

ヘリウム原子の多準位系における超放射の測定

(近畿大・理工¹, 分子研², 理研³, 岡山大・極限量子⁴, 岡山大・自然⁵, 岡山大・理⁶, JASRI⁷)
 ○中嶋 享¹, 岩山 洋士^{2,3}, 久間 晋^{3,4}, 宮本 祐樹^{3,5}, 永園 充³, 中野 逸夫⁴, 笹尾 登^{3,4},
 繁政 英治^{2,3}, 富樫 格⁷, 植竹 智⁵, 若林 知成¹, 吉見 彰洋⁴, 吉村 太彦⁶

Measurement of superradiance from a multi-level system
in atomic helium

(Faculty of Science and Engineering, Kinki University¹, Institute for Molecular Science²,
 RIKEN³, Research Core for Extreme Quantum World, Okayama University⁴,
 Graduate School of Natural Science and Technology, Okayama University⁵,
 Faculty of Science, Okayama University⁶, Japan Synchrotron Radiation Research Institute⁷)
 ○Kyo Nakajima¹, Hiroshi Iwayama^{2,3}, Susumu Kuma^{3,4}, Yuki Miyamoto^{3,5},
 Mitsuru Nagasono³, Itsuo Nakano⁴, Noboru Sasao^{3,4}, Eiji Shigemasa^{2,3}, Tadashi Togashi⁷,
 Satoshi Uetake⁵, Tomonari Wakabayashi¹, Akihiro Yoshimi⁴, Motohiko Yoshimura⁶

【序】原子や分子などの励起状態の集団からの協同的な自然放射である超放射は、1954年に R. H. Dicke によって初めて理論的に提唱され、その後、様々な理論的、実験的研究が多様な原子や分子種、標的性状、そしてマイクロ波から紫外に及ぶ幅広いエネルギー領域の準位系に対して行われてきている。そのような中で、近年利用可能になった、理研播磨研究所 SCSS 試験加速器における EUV-FEL 光を励起光として、ヘリウム原子の励起状態からの超蛍光(超放射)現象の観測 [1]が実現した。この実験では、中心波長 53.7 nm の FEL 光によって励起状態となる 1s3p 準位から 1s3p→1s2s 遷移に対応する 502 nm の超放射パルスを観測している。1s3p 準位からはこの他にも複数の脱励起遷移が許容であり、本研究では、多準位系における超放射発展の解明を目的として、これらの遷移に関わる超放射の同時測定実験を行った。

図 1 に本実験に関係のあるエネルギー準位を示す。1s3p 準位からの脱励起には、1s² および 1s2s 準位への遷移に加えて、1s3p→1s3d→1s2p 準位と 1s3p→1s3s→1s2p 準位のカスケード遷移が E1 許容遷移として存在する。1s3p→1s3d 遷移および 1s3p→1s3s 遷移のエネルギー間隔はそれぞれ 0.013 eV (96 μm)、0.167 eV (7.4 μm) である。本実験では可視光領域の 1s3p→1s2s 遷移 (502 nm)、1s3d→1s2p 遷移 (668 nm)、1s3s→1s2p 遷移 (728 nm) の超放射を観測対象とした。

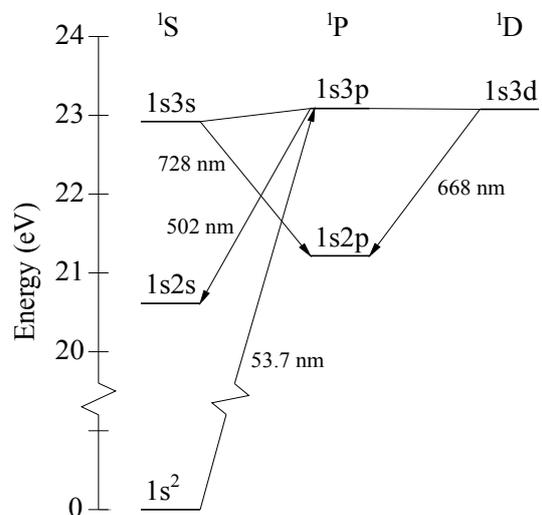


図 1. ヘリウム原子のエネルギー準位

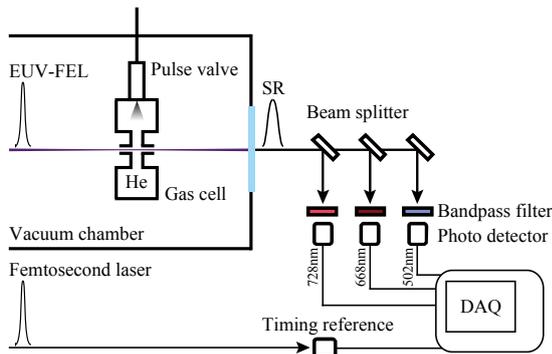


図 2. 実験セットアップの概略図

【実験】図 2 に理研播磨研究所 SCSS 試験加速器を用いて行った実験のセットアップ概略図を示す。FEL パルス光は 2 枚の集光ミラーによって真空チャンバー内のガスセル中心に集光され、そのビームウエスト半径は $5 \mu\text{m}$ (FWHM)、コンフォーカルパラメーターは 1.5 mm である。FEL パルス時間幅は 100 fs 、平均パルスエネルギーは $3.5 \mu\text{J/pulse}$ であり、ガスセル中心におけるピーク強度は $4 \times 10^{13} \text{ W/cm}^2$ となる。ガスセルへのヘリウムガスの導入は、 30 Hz の FEL パルスに同期したパルスバルブを用いて行った。ガスセルの FEL 光軸に沿った両端には直径 2 mm 、長さ 5 mm のアパーチャーが取り付けられている。アパーチャー内面の間隔は 4 mm である。パルスバルブの背圧によりセル中のヘリウム原子数密度の調整を行い、実験条件におけるセル中のヘリウム原子のピーク圧力は $2.3 \text{ Pa} \sim 2.5 \times 10^3 \text{ Pa}$ 、数密度は $6 \times 10^{14} / \text{cm}^3 \sim 6 \times 10^{17} / \text{cm}^3$ と見積もられる。真空チャンバー外に取り出した超放射パルス光はビームスプリッターで 3 つに分岐し、それぞれをバンドパスフィルターで波長弁別して高速フォトディテクター (Response time 30 ps) で検出し、波形を高速オシロスコープ (Sampling rate 40 GS/s) で同時記録した。

【結果と考察】図 3 にヘリウム数密度ごとに平均化した波形を示す。数密度 $2 \times 10^{15} / \text{cm}^3$ では $1s3d \rightarrow 1s2p$ 遷移 (668 nm) の超放射のみが発達する。 $5 \times 10^{15} / \text{cm}^3$ では $1s3p \rightarrow 1s2s$ 遷移 (502 nm) の超放射が現れる。 $4 \times 10^{16} / \text{cm}^3$ で $1s3s \rightarrow 1s2p$ 遷移 (728 nm) にも弱い超放射が現れる。これらの数密度依存性を解釈するため、Maxwell-Bloch 方程式を用いて図 1 に示したヘリウム原子 6 準位系のポピュレーション、コヒーレンスおよび E1 遷移に対応する電場の時間発展の追跡を試みた。その結果、超放射が優位に発達する遷移は $1s3p \rightarrow 1s3s \rightarrow 1s2p$ および $1s3p \rightarrow 1s2s$ であり、 $1s3p \rightarrow 1s3d \rightarrow 1s2p$ のカスケード遷移に超放射は発展しにくいことが示された。講演ではこの結果が、エネルギー間隔の接近した $1s3p \rightarrow 1s3d$ 遷移における超放射発展、あるいは大

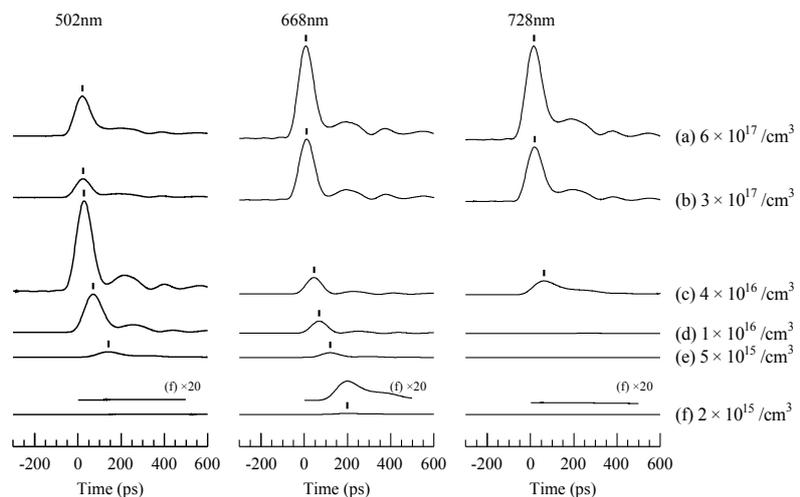


図 3. ヘリウム原子からの超放射の平均波形

強度 FEL パルス光による励起機構の扱いに起因する可能性についても議論する。

【参考文献】

[1] M. Nagasono *et al.*, Phys. Rev. Lett. 107, 193603 (2011).