

平成 22 年 5 月 26 日現在

研究種目：若手研究(B)  
 研究期間：2007～2009  
 課題番号：19740225  
 研究課題名（和文）  
 有限システムサイズでのコスタリッツ・サウレス転移  
 研究課題名（英文）  
 Kosterlitz-Thouless transition in a finite size system  
 研究代表者  
 池上 弘樹 (Ikegami Hiroki)  
 独立行政法人理化学研究所・河野低温物理研究室・専任研究員  
 研究者番号：70313161

## 研究成果の概要（和文）：

準1次元チャンネル（幅 5, 8, 15  $\mu\text{m}$ ）中の液体ヘリウム表面上のウィグナー結晶転移の研究を行った。電子の伝導度は、結晶状態では、リップロンの Bragg-Cherenkov (BC) 散乱により非線形になる。チャンネル間の電子数と BC 散乱が消失する温度の関係を明らかにした。BC 散乱が消失する温度は、有限系でのコスタリッツ・サウレス (KT) 転移において free dislocation が系に進入する温度と一致することが解った。

## 研究成果の概要（英文）：

The Wigner crystal transition is investigated for electrons confined in the quasi one dimensional channels (5, 8, and 15  $\mu\text{m}$ ). In the crystal phase, the transport of the electrons is nonlinear because of the Bragg-Cherenkov (BC) of ripplons. We find that the temperature at which the BC scattering disappears increases with decreasing the number of electrons across the channel. This temperature agrees with the temperature at which free dislocations emerge in the channel due to the Kosterlitz-Thouless mechanism.

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	2,600,000	0	2,600,000
2008年度	500,000	150,000	650,000
2009年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,600,000	300,000	3,900,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・物性Ⅱ

キーワード：2次元電子、ウィグナー結晶、コスタリッツ・サウレス転、準1次元系、液体ヘリウム、表面波

## 1. 研究開始当初の背景

2次元系におけるコスタリッツ・サウレス (KT) 転移は、秩序変数の位相のゆらぎに起因する特異な転移である。この KT 転移は、液体ヘリウム上の2次元電子系、超流動ヘリウム4薄膜、液晶系など多くの系で普遍的に

見られるが、顕著な例として液体ヘリウム表面上の2次元電子系のウィグナー結晶転移がある。液体ヘリウムの表面は不純物が全く存在しない清浄表面であるため、ウィグナー結晶のピンギングなどは無く理想的な KT 転移研究の舞台である。この2次元電子を有限サイズに閉じ込めたときに、KT 転

移にどのような影響があるかは興味深い問題である。

本研究では、準1次元系での有限サイズの影響を研究する。2次元系のウィグナー結晶転移はKosterlitz-Thouless-Halperin-Nelson-Young (KTHNY)メカニズムとして理解されている。このメカニズムによると、転移温度より高温では、結晶中にはfree dislocationができ、電子の位置を長距離にわたって乱すため結晶は融解する。転移温度より高温では、相関長は温度の低下とともに長くなり、転移温度で発散する。準1次元系では、相関長がチャンネル幅と同程度になったときに有限サイズの影響が現れると期待される。

## 2. 研究の目的

本研究では、幅1~20  $\mu\text{m}$ 程度の準1次元チャンネルに閉じ込められた液体ヘリウム上の2次元電子を用いて、有限サイズが(KTHN)転移へおよぼす影響を明らかにすることを目的とする。さらに、幅1 $\mu\text{m}$ 程度チャンネルでは、幅が格子間隔と同程度になると(KTHN)転移の描像は破綻する。それと同時に、1次元的特徴が現れると期待される。どのように破綻していくかは非常に興味深い問題であり、破綻していく様子を実験的に明らかにすることも本研究の主要な目的のひとつである。さらに、他の系、特に超流動ヘリウム4薄膜系との比較から、有限サイズ(KTHN)転移や(KTHN)転移の破綻に対する普遍的な物理描像を見出すということが、本研究の最終目標である。

## 3. 研究の方法

幅1~20  $\mu\text{m}$ 程度の1次元チャンネル伝導度測定用の電極を微細加工技術により作製する。10 $\mu\text{m}$ 程度のチャンネルはこれまでの経験から作製可能であるが、1 $\mu\text{m}$ 程度のチャンネルを作製するには、微細加工プロセスにおける最適な条件を探す必要がある。作製した電極を用いて、チャンネル幅を変えてウィグナー結晶転移温度のチャンネル幅依存性を調べる。ヘリウム表面には、ウィグナー結晶転移に伴って、dimple lattice (図1)と呼ばれる凸凹ができる。そのため、低周波伝導度には表面波(リップロン)のBragg-Cherenkov散乱と呼ばれる共鳴散乱がおき、伝導度は急激に減少する。そのため、伝導度測定は転移温度決定のための強力な手段となる。伝導度の測定を電子密度、チャンネル幅などを系統的に変えて測定することにより、転移温度と系のサイズの間関係を明らかにする。

幅1 $\mu\text{m}$ 程度のチャンネルでKT転移の破綻が期待される。その場合には、伝導度の非線形性を交流入力電圧や周波数を変えて測定を

行うことにより非線形伝導を詳細に調べ、転移メカニズムや結晶構造に関して情報を得る。

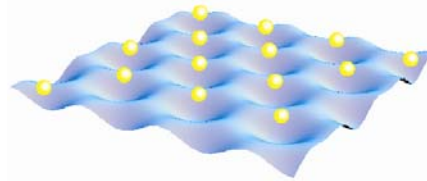


図1 ウィグナー結晶と dimple lattice

## 4. 研究成果

### (1) 1次元チャンネル電極の開発

本研究では、ウィグナー結晶になったときに現れる伝導度における非線形性を精度良く測定する事が重要である。そのためまず、1次元チャンネルのジオメトリーで非線形性を精度良く測定できる電極をデザインした。デザインされた電極は、1次元チャンネルを900 $\mu\text{m}$ と長いものとし、その両端は電子のリザーブがつながっている構造のものである。長いチャンネルのジオメトリーを用いることにより、1次元チャンネル中では電子が感じる電場がほぼ一様であることが計算機シミュレーションの結果から明らかとなった。一様な電場であることは非線形性を精度良く測定するのに不可欠である。なぜなら、非線形伝導では、電流は電圧に対し単純な関数でないため、電場が一様でない場合には観測される非線形性が鈍ってしまうためである。このことは、通常ヘリウム上の電子系での伝導度の測定に用いられるコルビノ電極が大きな電場分布を持つことと比較して非常に大きな利点となる。

開発した電極のSEM写真を図2に示す。電極は二層構造になっており、下側電極は伝導度測定用、上側電極は電子を面内に閉じ込めるためのものである。上側電極と下側電極はアルミニウムで出来ている。上側電極と下側電極の間には1 $\mu\text{m}$ 程度のSiO<sub>2</sub>の層があり、上側、下側電極は絶縁されている。電極には溝が掘ってあり、そこに毛管凝縮した液体ヘリウム上に電子を蓄える。SiO<sub>2</sub>膜はプラズマCVDで作製した。SiO<sub>2</sub>の溝構造の作成にはReactive Ion etching (RIE)を用いた。RIEではSiO<sub>2</sub>のみ選択的にエッチングされ、アルミニウムはエッチングされない。そのため、上側電極(アルミニウム)が無い所だけSiO<sub>2</sub>が除去され溝構造が出来る。

図2の中心を横に走るチャンネルが測定したい1次元チャンネルであり、両側にあるくし型をしたチャンネル列が電子のリザーブである。リザーブの下側の電極には、sourceとdrainがあり、リザーブ中の電子と静電容量的に結合し、伝導度の測定が可能となっている。1次元チャンネルの中心部分にはgateがあり、電流をコントロールすることが可能である。gateをかけ電流をカットオフすることにより電子密度を決定することが出来る。

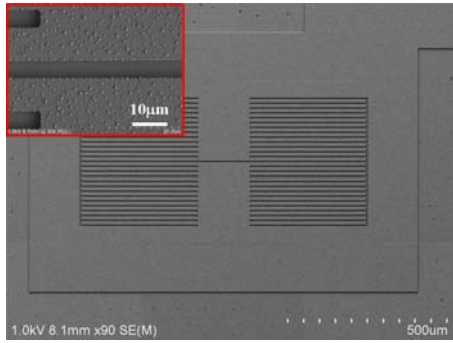


図2 電極のSEM写真  
(チャンネル幅 5 μm)

### (2) 非線形伝導

チャンネル中の電子の抵抗の温度依存性を図3に示す。図中には、幅 5, 8, 15 μm の3つのチャンネルに対して同じ電子密度で得られたものを示してある。温度を下げていくと電気抵抗は減少する。これは、電子の移動度はヘリウムガスまたはリブロンとの散乱でリミットされるためであり、これらの散乱体の密度は温度の低下とともに減少するためである。これらヘリウムガスおよびリブロンとの散乱による電子の抵抗の理論曲線の一致は非常に良い。

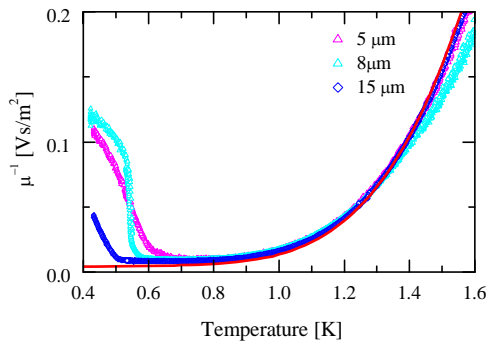


図3 移動度の逆数の温度依存。

幅 5, 8, 15 μm でのものを比較。  
(電子密度 :  $5.7 \times 10^{12} \text{ m}^{-2}$ )  
実線は移動度の理論曲線

低温では抵抗は上昇し始める。上昇が起こるのは、電子系が結晶構造を作り局在することにより、液体表面に dimple lattice と呼ばれる周期的な凹凸ができ、その結果、電子と液体表面の結合が強くなるためである。結合が強くなる結果、ウィグナー結晶が共鳴的

に表面波に散乱されるという Bragg-Cherenkov (BC) 散乱が起こる。この BC 散乱が起きると、ドライブ電圧を大きくしていても電子の速度がリブロン位相速度で制限されるため、伝導度が非線形になる。本研究の結果は、BC 散乱より予想されるリブロン位相速度において電子の速度のドライブ電圧に明確なプラトーが観測された。このことからマイクロメートル程度の幅のチャンネル中でも、BC 散乱が起きていることが明らかとなった。この BC 散乱が起きるためには電子系が周期的な構造を持つことが本質的であるため、BC 散乱の有無を調べるための良い手段となる。

### (3) 準1次元系でのウィグナー結晶転移

図3から電子の抵抗が始まる温度は、チャンネルが細いほど高温になっていることがわかる。このことは、ウィグナー結晶が細いチャンネル中ではより高温から出来ているを示唆している。このことをより詳細に調べるために、温度を細かく変えて BC 散乱が消失する温度  $T_0$  を決定した。さらに、電子密度を系統的に変えて伝導度の測定することによりチャンネル間の電子数と  $T_0$  の関係を実験的に明らかにした。その結果を図4に示す。幅 15 μm での  $T_0$  は2次元系のウィグナー結晶の転移温度の密度依存と一致する。しかし幅 5, 8 μm のチャンネルでは2次元系のものとはずれてくる。そのずれはチャンネルが細いほど、電子密度が小さいほど大きい。すなわち、チャンネル間の電子数が小さいほど、ずれは大きくなる。

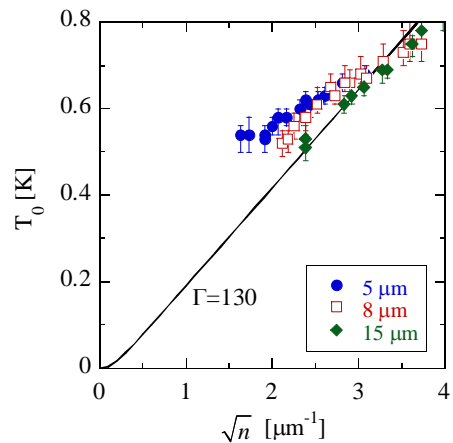


図4  $T_0$  の電子密度依存性。

横軸は電子密度の平方根。

実線は2次元系での転移温度。

この結果は、1次元-2次元クロスオーバーとして理解できる。2次元系では、ウィグナー結晶転移は Kosterlitz-Thouless-Halperin-Nelson-Young (KTHNY) メカニズムとして理解されている。このメカニズムによると、転移温度より高温では、

結晶中には free dislocation ができ電子の位置を長距離にわたって乱してしまうため、結晶は融解する。それに対して低温では、dislocation が2個または3個結合することにより電子の位置を局所的にしか乱さず、長距離にわたって結晶が保たれる。転移温度より高温で現れる free dislocation の平均間隔は相関長を表すが、相関長は温度の低下とともに長くなり、転移温度で発散する。本研究の準1次元系では、相関長が温度との低下と共に伸びチャンネル幅と同程度になったときに相関長はチャンネルに沿った方向にのび始める。そのため、相関長がチャンネル幅と同程度になると2次元-1次元クロスオーバーを起し、低温では1次元的になる。このことを実験データと比較すると、2次元-1次元クロスオーバーを起す温度付近でBC散乱が消失していることが明らかとなった。2次元-1次元クロスオーバーより高温では free dislocation が出現するため電子の位置が短時間で変わり、BC散乱が消失すると考えられる。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計4件)

①高橋大輔、池上弘樹、河野公俊、Transport Properties of Two-dimensional Snowballs Below the Surface of 4He-II Under Rotation、Journal of Low Temperature Physics、158巻、p 391-396、2010年、査読有

②斎藤政通、池上弘樹、河野公俊、Electrostatic Manipulation of Level of Bulk Liquid for Studies of Saturated Superfluid <sup>3</sup>He Films、Journal of Low Temperature Physics、158巻、p 716-721、2010年、査読有

③池上弘樹、秋元彦太、河野公俊、Nonlinear Transport of the Wigner Solid on Superfluid <sup>4</sup>He in a Channel Geometry、Physical Review Letters、102巻、p046807-1-4、2009年、査読有

④池上弘樹、秋元彦太、河野公俊、Wigner Solid Transition of Electrons Confined in Microchannel、Journal of Low Temperature Physics、150巻、p224-229、2008年、査読有

[学会発表] (計11件)

①池上弘樹、擬1次元チャンネルにおけるヘリウム液面電子の伝導度測定、日本物理学会2009年秋季大会、2009年9月27日、熊本

②池上弘樹、Melting of a Wigner Solid in Quasi-One-Dimensional Channels、International Symposium on Quantum Fluids and Solids (QFS2009)、2009年8月6日、

Evanston

③池上弘樹、Crystallization of Electrons on Liquid Helium in Channel Geometry、The 18th International Conference on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems (EP2DS-18)、2009年7月23日、神戸

④David Rees、Transport properties of a quasi-one-dimensional electron system on the surface of liquid helium、The 18th International Conference on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems (EP2DS-18)、2009年7月21日、神戸

⑤池上弘樹、1次元チャンネルにおけるWigner結晶転移、日本物理学会64回年次大会、2009年3月、東京

⑥池上弘樹、Electrons Confined in Micrometer-wide Helium Channel、International Symposium on Physics of Quantum Technology、2008年11月、奈良

⑦池上弘樹、1次元チャンネル中のヘリウム液面電子の非線形伝導、日本物理学会2008年秋季大会、2008年9月、盛岡

⑧池上弘樹、Wigner Solid Transition of Electrons in Micrometer-wide Channels、International Symposium on Ultra Low Temperature Physics、2008年8月、London

⑨池上弘樹、Wigner Solid Transition of Electrons in Micrometer-wide Channels、25th International Conference of Low Temperature Physics、2008年8月、Amsterdam

⑩池上弘樹、1次元チャンネルに閉じ込められたヘリウム液面電子III、日本物理学会第63回年次大会、2008年3月26日、近畿大学

⑪池上弘樹、Wigner Solid Transition of Electrons in a Micrometer-wide Channel、International Symposium on Physics of New Quantum Phases in Superclean Materials (PSM2007)、2007年11月、岐阜市

#### 6. 研究組織

(1) 研究代表者

池上 弘樹 (Ikegami Hiroki)

独立行政法人理化学研究所・河野低温物理研究室・専任研究員

研究者番号：70313161