
방사광의 밝기와 빔 품질

물리학과 60225090 한석희

목차

01	품질 요소 개요
02	품질요소 사이의 관계
03	품질 요소가 연구에 미치는 영향

방사광의 품질 요소

Coherence

방출되는 광자의 위상이 시간과 공간적으로 얼마나 일관성을 유지하는가

- Mutual Coherence Function
- Normalized Mutual Coherence Function

Divergence

방사광이 방출될 때, 공간적으로 얼마나 퍼지는지를 나타내는 각도

Brightness

단위 면적, 단위 각도, 단위 파장, 단위 시간당 방출되는 광자의 수

- Luminance(휘도)
- Illuminance(조도)
- Luminous Intensity(광도)

Coherence

Mutual Coherence Function

$$\Gamma(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2; \tau) = \langle E^*(\mathbf{r}_1, t) \cdot E(\mathbf{r}_2, t + \tau) \rangle$$

두 지점에서 빛의 위상과 진폭이 얼마나 일관성 있게 유지되는지를 나타내는 함수

- Spatial Coherence
 $\Gamma(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2; \tau = 0)$
 - 같은 순간에 두 지점에서의 전기장 간 위상 정렬
 - 위상이 잘 정렬되어 있음 -> 간섭무늬가 강하게 형성
 - 서로 다른 위치에서 동일한 시간의 위상 정렬
 - wavefront 정렬도, 간섭 가능성
- Temporal Coherence
 $\Gamma(\mathbf{r}, \mathbf{r}; \tau)$
 - 같은 위치에서 시간 차이가 나는 두 시점 간 위상 정렬
 - 천천히 감소 -> 긴 coherence time
 - 동일한 위치에서 서로 다른 시점의 위상 정렬
 - 실험에서의 의미: 단색성(좁은 대역폭), 파장 정밀도

Nomalized Mutual Coherence Function

실험적으로 증명된 Coherence Function

$$\gamma(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2) = \frac{\Gamma(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2)}{\sqrt{I(\mathbf{r}_1)I(\mathbf{r}_2)}}$$

$|\gamma| = 1 \rightarrow$ Perfect Coherence

$|\gamma| = 0 \rightarrow$ incoherence

Divergence

방사광이 방출될 때, 공간적으로 얼마나 퍼지는지를 나타내는 각도
각이 작을수록 더 직진성을 띄고 평행하게 나감

$\theta \approx \frac{1}{\gamma}$

$\gamma = \frac{E}{mc^2}$

Divergence = $\frac{\text{Beam size at distance } L}{L}$

방사광원	주요 발산각 수식	
Bending Magnet	$\theta_{\text{BM}} \sim \frac{1}{\gamma}$	단일 궤적에서 나오는 방사
Wiggler	$\theta_{\text{wig}} \sim K \cdot \frac{1}{\gamma}$	진동 세기가 커져 다양한 각도에서 광자 방출 (K(진동세기)>1)
Undulator	$\theta_{\text{und}} \sim \frac{1}{\gamma\sqrt{N}}$	전자가 작게 진동하면서 간섭효과에 의해 광자가 같은방향으로 정렬
FEL	$\theta_{\text{FEL}} \sim \frac{\lambda}{\sigma_x}$	전자빔과 광자가 상호작용하며 증폭 (σ = 전자빔 가로폭)

Brightness

단위 면적, 단위 각도, 단위 파장, 단위 시간당 방출되는 광자의 수량

$$\text{Brightness} = \frac{d^4 N}{dt dA d\Omega d(\lambda/\lambda)}$$

N: 광자 수

t: 시간 (s)

A: 광원 면적 (mm²)

Ω: 방사광 (solid angle, mrad²)

λ/λ: 상대 대역폭 (보통 0.1% 사용)

빛의 정렬도 + 집중도 + 양 을 종합적으로 평가하는 지표

Flux: 단위 시간당 방출된 총 광자 수 -> 광량의 수 (수량중심)
Brightness: 밀도 높고 평평하게 나오는 광자 -> 해상도, 효율 중심 -> 실험에 더 적합

Brightness

Luminous Intensity (광도)

단위 시간당 방출된 광속

$$I = \frac{d\Phi}{d\Omega}$$

I: 광도 [candela (cd)= lm/sr]
 Φ: 광속 [lumen (lm)=cd · sr]
 Ω: 입체각 [steradian (sr)]

-> 한 방향(각도)로 얼마나 많은 빛이 뿜어져
 나가는지를 나타냄

Illuminance (조도)

단위 면적당 수신된 빛의 양

$$E = \frac{d\Phi}{dA}$$

E: 조도 [lux = lumen/m²]
 Φ: 수신한 광속
 A: 조사받는 면적

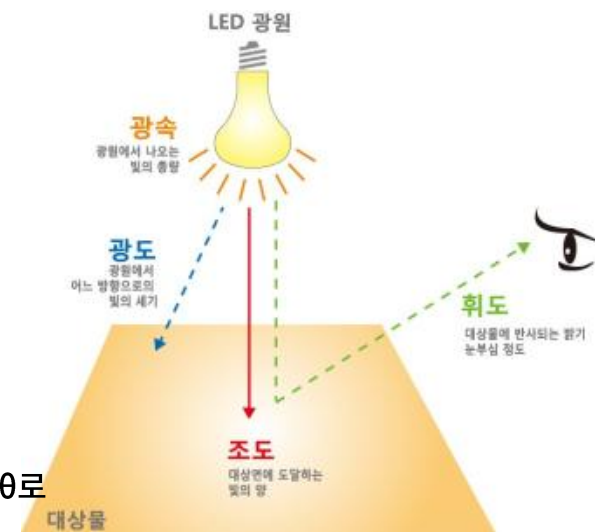
Luminance (휘도)

단위 면적과 단위 입사각당 광도

$$L = \frac{d^2\Phi}{dA \cdot \cos \theta \cdot d\Omega} = \frac{dI}{dA \cdot \cos \theta}$$

L: 휘도 [cd/m²]
 A: 면적 (m²)
 θ: 광선과 면의 법선 사이 각도
 Ω: 입체각

-> 광도 I를 면적 A에 걸쳐서, 특정 방향 θ로
 본 것
 -> cosθ는 관찰 방향이 수직에서
 멀어질수록 밝게 안 보이는 걸 반영



품질 요소 사이의 관계

- Brightness

$$\text{Brightness} \propto \frac{\text{Photon Flux}}{\text{Source Area} \cdot \text{Solid Angle} \cdot \text{Bandwidth}}$$

- Solid angle $\approx \theta^2 \rightarrow$ Divergence가 작을수록 Brightness \uparrow
- Bandwidth \downarrow (즉, 시간적 coherence \uparrow) \rightarrow Brightness \uparrow

- Spatial Coherence Length

$$l_c \approx \frac{\lambda}{\theta}$$

- λ : 파장
- θ : Divergence

- Divergence $\downarrow \rightarrow$ Coherence $\uparrow \rightarrow$ Brightness \uparrow
- Bandwidth $\downarrow \rightarrow$ Time Coherence $\uparrow \rightarrow$ Brightness \uparrow

- Temporal Coherence Length

$$l_{c,\text{temporal}} = \frac{c}{\Delta \nu} = \frac{\lambda^2}{\Delta \lambda}$$

- 대역폭이 작을수록(\rightarrow 단색성 \uparrow) 시간적 코히런스 증가

품질 요소가 연구에 미치는 영향

연구분야	Divergence	Coherence	Brightness	Luminous Intensity (광도)	Luminance (휘도)	Illuminance (조도)	요약
CDI	↓	↑(중요)	↑(중요)	↑	↑	조절	간섭 패턴의 품질과 위상 복원 정확도에 영향
XAS	영향 적음	↑(시간)	↑(중요)	↑	↑	조절	스펙트럼의 정밀도와 재현성 확보
Pump-Probe	조절	↑(시간)	↑(중요)	↑	↑	조절	반응 시간, 해상도, 동역학 분석 품질 향상
Nanofocusing	↓	↑(공간)	↑(중요)	↑	↑(중요)	조절	포커스 정밀도와 해상도 결정

품질 요소가 연구에 미치는 영향 - 품질요소의 상대성

연구분야	높은 품질 요소가 유리한 경우	낮거나 조절이 필요한 경우
CDI	높은 공간 Coherence → 간섭 무늬 정밀도 ↑ 낮은 Divergence → wavefront 정렬 ↑	너무 높은 Coherence → fringe 예민, 결함까지 반영 → 이미지 노이즈 발생 가능
XAS	좁은 Bandwidth(↑ 시간 Coherence) 충분한 Brightness → 빠르고 정밀한 측정	너무 높은 Brightness → 시료 과열 또는 화학적 변형 높은 Coherence는 불필요, 노이즈만 증가 가능
Pump-Probe	높은 Brightness → 짧은 시간 내 충분한 신호 높은 시간 Coherence → 시간 분해 해상도 ↑	너무 높은 조도 → 열 반응 또는 광손상 유발 과도한 Brightness → detector saturation 위험
Nanofocusing	낮거나 조절이 필요한 경우	지나치게 높은 Brightness → 시료 손상 또는 포커스 불안정 과도한 Coherence → 표면 노이즈 증가 가능

요약

- Coherence, Divergence, Brightness은 각각의 품질 요소이지만 독립적이지 않음.
- 품질은 빛의 ' 좋음 ' 보다는 ' 적절함 ' 을 찾는것이 중요.
- 좋은 품질의 기준은 목적에 따라 ' 절대적 ' 이 아닌 ' 상대적 ' 임.

참고문헌

- A New Method for Determining the Size of a Synchrotron Radiation Beam in the Focus of a Compound Refractive Lens:
https://www.researchgate.net/profile/Victor-Kohn/publication/379930797_A_New_Method_for_Determining_the_Size_of_a_Synchrotron_Radiation_Beam_in_the_Focus_of_a_Compound_Refractive_Lens/links/66ee78036b101f6fa4f8a258/A-New-Method-for-Determining-the-Size-of-a-Synchrotron-Radiation-Beam-in-the-Focus-of-a-Compound-Refractive-Lens.pdf?origin=publication_detail&_tp=eyJjb250ZXh0Ijp7ImZpcnN0UGFnZSI6InB1YmxpY2F0aW9uIiwicGFnZSI6InB1YmxpY2F0aW9uRG93bmxvYWQiLCJwcmV2aW91c1BhZ2UiOiJwdWJsaWNhdGlvbiJ9fQ
- SYNCHROTRON RADIATION: PRODUCTION & PROPERTIES:
https://neutrons.ornl.gov/sites/default/files/Sources%202023_MILLS_0.pdf
- 가속기의 과학 [3]: 방사광 가속기: <https://horizon.kias.re.kr/15887/>
- Synchrotron radiation:
https://en.wikipedia.org/wiki/Synchrotron_radiation
- BRIGHTNESS AND COHERENCE OF SYNCHROTRON RADIATION AND FELs: <https://accelconf.web.cern.ch/ipac2013/papers/moycb101.pdf>
- 방사광가속기의 구성:
https://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE01969991&utm_source=chatgpt.com