방사광 X-선 광원의 진보: 1세대-4세대

DOI: 10.3938/PhiT.26.022

노도영

Progress of Synchrotron X-ray Radiation

Do Young NOH

X-rays have contributed a lot to human society by revealing atomic structures of various materials as well as by providing means to image inside human body non destructively. Synchrotron accelerators revolutionized the use of x-rays by providing bright x-ray beam of superior quality. Recently, the x-ray free electron lasers providing ultrashort and ultra-intense x-ray pulses have culminated the success of synchrotron radiation. In this article, we review the nature and progress of synchrotron x-ray sources.

들어가는 글

1895년 뢰트겐이 발견한 X-선은(1901, Nobel Prize to Röntgen) 인체의 내부를 비파괴적으로 촬영하는 것을 가능하게 하여 의료계의 혁신을 가져옴과 동시에 인간의 삶을 크게 바꾸어 놓았다. 현재까지도 X-선의 가장 큰 사용처는 병원을 방문했을 때 진행되는 진단용 방사선 촬영일 것이다. 하지만 과학기술 분야에서 X-선의 응용은 라우에가 규명한 ‘X-선은 고체 상태의 원자 간격과 유사한 크기의 파장을 가지고 있는 빛’이라는 점에 기초한다(1914, Nobel Prize to Laue). 브래그가 이러한 성질을 응용하여 고체의 결정 구조를 규명할 수 있음을 보여준 이래로 X-선은 물질의 원자구조를 규명하는 도구로

저자약력

노도영 교수는 1985년 서울대학교 물리학과를 졸업하고, 1991년 MIT에서 박사학위를 취득했으며, MIT에서 박사후 연구원 과정을 마치고 Exxon 연구소의 연구원 생활을 거쳐 1995년부터 광주과학기술원 물리광학과 및 신소재공학부 교수로 재직 중이다. 국가핵심연구센터 NCRC인 ‘극한광응용기술 국가핵심연구센터’ 사업을 주관하였으며 현재 선도연구센터인 SRC ‘극미세 초고속 X-선과학 연구센터’를 운영하고 있고 X-선 자유전자레이저를 포함한 다양한 방사광 X-선 활용 연구를 수행하고 있다. (dynoh@gist.ac.kr).

Fig. 1. Third Generation Pohang Synchrotron Radiation Accelerator PLS-II and the 4th generation PAL-XFEL X-ray Free Electron Laser (Photo: Pohang Accelerator Laboratory Homepage).

꾸준히 응용되어 왔다(1915, Nobel Prize to Bragg). 20세기의 과학기술 성과 중 가장 임팩트가 큰 성과 중 하나로 X-선 회절 데이터로부터 왓슨과 크릭이 분석한 DNA의 이중나선 구조(1962, Nobel Prize to Watson and Crick)를 들 수 있다.

X-선을 이용한 비파괴 촬영은 X-선과 물질의 상호작용이 매우 작고 투과력이 큰 특징으로 인해서 가능한데 이는 역설적으로 물질에 의한 X-선 신호가 매우 작음을 암시하고, X-선을 활용하여 물질의 상태를 연구하는 것이 쉽지 않음을 시사한다. 따라서 대부분의 연구에서는 mm 수준의 macroscopic 시료를 구성하는 전 영역의 원자구조의 평균적 정보를 획득한다. X-선을 이용하여 0.1 nm 수준의 원자구조 정보를 얻을 수 있지만 이는 큰 시료의 평균적 정보라는 점을 기억할 필요가 있다. 시료의 크기가 작거나 국소영역의 원자정보를 얻는 데 있어 X-선과 물질의 작은 상호작용은 큰 제한점이 된다. 이러한 제한점을 극복하기 위해서는 매우 밝은 X-선(광자의 수가 많은)이 요구되는데 이 요구에 대한 해답이 바로 방사광 X-선 광원이다. 그림 1은 우리나라에서 운영 중인 제3세대 방사광가속기 PLS-II와 제4세대 방사광가속기 PAL-XFEL의 사진을 보여주고 있다.

제1세대 방사광 가속기(synchrotron: 싱크로트론)

X-선을 이용한 물질 연구의 전환점은 방사광(synchrotron

Fig. 2. Intensity distribution of the light generated when an electron changes its direction in magnetic field. The classical dipole radiation generated when the electron speed is much smaller than the speed of light appears on the left, while the right illustrates the synchrotron radiation generated with a relativistic electron. [Redrawn from Ref. 1]

radiation, SR)의 발견이다. 방사광은 빛의 속도에 가까운 고 에너지의 전자빔이 가속될 때(주로 자기장 하에서 진행방향을 바꿀 때) 발생하는 빛이다. 전하를 띤 입자가 가속될 때 빛이 발생하는 것은 고전 전자기학의 radiation theory에 의해 잘 설명되는 현상인데 입자가 빛의 속도에 근접하게 되면 빛을 발생하는 입자가 자신이 발생한 빛과 거의 같은 속도로 이동하면서 계속 빛을 발생하므로 관찰자에게는 가속운동 동안 발생한 모든 빛이 거의 동시에 도착하는 도플러 효과가 일어난다. 따라서 빛의 진행방향에 있는 관찰자는 매우 강한 빛을 관찰하게 된다. 결국 상대론적으로 운동하는 전자가 그림 2와 같이 자기장에 의해서 원형의 궤도로 가속되게 될 때 접선방향으로 강한 빛을 발생하는데 이렇게 주어진 방향으로 퍼짐 없이 발생하는 고휘도의 빛이 방사광이다.

방사광을 발생시키는 싱크로트론 가속장치는 1947년 미국의 General Electric에서 처음 제작되어 ‘Schwinger radiation’으로 예측되었던 방사광을 관측하였다. 싱크로트론이란 이름은 가속관 내에서 가속되는 여러 전자들의 움직임을 동기화하는 기술 즉 속도가 상대적으로 늦어 뒤쳐진 전자는 더 많이 가속시키고 앞에 있는 빠른 전자는 덜 가속시키는 방법으로 전자들이 평형궤도 중심에서 진동하며(synchrotron oscillation) 평형궤도로 복원하는 안정화된 전자군 빔으로 만드는 기술을 칭하는 말이다. 원형의 가속관에서 고에너지로 입자빔을 가속시키는 것이 목적이었던 싱크로트론 가속기 초기에서는 방사광 발생으로 인해서 가속하고자 하는 입자의 에너지가 줄어들어서 방사광은 입자물리 연구에 있어 골칫덩어리로 여겨졌다.

하지만 1960년에 들어서면서 방사광이 기존의 튜브 타입의 X-선광원의 단점을 극복하고 다양한 우수한 성질을 갖는 빛으로 인식되기 시작했다. 제1세대 방사광가속기는 입자물리 연구를 위해 건설한 가속장치에서 발생한 X-선을 각종 연구에 활용하는 형태의 가속기 운영 방식을 일컫는다. 이러한 방식은

입자가속기에서 방사광을 기생적으로 활용한다고 해서 ‘parasitic operation’이라고 한다. 독일의 DESY, 일본의 SOR(synchrotron orbital radiation), 미국의 SURF(Synchrotron Ultraviolet Radiation Facility), CHESS(Cornell high energy synchrotron source) 등이 1세대 싱크로트론에 해당한다. 방사광가속기는 크게 전자빔의 속도를 빛의 속도로 가속시키는 선형가속장치와 가속된 전자빔을 계속 순환시키며 방사광을 발생하는 저장링으로 구분할 수 있다. 저장링에서는 전자가 순환하면서 방사광으로 잃어버린 에너지만 보충해주며 전자의 에너지를 유지하고 재사용하므로 전력소모에 있어서도 매우 효율적인 운영이라고 볼 수 있다.

제2세대 방사광 가속기

방사광의 우수한 성능이 인지되고 알려지면서 1980년대 방사광 발생과 사용을 주목적으로 하는 방사광가속기가 건설되기 시작했다. 방사광은 적외선에서부터 감마선에 이르는 다양한 영역의 파장을 포함하지만, 제2세대 방사광가속기의 주된 목적은 X-선과 자외선 영역의 빛을 발생하는 것이었으며 X-선을 목적으로 하는 가속기는 전자빔의 에너지를 2~3 GeV 정도로 운영하였고 자외선을 목적으로 하는 가속기에서는 500~800 MeV 영역의 전자빔에너지를 활용하였다. X-선 활용을 목적으로 하는 대표적인 2세대 방사광가속기는 미국의 NSLS(National Synchrotron Light Source)와 일본의 Photon Factory, 그리고 스웨덴의 MAX-I 등이 있다.

방향성이 강하고 휘도가 높은 고품질의 방사광을 발생시키기 위해서는 저장링에서 순환하는 방사광의 방향성을 결정하는 전자빔의 에너지와 더불어 전자빔의 크기[beam size]와 전자빔이 움직이는 방향의 퍼짐[beam divergence]가 중요하다. 이를 기술하는 변수가 이들의 곱을 표현하는 에미턴스(emittance)인데 전자빔의 에미턴스는 발생하는 빛(photon beam)의 에미턴스를 결정한다. 제2세대 방사광가속기는 약 100 nm-rad의 수평방향 에미턴스를 가지고 있다. 이 정도의 에미턴스에서는 방사광 원으로 그림 3에 보인 것처럼 저장링에서 전자빔의 방향을 한번 바꾸는 휩자석을 사용한 휩자석광원이 주류를 이루고 있었다. 휩자석에서 발생하는 방사광은 수직방향에서 퍼짐이 $1/\gamma$ (γ =전자 총에너지/전자정지질량에너지)로 주어지고 그 휘도는 최대 10^{13} photons/s/mm mrad 정도였다. 2세대 방사광가속기에서 휩자석 이외에도 전자빔이 움직이는 직선구간에서 여러

REFERENCES

- [1] https://commons.wikimedia.org/wiki/File%3ASynchrotron_radiation_energy_flux.png.

Fig. 3. Schematic diagram of synchrotron storage ring. Electron bunches move along a straight sections and then change their direction at the bending magnet section. The size of the storage ring is hundreds of meters in diameter. The inset illustrates the synchrotron radiation generated in the tangential direction of the electron motion at a bending magnet.

변 가속시키는 장치인 wiggler나 undulator라고 불리는 주기적 자석배열을 설치하여 더 휘도가 높고 성능이 좋은 방사광을 발생하는 장치가 연구되고 설치되기 시작하였다. 하지만 전자빔의 조절이 쉽지 않아 insertion device(삽입장치)는 보편적으로 사용되지는 못하였다.

제2세대 방사광가속기가 정상 가동되기 시작하면서 방사광은 비로소 물리/생물/화학 등 다양한 기초연구분야에서 활발하게 활용되기 시작하였다. 방사광은 특히 생명과학 분야에 단백질 구조분석 등 다양한 생체고분자의 결정구조를 규명하는데 활용되어 많은 우수한 연구결과를 창출하였다.

제3세대 방사광가속기

1990년 후반 들어서면서 방사광 가속장치에서 전자빔을 조절하는 기술이 한층 더 발전하기 시작하였다. 이때 새롭게 건설된 대부분의 가속기의 전자빔 에미턴스는 2세대에 비하여 훨씬 줄어들어 다수의 가속기에서 10 nm-rad 이하로 개선되었다. 이렇게 개선된 에미턴스를 가진 방사광가속기를 '제3세대 방사광가속기'라고 칭한다. 고에너지의 낮은 에미턴스를 가지는 X-선 빔을 발생시키기 위해서는 전자빔의 에너지를 높이고 저장링의 크기를 크게 만드는 것이 유리한데, 유럽공동체의 ESRF(6 GeV), 미국의 Advanced Photon Source(APS, 7 GeV), 일본의 SPring-8(8 GeV)이 대표적인 초대형 방사광가속기이다. 반면 연 X-선이나 UV 광원으로는 1~2 GeV의 비교적 낮은 가속전압을 사용하였으며 미국의 ALS와 대만의 TLS가 이에 해당한다.

정교하게 컨트롤되는 전자빔 기반 하에서는 insertion device로 불리는 undulator와 wiggler를 전자빔의 직선구간에 설치하여 사용하는 것이 가능하였고, 횡자석보다는 삽입장치를

Fig. 4. Conceptual diagram of the electron movement and the generation of light in an undulator, one of the inserting devices.^[2] Since the electron moves in a sinusoidal path whereas the light propagates straightly, the radiation is strongly peaked at the X-ray wavelength corresponding to the path difference of the lights generated from two consecutive magnet poles.

보편적인 방사광원으로 사용한 것이 제3세대 방사광가속기의 특징이라고 할 수 있다. Wiggler에서는 주기적으로 배열된 자석에서 발생한 빛들이 서로 합쳐져서 더 강한 빛을 얻을 수 있으나 undulator는 이보다 더 나아가서 각 전자석에 의해 발

REFERENCES

- [2] D. McMorow and J. Als-Nielsen, *Elements of Modern X-ray Physics*, Hoboken (Wiley, N. J., 2013).

생한 빛들이 서로 일정한 관계를 가지고 있어 원하고자 하는 파장의 빛이 보강되어 매우 강한 X-선이 발생한다. 따라서 언듈레이터에서 발생하는 방사광은 빛의 파장이나 에너지에 따른 휘도가 일정한 파장에서 피크를 보이는 quasi monochromatic 광원이다. 그림 4에서는 언듈레이터 내에서의 전자군의 운동과 발생하는 빛의 진행을 보여주고 있다.

우리나라에서 1994년 준공된 포항방사광가속기(Pohang Light Source: PLS)도 제3세대 방사광가속기로 설계되었으나 초기에는 가속전압이 2.5 GeV로 경X-선에서 자외선영역까지 넓은 파장 영역의 빛을 발생하고 활용하는 것으로 설계되었다. PLS는 준공 이후 국내에 다양한 연구에 활용되어 많은 연구성과를 보여주었고 매우 성공적으로 운영되었다고 평가되지만, 세계적으로 경쟁력이 있는 새로운 X-선 연구 기법을 개발하기에는 광원성능의 한계점이 컸다. 가장 취약한 부분은 에미턴스로서 20 nm-rad 정도의 설계치로 건설되었고, 이에 따라 빔라인도 횡자석 기반의 빔라인이 주종을 이루어서 경X-선 영역에서의 성능은 3세대보다는 2세대에 가까웠다. PLS는 2012년 성능향상사업을 통하여 에미턴스 7 nm-rad를 목표로 PLS-II로 업그레이드 되었다. 방사광원도 여러 기의 undulator를 설치하여 기존 대비 성능이 대폭적으로 향상되었으며, 성능이 좋은 3세대 가속기에서 가능한 방사광의 coherence를 활용하거나 time structure를 이용하는 연구들이 가능해졌다. 하지만 PLS-II도 빛의 품질과 강도면에서 미국, 일본의 대형 3세대 방사광가속기에 비해 아직 뒤져 있으며, 동급 약 3 GeV의 가속 전압을 갖는 고 에미턴스 가속기인 영국의 Diamond, 스위스의 Swiss Light Source, 프랑스의 Soleil에 비해 성능이 뒤져 아쉬운 면이 있다.

최근에는 3세대 방사광가속기의 기술을 더욱 발전시켜 에미턴스가 이론적 한계치에 접근하고 있어서, 고품위의 강한 빛을 발생하는 가속기가 건설되고 있다. 이러한 차세대급 방사광가속기는 기존의 6~8 GeV급 초대형 방사광가속기보다 더 낮은 3-4 GeV 에너지의 전자빔으로도 월등한 성능의 X-선을 발생시킬 수 있다. 이러한 가속기들은 PLS-II에 비해 100~1000배 이상의 강한 빛이 발생하도록 설계되었고, 빛의 결맞음성 등과 관련된 성능도 매우 월등하다. 차세대급 방사광급 가속기는 2015년 완공된 미국의 NSLS-II와 2016년 준공된 스웨덴의 MAX IV가 대표적이고, 대만에서도 2017년 새로운 방사광가속기 Taiwan Photon Source(TPS)가 준공되었다.

제3세대 방사광 가속기는 여러 나라에서 국가거대과학시설로 설치하여 자국의 과학기술경쟁력을 향상시키는 데 활용하고 있으며 다양한 학문 분야 및 바이오 나노 기술 등 첨단기술 분야의 연구에서 중요한 역할을 하고 있다. 단백질 데이터은행에 수집된 개수의 연도별 증가량을 보면 3세대 방사광가속기

Fig. 5. Concept of the SASE effect in X-ray free electron laser. [redrawn from Ref. 4]

가 생물학 분야 연구에 미치는 영향이 지대함을 알 수 있다.^[3]

제4세대 X-선 자유전자레이저 (X-ray Free Electron Laser: XFEL)

제3세대 방사광원의 성능이 매우 발달하였음에도 불구하고, 저장링 내 전자군의 각 전자들은 독립적으로 운동하므로 전자들이 발생한 빛은 서로 상관관계가 없는 즉 결맞음성이 없는 in-coherent한 광원이다. 가시광 영역에서 백열전구에서 나오는 빛이 레이저포인터에서 나오는 레이저 빛에 비해 성능이 제한되어 있는 것처럼 2000년 이전의 모든 X-선 광원은 파장은 짧지만 백열등과 같은 incoherent한 광원이었다. 만약 모든 전자들이 일정한 관계를 가지고 가속을 받게 된다면 각 전자가 발생하는 빛의 위상이 같아져서 레이저 특성을 가지면서도 훨씬 강한 빛이 될 것이다.

제4세대 방사광가속기라고도 불리는 X-선 자유전자레이저(XFEL)는 전자들의 undulator 내에서 다른 전자의 가속으로 인해 발생한 빛에 의해 다시 가속을 받는다는 원리에 기반하고 있다. 다른 전자들이 발생한 빛이 충분히 강한 경우 주어진 전자의 운동은 이 빛의 위상과 연계되고 결국 빛을 발생한 전자의 운동과 연동되어 상관관계를 가진다(그림 5). 이에 따라 전자들이 자발적으로 운동의 위상이 연계되고 발생하고자 하는 빛의 파장 간격으로 떨어져 있는 마이크로군(microbunch)들을 형성하고 이 전자군들이 같은 위상의 빛을 증폭하는 SASE(self amplified spontaneous emission)가 발생한다.

SASE가 가능하기 위해서는 언듈러에 입사되는 전자군이 매우 작은 에미턴스를 가져야 하고 그 크기도 매우 작아야 한다. 이러한 고품위의 전자군을 제3세대 방사광가속기와 같은 전자들이 여러 차례 선회하는 저장링에서 유지하는 것은 불가능하다. 따라서 XFEL 빔은 선형가속기에서 가속된 전자군을 매우

REFERENCES

- [3] Z. Dauter, M. Jaskolski and A. Wlodawer, J. Synchrotron Radiation 17, 433(2010).
- [4] Brian W. J. McNeil and Neil R. Thompson, Nature Photonics 4, 814 (2010).

Fig. 6. Increase of the brilliance available x-ray beam by year as synchrotron radiation source technology evolves.

긴 undulator에 입사시켜 형성한다. 이러한 전자군은 재사용하는 것이 불가능하며 저장링과는 달리 1개의 광원만 형성하는 것이 가능하여 XFEL의 사용자 수는 매우 제한적이 될 수 밖에 없다. XFEL은 펄스 형태의 레이저 성능을 가진 강한 X-선을 제공하므로 성능이 원형 저장링 기반 방사광가속기보다 뛰어나다고 할 수 있지만 고비용의 광원이라고 할 수 있다.

XFEL은 매질과 cavity가 부재한 X-선 파장 영역에서의 레이징이라는 어려운 기술로 예상되었고 건설 당시에는 성공여부가 불투명했지만 기대 이상으로 레이징이 잘 이루어졌다. 현재 XFEL의 피크 brilliance는 그림 6에서 보는 것처럼 제3세대

방사광가속기의 10억 배에 다다를 것으로 예상되고 있다. 이러한 광원의 진보는 X-선을 활용하는 새로운 과학이 가능함을 시사한다. 2008년 미국에 LCLS(Linac coherent light source)가 최초로 성공적으로 작동하였고, 일본에서는 2011년에 SACLA(SPring-8 Angstrom Compact free electron LAser)가 가동되어 연구에 사용되고 있으며, 우리나라에서도 세계 3번째로 2016년 PAL-XFEL이 준공되어 사용자 지원을 시작하였다. XFEL의 가동은 원자 간격 수준(~0.1 nm)의 짧은 파장을 가지면서 시간적으로는 펨토초(10^{-15} 초)에 이르는 펄스 레이저 형태의 빛을 제공함으로써 원자 수준의 극미세 세계의 초고속 현상과 연관된 새로운 연구를 수행하는 것을 가능하게 했다. 가장 주목을 많이 받는 분야는 역시 단백질 구조 분석인데, 커다란 단백질 결정의 제조가 불가능하여 X-선 결정학 적용이 어려웠던 다양한 단백질의 구조가 나노결정을 활용하여 분석되고 있다. 또 다른 영역은 초고속 화학반응인데, 피코초 이내에 일어나는 다양한 화학반응에 대한 연구결과가 나오고 있다.

나오는 글

방사광 가속기의 비약적인 발전은 짧은 파장의 매우 밝고 우수한 성능의 빛을 발생시켜 물질의 특성을 원자 스케일에서 연구할 수 있는 기회를 제공해왔다. 특히 4세대 X-선 자유전자레이저는 원자들이 움직이는 시공간의 스케일에서 그것들을 관찰하고 조작하는 가능성을 열어 놓았다. 방사광가속기와 같은 거대과학시설을 막대한 비용을 투자하여 건설하고 운영하는 목적은 자연을 좀 더 자세하게 이해하여 인류의 진보에 필요한 지식을 창출함과 동시에 국가의 과학기술경쟁력을 강화시키는데 있다고 할 수 있다.