

초강력 레이저가 여는 상대론적 광학의 세계

DOI: 10.3938/PhiT.24.016

김철민·남창희

Relativistic Optics Explored with PW Lasers

Chul Min KIM and Chang Hee NAM

The unparalleled increase in laser intensity over the last decades has provided a novel challenging arena of optics - relativistic optics. In relativistic optics, the charged particles are driven by an ultra-intense laser field to move almost at the speed of light, and even the vacuum may behave as a dielectric consisting of electrons and positrons. As a result, extreme physical conditions that are impossible with any other terrestrial means are created. In this article, we provide a brief introduction to relativistic optics with the research output produced by Center for Relativistic Optics (CoReLS) of Institute of Basic Science (IBS) as examples.

들어가는 말

아인슈타인의 상대성이론을 아는 이라면 빛이 특수 상대성이론을 정립하는 데에 핵심적 요소였다는 것을 잘 알고 있을 것이다. 상대적으로 움직이는 두 관성계에서 빛의 속도가 일정해야 한다는 요구가 일상의 경험으로부터 형성된 시공간에 대한 관념을 송두리째 바꾸어 놓았다. 그런 의미에서 빛을 다루는

저자약력

김철민 박사는 2006년 카이스트 물리학과에서 박사학위를 취득한 뒤, 2006년 11월부터 현재까지 광주과학기술원 고등광기술연구소에서 근무하고 있다. 2012년 12월부터는 기초과학연구원 초강력 레이저과학 연구단에 참여하여 초강력 레이저장과 물질의 상호작용에 대한 이론 연구를 하고 있다. (chulmin@gist.ac.kr)

남창희 교수는 프린스턴 대학에서 플라즈마물리를 전공하여 1988년 박사학위를 취득하였으며, 2012년까지 카이스트에서 교수로 재직하다 2012년 12월부터 기초과학연구원 (IBS: Institute for Basic Science) 초강력 레이저과학 연구단(CoReLS: Center for Relativistic Laser Science)의 단장과 광주과학기술원 물리광학과 교수로 재직하고 있다. (chnam@gist.ac.kr)

학문인 광학은 근본적으로 상대론적이라고 할 수 있다.

하지만 대부분의 광학 연구에서, 빛을 광속 c 가 들어간 파동방정식으로 기술하는 것 이외에 상대론적인 요소를 거의 찾아볼 수 없다. 왜냐하면 보통의 경우 빛과 물질의 상호작용 에너지는 물질의 정지질량 에너지보다 훨씬 작아서 물질의 광학적 반응을 비상대론적인 운동방정식으로 기술해도 충분히 정확하기 때문이다. 예를 들어, 물질의 광학적 반응을 주로 결정하는 전자에 대해 상호작용 에너지는 보통 10 eV(electronvolt) 수준인데 비해 정지질량 에너지는 MeV ($=10^6$ eV) 수준이다. 이런 비상대론적인 광학 영역에서는 흔히 상호작용 에너지가 물질의 구조를 변화시킬 수 있는 에너지보다 작은 경우가 관심의 대상이 된다. 왜냐하면 물질의 고유 모드에 따라 다양한 광학적 특성이 나타나므로 물질의 구조가 유지된 채 상호작용이 이루어져야 하기 때문이다. 그러한 상황을 기술하기 위해 빛은 고전적 파동(맥스웰 방정식)으로, 물질은 양자적 파동(슈뢰딩거 방정식)으로 다루는 반(半)고전적 방법이 가장 널리 쓰이는데, 빛의 양자적 특성이 중요한 경우는 빛도 양자적 파동(양자화된 맥스웰 방정식)으로 다루기도 한다. 아마도 대부분의 광학 연구와 광학의 산업적 응용이 이 비상대론적 광학의 범주에 들어간다고 해도 과언이 아닐 것이다.

그런데 지난 30여 년간 비약적으로 발전한 레이저 증폭 기술 덕택에 이제 우리는 빛과 물질의 상호작용 에너지가 전자의 정지질량 에너지를 훌쩍 뛰어넘는 상대론적 광학(relativistic optics)을 탐구할 수 있게 되었다. 그러면 지금까지 익숙했던 비상대론적 광학과 비교해서 어떤 변화가 생길까? 우선 아무리 이온화수가 높은 이온이라도 이온화 퍼텐셜은 전자의 정지질량 에너지보다도 작다는 것을 생각해 보면 모든 물질은 상호작용하는 즉시 플라즈마가 되어 빛과 상대론적인 플라즈마의 상호작용이 주된 물리적 과정이 될 것이다. 게다가 전자의 정지질량 에너지가 핵준위의 들뜸에너지나 전자-양전자쌍의 생성 에너지와 같은 수준이라는 것을 생각하면, 우리가 고려해야 할 물질은 상대론적 플라즈마뿐만 아니라 들뜬 핵과 유전체처럼 행동하는 진공까지 포함되게 된다. 즉, 레이저 세기가 세어저서 빛과 물질의 상호작용 에너지가 전자의 정지질량 에너지

를 넘는 순간 우리는, 마치 판도라의 상자를 연 것처럼, 빛과 다양한 형태의 물질이 상호작용하는 세계, 심지어 진공까지 물질로써 행동하는 세계를 맞닥뜨리게 된다. 이러한 새로운 세계에 대한 체계적인 탐구가 바로 상대론적 광학이다.

이 글에서 우리는 상대론적 광학의 기본 개념과 특성, 그리고 주요 연구주제를 간략히 소개하고자 한다. 우선 상대론적 광학을 가능케 해주는 초강력 레이저 펄스 발생 기술을 소개한다. 이어서 레이저장의 세기가 세어짐에 따라 어떻게 상호작용의 양상이 바뀌는지 그리고 각 양상은 어떤 특성을 갖는지 설명한다. 그 다음으로 상대론적 광학의 현재의 주요 연구 주제들을 소개한 후 상대론적 광학에 대한 전망으로 이 글을 끝맺을 것이다.

참고문헌에 대해 한 마디 덧붙이고자 한다. 참고문헌을 달 때 해당사항의 최후연구를 넣는 것이 관례인데, 이 글에서는 가능하면 본 필자들이 속한 연구기관에서 그동안 산출한 연구 성과를 인용했다. 그들 중 상당수는 세계 최초 또는 세계 최고라고 할 수 있다. 이렇게 관례를 깬 이유는, 지난 20여 년간의 노력으로 한국에 상대론적 광학을 연구할 수 있는 세계적 수준의 기반이 마련되었음을 알리고 국내 연구자들 사이에 관심을 불러일으키기 위해서이다. 이 글을 읽고 흥미를 느낀 도전적인 과학도들은 참고문헌의 필자들에게 연락하면 이 분야를 더 깊이 있게 알아볼 수 있다.

초강력 레이저장을 만드는 핵심 기술: 처프된 펄스 증폭

우리는 레이저를 이용하여 자연에서 얻을 수 있는 빛과는 비교할 수 없을 정도로 센 빛을 얻는다. 이때 주어진 레이저의 에너지로 최대한의 전기장 크기를 얻기 위해서는 그 에너지가 존재하는 공간을 줄여서 에너지 밀도를 최대한 높여야 한다. 이를 위해 가장 흔한 방법은 렌즈나 거울을 이용해서 집속하는 것인데, 빛의 진행방향을 종방향이라고 하면, 집속은 횡방향의 단면적을 최소화하는 것이다. 현재 비축포물거울(Off-axis Parabolic Mirror)을 이용하면 파장의 서너 배 크기까지 집속 크기를 줄일 수 있다. 종방향의 크기를 줄이기 위해서는 레이저장을 연속발진의 형태가 아니라 펄스의 형태로 만들어야 하는데, 흔히 Q-스위칭(Q-switching)이나 모드록킹(modelocking)을 이용한다. Q-스위칭에서는 레이저 공진기에 에너지를 축적한 다음 공진기의 Q값을 변화시켜 한꺼번에 짧은 시간에 빼내는데, 나노초(ns=10⁻⁹초) 수준의 짧은 펄스를 얻을 때 사용한다. 펨토초(fs=10⁻¹⁵초) 수준의 짧은 펄스폭을 얻기 위해서는 모드록킹이 이용되는데, 이 방법은 공진기 조건을 인위적으로 변화시켜 적자생존에 따라 짧은 펄스만 공진기에서 살아남도록

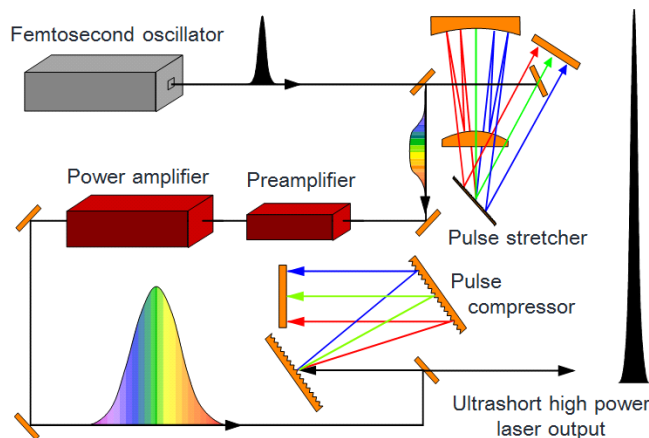


Fig. 1. Schematic diagram of chirped pulse amplification (CPA).

한다.

집속과 펄스 발생은 파장 크기라는 이론적인 한계가 있으므로 (실제로는 훨씬 더 큰 크기에서 이미 한계에 다다른다.), 결국 펄스의 에너지를 늘려야만, 즉 펄스를 증폭해야만 더 센 레이저장을 얻을 수 있다. 그런데 펄스를 밀도반전된 증폭매질을 통과하게 하여 증폭하면, 매질의 손상한계(중심파장이 μm 인 레이저장과 고체 매질에 대해 대략 10^{12} W/cm^2 정도) 이상으로는 펄스를 증폭할 수 없다. 이 문제를 해결하고자 80-90년대에는 펄스의 단면적을 확대시킨 후 증폭하고 다시 집속하는 방법을 사용하였으나, 대구경 증폭 매질을 제작하는 데 한계가 있고 큰 단면적을 가진 우수한 렌즈나 거울을 만드는 것이 매우 어려우므로, 레이저의 집속세기를 향상시키는 데 한계가 있었다.

이 문제를 획기적으로 해결한 것이 Strickland와 Mourou에 의해 1985년에 보고된 처프된 펄스 증폭(CPA: chirped pulse amplification) 기술이다.^[1] 이 방법에서는 횡단면적을 확대하는 대신 펄스의 종방향 길이를 늘리는 방법을 택했다(그림 1 참고). 극초단 공진기에서 나온 약한 피코초나 펨토초 펄스가 두 개의 에돌이발과 오목거울, 볼록거울로 구성된 펄스 확장기(pulse stretcher)를 거치면 수백 피코초 이상의 긴 펄스가 된다. 확장기는 서로 다른 파장 성분이 서로 다른 광경로를 겪도록 해서 펄스 길이를 늘리므로, 확장기 이후에는 길이가 길어지고 파장 성분이 시간적으로 배열된 펄스, 즉 처프된(chirped) 펄스가 된다. 이때 확장 비율이 $10^4 - 10^5$ 에 이르므로, 이렇게 확장된 펄스를 증폭단에서 증폭하면 단면적을 늘리는 경우보다 훨씬 더 많은 에너지를 레이저 펄스에 부여할 수 있다. 마지막으로 증폭된 펄스가 확장기와는 반대의 작용을 하는 펄스 압

REFERENCES

- [1] D. Strickland and G. Mourou, Opt. Commun. **6**, 219 (1985).

축기(pulse compressor)를 거치면 거의 원래의 펄스폭을 회복하게 된다. 따라서 증폭한 에너지에 해당하는 만큼의 강력한 극초단 펄스가 얻어진다.

이 초프된 펄스 증폭 기술을 이용하여 구축된 페타와트(PW = 10^{15} W) 펄스초 티타늄 사파이어 레이저의 예가 그림 2에 나타나 있다. 광주과학기술원에 구축되어 기초과학연구원 초강력 레이저과학 연구단에서 운영하는 이 레이저는, 동시에 작동하는 두 개의 빔라인을 가지고 있는데 그 중 첫 번째 것은 세계 최초의 펄스초 페타와트 레이저이고,^[2] 두 번째 것은 세계 최고 출력을 기록했다.^[3] 이 레이저로 앞서 말한 집속기술 등을 이용하여 약 7×10^{21} W/cm²의 집속세기를 구현할 수 있다. 현재 4 PW로 출력을 향상시키기 위한 작업이 진행되고 있다.^[4] 2015년 봄 현재 전 세계적으로는 대략 5대의 펄스초 페타와트 레이저가 운영되고 있는데, 유럽연합에서는 10 PW 펄스초 레이저를 구축하는 Extreme Light Infrastructure라는 이름의 연구사업에 박차를 가하고 있다.^[5] 이런 대형 레이저에서는 초프된 펄스 증폭도 한계에 이르게 되어 결국 레이저빔의 단면적을 키울 수밖에 없다. 예를 들어 그림 2의 레이저의 4 PW 빔라인에서는 직경 150 mm, 두께 25 mm인 티타늄 사파이어 결정, 직경 500 mm인 거울, 면적 800 mm×600 mm인 예뎀이탈을 사용하는데, 이 크기들은 상업적 광학부품 제작기술의 한계에 근접한다. 아마 멀지 않은 미래에 이 문제를 획기적으로 해결하는 방법이 필요할 것이다.

초강력 레이저장과 물질의 상호작용

빛이 물질에 입사하면 제일 먼저 반응하는 것이 물질을 구성하는 요소 중 가장 가벼운 전자이다. 전자에 영향을 주는 다양한 상호작용의 크기와 전자와 빛의 상호작용의 크기를 비교하면 어떤 영역에서 빛과 물질의 상호작용이 일어나는 건지 분류하는 데에 편리하다. 상호작용의 크기는 그 상호작용에 의해 전자가 갖게 되는 에너지로 표현할 수 있으며, 빛과 전자의 상호작용의 경우, 자유전자가 빛에 의해 갖게 되는 평균 운동 에너지인 폰더모토티브 퍼텐셜(ponderomotive potential) $U_p = e^2 E^2 / 4m_e \omega^2$ 로 주어진다. 여기서 E 는 레이저장의 전기장 성분의 진폭, ω 는 레이저장의 각진동수이다. 폰더모토티브 퍼텐셜은 ω^2 에 반비례하는데 그 이유는 레이저장이 빨리 진동할수록 부호가 자주 바뀌어서 전자가 충분한 운동에너지를 얻지 못하기 때문이다. 앞으로 대부분의 초강력 레이저의 중심 파장($\sim \mu\text{m}$)에 해당하는 각진동수를 가정하고 이야기를 풀어간다. 한편 전자와 핵의 정전기 상호작용의 크기는 이온화 퍼텐셜(ionization potential) I_p 로 나타낸다.

흔히 광학 교과서에서 나오는 선형 광학(linear optics)의 경

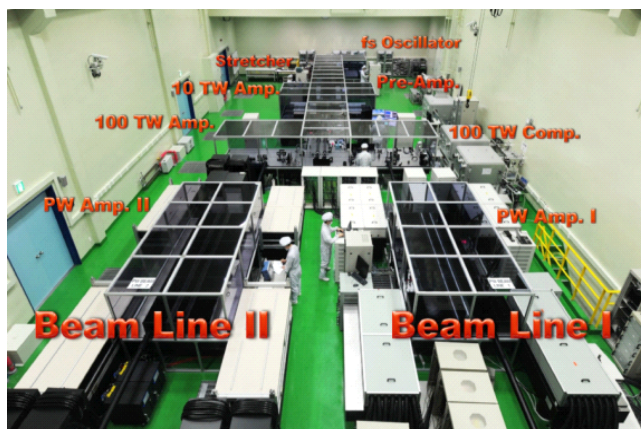


Fig. 2. Petawatt femtosecond Ti:sapphire laser operated at CoReLS, IBS. It has two PW laser beamlines that can work simultaneously. The beam line I (1 PW) delivers 30-fs, 33-J laser pulses at 0.1 Hz, and the beam line II (1.5 PW) 30-fs, 45-J pulse at the same repetition rate. The beam line II is now being upgraded to deliver 4 PW.

우는 $U_p \ll I_p$ 에서 빛과 물질의 상호작용은 물질 구조를 유지하는 정전기 상호작용에 비해 매우 작은 섭동으로 다룰 수 있다. 이 섭동에 대한 반응은 선형적으로 나타나며, 이때는 물질을 다양한 주파수를 가지고 있는 조화진동자의 모임으로 다룰 수 있다. 1960년에 레이저가 발명된 후 비로소 빛의 세기가 10^{10} W/cm²에 이르게 되었는데, 이 정도 세기가 되어야 핵의 전기장에 구속된 전자가 평형점을 중심으로 비선형 운동을 하게 되어 그 결과 입사파의 조화파가 발생한다. 역사적으로 레이저가 발명된 이듬해에 바로 이차조화파의 발생이 보고되었다. 이 영역이 흔히 비선형 광학 교과서에서 주로 다루어지는 섭동적 비선형 광학(perturbative nonlinear optics)이다. 섭동적 비선형 광학의 특징은 비선형 차수에 따라서 상호작용의 효율이 지수적으로 감소한다는 것이다. 레이저의 세기가 더 세어져서 10^{14} W/cm² 이상이 되면 전자가 느끼는 레이저장이 정전기장에 버금갈 정도로 세지며($U_p \leq I_p$), 이때는 전자가 일시적으로 레이저장에 의해 자유 상태가 되므로, 전자의 속박 상태와 자유 상태가 모두 광학적 반응에 참여하게 된다. 이때의 자유 상태는 비선형 차수에 큰 영향을 받지 않으므로, 차수가 커져도 에너지 보존이 허용하는 한계까지는 상호작용의 효율이 별로 감소하지 않는다. 이 영역을 비섭동적 비선형 광학(non-perturbative nonlinear optics)이라고 한다. 앞서 들어가는 말에서 언급한 비상대론광학은 주로 이 세기까지의 상호작

REFERENCES

- [2] J. H. Sung *et al.*, Opt. Lett. **32**, 3021 (2010).
- [3] T. J. Yu *et al.*, Opt. Express **20**, 10807 (2012).
- [4] <http://corels.ibs.re.kr/>.
- [5] <http://www.eli-laser.eu/>.

Table 1. Regimes of light-matter interactions depending on the laser intensity. I_p , E , and λ_C refer to ionization potential, laser electric field, and electron Compton wavelength, respectively. The laser wavelength is assumed to be around μm .

레이저 세기 (W/cm^2)	폰더모토티브 퍼텐셜의 크기	빛과 상호작용하는 물질의 요소	명칭
10^{14}	$U_p \sim I_p \sim 10 \text{ eV}$	비상대론적 속박/자유 전자	비섭동적 비선형 광학
10^{18}	$U_p \sim m_e c^2 \sim \text{MeV}$	상대론적 전자, 비상대론적 이온	(좁은 의미의) 상대론적 광학
10^{24}	$U_p \sim m_p c^2 \sim \text{GeV}$	극상대론적 전자, 상대론적 이온, 원자핵	극상대론적 광학, 레이저 핵물리
10^{29}	$eE\lambda_C \sim 2m_e c^2$	양자역학적 진공	비섭동적 비선형 양자전자역학

용을 다룬다. 레이저 세기가 더 증가하여 $10^{16} \text{ W}/\text{cm}^2$ 를 넘어서면 대부분의 원자에 대해 $U_p > I_p$ 가 되므로 즉각적인 이온화가 이루어져서 레이저-원자 상호작용보다 레이저-플라즈마 상호작용이 더 중요해지게 된다.

상대론적 광학은 전자의 폰더모토티브 퍼텐셜이 자유전자의 정지질량 에너지보다 커지는 $10^{18} \text{ W}/\text{cm}^2$ 정도의 세기에서 시작한다(표 1 참고). 전자가 상대론적인 운동을 하게 되면 비상대론적인 경우와는 매우 다른 동역학적 특성들이 나타나기 시작한다. 첫째, 레이저장에 놓인 전자의 종방향 진행이 횡방향 진동보다 훨씬 커져서 광학적 반응이 비국소적으로 되고, 더구나 종방향과 횡방향의 운동이 서로 영향을 미치게 된다. 둘째, 상대론적인 속도 제한 때문에 충분히 센 레이저장에서는 모든 하전 입자가 같은 속도로 움직이게 되어 특이하게 큰 입자 밀도와 결맞음을 보일 수 있다. 이를 상대론적 결맞음(relativistic coherence)이라고 한다. 셋째, 레이저 세기가 세어질수록 전자의 관성이 증가한다. 넷째, 가벼운 전자가 무거운 이온으로부터 쉽게 분리되어 U_p 에 필적하는 크기의 전하분리 정전 에너지를 갖는 구조가 형성된다. 더불어 전하 분리가 일어나는 동안의 강력한 전류 형성에 의해 강한 정자기장이 수반되기도 한다. 문헌에 따라 전자만 상대론적인 에너지를 갖는 경우로 상대론적 광학을 제한하기도 하는데 (좁은 의미의 상대론적 광학), 이 경우에는 레이저 에너지는 우선 전자가 흡수하면서 전하분리를 일으키고 이 전하분리에 의한 정전장이 무거운 이온을 움직인다. 즉, 그 정도의 세기에서는 무거운 이온은 직접 레이저장에 반응하지 않는다. 이 글에서는 상대론적 광학을 이런 경우로 제한하지 않고, 전자의 폰더모토티브 퍼텐셜이 전자의 정지질량 에너지보다 큰 모든 경우를 일컫는다. 레이저 세기가 $10^{22} \text{ W}/\text{cm}^2$ 정도가 되면 무거운 양성자나 이온도 비상대론적이기는 하지만 직접 레이저장에 의해 움직이기 시작한다. 즉, 이 정도 수준부터는 빛으로 물질을 강력히 밀 수 있게 되는 것이다. 보다 상세한 설명은 [6]에서 얻을 수 있다.

레이저 세기가 더욱 증가하여 $10^{24} \text{ W}/\text{cm}^2$ 정도가 되면 레이저장에 의해 움직이는 양성자나 이온의 속도가 광속에 가깝게 되고, 전자의 복사 반작용(radiation reaction)이 두드러지게 된다. 흔히 전자기학의 복사 문제를 다룰 때, 우선 전하의 복

사를 무시하고 외부전자기장에 의한 전하의 궤적을 구한 후에 이 궤적에 의한 복사를 계산하는 근사를 취한다. 이 근사는 전하가 가진 운동에너지에 비해 복사로 인한 에너지손실이 작다고 가정하는 것인데 (좁은 의미의) 상대론적 광학 영역까지는 잘 맞는 근사이다. 하지만 $10^{24} \text{ W}/\text{cm}^2$ 정도에서는 한 진동주기에 내보내는 복사 에너지가 전하의 운동에너지에 버금갈 정도로 커서 복사 반작용을 고려하지 않으면 올바르게 상호작용을 기술할 수 없다. 이 영역을 극상대론적 광학(ultrarelativistic optics)이라고 한다. 복사 반작용까지 완벽히 고려한 고전 전자기학은 아직 이론적으로도 완성되지 않았는데, 란다우와 리프쉬츠가 도입한 복사반작용의 식이 고전물리의 유효 영역 내에서는 실질적으로 올바른 결과를 준다고 여겨지고 있다.[7] 빛이 이 정도로 세어지면 고전전자기학과 양자전자기학의 예측이 달라지기 시작하는데 이에 대한 연구는 이론물리학자들에 의해 매우 활발하게 진행되고 있다. 아울러 이 영역에서는 레이저장에 의한 핵반응이 일어나기 시작한다.

레이저의 세기가 $10^{29} \text{ W}/\text{cm}^2$ 에 이르면 레이저장이 진공에서 전자-양전자쌍 생성을 일으켜서 진공이 일종의 유전체로 행동하게 된다. 이 정도의 레이저세기를 슈빙거장(Schwinger field)이라고 한다. 우리가 익숙한 섭동적 양자전기역학에서는 높은 광자에너지를 갖는 단일 광자(예를 들면 MeV의 에너지를 갖는 감마선)와 저차수의 비선형 과정에 의해 쌍생성이 일어나는 데에 비해, 여기서는 작은 광자에너지(eV 수준)지만 엄청나게 많은 수의 광자에 의해 매우 고차의 과정으로 쌍생성이 일어나는 것이다. 달리 말하면, 초강력 레이저장에 의해 터널링 과정을 통해 음에너지 전자가 양에너지로 전이하는 것이다. 이 과정은 극단적으로 비섭동적이어서 기존의 섭동론이 전혀 맞지 않으므로 완전히 비섭동적인 양자전기역학을 정립하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다.

한편으로는 레이저의 세기를 증가시키는 것이 결국 고전물리

REFERENCES

- [6] C. M. KIM and K. H. PAE, Phys. High Technol. **22**(10), 20 (2013).
- [7] F. Rohrlich, *Classical Charged Particles* (3rd ed.) (World Scientific, 2007).

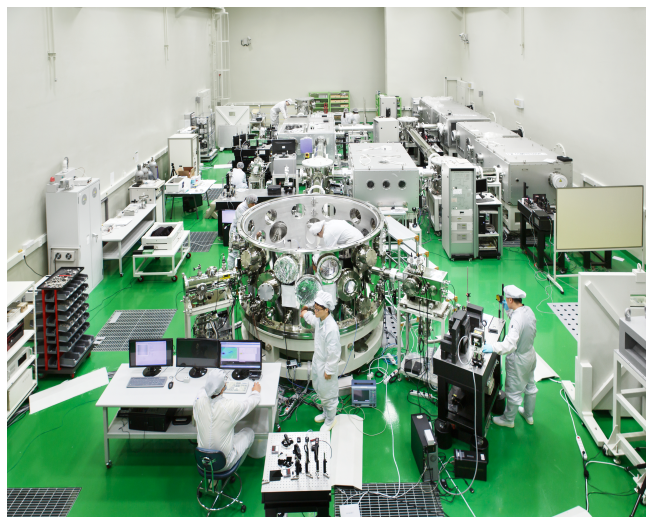


Fig. 3. Laser-matter interaction lab at CoReLS, IBS. In the lab two large target chambers are shown along with two laser pulse compression chambers.

의 영역에서 양자물리의 영역으로 가는 새로운 길을 제시한다고 볼 수 있다. 교과서에 나와 있는 길이 물리계의 에너지를 줄여서 양자물리학의 영역에 다다른 길이였다면, 초강력 레이저가 여는 새로운 길은 외부장의 세기를 증가시켜 더 깊은 수준의 물질 요소를 여기시킴으로써 양자물리학의 영역으로 들어가는 길이라 할 수 있다.

상대론적 광학의 연구주제

현재의 초강력 레이저는 대략 10^{22} W/cm² 미만의 세기를 낼 수 있는데, 이는 앞서 언급한 좁은 의미의 상대론적 광학 영역에 해당한다. 집중했을 때 이 정도의 세기를 만들어 내는 레이저빔은 만약 그대로 공기를 지나가면 섭동적 비선형 효과에 의해 상당한 변형을 겪게 되므로, 레이저 공진기에서 나온 빔이 어느 정도 증폭된 이후의 빔경로는 모두 진공에 놓이게 한다. 게다가 레이저와 물질의 상호작용의 결과로 나오는 이온, 전자, 엑스선, 감마선도 모두 진공 중에서 측정해야 하므로, 상호작용 실험은 그림 3에서 볼 수 있는 것처럼 여러 개의 거대한 진공챔버를 갖춘 실험실에서 수행한다. 여기서는 현재 실제로 실험이 수행되고 있는 좁은 의미의 상대론적 광학의 연구들을 살펴본다.

1. 레이저를 이용한 하전 입자 가속

레이저를 이용한 하전 입자 가속은 크게 두 가지로 나뉘는데, 기체 매질에 초강력 레이저를 조사하여 전자를 GeV 수준까지 가속하는 것과, 고체 매질에 초강력 레이저를 조사하여

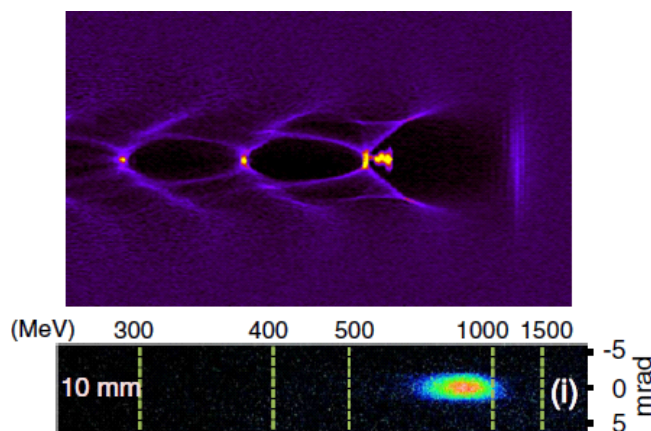


Fig. 4. Electron acceleration based on the laser wakefield acceleration mechanism. The upper figure shows the snapshot of electron density obtained from a particle-in-cell simulation. The comb structure near the right end indicates the position of the laser pulse, and the black areas are the electron-free cavities. A dense electron bunch is shown to be located in the first cavity. The lower figure shows an experimental electron spectrum obtained using a 10-mm-long He gas jet driven by the laser shown in Fig. 2.^[8] The maximum electron energy is about 1 GeV.

양성자나 이온을 핵자당 수십~수백 MeV 수준으로 가속하는 것이 있다.

초강력 레이저 펄스가 기체 매질에 입사하면 즉각적으로 플라스마가 형성되면서 전자는 레이저 펄스에 옆으로 밀려나가게 되어 레이저 펄스 뒤쪽으로 양이온으로 이루어진 공동(空洞)이 생긴다(그림 4 참고). 이러한 원형 공동에서 전기장의 방향은 공동의 중심을 향하는데, 공동의 좌측반원관 구역에 전자가 놓이게 된다면 전자가 중심에 이를 때까지 가속되고 중심을 지나면 감속된다. 이러한 원형 공동은 레이저 펄스와 함께 이동하는데, 이때의 정전기장을 레이저 항적장(laser wakefield)이라고 하고, 이러한 전자 가속 방식을 레이저 항적장 가속(laser wakefield acceleration)이라고 한다. 10^{16-18} 개/cm³의 전자를 갖는 기체 매질에 대해서 레이저 항적장의 세기는 GV/cm 이상이 되는데, 이는 기존의 대형 전자가속기에 비해 대략 1000배 정도 큰 값이다. 따라서 그림 3에서 보인 바와 같이 10 mm의 짧은 거리로도 1 GeV 이상의 에너지를 얻을 수 있다. 본 연구단에서는 이 가속 방식을 이용하여 3 GeV까지 전자를 가속하였다.^[8]

이 장점 때문에 레이저 가속기가 기존의 전자가속기를 대신할 수 있다는 기대를 받고 있는데, 아직 다른 목적에 이용하기에는 극복해야 할 난제들이 있다. 우선 가능한 레이저 펄스를

REFERENCES

- [8] H. T. Kim *et al.*, Phys. Rev. Lett. **111**, 165003 (2013).

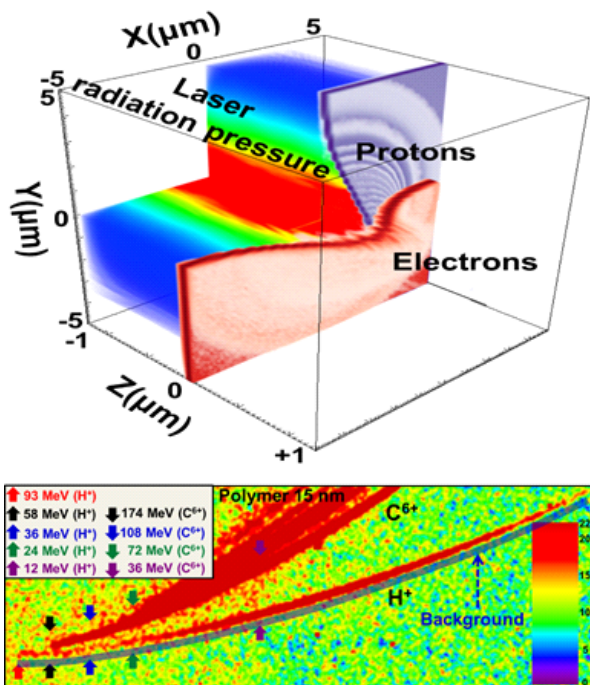


Fig. 5. Acceleration of protons by the radiation pressure of an ultra-intense laser pulse. The upper figure, obtained from a particle-in-cell simulation, shows the separation of electron and proton/ion layers upon the incidence of an intense laser pulse. The lower figure shows the raw image of a Thomson parabola spectrometer. The proton energy reached 93 MeV with 10-nm-thick F8BT polymer target.^[11]

안정적으로 원하는 만큼 길게 전파시켜야 한다. 이를 위해 레이저 펄스를 약하게 집속하고 낮은 밀도의 기체를 사용해서 레이저-플라즈마의 비선형 상호작용 때문에 생기는 레이저 펄스의 변형을 최소화한다. 또 레이저 펄스의 진행속도를 가능한 광속에 가깝게 해서 전자무치가 감속영역에 들어가는 시간을 최대한 늦춰야 한다. 이를 위해 낮은 밀도의 기체를 사용하는데, 이 경우 가속되는 전자의 양이 적어지거나 항적장의 크기가 작아질 수 있으므로 최적점을 찾아야 한다. 이보다 더 중요한 문제는 가속해야 할 전자무치를 최적의 위치에 원하는 양만큼 삽입하는 것이다. 지금까지는 자체삽입이라고 해서 레이저 펄스에 의해 밀린 전자가 공동의 경계를 따라 흐르다가 저절로 공동의 왼쪽구역에 빨려 들어가서 삽입되는 방법을 이용하는 경우가 많았는데,^[9] 이는 그리 안정적이지 못하다. 이 삽입 문제를 해결하기 위해 외부에서 강제적으로 삽입하는 방법이 많이 연구되고 있는데, 공동과 정면충돌하는 제 2의 레이저 펄스를 이용하거나, 두 개의 기체 매질을 인젝터와 증폭단으로 나누어 가속하는 방법 등이 연구되었다.

초강력 레이저를 이용한 양성자나 이온의 가속은 초강력 레이저를 고체 매질에 조사하여 이루어진다. 초강력 레이저 펄스를 μm 이상의 두께를 가지는 고체에 집속하면, 고체 표면에서

고밀도 플라즈마가 형성되면서 레이저장을 반사시킨다. 따라서 레이저 펄스는 고체를 투과하지 못한다. 하지만 고체 표면에서 레이저로부터 에너지를 얻은 전자(대략 폰더모토티브 퍼텐셜 만큼의 에너지를 얻는다.)들은 고체를 통과해서 뒷면으로 빠져나가게 되는데, 이 빠져나간 전자와 고체매질 사이에 정전기력이 고체 뒷면에 있는 수소와 가벼운 원소를 이온화시킨 후 양성자와 이온을 가속시킨다. 이를 표적 수직 쉬스 가속(target normal sheath acceleration)이라고 한다. 이때의 최대 양성자의 에너지는 대략 폰더모토티브 퍼텐셜 중 수직 진동 운동의 기여 만큼에 해당한다. 지금까지 이 방식에 의한 양성자, 이온 가속 연구가 많이 행해졌는데, 나노미터 두께의 박막 제조기술의 발전과 초강력 레이저의 세기 향상 덕분에 최근에는 이보다 효율적이라고 여겨지는 광압 가속(radiation pressure acceleration)이 연구되고 있다. 초강력 레이저 펄스를 레이저 펄스의 표피 깊이(고체 밀도에 대해 10 nm 정도)의 두께를 가진 고체에 집속하면, 이 얇은 고체에 있는 전자는 하나의 뭉치로 앞으로 밀려나가게 되는데, 이때 발생하는 전하분리에 의한 정전기장이 뒤에 남아있는 양성자와 이온을 끌어당겨 가속한다(그림 5). 이는 전자를 매개로 해서 레이저의 운동량을 마치 충돌에서처럼 양성자와 이온에 전달하는 셈인데, 레이저의 세기가 세질수록 더욱 효율적이 될 수 있다고 알려져 있다. 얼마 전 본 연구단은 이론적으로 예측되던 광압 가속의 대표적인 특성들을 처음으로 명확하게 실험적으로 증명했고, 아울러 93 MeV에 이르는 양성자 에너지를 달성하였다.^[10,11]

2. 강력한 엑스선, 감마선 발생

강력한 레이저장을 이용하여 고밀도의 전자 뭉치를 비선형적으로 진동시키면 결맞는 강력한 단파장 빛이 발생되리라는 것은 전자기학을 아는 사람이라면 누구나 이해할 수 있다. 이때 전자무치의 크기가 달성 가능한 최소 파장을 결정한다. 문제는 과연 이런 고밀도의 전자 뭉치를 어떻게 밀도를 유지하면서 강하게 흔드느냐 하는 것이다. 전자 사이의 반발력을 생각하면 그러한 전자 뭉치는 금방 흩어질 것이다. 초강력 레이저는 그에 대한 한 가지 해결책을 제공한다. 레이저의 세기가 충분히 세다면 전자 뭉치가 퍼지기 전에 충분히 많은 횡수의 결맞는 진동을 하는 것이 가능하다. 이제 남은 문제는 애초에 어떻게

REFERENCES

- [9] N. A. M. Hafz *et al.*, *Nature Photon.* **2**, 571 (2008).
- [10] I. J. Kim *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **111**, 165002 (2013).
- [11] I. J. Kim *et al.*, "New frontier of laser particle acceleration: driving protons to 80 MeV by radiation pressure," arXiv:1411.5734 [physics.plasm-ph].

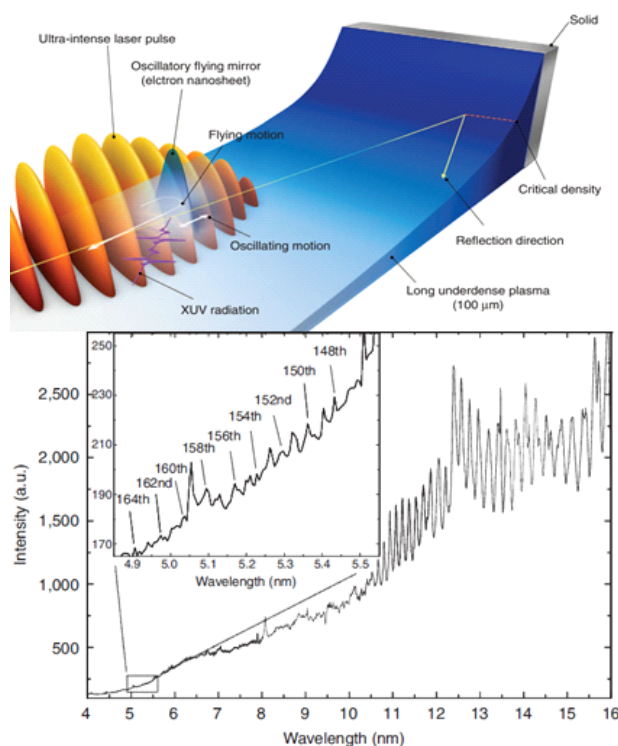


Fig. 6. Relativistic high harmonic generation by the oscillating flying mirror mechanism. The upper figure shows the mechanism schematically. The lower figure shows the experimental spectrum obtained with the 100-TW beamline of the laser in Fig. 2. The harmonics up to the 164th order were obtained.

그런 전자뭉치를 만드는가이다.

이에 대한 한 가지 방법은 매우 급한 밀도 경사를 갖는 고밀도 플라스마에 P편광을 가진 초강력 레이저 펄스를 비스듬히 입사시키는 것이다. 그러면 레이저의 전기장 중 플라스마 표적에 수직인 성분이 고밀도 플라스마의 맨 바깥쪽의 얇은 전자막을 떼어내 진동시켜서, 격렬하게 진동하는 거울을 만들어 낸다. 이 진동하는 거울은 입사하는 레이저 펄스에 의해 구동되는 동시에 레이저 펄스를 반사시킬 것이므로, 도플러 효과에 의해 주기적으로 반사된 레이저 펄스는 입사파의 고차조화파가 된다. 이를 상대론적으로 진동하는 거울 방식(relativistically oscillating mirror mechanism)이라고 하는데, 이 방식으로 keV 영역에 이르는 고차조화파까지 발생된 것이 보고되었다. 이 방식에서 핵심적인 사항은 우수한 거울을 만들기 위해서는 매우 급한 밀도 경사를 갖는 고체밀도의 플라스마를 준비해야 한다는 것인데, 이러한 플라스마는 입사하는 레이저 펄스의 대조비를 매우 높여서 얻을 수 있다. 다만 대조비를 높이는 과정에서 레이저 펄스의 에너지가 상당히 감소할 수 있다.

이와 반대의 경우에도 강한 고차조화파가 발생한다는 것이 본 연구단의 연구진에 의해 밝혀졌다.^[12] 같은 실험 조건에서 레이저 펄스의 대조비가 높지 않으면 매우 낮은 경사 밀도를

갖는 플라스마가 만들어진다(그림 6 참고). 이때 레이저 펄스는 레이저 펄스의 반사가 일어나는 임계밀도 부근까지 진행하는데, 진행하면서 폰더로모티브 힘에 의해 임계밀도의 10배 정도의 밀도를 갖지만 두께는 nm 정도밖에 되지 않는 고밀도 전자막을 만들어 낸다. 이 전자막은 레이저 펄스의 앞단에서 만들어진 후 레이저에 의해 표적쪽으로 밀렸다가 쿨롱힘에 의해 레이저 펄스의 뒷부분으로 쏘아진다. 마치 새총으로 돌맹이를 쏘는 것처럼, 즉, 고밀도 전자막이 레이저와 충돌하는 것인데 이때 레이저 전기장에 의한 막의 진동 때문에 고차조화파가 만들어진다. 이를 진동하며 비행하는 거울 방식(oscillating flying mirror mechanism)이라고 한다. 이 방식에 의해 같은 레이저를 이용했을 때 상대적으로 진동하는 거울 방식보다 훨씬 높은 차수의 고차조화파가 강하게 얻어졌다.^[12]

위에서 살펴본 상대론적 고차조화파 발생에서는 레이저의 세기가 세면 셀수록 더 높은 차수가 더 세게 나온다. 이는 매질의 이온화를 가능한 억제해야 하는, 원자를 이용한 비상대론적 고차조화파 발생에 비하면 큰 장점이다. 하지만 자유 입자로 이루어진 플라스마를 매질로 쓰기 때문에 원자를 매질로 쓰는 경우, 즉, 원자가 가진 결맞음을 이용하는 경우보다 결맞음이 좋기는 힘들다. 하지만 수주기 초강력 레이저 기술이 발전하여 거울의 진동을 한 주기 내로 제한할 수 있다면 단일 아토초 광원으로 유용하게 쓰일 수도 있을 것이다.

지금까지 고차조화파는 keV 수준까지 보고되었는데, 상대론적 광학이 더 독보적인 역할을 할 수 있는 것은 MeV 영역의 감마선 발생이다. 특히 두 개의 동기화된 초강력 레이저 펄스를 이용하여 하나는 GeV 전자 뭉치를 만들고 다른 하나는 그 뭉치에 입사하는 실험이 큰 관심의 대상인데 현재 본 연구단의 주요 실험주제이다. 전자 뭉치와 레이저가 서로 마주 보는 경우, 전자와 함께 움직이는 계에서 보면 강력한 감마선 펄스가 입사하는 셈이라 비선형 콤프턴 효과가 일어날 수 있다. 또한 실험실계에서 보면 전자에 의해 반대방향으로 산란된 레이저는 강력한 감마선이 될 것이다. 물리적으로 이 실험은 상대론적 고전전자기학에서 섭동적 비선형 양자전기역학으로의 전환을 다루는 의의가 있다.

3. 천체물리현상의 구현: 실험 천체물리

현재의 초강력 레이저를 이용하면 100 J의 에너지를 $10\mu\text{m} \times 10\mu\text{m} \times 10\mu\text{m}$ 의 공간 안에 어렵지 않게 집속할 수 있는데, 이때의 에너지밀도(압력)는 대기압의 10^{12} 배에 해당하는 엄

REFERENCES

- [12] I. J. Kim *et al.*, Nature Commun. **3**, 1231 (2012).

Table 2. Magnitudes of some physical quantities realizable with the best conventional methods and with ultra-intense lasers.

물리량 (단위)	기존 기술 이용	초강력 레이저 이용
정적 전기장 (V/m)	10^8 (가속기)	10^{14}
정적 자기장 (T)	10^2 (초전도 자석)	10^6
온도 (K)	10^9 (토카막)	10^{12}
압력 (bar)	10^5 (다이아몬드 모루)	10^{11}

청난 값이다. 앞에서 살펴봤듯이 이 어마어마한 빛의 에너지밀도는 빛과 물질의 상호작용을 통해서 물질의 운동에너지 밀도, 정전기에너지 밀도 그리고 정자기에너지 밀도로 변환되는데, 그 크기는 지구상의 다른 기술로 얻을 수 있는 것보다 훨씬 크다 (표 2 참고). 즉, 초강력 레이저를 이용하면 다른 기술로 얻기 힘든 극한의 에너지 밀도를 가진 환경을 만들어 낼 수 있다.

지구상에서는 이런 환경이 극히 예외적이고 인공적으로나 가 능한 것이지만, 우주에서는 어렵지 않게 찾아볼 수 있다. 별이 나 행성의 내부, 블랙홀, 펄사, 초신성 폭발 등 우주에는 고에너지밀도를 갖는 다양한 환경이 존재한다. 이런 우주를 탐구하는 데에 매우 아쉬운 점은 거의 전적으로 관측이나 전산모사에만 의존할 수밖에 없다는 점이다. 비록 지난 10여 년 간의 관측기술이 비약적으로 발전하여 빅뱅 이론을 확증하고 우주가 가속 팽창을 한다는 것까지 믿을 수 있는 단계에 이르렀지만, 우주의 다양한 물체에서 벌어지는 동역학을 자세히 이해하기에는 한계가 있다. 이런 상황에서 초강력 레이저는 고에너지 천체 현상을 지구상에서 구현하여 제어된 실험을 할 수 있는 방법을 제공해 준다. 이런 연구를 실험실 천체물리(laboratory astrophysics) 또는 실험 천체물리(experimental astrophysics)라고 하는데 최근 초강력 레이저를 이용한 연구에서 큰 관심을 받고 있다.

그렇다 하더라도 초강력 레이저로 관련된 천체 현상을 물리량의 크기를 있는 그대로 구현하는 경우는 거의 없다. 왜냐하면 천체 현상인 주요에너지원인 중력은 애초에 초강력 레이저로 구현할 수 없고, 천체 현상과 관련된 물리량의 크기는 초강력 레이저로 구현할 수 있는 것의 범위를 뛰어넘는 경우가 많기 때문이다. 대신 관심이 되는 천체 현상에 대해 상사(相似)적인 레이저-플라즈마 환경을 설계하여 연구한다. 이는 비행기를 설계할 때 비행기보다 훨씬 작지만 비슷한 유체역학적 특성을 보이는 모델 비행기로 풍동실험을 하는 것과 마찬가지이다. 예를 들어 전자기장에 있는 하전입자의 동역학은 $q = eE/m\omega c$ 로 주어지는 무차원량에 의해 결정되는데, 펄사 주변에서 0.3-30 Hz의 전자기파는 $q = 100$ 정도가 된다. 같은 q 값을 전자에 대해 10^{22} W/cm²의 초강력 레이저 펄스로 얻을 수 있다. 두 경우에 절대적인 물리량의 크기는 큰 차이가 나지만, 비슷한 즉,

상사적인 하전 입자 동역학을 갖게 된다. 또 다른 예로 초신성 SN 1987A의 폭발에 대한 연구가 있다.^[13] 이 현상의 유체역학적 표면 불안정성은 100만 킬로미터에 걸쳐 2000초 동안 일어나는 현상인데, 이를 0.18 mm에서 21 ns 동안 일어나는 레이저-플라즈마 상호작용으로 연구하였다. 두 물리 시스템의 물리량은 엄청나게 다르지만, 유체역학적 운동을 결정짓는 무차원수 $u/\sqrt{p/\rho}$ (u 는 유체 속도, p 는 압력, ρ 는 밀도)는 각각 2.9와 3.1로 거의 같았다. 일반적으로 이상 유체 방정식은 scalable해서 쉽게 상사적인 실험상황을 찾을 수 있지만, 여기서 점성 등을 비롯한 다른 물리적 요소를 고려해야 하면 알맞은 상사적인 실험상황을 설계하는 것이 매우 중요해진다.

현재 우주의 다양한 현상들, 즉, 우주의 전자기장 형성, 감마선 폭발, 상대론적인 제트, 플라즈마 제트와 충격파에서의 플라즈마 불안정성, 초신성 폭발, 고에너지 입자 형성, 천체 물체에 의한 엑스선 발생, 자기장 재연결 등이 초강력 레이저를 이용한 실험 천체물리의 연구주제로 큰 관심의 대상이 되고 있다.

맺는 말

지금까지 초강력 레이저에 의해 가능하게 된 상대론적 광학의 기본적인 특성과 연구 주제들을 간단히 살펴보았다. 위에서 살펴본 바와 같이, 레이저 세기를 올리는 것은 단순히 주어진 상호작용을 세게 하는 정도의 일이 아니고, 상호작용의 특성과 심지어 그 요소와 종류까지도 바꾸어 버리는 일이다. 게다가 비섭동적으로 강력한 빛과 물질의 상호작용은 우리가 지금까지 정립해 온 고전전자기학과 양자전자기학을 대대적으로 수정할 것을 요구하고 있다.

현재 구축되었거나 가까운 미래에 구축될 초강력 레이저는 그 집속 세기가 10²³ W/cm² 이상이 되기 힘들기 때문에 상대론적 광학의 전 영역을 모두 실험적으로 연구하는 것이 지금 당장은 요원하지만 적어도 상대론적 광학의 큰 비전은 제시되어 있다고 볼 수 있다. 현재는 앞서 언급한 협의의 상대론적 광학과 극상대론적 광학에 대해 많은 연구가 진행되고 있고, 그 이상의 세기 영역에 대해서는 이론적인 연구만 진행되고 있다. 하지만 이미 현재의 초강력 레이저와 상대론적 광학 기술을 바탕으로 훨씬 더 높은 세기의 전자기파를 만드는 방법이 제안되고 있을 정도로 빠르게 발전하고 있으므로, 진공 비선형 광학 실험을 논의할 날이 그리 멀지만은 않은 것 같다. 이 길에 젊고 도전적인 과학도들이 동참하기를 바라며 이 글을 맺는다.

REFERENCES

- [13] R. P. Drake, *High-Energy-Density Physics* (Springer, 2006).