การศึกษาและพัฒนาคุณสมบัติของปืนอิเล็กตรอนแบบโฟโตคาโทด สำหรับเครื่องเร่งอนุภาคเพื่อผลิตแสงเลเซอร์แบบอิเล็กตรอนอิสระ ณ สถาบันวิจัยเดซี ประเทศเยอรมันนี

Study and Development of Photocathode Electron Gun for X-ray Free Electron Laser (XFEL)

สาคร ริมแจ่ม

Deutsches Elektronen-Synchrotron (DESY)

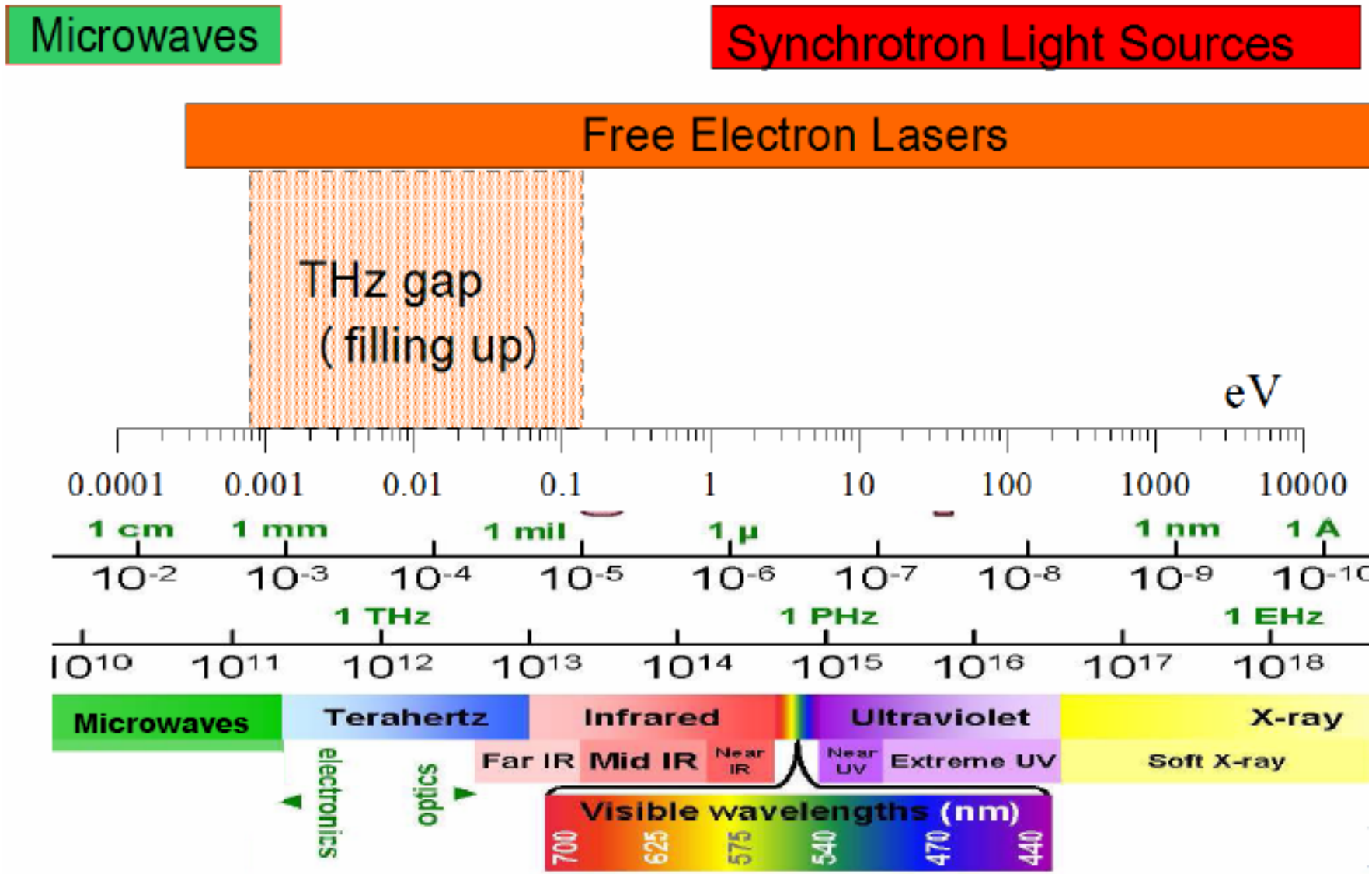
สารบัญ

- แนวทางการวิจัยด้านเครื่องเร่งอนุภาคในปัจจุบัน
- เครื่องเร่งอนุภาคเพื่อผลิตแสงแบบอิเล็กตรอนอิสระ
- สถาบันวิจัย DESY
- เครื่องเร่งอนุภาคเพื่อผลิตแสงแบบอิเล็กตรอนอิสระ ณ สถาบันวิจัย DESY
  - FLASH
  - European XFEL
- การศึกษาวิจัยด้านปืนอิเล็กตรอนแบบโฟโตคาโทด ณ Photo Injector Test Facility at DESY in Zeuthen (PITZ)

High Energy Physics (HEP) Facilities → Light Sources

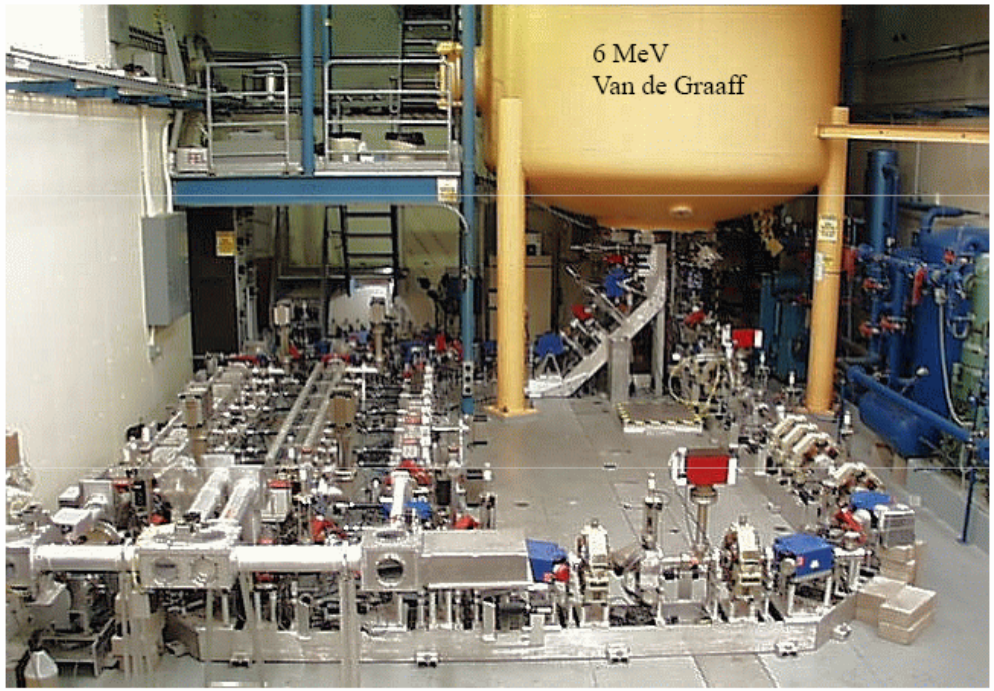
- เครื่องเร่งอนุภาคทาง High Energy Physics ในสถาบันวิจัยใหญ่ๆ ในยุโรปและอเมริกาได้ปิดตัวลงหรือเปลี่ยนไปเป็นเครื่องเร่งอนุภาคเพื่อการผลิตรังสี (Light Sources)
  - Synchrotron Radiation (SR)
  - Next generation light sources
    - ➔ X-ray Free Electron Lasers (XFEL)
    - ➔ THz light sources (T-ray)
- ตัวอย่างของเครื่องเร่งอนุภาคเพื่อการผลิตรังสีแบบอิเล็กตรอนอิสระ (Free Electron Laser, FEL)
  - Asia: XFEL @ Spring8 ประเทศญี่ปุ่น
  - America: LCLS @ SLAC, NSLS @ BNL
  - Europe: FLASH @ DESY และ European XFEL ประเทศเยอรมนี, SwissFEL @ PSI ประเทศสวิสเซอร์แลนด์

Next Generation Light Sources: THz & XFEL

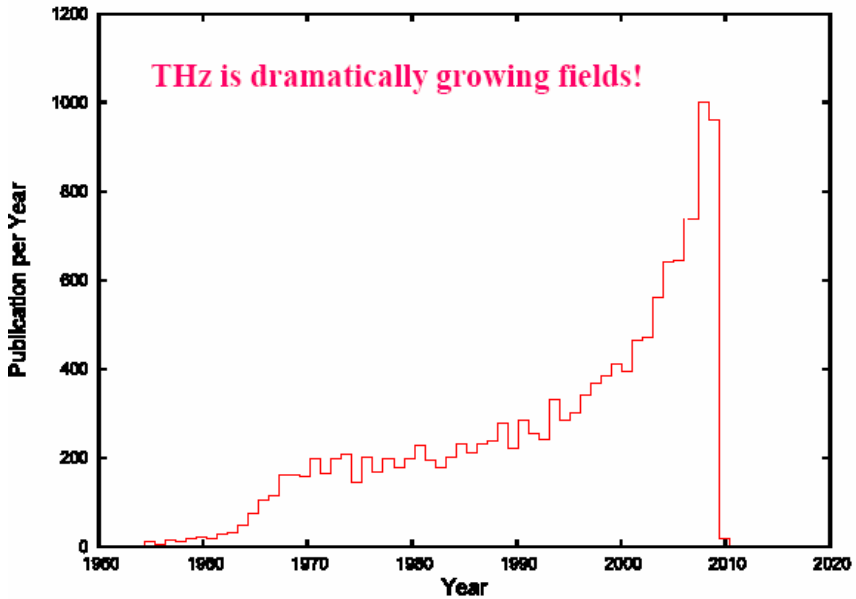


ตัวอย่างเครื่องเร่งอนุภาคอิเล็กตรอนเพื่อผลิตรังสี THz FEL

University of California in Santa Barbara, UCSB

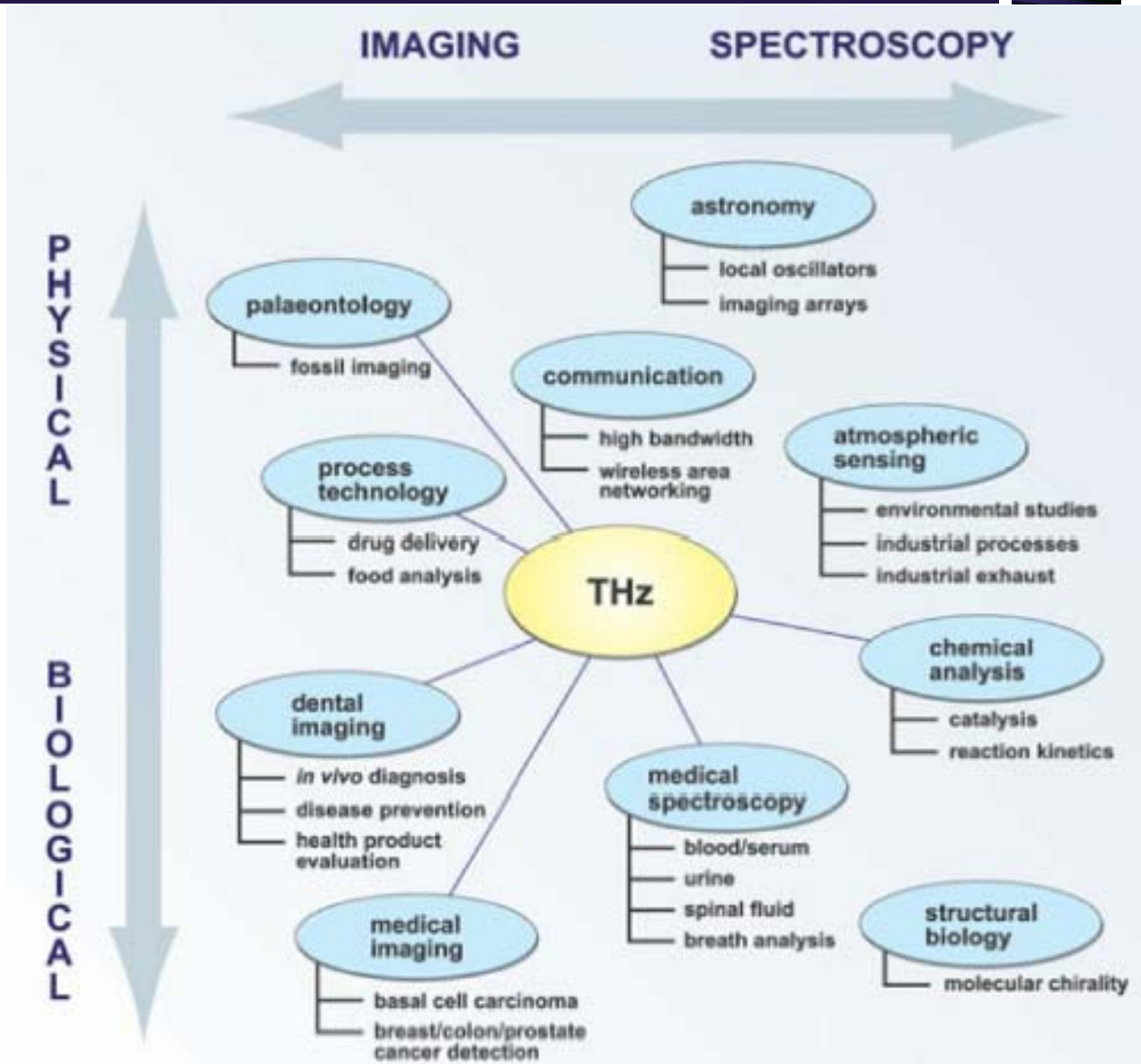


ELBE - U27 and U100 in Rossendorf

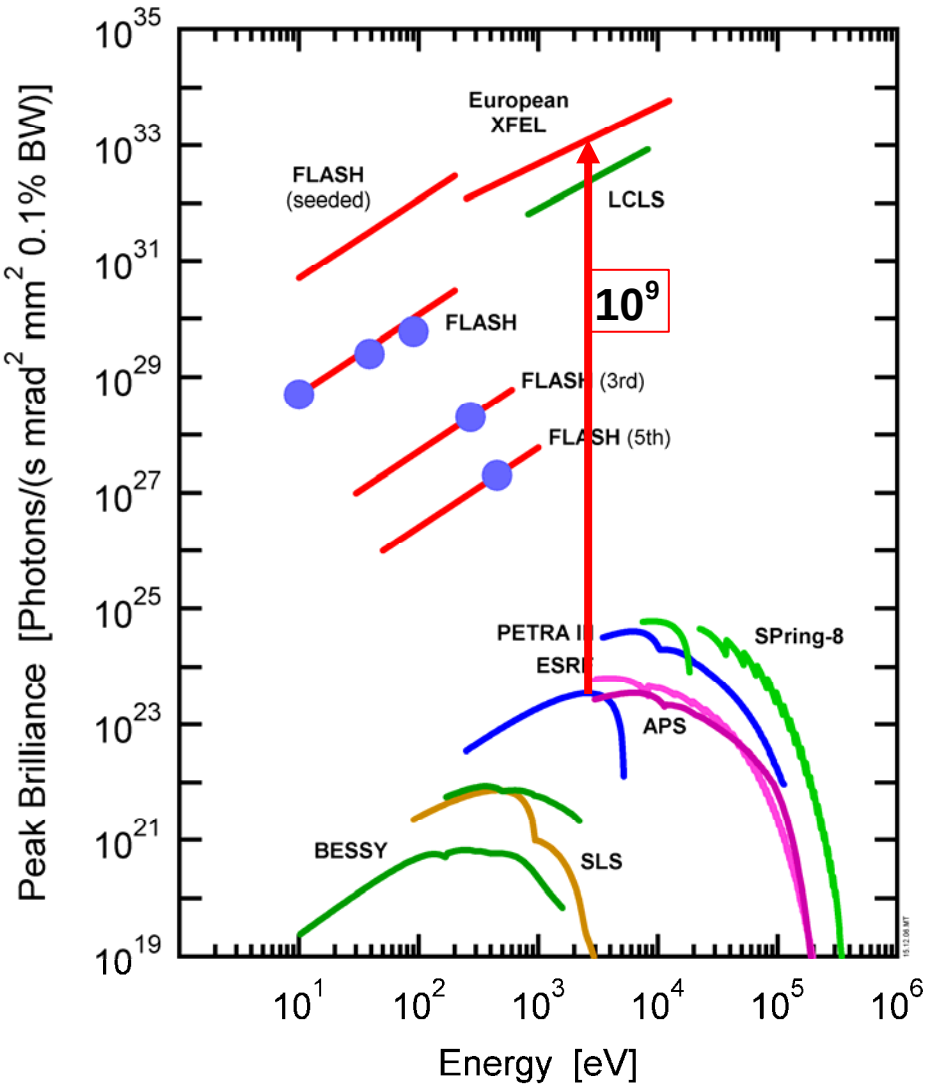


คุณสมบัติและการประยุกต์ใช้รังสี THz

- เป็นรังสีแบบ non-ionizing ซึ่งไม่ทำลาย biological molecule เช่น DNA
- Good resolution: ~40-200 μm
- สามารถเคลื่อนผ่านวัสดุบางชนิด เช่น พลาสติก ผ้า และกระดาษ
- ไม่สามารถเคลื่อนผ่านวัสดุบางชนิด เช่น โลหะ และน้ำ
- มีความสามารถในการดูดกลืนสูงและมีการหักเหต่ำ
- มีความสามารถในการกระจาย (scatter) ในสารตัวอย่างทาง biological molecule
- ใช้เวลาในการทดลองและวิเคราะห์อย่างรวดเร็ว สามารถนำไปใช้ใน in-situ surgery



X-ray Free Electron Laser (XFEL) – next generation light source



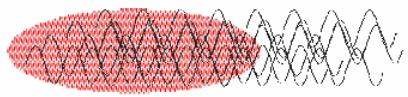
- เป็นรังสีที่มีความยาวคลื่นสั้นมาก (~1 nm)
- เป็นรังสีที่มีห้วงสั้นมาก ($\leq$ 100 fs)

  → high temporal resolution

  → ศึกษาเปลี่ยนแปลงของปฏิกิริยาที่มีความไวสูงได้ เช่นการเปลี่ยนแปลงทางชีวโมเลกุล หรือปฏิกิริยาเคมี
- เป็นรังสีอาพันธ์ (coherent radiation) ที่มีความเข้ม (Brilliance) สูงมาก

  → สูงกว่าแสงซินโครตรอน 10^9 เท่า

long bunches: bunch length > wavelength ➔ incoherent radiation



$I \propto N_e$

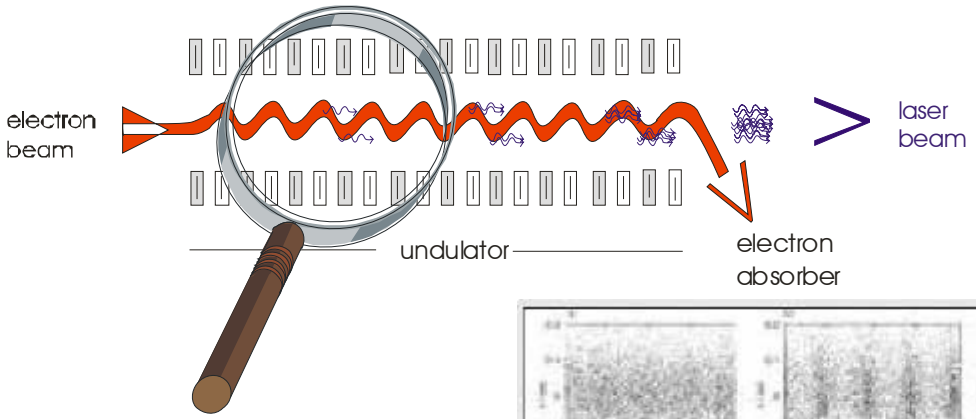
short bunches: bunch length < wavelength ➔ coherent radiation

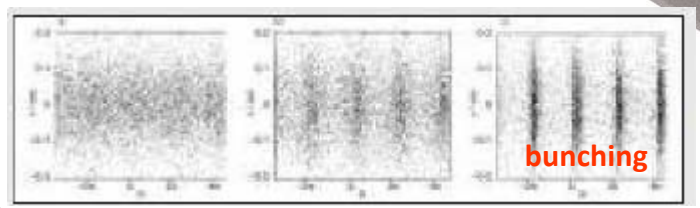
$I \propto N_e^2$

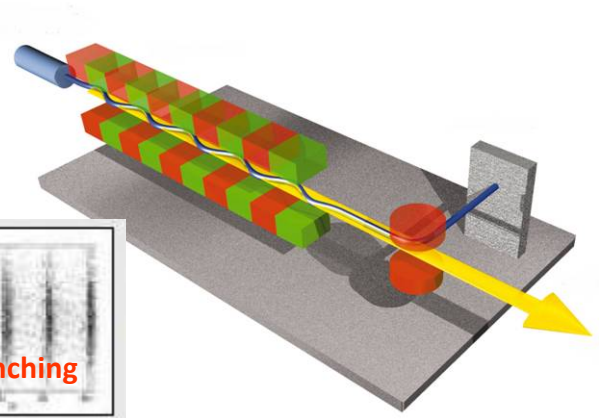
การผลิตรังสี Free Electron Laser: SASE Free Electron Laser

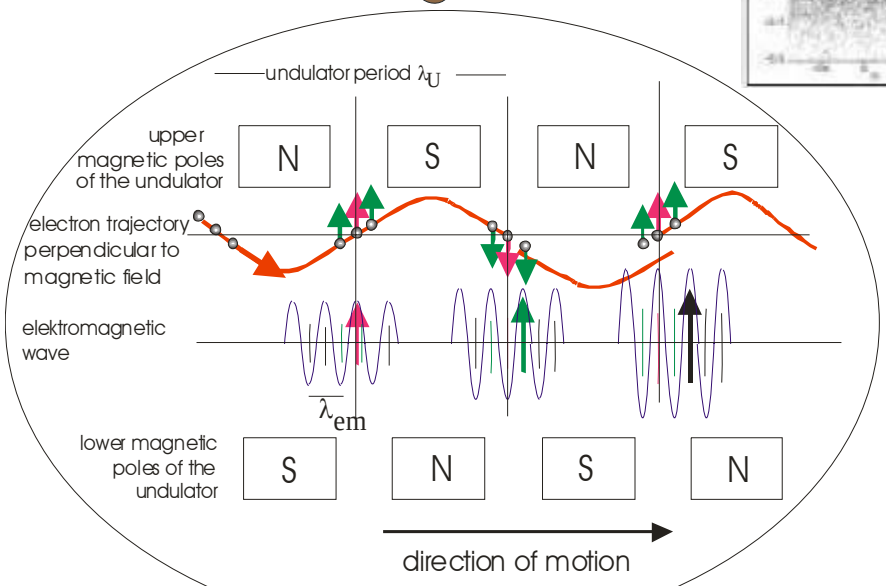
- ลำอิเล็กตรอน interact กับ EM-fields ใน undulator แล้วเคลื่อนที่แบบส่าย
- อิเล็กตรอนบางตัวสูญเสียพลังงานเนื่องจากการแผ่รังสี บางตัวสะสมพลังงานจาก EM-field
- ทำให้เกิดการ bunching ด้วยความยาวห้วงประมาณความยาวคลื่นของรังสีที่แผ่ออกมา

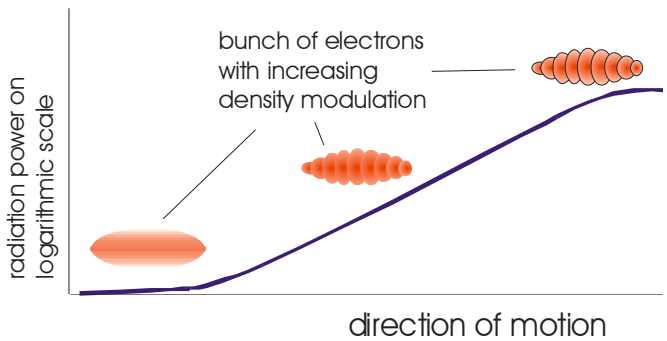
SASE = self amplified spontaneous emission



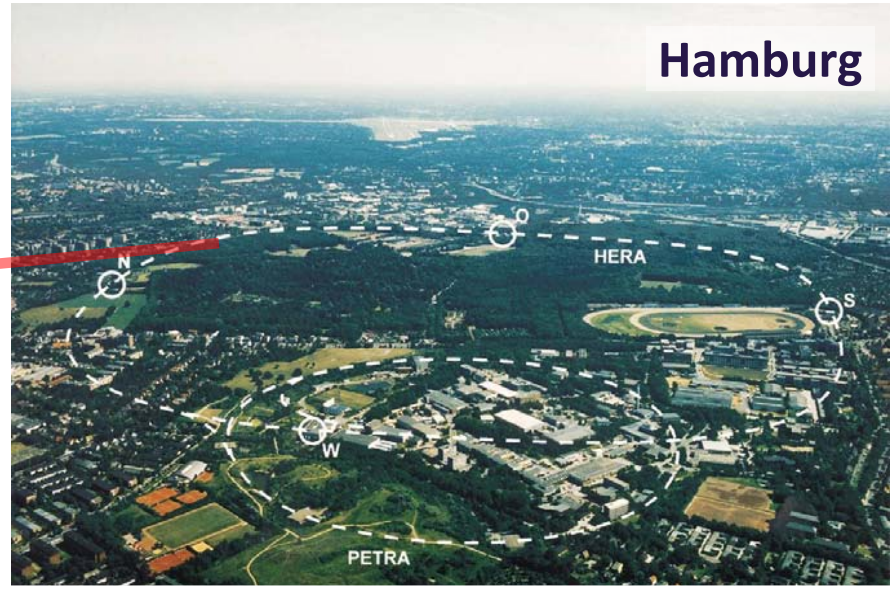








สถาบันวิจัย DESY (Deutsches Elektronen-Synchrotron)



Staff: ~1700
Budget: ~170 M€
Users: ~3000

การศึกษาวิจัย

- Particle physics
- Astro particle physics
- Accelerators & light sources

เครื่องเร่งอนุภาคเพื่อผลิตแสงแบบอิเล็กตรอนอิสระ ณ สถาบันวิจัย DESY

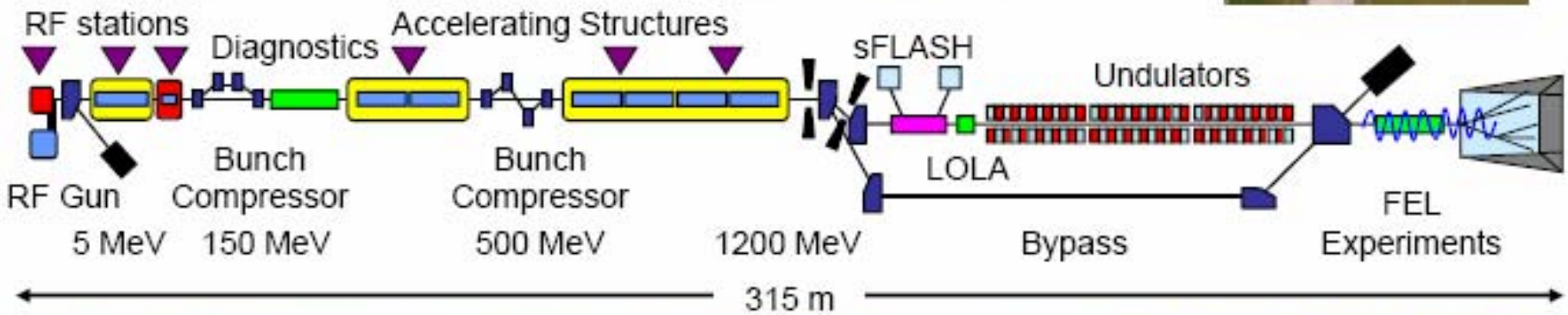
Free-electron LASer in Hamburg (FLASH)

- 10 Hz/1 MHz (8000 bunches/s)
- Peak electron current: 1–2 kA
- Emittance ~2π mm mrad @ undulator
- Electron energy range: ~0.3 - 1 GeV
- Photon energy : ~20-200 eV (~60 → 6.5 nm)
- Pulse duration: ~10 - 50 fs (FWHM)
- Peak power: 1 - 10 GW

European X-ray Free-Electron Laser (European XFEL)

- 10 Hz/5 MHz (30,000 bunches/s)
- Peak electron current: 5 kA
- Emittance ~1.4π mm mrad @ undulator
- Electron energy range: ~10 – 17.5 GeV
- Max. photon energy : 12.4 keV (~1 nm)
- Pulse duration: <100 fs (FWHM)
- Peak power: 30 GW

Free electron LASer in Hamburg (FLASH)



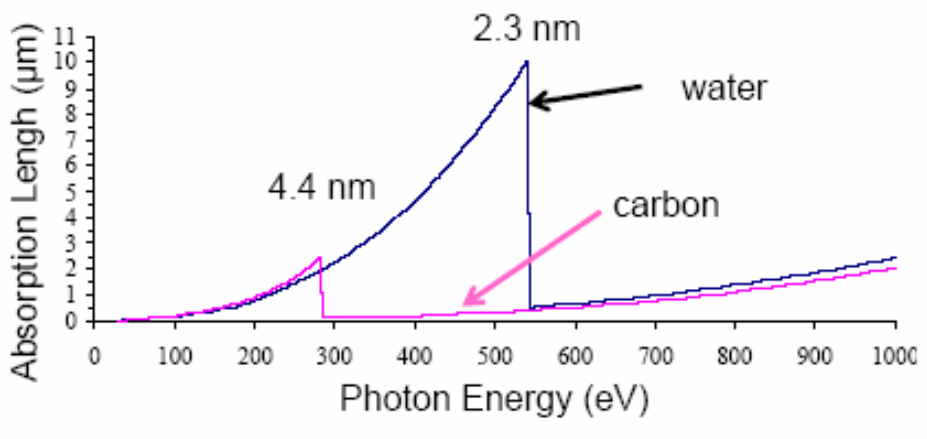
FLASH: ผลิต FEL ความยาวคลื่น 4.12 nm ได้เป็นครั้งแรก (November 2010)

CERN Courier December 2010

LASERS & ACCELERATORS

FLASH: the king of VUV and soft X-rays

DESY's experience with accelerators made it a natural home for one of the world's most brilliant radiation sources, where the intense laser pulses allow for fascinating research.



Preliminary data for 4.4 nm:

- Energy 140 μJ (max.)
- Peak power ~ 2 GW (estimate)
- bandwidth 0.25 % rms
- Peak Brilliance

B ~ 10^{30} - 10^{31}
photons/s/mrad^2/mm^2/0.1%bw

- Water window: ความยาวคลื่น 2.3 – 4.4 m
  - Carbon ดูดกลืนรังสี FEL
- ใช้ศึกษาคุณสมบัติของสสารทางชีวโมเลกุลในสารละลาย

European XFEL GmbH

Research institutes of 14 countries

(start version of XFEL ~1050 M€)

- **5 beamlines / 10 instruments**

  ⇒ start version 3 beamlines/

  6 instruments

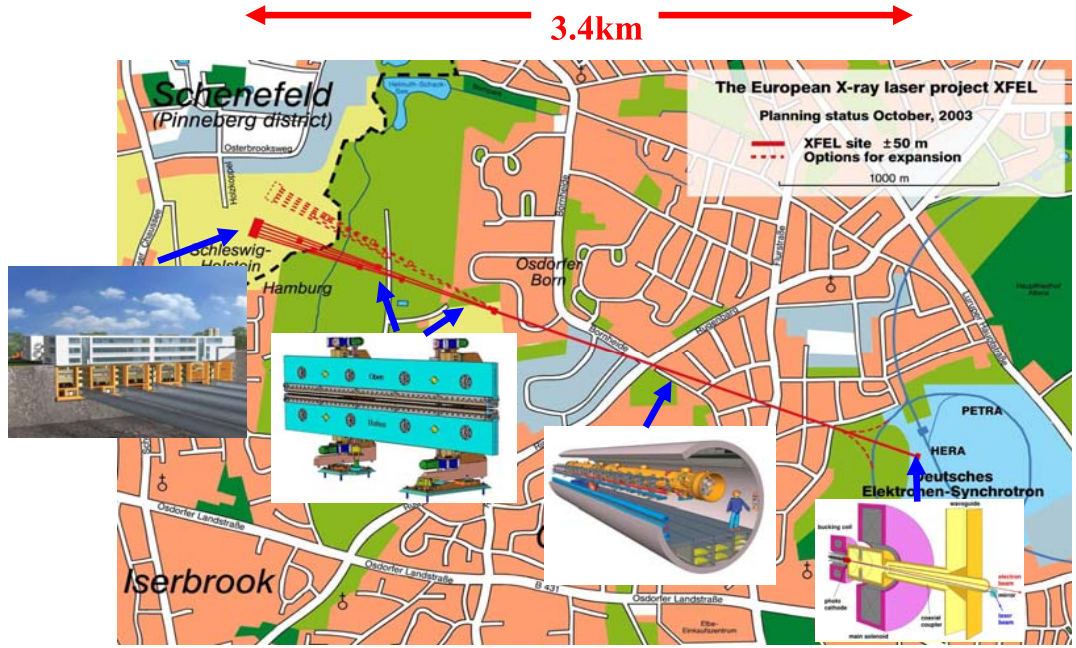
- **Project schedule**

  ⇒ launce Jan 2007

  ⇒ civil construction Nov 2008

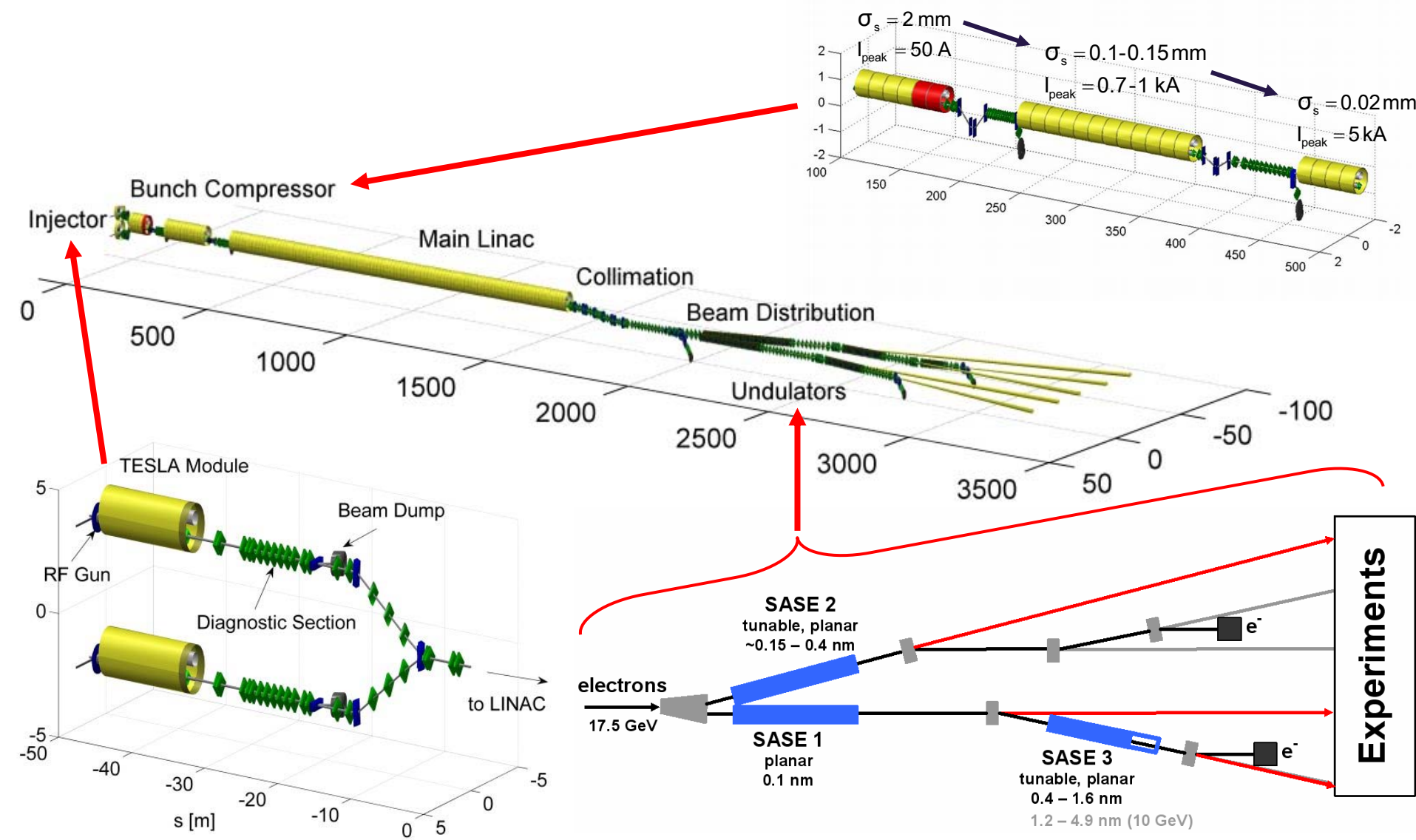
  ⇒ first beam 2014

  ⇒ operation end 2015



www.xfel.eu

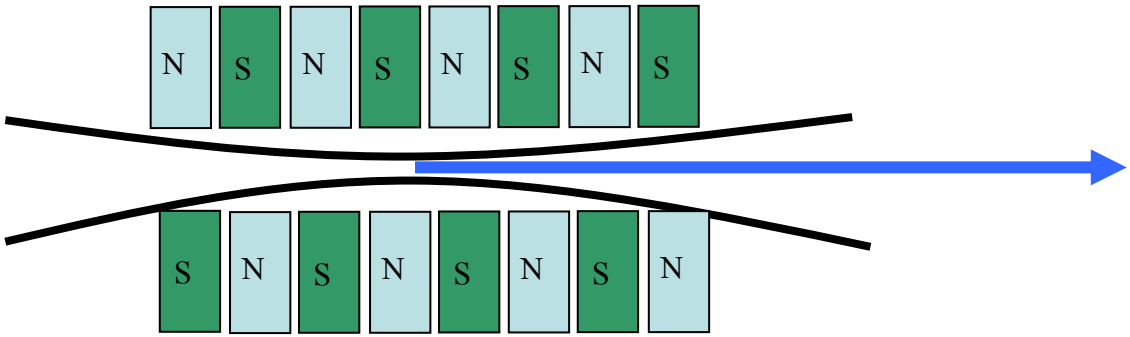
European XFEL: เพื่อผลิตแสงเลเซอร์ความยาวห้วง 0.1 nm

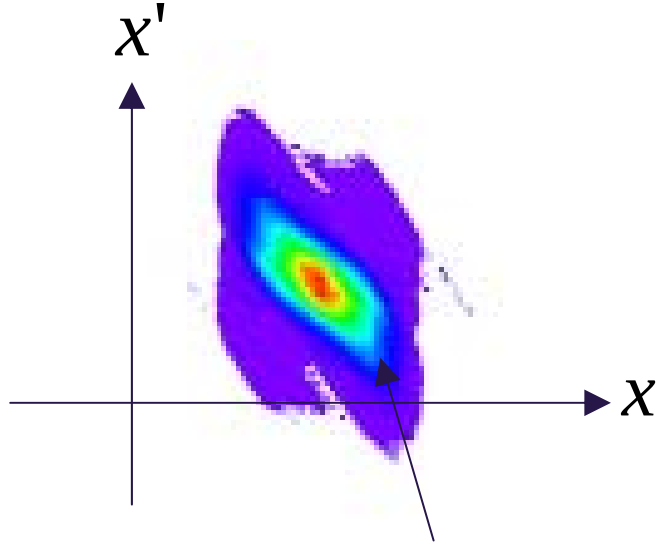


(start-up version)

คุณสมบัติของลำอิเล็กตรอน – Emittance และความเข้มของรังสี อิเล็กตรอนอิสระ - Brightness

FELs require electrons to be focused into the optical beam over the undulator length





$dI / dxdx'$ ความเข้มแต่ละจุดในการกระจายของอิเล็กตรอนใน phase space

ความเข้มของลำอิเล็กตรอน (beam brightness)

$$B = \frac{d^2 I}{dA d\Omega} = \frac{d^2 I}{dx dx' dy dy'} \propto \frac{2I_p}{\varepsilon_x \varepsilon_y}$$

- ***I*** - *กระแสของลำอิเล็กตรอน*
- ***A*** - *พื้นที่ภาคตัดขวางของลำอิเล็กตรอน*
- ***Ω*** - *มุม divergence ของลำอิเล็กตรอน*
- ***x, y*** - *ตำแหน่งของอิเล็กตรอนแต่ละตัวใน transverse coordinates*
- ***x', y'*** - *มุม divergence ของอิเล็กตรอนแต่ละตัวเทียบกับเส้นทางเดินทางของลำอิเล็กตรอนบ*

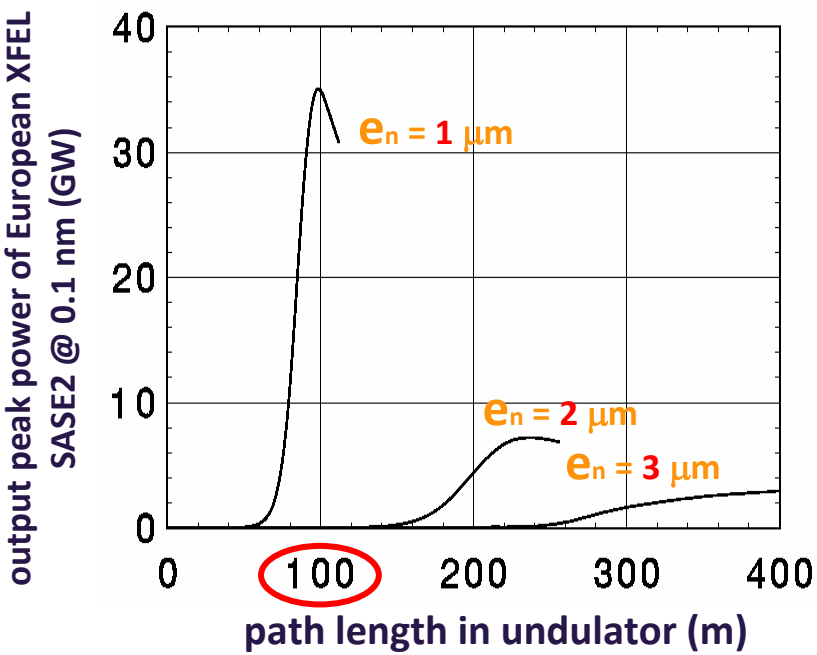
พื้นที่ของ phase space

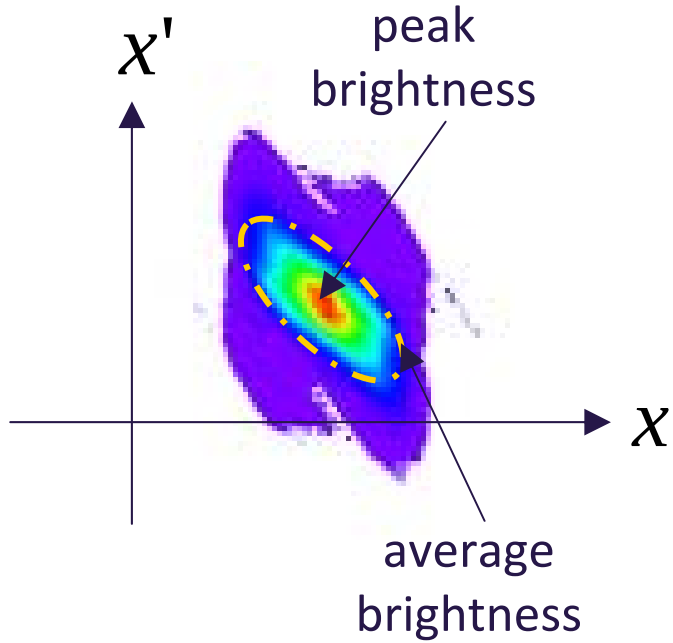
↓

Emittance (ε) ของลำอิเล็กตรอน

$$\varepsilon_n = \beta\gamma\varepsilon = \beta\gamma\sqrt{\langle x^2 \rangle \cdot \langle x'^2 \rangle - \langle xx' \rangle^2}$$

คุณสมบัติขอลำอิเล็กตรอนเพื่อผลิตรังสีแบบอิเล็กตรอนอิสระ: Brightness & Emittance





คุณสมบัติของลำอิเล็กตรอนเพื่อผลิตรังสีอิเล็กตรอนอิสระความยาวคลื่น 0.1 nm สำหรับโครงการ European XFEL

- Peak current (I_p): 5 kA, energy spread: 2.5 MeV
  → สามารถปรับปรุงได้โดยการบีบห้วงอิเล็กตรอนโดยใช้สนามแม่เหล็ก
- Slice emittance @ undulator: 1.4 mm-mrad
- Nominal projected emittance @ injector: **0.9 mm-mrad** สำหรับประจุ 1 nC
  → เป็น**คุณสมบัติเฉพาะตัว**ของแหล่งผลิตอิเล็กตรอนที่

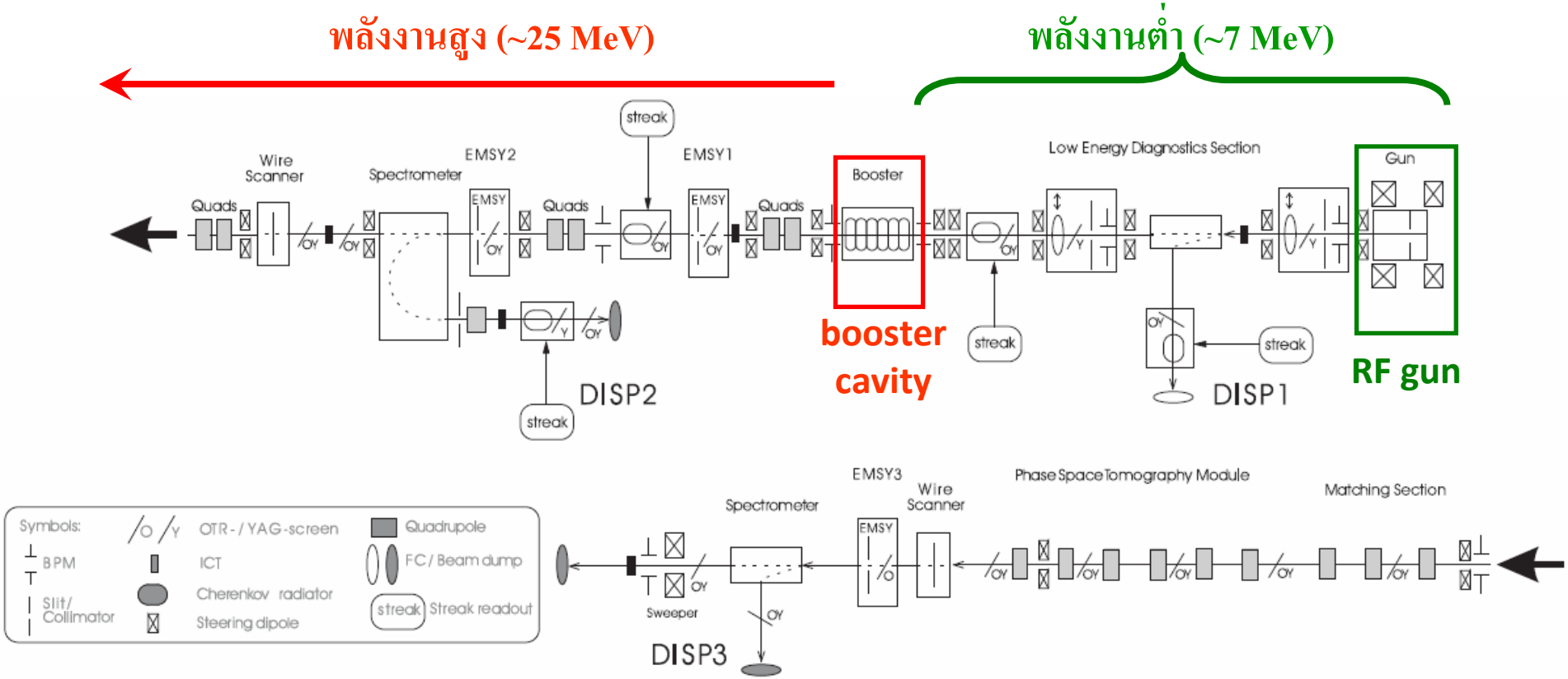
$$B \propto \frac{2I_p}{\varepsilon_x \varepsilon_y}$$

Photo Injector Test facility at DESY, Zeuthen Site (PITZ)

วัตถุประสงค์และแนวการทำวิจัย

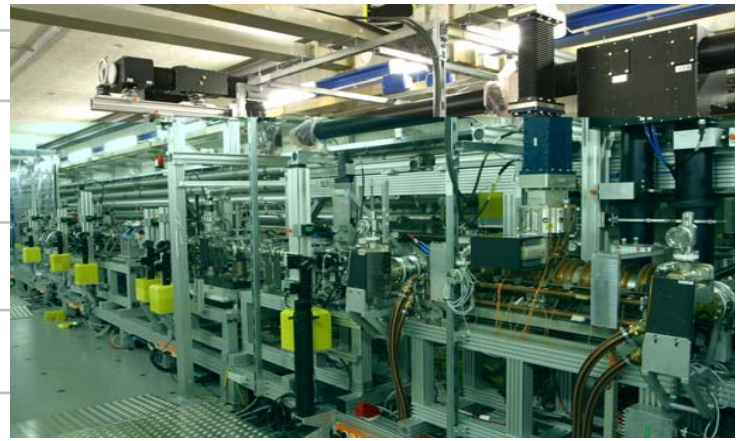
- ศึกษาและพัฒนาปืนอิเล็กตรอนเพื่อสำหรับเครื่องเร่งอนุภาคเพื่อผลิตแสงเลเซอร์แบบอิเล็กตรอนอิสระ สำหรับเครื่อง European XFEL
  - สามารถผลิตลำอิเล็กตรอนที่มีความยาวห้วงสั้นๆ ที่มีการกระจายของพลังงานน้อยๆ ($\leq$10%) และมีค่า emittance $\leq$ 0.9 mm-mrad สำหรับประจุต่อห้วงขนาด 1 nC
  - ปืนอิเล็กตรอนสามารถทำงานในสภาวะ high duty cycle สำหรับ linac แบบ superconducting cavity
    - คลื่น RF กำลังเฉลี่ยสูง ($\geq$50 kW) $\longrightarrow$ 650 μs @ 10 Hz repetition rate
    - ผลิตลำอิเล็กตรอนที่ประกอบไปด้วยอิเล็กตรอนห้วงสั้นๆ จำนวนมาก (650 ห้วง)
- เตรียมความพร้อมและศึกษาคุณสมบัติของปืนอิเล็กตรอนก่อนที่จะนำไปติดตั้งเป็นตัวผลิตอิเล็กตรอนของเครื่องเร่งอนุภาค FLASH และ European XFEL
- พัฒนาองค์ความรู้ใหม่ทางด้านเครื่องเร่งอนุภาคเพื่อการผลิตแสงเลเซอร์แบบอิเล็กตรอนอิสระ เช่น
  - ระบบแสงเลเซอร์และคาโทด
  - พัฒนาระบบและเครื่องมือที่ใช้ในการวัดคุณสมบัติของอิเล็กตรอน

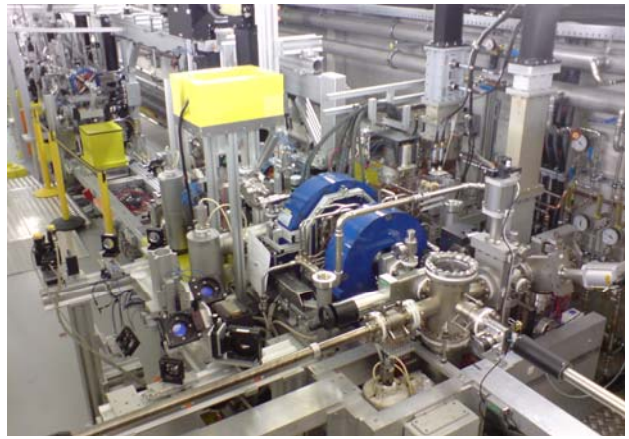
แผนผังเครื่องเร่งอนุภาค PITZ

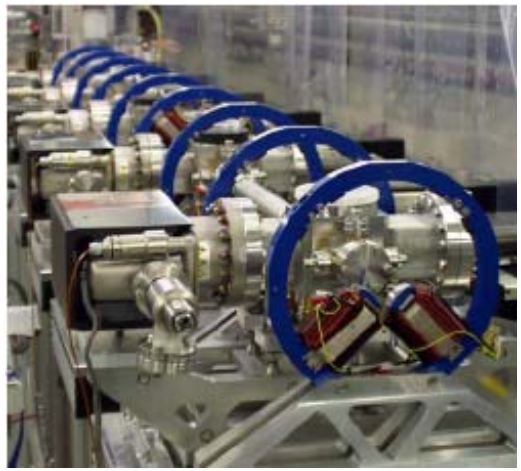


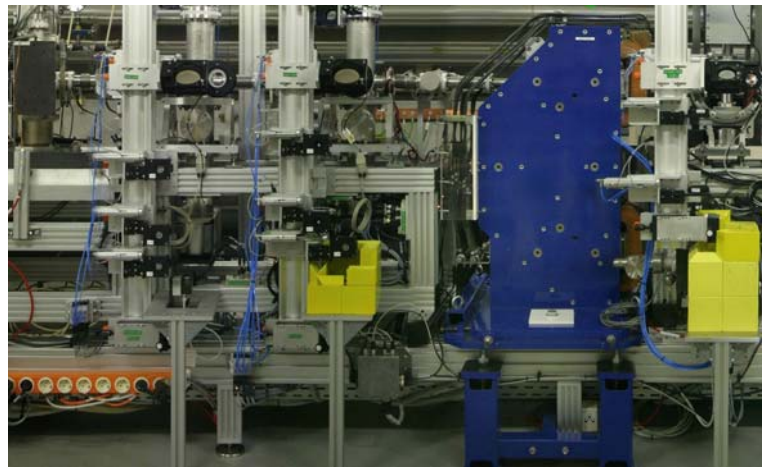
เครื่องเร่งอนุภาค PITZ และ PITZ Collaborations

BESSY	Berlin
CCLRC	Daresbury
DESY	Hamburg, Zeuthen
Hamburg University	Hamburg
Humboldt University	Berlin
INFN	Frascati, Italy
INFN	Milan, Italy
INR	Troitsk, Russia
INRNE	Sofia, Bulgaria
LAL	Orsay, France
MBI	Berlin
TechnicalUniversity	Darmstadt
Thep	Thailand
YERPHI	Yerevan, Armania

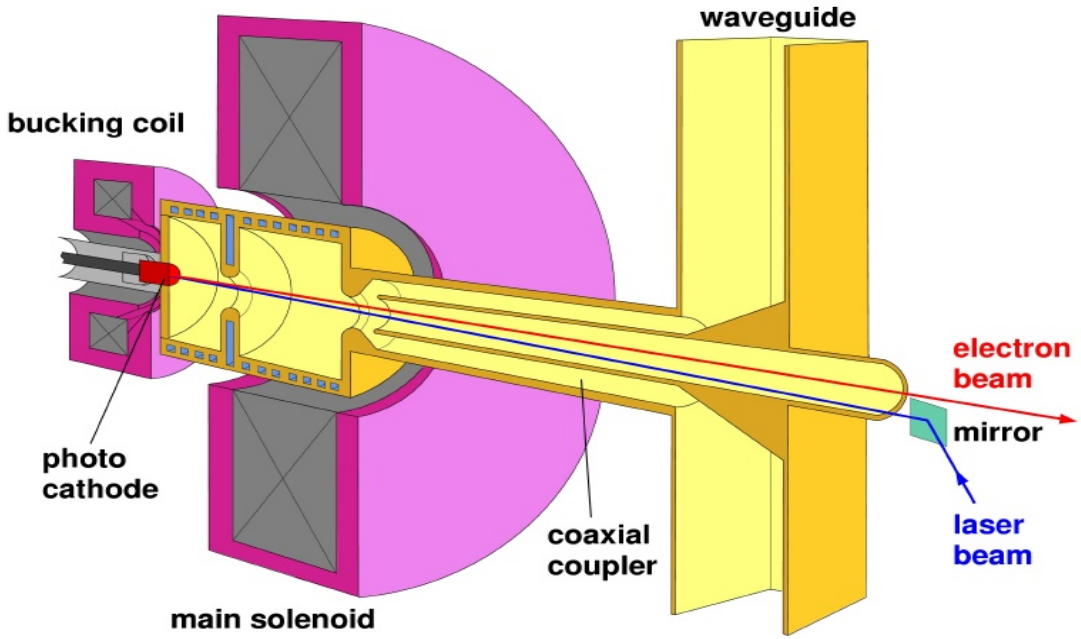








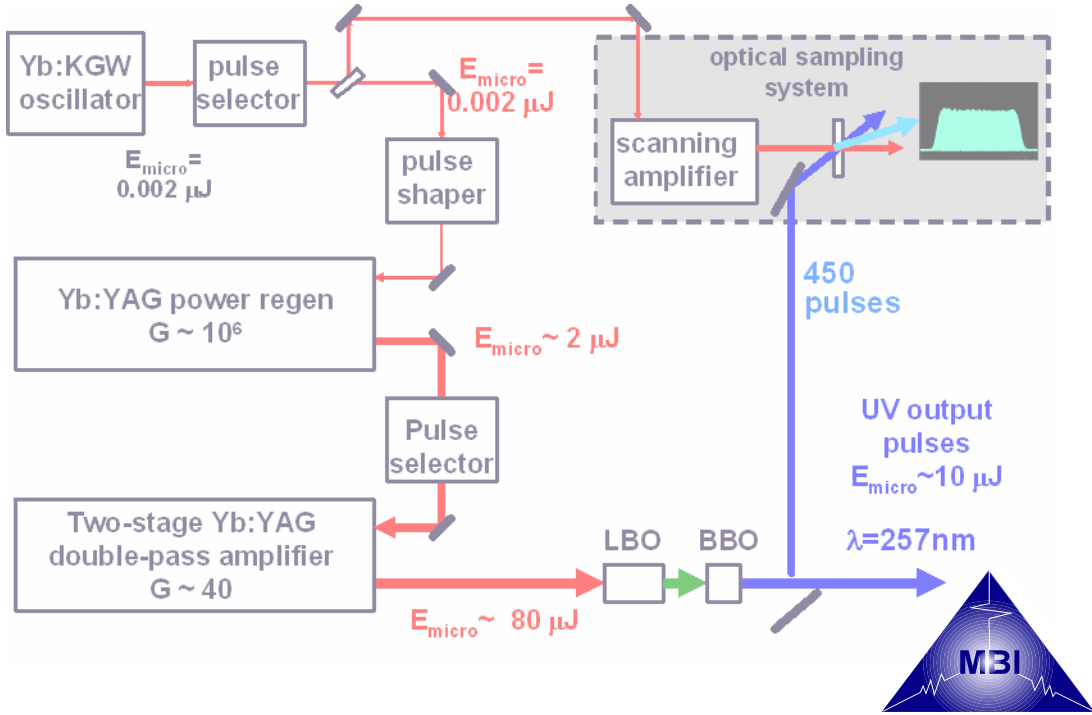
หลักการทำงานของปืนอิเล็กตรอนแบบโฟโตคาโทด: ผลิต & เร่งห้วงอิล็กตรอน

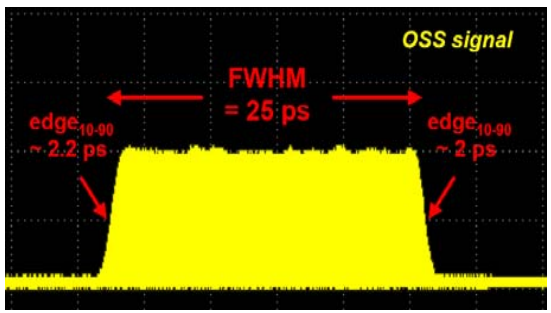


- ผลิตห้วงอิเล็กตรอนโดยกระบวนการ Photoemission โดยใช้ลำแสงเลเซอร์ห้วงสั้น
  - ➔ แสงเลเซอร์จะถูกฉายไปชนกระจกโลหะแล้วสะท้อนไปชนคาโทด
  - ➔ ห้วงอิเล็กตรอนที่มีความยาวห้วงเท่ากับเลเซอร์ที่ไปชนหลุดออกมาจากคาโทด
- ห้วงอิเล็กตรอนจะถูกเร่งภายใน RF cavity ที่มี gradient สูง จนมีพลังงานมากและมีความเร็วเข้าใกล้ความเร็วแสง
  - ➔ ลำอิเล็กตรอนภายใน cavity ถูกโฟกัสด้วยสนามแม่เหล็กจากแม่เหล็ก solenoids เพื่อลดอิทธิพลของ space charge (coulomb force) ระหว่างอิเล็กตรอนแต่ละตัว

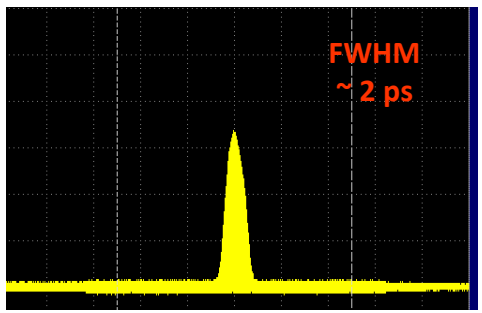
ระบบแสงเลเซอร์สำหรับใช้ผลิตอิเล็กตรอน

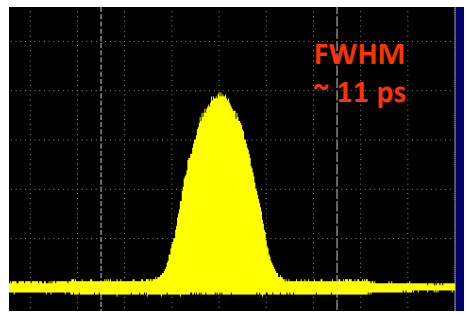
- Ytterbium-doped YAG laser (Yb:YAG)
- IR input pulses
- UV output pulses
  - ความยาวคลื่น 257 nm
  - pulse repetition rate = 1 MHz
  - พลังงานของห้วงเลเซอร์ ≤10 μJ
- สามารถปรับรูปร่างของเลเซอร์ได้ ทำให้สามารถปรับรูปร่าง longitudinal ของลำอิเล็กตรอนได้





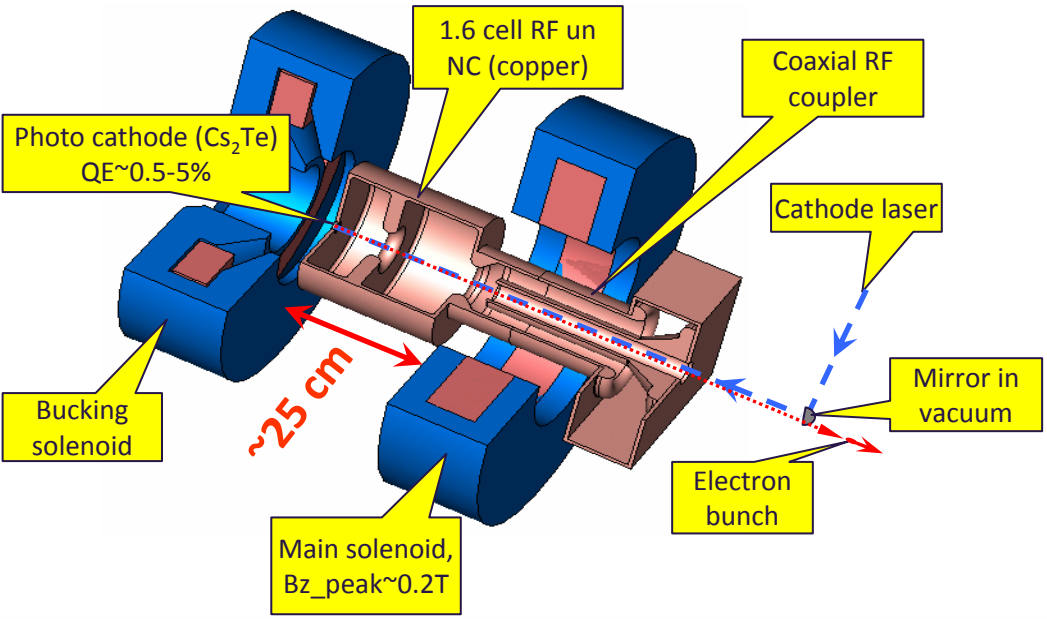
Flat-top pulses (max. flat-top ~25 ps FWHM)

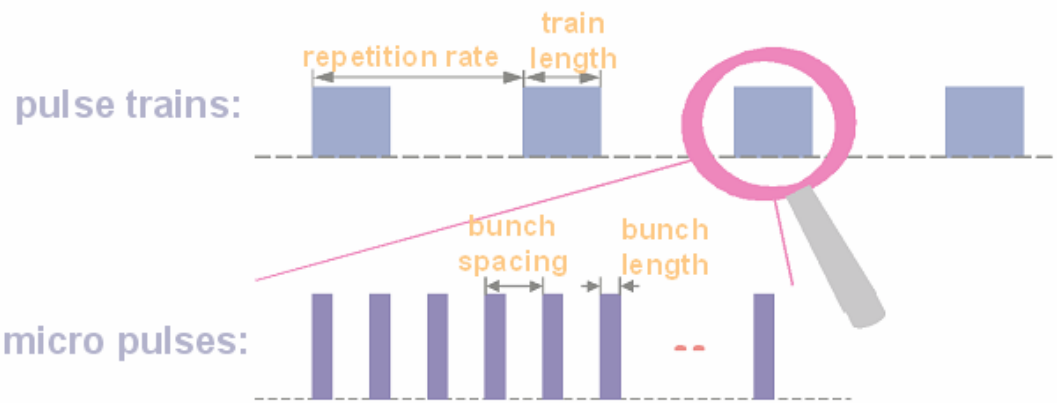


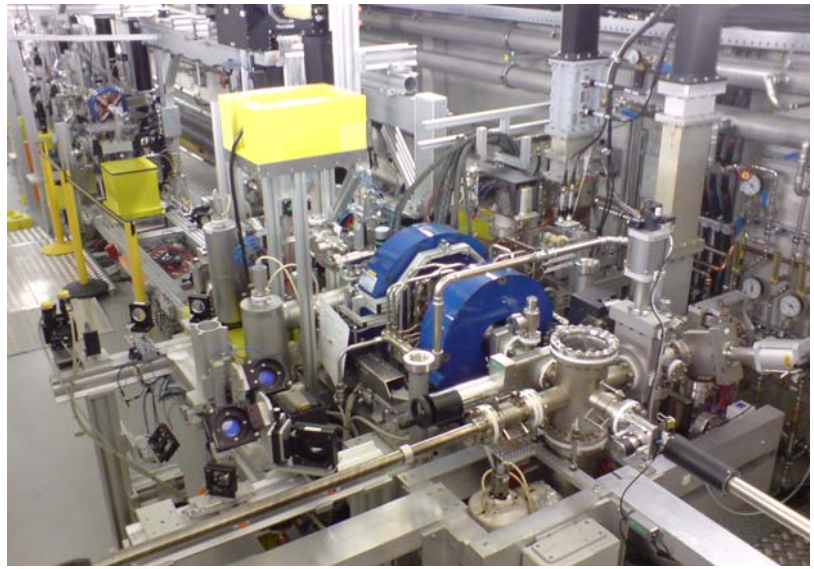


Gaussian pulses (FWHM = 2 -14 ps)

ปืนอิเล็กตรอนแบบโฟโตคาโทดชนิด L- band ความถี่เรโซแนนซ์ 1.3 GHz





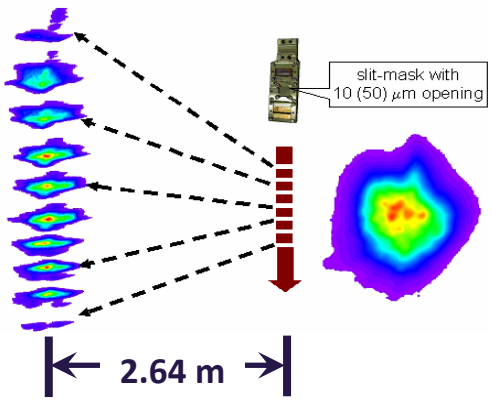


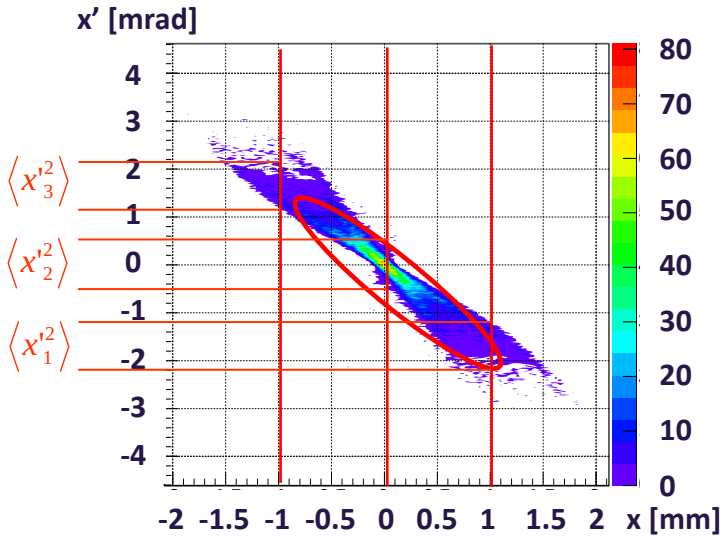
คุณสมบัติของปืนอิเล็กตรอน	
RF repetition rate สูงสุด	10 Hz
กำลัง RF สูงสุด	6 MW peak power
ความยาว RF มากที่สุด	800 μs
กำลัง RF เฉลี่ยสูงสุด	50 kW (ใน 25 cm cavity)
Bunch spacing	0.2 – 1 μs (สำหรับ XFEL)
พลังงานสูงสุด	~7 MeV
ประจุต่อห้วง	≤3 nC

การวัด Transverse Projected Emittance และ Transverse Phase Space

Single slit scan technique

- วัดค่า emittance และ phase space โดยใช้ **Emittance Measurement SYstem (EMSY)** ซึ่งประกอบไปด้วย horizontal / vertical actuators สำหรับ
  - **YAG** / OTR screens ⟶ วัดขนาดลำอิเล็กตรอน
  - **10** / 50 μm slits ⟶ สร้างbeamlets
- วัดขนาดภาคตัดขวางของลำอิเล็กตรอน ณ ตำแหน่ง slit
- วัด local divergence ของลำอิเล็กตรอนโดยวัดขนาด beamlets ณ ตำแหน่งของ observation screen





2D scaled normalized RMS emittance

$$\varepsilon_n = \beta\gamma \frac{\sigma_x}{\sqrt{\langle x^2 \rangle}} \sqrt{\langle x^2 \rangle \cdot \langle x'^2 \rangle - \langle xx' \rangle^2}$$

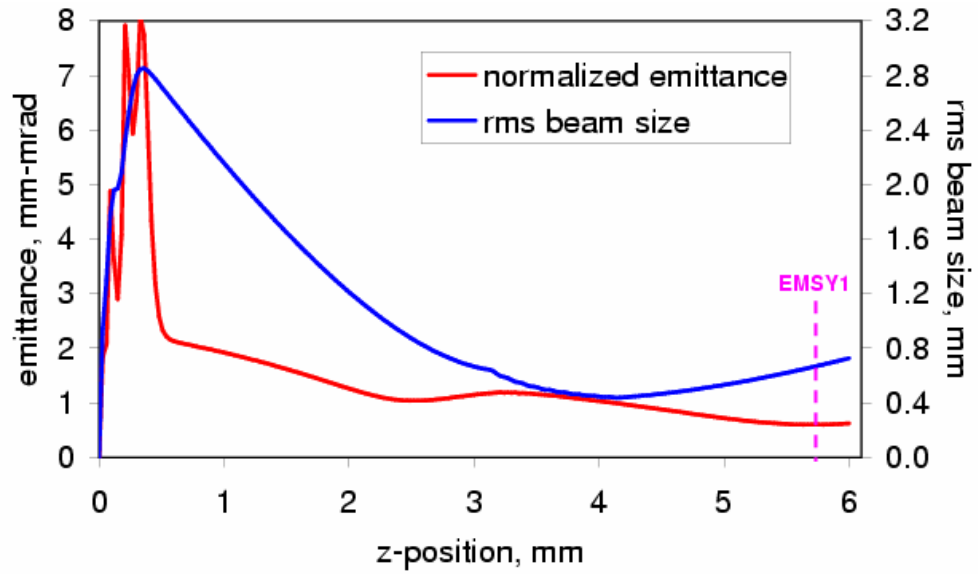
$\langle x^2 \rangle$, $\langle x'^2 \rangle$ - second central moments of electron distribution and divergence in phase space

$x' = p_x/p_z$ - angle of the single electron trajectory

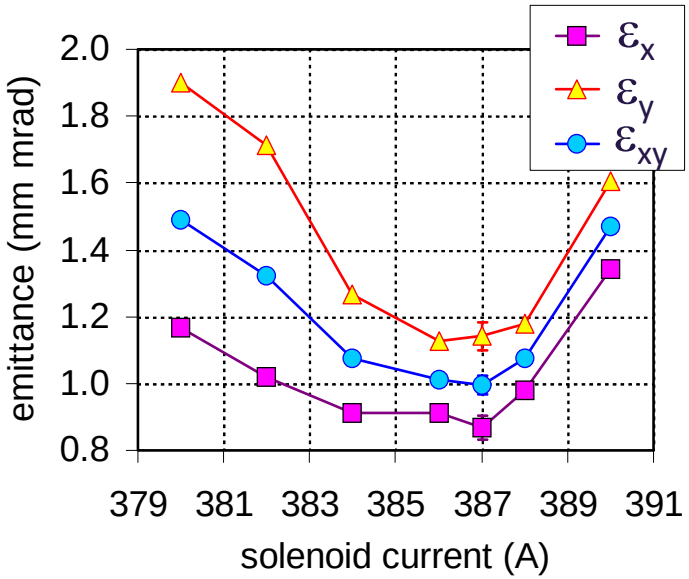
σ_x - RMS beam size measured at slit location

การคำนวนและการวัด Transverse Projected Emittance

ผลการคำนวนขนาดลำอิเล็กตรอนและ Emittance ณ ตำแหน่างต่างๆ ภายในเครื่องเร่งอนุภาค PITZ



ผลการวัดค่า Emittance ซึ่งขึ้นอยู่กับกระแสของแม่เหล็ก solenoid



Machine & beam parameters

- gun phase: +6 deg from MMMG phase
- booster phase: MMMG phase
- beam energy: 14.7 MeV/c
- flat-top laser profile: 2.1/23.1\2.4 ps
- laser (RMS) spot size: 0.36 mm

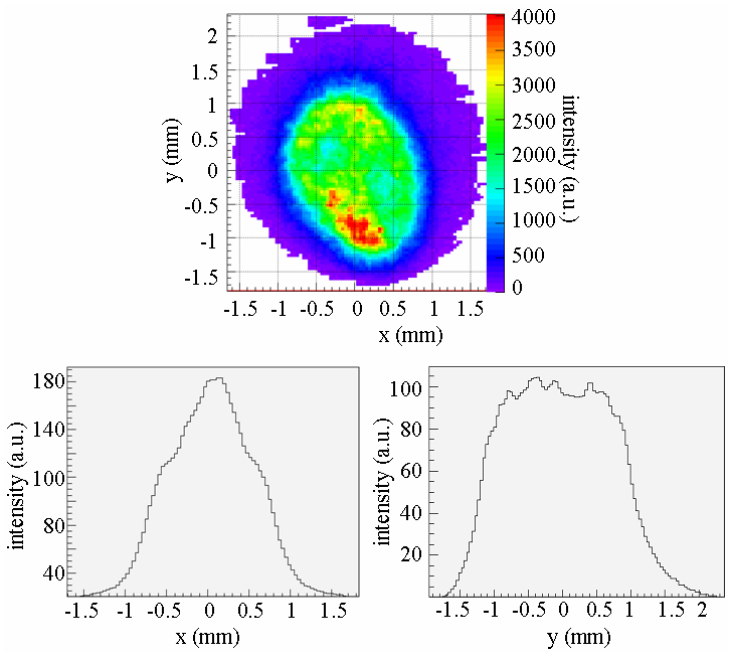
geometrical emittance: $\varepsilon_{xy} = \sqrt{\varepsilon_x \varepsilon_y}$

ε_x - horizontal emittance

ε_y - vertical emittance

ตัวอย่างผลการวัดค่า Transverse Projected Emittance และ Phase Space ของลำอิเล็กตรอน

Measured beam distributions and profiles

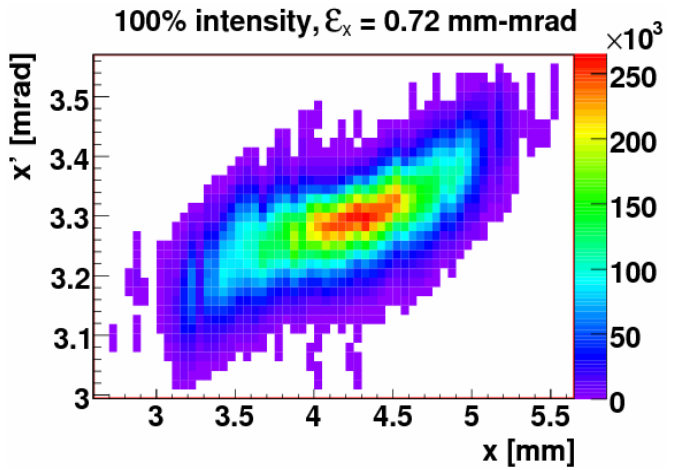


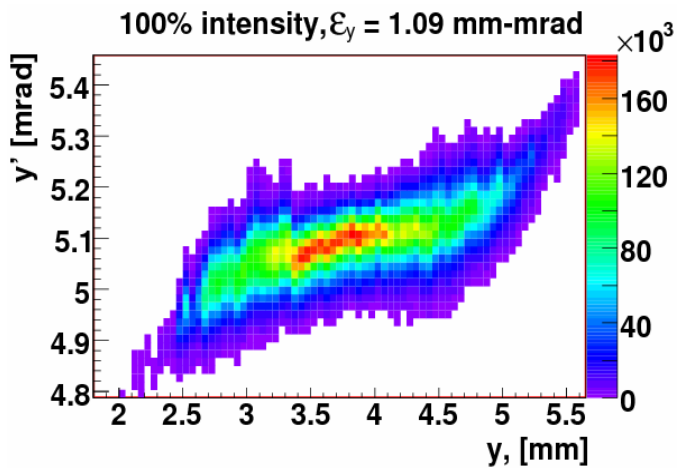
geometrical emittance: $\varepsilon_{xy} = \sqrt{\varepsilon_x \varepsilon_y}$

Machine & beam parameters

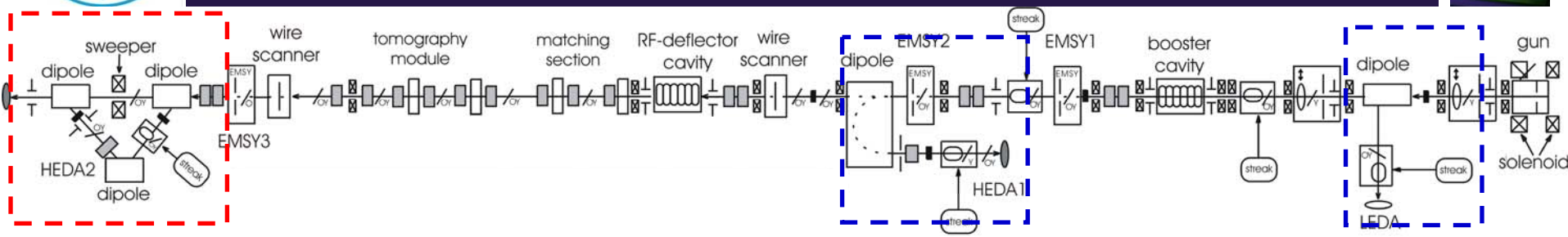
- gun phase: +6 deg from MMMG phase
- booster phase: MMMG phase
- beam energy: 14.7 MeV/c
- flat-top laser profile: 2.1/23.1\2.4 ps
- laser (RMS) spot size: 0.36 mm

Measured horizontal (ε_x) and vertical (ε_y) phase space distributions for minimum emittance point of 1 nC bunch charge

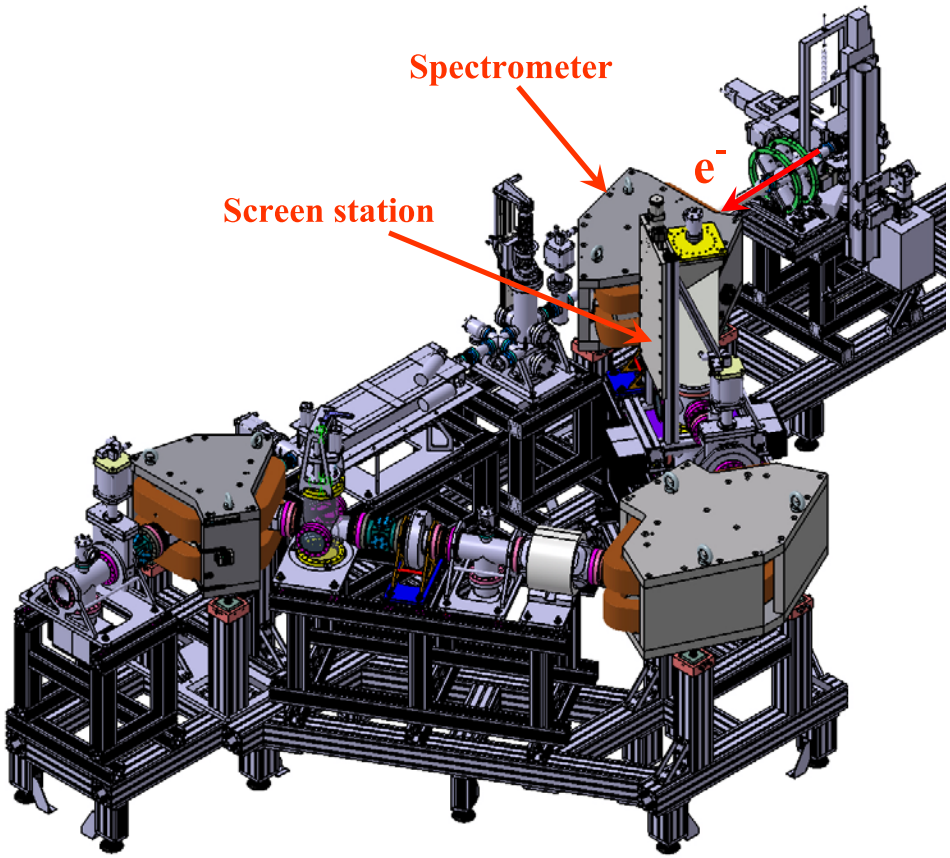




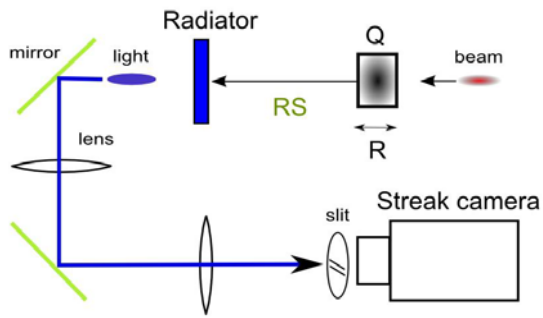
การวัดพลังงาน, ความยาวห้วง และ Longitudinal phase space ของลำอิเล็กตรอน



HEDA2 (DISP3) HEDA1 (DIPS2) LEDA (DISP1)

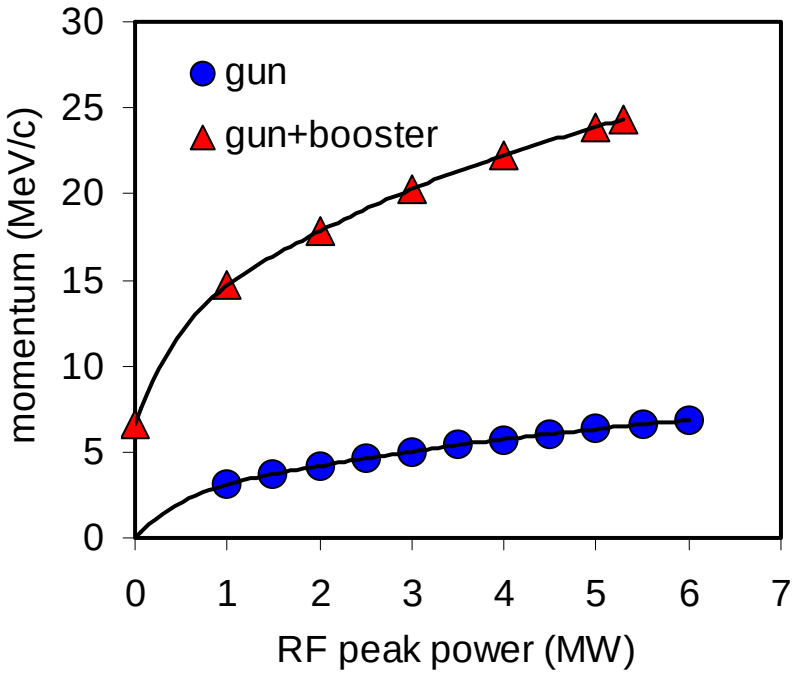


- การวัดพลังงานเฉลี่ยและการกระจายค่าพลังงานโดยใช้แม่เหล็กสองขั้ว (dipole) และ View screen
  - → เบนลำอิเล็กตรอนใช้แม่เหล็ก dipole
  - → วัด distribution ของลำอิเล็กตรอน @ Screen
  - → คำนวนค่าพลังงานและการกระจายพลังงาน
- การวัดความยาวห้วงอิเล็กตรอนและ longitudinal phase space
  - → ผลิตรังสี Cherenkov โดยใช้ aerogel screen
  - → วัดความยาวห้วงโดยใช้ streak camera



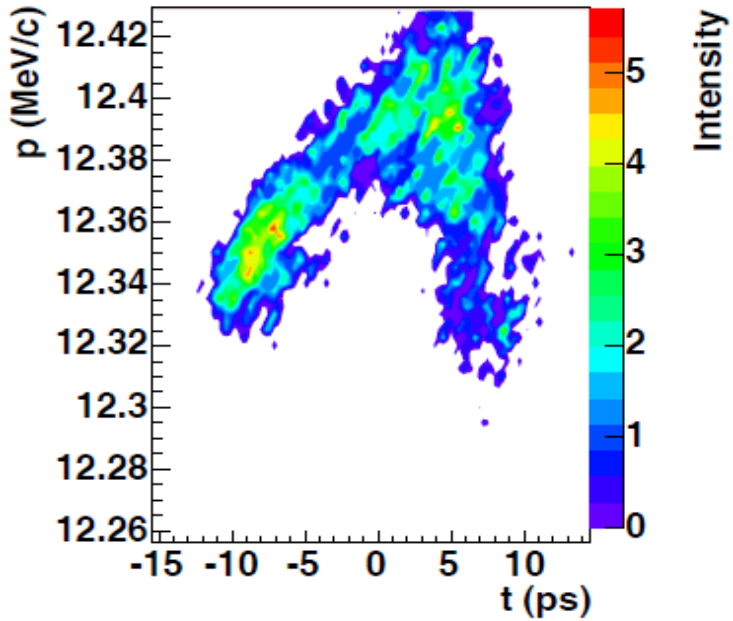
ตัวอย่างการวัดพลังงานหรือโมเมนตัม และ Longitudinal phase space ของลำอิเล็กตรอน

Momentum vs. RF peak power



- gun gradient: 60 MV/m at the cathode
- gun & booster phase: maximum mean momentum gain (MMMG) phase

Longitudinal phase space distribution



- gun gradient: 60 MV/m at the cathode
- gun phase: MMMG phase
- booster phase: -10° from MMMG phase

สรุป

- เครื่องเร่งอนุภาคเพื่อผลิตแสงเลเซอร์แบบอิเล็กตรอนอิสระ X-ray FEL กำลังได้รับการออกแบบและสร้างในสถาบันวิจัยเครื่องเร่งอนุภาคใหญ่ทั่วโลก เพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยคุณสมบัติของสสารที่ไม่สามารถใช้เครื่องมือทั่วไปหรือรังสีซินโครตรอนวิเคราะห์ได้
- DESY สร้างเครื่องเร่งอนุภาค PITZ ขึ้นมาเพื่อใช้ศึกษาและพัฒนาคุณสมบัติของปืนผลิตอิเล็กตรอนสำหรับเครื่องเร่งอนุภาคเพื่อผลิตแสงเลเซอร์แบบอิเล็กตรอนอิสระ FLASH และ European XFEL
- ผลการศึกษาว่าสุดโดยใช้เครื่องเร่งอนุภาค PITZ พบว่าสามารถพัฒนาปืนอิเล็กตรอนที่สามารถผลิตลำอิเล็กตรอนที่มีคุณสมบัติตามความต้องการของโครงการ FLASH และ European XFEL
  - ปืนอิเล็กตรอนสามารถทำงานได้โดยใช้คลื่น RF เกรเดียนสูงมากกว่า 60 MV/m
  - กำลัง RF เฉลี่ยในปืนอิเล็กตรอนมีค่า $\geq$50 kW
  - ค่า normalized transverse projected emittance $\leq$ 0.9 mm-mrad

Thank You for Your Attention