

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 15 日現在

機関番号：63902

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420893

研究課題名(和文) ストキャスティック磁場による高Z不純物遮蔽の定量評価と輸送モデルの検証

研究課題名(英文) Quantitative evaluation of high Z impurity screening effect in a stochastic magnetic layer and transport model validation

研究代表者

小林 政弘 (Kobayashi, Masahiro)

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・准教授

研究者番号：30399307

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：ストキャスティック磁場領域における高Z(高原子番号)不純物の振る舞いについて以下の成果を得た。原子番号が大きく異なる(Z=2,6,26)不純物(ヘリウム、炭素、鉄)に対して遮蔽効果があることがわかった。現行の輸送モデルでは、不純物の輸送係数は背景プラズマに比べて3～4倍程度大きな値が必要である。モデルが実験結果を再現するためには第一壁からの不純物発生量として、全体の10%程度を考慮する必要がある。装置間で比較を行った結果、不純物遮蔽が起こる場合には、ストキャスティック層の厚みが不純物の侵入長に比べて10倍以上大きくなっている。不純物の流れの分布を計測し、磁力線構造との相関を得ることに成功した。

研究成果の概要(英文)：Transport properties of high Z (high atomic number) impurity in the edge stochastic magnetic layer have been investigated. Following results are obtained: Screening effects have been observed for different impurity species of Z numbers, Z=2, 6 and 26 (helium, carbon and iron). The current transport model needs a cross-field transport coefficient for impurity larger than the background plasma by a factor of 3 to 4. About 10% of first wall source should be considered to interpret the experimental results. Multi-machine comparison shows that the stochastic layer width should be larger than the impurity penetration length by a factor of 10 in order to realize effective impurity screening. Impurity flow velocity parallel to the magnetic field lines has been successfully measured, in which a clear correlation between the flow field and magnetic structure is identified. The result opens further possibility of detailed validation of the current transport model in future.

研究分野：磁場閉じ込め核融合装置の周辺プラズマ輸送

キーワード：核融合 ストキャスティック磁場 不純物輸送 分光計測 数値シミュレーション

1. 研究開始当初の背景

磁場閉じ込め核融合装置の軸対称性が破れると、周辺部の磁場構造がストキャスティック磁場と呼ばれるものに変化する。近年、このような磁場構造を用いた周辺プラズマの制御が以下に示す理由により、注目を浴びている。

・ ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor, 国際熱核融合実験炉) のダイバータ板への過大な熱負荷を軽減するために、ストキャスティックな磁場構造を用いた ELM (Edge Localized Mode) 制御が計画されている。すでに各国の装置 (DIII-D (Doublet III-D, 米国), JET (Joint European Torus, 欧州), ASDEX-Upgrade (Axial Symmetric Divertor Experiment, 独 国) 等) でその実証実験が進められており、有効性が確認されつつある。

・ ITER とそれ以降の原型炉ではプラズマ対向壁に高 Z 材料 (高い原子番号) を用いることが予想され、またデータ運転のために外部から導入するガスもより多くのエネルギーを放射させるために Kr や Xe などの高 Z 不純物が検討されている。

・ ストキャスティック磁場における不純物輸送の研究は、炭素、ネオン、アルゴンなどの低～中 Z 種に関するものにとどまっておらず (Tore Supra (フランス語で Super Torus の意、フランス) TEXTOR (Torus Experiment for Technology Oriented Research, ドイツ) LHD (Large Helical Device, 日本) などの実験)、高 Z 不純物に関しては手つかずの状態である。また、実験と数値シミュレーションとの比較によるモデルの検証についてはほとんど進んでいない。

従って、ストキャスティック磁場領域における高 Z 不純物輸送の解明は、緊急かつ重要な研究課題である。

このような背景から、ITER の運転シナリオの検討およびその後の原型炉の設計のためにも、本研究分野の重要性は今後ますます高まると予想される。

2. 研究の目的

申請者はこれまで、周辺部のストキャスティック磁場によって、高密度運転時に炭素不純物が遮蔽されることを見いだしてきた。本研究ではこれらの結果をさらに進展させ、遮蔽効果について、不純物種および各種パラメータ依存性を系統的に調べ、その結果をもとに現状の輸送モデルを検証することが目的である。これにより、ITER で計画されているストキャスティック磁場による ELM 制御時の運転シナリオ検討に不純物輸送の観点から貢献するとともに、その後の炉設計における周辺不純物制御に関する指標を与えることを最終的な目標としている。

3. 研究の方法

実験における不純物の挙動の観測には、不

純物が発する光を計測する装置を用いる。得られた実験データを、不純物輸送の数値シミュレーションから得られる発光分布と比較することにより、プラズマ中の不純物の挙動を考察し、現行の輸送モデルの検証を行う。具体的には以下の方法を用いる。

(1) 不純物発光の分布計測の増強

これまでの研究では、不純物からの発光は、空間的に 1 点あるいは 1 次元分布の計測に限られていた。本研究では、これら既存の計測器の拡張を行い、2 次元分布の計測を行う。またチャンネル数を増やして計測範囲の拡大を行う。加えて発光強度の絶対値が計測できるように分光器の較正を行う。これにより、不純物輸送の数値シミュレーションとのより詳細な比較を可能にする。

(2) 複数の計測器からのデータを解析する

不純物からの発光は、測定原理の違う計測器で観測可能である。本研究では、不純物からの発光を波長ごとに分光してそのスペクトルを計測する真空紫外、可視分光計測に加え、プラズマが発する光をほぼそのまま熱として計測するボロメータ計の両方のデータを解析に用いる。このことにより、実験データが示す不純物の挙動を多角的に考察することができる。

(3) 数値シミュレーションにおける入力パラメータの系統的なスキャン

不純物輸送の数値シミュレーションには、いくつかの入力パラメータがあり、これらは代表的な値を中心にしてある範囲で任意入力となっている。本研究では、実験とシミュレーションとの比較において、これらのパラメータを系統的に変化させ、実験データとシミュレーションが一致するパラメータの範囲を同定する。これにより、現行のモデルを用いた将来の装置の予測精度の向上を試みる。

(4) 異なる不純物種 (原子番号 Z) についての解析

これまで、主に炭素について解析を行ってきたが、原子番号 (Z) の違う不純物について比較することにより、不純物輸送の Z 依存性を調べる。このことにより、現在研究されている不純物で観測される挙動が、Z の変化、すなわち高 Z 不純物に対してどのように適用されるかの予測が可能となる。

(5) 装置間での比較

周辺部の磁場構造やプラズマパラメータは、装置によって変化する。そこで、ヘリカル型、トカマク型の様々な装置から不純物遮蔽に関するデータを集め、これらを重要であると思われるパラメータで整理する。これにより、1 つの装置では不可能であるようなより広いパラメータ領域において、不純物の輸送物理の検証を行う。

4. 研究成果

(1) 異なる不純物種 (原子番号 Z) についての解析

これまで、炭素不純物(Z=6)に関しては、外部から摂動磁場を印加することにより遮蔽効果が強まることが観測されてきた。今回は同様の実験を鉄およびヘリウムについても行った。分光計測により、鉄(Z=26)の16、17荷(Fe^{16+} , Fe^{17+})およびヘリウム(Z=2)の1荷(He^{1+})からの発光強度が摂動磁場の印加によって減少することが観測された(図1)。これらの結果はともに摂動磁場の印加によって鉄とヘリウムの不純物の遮蔽効果が強まっていることを示している。摂動磁場を印加することによって周辺部のストキャステック磁場領域の厚みが増し、そこでの遮蔽効果がより有効になるためだと考えられている。今回の実験結果はこの効果が原子番号(Z)が大きく違う不純物種に対しても発現することを示している。

また、真空紫外分光から鉄の15荷の(Fe^{15+})密度を評価し、そのプラズマ密度依存性を調べると、プラズマが高密度になるにつれて減少していく傾向が見られた。これについては、

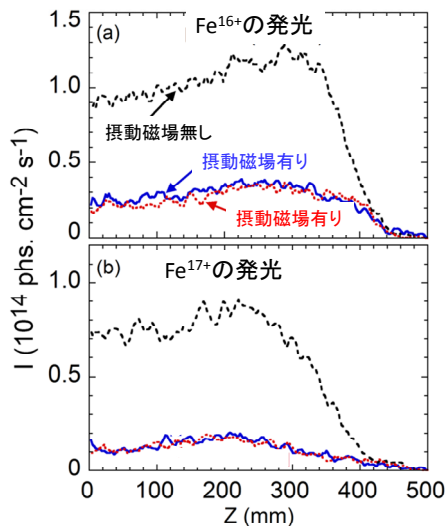


図1：摂動磁場有り無しによる鉄からの発光強度の変化。摂動磁場有りの赤・青字は摂動のトロイダル角位相を変化させたものを示している。

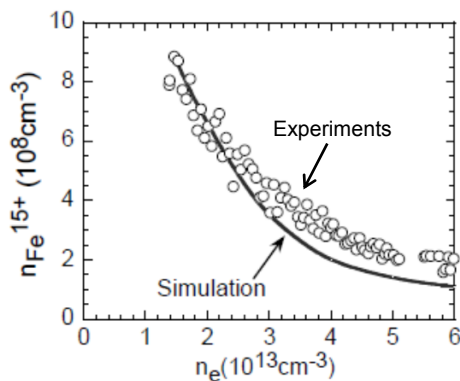


図2：真空紫外分光から評価した鉄の密度(Fe^{15+})のプラズマ密度依存性、および数値シミュレーションとの比較。

現行の輸送モデルを用いた数値シミュレーションとの比較を行い、良い一致が得られている(図2)。現行のモデルでは、このような高密度における遮蔽効果は、背景プラズマの外向きの流れと不純物の間の摩擦力によるものであると考えられている。今回の結果はこのモデルが鉄に対しても適用できることを示している。

以上、の結果から、現行の輸送モデルが炭素以外の鉄およびそれ以外の高Z不純物に対しても適用できる可能性を示している。

(2) 数値シミュレーションにおける入力パラメータの系統的なスキャン

新たに増強を行った真空紫外分光器により、不純物発光の2次元分布が絶対値として得られるようになった。この計測から、発光分布は磁力線構造に関係した特徴的なパターンを持つことが分かった(図3)。今回の研究では数値シミュレーションで分光計測と同様の視野を模擬し、両者の詳細な比較を行った。不純物輸送モデルの磁力線に平行・垂直方向の輸送係数を1桁ほど変化させた。また、不純物の発生場所をダイバータ板以外の第一壁に分布させたり、不純物の発生量を変化させ、実験で得られた2次元発光分布のパターンと強度がどのようなパラメータ設定の時に再現されるかを調べた。その結果、以下のことが分かった。

不純物輸送では、磁力線に垂直方向の輸送係数は、背景プラズマに比べて3~4倍程度大きな値の時に実験結果をよく再現する。

不純物のスパッタリング率(ダイバータや壁材料にプラズマが照射されたときの不純物の発生割合)は当初の予想よりも低く、0.5%程度かそれ以下である。

第一壁からの不純物発生量として、全体の10%程度を考慮する必要がある。

また、の結果は、ポロメータを用いたプラズマの放射分布の2次元計測と数値シミュレーションを比較した際にも同様の結果が得られていることが分かった。以上の結果は、現行の輸送モデルを将来の装置の予測

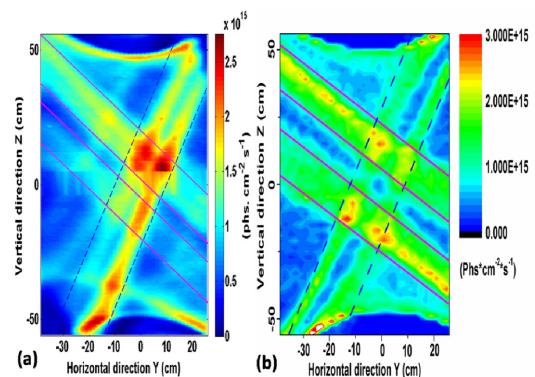


図3：炭素不純物(C^{3+})からの2次元発光分布の計測結果(a)と、数値シミュレーション(b)との比較。

に用いるときの重要な知見となる。

(3) 装置間での比較

周辺部の磁場構造やプラズマパラメータの違いを考慮して、不純物遮蔽効果について整理したものを図4に示す。不純物遮蔽が観測された場合、されなかった場合をそれぞれ青・赤で示している。また縦軸はストキャスティック層の厚み（不純物の侵入長で規格化）、横軸は背景のプラズマ流と不純物との間の摩擦力の大きさを表す。この図から、縦軸、横軸ともに大きくなるにつれて、不純物遮蔽が起こる傾向にあることがわかる。また、各装置の結果の分布から、縦軸のストキャスティック層の厚みがより重要なパラメータであることがわかった。特に、ストキャスティック層の厚みが重要なパラメータであり、不純物遮蔽が観測される場合には、この厚みが不純物の侵入長より10倍以上大きくなっていることが明らかになった。このような複数の装置にまたがるより広いパラメータ領域において、不純物遮蔽に有効なパラメータと運転領域の同定がされたのは初めての試みであり、将来の装置におけるダイバータ設計に対して、重要な知見を与える。

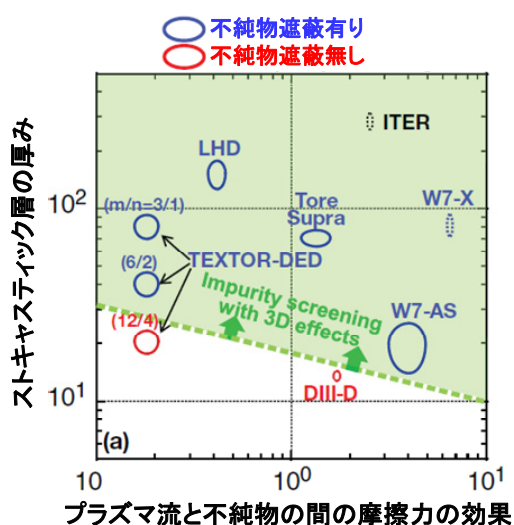


図4：不純物遮蔽効果の装置間比較。青：不純物遮蔽が観測された場合、赤：不純物遮蔽が観測されなかった場合。縦軸：ストキャスティック領域の厚み、横軸：プラズマ流と不純物との間の摩擦力の効果。

(4) 不純物の磁力線方向の流れの分布およびパラメータ依存性

新たに増強された可視分光計測を用いて、不純物からの発光分布を計測し、スペクトルのドップラーシフトからその流れの速度を評価した。その結果、不純物の流れはダイバータ板につながる磁力線の向きに対応して変化していることが観測された。また速度は

背景プラズマの音速の40~50%程度であり、低いプラズマ密度では磁力線を遡る向きに（コアプラズマに向かう向き）、高密度ではダイバータ板に向かう向きに流れることが明らかになった。このような実験結果は今回の計測で初めて得られたものである。また、輸送モデルでも同様の傾向が予測されている。今後、不純物輸送モデルの詳細な検証を可能にするものであり、極めて有意義な結果であるといえる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計11件)

Shwetang N. Pandya, Byron J. Peterson, Masahiro Kobayashi, Katsumi Ida, Kiyofumi Mukai, Ryuichi Sano, Junichi Miyazawa, Hirohiko Tanaka, Suguru Masuzaki, Tsuyoshi Akiyama, Gen Motojima, Noriyasu Ohno, LHD Experiment Group, "Dynamics of three-dimensional radiative structures during RMP assisted detached plasmas on the large helical device and its comparison with EMC3-EIRENE modeling", Nuclear Fusion, vol.56, 2016, 046002, 査読有り.

doi:10.1088/0029-5515/56/4/046002

Shuyu Dai, M. Kobayashi, G. Kawamura, S. Morita, H.M. Zhang, T. Oishi, Y. Feng, D.Z. Wang, Y. Suzuki, the LHD Experimental Group, "EMC3-EIRENE modelling of edge impurity transport in the stochastic layer of the large helical device compared with extreme ultraviolet emission measurements", Nuclear Fusion, vol.56, 2016, 066005, 査読有り.

doi:10.1088/0029-5515/56/6/066005

S. Y. Dai, M. Kobayashi, G. Kawamura, S. Morita, T. Oishi, H. M. Zhang, X. L. Huang, Y. Feng, D. Z. Wang, Y. Suzuki, the LHD experiment group, "EMC3-EIRENE simulation of impurity transport in comparison with EUV emission measurements in the stochastic layer of LHD: Effects of force balance and transport coefficients", Contributions to Plasma Physics, 掲載決定, 査読有り.

M. Kobayashi, Y. Feng, Y. Xu, F.L. Tabares, K. Ida, O. Schmitz, T.E. Evans, H. Frerichs, Y. Liang, A. Bader, K. Itoh, H. Yamada, Ph. Ghendrih, G. Ciruolo, D. Tafalla, A. Lopez-Fraguas, H.Y. Guo, Z.Y. Cui, D. Reiter, N. Asakura, U. Wenzel, S. Morita, N. Ohno, B.J. Peterson, S. Masuzaki, "Impact of 3D magnetic field structure on boundary and divertor plasmas in stellarator/heliotron devices", Journal of Nuclear Materials, vol.463,

2015, 2-10, 査読有り.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jnucmat.2015.01.011>

M. Kobayashi, Y. Xu, K. Ida, Y. Corre, Y. Feng, O. Schmitz, H. Frerichs, F.L. Tabares, T.E. Evans, J.W. Coenen, Y. Liang, A. Bader, K. Itoh, H. Yamada, Ph. Ghendrih, G. Ciruolo, D. Tafalla, A. Lopez-Fraguas, H.Y. Guo, Z.Y. Cui, D. Reiter, N. Asakura, U. Wenzel, S. Morita, N. Ohno, B.J. Peterson and S. Masuzaki, "3D effects of edge magnetic field configuration on divertor/scrape-off layer transport and optimization possibilities for a future reactor", Nuclear Fusion, vol.55, 2015, 104021, 査読有り.
doi:10.1088/0029-5515/55/10/104021

S. Morita, M. Kobayashi, T. Oishi, H.M. Zhang, M. Goto, Z.Y. Cui, C.F. Dong, L.Q. Hu, X.L. Huang, G. Kawamura, S. Masuzaki, I. Murakami, E.H. Wang, "Effect of neutral hydrogen on edge impurity behavior in stochastic magnetic field layer of Large Helical Device", Journal of Nuclear Materials, vol.463, 2015, 644-648, 査読有り.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jnucmat.2014.12.055>

Hongming ZHANG, Shigeru MORITA, Tetsutarou OISHI, Masahiro KOBAYASHI, Motoshi GOTO, Xianli HUANG, "Evaluation of Poloidal Distribution from Edge Impurity Emissions Measured at Different Toroidal Positions in Large Helical Device", Plasma and Fusion Research, vol.10, 2015, 3402038, 査読有り.
DOI: 10.1585/pfr.10.3402038

M. Kobayashi, Y. Feng, I. Yamada, H. Hayashi, G. Kawamura, "Benchmark of Monte Carlo Scheme of EMC3 Dealing with NonUniform Cross-Field Transport Coefficients and Implementation in LHD", Contributions to Plasma Physics, vol.54, 2014, 383-387, 査読有り.
doi: 10.1002/ctpp.201410015

S. Morita, E. H. Wang, M. Kobayashi, C. F. Dong, T. Oishi, Y. Feng, M. Goto, X. L. Huang, S. Masuzaki, I. Murakami, Y. Suzuki, T. Watanabe, the LHD Experiment Group, "Two-dimensional study of edge impurity transport in the Large Helical Device", Plasma Physics and Controlled Fusion, vol.56, 2014, 094007, 査読有り.
doi:10.1088/0741-3335/56/9/094007

Y. Nakamura, M. Kobayashi, S. Yoshimura, N. Tamura, M. Yoshinuma, K. Tanaka, C. Suzuki, B. J. Peterson, R. Sakamoto, T. Morisaki, the LHD Experiment Group, "Impurity shielding criteria for steady state hydrogen plasmas in the LHD, a heliotron-type device", Plasma Physics and Controlled Fusion, vol.56, 2014, 075014, 査読有り.
doi:10.1088/0741-3335/56/7/075014

S. Morita, C. F. Dong, M. Kobayashi, M. Goto, X. L. Huang, I. Murakami, T. Oishi, E. H. Wang, N. Ashikawa, K. Fujii, M. Hasuo, H. Kasahara, D. Kato, F. Koike, S. Masuzaki, H. A. Sakaue, T. Shikama, N. Yamaguchi, the LHD Experiment Group, "Effective screening of iron impurities in the ergodic layer of the Large Helical Device with a metallic first wall", Nuclear Fusion, vol.53, 2013, 093017, 査読有り.
doi:10.1088/0029-5515/53/9/093017

[学会発表](計 11 件)

小林 政弘, "Relation between hydrogen/impurity emission distributions and stochastic magnetic field structure in LHD", 第32回プラズマ・核融合学会 年会, 2015年11月24-27日, 名古屋大学東山キャンパス・豊田講堂(愛知県・名古屋市).

M. Kobayashi, "Relation between impurity/hydrogen emissions and edge stochastic magnetic structure at detachment transition observed in LHD divertor region", 20th International Stellarator-Heliotron Workshop, 2015年10月5-9日, Greifswald (Germany).

M. Kobayashi, "Effects of stochastic magnetic boundaries on divertor optimizations", 1st IAEA Technical Meeting on Divertor Concepts, 2015年9月29日-10月2日, IAEA Headquarters, Vienna (Austria).

S. Dai, "EMC3-EIRENE simulation of impurity transport in comparison with EUV emission measurements in the stochastic layer of LHD: Effects of force balance and transport coefficients", 15th International Workshop on Plasma Edge Theory in Fusion Devices, 9-11th September 2015, 奈良春日野国際フォーラム (奈良県・奈良市).

M. Kobayashi, "Transport and exhaust in helical divertors", 597th Wilhelm and Else Heraeus Seminar, Stochasticity in Fusion Plasmas, 2015年9月10-12日,

Physikzentrum Bad Honnef (Germany).

小林 政弘, “2D visible imaging spectrometer for divertor plasma in LHD”, 第31回プラズマ・核融合学会 年会, 2014年11月18-21日, 朱鷺メッセ (新潟県・新潟市).

M. Kobayashi, “3D effects of edge magnetic field configuration on divertor/SOL transport and optimization possibilities for a future reactor”, 25th IAEA Fusion Energy Conference, 13-18th October 2014, St. Petersburg (Russia).

M. Kobayashi, “Impact of 3D magnetic field structure on boundary and divertor plasmas in stellarator/heliotron devices”, 21st International Conference on Plasma Surface Interactions in Controlled Fusion Devices, 26-30th May 2014, 石川県立音楽堂 (石川県・金沢市).

小林政弘, “LHDにおける周辺部ストキャスティック領域の水素・不純物発光の2次元可視分光計測”, 第30回プラズマ・核融合学会 年会, 2013年12月3-6日, 東京工業大学 大岡山キャンパス (東京都・目黒区).

M. Kobayashi, “Benchmark of Monte Carlo Scheme of EMC3 Dealing with Non-Uniform Cross-Field Transport Coefficients and Implementation in LHD”, 14th International Workshop on Plasma Edge Theory in Fusion Devices, 23-25th September 2013, Cracow (Poland).

S. Morita, “Two-dimensional study of edge impurity transport in LHD”, Joint 19th ISHW and 16th RFP Workshop, 16-20th September 2013, Padova (Italy).

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小林 政弘 (KOBAYASHI, Masahiro)
核融合科学研究所・ヘリカル研究部・准教授
研究者番号: 30399307

(2) 研究分担者

なし。

(3) 連携研究者

森田 繁 (MORITA, Shigeru)
核融合科学研究所・ヘリカル研究部・教授
研究者番号: 80174423

後藤 基志 (GOTO, Motoshi)
核融合科学研究所・ヘリカル研究部・准教

授

研究者番号: 00290916

河村 学思 (KAWAMURA, Gakushi)
核融合科学研究所・ヘリカル研究部・助教
研究者番号: 70509520

ダイ シュウユウ (DAI, Shuyu)
核融合科学研究所・ヘリカル研究部・特任
研究員
研究者番号: 50754686

(4) 研究協力者

ファン ユウヘ (FENG, Yuehe)
マックスプランク研究所 (ドイツ) 上級研究員

シュウ ユンホン (Xu, Yuhong)
西南物理研究所 (中国) 教授

ドン チュンファン (Dong, Chunfeng)
西南物理研究所 (中国) 准教授

シュミッツ オリバー (SCHMITZ, Oliver)
ウィスコンシン大学 (アメリカ) 准教授

コレー ヤン (CORRE, Yann)
カダラッシュ研究所 (フランス)