

古崎物性理論研究室

Condensed Matter Theory Laboratory

主任研究員 古崎 昭 (博士 (理学))

FURUSAKI, Akira (Ph.D)



キーセンテンス：

1. 物質の多彩な性質を理解する
2. 新しい物質相を見つける

キーワード：

強相関電子系、磁性、超伝導、新奇秩序、量子相転移、メソスコピック系

研究目的

電子間斥力のため互いに避けあいながら固体中を運動している電子の集団（強相関電子系）が示す、多様な量子的秩序の理解を目指して、遷移金属酸化物や分子性導体を舞台とする磁性・超伝導・新奇秩序状態・量子相転移などについて研究する。物質の新しい相を発見することを目指す。また、固体中の不純物や欠陥などによるランダムな電子散乱によって生じる金属絶縁体転移の臨界現象を研究し、メソスコピック系における新しい量子効果を探究する。

1．2次元磁性体における新奇磁性状態の研究（Sindzingre, Shannon, 桃井）

強磁性的な最近接相互作用を持つ2次元正方格子磁性体とみなせる層状銅酸化物の示す磁化ギャップ状態、磁化プラトーおよびマグノン束縛状態の凝縮を理論的に理解するために、 $S=1/2$ の J_1 - J_2 - J_3 模型の強磁性 J_1 相互作用領域における磁性を有限系の厳密対角化法により調べた。スパイラル状態が基底状態に現れるスパイラル相が広い領域に出現し、ネマティック相および反強磁性相と隣接することがわかった。また、これらの相は高磁場領域においていずれもネマティック状態に転移することを確認した。

2．フラストレーションのある量子一次元スピン模型の磁場中での相図（引原、桃井、古崎）

反強磁性的な最近接相互作用と次近接相互作用を持つ、 $S=1/2$ の1次元ジグザグスピン鎖の磁場中の基底状態を研究した。スピン密度波が支配的な相、ベクトル・カイラリティが長距離の秩序を持つ相、波数が不整合でありながらカイラル秩序がない相が出現することを、密度行列繰り込み群法による数値計算によって確認し、相図を求めた。各相の相関関数を密度行列繰り込み群法によって数値計算し、その結果が有効理論（ボゾン化法）の解析と一致することを確認した。

3．磁場中フラストレートスピン鎖の磁気多極子液体相のNMRと動的構造因子（佐藤、桃井、古崎）

磁場中のジグザグスピン鎖の相図中の広いパラメータ領域において、磁気多極子(四極子、八極子、十六極子)相関が準長距離秩序を示す多極子液体相が存在する。ジグザグ鎖は LiCuVO_4 などの多数の擬1次元銅酸化物磁性体のミニマル模型であり、これらの物質で多極子液体状態が実現していることが期待される。しかし、多極子相関を直接観測するには4点以上のスピン相関関数を検出する必要があるが、これは困難である。多極子秩序の有効な観測方法を提案することは重要である。我々は、ジグザグ鎖の

多極子液体相の特徴が、核磁気緩和率 $1/T_1$ の温度磁場依存性とスピン動的構造因子の波数依存性に現れることを示した。すなわち、通常の朝永ラッティンジャー液体相とは対照的に、 $1/T_1$ が高磁場領域において低温で冪的に減衰すること、動的構造因子のギャップレス点の位置が通常の磁場中スピン鎖とは明確に異なること、を明らかにした。これらの特徴は、磁気多極子液体状態を実験研究で探索する上で大きな手掛かりになると考えられる。

4 . 一次元フラストレート磁性体におけるカイラリティの量子揺らぎ (古川、佐藤、小野田)

近年、 LiCuVO_4 、 LiCu_2O_2 などの擬一次元フラストレート磁性体において、スピンの螺旋秩序ないしベクトル・カイラル秩序に起因する強誘電性 (マルチフェロイクス) が観測されている。これらの系における、カイラル秩序形成と量子揺らぎの競合を理解するため、最近接強磁性、次近接反強磁性の交換相互作用をもつスピン $1/2$ フラストレート鎖を解析した。容易面異方性を含む模型に対して iTEBD アルゴリズムにより相図を決定し、カイラル秩序相が、異方性の弱い場合を含む、広いパラメータ領域に広がっていることを見出した。これは、最近接相互作用が反強磁性の場合とは対照的である。また、誘電応答に寄与すると考えられる、カイラリティの量子ダイナミクスを、ボソン化法に基づく有効理論により解析した。

5 . 3 本鎖スピン $1/2$ チューブの有効模型と基底状態相図 (佐藤)

3 本のスピン $1/2$ 反強磁性鎖が反強磁性交換相互作用 J_1 によって結合したチューブ状の磁性体 (スピンチューブ) は、最も単純なフラストレート磁性体の 1 つである。奇数本鎖スピン $1/2$ ラダーの低エネルギー物性がギャップレスの朝永ラッティンジャー液体で記述できることと対照的に、スピン $1/2$ チューブは鎖方向の並進対称性が破れたギャップのある基底状態をもつことが知られている。一方、3 つの鎖間結合のうち 1 つの強さを変化させると、変形ボンド J_2 が強い極限と弱い極限が各々「独立した 2 本鎖スピンラダーとスピン鎖」と「3 本鎖スピンラダー」に対応し、両極限ともギャップレス励起を持つ朝永ラッティンジャー液体で記述される。従って、ボンドの強さを変えたとき少なくとも 2 回の量子相転移が期待される。我々はチューブ格子上の電子系から出発してスピンチューブの有効理論を構築し、 (J_1, J_2) 空間全体における定性的な相図を得た。さらにこの有効理論に基づいて数値対角化法や DMRG を応用することで、より定量的な相図を完成させた。

6 . 三角格子上的 XY スピンに対するネマティック秩序とカイラル秩序 (小野田)

反強磁性的相互作用 (J_1) をする容易面に制限されたスピン模型に、双二次形式の相互作用 (J_2) を含める形で一般化された模型を数値的に研究した。特に、 J_2/J_1 が大きい場合に、ネマティック準長距離秩序とスピンのベクトル・カイラリティの長距離秩序が共存するが、準長距離磁気秩序は存在しない新しい熱力学相を見出した。この相への相転移に関連した多様な臨界的性質をモンテ-カルロ・シミュレーションで明らかにした。

7 . Bond-nematic 状態の slave boson 法による定式化 (進藤、桃井)

フラストレーションやリング交換相互作用を導入した正方格子や三角格子の Heisenberg 模型などでは、数値的対角化や multiple-magnon bound state の BEC 不安定性の議論などを通じて、bond-nematic 秩序状態が実現していると認識されてきている。このような秩序状態の物性を現実の物質の物性と比較検討していく上ではその平均場理論が有用となるはずである。そこで本研究では、この bond-nematic

状態の平均場理論を slave boson 法を使って定式化した。具体的には、Wen の symmetric quantum spin liquid の SU(2)平均場理論を triplet sector へ拡張し(従って spin の回転対称性は破れた状態を記述する平均場理論) spinon の p-p 及び p-h の triplet-pairing に付随する d-ベクトルが、bond-nematic 状態の director に対応することを見出した。さらに、この director が coplanar になった状態が実現している正方格子上的 J_1 - J_2 模型を例にとり、SU(2)平均場解析とそのゲージ場揺らぎに対する安定性を Projective symmetry group (PSG) を使って議論した。それを通じて、 ^3He の B-phase の BW 状態に対応するトポロジカルなスピン状態によって、bond-nematic 状態が記述されることを見出した。

8 . $\text{Pr}_2\text{Ir}_2\text{O}_7$ における自発的ホール効果と非自明な時間反転対称性の破れ (小野田)

フラストレートした遍歴磁性体 $\text{Pr}_2\text{Ir}_2\text{O}_7$ において、磁場も磁化もゼロにもかかわらず異常ホール効果が出現すること、さらに、その状態が主としてスピナイスと類似した希土類磁気モーメント “2-イン, 2-アウト” 状態から構成されていることが、最近の実験的研究によって明らかになってきた。そこで、希土類モーメントと結合した Ir $5d$ 電子の強束縛近似模型に基づき、内因性の異常ホール伝導度と磁化を理論的に計算した。特に、希土類モーメントが “2-イン, 2-アウト” のスピナイス則を局所的に満たしつつ、ゼロ磁化で異常ホール効果をもたらすカイラル・スピン状態が存在することを示した。この状態は、時間反転対称性を巨視的に破っており、伝導電子による微細な磁化のみが発生する。これらの結果は実験事実と符合する。

9 . Pr 型パイロクロア格子磁性体における量子スピナイスと時間反転対称性の破れ (小野田、田中)

最近の中性子散乱実験により、パイロクロア格子磁性体 $\text{Pr}_2\text{Sn}_2\text{O}_7$ で極低温でも長距離秩序を示さず、磁気モーメントが量子的に強く揺らいでいることが明らかになった。そこで、パイロクロア格子の磁性体に対して、スピナイスの量子力学的拡張版からなる新しいカイラル状態を理論的に提案した。まず、 $\text{Pr}_2\text{TM}_2\text{O}_7$ (TM : 遷移金属元素) の基本単位である Pr^{3+} イオンの正四面体クラスターに対して、相対論的有効スピン-軌道ハミルトニアンを導出した。強い LS 結合と結晶場効果を受ける f 電子に固有な相対論的かつ異方的な特徴のために、最近接の有効交換相互作用を反強磁性的から強磁性的に修正することがあることが明らかになった。その場合、 Pr^{3+} イオンの磁気モーメントに対する 2-イン, 2-アウトのスピナイス則が超交換相互作用を主因としてもたらされる。これは磁気双極子相互作用に起因したスピナイス系である $\text{Dy}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ とは対照的である。実際には、6重縮退した 2-イン, 2-アウトの状態は量子力学的にもつれ、その縮退も3回対称結晶場のために小さくエネルギー分裂する。その結果、正四面体あたり2重縮退した基底状態をもたらす。この残された自由度は、熱力学極限において時間反転対称性/格子変形を伴った長距離多極子秩序をもたらす得る。

10 . 一次元量子臨界系における相互情報量のスケールリング (古川)

情報理論の概念を応用し、一次元臨界系を特徴づけるための新しい方法論の開発に取り組んだ。我々は、二つの領域間の相関量を測る指標として相互情報量に着目した。一次元量子系に広く現れる、朝永・Luttinger 流体において、この量が、系の詳細によらず、ボゾン半径(もしくは Luttinger パラメータ)に直接、依存していることを、スピン鎖模型の数値的解析から見出した。この結果は、ボゾン半径を波動関数の構造から決める、普遍的な方法を提示している。

11 . 乱れた強磁性体の異常ホール効果におけるスケールリング (小野田)

強磁性体における電気伝導度と異常ホール伝導度間のスケーリング関係式の問題を、特に乱れた領域について再検討した。異常ホール効果に対する内因機構と外因機構の両方を寄与を持つ簡単なモデルを採用した。臨界領域を除く乱れた伝導性の悪い領域に対して適切な近似となるコヒーレント・ポテンシャル近似を用い、以前に乱れた金属領域に対して得ていた関係と同じ振る舞い $\sigma_{xy} \propto \sigma_{xx}^n$ ($n \sim 1.6$) を得た。これは、ほとんど局在しかかった鉄（体心立方格子）やマグネタイトにおける最近の実験結果を説明する。

1 2 . 3次元トポロジカル絶縁体の分類（古崎）

トポロジカル絶縁体は、系の端に安定なギャップレス励起をもったバンド絶縁体である。その最もよく知られた例は整数量子ホール系であり、ホール伝導度のプラトー値で決まる整数個のエッジ状態をもつ。また、 Z_2 トポロジカル絶縁体は奇数個のクラマース縮退したエッジ状態をもっている。我々は3次元空間で可能なトポロジカル絶縁体の種類を完全に分類する理論をつくった。励起ギャップの開いている超伝導（超流動）体も含めた、自由フェルミオンの一般のハミルトニアンについて考察した。時間反転と電荷共役の2つの離散的対称性の有無のみをハミルトニアンに課したとき、ハミルトニアンの集合は10種類の（ランダム行列）対称類に分類されることはよく知られている。空間次元が1, 2, 3のそれぞれの場合に、これら10種の対称類のうち、2種が Z_2 トポロジカル絶縁体（超伝導体・超流動体）となる可能性があり、3種が整数個のギャップレス端状態をもつトポロジカル絶縁体（超伝導体・超流動体）なりうることを明らかにした。

1 3 . Z_2 量子スピンホール絶縁体における非磁性不純物による乱れの効果（進藤）

3次元の Z_2 量子スピンホール絶縁体は、その表面にいわゆる helical 端状態を持った新しいクラスの絶縁体として近年一躍脚光を浴びている。この新しいトポロジカル絶縁体と、端状態を持たない通常のバンド絶縁体との間の量子相転移点は、量子ホール系に於ける plateau-plateau 間転移とは異なる、新しいクラスのトポロジカル量子臨界点(TQCP)となっていると期待される。本研究では、このTQCPの有効連続体モデルに対して、(a)セルフコンシステント・ボルン近似、(b)久保公式に基づく弱局在補正の計算、(c)モード間結合理論に基づく拡散係数の平均場理論計算を行い、上述のTQCPでのバルクの臨界性を守っているミクロスコピックな仕組みを明らかにした。まず、parity 密度(時間反転に対して偶で空間反転に対して奇なある種の内部自由度)がTQCP直上でのみ保存量となることに着目した。実際、diffuson を計算してみると、このU(1)対称性の回復の為、通常の電荷密度の拡散モード以外に、parity 密度の拡散モード（以下 parity mode）がTQCP近傍で赤外発散的な振る舞いを示すことが分かった。さらに、この parity mode の赤外発散に対応して、Cooperon（伝導度に最強後方散乱を与えるプロセス）にも付加的な反局在補正が発生することが導かれる。我々は、この parity mode に付随する反局在補正項がTQCP近傍でのみ増大することに注目し、「parity密度が創発的に保存量となることで、TQCPでのバルクの臨界性が保証されている」という新しい微視的描像を提案した。

1 4 . 整数量子ホール系のプラトー間転移の境界マルチフラクタル解析（小布施、古崎）

整数量子ホール系のプラトー転移の臨界現象を理論的に記述することは、未解決の難問である。約10年前にある種の超対称 Wess-Zumino 模型がプラトー転移の有効モデルとして提案されたが、その理論によれば臨界波動関数の特異スペクトル $f(q)$ は放物線になり、マルチフラクタル指数 $\nu(q)$ にあられる異常次元 q と $q(1-q)$ の比 $\nu(q)$ は定数となることが期待される。我々は Chalker-Coddington 模型を用

いて臨界波動関数のバルクと端での (q) を数値的に決定した。 (q) は明らかに q 依存性を持ち、上述の Wess-Zumino 模型はプラトー転移を記述できないことがわかった。

15 . T字型ダブル量子ドット系におけるアンドレーエフ反射と近藤効果 (田中)

二つのドットのうち片方のみ超伝導体・常伝導体に繋がれたT字型ダブルドット系を考え、アンドレーエフ反射による輸送特性について調べた。数値繰り込み群による解析結果より、超伝導体・常伝導体と繋がっていない横結合したドットのクーロン相互作用が大きくなると、電子の干渉効果が抑制されて近藤領域でのコンダクタンスは増大することを示した。この振る舞いは、二つの常伝導体を繋いだT字型ダブルドット系においてコンダクタンスが減少するのは全く対照的である。また、超伝導体と接合したドットへの近接効果によって、横結合したドット内の局在電子を遮蔽する伝導電子は常伝導体の方に押し出され、その結果として長距離的な近藤効果が生じていることを明らかにした。

16 . 一次元 $S=1/2$ ボーズ液体の相関関数 (Matveev、古崎)

ハードコア斥力をもつスピン $1/2$ のボーズ液体の基底状態は、強磁性的にスピンの完全偏極した状態である。昨年度開発した斥力相互作用の強い系のボゾン化法を応用することにより、スピン偏極したボーズ液体のスピン波励起のスペクトル関数と一粒子励起のスペクトル関数を求めた。ハードコア・ボゾンと等価な (自由) フェルミオン気体のフェルミ波数の偶数倍の運動量付近の特異性を明らかにした。

Key Sentence:

1. Understand various properties of materials
2. Find a new state of matter

Key Words:

Strongly-correlated electron systems, Magnetism, Superconductivity, Novel orders, Quantum phase transitions, Mesoscopic systems

Purpose of Research :

Condensed matter theory laboratory is aiming at theoretically understanding, at the level of quantum and statistical physics, various quantum orders (such as magnetism, superconductivity and other novel exotic orders), exhibited by strongly-correlated electron systems which are realized, e.g., in transition metal oxides and organic conductors. We also study mesoscopic systems and, in particular, metal-insulator transitions in disordered solids.

1. Novel phases in two-dimensional frustrated ferromagnets (Sindzingre, Shannon, Momoi)

The phase diagram of the $S=1/2$ J_1 - J_2 - J_3 Heisenberg model on the square lattice with ferromagnetic 1st neighbor and antiferromagnetic 2nd and 3rd neighbor interactions is studied by means of exact diagonalization and spin wave calculations. Quantum fluctuations are shown to induce phases that are not present classically and a shift in the wave vector of the spiral phases. Results are compared with recent experimental data.

2. Phase diagram of frustrated antiferromagnetic spin chain in magnetic field (Hikihara, Momoi, Furusaki)

We studied the ground-state phase diagram of the spin-1/2 one-dimensional Heisenberg model with antiferromagnetic nearest-neighbor coupling J_1 and next-nearest-neighbor interaction J_2 in a magnetic field. We found that there exist a phase in which a vector chiral order parameter has long-range order, non-chiral phase with incommensurate pitch angle, and spin density wave phase. We calculated various correlation functions in these phases using the density matrix renormalization group method. The results agree with field-theory predictions.

3. Signatures of magnetic multipolar orders in frustrated spin chains in magnetic fields seen in NMR and dynamical structure factors (Sato, Momoi, Furusaki)

We have recently shown that magnetic multipolar correlations are quasi long-range ordered in the wide region of the magnetic-field-induced Tomonaga-Luttinger liquid (TLL) phases in the frustrated spin-1/2 zigzag chains. The zigzag chain is a minimal model for several quasi-one-dimensional cuprates, such as LiCuVO_4 . The multipolar liquid phases are thus expected to be realized in these materials. To directly detect multipolar orders, one would have to observe four- or more-point spin correlation functions, which however is a difficult task. Instead, we have found that the temperature and magnetic-field dependence of NMR relaxation rate $1/T_1$ and the wavenumber k dependence of dynamical structure factors $S(k, \omega)$ contain features characteristic of multipolar liquid phases in the zigzag spin chains. Namely, we have shown that, in contrast to conventional TLLs, $1/T_1$ decreases with lowering temperature in the high-magnetic-field region, and that the gapless points of $S(k, \omega)$ appear at clearly distinct positions from those of antiferromagnetic spin chains. These features would help us distinguish multipolar liquid phases in quasi-one-dimensional magnets.

4. Quantum fluctuations of chirality in one-dimensional frustrated magnets (Furukawa, Sato, Onoda)

To understand the interplay of chiral spin ordering and quantum fluctuations in one-dimensional multiferroic cuprates such as LiCuVO_4 and LiCu_2O_2 , we analyzed the spin-1/2 frustrated chain with ferromagnetic nearest-neighbor and antiferromagnetic second-neighbor exchange interactions. We determined the ground-state phase diagram in the presence of easy-plane anisotropy using the iTEBD algorithm, and found that the chiral ordered phase extends to the vicinity of the $\text{SU}(2)$ -symmetric case. We also analyzed the quantum dynamics of the chirality, which contributes to the dielectric response through the magnetoelectric coupling.

5. Ground-state phase diagram of asymmetric three-leg spin tubes (Sato)

Three-leg antiferromagnetic spin tubes with interchain coupling J_1 , i.e., coupled three spin chains with periodic boundary condition for the interchain direction, are one of the simplest magnets with geometric frustration. It is known that the spin tubes have a gapped ground state with broken

translational symmetry, in contrast to three-leg spin ladders with gapless excitations. If we change the strength of one of the three interchain bonds to J_2 , the system interpolates between a three-leg ladder and a decoupled system of a spin chain and a two-leg ladder, and both limits have gapless excitations. Therefore, at least two quantum phase transitions are expected to occur as J_2 is varied. To describe them, we have proposed a simple effective theory for the spin tube, which is based on an electron system on the tube lattice. We then constructed a qualitative ground-state phase diagram in the whole (J_1, J_2) space. Furthermore, numerical analyses of finite-cluster diagonalization and DMRG have quantitatively improved the phase diagram.

6. Nematic and chiral orders for planar spins on a triangular lattice (Onoda)

A variant of the antiferromagnetic XY model has been proposed by including the biquadratic (J_2) as well as the quadratic (J_1) interaction on the triangular lattice. The phase diagram for large J_2/J_1 has a phase with coexisting quasi-long-range nematic order and long-ranged vector spin chiral order in the absence of magnetic quasi-long-range order. A variety of critical properties are derived by means of Monte-Carlo simulation.

7. $SU(2)$ formulation of bond-nematic ordered states (Shindou, Momoi)

It is recently recognized that, when either frustration or ring exchange interaction is introduced into the ferromagnetic Heisenberg model, a new type of spin ordering state with the so-called “bond-nematic” order can be stabilized. We have constructed $SU(2)$ mean-field formulations of this exotic state. To be specific, we extended the so-called $SU(2)$ formulation of symmetric quantum spin liquids to the p-wave sector, to describe those bond ordered state breaking the spin-rotational symmetry. In this formulation the d-vector describing the particle-particle (also hole) triplet pairing of the “spinon” actually characterizes the director of the bond-nematic orders. Using this correspondence, we worked out the ferromagnetic J_1 - J_2 model on the square lattice, to (i) enumerate the $SU(2)$ mean-field solutions and (ii) argue their stability against the gauge fluctuations, i.e., clarify the number of the massless gauge bosons within the PSG arguments. The bond-nematic state is therefore described by a sort of the spinon-analogue of the BW state known to be realized in the ^3He B-phase.

8. Spontaneous Hall effect and nontrivial time-reversal symmetry breaking in $\text{Pr}_2\text{Ir}_2\text{O}_7$ (Onoda)

A recent experimental study has clarified that the anomalous Hall effect appears in the apparent absence of both magnetic field and magnetization in a itinerant frustrated magnet $\text{Pr}_2\text{Ir}_2\text{O}_7$ and that this state dominantly consists of local “2-in, 2-out” configurations of $\langle 111 \rangle$ rare-earth magnetic moments in an analogy to the spin ice. Motivated by this experiment, theoretical calculations of the intrinsic anomalous Hall effect and the magnetization have been performed by taking the tight-binding bands for the Ir 5d conduction electrons coupled to the rare-earth moments. In particular, it has been shown that there exist the chiral spin states where the rare-earth moments locally satisfy the “2-in, 2-out” spin-ice rule and give rise to the anomalous Hall effect under zero net rare-earth moment. This state, macroscopically breaking the time-reversal symmetry, is

accompanied by a negligibly small magnetization due to conduction electrons. The results explain the main experimental findings.

9. Quantum spin ice and time-reversal symmetry breaking in Pr pyrochlore-lattice magnets (Onoda, Tanaka)

Recent neutron scattering experiments have unveiled that the pyrochlore-lattice magnet $\text{Pr}_2\text{Sn}_2\text{O}_7$ does not show a magnetic long-range order even at lowest temperatures and that the magnetic moments strongly fluctuate quantum-mechanically. Then, we have theoretically proposed new scalar-chiral states comprising a quantum-mechanical analogue of the spin ice for pyrochlore magnets. We first derived an effective relativistic spin-orbital Hamiltonian for Pr_4O tetrahedron that is a primitive unit of the pyrochlore magnets $\text{Pr}_2\text{TM}_2\text{O}_7$ with TM being the transition-metal element. It has been found that the relativistic and anisotropic nature inherent to the f -electrons with strong LS coupling and crystal-electric field can significantly modify the effective nearest-neighbor exchange interaction from antiferromagnetic to ferromagnetic. Then, the “two-in two-out” spin-ice rule of Pr magnetic moments is predominantly caused by the super-exchange interaction but not a small magnetic dipolar interaction, in contrast with the conventional dipolar spin-ice like $\text{Dy}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$. In fact, six “two-in two-out” configurations are quantum-mechanically entangled and the degeneracy is lifted by a further small energy splitting originated from the trigonal crystal field, leaving doubly degenerate ground states per tetrahedron. In the thermodynamic limit, this degree of freedom can produce a long-range multipolar order, which is accompanied by a time-reversal symmetry breaking and/or a lattice distortion.

10. Scaling of mutual information in one-dimensional quantum critical systems (Furukawa)

We applied the informational perspective to the characterization of one-dimensional quantum critical systems. Specifically, we investigated the scaling of the mutual information in Tomonaga-Luttinger liquids. Through a numerical analysis of a spin-chain model, we found that the mutual information depends directly on the boson compactification radius (or Luttinger parameter), irrespective of the microscopic details. This result provides a universal way to determine the boson radius from the ground-state wave function of any one-dimensional quantum system at criticality.

11. Scaling behavior of the anomalous Hall effect in disordered ferromagnets (Onoda)

Scaling relation between the longitudinal conductivity and the anomalous Hall conductivity in ferromagnets is revisited with a particular emphasis on the disordered regime. We take a minimal model which contains both the band-intrinsic and extrinsic contributions to the anomalous Hall effect. Employing the coherent potential approximation appropriate for describing the disordered regime away from the critical region, we have obtained the scaling relation $\sigma_{xy} \sim \sigma_{xx}^n$ with $n \sim 1.6$, which was previously obtained for dirty metals. This explains recent experimental observations in the nearly localized regime of bcc Fe and magnetite.

12. Classification of three-dimensional topological insulators (Furusaki)

A topological insulator is a band insulator with gapless excitations which are stable against perturbations. Its best-known example is an integer quantum Hall insulator with an integer number, determined by the Hall conductivity, of edge states. By contrast, a Z_2 topological insulator has an odd number of Kramers pair of edge states. We have developed a theory that gives exhaustive classification of topological insulators in three spatial dimensions. The theory accounts for any free fermion Hamiltonian, including fully gapped superconductors. It is well known that such Hamiltonians are classified into ten (random matrix) symmetry classes, according to the presence/absence of time-reversal and charge-conjugation (i.e., particle-hole) symmetry. We have shown that, for each spatial dimension $d=1, 2$ and 3 , there are two classes of Z_2 topological insulators (superconductors) and three classes of topological insulators (superconductors) with an integer number of edge states, among the ten symmetry classes.

13. Disorder effects onto the Z_2 quantum spin Hall systems (Shindou)

Three-dimensional Z_2 quantum spin Hall insulators (Z_2 QSHI) are a new state of matter, having a gapless helical surface mode. Such a topological insulator is separated from an ordinary insulator by a new type of the topological quantum critical point (TQCP) which is distinct from those TQCPs located between two neighboring quantum Hall plateaus. To understand stability of bulk criticality at the new TQCP, we took an effective continuum model and performed (a) self-consistent Born calculations, (b) calculation of weak-localization corrections from the Kubo-formula (c) mean-field calculations of the diffusion constant within the mode-mode coupling theory. Specifically, we first considered (a sort of) parity degree of freedom, which happens to become a conserved quantity only at the TQCP. Because of this additional $U(1)$ symmetry recovery at the TQCP, not only the usual charge diffusion mode but also the parity diffusion mode exhibits the quasi-divergent behavior at infrared. In parallel to this anomaly in the parity diffusion channel, the Cooperon mode acquires an additional anti-weak localization (AWL) contribution, which becomes effective only at the TQCP ("quantum conductivity correction doubling"). From this observation we argued that the emergence of the $U(1)$ symmetry associated with the parity degree of freedom guarantees stable TQCPs in Z_2 QSHI systems.

14. Boundary multifractality at the integer quantum Hall plateau transition (Obuse, Furusaki)

It is an unsolved problem to theoretically describe critical properties at the integer quantum Hall plateau transition. About 10 years ago some Wess-Zumino models were proposed to be the effective theory for the transition, according to which one expects that singular spectrum $f(\epsilon)$ be parabolic and the ratio $\nu(q) = \nu/[q(1-q)]$ is independent of q , where ν is anomalous dimension. We numerically calculated the bulk and boundary values of $\nu(q)$ of critical wave functions of the Chalker-Coddington network model. We found that $\nu(q)$ is clearly dependent on q , thereby refuting the above-mentioned proposals.

15. Andreev reflection and the Kondo effect in a T-shaped double quantum dot (Tanaka)

We studied Andreev transport through side-coupled double quantum dots connected to normal

and superconducting leads with a T-shape configuration. Using numerical renormalization group, we showed that the destructive interference effect via the side dot is suppressed with increasing the Coulomb interaction, and the conductance in the Kondo regime is enhanced. This behavior stands in stark contrast to the normal conductance, which is suppressed in the Kondo regime. We also found that the superconducting proximity effect penetrating into the interfacial dot pushes the Kondo clouds, which screen the local moment in the side dot, towards the normal lead to make the singlet bond longer.

16. Correlation functions of one-dimensional spin-1/2 Bose liquids (Matveev, Furusaki)

The ground state of a spin-1/2 Bose liquid with hard-core repulsion is a ferromagnetic state with full spin polarization. Using the bosonization technique, which we developed last year, for strongly interacting particles, we have calculated spectral functions of spin-wave excitations and one-particle excitations of the spin-polarized Bose liquid. These spectral functions have singularities at momentum near even multiples of the Fermi momentum of the free Fermi gas which is equivalent to the hard-core Bose gas.

Head

古崎 昭 Akira Furusaki

Members

桃井 勉 Tsutomu Momoi

小野田 繁樹 Shigeki Onoda

佐藤 正寛 Masahiro Sato

Special Postdoctoral Researchers

古川 俊輔 Shunsuke Furukawa

進藤 龍一 Ryuichi Shindou

田中 洋一 Yoichi Tanaka

Visiting Members

Alexander Abanov

有田 亮太郎 Ryotaro Arita

引原 俊哉 Toshiya Hikihara

伊豆山 健夫 Takeo Izuyama

是常 隆 Takashi Koretsune

久保 健 Ken Kubo

前川 禎通 Sadamichi Maekawa

Konstantin Matveev

宮下 精二 Seiji Miyashita

望月 維人 Masahito Mochizuki

求 幸年 Yukitoshi Motome

Christopher Mudry

小布施 秀明 Hideaki Obuse

大橋 琢磨 Takuma Ohashi

Zlata Pchelkina

Karlo Penc

Nicholas Sean Patrick Shannon

Philippe Sindzingre

常次 宏一 Hirokazu Tsunetsugu

植田 浩明 Hiroaki Ueda

内海 裕洋 YasuhiroUtsumi

Trainees

Guang Qiang Zhong

Assistant and Part-timer

網代 雅代 Masayo Ajiro