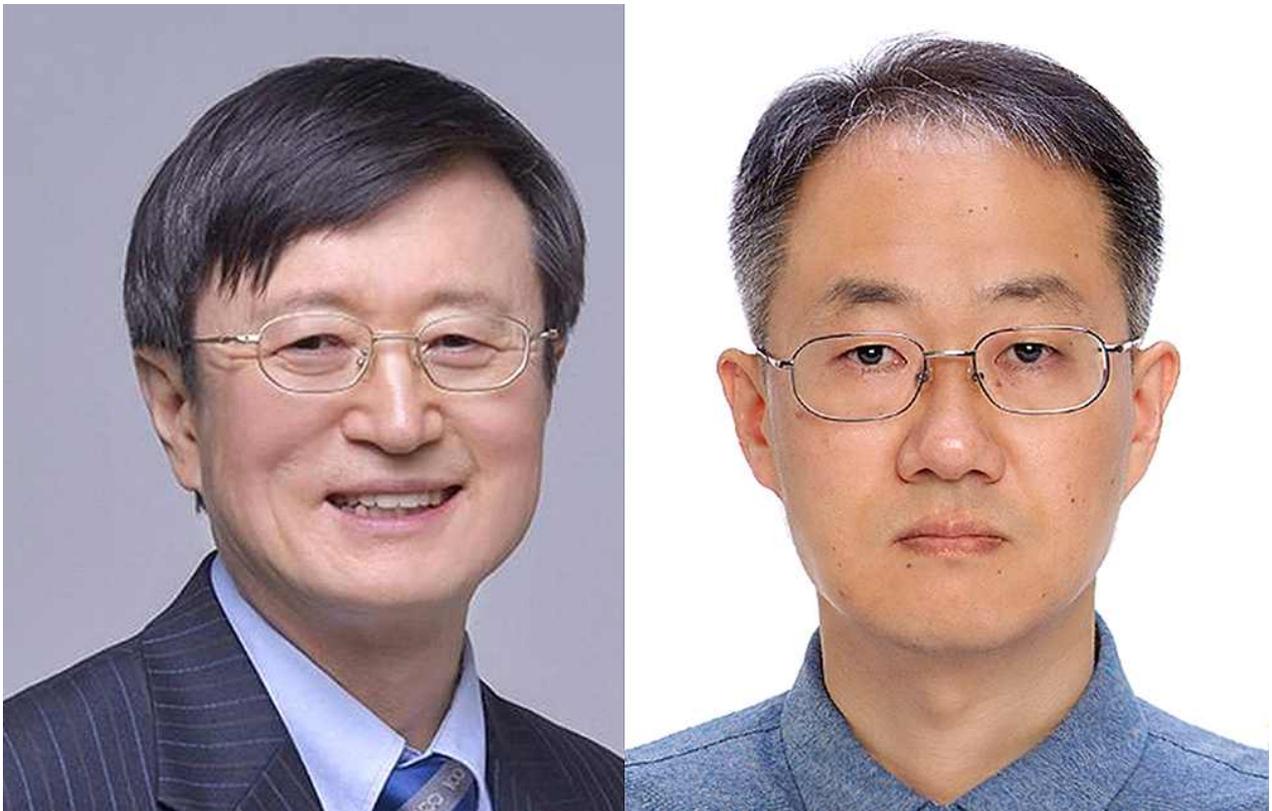


GIST-IBS, 강력장 양자전기역학 현상 세계 최초 입증

자체 개발 세계 최고 세기 4PW(페타와트) 초강력 레이저로
'비선형 콤프턴 산란' 세계 최초 구현

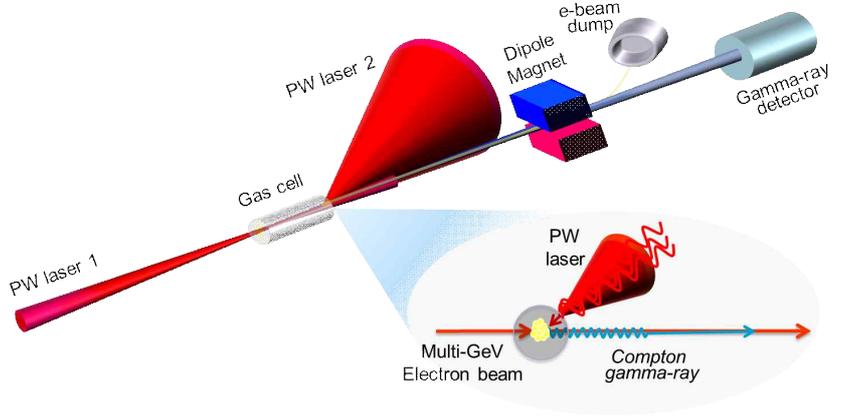
- 물리·광학과 남창희 교수·고등광기술연구소 성재희 수석연구원, 강한 세기의 빛-물질 상호작용에 대한 기존의 실험적 한계 획기적 극복... 유럽·미국·중국 시도했으나 입증 못해
- 전자 한 개와 300개 이상의 레이저 광자가 충돌하면서 470MeV(메가볼트)의 에너지 갖는 하나의 감마선 광자로 변환되는 '비선형 콤프턴 산란' 현상 실험적 규명 최초 성공
- "빛-물질 상호작용 연구의 새로운 영역(강력장 양자전기역학) 진입 의미... 우주 천체 현상을 지상에서 구현할 가능성 열어" 국제학술지 《Nature Photonics》 게재



▲ (왼쪽부터) GIST 물리·광학과 남창희 초빙석학, 고등광기술연구소 성재희 수석연구원

1960년 '인공의 빛' 레이저가 처음 발명된 이래 레이저의 세기가 급격히 증가하면서 인류가 탐구할 수 있는 물리 현상의 영역도 크게 확장되었다. 그동안 이론적으로만 연구되어 오다가 최근에는 관련 실험 연구가 시작된 강력장 양자전기역학 현상을 국내 연구진이 최초로 입증하였다.

광주과학기술원(GIST, 총장 임기철)은 물리·광학과 남창희 교수와 고등광기술연구소 성재희 수석연구원 연구팀이 초강력 레이저를 이용하여 강력장 양자전기역학(Strong Field Quantum Electrodynamics) 현상인 비선형 콤프턴 산란*을 실험적으로 입증했다고 밝혔다.



▲ (왼쪽부터) 세계 최고 세기를 가지는 초강력 레이저(GIST & IBS)와 비선형 콤프턴 산란 실험 개념도.

빛과 물질의 상호작용(즉, 전자기 현상)의 가장 근본적인 이론은 특수 상대론과 양자 역학을 결합하여 만든 양자전기역학이다. 약한 빛의 양자전기역학은 1950년대까지 이론이 완성되고 검증도 완료되었으나, 강력한 빛에 의한 양자역학적 진공*이 빛-물질 상호작용에 영향을 끼치는 강력장 양자전기역학은 관련 연구가 부족한 실정이다.

이번 연구 성과로 **강한 세기의 빛-물질 상호작용에 대한 기존의 실험적 한계를 획기적으로 극복**했을 뿐만 아니라, **우주에서 일어나는 천체 현상을 지상에서 구현할 가능성을 열었다.**

* **양자역학적 진공:** 일반적으로 또는 고전물리에서 진공은 아무것도 없는 텅 빈 공간이지만, 양자역학적으로는 입자와 반입자가 아주 짧은 시간 동안 발생하고 소멸하는 일이 끊임없이 일어나는 공간이다. 이를 양자역학적 진공이라고 한다.

강력한 빛과 물질이 상호 작용하게 되면 양자역학적 진공 요동이 상호작용에 중요한 요소로 등장함을 1930년대에 이론적으로 예측하였으나, 이를 실험적으로 증명하기 위해 필요한 레이저의 출력이 너무 세기 때문에 지금까지 증명할 수 없었다.

보통 전자 한 개와 광자 한 개가 충돌하지만 빛이 충분히 세면 전자 한 개와 많은 수의 광자가 동시에 충돌하면서 고에너지 광자 한 개가 발생하는데 이를 **'비선형 콤프턴 산란'**이라고 하며, **새로운 상호작용 영역에서 가장 기본적으로 일어나는 물리 현상**을 뜻한다.

비선형 콤프턴 산란을 실험적으로 입증하기 위한 연구가 10여 년 전부터 유럽, 미국, 중국 등 초강력 레이저 시설을 보유한 그룹에서 추진되어 왔다.

유럽연합의 Extreme Light Infrastructure 컨소시엄, European X-ray Free-electron Laser의 LUXE 사업, 미국 Stanford Linear Accelerator의 FACET 사업, 중국 상해 광학정밀기계연구소의 SEL 사업 등 세계적인 연구 그룹들의 꾸준한 노력에도 불구하고 최근까지 비선형 콤프턴 산란에 대한 간접적인 증거나 빛이 충분히 세지 못한 영역에서의 결과만 제시되었을 뿐이다.

GIST-IBS 연구팀은 이번 연구를 통해 초강력 레이저를 이용하여 빛의 세기가 극히 강력한 영역에서 **비선형 콤프턴 산란을 직접적으로 실증함**으로써 빛-물질 상호작용의 새로운 탐구 영역을 개척하였다.

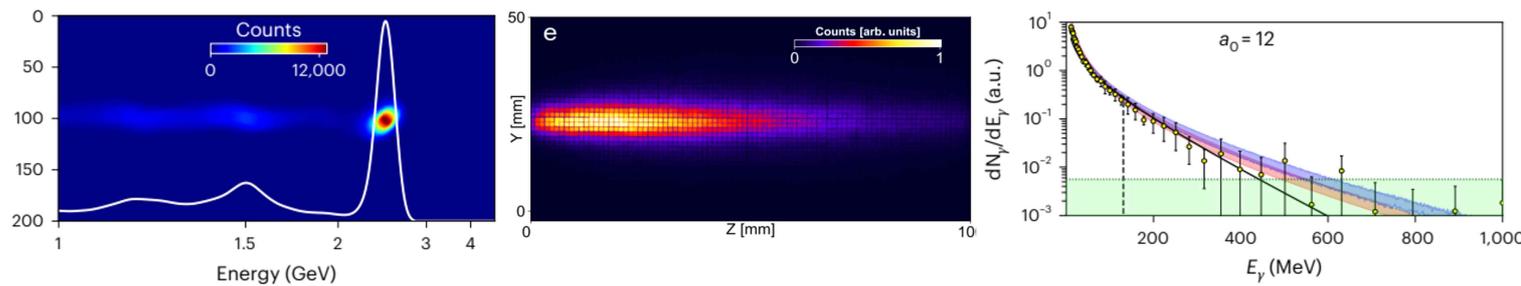
GIST-IBS 연구팀은 이미 2021년에 자체 개발한 초강력 레이저를 이용하여 집속된 세기가 10^{23} W/cm^2 를 넘어서는 세계 기록을 달성한 바 있으며, 자체 개발한 **세계 최고 세기의 4 PW(페타와트)* 초강력 레이저를 이용하여 비선형 콤프턴 산란을 세계 최초로 구현**하였다.

* **PW**: 1000조 $W = 10^{15} \text{ W}$

연구팀은 초강력 레이저를 두 개의 빔으로 가른 후, **하나의 레이저 빔은 기체에 집속시켜 고에너지 전자를 발생시키고, 다른 빔은 이 고에너지 전자와 충돌시켜 비선형 콤프턴 산란을 일으켰다.**

$3 \times 10^{20} \text{ W/cm}^2$ 의 강한 세기를 갖는 초강력 레이저 빔과 2.4 GeV(10^9 eV)의 에너지를 갖는 전자가 충돌할 때, **전자 한 개와 300개 이상의 레이저 광자가 충돌하면서 470 MeV(10^6 eV^*)의 에너지를 갖는 하나의 감마선 광자로 변환되는 비선형 콤프턴 산란 현상을 실험적으로 관측**하였다.

* **eV**: 전자볼트(electronvolt), 에너지의 단위로 전자 한 개가 1 볼트(volt)의 전위를 거슬러 이동할 때 필요한 에너지이다.



▲ **비선형 콤프턴 산란 실험 결과.** (왼쪽) 초강력 레이저로 발생된 고에너지 전자빔의 스펙트럼으로 전자의 에너지가 2.4 GeV 임을 보여줌. (가운데) 초강력 레이저와 고에너지 전자빔의 충돌로 발생한 고에너지 광자(감마선)의 측정 신호를 보여줌. (오른쪽) 감마선의 측정 신호를 분석하여 얻은 감마선의 스펙트럼으로 470 MeV의 에너지를 갖는 감마선이 발생되었음을 보여주며, 이는 330개의 레이저 광자가 2.4 GeV 에너지를 갖는 전자와 충돌해서 얻을 수 있는 감마선임.

남창희 교수는 "이번 연구 성과를 통해 빛과 물질의 상호작용 연구가 양자적 진공이 상호작용의 주인공으로 등장하는 새로운 영역 즉, **강력장 양자전기역학에 진입**하게 되었고, 더불어 진공의 본질을 더 잘 이해하게 되었다"면서 또한 "초강력 레이저를 이용한 빛-물질 상호작용의 연구를 통해 **다양한 천체 현상을 지상에서 구현**하여 지금까지 제시된 이론적 예측을 확인하고 새로운 물리 현상을 발견할 수 있을 것으로 기대된다"고 말했다.

GIST 물리·광학과 남창희 교수와 고등광기술연구소 성재희 박사 연구팀이 수행한 이번 연구는 IBS 초강력레이저과학 연구단사업과 GIST 극초단광양자빔 연구시설 운영사업의 지원을 받았으며, 광학 분야의 국제 학술지 《네이처 포토닉스(Nature Photonics)》에 2024년 10월 14일 온라인 게재되었다.

논문의 주요 정보

1. 논문명, 저자정보

- 저널명 : Nature Photonics (IF: 32.3, 2023 기준 JCR 광학 분야 1위)
- 논문명 : All-optical nonlinear Compton scattering performed with a multi-petawatt laser
- 저자 정보 : Mohammad Mirzaie(제1저자, IBS & GIST), Calin Ioan Hojbota(제1저자, IBS), 김도연(제1저자, IBS), Vishwa Bandhu Pathak(공저자, IBS), 박태규(공저자, GIST), 김철민(공저자, GIST), 이황운(공저자, IBS), 윤진우(공저자, GIST), 이성구(공저자, GIST), 이용주(공저자, IBS), Marija Vranic(공저자, 포르투갈 리스본 대학교), Óscar Amaro(공저자, 포르투갈 리스본 대학교), 김기용(공저자, IBS, GIST & 메릴랜드 대학교), 성재희(교신저자, GIST), 남창희(교신저자, GIST & IBS)