

令和 5 年 5 月 28 日現在

機関番号：24405

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20H01843

研究課題名(和文) 2原子種ボース凝縮体の相分離過程の可視化と動的スケールリング仮説の実験的検証

研究課題名(英文) Visualizing the phase separation of a dual-BEC for verifying the dynamical scaling hypothesis

研究代表者

井上 慎 (Inouye, Shin)

大阪公立大学・大学院理学研究科・教授

研究者番号：10401150

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,700,000円

研究成果の概要(和文)：クエンチした冷却原子による非平衡物理の実験的探求を目指し、ルビジウムとカリウムの混合ボースアインシュタイン凝縮体を用いた実験装置の改良に取り組み、2次元磁気光学トラップの導入やイメージングの高解像度化などに成功した。理論面では、1次元Hubbard模型の量子ダイナミクスを古典界面成長の視点から調べ、界面粗さの動的スケールリング則には、保存則が重要であることを明らかにした。さらに2成分BECの相分離過程におけるパターン形成の系統的理解に成功すると共に、半整数量子渦のケルビン波は、循環が半整数ではなく整数である量子渦のケルビン波として理論的に理解できることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

超流動体がどのように相分離するかを目指して装置の開発をおこなったことは、日常でも重要な相分離の物理の解明に一步近づいたという意味で大変意義深い。さらに理論的にも1次元量子系に界面粗さの概念を導入してその振る舞いを明らかにしたことや、超流動体が混合されると界面にどのようなパターンを生じるか明らかにしたことは大変意義深い。

研究成果の概要(英文)：Aiming at the experimental exploration of non-equilibrium physics with quenched cold atoms, we worked on improving experimental equipment using a mixture of rubidium and potassium Bose-Einstein condensate. We succeeded in introducing a two-dimensional magneto-optical trap and increasing the resolution of imaging system. With respect to the theory, we investigated the quantum dynamics of the one-dimensional Hubbard model from the viewpoint of classical interface growth and clarified that the conservation law is important for the dynamic scaling of interface roughness. Furthermore, we succeeded in systematically understanding the pattern formation in the phase separation process of two-component BEC and found that Kelvin waves of half-integer quantum vortices can be theoretically understood as Kelvin waves of quantum vortices whose circulation is not a half-integer but an integer.

研究分野：量子縮退気体

キーワード：量子縮退気体 冷却原子 ボース・アインシュタイン凝縮

1. 研究開始当初の背景

孤立系を用いた非平衡の物理の解明は非常に重要な課題である。冷却原子を用いれば、ポテンシャルや相互作用を急激に変えること (= 「クエンチ」) により、平衡状態から極めて離れた状態に系を用意し、その後の系の時間発展を実際に観測することが可能である。

クエンチした冷却原子による非平衡物理の実験的探求の最初の有名な例は、バークレーのグループが行った、スピン自由度のあるボース・アインシュタイン凝縮体の実験であった。ルビジウム 87 の基底状態 ($F=1$) のスピン間の相互作用は強磁性なので、BEC を「スピンがどちらも向いていない」(すなわち磁気量子数 $mF=0$ の) 状態に準備して時間発展させると、自発的に強磁性のドメインを作る。スピンの向きを検出できる非破壊イメージングを行えば、ドメイン生成のその場観察が可能である。量子渦 (位相欠陥) の自発的な生成は観測されたが、実験結果の定量的理解は難しく、上記の動的スケールング仮説の検証はなされなかった。

その後も様々な実験が繰り広げられたが、中でも 1 次元に閉じ込められたボース気体を急冷して得られる擬 BEC (quasi-BEC) におけるソリトン形成は、理論計算と相性の良いこともあって精力的に研究された。特に 2018 年になって、ドイツのハイデルベルグ大学のグループと、オーストリアのウィーン工科大学のグループは、ともにクエンチした 1 次元ボース気体の時間発展を観測することで動的スケールング仮説を確認し、ほぼ同時に学術誌 Nature に発表した。前者はスピン自由度のある BEC のドメイン、後者は急冷したボース気体の運動量、を観測しているが、ともに動的スケールング仮説を量子系に適用できることを確認したという意味で重要な成果であった。しかし位相欠陥が絡む非平衡物理の解明と言う意味では、2 次元及び 3 次元系での実験が特に重要である。2 次元に閉じ込められた冷却原子系を用いてまずは動的スケールング仮説の実験的検証を行うことが喫緊の課題である。

2. 研究の目的

混合ボース凝縮体を用いて、2 次元の超流動体の相分離における動的スケールング仮説を実験的に検証することを目的とする。具体的にはルビジウムとカリウムの混合ボース凝縮体を 2 次元箱型ポテンシャルに閉じ込め、フェッシュバハ共鳴を用いてその相互作用を急変させて相分離を起こす。生じるドメインの時間発展は非破壊観測が可能であり、ドメインの大きさの分布を異なる時刻で比較すれば、動的スケールング仮説を実験的に検証できる。成功すれば、2 次元量子系で動的スケールング仮説を検証した初めての例となり、2 原子種ボース凝縮体を非平衡物理探索のプラットフォームとして確立することができる。実験的には、相分離を広いスケールで観測する為に、生成される凝縮体中の原子数を増やすこと、及びイメージング解像度を改善することが重要となる。

3. 研究の方法

冷却原子生成装置の改良

我々はルビジウムとカリウムの混合冷却装置を用意していたが、コイルの意図しない加熱により実験装置の一部修理が必要となったため、これを機に装置の抜本的な改良に取り組んだ。改良点としては、(1) 同位体比を増強した原子源への変更、(2) 2 次元磁気光学トラップの実装、の 2 つを行った。まず (1) の原子源の改良であるが、カリウムは元々ルビジウムに比べて蒸気圧が低い上に、実験で使用する 41 カリウム同位体の自然存在比が低い (6.7%) という問題があった。そこでカリウム 41 の同位体比を 98% まで高めた原子源を使用することとした。41 カリウムは塩化カリウムの形で提供され、値段も 50mg で 100 万円以上と大変高価である。そこで米国の企業に依頼して 41 カリウムを塩化物から純粋金属に蒸留した後、アンプルに封入してもらったものを使用することにした。さらにイオンポンプで浪費される原子の割合を減少させるためにイオンポンプの前に真空バルブを新たに導入した。さらに従来、背景ガスから原子を集める第 1 段階の冷却においては通常の 3 次元磁気光学トラップ (3D-MOT) を用いていたが、2 次元磁気光学トラップに変更することで、より速度の速い原子も冷却・捕獲できるように装置を改良した。

高解像度・長作動距離対物レンズの開発

次にイメージングの改善に取り組んだ。解像度を上げる事でより小さなスケールの構造を観測できるようになる。解像度の向上には対物レンズの実効開口の増大が必要となり、一般的には作動距離の短縮が伴う。一方で観測は原子を捕獲している真空ガラスセルの外側に対物レンズを置いて行う事が一般的であり、それには長い作動距離とガラスによる収差の補正が必要である。これまでは対物レンズとして単体の非球面レンズを用いていた

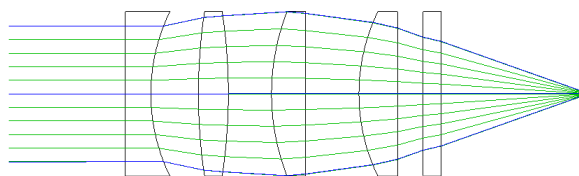


図 1 組み合わせ対物レンズの設計

が、作動距離や実効開口に制限がある。従って、光学設計ソフトウェアを用いて、組み合わせ対物レンズを設計することによりこれを解決することにした。図1が実際に設計した対物レンズであり、全て汎用のレンズを使用している。設計解像度はルビジウム共鳴波長 780 nm に対して 1.25 μm であり、作動距離は 21.3 mm でガラス厚み 2.5mm の補正込みである。解像度は従来より 1.6 倍程度改良されると期待される。

実験制御系の改良

実験条件を変えつつ大量のデータを取得し、それを系統的に解析するためにはデータの自動取得が欠かせない。従来我々の実験室で使用していた Labview によるコントロールプログラムには自動でパラメータを変えながら実験を続ける機能が備わっていなかった。そこで理研、阪大、電通大の冷却原子の実験を行うグループと共同で冷却原子実験用の制御プログラムの開発をおこなった。開発されたプログラムは 2022 年 6 月に担当業者より納品された(図2)。いくつかの不具合があることも分かったので、業者と連絡をとりながらバグの修正に努めている。

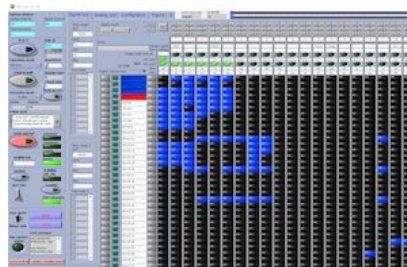


図 2 共同開発した制御プログラム

4. 研究成果

(1) ルビジウム原子とカリウム原子の同時レーザー冷却の実現(加藤、井上)

実際に冷却原子生成装置を改良し、ルビジウム原子とカリウム原子の同時レーザー冷却に成功した。図3が実際に構築された第1段階磁気光学トラップの写真である。図3の中心部の細長い蛍光が冷却されたルビジウム原子であり、2次元磁気光学トラップを採用する事で、超高真空側へ原子を送り込む、低速原子ビームが生成されている。



図 3 ルビジウム原子の2次元磁気光学トラップ

超高真空側の真空度は 10^{-11} Torr 程度であり、凝縮体の実験を行うのに十分な真空度を達成している。改良されたカリウム原子源も導入されており、パルスでイオンポンプの排気量を制限することで、50 mg でも7年以上の寿命が期待される。実際、すでに1年以上の原子を安定的に供給することに成功している。また、従来は実験開始時・終了時に原子源の加熱・冷却を行っていたものが、定常的に原子を供給できるようになり、実験の安定度は格段に増した。超高真空側での3次元磁気光学トラップにも成功しており(図4)、十分な数の原子を安定的にレーザー冷却することに成功した。

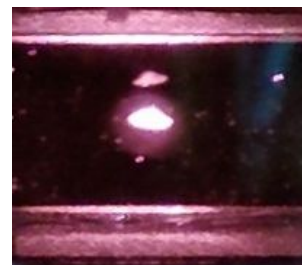


図 4 ルビジウム原子の3次元磁気光学トラップ

(2) 高解像度・長作動距離対物レンズの開発(加藤、井上)

計画通り対物レンズを設計し、実際に設計解像度が実現されるかを、テストイメージング系を実装して確かめた。図5が実際に設計された組み合わせ対物レンズを用いて解像度ターゲットをイメージングしたものである。図で示す様に、設計解像度 1.25 μm は十分に達成できている。既成品の対物レンズも試験したが、同等の作動距離の物では、解像度の他に、視野や反射防止膜の有無等の面でも自作対物レンズの方が優位であることが分かった。蛍光イメージングと比べて本研究で用いる吸収イメージング・位相コントラストイメージングでは特にプローブ光の反射による干渉フリッジが問題となる。従って、本研究に用いる上で最適な対物レンズを開発できたと言える。

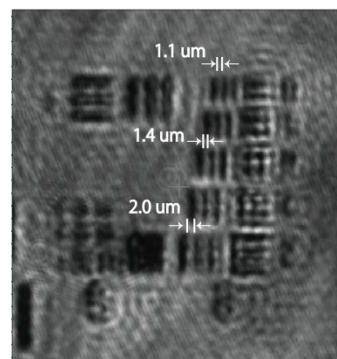


図 5 自作対物レンズによるイメージング

(3) 量子系の界面粗さのスケーリングの解明(藤本)

藤本は1次元 Hubbard 模型の量子ダイナミクスを古典界面成長の視点から調べて、その普遍的性質を解明する理論研究を行った。先行研究において、藤本は古典系の揺らぐ1次元流体力学と古典界面成長モデルとの対応関係に基づいて、量子系の界面粗さを定義し、その時間発展を1次元 Hubbard 模型で調べたところ、古典界面成長の文脈で議論されてきた Family-Vicsek スケーリング則(界面粗さに対する動的スケーリング則)が現れることを理論的に明らかにしていた。藤本はこの研究をランダムポテンシャルがある場合に拡張することで、Anderson 局在により量子ダイナミクスの Family-Vicsek スケーリング則の性質が

大きく変化することを数値的に見出した。この成果は Physical Review Letters 誌に掲載された。つづいて、環境と注目する系との相互作用の効果を調べるため、Gorini-Kossakowski-Sudarshan-Lindblad 方程式を用いて、量子系の界面粗さを調べた。その結果、粒子数を保存する散逸を持つ 1 次元開放量子系では Family-Vicsek スケーリング則が現れうることを数値的に明らかにした。しかし、環境との相互作用により、スケーリング指数は著しく変化し、古典界面成長で研究されてきた Edwards-Wilkinson 方程式のスケーリング指数と一致することを数値的に発見した。このスケーリング指数の変化は、微分方程式に対するくりこみ群解析を行うことで解析的に説明することができた。一方、粒子数を保存しない散逸を持つ 1 次元開放量子系では、Family-Vicsek スケーリング則が現れないことを数値的に見出し、界面粗さの動的スケーリング則の出現には、保存則が重要であることを示唆する理論結果を得た。この成果は Physical Review Letters 誌に掲載されるとともに、国際学会 (ULT2022) の招待講演で報告した。

(4) 2 成分 BEC の相分離過程におけるパターン形成の解明 (竹内)

2 成分 BEC の相分離過程の後期段階において、特徴的なドメインサイズよりも小さいドメインはケルビン・ヘルムホルツ不安定性 (KHI) によって生成される。この現象は 2 成分間の相対速度と相互作用に依存して、そのパターン形成の様子が変化することが知られていたが、その系統的な理解は得られていなかった。竹内は古典流体力学で KHI の解析に用いられる無次元量 (ウェーバー数 We) をこの系にも適用できる普遍的な形式に拡張することで、 We の値に応じて不安定性による界面の波模様が、古典系でも起こる普遍的な模様である Flutter-finger 模様から、量子系特有の Sealskin 模様や Zipper 模様へと連続的に変化することを理論・数値的に明らかにした (図 6)。本成果は、アメリカ物理学会刊行のオンラインマガジン “Physics Magazine” にニュースとして取り上げられるとともに、プレスリリースを行い複数のメディアで報道された。[Physical Review A 104, 023312 (2021)]

また、2 成分 BEC における半整数量子渦のケルビン波は、循環が半整数ではなく整数である量子渦のケルビン波として理論的に理解できることを示した。[Physical Review A 107, 013309 (2023)]

(以上)

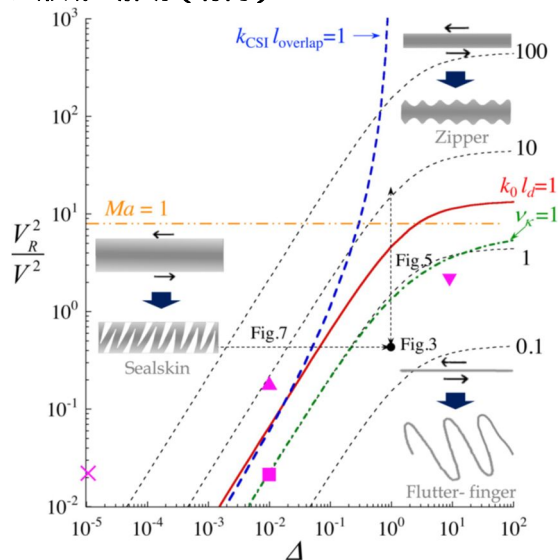


図 6 : 2 成分 BEC における KHI の界面波パターン相図。縦軸は相対速度 V_R の 2 乗、横軸は 2 成分相互作用の強さを特徴づけるパラメータ Δ 、黒い破線は We の等値線を表している。 We が 1 より十分小さくなると古典的な Flutter-finger 模様が現れる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 9件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Takeuchi Hiromitsu	4. 巻 104
2. 論文標題 Phase diagram of vortices in the polar phase of spin-1 Bose-Einstein condensates	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review A	6. 最初と最後の頁 1-15
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevA.104.013316	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Kokubo Haruya, Kasamatsu Kenichi, Takeuchi Hiromitsu	4. 巻 104
2. 論文標題 Pattern formation of quantum Kelvin-Helmholtz instability in binary superfluids	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review A	6. 最初と最後の頁 1-16
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevA.104.023312	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Takeuchi Hiromitsu	4. 巻 105
2. 論文標題 Spin-current instability at a magnetic domain wall in a ferromagnetic superfluid: A generation mechanism of eccentric fractional skyrmions	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review A	6. 最初と最後の頁 1-14
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevA.105.013328	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Liu I-Kang, Gou Shih-Chuan, Takeuchi Hiromitsu	4. 巻 2
2. 論文標題 Phase diagram of solitons in the polar phase of a spin-1 Bose-Einstein condensate	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Research	6. 最初と最後の頁 033506-1-8
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevResearch.2.033506	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

1. 著者名 Chai Xiao, Lao Di, Fujimoto Kazuya, Raman Chandra	4. 巻 3
2. 論文標題 Magnetic soliton: From two to three components with $SO(3)$ symmetry	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review Research	6. 最初と最後の頁 L012003-1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevResearch.3.L012003	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Fujimoto Kazuya, Hamazaki Ryusuke, Kawaguchi Yuki	4. 巻 129
2. 論文標題 Impact of Dissipation on Universal Fluctuation Dynamics in Open Quantum Systems	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 110403-1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.129.110403	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kasamatsu Kenichi, Okada Maki, Takeuchi Hiromitsu	4. 巻 107
2. 論文標題 Kelvin wave in miscible two-component Bose-Einstein condensates	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review A	6. 最初と最後の頁 013309-1-9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevA.107.013309	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Fujimoto Kazuya, Hamazaki Ryusuke, Kawaguchi Yuki	4. 巻 127
2. 論文標題 Dynamical Scaling of Surface Roughness and Entanglement Entropy in Disordered Fermion Models	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 090601-1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.127.090601	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Imaeda Yuya, Fujimoto Kazuya, Kawaguchi Yuki	4. 巻 3
2. 論文標題 Spin-wave growth via Shapiro resonances in a spinor Bose-Einstein condensate	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review Research	6. 最初と最後の頁 043090-1-14
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevResearch.3.043090	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

[学会発表] 計11件(うち招待講演 1件/うち国際学会 4件)

1. 発表者名 船波寛史, 井上慎, 堀越宗一, 加藤宏平
2. 発表標題 スピン自由度のあるBECの位相コントラストイメージングにおける測定の反作用の評価
3. 学会等名 日本物理学会 2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Haruya Kokubo, Kenichi Kasamatsu, Hiromitsu Takeuchi
2. 発表標題 Phase diagram of pattern formation in binary Bose-Einstein condensates with shear flow
3. 学会等名 QFS2021: International Conference on Quantum Fluids and Solids (online), Bangalore, India (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小久保治哉, 笠松健一, 竹内宏光
2. 発表標題 対向流をもつ相分離した2成分ボース凝縮体における界面の非線形ダイナミクス
3. 学会等名 日本物理学会、2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小久保治哉, 笠松健一, 竹内宏光
2. 発表標題 流動界面で生じるケルビン・ヘルムホルツ不安定性の量子・古典クロスオーバー
3. 学会等名 日本物理学会、年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 藤本和也、濱崎立資、川口由紀
2. 発表標題 乱れたポテンシャル中のフェルミ粒子系における非平衡界面揺らぎの成長則
3. 学会等名 日本物理学会 第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kazuya Fujimoto
2. 発表標題 Dynamical scaling of roughness growth in quantum many-body systems
3. 学会等名 Quantized Vortices and Nonlinear Waves (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 今枝祐哉、藤本和也、川口由紀
2. 発表標題 スピノールボース・アインシュタイン凝縮体における非一様シャピロ共鳴
3. 学会等名 日本物理学会 2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kazuya Fujimoto
2. 発表標題 Surface-roughness dynamics in a one-dimensional Bose-Hubbard model
3. 学会等名 International Conference on Ultra Low Temperature Physics, 2022 Aug. 25-28, Otaru, Japan. (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hiromitsu Takeuchi
2. 発表標題 Nematic superfluidity of spinor Bose-Einstein condensates
3. 学会等名 Collective Effects & Non-Equilibrium Phenomena in Quantum Gases and Superconductors (CMD29), Manchester, UK, Aug. 21-26 (2022) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 藤本和也、濱崎立資、川口由紀
2. 発表標題 開放量子系における界面粗さ成長
3. 学会等名 日本物理学会 第77回年次大会 (オンライン開催)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 今枝祐哉、藤本和也、川口由紀
2. 発表標題 スピノール・ボース・アインシュタイン凝縮体のドメイン壁におけるシャピロ共鳴
3. 学会等名 日本物理学会 2021年秋季大会 (オンライン開催)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	竹内 宏光 (Takeuchi Hiromitsu) (10587760)	大阪公立大学・大学院理学研究科・講師 (24405)	
研究分担者	藤本 和也 (Fujimoto Kazuya) (40838059)	東京工業大学・理学院・助教 (12608)	
研究分担者	加藤 宏平 (Kato Kohei) (60793586)	大阪公立大学・南部陽一郎物理学研究所・特任助教 (24405)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------