

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 22 日現在

機関番号：18001

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2022

課題番号：18K03624

研究課題名(和文)数値相対論的シミュレーションの多様な初期データの構築

研究課題名(英文)Construction of various initial data for numerical relativity simulations

研究代表者

瓜生 康史(Uryu, Koji)

琉球大学・理学部・教授

研究者番号：40457693

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：高密度天体の定常・準定常状態の数値解を求めるCOCALコード(Compact Object Calculator)を、一般的な座標条件、強い磁場、クォーク物質の状態方程式などを取り扱えるよう拡張した。このコードを用いて、高速回転するブラックホールとその周りのガスディスクや、高速回転するクォーク星、連星クォーク星、超強磁場を伴う相対論的高密度星などの数値解を求めることに成功した。また、これらの数値解を初期データとして、数値相対論的シミュレーションを実行した。特に、超強磁場を伴う高密度星のシミュレーションでは、強い磁場を持つ場合でもAlfven時間より長い時間安定な解があることがわかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ブラックホールや中性子星の合体から発生する重力波がレーザー干渉計型検出器により観測されるようになり、重力波・電磁波・宇宙線からの情報を総合して観測を行うマルチメッセンジャー天文学の時代が到来した。本研究では、このように極めて重力の強い天体の理論的なモデルを求めるための数値計算コードを開発し、高密度天体の多様な定常・準定常解を求めた。その一例として、極めて強い磁場と高速回転を伴う相対論的高密度星の平衡解を求め、これを初期データに用いることで、このような極限状態にある高密度天体の数値シミュレーションを世界で初めて実行した。

研究成果の概要(英文)：We have extended our numerical code (COCAL:Compact Object Calculator) for computing equilibrium and quasi-equilibrium solutions of compact objects. Subroutines for dealing with generic coordinate conditions, strong magnetic fields, and equations of state of dense quark matter are included. Using the extended COCAL code, We have successfully obtained numerical solutions for the spinning black hole - gaseous disk system, rapidly rotating quark stars, binary quark stars, and strongly magnetized relativistic compact stars. We also performed numerical relativity simulations starting from these solutions as initial data. For example, from the simulations for strongly magnetized compact stars, we found a solution which is stable for a timescale longer than the Alfven time.

研究分野：相対論的宇宙物理学

 キーワード：相対論・重力(理論) 重力波 相対論的宇宙物理学 数値相対論 相対論的回転星 連星中性子星  
ブラックホール クォーク星

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

(1) 2015年9月にレーザー干渉計型重力波検出器 LIGO が連星ブラックホール(BBH)インスパイラルからの重力波の初観測に成功した。2017年8月には VIRGO 検出器も加わって連星中性子星からの重力波の初観測に成功し、さらにその合体後に発生した多波長に渡る電磁波での観測にも成功するという、天文学の歴史の中でも特筆すべき共同観測に成功した。日本においても、世界的な重力波検出コンソーシアムに正式に加わるべく、重力波検出器 KAGRA の建設が進んでいた。

(2) このような重力波と電磁波によるマルチメッセンジャー・マルチウェーブレンクス(多波長)観測から重力波源となる天体の情報を引き出すには精密な理論モデルが必要である。特に合体の直前直後を調べるには、一般相対論的な強い重力、電磁場とニュートリノの放射、高密度物質の状態方程式など、極限的な物理状態を取り扱うことのできる数値相対論的シミュレーションが必要となる。

### 2. 研究の目的

(1) 本研究では、重力波源となる高密度天体(ブラックホール、中性子星、クォーク星など)の連星系の準定常解や、ブラックホール-自己重力ガスディスクシステム、高速回転するクォーク星や極めて強い磁場を持つ高速回転星などの定常解を計算するための数値計算コードを開発し、求められた数値解から極限的な状態にある多様な高密度天体の構造を解析する。

(2) (1) で求めた定常・準定常解を初期データに用いて、数値相対論的シミュレーションを実行する。高密度天体の連星系については、放出される重力波をシミュレーションから求め、重力波検出の可能性を評価する。また、合体後の生成物がブラックホールに即座に崩壊する場合と、高速差動回転する超質量高密度天体になる場合の閾値を求め、合体後の重力波放射の特徴を探る。ブラックホール-ガスディスク、高速回転クォーク星や超強磁場を伴う高速回転星については、数値相対論的シミュレーションを用いてその構造の安定性を調べる。

### 3. 研究の方法

(1) 2007年ごろより我々は数値相対論的な高密度天体の定常解や準定常初期データを求めるための数値計算コード COCAL (Compact Object CALculator)を継続的に開発してきた。このコードでは、重力場や電磁場の方程式などに定常性を仮定して導いた楕円型の方程式系と、相対論的(磁気)流体の方程式の積分可能条件や第一積分から導いた代数方程式系を連立させて差分化した後、逐次代入法を用いて数値解を求める。これまでに、右の表に示したような高密度天体の計算コードが開発済みであり、本研究課題では、表の赤で囲んだ部分の開発を行う。

COCALコードの進捗状況 (記入部分が開発済み)

高密度天体	回転・自転	重力	電磁場
回転NS/QS	剛体回転 差動回転 子午面流(磁場星のみ)	共形平坦 Waveless	Waveless
連星BH	任意のスピン	共形平坦	
連星NS/QS	軌道面に垂直なスピン	共形平坦	
連星BH-NS			
BHとガスディスク	任意のスピン(BH) 剛体回転(ディスク) 差動回転(ディスク)	Kerr-Schild	
重力波テスト		スカラー波	

NS - Neutron Star, QS - Quark Star, BH - Black Hole  
共形平坦 - 空間的メトリックを共形平坦と仮定して単純化した定式化  
Waveless - 波動成分を切り捨てた下で場の方程式の全成分を解く定式化

(2) 数値シミュレーションについては、イリノイ大学の共同研究者およびマックスプランク研究所(AEI)との共同研究者らと共同研究で行う。イリノイ大学の数値相対論グループは、独自の相対論的磁気流体シミュレーションコードと数値相対論コードを The Einstein Toolkit という、数値相対論のパブリックドメインコード上で開発している(イリノイ GRMHD コード)。また、AEI グループも独自の数値相対論コード(SACRA-MPI コード)を開発済みである。COCAL コードからイリノイ GRMHD コードや SACRA-MPI コードへ初期データを提供するためのサブルーチンは開発済みであるため、(1)のコード開発と計算が完了した時点で、初期データを提供することができる。

### 4. 研究成果

(1) 連星中性子星(Binary neutron star, BNS)の円軌道にある準定常初期データの系統的な計算を行った。この計算では空間的な計量を共形平坦と仮定して重力場計算を少し単純化した IWM 定式を用いて、中性子星の自転が非回転の場合、軌道回転と同期している場合、および任意の自転をしている場合のそれぞれについて COCAL コードを用いて準定常的なインスパイラルを近似する解の系列を計算した。得られた解系列を、4次のポストニュートン近似の結果と比較することで数値解の精度を校正した。また、自転をしている連星中性子星の場合に、赤道面上での循環を用いて自転の大きさを定義する方法を提案し、これで求めた解系列と、従来の定義による解系

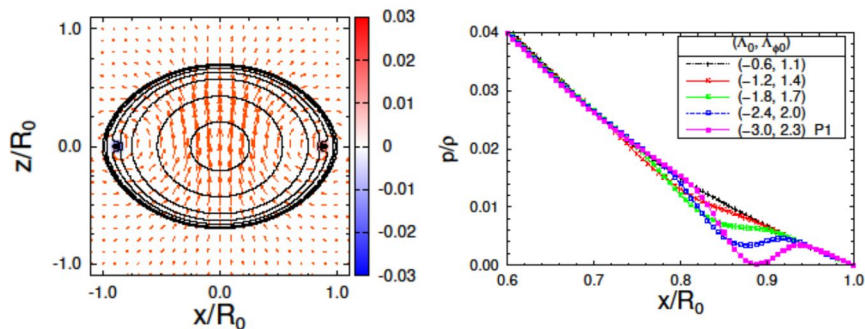
列とを比較し、循環を用いる方法でも同様の解系列が求まることを示した。

(2) ブラックホールとその周りにある軸対称トロイド形状の自己重力ガスディスクからなる系の初期データを計算するコードを COCAL 上で開発した。この計算では、Einstein 方程式の全成分を解く Waveless 定式を利用し、座標条件を同時に解くことで Kerr-Schild 座標に近い座標での数値解が求まるような計算法を開発した。この方法により初期データ計算法でも任意の座標条件を利用できるようになった。また、ブラックホールのスピニングがディスクの角運動量の方向から傾いているような数値解の計算にも世界で初めて成功した。

(3) クォーク物質の状態方程式の簡単なモデルである MIT バッグモデルを改変し、ポリトロップ状態方程式と接続した状態方程式を作成し、これを用いて差動回転をする高密度星の平衡解を求めた。さらに、これを初期データとした数値相対論的シミュレーションを実行した。この状態方程式では、球対称星の場合に最大質量での質量/半径比 (コンパクトネス  $M/R$ , 相対論的な重力の強さの度合いを表す) が  $M/R=0.355$  とかなり大きい値まで、最大密度近傍でも因果律を破らない (音速が光速を超えない)。このような高速差動回転星の内部にはエルゴ領域 (回転による慣性系の引きずりにより、遠方の観測者に対して定常的に同じ場所に止まるには光より速い速度が必要となる領域) が生じることを示した。また、このようなエルゴ領域が内部に生じた回転星も力学的には安定であることをシミュレーションにより示した。

(4) (3)で作成した状態方程式は、球対称星の場合の最大質量が太陽質量の約4倍になる。実際にこのような大質量でコンパクトな (相対論度の高い) 高密度星があった場合、その連星合体はバイナリーブラックホール (BBH) の合体と見分けがつかないのかについて、数値相対論的シミュレーションを実行して調べた。このような連星高密度星と BBH の軌道の位相のずれは、BNS と BBH の場合と比べて約4分の1となり、また、コンパクトであることから合体が始まるのとほぼ同時に重力崩壊を起こしブラックホールとなることが分かった。このため、現在の重力波検出器程度の感度では BBH と見分けのつかない Great Imposter (グレートインポスター、大偽物) となることが分かった。

(5) 極めて強い磁場を持つ相対論的回転星の平衡解を求めるための数値計算コードを COCAL コード上で開発することに成功した。このコードでは、新たに Maxwell 方程式を解くルーチンと定常かつ軸対称を仮定した磁気流体方程式の積分可能条件と第一積分を解くルーチンなどを新たに開発した。これを用いて、星の外部を真空と仮定した下で一様回転をする定常軸対称の相対論的磁気回転星の平衡解を数値的に求めた。重力場の計算に Waveless 定式を用いることで、磁場のポロイダル成分とトロイダル成分の両方を持つ定常軸対称相対論的磁気回転星を、世界で初めて何も近似を用いない定式化の下で求めることに成功した。また、磁場の強度を上げると赤道表面に近い部分で磁場が物質を排除するほど極めて強くなることが分かった。右の図は表面付近の赤道半径に沿った物質の分布 ( $p/\rho$  = 圧力/密度) を表している。図の5本の曲線はそれぞれ異なる磁場の強さの場合に対応しており、下の曲線ほど磁場が強くなっている。左の等高線は、一番磁場が強い場合の物質の分布 ( $p/\rho$ ) の等高線である。(オレンジの矢印は磁場のポロイダル成分、赤と青の色密度は磁場のトロイダル成分を表している。)これから、磁場をさらに強くすると高密度星の赤道表面の少し内側にトンネルが形成される可能性があることが分かった。



(6) (5)で求めた相対論的磁気回転星を初期データにして数値相対論的磁気流体シミュレーションを実行した。このように定式化としては何も近似を用いずに求めた初期データから数値相対論的シミュレーションまでを、極めて強いポロイダル成分とトロイダル成分の両方の磁場を伴う相対論的磁気回転星の場合に実行したのは世界で初めてである。トロイダル成分の磁場の強さを系統的に変化させてシミュレーションを数モデルについて実行したところ、ほとんどのモデルでは数回転以内に磁気不安定が成長し星の構造が大きく変化したが、Alfven 時間よりも長い間安定な解も存在することが分かった。

(7) クォーク物質の状態方程式の簡単なモデルである MIT バッグモデルを用いて、高速回転す

る 3 軸不等なクォーク星と、連星クォーク星の準定常状態を、COCAL コードを用いて計算した。さらに、これを初期データにして数値相対論的シミュレーションを実行した。このようなクォークの状態方程式では、圧力がゼロとなる星の表面で密度の値が有限の値をとるため、初期データの精度が損なわれることが分かった。そこで、重力場計算の際に表面での値を補正するルーチンを開発し、回転クォーク星と連星クォーク星の初期データをいずれも精度良く求められるように改良した。連星クォーク星の数値シミュレーションから、合体後に BH を生成する閾値となる初期データの質量を求めた。

(8) 本研究課題では上述の通り、これまでに開発してきた COCAL コードを拡張し、BH-ガスディスク、連星クォーク星、超強磁場を持つ相対論的回転星などの定常・準定常解を求めることに成功した。さらに、これらの数値解を初期データとして数値相対論的シミュレーションを実行した。本課題の研究代表者が獲得した過去の基盤研究 (C) も含めて COCAL コードの開発が進んだ結果、多様な定常・準定常初期データを計算することが可能になり、これらを円滑に数値相対論的シミュレーションコードに初期データを提供できるようになった。近年の数値相対論的シミュレーションは、より現実的なモデルを精密にシミュレーションする方法の開発が主流となっているが、COCAL コードを利用した研究では、精度の向上に注力する代わりに、より極限的な状態や、どちらかというエキゾチックなモデルとも言える高密度天体の計算を中心に進めている。このため、本研究課題で過去に例のない様々な高密度天体に関する理論的なモデルを取り扱うことが可能になった。

(9) 本研究課題は、当初 2018～2020 年度 3 年の予定であったが、2020 年度に本予算を一部利用して開催予定であった国際研究会 9th East Asian Numerical Astrophysics Meeting (EANAM9) が新型コロナウイルス感染症蔓延のため延期となったため、本課題の期間延長を 2 回申請した。EANAM9 は 2022 年 9 月末に沖縄県那覇市において、現地参加 89 名、オンライン参加 39 名のハイブリッド形式で開催することができた。

(10) これまでの COCAL コード開発に関連する分野のレビュー論文として、連星中性子星の初期データ・BH-ガスディスク系の平衡解・磁場を伴う相対論的回転星についてのレビュー論文を、Illinois 大学の Antonios Tsokaros 氏と共同で執筆した。Tsokaros 氏は COCAL コードの共同開発者であり、上述の数値相対論的シミュレーションの多くを手掛けてくれた共同研究者でもある。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計11件（うち査読付論文 11件 / うち国際共著 11件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Tsokaros Antonios, Uryu Koji	4. 巻 54
2. 論文標題 Methods for relativistic self-gravitating fluids: from binary neutron stars to black hole-disks and magnetized rotating neutron stars	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 General Relativity and Gravitation	6. 最初と最後の頁 1--77
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10714-022-02928-1	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 該当する
1. 著者名 Zhou Enping, Kiuchi Kenta, Shibata Masaru, Tsokaros Antonios, Uryu Koji	4. 巻 106
2. 論文標題 Evolution of equal mass binary bare quark stars in full general relativity: Could a supramassive merger remnant experience prompt collapse?	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 103030-1--7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.106.103030	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 該当する
1. 著者名 Zhou Enping, Kiuchi Kenta, Shibata Masaru, Tsokaros Antonios, Uryu Koji	4. 巻 103
2. 論文標題 Evolution of bare quark stars in full general relativity: Single star case	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 123011--1-18
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.103.123011	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 該当する
1. 著者名 Tsokaros Antonios, Ruiz Milton, Shapiro Stuart L., Uryu Koji	4. 巻 128
2. 論文標題 Magnetohydrodynamic Simulations of Self-Consistent Rotating Neutron Stars with Mixed Poloidal and Toroidal Magnetic Fields	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 061101--1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.128.061101	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 該当する

1. 著者名 Tsokaros Antonios, Ruiz Milton, Paschalidis Vasileios, Shapiro Stuart L., Uryu Koji	4. 巻 100
2. 論文標題 Effect of spin on the inspiral of binary neutron stars	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 024061--1-12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.100.024061	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 該当する

1. 著者名 Zhou Enping, Tsokaros Antonios, Uryu Koji, Xu Renxin, Shibata Masaru	4. 巻 100
2. 論文標題 Differentially rotating strange star in general relativity	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 043015--1-11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.100.043015	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 該当する

1. 著者名 Tsokaros Antonios, Ruiz Milton, Sun Lunan, Shapiro Stuart L., Uryu Koji	4. 巻 123
2. 論文標題 Dynamically Stable Ergostars Exist: General Relativistic Models and Simulations	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 231103--1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.123.231103	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 該当する

1. 著者名 Uryu Koji, Yoshida Shijun, Gourgoulhon Eric, Markakis Charalampos, Fujisawa Kotaro, Tsokaros Antonios, Taniguchi Keisuke, Eriguchi Yoshiharu	4. 巻 100
2. 論文標題 New code for equilibriums and quasidequilibrium initial data of compact objects. IV. Rotating relativistic stars with mixed poloidal and toroidal magnetic fields	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 123019--1-34
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.100.123019	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 該当する

1. 著者名 Tsokaros Antonios, Ruiz Milton, Shapiro Stuart L., Sun Lunan, Uryu Koji	4. 巻 124
2. 論文標題 Great Impostors: Extremely Compact, Merging Binary Neutron Stars in the Mass Gap Posing as Binary Black Holes	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 071101--1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.124.071101	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 該当する

1. 著者名 Antonios Tsokaros, Koji Uryu, Milton Ruiz, Stuart L. Shapiro	4. 巻 98
2. 論文標題 Constant circulation sequences of binary neutron stars and their spin characterization	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 124019--1-10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.98.124019	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 該当する

1. 著者名 Antonios Tsokaros, Koji Uryu, Stuart L. Shapiro	4. 巻 99
2. 論文標題 Complete initial value spacetimes containing black holes in general relativity: Application to black hole-disk systems	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 041501(R)--1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.99.041501	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 該当する

〔学会発表〕 計7件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件)

1. 発表者名 瓜生康史
2. 発表標題 超強磁場を伴う相対論的高密度回転星
3. 学会等名 コンパクト星研究会2023
4. 発表年 2023年

1 . 発表者名 Antonios Tsokaros, Milton Ruiz, Stuart Shapiro, Lunan Sun, Koji Uryu
2 . 発表標題 Binary Neutron Star Impostors & Event GW190814
3 . 学会等名 30th Midwest Relativity Meeting 2020
4 . 発表年 2020年

1 . 発表者名 Antonios Tsokaros, Milton Ruiz, Stuart Shapiro, Lunan Sun, Koji Uryu
2 . 発表標題 Binary Neutron Star Impostors & Event GW190814
3 . 学会等名 APS April Meeting 2021, Virtual meeting, USA
4 . 発表年 2021年

1 . 発表者名 Antonios Tsokaros, Milton Ruiz, Lunan Sun, Stuart Shapiro, Koji Uryu
2 . 発表標題 Dynamically stable ergostars exist: General relativistic models and simulations.
3 . 学会等名 APS Virtual April Meeting, April 19th 2020, J14 Numerical Modeling of Neutron Stars
4 . 発表年 2020年

1 . 発表者名 Antonios Tsokaros, Koji Uryu, Stuart Shapiro
2 . 発表標題 Complete initial value spacetimes containing black holes in general relativity:Application to black hole-disk systems
3 . 学会等名 APS April Meeting 2019, Denver, Colorado
4 . 発表年 2019年



1. 発表者名 Antonios Tsokaros, Koji Uryu, Milton Ruiz, Stuart Shapiro
2. 発表標題 Spin in binary neutron star initial data
3. 学会等名 APS April Meeting 2018, Columbus, Ohio
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Koji Uryu and Antonio Tsokaros
2. 発表標題 COCAL: initial data code for numerical relativity
3. 学会等名 The 8th East Asian Numerical Astrophysics Meeting (EANAM 2018), National Cheng-Kung University (NCKU), Tainan, Taiwan (国際学会)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>琉球大学理学部 物質地球科学科 物理系 宇宙物理学研究室ホームページ  <a href="http://www.phys.u-ryukyu.ac.jp/~apweb_user/">http://www.phys.u-ryukyu.ac.jp/~apweb_user/</a>          COCALコード ドキュメントページ (仮設)  <a href="http://www.phys.u-ryukyu.ac.jp/~uryu/Cocal_tmp2/">http://www.phys.u-ryukyu.ac.jp/~uryu/Cocal_tmp2/</a></p>
--

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
研究協力者	ツォカロス アントニオス  (Tsokaros Antonios)		

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1件

国際研究集会 9th East Asian Numerical Astrophysics Meeting	開催年 2022年～2022年
---	--------------------

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			
米国	University of Illinois Urbana-Champaign	University of Arizona		
ドイツ	Max Planck Institute (AEI)	Johann Wolfgang Goethe- Universitat	Institute for Theoretical Physics	
フランス	CNRS, Observatoire de Paris	Universite Paris Diderot		
中国	北京大学	華中科技大学		
英国	Queen Mary University of London			