

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 5 日現在

機関番号：24402

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2014

課題番号：23340108

研究課題名(和文)超流動ヘリウム4量子渦の慣性質量と波動の研究

研究課題名(英文)Study of waves and inertia mass of quantized vortices in superfluid helium-4

研究代表者

矢野 英雄 (Yano, Hideo)

大阪市立大学・大学院理学研究科・准教授

研究者番号：70231652

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 15,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、超流動ヘリウムの量子渦について、そのユニークな性質を利用することで、量子渦の運動を実験的に研究し、以下の成果を得た。

(1)物体の振動によって超流動ヘリウムに生成される量子渦輪は、ランダムに飛行する。(2)渦輪の飛行速度から見積もられる渦輪の直径は、 $0.2\sim 1\mu\text{m}$ と分布する。この結果は、大きな渦輪から小さな渦輪へのカスケードが起こることを示している。(3)渦輪は点源から等方的に放出される。(4)生成される渦輪の直径は、振動振幅程度以下に制限される。(5)振動球のシミュレーションでは、渦輪の放出が異方的である。(6)量子渦波動の直接観測には、渦の付着制御の確立が必要である。

研究成果の概要(英文)：We report the results obtained in the present study as follows, for the purpose of investigating vortex motions in superfluid helium by using novel characteristics of a quantized vortex.

(1) Quantized vortex rings can be produced by vibrating motions of an object immersed in superfluid helium, emitting in random directions. (2) The diameters of vortex rings, estimated from the velocities of the rings, are distributed from 0.2 to 1 micro meter, suggesting that vortex rings cascade to smaller rings by reconnection between vortices. (3) Vortex rings are emitted radially from a point source. (4) The diameters of vortex rings are limited to sizes smaller than a vibrating amplitude of an object. (5) Simulations of vortex emissions by an oscillating sphere reveal that vortex rings are emitted anisotropically in directions. (6) The direct measurements of vortex wave spectrums require new methods of attaching vortices between a vibrating object and a probe.

研究分野：超低温物理学

キーワード：流体力学 超流動ヘリウム 量子渦 量子乱流 量子流体力学

1. 研究開始当初の背景

最後の永久気体と言われたヘリウム(⁴He)が液化されてから1世紀がたち、液体ヘリウムが低温で示す特異な現象である超流動は、これまでの膨大な研究から、その性質が明らかになってきた。ヘリウム4原子は、陽子2個、中性子2個、電子2個の偶数個のフェルミ粒子から構成される、スピン0のボース粒子である。液体ヘリウム4は、飽和蒸気圧下において絶対温度2.17 K (-271°C)で Bose-Einstein 凝縮を起こし、超流動と呼ばれる粘性をもたない液体の性質が現れる。この温度以下の液体は、粘性を示す常流動の成分 ρ_n と、粘性がない超流動の成分 ρ_s の二成分の和で記述される。温度が下がるにつれ ρ_n の割合は減少し、絶対零度の極限ではすべての液体ヘリウムが超流動となる。

超流動成分の流れ場は、秩序変数 $\Psi(r) = \sqrt{n_0(r)}e^{i\varphi(r)}$ で特徴づけられ、超流動速度場は波動関数の位相勾配に比例し、 $v_s = (\hbar/m)\nabla\varphi$ で与えられる。ここで \hbar はプランク定数、 m はヘリウムの質量、 φ は波動関数の位相である。したがって、ある閉曲線Cを巡る超流動の循環 $\kappa = \oint_C v_s \cdot dl$ は0となる。しかし、超流動の位相に秩序変数が零の欠陥があると、そのまわりの循環は有限の値をとりうる。

$$\kappa = \frac{\hbar}{m} \oint_C \nabla\varphi \cdot dl = \frac{\hbar}{m} n \quad (n = 1, 2, \dots) \quad (1)$$

これは超流動の流れの循環が、 $(\hbar/m) (= 0.998 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{s})$ を単位として量子化されていることを示しており、この渦を「量子渦」と呼ぶ。実際、超流動ヘリウム渦の量子化は、Vinenによって観測されている[1]。また渦のつらなりを渦糸と呼び、一本の曲線状に渦度 $\omega = \nabla \times v_s$ が集中して存在している。通常の流体では粘性のため、任意の小さい循環の渦の生成消滅を繰り返すのに対し、量子渦はそれ自身で閉じるか、壁に付着するなどして準安定的に存在することができる。また渦度 ω によって作る速度場は Biot-Savart の法則により与えられる。

渦糸は、流体の流れによって運動する。粘性をもつ流体の渦は、風呂の水栓を抜いたときに見られる渦のように、らせん運動する。ケルビン卿は、粘性のない理想流体の渦の動きがらせんになる(ケルビン波)ことを示したが、超流動の渦でもこのケルビン波が現れることが予想される。また渦の動きには慣性質量がともなう。量子渦の慣性質量について、A. J. Leggett と D. J. Thouless の論争など多くの議論がなされてきたが、質量は渦芯のみの寄与(すなわちほぼゼロ)とするものから、回転流すべての寄与(すなわち log 発散)まで、多様な理論予想があり決着していない[2]。

このように超流動や量子渦の理論的背景はわかってきているが、量子渦の動的な性質の実験研究は現在でもあまり進んでいない。これは量子渦の芯の半径が 0.1 nm 程度と非常

に細く、渦の運動を観測する手段が限られているためである。

このような実験研究の状況を打開すべく、我々は、超流動ヘリウム4の量子渦を検出する新たな方法を開発した[3,4]。超伝導線を太さ 2 μm のワイヤーに極微再加工すると、その表面は滑らかになり、超流動ヘリウムの中で振動させても、速い速度まで層流状態を保つ[3]。これはワイヤー表面に付着する量子渦の大きさを、表面の滑らかさによって制御できることを示している。この振動ワイヤーに量子渦輪をぶつけると、振動ワイヤーは乱流を生成し、その速度は減少する[4]。これらの研究から我々は、超流動の乱流が振動物体によって生成される機構を解明すると同時に、量子渦の物体表面への付着制御法と、渦運動を検出する新たな方法の開発に成功した。

2. 研究の目的

本研究は、振動によって量子渦に誘起される波動に着目し、我々が開発した量子渦運動の新たな検出方法と付着制御法を用いて、量子渦の運動を検出する。渦の非線形波動と渦間の再結合によって生成される量子渦輪を直接検出し、渦輪の飛行速度と分布から量子渦運動の知見を得ることを目的とする。また、振動物体に付着する渦の波動とエネルギースペクトルの検出を試みることで、渦の慣性質量の知見を得ることを目的とする。

3. 研究の方法

本研究では、振動物体にワイヤーを用いる量子渦運動の観測法を利用する。非線形波動によって生成される渦輪の検出には、3つ

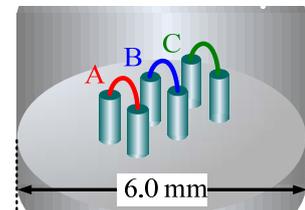


図1. 振動ワイヤーの配置

を用いる(図1)。ワイヤーAまたはBに付着する渦の波動によって生成される渦輪を、ワイヤーCで検出する。生成から検出までの時間を調べ、渦輪の生成と運動を明らかにする。エネルギースペクトルは、付着する渦の波動に応答するワイヤーの振動応答から観測する。このためにワイヤーに探査針を近づけ、量子渦の付着制御を行う必要があり、付着制御法の確立を目指す。

4. 研究成果

(1) 量子渦の振動運動により生成される渦輪

ワイヤーBで生成された渦輪が1.13 mm離れたワイヤーCで検出されるまでの時間は、一定値を取らず分布する。時間 t までに渦輪を検出する確率 P を調べると、指数分布

$$1 - P = \exp(-(t - t_0)/t_1) \quad (2)$$

になることがわかった(図2)。これは検出がポアソン過程であることを示しており、したがって渦輪の生成がランダムであることを示

している。この分布が示す渦輪が届け始める時間 t_0 は、渦輪の生成時間と飛行時間の和に相当する。また平均検出時間間隔 t_1 は、振動物体が生成する渦輪の生成頻度に反比例する。

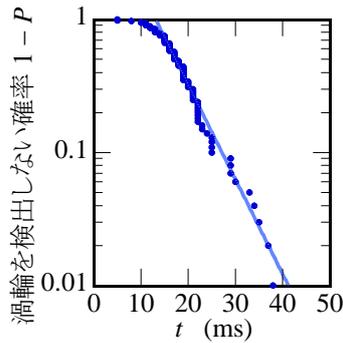


図2. 検出時間の分布

(2) 渦輪の飛行速度

2つの距離についての時間 t_0 の差から求めた渦輪の飛行速度は、渦輪検出器のワイヤーCの振動速度とだいたい一致する(図3)。この結果は、物体の振動が引き起こす渦の運動状態を反映する。渦輪が検出器(ワイヤーC)にぶつくとワイヤーに付着する。付着した渦は、自身の自己誘導速度でさらに動こうとするが、付着した足を支点にするため渦全体がワイヤーに衝突し消滅する。しかしワイヤーが自己誘導速度より速く動くと、渦は流れからエネルギーをもらい、成長・再結合によって、渦の再生産が始まり、乱流生成へと発展する。これにより渦が検出されることになり、図の結果は、渦が成長を始めるのに必要な振動物体の速度を示している。

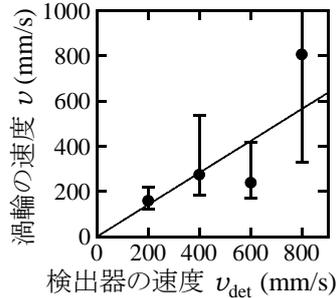


図3. 検出される渦輪の速度

また図のように検出器の速度と同じ速度の渦輪が検出されていることから、生成される渦輪の速度が分布していることを示している。渦輪の速度 v は、渦輪が半径 R の円とすると、

$$v = \frac{\kappa}{4\pi R} \left(\ln \frac{8R}{a_0} - \frac{1}{2} \right) \quad (3)$$

で与えられる。ここで κ は式(1)の $n = 1$ での循環量子で、 a_0 は渦芯の半径 (~ 0.1 nm) である。この式より、渦輪の直径 $2R$ は $0.2 \mu\text{m}$ から $1 \mu\text{m}$ と分布することが分かる。このサイズは振動ワイヤーの太さ(直径 $2 \mu\text{m}$) や振動振幅 $13 \mu\text{m}$ に比べ小さく、渦輪運動によって再結合が繰り返され、大きな渦輪から小さな渦輪へとカスケードが起こっていることを示唆している。

(3) 小さい渦輪の放出頻度

渦輪の検出頻度は、 20 pW 以下では渦輪の生成パワーにほぼ比例して増加する(図4)。これは生成される渦輪の数がパワーに比例す

ることを示している。しかし 20 pW 以上では、検出頻度は比例よりも減少する。この結果から、パワーの増加によって渦輪の数が増加し、渦輪と渦輪が衝突する機会が増える

ことで、渦輪の再結合が頻繁に起こり、渦輪の数が減少していることが考えられる。超流動 ^3He の量子渦の実験や、渦糸モデルによるシミュレーションでも、同様の結果が報告されている[5]。

B \rightarrow C (距離 1.13 mm) を飛行する渦輪と A \rightarrow C (距離 2.26 mm) を飛行する渦輪の同じパワーにおける検出頻度の比は、 3.7 ± 0.3 となり、ほぼ距離の自乗に反比例する。このことから、渦輪が点源から等方的に放出されていることがわかる。

(4) 大きい渦輪の放出頻度

振動ワイヤーは、最初に衝突した渦輪のみを検出する。したがって飛行速度の遅い渦輪は、速い渦輪に阻まれて検出できない。我々はこの困難を解決するために、常流動成分が量子渦を減衰させる効果を利用し、小さい渦輪を減衰・消滅させ、大きな渦輪(したがって式(3)より遅い渦輪)のみが検出されるように設定した。直径が $42 \mu\text{m}$ の渦輪では、 $1 \mu\text{m}$ の渦輪に比べ、平均検出時間が2~3桁も増加した(図5)。また渦輪生成パワーが 60 pW を境に、検出時間のパワーに対する振る舞いが変わった。 60 pW のときのワイヤーの振動振幅は $34 \mu\text{m}_{pp}$ であり、検出できる渦輪の直径とほぼ同じ程度の幅になっている。このことは生成される渦輪の最大サイズはワイヤー振動の振幅で決まり、振幅以上の渦輪は生成されないことを示唆している。

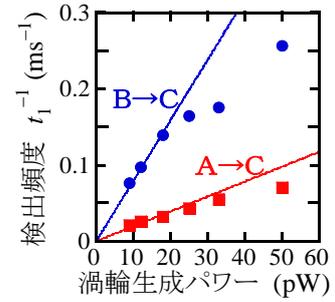


図4. パワーと検出頻度

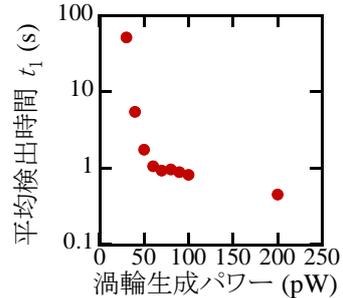


図5. 大きい渦輪の検出時間

(5) 渦糸モデルによる渦輪生成と飛行のシミュレーション

渦糸モデルを用いて、振動物体に付着する渦の運動と、生成され飛行する渦輪の運動を、数値シミュレーションにより調べた。数値計算の制限から振動物体として球を用いた。振動球に付着した渦は、球の運動と相対的に誘起される超流動流によって、非線形的に運動する。速い流れによって渦は成長を始め、渦

間の再結合により渦輪が生成され、飛行する。生成される渦輪のサイズは分布し、実験で観測した結果と定性的に一致する。また振動球の振動方向と、振動に垂直な方向への渦輪の放出頻度を調べ、サイズの大きい渦輪は振動方向への放出が多くなること、すなわち放出に異方性があることを発見した。

(6) 量子渦の波動検出

バイモルアクチュエーターに取り付けた探査針を、70 μm までワイヤーへ近づけ、ワイヤーと探査針間に付着する量子渦の波動検出を試みた。アクチュエーターで探査針とワイヤー間の距離を変化させて、振動ワイヤーの信号を測定したが、量子渦波動による信号変化を検出できなかった。ワイヤーと探査針間に量子渦が付着しなかったためだと考えられる。

渦を付着させるために、検出用振動ワイヤーが量子渦を生成する状態で、探査針を近づけたが、これらの間を橋渡しする渦を作ることができなかった。(4)節で述べたように、振動振幅程度の大きさの渦輪が生成されているので、これらの間に渦が付着しない理由は考えにくい。また波動の検出感度に問題があることも考えられる。以上のことから、更なる検証と、量子渦付着制御の確立が必要である。

<引用文献> (*: corresponding author)

1. 'The detection of single quanta of circulation in liquid helium II', W. F. Vinen, Proc. Roy. Soc. A 260, 218 (1961).
2. 'Vortex mass in a superfluid at low frequencies', D. J. Thouless, J. R. Anglin, Phys. Rev. Lett., 99, 105301 (2007).
3. 'Control of turbulence in boundary layers of superfluid ^4He by filtering out remanent vortices', N. Hashimoto, *H. Yano, *et al*, Phys. Rev. B, 76, 020504(R) (2007).
4. 'Turbulence in boundary flow of superfluid ^4He triggered by free vortex rings', R. Goto, *H. Yano, *et al*, Phys. Rev. Lett., 100, 045301 (2008).
5. 'Generation, evolution, and decay of pure quantum turbulence: A full Biot-Savart simulation', S. Fujiyama, A. Mitani, M. Tsubota, *et al*, Phys. Rev. B, 81, 180512(R) (2010).

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 9 件)

- ① A. Nakatsuji*, M. Tsubota, and H. Yano, 'Statistics of vortex loops emitted from quantum turbulence driven by an oscillating sphere', Phys. Rev. B, 査読有, **89**, (2014), 174520(1-7)
DOI: 10.1103/PhysRevB.89.174520
- ② S. Oda, Y. Wakasa, H. Kubo, K. Obara, H. Yano*, O. Ishikawa, and T. Hata,

'Observations of vortex emissions from superfluid ^4He turbulence at high temperatures', J. Low Temp. Phys., 査読有, **175**, (2014), 317-323

DOI: 10.1007/s10909-013-0934-2

- ③ Y. Wakasa, S. Oda, Y. Chiba, K. Obara, H. Yano*, O. Ishikawa, and T. Hata, 'Vortex emissions from quantum turbulence generated by vibrating wire in superfluid ^4He at finite temperature', J. Phys.: Conf. Ser., 査読有, **568**, (2014), 012027(1-6)
DOI: 10.1088/1742-6596/568/1/012027
- ④ 矢野英雄*, 坪田誠, '物体の運動で発現する量子乱流', 日本物理学会誌, 査読有, **68**, (2013), 734-738, 711
<http://www.jps.or.jp/books/gakkaishi/2013/11/6811.html>
- ⑤ H. Kubo, Y. Nago, A. Nishijima, K. Obara, H. Yano*, O. Ishikawa, and T. Hata, 'Time-of-flight measurements of vortices emitted from quantum turbulence in superfluid ^4He ', J. Low Temp. Phys., 査読有, **171**, (2013), 466-472
DOI: 10.1007/s10909-012-0723-3
- ⑥ A. Nakatsuji*, M. Tsubota, and H. Yano, 'Propagation of quantized vortices driven by an oscillating sphere in superfluid ^4He ', J. Low Temp. Phys., 査読有, **171**, (2013), 519-525
DOI: 10.1007/s10909-012-0797-y
- ⑦ Y. Nago, A. Nishijima, H. Kubo, T. Ogawa, K. Obara, H. Yano*, O. Ishikawa, and T. Hata, 'Vortex emission from quantum turbulence in superfluid ^4He ', Phys. Rev. B, 査読有, **87**, (2013), 024511(1-9), Editors' suggestion
DOI: 10.1103/PhysRevB.87.024511
- ⑧ H. Yano*, A. Nishijima, S. Yamamoto, T. Ogawa, Y. Nago, K. Obara, O. Ishikawa, M. Tsubota, and T. Hata, 'Generation and detection of vortex rings in superfluid ^4He at very low temperature', J. Phys.: Conf. Ser., 査読有, **400**, (2012), 012085(1-4)
DOI: 10.1088/1742-6596/400/1/012085
- ⑨ Y. Nago*, T. Ogawa, K. Obara, H. Yano, O. Ishikawa and T. Hata, 'Time-of-flight experiments of vortex rings propagating from turbulent region of superfluid ^4He at high temperature', J. Low Temp. Phys., 査読有, **162**, (2011), 322-328
DOI: 10.1007/s10909-010-0277-1

[学会発表] (計 26 件)

- ① 千葉祐弥*, 若狭洋平, 小原颯, 矢野英雄, 石川修六, 畑徹, "超流動 ^4He 中振動ワイヤーによる渦環放出の温度変化", 日本物理学会第 70 回年次大会、早稲田大学 (東京都新宿区)、2015 年 3 月 21 日~24 日

- ② H. Yano* (Invited Talk), “Quantum turbulence generated by vibrating wire in superfluid ^4He ”, Workshop on New Perspectives in Quantum Turbulence: experimental visualization and numerical simulation, 名古屋大学 (愛知県名古屋市), 2014 年 12 月 11 日~12 日
- ③ 矢野英雄* (シンポジウム講演)、“超流動ヘリウム中の振動物体が生成する量子乱流と量子渦の放出”、; 日本物理学会 2014 年秋季大会: シンポジウム「量子渦の物理の最前線」、中部大学 (愛知県春日井市)、2014 年 9 月 7 日~10 日
- ④ H. Yano* (Invited Talk), “Vortex emissions from quantum turbulence generated by vibrating wire in superfluid ^4He at finite temperature”, The 27th International Conference on Low Temperature Physics (LT27), Palais Rouge, Buenos Aires (Argentina), 2014 年 8 月 6 日~13 日
- ⑤ Y. Wakasa*, S. Oda, K. Obara, H. Yano, O. Ishikawa, and T. Hata, “Power dependence of vortex emissions generated by vibrating wire in superfluid ^4He at finite temperature”, The 27th International Conference on Low Temperature Physics (LT27), Palais Rouge, Buenos Aires (Argentina), 2014 年 8 月 6 日~13 日
- ⑥ 矢野英雄*、“振動物体が生成する量子乱流と渦放出”、物性研究所短期研究会「スーパーマターが拓く新量子現象」、東京大学物性研究所 (千葉県柏市)、2014 年 4 月 17 日~19 日
- ⑦ 若狭洋平*, 織田慎平, 小原顕, 矢野英雄, 石川修六, 畑徹, “渦環放出から見る超流動 ^4He 中振動ワイヤーによる量子乱流の生成機構”、日本物理学会第 69 回年次大会、東海大学 (神奈川県平塚市), 2014 年 3 月 27 日~30 日
- ⑧ H. Yano* (Invited talk), “Vortex emission from quantum turbulence generated in superfluid ^4He ”, International Conference on Quantum Fluids and Solids (QFS2013), くにびきメッセ (島根県松江市)、2013 年 8 月 1 日~6 日
- ⑨ S. Oda*, H. Yano, “Observation of vortex emissions from superfluid ^4He turbulence at high temperatures”, International Conference on Quantum Fluids and Solids (QFS2013), くにびきメッセ (島根県松江市)、2013 年 8 月 1 日~6 日
- ⑩ 織田慎平*, 久保博史, 小原顕, 矢野英雄, 石川修六, 畑徹, “振動ワイヤーによる超流動 ^4He 乱流からの渦環放出”、日本物理学会第 68 回年次大会、広島大学 (広島県東広島市), 2013 年 3 月 26 日~29 日
- ⑪ 矢野英雄* (シンポジウム講演)、“量子乱流から放出される量子渦環”、日本物理学会 2012 年秋季大会: シンポジウム「量子流体で拓かれる新しい物理」、横浜国立大学 (神奈川県横浜市), 2012 年 9 月 18 日~21 日
- ⑫ 仲辻愛*, 坪田誠, 矢野英雄、“振動球により駆動される超流動 ^4He 量子乱流から放出される量子渦”、日本物理学会 2012 年秋季大会、横浜国立大学 (神奈川県横浜市), 2012 年 9 月 18 日~21 日
- ⑬ H. Yano* (Invited talk), “Vortex emission from quantum turbulence generated by a vibrating wire in superfluid ^4He ”, International Conference on Quantum Fluids and Solids (QFS2012), Lancaster University, Lancaster (UK), 2012 年 8 月 15 日~21 日
- ⑭ H. Kubo*, H. Yano, “Time-of-flight measurements of vortex rings emitted from quantum turbulence in superfluid ^4He ”, International Conference on Quantum Fluids and Solids (QFS2012), Lancaster University, Lancaster (UK), 2012 年 8 月 15 日~21 日
- ⑮ A. Nakatsuji*, M. Tsubota, H. Yano, “Propagation of quantized vortices driven by an oscillating sphere in superfluid ^4He ”, International Conference on Quantum Fluids and Solids (QFS2012), Lancaster University, Lancaster (UK), 2012 年 8 月 15 日~21 日
- ⑯ 西嶋陽*, 久保博史, Kyle Thompson, 永合祐輔, 小原顕, 矢野英雄, 石川修六, 畑徹, “超流動 ^4He 中乱流から放出された渦環と乱流生成エネルギーの関係”、日本物理学会第 67 回年次大会、関西大学 (兵庫県西宮市), 2012 年 3 月 24 日~27 日
- ⑰ 久保博史*, 西嶋陽, Kyle Thompson, 永合祐輔, 小原顕, 矢野英雄, 石川修六, 畑徹, “超流動 ^4He 乱流から放出される渦環の飛行”、日本物理学会第 67 回年次大会、関西大学 (兵庫県西宮市), 2012 年 3 月 24 日~27 日
- ⑱ 永合祐輔*, 西嶋陽, 久保博史, Kyle Thompson, 小原顕, 矢野英雄, 石川修六, 畑徹, “振動子が作る超流動 ^4He 乱流から放出される渦環”、日本物理学会第 67 回年次大会、関西大学 (兵庫県西宮市), 2012 年 3 月 24 日~27 日
- ⑲ 矢野英雄*、“量子乱流から放出される量子渦環と常流体との相互摩擦”、物性研究所短期研究会「量子凝縮系における defects および topology」、東京大学物性研究所 (千葉県柏市), 2012 年 1 月 5 日~7 日
- ⑳ 永合祐輔*, 久保博史, 西嶋陽, Kyle Thompson, 小原顕, 矢野英雄, 石川修六, 畑徹, “量子乱流から放出される渦環の伝播”、物性研究所短期研究会「量子凝縮系における defects および topology」、東京大学物性研究所 (千葉県柏市), 2012 年 1

- 月 5 日～7 日
- ⑳ 永合祐輔*, 小原顕, 矢野英雄, 石川修六, 畑徹, “超流動 $^3\text{He-B}$ 相の振動流における量子渦生成機構”, 日本物理学会 2011 年秋季大会、富山大学 (富山県富山市), 2011 年 9 月 21 日～24 日
 - ㉑ 矢野英雄*, 小川徹也, 西嶋陽, 久保博史, 永合祐輔, 小原顕, 石川修六, 畑徹, “超流動 ^4He 乱流から放出される量子渦環と常流体との相互摩擦”, 日本物理学会 2011 年秋季大会、富山大学 (富山県富山市), 2011 年 9 月 21 日～24 日
 - ㉒ 西嶋陽*, 久保博史, 小川徹也, 永合祐輔, 小原顕, 矢野英雄, 石川修六, 畑徹, “超流動 ^4He 中乱流から放出される渦環の伝播”, 日本物理学会 2011 年秋季大会、富山大学 (富山県富山市), 2011 年 9 月 21 日～24 日
 - ㉓ H. Yano*, “Propagation of vortex rings emitted from turbulence in superfluid ^4He at finite temperatures”, New Frontiers of Low Temperature Physics (ULT2011), KAIST, Daejeon (Korea), 2011 年 8 月 19 日～22 日
 - ㉔ H. Yano*, “Generation and detection of vortex rings in superfluid ^4He at very low temperature”, The 26th International Conference on Low Temperature Physics (LT26), Beijing International Convention Center, Beijing (China), 2011 年 8 月 10 日～17 日
 - ㉕ H. Yano* (Invited Talk), “Generation and detection of vortex rings in superfluid ^4He using the transition to turbulence generated by a vibrating wire”, Classical and Quantum Turbulence Workshop, Intercontinental Hotel, Abu Dhabi (UAE), 2011 年 5 月 2 日～5 日

6. 研究組織

(1) 研究代表者

矢野 英雄 (YANO, Hideo)

大阪市立大学・大学院理学研究科・准教授

研究者番号 : 70231652