

광자 및 광전자학

방사광의 밝기와 빔 품질

60201519 물리학과 이경훈





CONTENTS

01

방사광원과 밝기

- 방사광의 정의 / 밝기의 정의

02

방사광가속기의 구성

- 저장링 / emittance

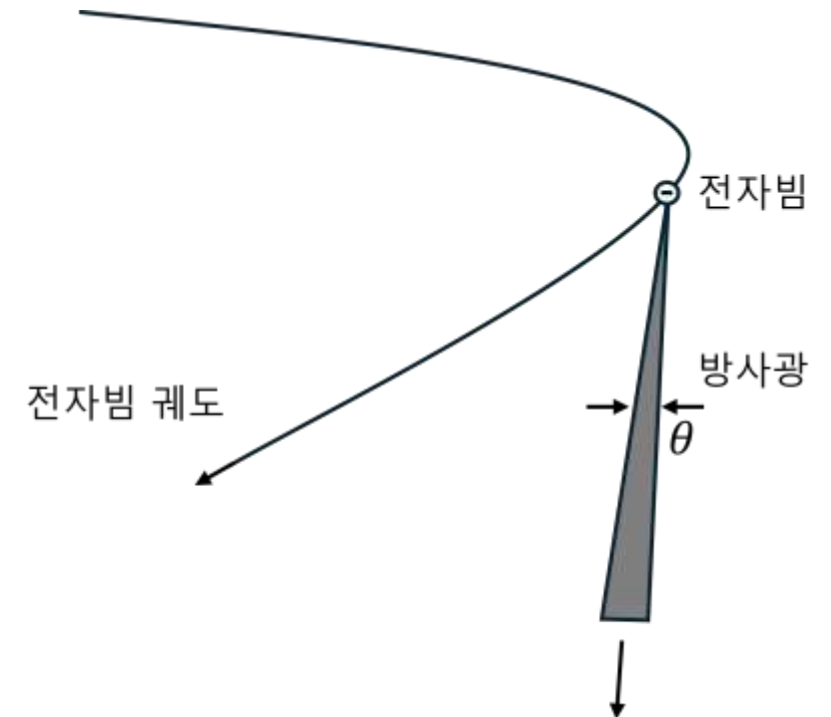
03

방사광의 특성

- 광원의 밝기 / Coherence

방사광 : 빛의 속도에 가까운 속도로 운동하는 전자가 곡선 궤도를 따라 이동할 때, 궤도의 접선 방향으로 방출되는 좁은 퍼짐의 빛

광속에 가까운 속도로 운동하는 전자는 커브를 돌 때 그 접선방향으로 좁은 퍼짐각(θ)의 강한 빛을 방사함.

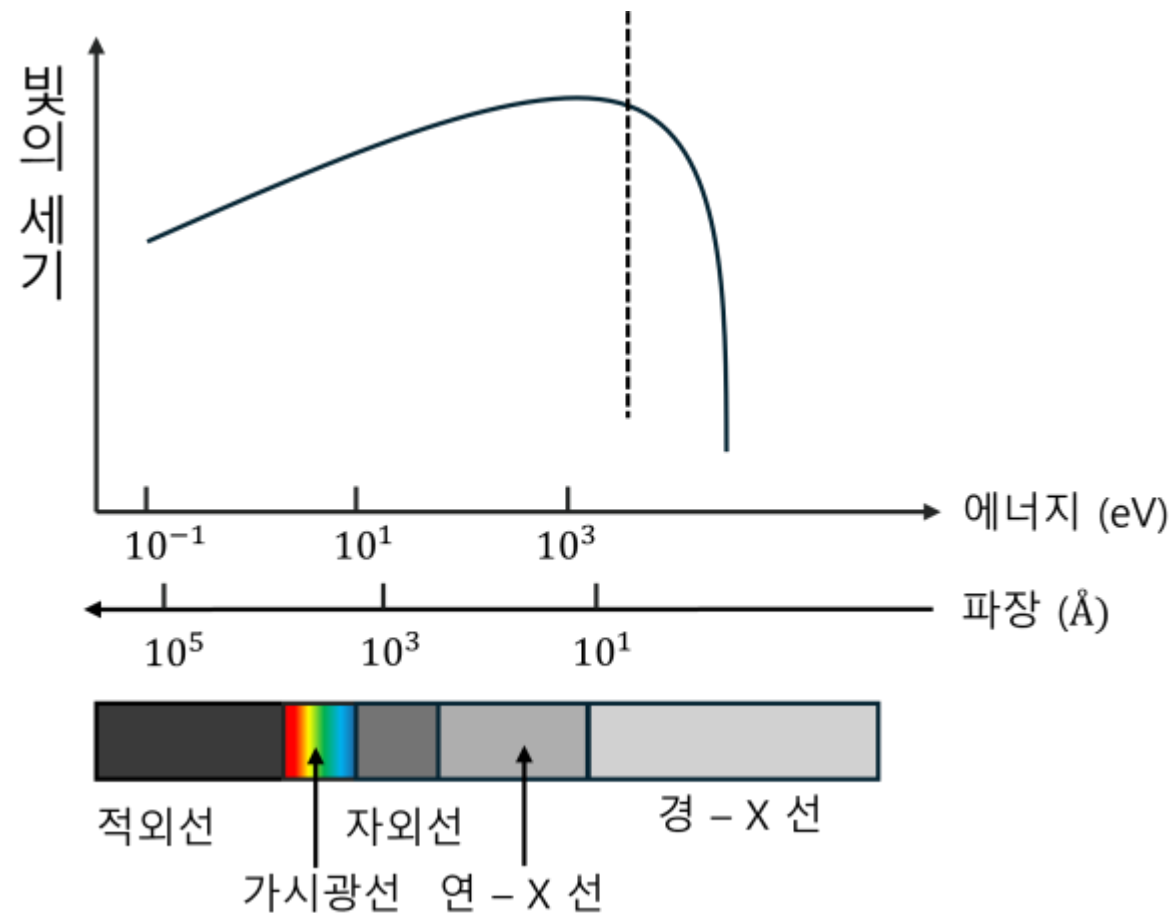


방사광원 : X - 선, 자외선, 가시광선, 적외선에 이르는 광범위한 파장역을 망라하는 강력한 빛을 마련하기 위한 전자 가속장치와 기타 시설

방사광원 = 우수한 질의 광원

1. 파장의 단색광을 선택할 수 있는 성질을 가진 빛
2. 물질과 생체의 미세구조를 규명하는데 매우 유용

방사광 = synchrotron light



대역명칭	광자에너지	파장
경X-선 (hard X-ray)	6.2 keV ~ 124 keV	2Å ~ 0.1Å
연X-선 (soft X-ray)	413 eV ~ 6.2 keV	300Å ~ 2Å
진공자외선 (VUV: vacuum ultraviolet)	6.2 eV ~ 6.2 keV	2000Å ~ 2Å
극자외선 (EUV: extreme ultraviolet)	12.4 eV ~ 6.2 keV	1000Å ~ 2Å
가시광 (visible)	1.65 eV ~ 3.1 eV	7500Å ~ 4000Å
적외선 (infrared)	$\sim 1.24 \times 10^{-3}$ eV ~ 1.65 eV	$\sim 1000\mu\text{m} \sim 0.75\mu\text{m}$

단위 변환 : $1 \text{ nm} = 10 \text{ Å} = 10^{-7} \text{ cm}$ / $1 \text{ Å} = 0.1 \text{ nm} = 10^{-8} \text{ cm}$ / $1 \mu\text{m} = 10^4 \text{ Å} = 10^{-4} \text{ cm}$

빛의 밝기를 나타내는 척도 - 휘도(Luminance), 밝기(brightness 또는 brilliance)

$$\text{밝기(또는 휘도)} = \frac{(\text{방출되는 광자의 수})}{(\text{단위시간})(\text{단위면적})(\text{단위입체각})} \quad \bullet \text{ 단위 : } \frac{(\textit{photons})}{(\textit{s}) \cdot (\textit{mm}^2) \cdot (\textit{mrad}^2)}$$

$$\text{빛띠밝기(분광휘도)} = \frac{(\text{방출되는 광자의 수})}{(\text{단위시간})(\text{단위면적})(\text{단위입체각})(\text{빛 띠너비 } \frac{\Delta\lambda}{\lambda}=0.1\%)}$$

$$\text{BW(대역폭)} : \frac{\Delta\lambda}{\lambda} = 0.1\%$$

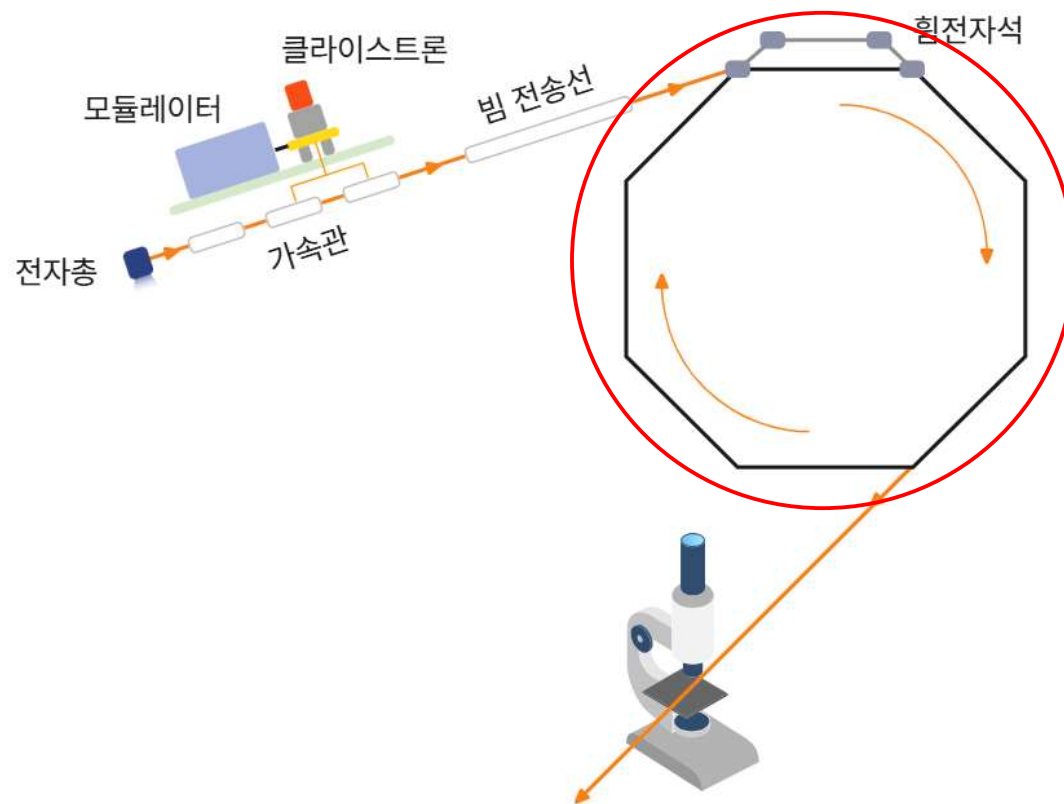
빛띠너비(spectral band width)당의 밝기 = 파장폭에 속하는 빛의 밝기

Ex) $\lambda = 100\text{\AA}$ 에서의 분광휘도를 말할 때, $\Delta\lambda = 0.1\text{\AA}$ 의 빛띠너비당 휘도를 말한다.



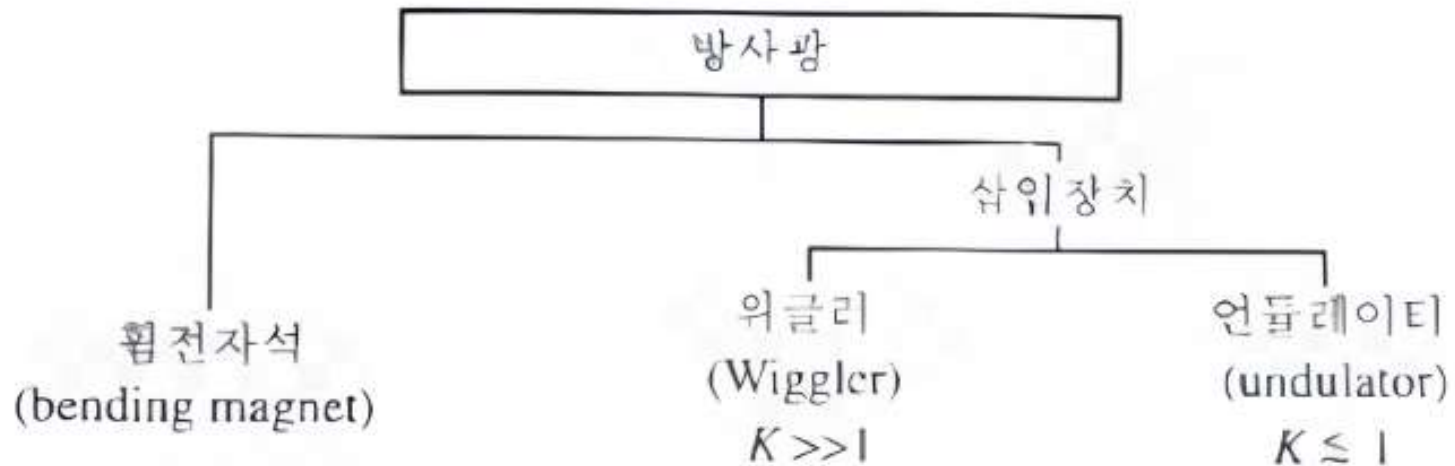
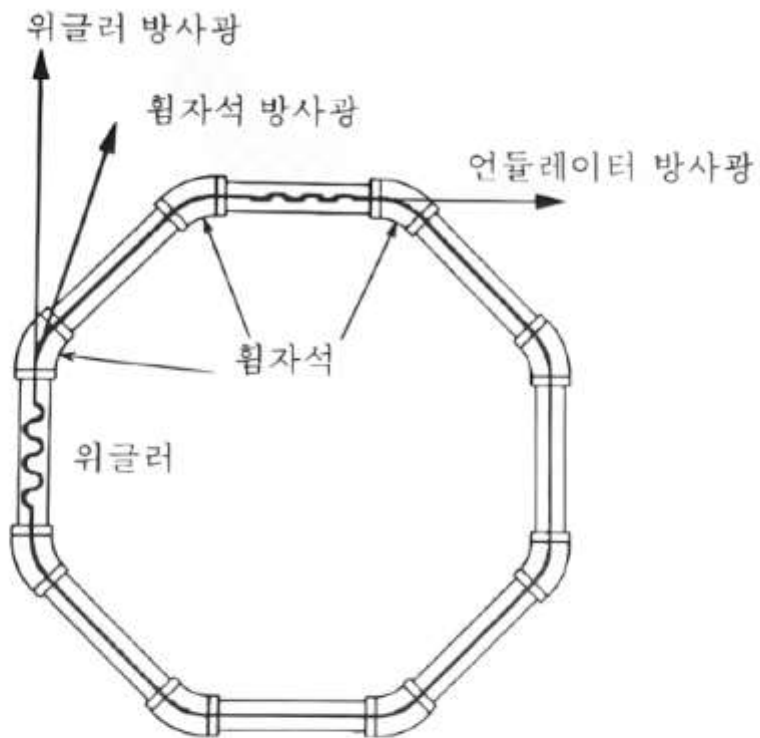
특정 파장 범위(0.1% 대역폭) 내에서 방출된 광자의 밀도를 측정한 값.

1. 전자입사장치(electron injector) : 전자빔을 빛의 속도로 가속 -> 저장링에 입사
2. 저장링(storage ring) : 정해진 궤도상에서 계속 회전 -> 커브를 돌 때마다 빛을 방출
3. 방사광관(beamline) : 방출된 빛을 실험장치까지 이끌고 필요한 장치를 갖추.

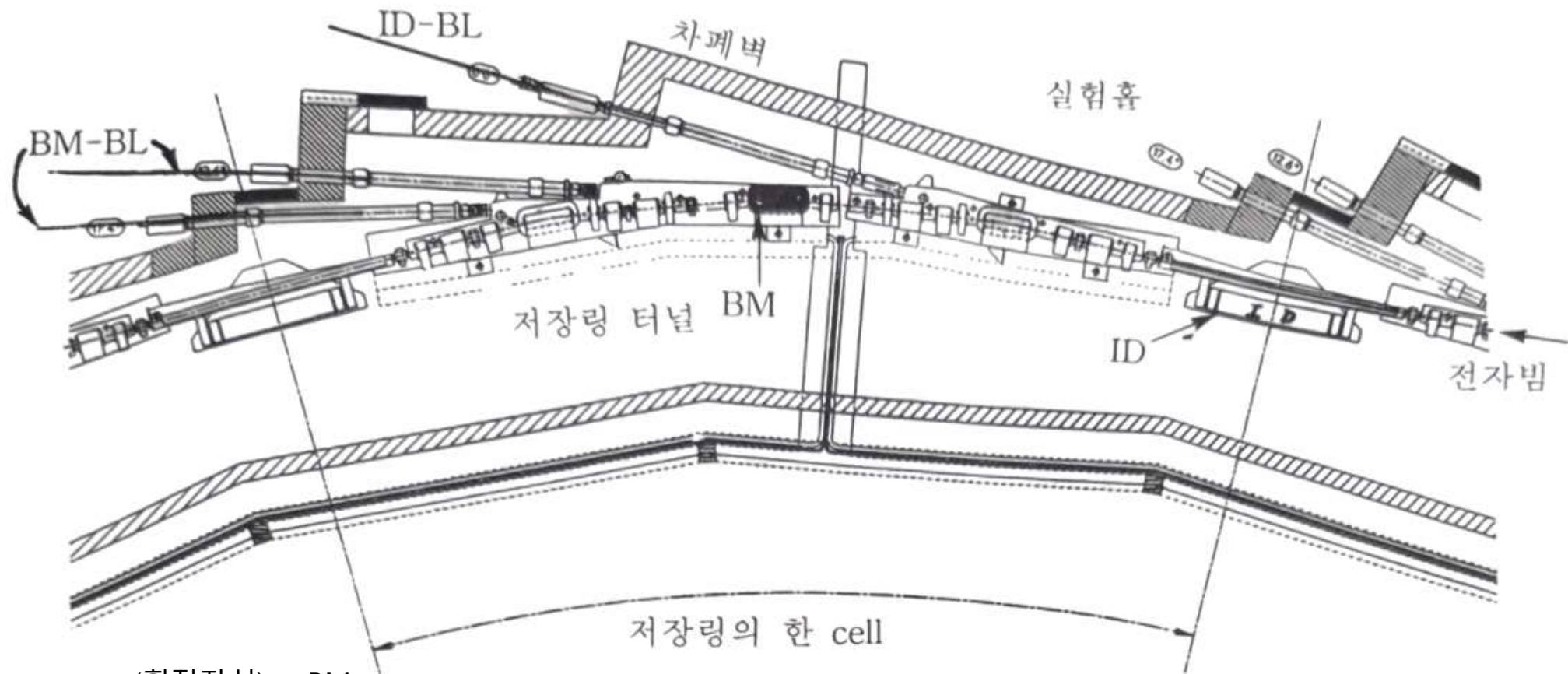


힘자석 있는 곳 – 힘자석 방사광 방출

직선부위 삽입장치(undulator, wiggler) – 삽입장치 방사광 방출



힘자석과 삽입장치가 들어 있는 저장링의 폐궤도 간략도



Bending electromagnet(휨전자석) = BM

Insertion device(삽입장치) = ID

Beamline(빔라인) = BL

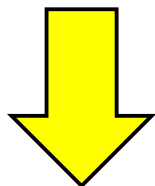
PLS 저장링의 한 cell(궤도 모서리 부분)에서 두 개의 휨자석(BM) 빔라인과 하나의 삽입장치(ID) 빔라인이 차폐벽을 통해서 실험홀(experimental hall)로 나오고 있음을 보여주고 있다

저장링의 가장 중요한 것. = 방사광의 밝기를 크게 하는 것.

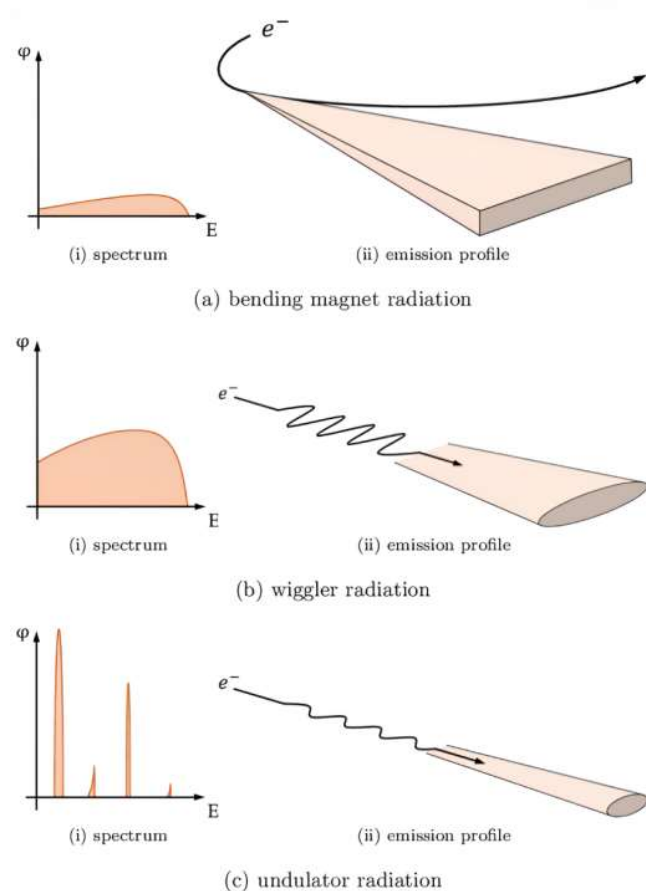
방사광관이 나가는 힘자석 or 삽입장치 통과하는 곳에서 어떻게 해야 하나?

전자빔의 단면적과 전자빔의 퍼짐이 적어야 한다.

전자빔의 품질을 나타내는 피라미터



에미턴스(emittance)



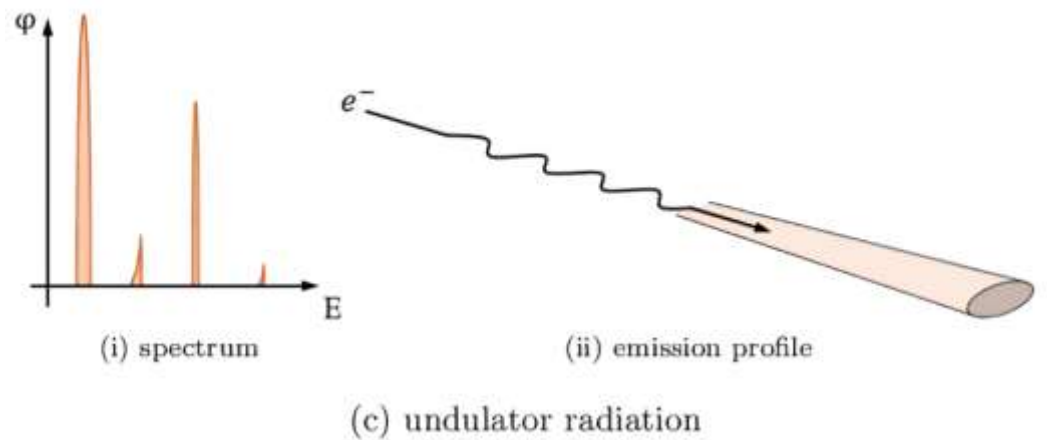
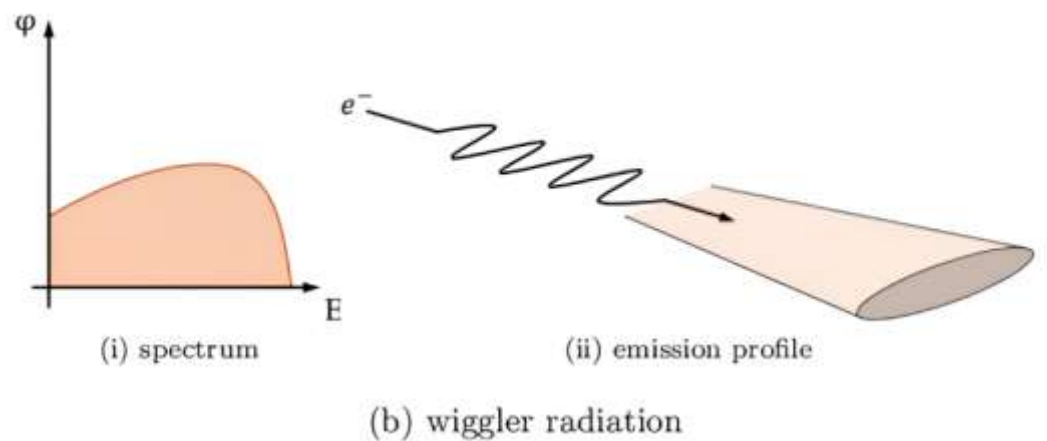
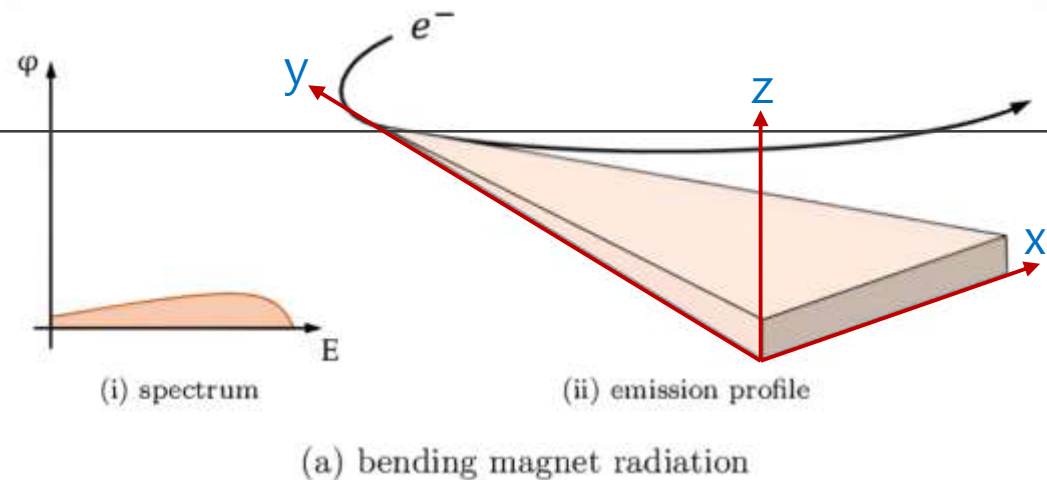
에미턴스(emittance) : 전자빔의 크기와 퍼짐을 곱한 것으로 정의

- 궤도면에 수직인 방향 (z-축)
- 궤도면에 있는 축방향 (x-축)

※ 빔의 폭과 퍼짐각도 달라, 에미턴스를 구별하기 위한 방식

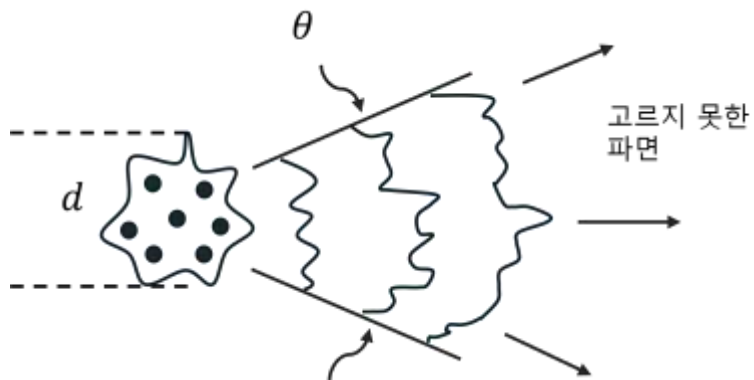
$$\varepsilon_x = \sigma_x \cdot \sigma'_x \quad \varepsilon_z = \sigma_z \cdot \sigma'_z$$

σ_x = x 방향의 빔 폭, σ'_x = x 방향의 퍼짐각
 σ_z = z 방향의 빔 폭, σ'_z = z 방향의 퍼짐각

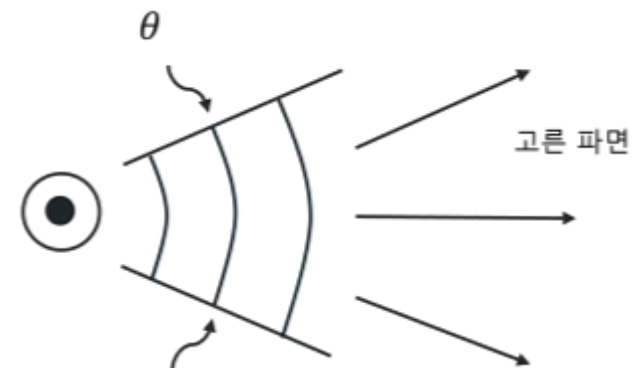


제 2세대 방사광가속기	제 3세대 방사광가속기
상대적으로 낮은 빔띠밝기	상대적으로 큰 값의 빔띠밝기

일차원적 – 강한 세기의 광자다발 + 결맞음(Coherence)과 직결됨.



큰 광원으로부터 전파되는 광원은 고르지 못한 전면파를 가짐.



매우 작은 광원으로부터 작은 퍼짐으로 전파할 경우 비교적 고른 구면파를 가짐.

$$d \cdot \theta = \lambda / 2\pi \quad (\text{광원의 크기 } d, \text{ 퍼짐각 } \theta)$$

$$\text{밝기(또는 휘도)} = \frac{(\text{방출되는 광자의 수})}{(\text{단위시간})(\text{단위면적})(\text{단위입체각})}$$

관계가 성립하면 그 광원은 공간 결맞음(spatial coherence)이 있다고 한다.

= 횡적 결맞음(transverse coherence)

위 식은 주어진 파장 λ 로 식별 가능한 최소 광원의 크기를 말한다.

= 회절에 의해 제한된 크기(diffraction limited)

1. 작은 값의 $d \cdot \theta$ (상-공간 곱하기 : phase – space product) 을 얻기 위해서? **큰 값의 밝기가 필요!**


2. 큰 값의 밝기를 얻기 위해서? **작은 전자빔의 (emittance)에미턴스가 필요!**

에미턴스 ε 이 회절에 의해 제한된 방사광의 최단의 파장 λ_{min} 을 결정짓는다.

관계식) $\lambda_{min} = (4\pi)\varepsilon$

λ_{min} 보다 짧은 파장영역에서는 결맞음의 정도가 급격히 나빠지는 ($\propto 1/\lambda^2$) 부분적 결맞음을 갖는다.

결맞음은 수직, 수평 방향으로 나누어 다룬다.

 시간 결맞음 (temporal coherence) = 종적 결맞음 (longitudinal coherence)
공간 결맞음 (spatial coherence) = 횡적 결맞음 (transverse coherence)

종적 결맞음은 두 광파의 위상 상관관계를 말해준다.

간섭계(interferometer)

1. 한 광원에서 나오는 광파를 두 경로로 나눈다.
2. 각각 다른 통로로 보낸 다음 다시 합친다.
3. 두 광파에 의한 간섭무늬 관찰한다.

빛의 경로차(path difference)가 너무 크면 두 광파의 위상 상관관계 X -> 간섭무늬 관찰 X

간섭무늬를 볼 수 있는 최대의 경로차 = 시간적 결맞음 길이(temporal coherence length)

이것을 l_c 라고 하자. $l_c = \frac{\lambda^2}{\Delta\lambda}$ 로 표현 가능하다.

빛 띠너비 ($\Delta\lambda/\lambda$) 가 작을수록 시간적 결맞음의 길이가 길어진다.

제 3세대 가속기의 언듈레이터로부터의 방사광은
결맞음의 정도(degree of coherence)가 비교적 높은 빛,
 부분적인 결맞음을 갖는 빛에 해당.

결맞음의 정도를 말하는 척도)
 횡적 결맞음(또는 공간 결맞음)의 경우, 상- 공간 곱하기

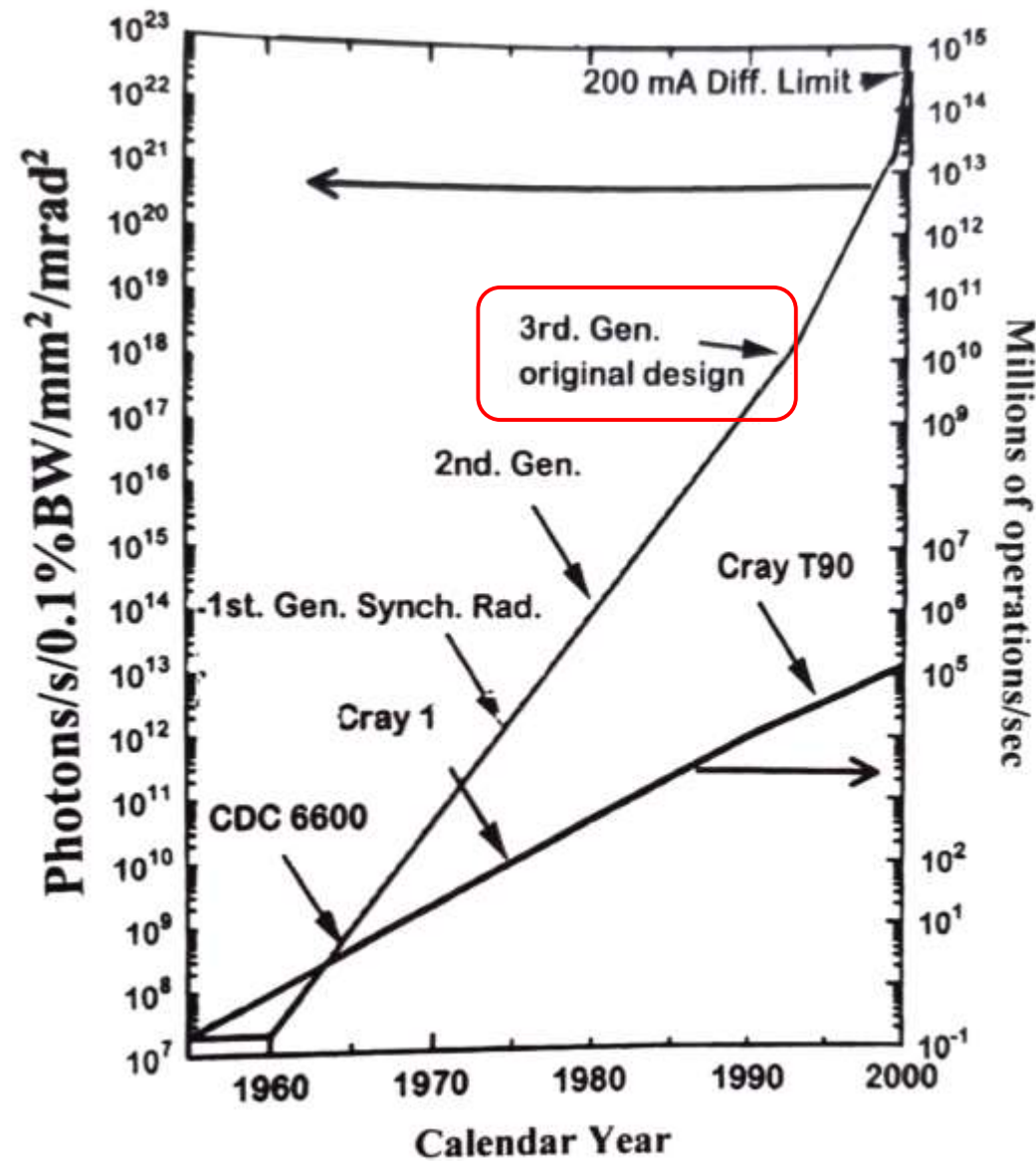
$d \cdot \theta = \lambda/2\pi$ 으로 정의된 회절에 의해 제한된 크기

의 몇배가 되느냐로 나타낸다.

or

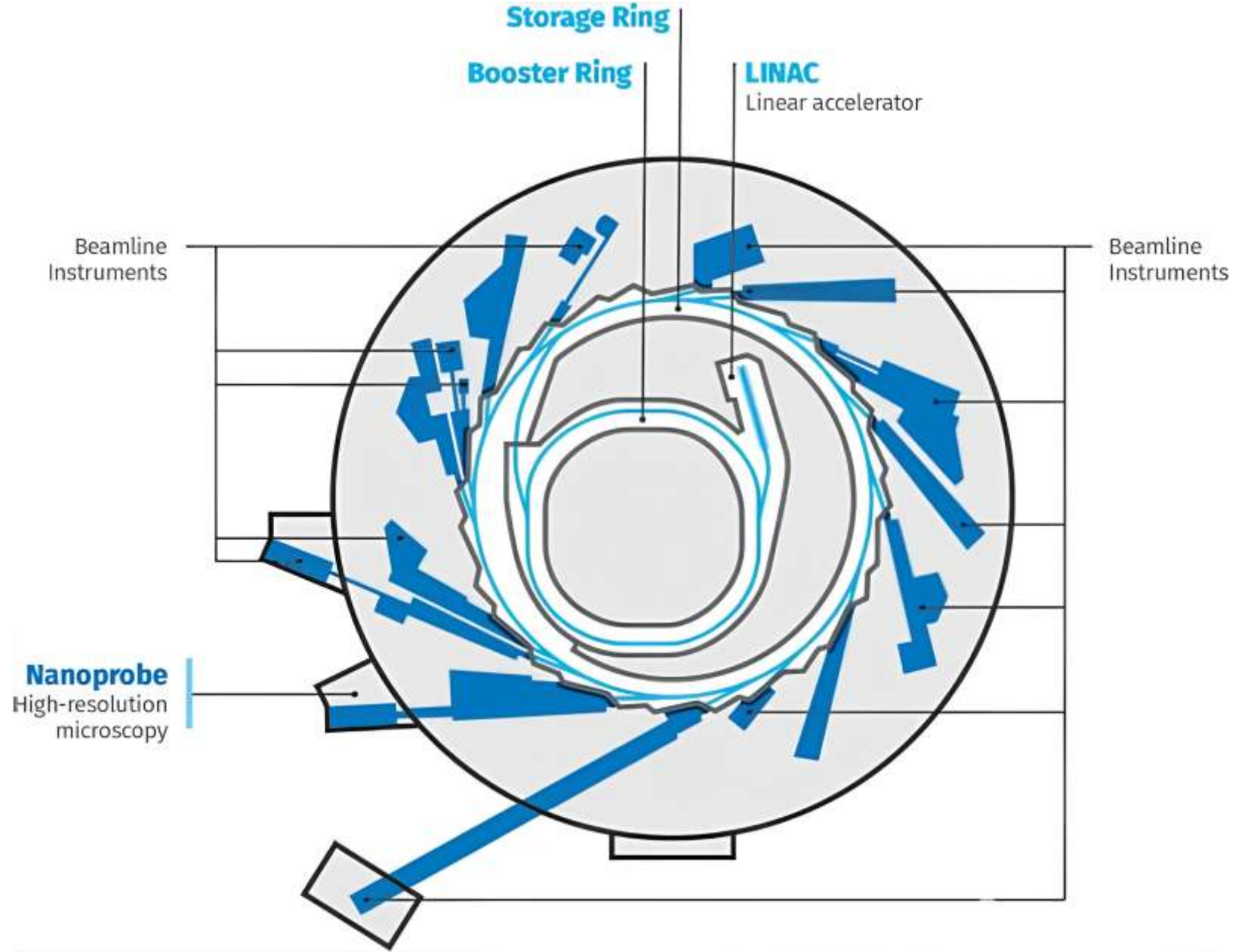
횡적 결맞음 길이 l_t 로 나타냄. $l_t = \frac{\lambda R}{d}$

- λ : 빛의 파장
- R : 광원으로부터 관찰 지점까지의 거리
- d : 광원의 크기



구분	종적 결맞음 (Longitudinal Coherence)	횡적 결맞음 (Transverse Coherence)
정의	시간적 위상 결맞음	공간적 위상 결맞음
주요 영향 인자	빛의 단색성 ($\Delta\lambda$)	광원 크기 (d) 및 각도 분포 (θ)
밝기 관계	$\Delta\lambda \downarrow \rightarrow \text{밝기} \uparrow$	$d \downarrow, \theta \downarrow \rightarrow \text{밝기} \uparrow$
공식	$l_c = \frac{\lambda^2}{\Delta\lambda}$	$l_t = \frac{\lambda R}{d}$

The Australian Synchrotron



출처

[1]

방사광과학 입문 1장 1-1, 1-2, 1-5.

[2]

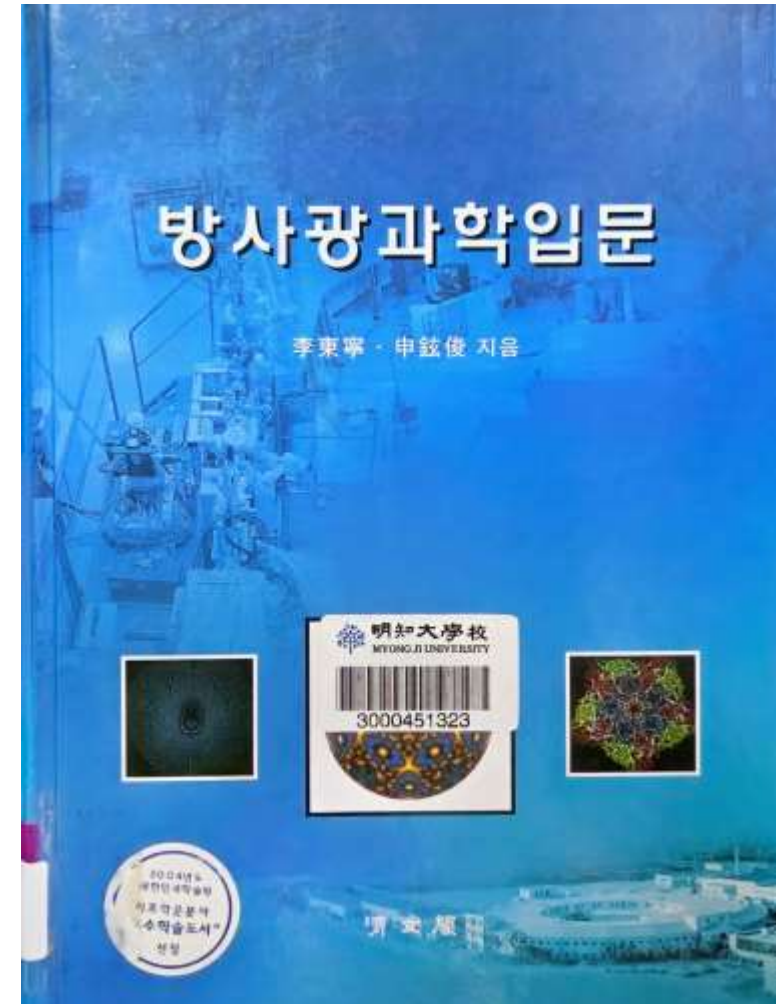
한국핵융합·가속기기술진흥협회 – 가속기 이해.

[3]

Figs. 5.1-5.3 in [Attwood, 1999] and 2 from [Clarke, 2004]..

[4]

<https://www.ansto.gov.au/education/nuclear-facts/what-is-synchrotron-light>



EXIT



Fin.

Q&A



이미지 모음

