

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 16 日現在

機関番号：15301

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2009～2013

課題番号：21244032

研究課題名(和文)マクロコヒーラント増幅機構と二光子超放射過程の実験的研究

研究課題名(英文)Experimental studies on the macro-coherent amplification mechanism and two-photon paired super-radiance

研究代表者

笹尾 登 (Sasao, Noboru)

岡山大学・その他部局等・教授

研究者番号：10115850

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 35,000,000円、(間接経費) 10,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、新しい量子干渉効果であるマクロコヒーラント増幅機構を実験的に証明することを目的とする。マクロコヒーラント増幅機構が働くと二光子過程等の稀過程は増幅されると予想される。そこで断熱ラマン過程を用い、水素分子の振動励起状態を生成し二光子過程を観測した。その結果、提唱された理論が予言する増幅過程を観測することに成功し、当該理論の妥当性を確認することに成功した。

研究成果の概要(英文)：The present research aims at proving experimentally the macro-coherent amplification mechanism that is a new class of coherent and cooperative phenomena similar to the super-radiance. When such an amplification mechanism works for a two-photon deexcitation process, for example, its rate is expected to be amplified. In our experiment, we prepared the vibrational excited states of hydrogen gas by adiabatic Raman scatterings, and observed the two photon cascade process. As a result we found that the rate of the observed process is amplified as the initial coherence increases and that its amplification factor agrees with the theoretical expectation. We have thus established the validity of macro-coherent amplification mechanism.

研究分野：数物系

科研費の分科・細目：素粒子

キーワード：マクロコヒーランス 超放射 二光子超放射 ニュートリノ質量分光

1. 研究開始当初の背景

(1) 原子集団(又は分子集団)が光を放出しながら脱励起するとき、光波長程度内にある集団は量子コヒーレント状態を形成する可能性を有する。コヒーレント状態が実現すると、脱励起過程のレートは関与する原子の二乗(N^2)に比例するようになり、当該過程は加速する。この現象は Dicke (Phys. Rev. 93, (1954) 99) により予言され、超放射現象と命名された。その後、多数の実験的・理論的研究により確立された現象となっている。

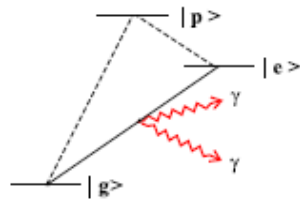


図1 二光子対超放射過程

(2) 我々は一光子脱励起過程ではなく、二光子放射過程(図1参照)や光随伴ニュートリノ対放射過程(図2参照)に対しても、放射される粒子の運動量配位が特殊な条件を満たすとき、注目する過程の増幅因子は巨大となることを発見した。〔論文発表〕この増幅機構(マクロコヒーレント増幅機構と呼ぶ)は、従来の超放射のコヒーランス領域が放射光波長程度に制約されるのに対し、その限界を突破する可能性を持つ。

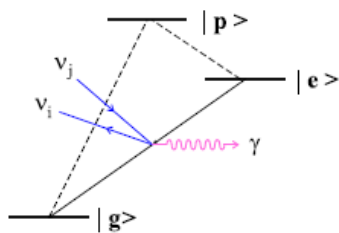


図2 光随伴ニュートリノ対放射過程

(3) この機構を用いることにより、増幅なしには観測不可能な超稀現象の観測が可能になり得る。我々の知る限り過去にはこの増幅機構に対する理論及び実験的研究は存在せず、マクロコヒーレント増幅機構の実験的検証が喫緊の課題となっていた。

2. 研究の目的

本研究の目的は、マクロコヒーレント増幅機構に対する、二光子対超放射過程を用いた実証である。より具体的には、(1) 二光子対超放射を念頭においた超放射の観測と理論との比較、(2) 標的への巨視的コヒーランスの付与方法確立、(3) 巨視的コヒーランスが付与された標的からの二光子超放射過程の観測とマクロコヒーレント増幅機構の実証、(4) 光随伴ニュートリノ対放射過程に対する基礎的データの収集、等である。

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ランスを測定する。コヒーラ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) 巨視的コヒーラ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。

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、コヒーラ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(コヒーラ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。

〔論文発表〕〔学会発表④⑩⑰⑳〕

極端紫外自由電子レーザー光による励起 He 原子からの競合超放射実験を行った。この結果、旧来の理論では説明不可能な事が判

明し、新たな理論構築を目指している。

〔学会発表 〕

ビスマス導入マトリックスの吸収分光を進め、新たに発光バンドを3本発見し同定することに成功した。

〔論文発表 〕〔学会発表 〕

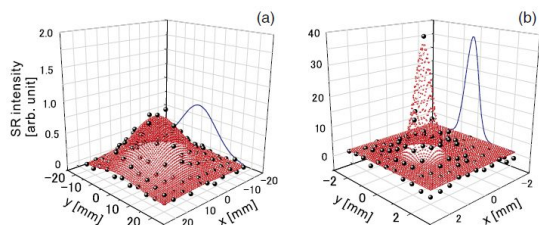


図3 超放射角分布：外部レーザー入射無し(a)と有り(b)の比較。スケール変化に注意。

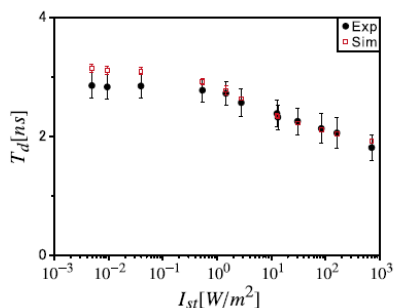


図4 超放射遅延時間 vs 外部レーザー入射強度 (実験値は黒丸、理論は赤抜き)

(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。即ち

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5は緩和時間測定の結果を表わす。

〔論文発表 〕

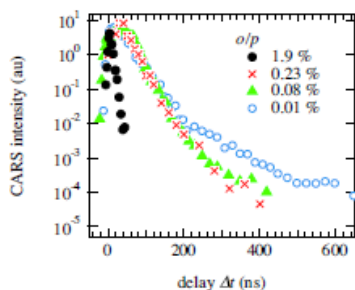


図5 パラ水素(v=2)位相緩和時間測定結果 o/p はオルソ水素パラ水素の比を表わす。オルソは、緩和時間を早めることが判明。

断熱ラマン過程を用い、水素分子標的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5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。〔学会発表 〕

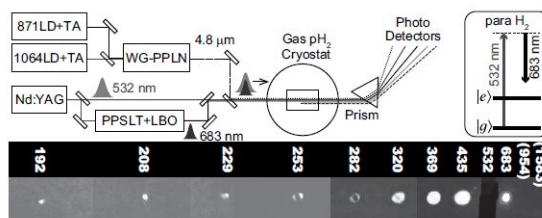


図5 水素分子振動準位からの二光子対超放射実験セットアップ。右上は準位と励起スキーム、下は高次の Stokes/Anti-Stokes 光発光スペクトル。

(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6は二光子対(4.66um 及び 4.96um の波長を持つ)の観測スペクトルを示す。この過程は自然放射二光子過程に比較し、19桁以上の高い頻度で起っていることが確認されている。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。〔学会発表 〕

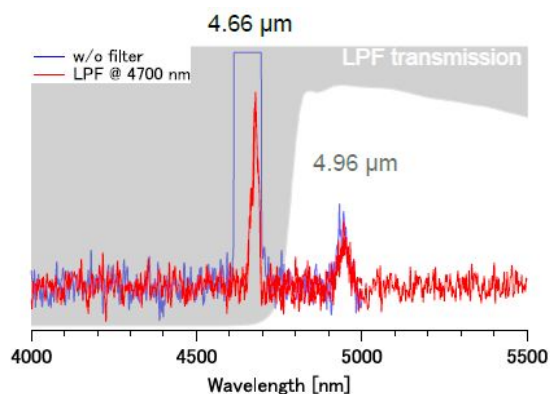


図6 コヒーラント二光子(4.66um 及び 4.96um)カスケード過程を示すスペクトル。横軸は波長、縦軸は放射強度。青線はフィルターなし(4.70um 以上の長波長を透過)、赤線はフィルターあり。

(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。また関連する理論を構築した。〔論文発表〕

〔学会発表①③⑧⑭⑯⑲⑳㉑㉒〕

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 17 件)

C. Ohae, A. Fukumi, S. Kuma, Y. Miyamoto, K. Nakajima, I. Nakano, H. Nanjo, N. Sasao, S. Uetake, T. Wakabayashi, A. Yoshimi, K. Yoshimura, M. Yoshimura “Production of Ba Metastable State via Super-Radiance” Journal of the Physical Society of Japan, 査読有, Vol. 83, 2014, 044301(1-9)
DOI: <http://dx.doi.org/10.7566/JPSJ.83.044301>

M. Tashiro, M. Ehara, S. Kuma, Y. Miyamoto, N. Sasao, S. Uetake, M. Yoshimura “Iodine molecule for neutrino mass spectroscopy: ab initio calculation of spectral rate” Progress of Theoretical and Experimental Physics, 査読有 Vol. 2014, 2014, 013B02(1-21),
DOI: [10.1093/ptep/ptt118](https://doi.org/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, 053013(1-8)/
arXiv, 査読無, 2013, DOI: [1310.6472\(1-10\)](https://doi.org/10.1310.6472(1-10)),

S. Kuma, Y. Miyamoto, K. Tsutsumi, N. Sasao, and S. Uetake “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, 2825-2828
DOI: [10.1364/OL.38.002825](https://doi.org/10.1364/OL.38.002825)

D.N.Dinh, S.T.Petcov, N. Sasao, M. Tanaka and M. Yoshimura “Observables in Neutrino Mass Spectroscopy Using Atoms” Physics Letters B, 査読有, Vol. 719, 2013, 154-163
DOI: [10.1016/j.physletb.2013.01.015](https://doi.org/10.1016/j.physletb.2013.01.015)

S.Kuma, Y.Miyamoto, K.Nakajima, A.Fukumi, K.Kawaguchi, I.Nakano, N. Sasao, M.Tanaka, J.Tang, T.Taniguchi, S.Uetake, T. Wakabayashi, A.Yoshimi and M. Yoshimura “Coherence decay measurement of $\nu=2$ vibrons in solid parahydrogen” J. Chem. Phys., 査読有, Vol. 138, 2013, 024507(1-6), DOI: [10.1063/1.4773893](https://doi.org/10.1063/1.4773893)

T. Wakabayashi, M.Tomioka, Y.Wada, Y.Miyamoto, J.Tang, K.Kawaguchi, S.Kuma, N. Sasao, H. Nanjo, S.Uetake, M. Yoshimura and I.Nakano “Observation of near infrared emission band systems of small bismuth clusters in solid neon matrix” The European Physical Journal D, 査読有, Vol. 67, 2013, 36(1-7)
DOI: [10.1140/epjd/e2012-30529-x](https://doi.org/10.1140/epjd/e2012-30529-x)

T. Wakabayashi, Y.Wada, N.Iwahara and T.Sato “Vibronic bands in the HOMO-LUMO excitation of linear polyyne molecules” Journal of Physics: Conference Series, 査読有, Vol. 428, 2013, 012004(1-13)
DOI: [10.1088/1742/6596/428/1/012004](https://doi.org/10.1088/1742/6596/428/1/012004)

A.Fukumi, S.Kuma, Y.Miyamoto, K.Nakajima, I.Nakano, H. Nanjo, C.Ohae, N. Sasao, M.Tanaka, T.Taniguchi, S.Uetake, T. Wakabayashi, T.Yamaguchi, A.Yoshimi and M. Yoshimura “Neutrino spectroscopy with atoms and molecules” Progress of Theoretical and Experimental Physics (PTEP) 査読有, Vol. 2012, 2012, 04D002(1-79)
DOI: [10.1093/ptep/pts066](https://doi.org/10.1093/ptep/pts066)

M. Yoshimura, N. Sasao and M.Tanaka, “Dynamics of two-photon paired superradiance” Phys Rev A., 査読有, Vol. 86, 2012, 013812(1-14)
DOI: [10.1103/PhysRevA.86.013812](https://doi.org/10.1103/PhysRevA.86.013812)

Y.Wada, K.Koma, Y.Ohnishi, Y.Sasaki and T. Wakabayashi “Photoinduced reaction of methylpolyynes $\text{H}(\text{C}-\text{C})_n\text{CH}_3$ ($n=3-7$) and polyyne $\text{H}(\text{C}-\text{C})_5\text{H}$ with I_2 molecules” The European Physical Journal D, 査読有, Vol. 66, 2012, 322(1-6)
DOI: [10.1140/epjd/e2012-30545-x](https://doi.org/10.1140/epjd/e2012-30545-x)

S.Kuma, Y.Miyamoto, C.Ohae, K.Nakajima, A.Fukumi, K.Kawaguchi, T.Momose, I.Nakano, N. Sasao, M.Tanaka, J.Tang, T.Taniguchi, S.Uetake, T. Wakabayashi, T.Yamaguchi, A.Yoshimi, M. Yoshimura and K.Yuasa “Paired Superradiance Experiments” Proceedings of 5th International Workshop on Fundamental Physics Using Atoms 2011, 査読無, Vol. 2012, 2012, 37-40

C.Ohae, A.Fukumi, S.Kuma, K.Nakajima, I.Nakano, N.Sasao, M.Tanaka, S.Uetake, T.Yamaguchi, M.Yoshimura and K.Yuasa
“Search for Paired Superradiance Using Metastable State of Atomic Barium”
Proceedings of 5th International Workshop on Fundamental Physics Using Atoms 2011, 査読無, Vol.2012, 2012, 143-145

Y.Miyamoto, H.Ooe, S.Kuma, K.Kawaguchi, K.Nakajima, I.Nakano, N.Sasao, J.Tang, T.Taniguchi and M.Yoshimura “Spectroscopy of HF and HF containing clusters in solid parahydrogen”
J.Phys.Chem.A, 査読有, Vol.115,2011, 14254-14261 DOI: 10.1021/jp207419m

M.Yoshimura “Light Propagation and Paired Superradiance in Coherent Medium”
Progr. Theor. Phys., 査読有, Vol. 125,2011,149-186
DOI:10.1143/PTP.125.149

M.Yoshimura “Solitons and Precision Neutrino Mass Spectroscopy” Phys.Lett.B, 査読有, Vol.699, 2011, 123-128
DOI:http://dx.doi.org/10.1016/j.physletb.2011.03.058

M.Yoshimura, A.Fukumi, N.Sasao and T.Yamaguchi, “Parity violating observables in radiative neutrino pair emission from metastable atoms”
Progress of Theoretical Physics, 査読有, Vol.123, 2010, 523-532
DOI :10.1143/PTP.123.523

[学会発表](計 34 件)

N.Sasao “Neutrino spectroscopy with atoms” 7th International Workshop on Fundamental Physics Using Atoms
2014 年 3 月 14 日 日本科学未来館(東京都)

T.Wakabayashi “Dressed-State Approach to the Excitation of He atoms by Intense EUV Laser Fields Followed by Superradiance” 7th International Workshop on Fundamental Physics Using Atoms
2014 年 3 月 14 日 ~ 15 日
日本科学未来館(東京都)

D.N.Dinh, S.T.Petcov, 笹尾登, 田中実, 吉村太彦 “Observables in Neutrino Mass Spectroscopy Using Atoms” 日本物理学会第 68 回年次大会 2013 年 3 月 26 日 ~ 29 日
広島大学(広島県)

大饗千彰, 植竹智, 久間晋, 笹尾登, 高橋弘紀, 田中実, 中嶋享, 中島優夢, 中野逸夫, 南條創 “バリウム原子準安定状態を用いた対超放射実験” 日本物理学会第 68 回年次大会
2013 年 3 月 26 日 ~ 29 日 広島大学(広島県)

中嶋享, 福見敦, 岩山洋士, 川口建太郎, 久間晋, 宮本祐樹, 中野逸夫, 中島優夢, 南條創 “極端紫外自由電子レーザー光による励起 He 原子からの分岐超放射の同時測定”
日本物理学会第 68 回年次大会 2013 年 3 月 26 日 ~ 29 日 広島大学(広島県)

若林知成, 富岡万貴子, 宮本祐樹, 久間晋, 川口建太郎 “固体ネオンマトリックス中におけるピスマスクラスターの近赤外発光スペクトル” 日本化学会第 93 春季年会 2013 年 3 月 25 日 立命館大学びわこ・くさつキャンパス(滋賀県)

若林知成 “活性分子の電子遷移 振電相互作用とスピン軌道相互作用をめぐって-” 日本分光学会関西支部平成 24 年度講演会(招待講演)2013 年 3 月 4 日 近畿大学(大阪府)

Noboru Sasao “Neutrino spectroscopy with atoms and molecules -A general overview-”
Interdisciplinary Workshop on Quantum Device-through Mathematical Structure-(招待講演) 2013 年 1 月 15 日
国立情報学研究所(東京都)

岡林裕介, 唐健, 川口建太郎, 久間晋, 笹尾登, 谷口敬, 中嶋享, 中野逸夫, 宮本祐樹, 吉村太彦, 金森英人 “cw-OP0 赤外レーザーによる CH₃ 分子のコヒーレント過渡現象の観測”
日本化学会西日本大会 2012 年 11 月 10 日
佐賀大学(佐賀県)

大饗千彰, 植竹智, 久間晋, 笹尾登, 高橋弘紀, 田中実, 中嶋享, 中島優夢, 中野逸夫, 南條創, 福見敦, 山口琢也, 湯浅一生, 吉見彰洋, 吉村太彦 “バリウム原子準安定状態を用いた対超放射実験” 日本物理学会 2012 年秋季大会 2012 年 9 月 11 日 ~ 14 日
京都産業大学(京都府)

Y.Wada, T.Wakabayashi ほか 3 名
“Photoinduced reaction of polyynederivatives and iodine molecules” 16th International Symposium on Small Particles and Inorganic Clusters (ISSPIC XVI) 2012 年 7 月 12 日
ルーヴェン・カトリック大学(ベルギー)

T.Wakabayashi ほか 9 名 “Spectroscopy of bismuth atoms and clusters embedded in solid neon matrices” 16th International Symposium on Small Particles and Inorganic

Clusters (ISSPIC XVI) 2012年7月10日
ルーヴェン・カトリック大学(ベルギー)

H.Ooe, Y.Miyamoto, J.Tang, K.Kawaguchi,
S.Kuma, K.Nakajima, N.Sasao, T.Taniguchi,
I.Nakano and M.Yoshimura
“Diffusion of hydrogen fluoride in solid
parahydrogen” 67th Ohio State University
international symposium on molecular
spectroscopy 2012年6月18日
Ohio State University (Columbus, USA)

Noboru Sasao “Neutrino spectroscopy
with atoms” The 25th International
Conference on Neutrino Physics and
Astrophysics(招待講演)
2012年6月6日~9日 京都テルサ(京都府)

大江裕公, 宮本祐樹, 唐健, 川口建太郎, 久
間晋, 笹尾登, 谷口敬, 中嶋享, 中野逸夫, 吉村
太彦 「固体パラ水素中のフッ化水素の拡散」
第12回分子分光研究会 2012年5月19日
上智大学(東京都)

吉村太彦, 笹尾登, 田中実 「対超放射のダイ
ナミクス」日本物理学会第67回年次大会
2012年3月27日 関西学院大学(兵庫県)

大饗千彰, 植竹智, 久間晋, 笹尾登, 田中実,
中嶋享, 中野逸夫, 南條創, 福見敦, 山口琢也,
湯浅一生, 吉見彰洋, 吉村太彦 「バリウム原子
準安定状態を用いた対超放射探索実験」日本
物理学会第67回年次大会 2012年3月27日
関西学院大学(兵庫県)

若林知成, 富岡万貴子, 山口琢也, 久間晋,
宮本祐樹, 中嶋享, 植竹智, 大饗千彰, 川口建
太郎, 笹尾登, 田中実, 唐健, 中野逸夫, 南條創,
福見敦, 百瀬孝昌, 吉見彰洋, 吉村太彦
「固体ネオンマトリクス中における Bi 原子
および Yb 原子の発光スペクトル」日本物理
学会第67回年次大会 2012年3月27日
関西学院大学(兵庫県)

吉村太彦, 大饗千彰, 川口建太郎, 久間晋,
谷口敬, 唐健, 中嶋享, 中野逸夫, 南條創, 福見
敦, 宮本祐樹, 百瀬孝昌, 笹尾登, 若林知成, 山
口琢也, 湯浅一生 「分子を利用したニュート
リノ質量分光」日本物理学会 2011年秋季大
会 2011年9月18日 弘前大学(青森県)

N.Sasao, A.Fukumi, S.Kuma, K.Nakajima,
I.Nakano, H.Nanjo, C.Ohae, S.Sato,
T.Taniguchi, T.Wakabayashi, T.Yamaguchi,
M.Yoshimura “From paired super-radiance
to neutrino mass spectroscopy using
atoms” XIV International Workshop
on “Neutrino Telescopes”
March15-18, 2011, Venice, Italy

②1 Noboru Sasao “Towards neutrino mass
spectroscopy with Atoms” The 5th
international workshop on “Fundamental
Physics Using Atoms” August 10, 2010, Osaka

②2 N.Sasao, A.Fukumi, K.Nakajima, I.Nakano,
H.Nanjo, C.Ohae, S.Sato, T.Taniguchi,
T.Yamaguchi, M.Yoshimura
“Production of Ba meta-stable states via
super-radiance” 22nd International
Conference on Atomic Physics
25-30 July, 2010, Cairns, Australia

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕
出願状況(計0件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年月日:
国内外の別:

取得状況(計0件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
取得年月日:
国内外の別:

〔その他〕
ホームページ等
http://www.xqw.okayama-u.ac.jp/research/research_past

6. 研究組織

(1) 研究代表者
笹尾登 (SASAO NOBORU)
研究者番号: 10115850

(2) 研究分担者
南條創 (NANJO HAJIME)
研究者番号: 40419445

若林知成 (WAKABAYASHI TOMONARI)
研究者番号: 30273428

(3) 連携研究者
吉村太彦 (YOSHIMURA MOTOHIKO)
研究者番号: 70108447