

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 1 日現在

機関番号：15301

研究種目：新学術領域研究（研究領域提案型）

研究期間：2009～2014

課題番号：21104002

研究課題名（和文）マクロコヒーラント増幅機構を用いたニュートリノ対生成の検出

研究課題名（英文）Detection of neutrino pairs using macro coherent amplification mechanism

研究代表者

笹尾 登（SASAO, NOBORU）

岡山大学・その他部局等・特任教授

研究者番号：10115850

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 316,800,000円

研究成果の概要（和文）：「マクロコヒーラント増幅」は原子を用いたニュートリノ質量分光計画にと極めて重要な増幅機構である。本研究の最大の成果は、水素分子振動励起状態($v=1$)からの二光子放射過程を用いて原理検証実験を行い、期待通りの結果を得たことにある。具体的には、断熱ラマン過程を用いて振動励起準位に励起し、二光子コヒーラント放射が観測された。この結果自然放射過程に比較し、15桁以上の巨大な増幅効果が確認された。これにより原子を用いたニュートリノ質量分光の道を大きく切り開くことが出来た。この他、多様な原子分子を用い超放射過程の詳細研究や位相緩和の研究などニュートリノ質量分光に対する基礎研究を行った。

研究成果の概要（英文）："Macro-coherent amplification mechanism" is the crucial principle for success of the neutrino mass spectroscopy with atoms. The most important result of the present research was an experimental proof of the principle with a two photon process from the vibrationally excited state of para-hydrogen molecules. Actually, the initial coherent states were prepared by an adiabatic Raman process, and two photon emissions were observed. As a result, a gigantic enhancement factor of the photon yields greater than 15 orders of magnitude was confirmed compared to its natural emission rate; it was found consistent with the theoretical prediction. Thus a big step has been made forward towards the neutrino mass spectroscopy with atoms. In addition, detailed studies on super-radiance and phase relaxation etc. were conducted as basic studies using various atoms and molecules.

研究分野：高エネルギー物理学

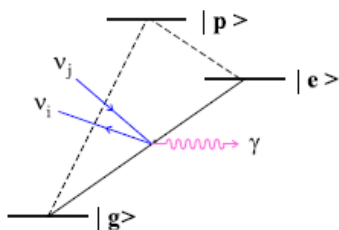
キーワード：ニュートリノ質量 マヨラナ粒子 マクロコヒーラント 超放射

1. 研究開始当初の背景

ニュートリノ実験は、高エネルギー衝突型実験と共に素粒子物理学の現代的フロンティアである。その現状を要約すると、3種類のニュートリノは互いに混合し有限の質量を持ち、その質量二乗差及び混合角はほぼ確定した、となるであろう。長足の進歩を遂げたニュートリノ物理ではあるが、未だ重要な性質が解明されていない。例えば、ニュートリノはディラック粒子なのかそれともマヨラナ粒子か、絶対質量はどうか、荷電空間対称性の破れ (CP-violation) は存在するのか？ これら疑問は実験のみが解答できる課題であり、大別すると2つの実験手段が追求されている。即ち、大強度ビームを使った高エネルギー振動実験、ニュートリノが放出されない二重ベータ崩壊実験がそれである。前者はレプトンセクターにおける小林益川型 CP 位相の測定を目指す実験であり、後者はニュートリノの質量様式(ディラック・マヨラナの区別)を確定し、絶対質量平均値を測定する実験である。本研究に於いては原子を用いるという全く新しい方法を用いて、ニュートリノの未解明の性質を探ることを目指す。

2. 研究の目的

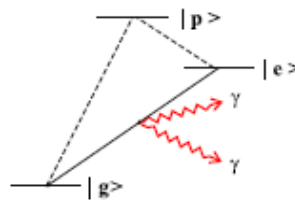
本研究では、原子からの光随伴ニュートリノ対生成過程[図1参照]を利用し、組織的なニュートリノ質量分光(即ち、質量絶対値の決定・マヨラナ/ディラック質量形式の弁別・CP非保存位相の測定等)の道を拓く。この最終目的のため、我が国発信の新原理「マクロコヒーレンス増幅機構」を確立し、利用する。この増幅機構は、励起された原子が、複数の粒子を伴って脱励起する際、ある位相条件(運動量保存と等価)が実現されると、超放射に似た、しかしより巨大な協同現象が生じ、単位時間当たりの強度が原子数(N)の二乗(N²)に比例する現象を言う。N²効果により巨大な増幅率が期待される。「マクロコヒーレント増幅機構」は、原子を用いたニュートリノ質量分光の研究を進めるに当たり、鍵を握るコンセプトである。本研究では、この新しい増幅機構の原理を二光子対超放射過程[図2参照]により実証すると共にニュートリノ質量分光に向け、様々な研究を進めることを目標としている。



[図1]光随伴ニュートリノ対生成過程(光子エネルギースペクトルを測定)

3. 研究の方法

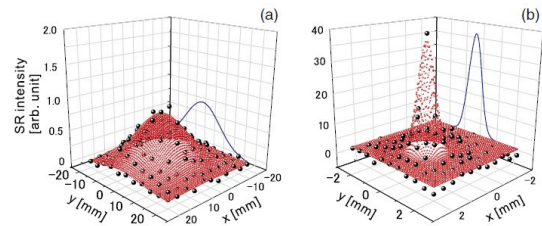
- (1) バリウム原子や水素分子などからの超放射現象を観測する。特に、二光子対超放射の理論と関連の深い現象に注目し、理論との整合性を確かめる。
- (2) 断熱ラマン励起法や超放射を用いた励起法などを精査し、その特徴及び付加されるコヒーレンスを測定する。コヒーレンスの成長を阻害する位相緩和項に関する知見を深める。
- (3) 巨視的コヒーレンスが付与された標的からの二光子対超放射過程の観測を試み、マクロコヒーレント増幅機構の実証をおこなう。
- (4) 光随伴ニュートリノ対放射過程観測に適切な標的(例えば Xe 原子)に対する基礎的データを収集する。また関連する理論研究を推進する。



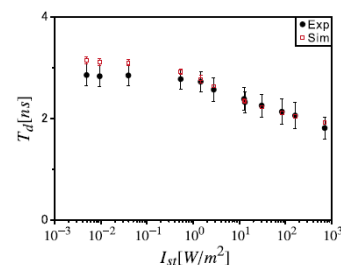
[図2]二光子放射過程(マクロコヒーレンス増幅機構を実証に用いた。)

4. 研究成果

- (1) バリウム原子を用いた超放射実験を行い、遅延時間や放射強度、放射角分布などを詳細に観測し理論の妥当性を確認した。特に外部レーザー注入により、コヒーレンス過程が誘導促進されることを確かめ、理論予想と一致する事を確認した。図3は外部レーザー注入により、超放射モードの単一化が生じていることを示す(角分布の先鋭化)、また図4は遅延時間(コヒーレンスの成長に必要な時間)が短縮される様子を示す。いずれも理論予想と一致することが分かった。[発表論文]



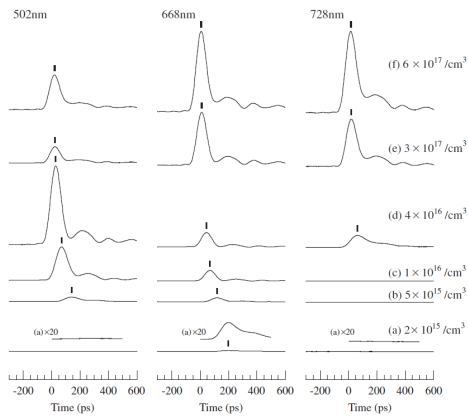
[図3]バリウム超放射の角分布。(左)外部レーザーなし、(右)外部レーザー入射。



[図4]超放射強度(縦軸)vs 入射レーザー強度(横軸)

極端紫外自由電子レーザー光(Spring-8)による励起 He 原子からの複数の超放射光を同時測定する実験(競合超放射実験)を行った。この結果、標準の超放射理論では説明不可能な事象(密度依存性が標準理論の予想と異なる逆転現象[図5参照])を観測した。またこの事実を説明する新しいモデルを構築した。

[発表論文]

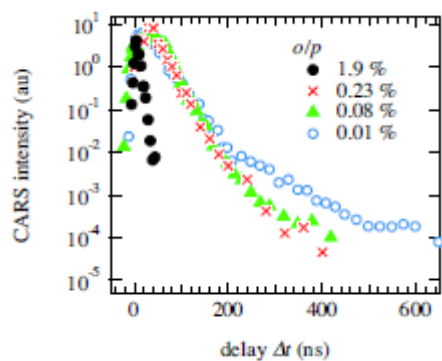


[図5] ヘリウム競合超放射の平均パルス強度測定結果。3色(波長 502nm(左)、668nm(中)、728nm(右))の超放射過程を観測(縦方向の6つの図は異なる標的密度を表す)

(2) 水素分子の振動励起状態が二光子対超放射の観測に適していることを確認した。

固体水素分子の振動励起状態の位相緩和時間を測定し、この状態が固体として異常に長い緩和時間を有することを突き止めた。図6は緩和時間測定の結果を表わす。

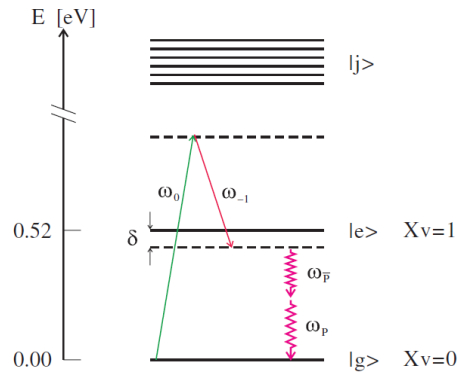
[発表論文]



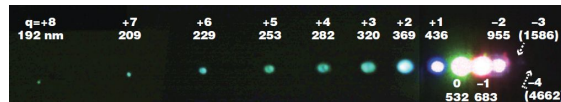
[図6] 固体パラ水素分子の緩和時間測定結果(横軸はプローブレーザー光の遅延時間、縦軸は信号強度、図中の o/p はオルソ水素とパラ水素の比率を表す。)この結果、純度の高いパラ水素の振動励起状態は長いコヒーランス時間(50nsec)を持つことが判明した。

断熱ラマン過程を用い(図7参照)、水素分子標の全体にコヒーランスを付与しつつ、基底状態($v=0$)から振動状態($v=1$)に励起することに成功した。図8は高次のストークス光及び反ストークス光を示す写真であり、大きなコヒーランス生じていることを示す。

[発表論文]



[図7] 水素分子振動準位と断熱ラマン過程(二色のレーザー(ω_0 と ω_{-1})を同時入射することにより $v=1$ 状態に励起)



[図8] 観測された高次ラマン光。最低次のストークス光は $q = -4$ 、また最高次の反ストークス光は $q = +8$ である。シミュレーションとの比較により理論的最大値の約 6% のコヒーランスが生じていることが確認された。

(3) 続いて水素分子振動励起状態($v=1$)からの二光子対超放射実験を行い、コヒーラント二光子カスケード過程の観測に成功した。図7に於ける ω_p とその対であり、各々の波長は $4.66 \mu\text{m}$ 及び $4.96 \mu\text{m}$ である。図9は二光子対の観測スペクトルを示す。自然放射二光子過程に比較し、この過程は 15 桁以上の高い頻度で起っている。また二光子対超放射の理論が予言する頻度にも一致し、マクロコヒーランス増幅機構の実験的検証となっている。マクロコヒーランス増幅機構は原子を用いたニュートリノ質量分光にとり核心的な増幅原理である。これにより原子を用いたニュートリノ質量分光の道を大きく切り開くことが出来た。

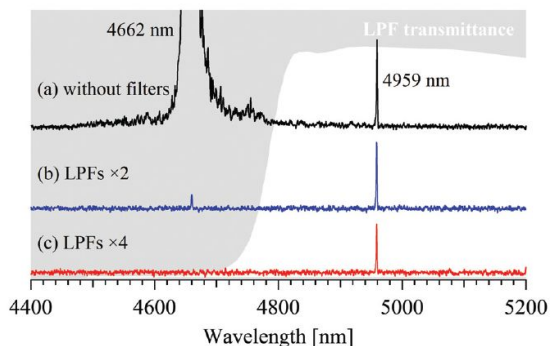
[発表論文]

(4) Xe 原子は光随伴ニュートリノ対放射過程観測に適切な標的である。準安定状態を生成することに成功した。またニュートリノ質量分光に繋がる基礎実験を遂行した。

[発表論文⑤⑪⑬⑳]

更に関連する理論を構築した。

[発表論文②⑥⑦⑨⑩⑭⑰⑲⑳㉑㉒㉓㉔㉕]



[図9]コヒーレント二光子(4.66 μm 及び4.96 μm)カスケード過程を示すスペクトル。縦軸は放射強度であり横軸は波長を表す。青線はフィルターなし(4.70 μm 以上の長波長を透過)、赤線はフィルターあり。

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35件)

K.Nakajima, J.R.Harries, H.Iwayama, S.Kuma, Y.Miyamoto, M.Nagasono, C.Ohae, T.Togashi, M.Yabashi, E.Shigemasa, and N.Sasao "Simultaneous Measurements of Super-Radiance at Multiple Wavelengths from Helium Excited States: I. Experiment" *J.Phys.Soc.Jpn.*, 査読有, Vol.84(2015), pp.054301(1-7), DOI:10.7566/JPSJ.84.054301

M.Yoshimura, N.Sasao, and M.Tanaka "Experimental method of detecting relic neutrino by atomic de-excitation" *Phys.Rev.D.*, 査読有, Vol.91(2015), pp.063516(1-6), DOI:10.1103/PhysRevD.91.063516

Y.Miyamoto, N.Sasao(12名中7番目) "Observation of coherent two-photon emission from the first vibrationally excited state of hydrogen molecules" *Prog.Theor.Exp.Phys.*, 査読有, Vol.2014(2014)pp.113C01(1-12), 10.1093/ptep/ptu152

植竹智, 笹尾登(4名中4番目) "原子を用いたニュートリノ質量分光-その現状と将来の展望-" *高エネルギーニュース*, 査読有, 33巻(2014)pp.99-107 <http://www.jahep.org/hepnews/2014/14-2-5-SPAN.pdf>

T.Wakabayashi, 他9名 "Low-Lying Electronic States in Bismuth Trimer Bi₃ as Revealed by Laser Induced NIR Emission Spectroscopy in Solid Ne" *J.Phys.Chem.A*, 査読有, Vol.119(2014), pp.2644-2650, 10.1021/jp509714f

M.Yoshimura, N.Sasao, and S.Uetake "Parity violating radiative emission

of neutrino pairs in heavy alkaline earth atoms of even isotopes" *Phys.Rev.D*, 査読有, Vol.90(2014), pp.013022(1-12), 10.1103/PhysRevD.90.013022

M.Yoshimura and N.Sasao "Two-photon paired solitons supported by medium polarization" *Prog.Theor.Exp.Phys.*, 査読有, Vol.2014(2014), pp.073B02(1-14) 10.1093/ptep/ptu094

C.Ohae, N.Sasao(13名中8番目)

"Production of Ba Metastable State via Super-Radiance" *Journal of the Physical Society of Japan*, 査読有, Vol.83(2014), pp.044301(1-9) 10.75666/JPSJ.83.044301

M.Tashiro, N.Sasao(7名中5番目)

"Iodine molecule for neutrino mass spectroscopy: ab initio calculation of spectral rate" *Progress of Theoretical and Experimental Physics*, 査読有, Vol.2014(2014), pp.013B02(1-21), 10.1093/ptep/ptt118

M.Yoshimura and N.Sasao "Radiative emission of neutrino pair from nucleus and inner core electrons in heavy atoms" *Physical Review D*, 査読有, Vol.89(2014) pp.053013(1-8), 10.1103/PhysRevD.89.053013

S.Kuma, N.Sasao(5名中4番目)

"4.8 μm difference-frequency generation using a waveguide-PPLN crystal and its application to mid-infrared Lamb-dip spectroscopy" *Opt.Lett.*, 査読有, Vol.38(2013), pp.2825-2828, 10.1364/OL.38.002825

M.Hase, M.Katsuragwa(4名中2番目)

"Coherent phonon induced optical modulation in semiconductors at terahertz frequencies" *New Journal of Physics*, 査読有, Vol.15(2013), pp.055018(1-16), 10.1088/1367-2630/15/5/055018

T.Wakabayashi, 他3名 "Vibronic bands in the HOMO-LUMO excitation of linear polyene molecules" *Journal of Physics: Conference Series*, 査読有, Vol.428(2013), pp.012004(1-13), 10.1088/1742-6596/428/1/012004

D.N.Dinh, N.Sasao, (5名中3番目)

"Observables in Neutrino Mass Spectroscopy Using Atoms" *Physics Letters B*, 査読有, Vol.719(2013), pp.154-163, 10.1016/j.physletb.2013.01.015

S.Kuma, N.Sasao(14名中7番目)

- “ Coherence decay measurement of $v = 2$ vibrons in solid parahydrogen ” J. Chem. Phys., 査読有, Vol.138(2013), pp.024507(1-6), 10.1063/1.4773893
T.Wakabayashi, N.Sasao, (12名中8番目)
 “ Observation of new near infrared emission band systems of small bismuth clusters in solid neon matrix ” The European Physical Journal D, 査読有, Vol.67(2013) pp.36(1-7), 10.1140/epjd/e2012-30529-x
 K.Yoshii, J.K.Anthony, and M.Katsuragawa “ The simplest rout to generating a train of attosecond pulses ” Light: Science & Applications, 査読有, Vol.2(2013), e58, 10.1038/lsa.2013.14.
M.Katsuragawa, T.Suzuki, and K.R.Pandiri “ Generation of trains of arbitrary waveforms and their repeated revivals ” European Physical Journal, 査読有, Vol.41(2013), pp.11008(1-3), 10.1051/epjconf/20134111008
 K.Yoshii, J.K.Anthony, and M.Katsuragawa “ The Simplest Method for Generation of an Attosecond Pulse Train ” The European Physical Journal, 査読有, Vol.41(2013), pp.01010(1-3), 10.1051/epjconf/20134101010
 M.Hase, M.Katsuragawa (4名中2番目), “ Coherent phonon frequency comb generated by few-cycle femtosecond pulses in Si ” The European Physical Journal, 査読有, Vol.41(2013), p.4020, 10.1051/epjconf/20134104020
- ②① M.Yoshimura, N.Sasao and M.Tanaka “ Dynamics of two-photon paired superradiance ” Phys Rev A., 査読有, Vol.86 (2012), pp. 013812(1-14), 10.1103/PhysRevA.86.013812
- ②② A.Fukumi, N.Sasao (15 名中 8 番目) , “ Neutrino Spectroscopy with Atoms and Molecules ” Prog.Theor.Exp.Phys, 査読有, Vol.2012 (2012), pp.04D002(1-79), 10.1093/ptep/pts066
- ②③ Y.Wada, T.Wakabayashi (5名中5番目) “ Photoinduced reaction of methylpolyynes $H(C \equiv C)_nCH_3$ ($n=5-7$) and polyynes $H(C \equiv C)_5H$ with I_2 molecules ” The European Physical Journal D, 査読有, Vol.66(2012), pp.322(1-6), 10.1140/epjd/e2012-30545-x
- ②④ Y.Wada, Y.Morisawa, and T.Wakabayashi, “ Spectroscopic characterization of a series of polyynes-iodine molecular complexes $H(C \equiv C)_nH(I_6)$ of $n=5-9$ ” Chemical Physics Letters, 査読有, Vol.541(2012), pp.54-59, 10.1016/j.cplett.2012.05.035
- ②⑤ T.Wakabayashi, 他3名 “ Isotope scrambling in the formation of cyanopolyynes by laser ablation of carbon particles in liquid acetonitrile ” Carbon, 査読有, Vol.50(2012), pp.47-56, 10.1016/j.carbon.2011.07.053
- ②⑥ M.Hase, M.Katsuragawa (4名中2番目), “ Frequency comb generation at THz frequencies by coherent phonon excitation in Si ” Nature Photonics, 査読有, Vol.6(2012), pp243-247, 10.1038/nphoton.2012.35
- ②⑦ Y.Wada, T.Wakabayashi, and T.Kato “ Photoinduced Reaction of Hydrogen-End-Capped Polyynes with Iodine Molecules ” The Journal of Physical Chemistry B, 査読有, Vol.115(2011), pp.8439-8445, 10.1021/jp203074r
- ②⑧ Y.Miyamoto, N.Sasao (10名中7番目) “ Spectroscopy of HF and HF containing clusters in solid parahydrogen ” J.Phys.Chem.A, 査読有, Vol.115(2011), pp.14254-14261, 10.1021/jp207419m
- ②⑨ M.Yoshimura “ Light Propagation and Paired Superradiance in Coherent Medium ” Progress of Theoretical Physics, 査読有, Vol.125(2011), pp.149-186, 10.1143/PTP.125.149
- ③⑩ M.Yoshimura “ Solitons and Precision Neutrino Mass Spectroscopy ” Phys.Lett.B, 査読有, Vol.699(2011)pp.123-128, 10.1016/j.physletb.2011.03.058
- ③⑪ M.Yoshimura, N.Sasao (4名中3番目) “ Parity violating observables in radiative neutrino pair emission from metastable atoms ” Progress of Theoretical Physics, 査読有, Vol.123(2010), pp.523-532, 10.1143/PTP.123.523
- [学会発表] (計 104 件)
- M.Yoshimura “ Towards neutrino mass spectroscopy using atoms: theoretical aspects ” (招待講演) the Fourth Users Meeting of the Spanish Pulsed Lasers Center, 2014年12月2日 Salamanca(Spain)
A.Yoshimi “ Towards neutrino mass spectroscopy using atoms: experimental aspects ” (招待講演) the Fourth Users Meeting of the Spanish Pulsed Lasers Center, 2014年12月2日 Salamanca(Spain)
 T.Masuda “ Rate amplification of the two photon emission from para-hydrogen

toward the neutrino mass measurement ”
TCP2014, 6th International Conference
on Trapped Charged Particle and
Fundamental Physics, 2014年12月1日,
Sunport Hall Takamatsu Kagawa
International Conference Hall
(Takamatsu, Kagawa)

S.Uetake “ Observation of Paired
Superradiance ”

ICAP, The 24th International Conference
on Atomic Physics, 2014年8月4日,
Washington DC(USA)

K.Yoshimura “ A search for ultra-low
energy nuclear isomer state of
Thorium-229-New method using
synchrotron radiation X-ray source- ”
ICAP, The 24th International Conference
on Atomic Physics, 2014年8月4日,
Washington DC(USA)

M.Yoshimura “ Neutrino mass spectroscopy
using atoms/molecules ” (招待講演)
NuMass2013, 2013年02月05日

Milan(Italy)

N.Sasao “ Neutrino spectroscopy with
atoms and molecules-A general
overview- ” (招待講演)

Interdisciplinary Workshop on Quantum
Device-through Mathematical Structure-
2013年01月15日 国立情報学研究所(東京
都)

N.Sasao “ Neutrino spectroscopy with
atoms ” (招待講演) 2012年6月8日 The
25th International Conference on
Neutrino Physics and Astrophysics, 京都
テルサ(京都府京都市)

T.Wakabayashi “ Optical transition of
bismuth atoms in solid neon matrix ” (招
待講演) MATRIX 2011, 2011年7月11日-2011
年7月15日, Vancouver (Canada)

N.Sasao “ From paired super-radiance to
neutrino mass spectroscopy using
atoms ” XIV International Workshop on
“ Neutrino Telescopes ”

2011年3月15-18日, Venice(Italy)

[図書](計1件)

[その他]

ホームページ

<http://xqw.hep.okayama-u.ac.jp/kakenhi/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

笹尾 登 (SASAO NOBORU)

岡山大学・極限量子研究コア・特任教授
研究者番号: 10115850

(2) 研究分担者

中野 逸夫 (NAKANO ITSUO)

(平成21年度～平成24年度)

岡山大学・大学院自然科学研究科・教授
研究者番号: 90133024

吉村 太彦 (YOSHIMURA MOTOHIKO)

岡山大学・理学部・特任教授

研究者番号: 70108447

福見 敦 (FUKUMI ATSUSHI)

川崎医療短期大学・放射線技術科・講師

研究者番号: 40426656

若林 知成 (WAKABAYASHI TOMONARI)

近畿大学・理工学部・教授

研究者番号: 30273428

田中 実 (TANAKA MINORU)

大阪大学・大学院理学研究科・助教

研究者番号: 70273729

桂川 眞幸 (KATSURAGAWA MASAYUKI)

(平成23年12月～)

電気通信大学・大学院情報理工学研究科・教授

研究者番号: 10251711

(3) 連携研究者

南條 創 (NANJO HAJIME)

京都大学・大学院理学研究科・助教

研究者番号: 40419445

川口 建太郎 (KAWAGUCHI KENTAROU)

岡山大学・大学院自然科学研究科・教授

研究者番号: 40158861

唐 健 (TANG JIAN)

岡山大学・大学院自然科学研究科・准教授

研究者番号: 40379706

久保園 芳博 (KUBOZONO YOSHIHIRO)

岡山大学・大学院自然科学研究科・教授

研究者番号: 80221935

谷垣 勝己 (TANIGAKI KATSUMI)

東北大学・大学院理学研究科・教授

研究者番号: 60305612

中嶋 亨 (NAKAJIMA KYO)

岡山大学・極限量子研究コア・助教

研究者番号: 80400240

吉村 浩司 (YOSHIMURA KOJI)

岡山大学・極限量子研究コア・教授

研究者番号: 50272464

吉見 彰洋 (YOSHIMI AKIHIRO)

岡山大学・極限量子研究コア・准教授

研究者番号: 40333314

植竹 智 (UETAKE SATOSHI)

岡山大学・大学院自然科学研究科・准教授

研究者番号: 80514778

久間 晋 (KUMA SUSUMU)

岡山大学・極限量子研究コア・助教

研究者番号: 50600045

谷口 敬 (TANIGUCHI TAKASHI)

岡山大学・極限量子研究コア・准教授

研究者番号: 60163630