



中山大學
SUN YAT-SEN UNIVERSITY



中国科学院高能物理研究所
Institute of High Energy Physics Chinese Academy of Sciences

粒子加速器原理

~自由电子激光简介~

A brief Introduction of Free Electron Lasers

刘星光

liuxg@ihep.ac.cn

中国科学院高能物理研究所 东莞研究部

2024

目录

CONTENTS

电磁波谱

Electromagnetic Spectrum

光源及X射线自由电子激光

Light Sources and Free Electron Lasers

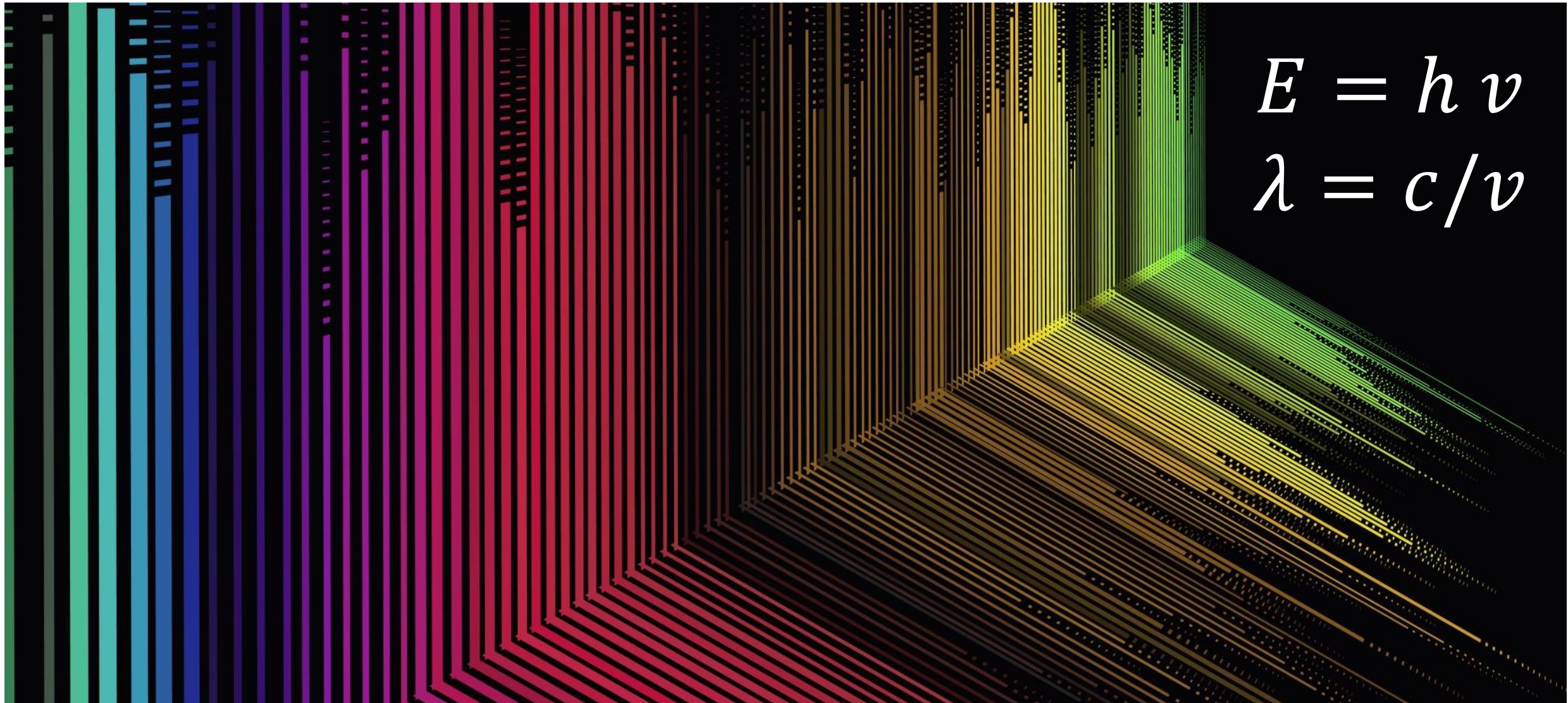
自由电子激光的关键技术

What makes an FEL

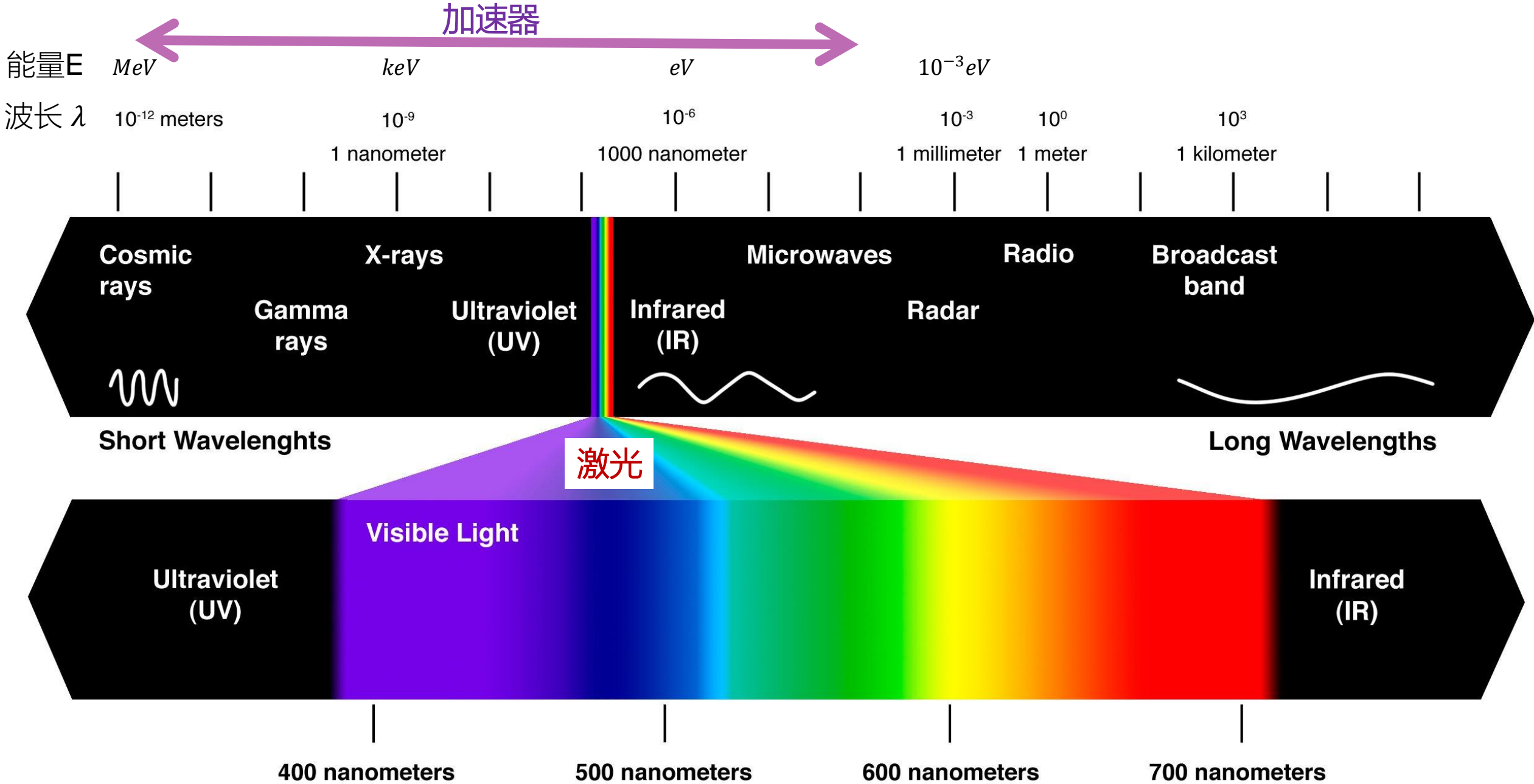
自由电子激光的应用及发展趋势

Applications and Trends

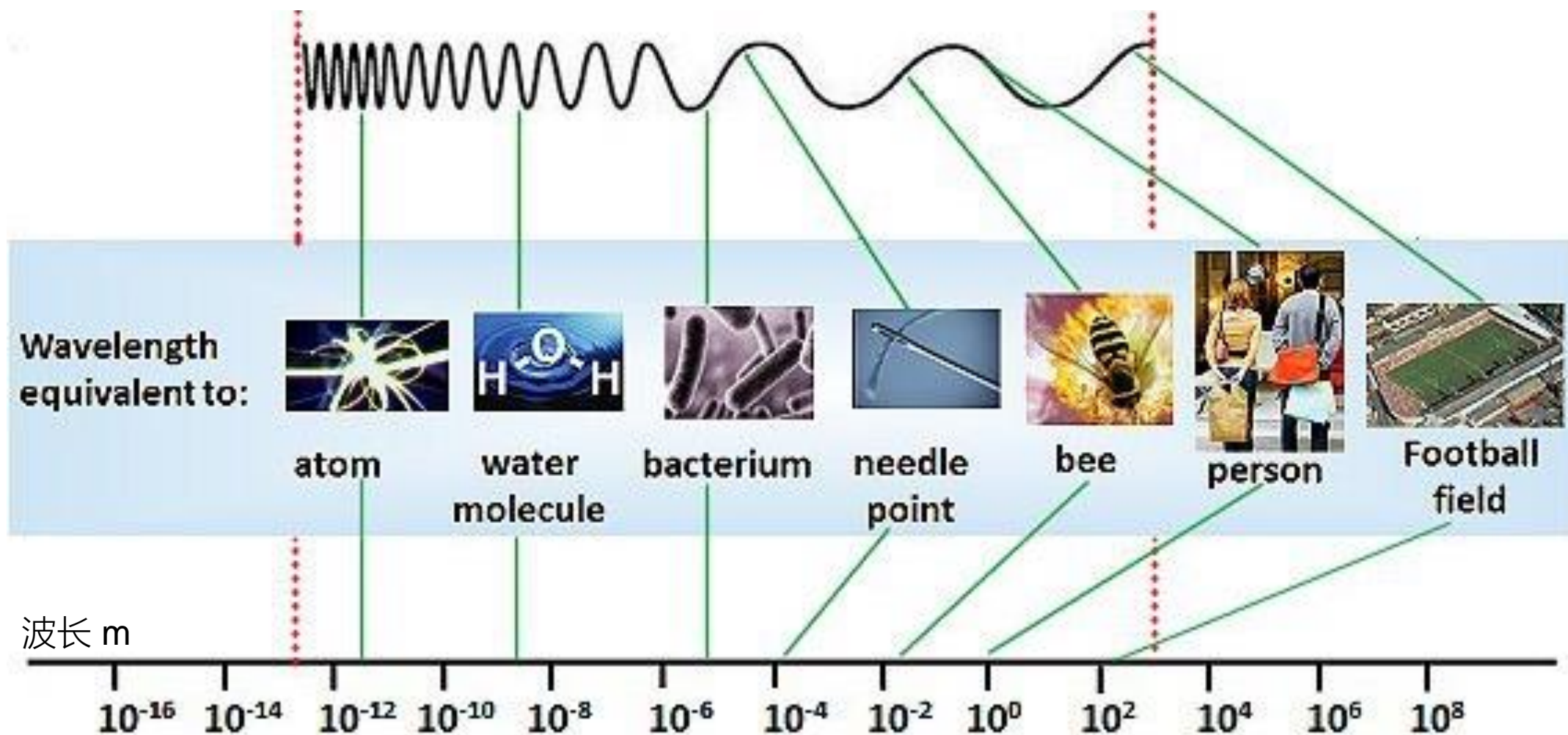
Electromagnetic Spectrum



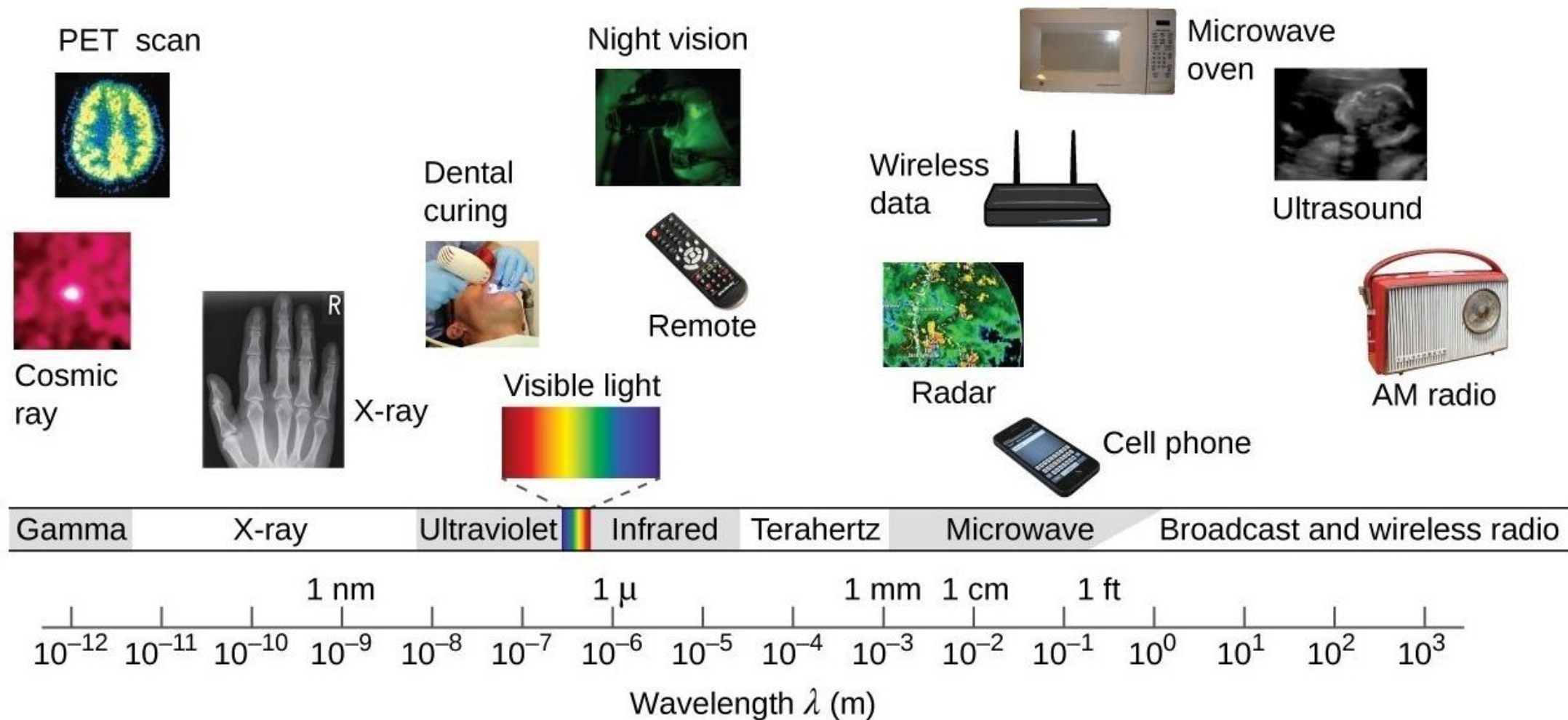
光速 $c = 299,792,458$ m/s 普朗克常数 $h = 6.626 \times 10^{-27}$



电磁波谱中的世界



电磁波的应用





Frederick William Herschel
(15 November 1738 – 25 August 1822)



Johann Wilhelm Ritter
(16 December 1776 – 23 January 1810)

1880/81 红外及紫外

Frederick Herschel使用棱镜和温度计发现了红外线; 物理学家 Johann Wilhelm Ritter 注意到了它对银色氯化物的影响, 并发现了紫外线。

1887/88 无线电及微波

Heinrich Hertz 使用来自电路的振荡发现了无线电波



Heinrich Rudolf Hertz
(22 February 1857 – 1 January 1894)



1895 X射线

Wilhelm Rontgen 在使用真空管时意外发现了X射线



Wilhelm Conrad Röntgen
(27 March 1845 – 10 February 1923)

1900 γ 射线

由法国化学家 Paul Villard 发现, 并在 1903年由 Ernest Rutherford 命名



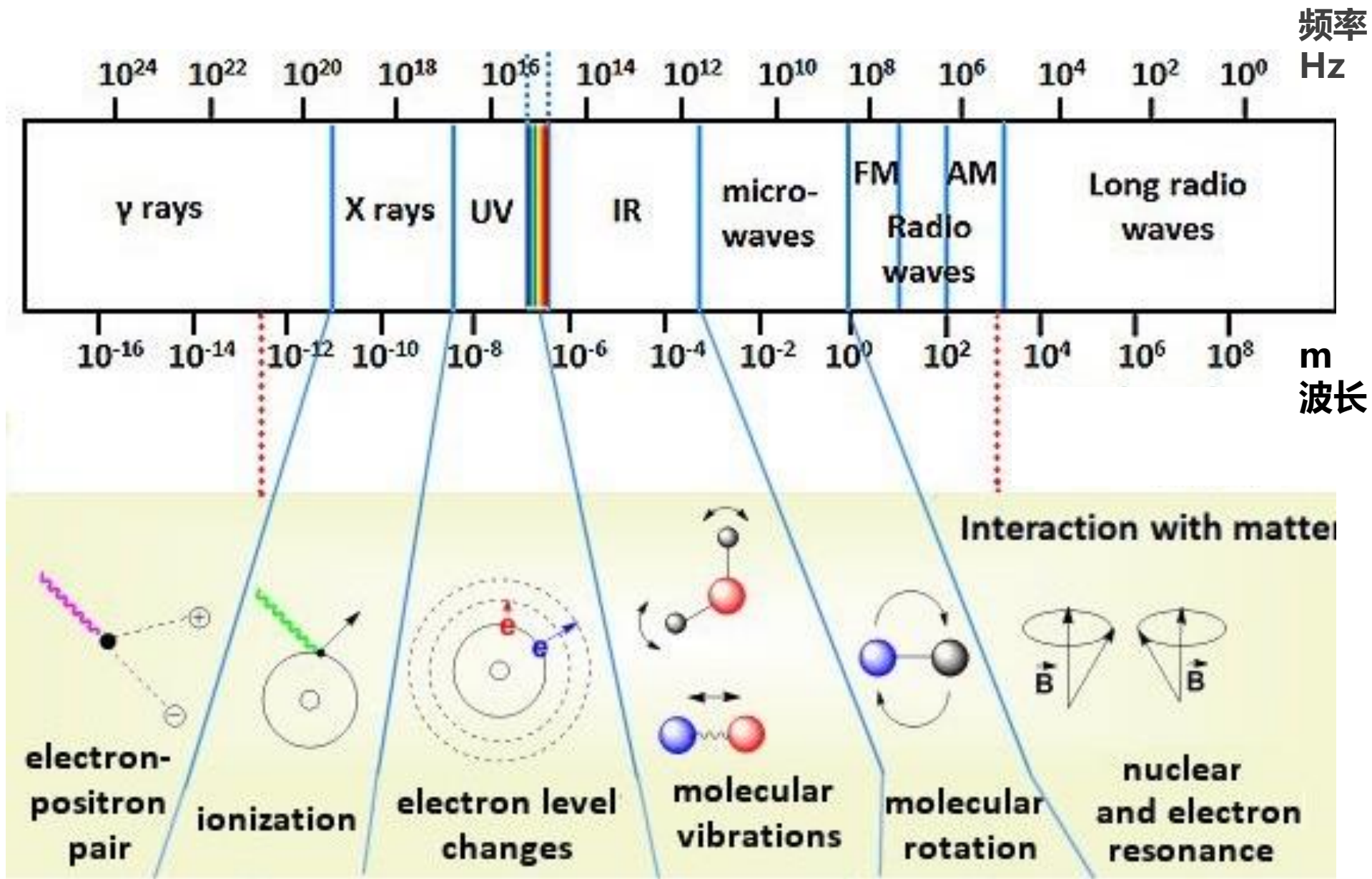
Paul Ulrich Villard
(28 September 1860 – 13 January 1934)

1666 可见光

牛顿利用棱镜分离可见光



Isaac Newton
(4 Jan. 4, 1643- 31 March, 1727)



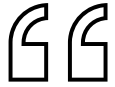
生物、化学、材料、医学

Relativistic Short Wavelength Free Electron Lasers (2000)

FELs	λ (μm)	σ_z	E (MeV)	I (A)	N	λ_0 (cm)	K (rms)
EXISTING =====	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
UCSB(mm FEL)	340	25 μs	6	2	42	7.1	0.7
Dartmouth(FEL)	200	CW	0.04	0.001	50	300	-
Korea(KAERI-FEL)	97-150	25ps	6.5	0.5	80	2.5	1.6
Himeji(LEENA)	65-75	10ps	5.4	10	50	1.6	0.5
UCSB(FIR FEL)	60	25 μs	6	2	150	2	0.1
Osaka(ILE/ILT)	47	3ps	8	50	50	2	0.5
Osaka(ISIR)	40	30ps	17	50	32	6	1
Tokai(JAERI-FEL)	22	5ps	16.5	100	52	3.3	0.7
Bruyeres(ELSA)	20	30ps	18	100	30	3	0.8
Osaka(FELI4)	18-40	10ps	33	40	30	8	1.3-1.7
UCLA-Kurchatov	16	3ps	13.5	80	40	1.5	1
LANL(RAFEL)	15.5	15ps	17	300	200	2	0.9
Stanford(FIREFLY)	15-65	1-5ps	15-32	14	25	6	1
UCLA-Kurchatov-LANL	12	5ps	18	170	100	2	0.7
Maryland(MIRFEL)	12-21	5ps	9-14	100	73	1.4	0.2
Beijing(IHEP)	10	4ps	30	14	50	3	1
Darmstadt(IR-FEL)	6-8	2ps	25-50	2.7	80	3.2	1
BNL(HGHG)	5.3	6ps	40	120	60	3.3	1.44
Osaka(FELI1)	5.5	10ps	33.2	42	58	3.4	1
Tokyo(FEL-SUT)	5-16	2ps	32	0.2	40	3.2	0.7-1.8
Nieuwegein(FELIX)	4-200	1ps	50	50	38	6.5	1.8
Duke(MarkIII)	3	3ps	44	20	47	2.3	1

(Plus fifteen more)

由于半导体和光纤激光的崛起:



There was thus no place left in 1965 at which I could pursue studies of the physics and technology of advanced vacuum electronic radiation sources



John M. J. Madey(2015)

激光

Laser



Microchip Laser



Nanosecond Laser



Fiber Laser

大连光源EUV-FEL光源 (~100m)



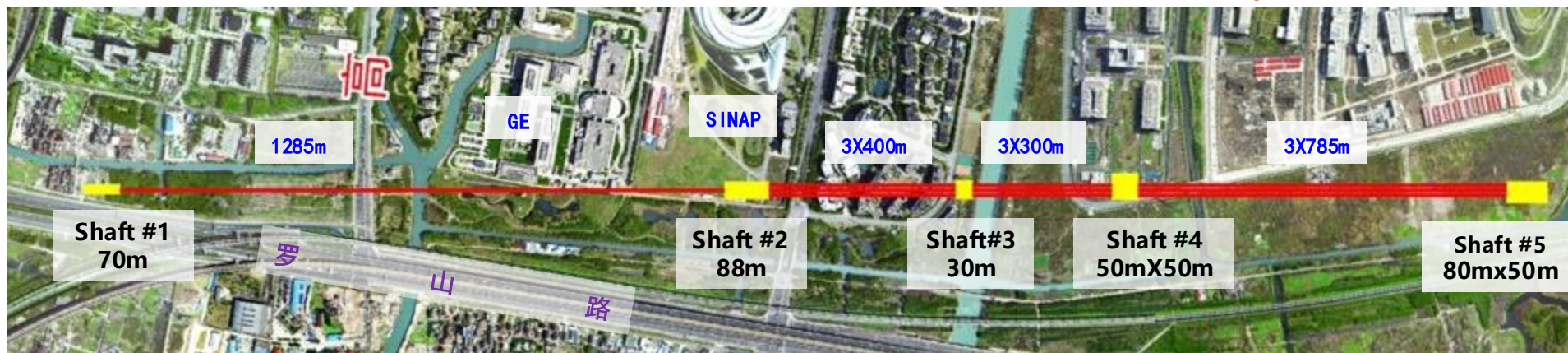
自由电子激光

Free Electron Laser

X射线自由电子激光

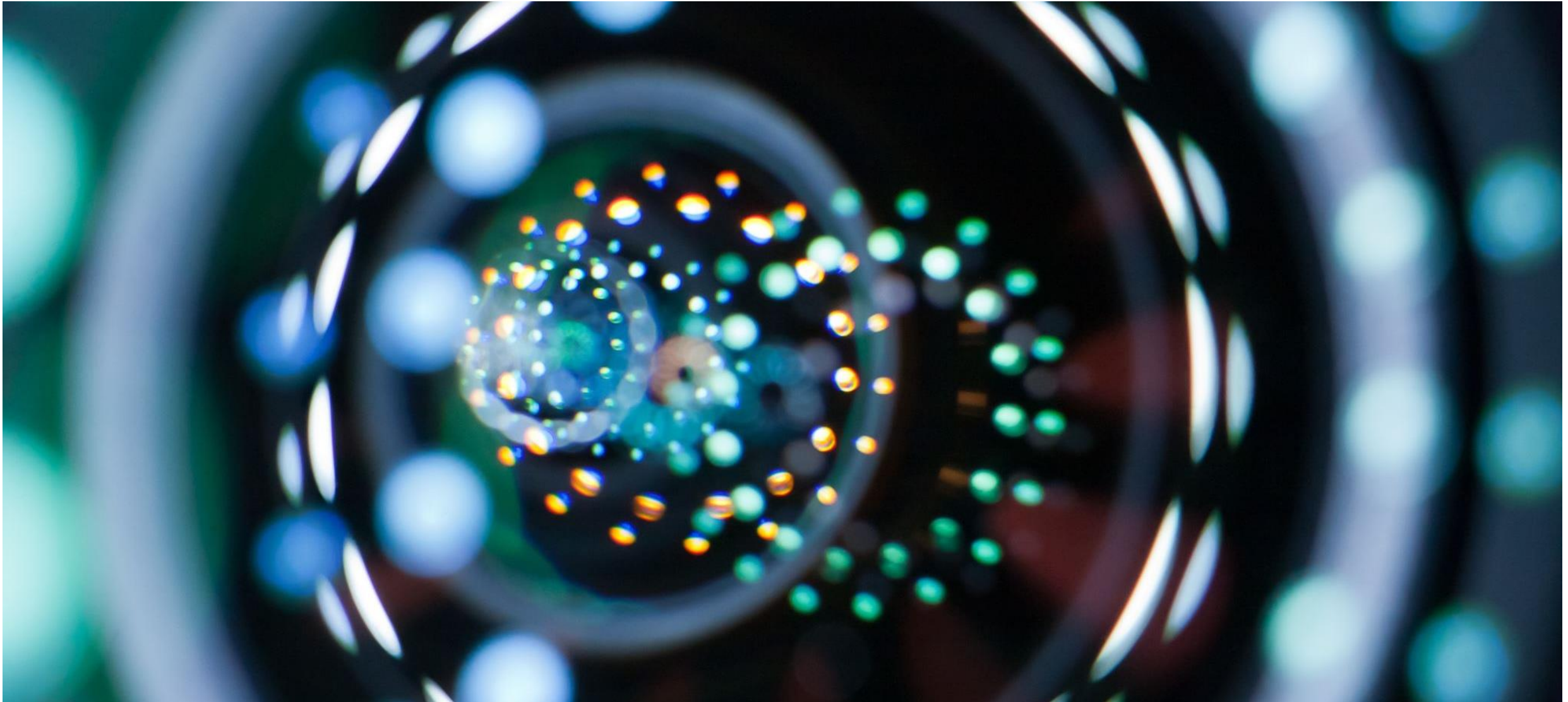
X-ray Free Electron Laser

上海硬X射线SHINE (~3km, 在建)



光源与X射线自由电子激光

Light Sources and X-ray FEL





什么是光源，都有哪些类型



光源是任何可以发出光的物体或装置。在自然界和人造设备中，光源的类型繁多，它们可以基于发光的物理机制和应用场景被分类。以下是一些常见的光源类型：

1. 自然光源：

太阳：是地球上最重要的自然光源，提供了日光。

星星：包括其他恒星和星系，它们发出的光可能需要数百万年才能到达地球。

生物发光：某些生物体（如萤火虫和深海鱼类）能够通过生物化学反应发光。

2. 人造光源：

白炽灯：通过加热丝状物体（通常是钨丝）到高温使其发光。

荧光灯：通过电流激发汞蒸气产生紫外线，紫外线随后被荧光粉转换为可见光。

发光二极管(LED)：利用半导体材料，通过电流直接产生可见光。

激光器：通过受激发射产生高度单色、相干的光束。

光纤：通过内部反射传输光，常用于通信和照明。

3. 特殊光源：

同步辐射光源：当带电粒子（通常是电子）以接近光速在磁场中做圆周运动时，会发出宽频谱的同步辐射光。

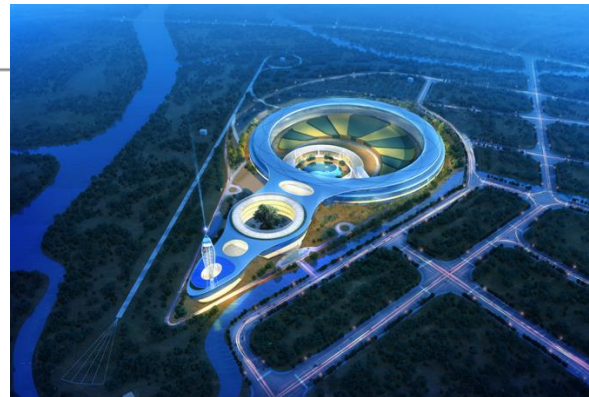
自由电子激光(FEL)：利用相对论性电子束通过特殊的磁结构（称为undulator或wiggler）产生的相干光。

气体放电灯：例如霓虹灯，通过电流激发气体分子发光。

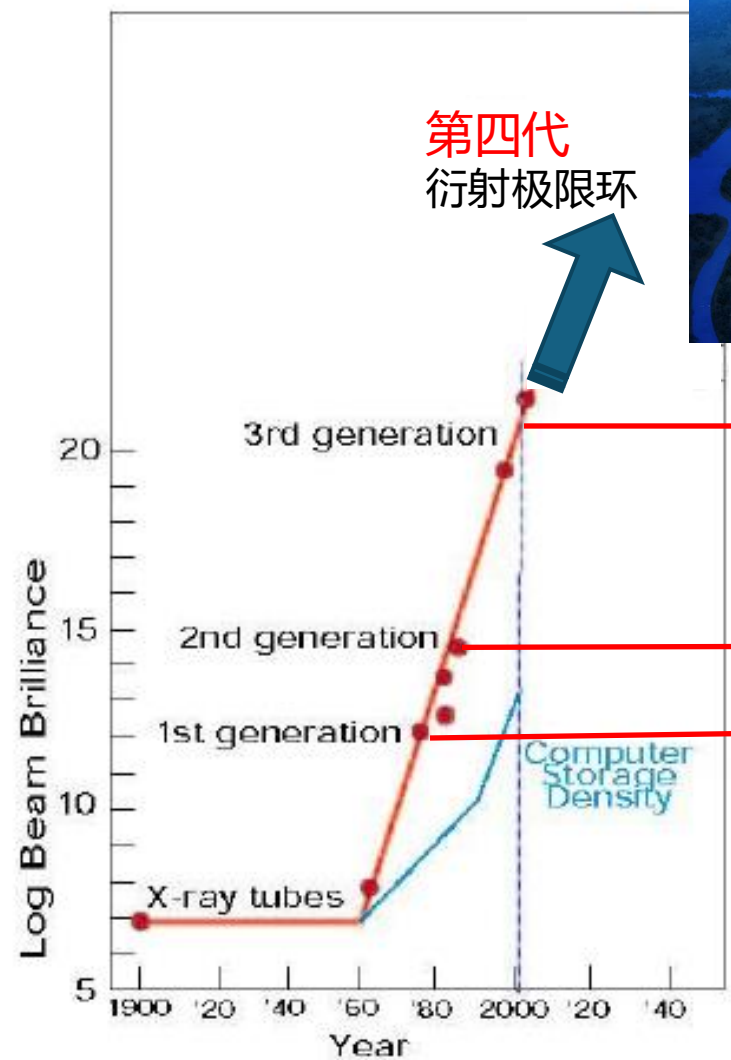
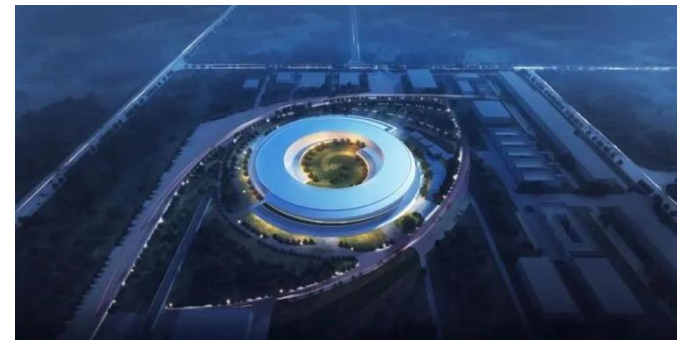
每种光源都有其特定的用途和特点，例如，LED灯以其高效率和长寿命被广泛用于照明，而激光器则因其高度的方向性和能量集中，被用于从医疗手术到工业切割等多种应用。同步辐射光源和自由电子激光则主要用于科学研究，如材料科学、生物学和化学等领域的研究。

我国的同步辐射光源

北京高能同步辐射光源 (6GeV, 安装调试)



合肥低能先进光源 (2.2GeV, 在建)



第四代
衍射极限环

第三代
可加装波荡器磁铁的
同步辐射专用光源

第二代
基于同步辐射专用
储存环的专用机

第一代
寄生于高能物理实验
专用的高能对撞机的
兼用机



上海同步辐射光源



合肥同步辐射光源



北京同步辐射装置

Light Sources Around the World

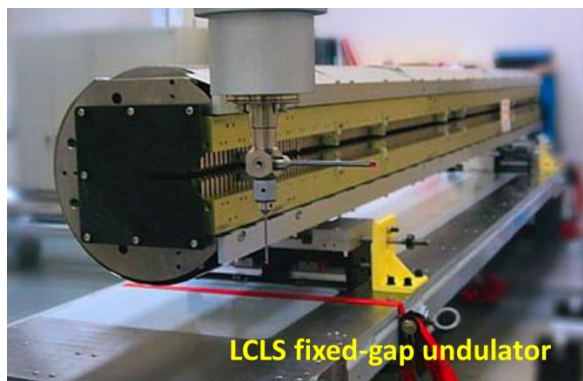
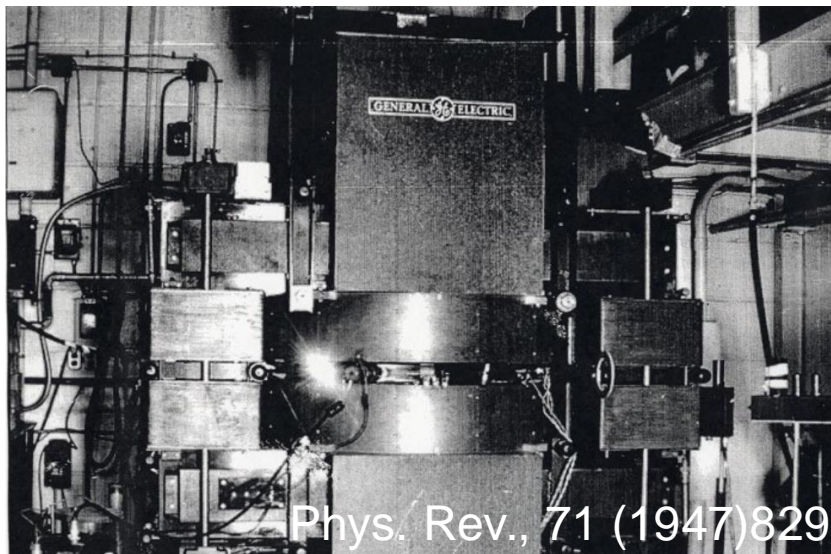
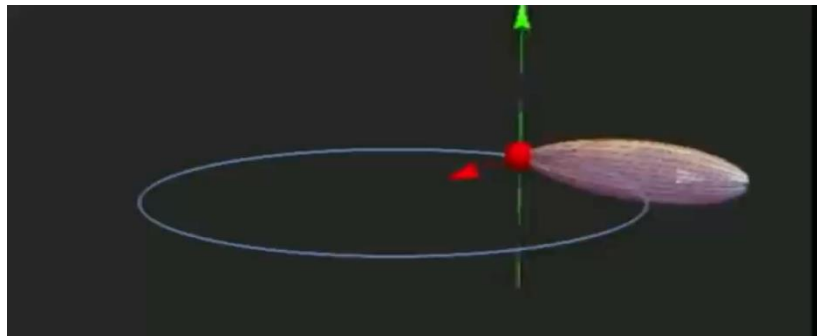


lightsources.org

XFELs around the world



几种辐射方式的比较



Source	Intensity	Spectrum $\hbar\omega$
<p>Bending magnet</p>	$\propto N_{\text{electrons}}$	
<p>Wiggler</p>	$\propto N_{\text{electrons}} \times N_{\text{poles}}$	
<p>Undulator</p>	$\propto N_{\text{electrons}} \times (N_{\text{poles}})^2$	
<p>Free Electron Laser</p>	$\propto (N_{\text{electrons}})^2 \times (N_{\text{poles}})^2$	

FEL物理基础

spontaneous undulator radiation

$$\lambda_r = \frac{\lambda_w}{2\gamma^2} (1 + a_w^2)$$

undulator deflection parameter

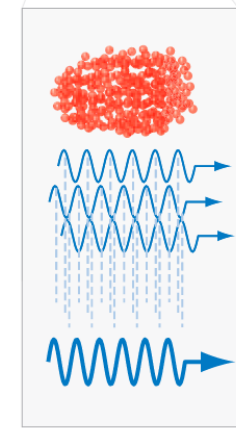
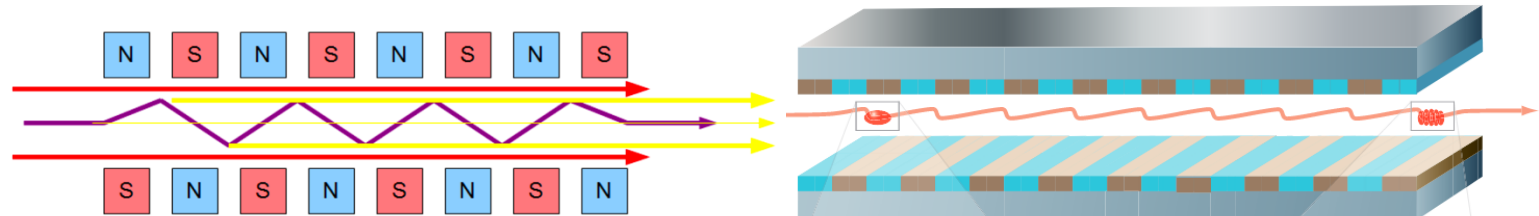
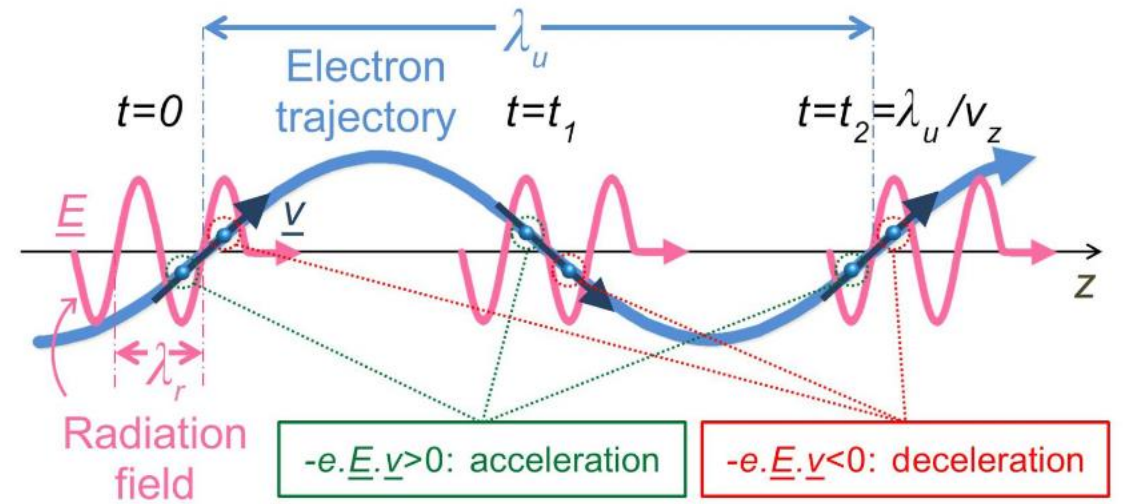
$$a_w = \frac{eB\lambda_w}{2\pi mc}$$

$$B = \frac{\Phi}{4\pi^2 \Sigma_x \Sigma_{\theta_x} \Sigma_y \Sigma_{\theta_y}} \quad (\text{photons/s/mm}^2/\text{mrad}^2/0.1\% \text{ BW})$$

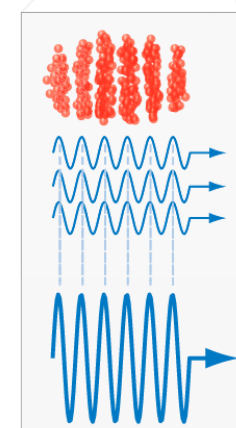
$$P_{\text{rad}} \approx \rho P_{\text{beam}} = \rho I_{\text{peak}}[\text{A}]E[\text{eV}]$$

$$B \simeq 8 \times 10^9 \frac{P}{\rho \lambda} \quad P_{\text{rad}} \simeq 10 \text{GW}, \rho \simeq 10^{-3} \text{ and } \lambda = 0.1 \text{nm}$$

$$B \simeq 8 \times 10^{32}$$



INCOHERENT EMISSION
Electrons randomly phased

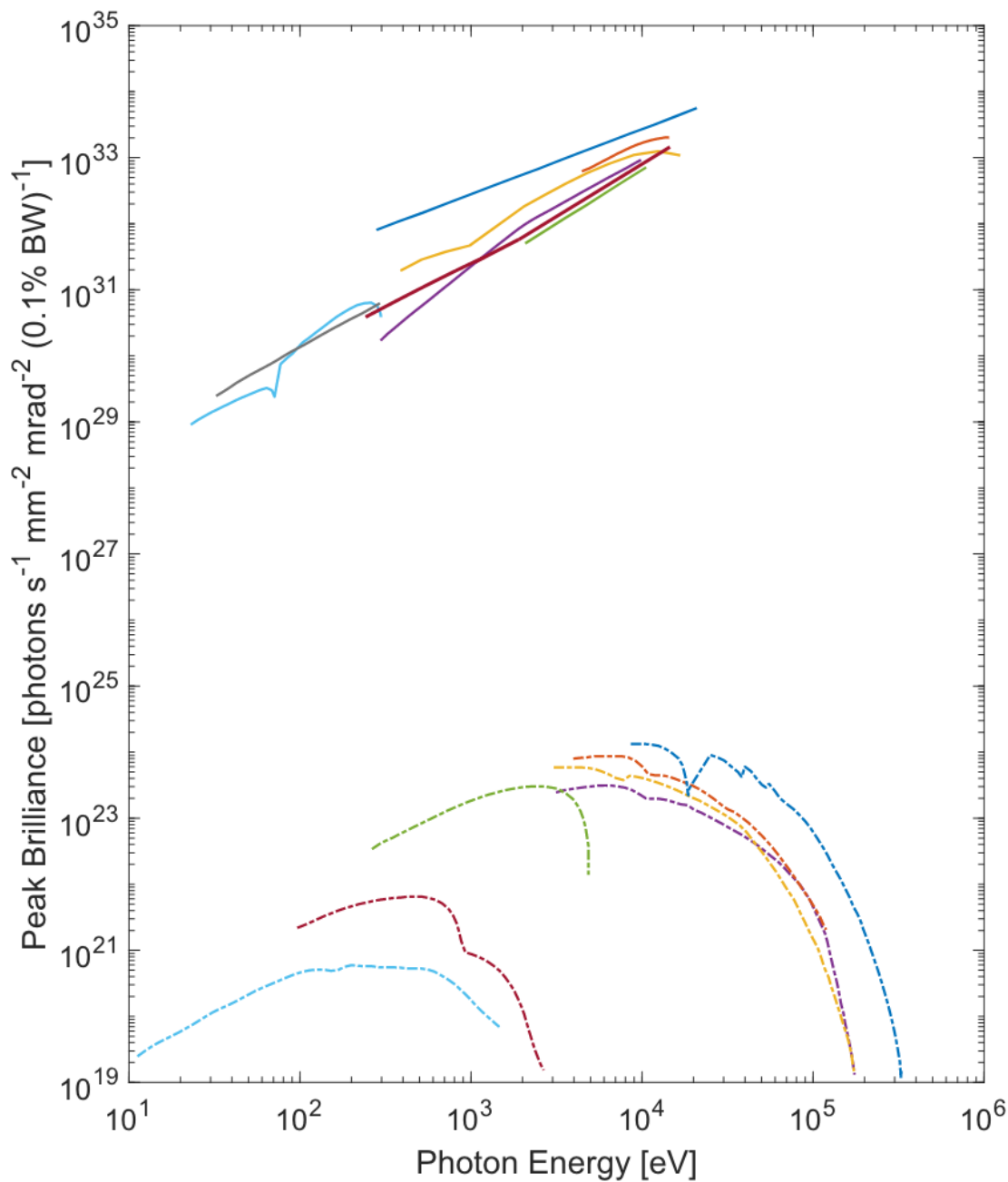
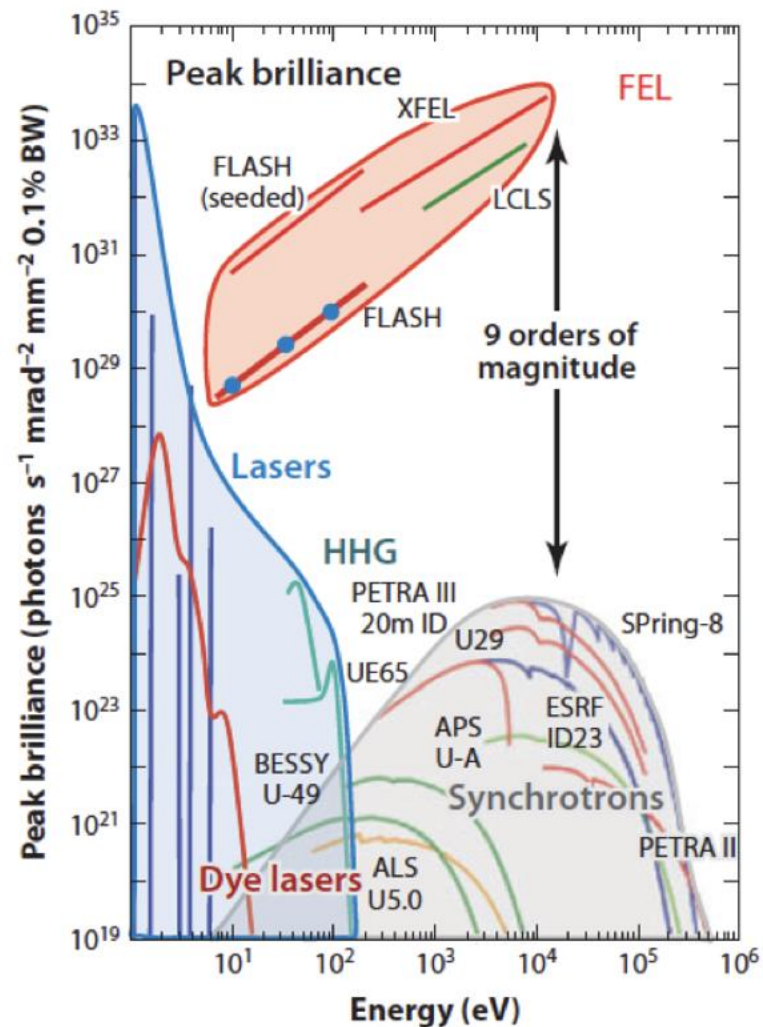


COHERENT EMISSION
Electrons bunched at radiation wavelength

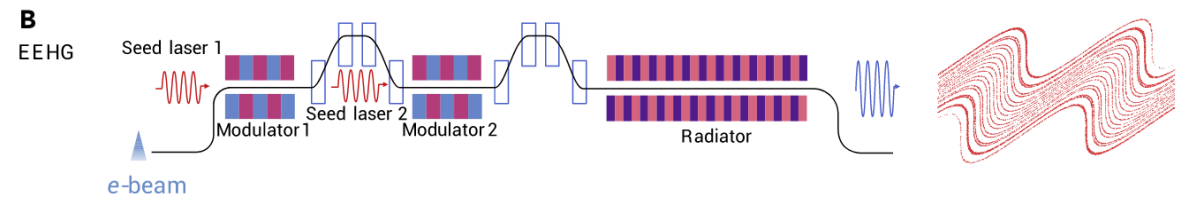
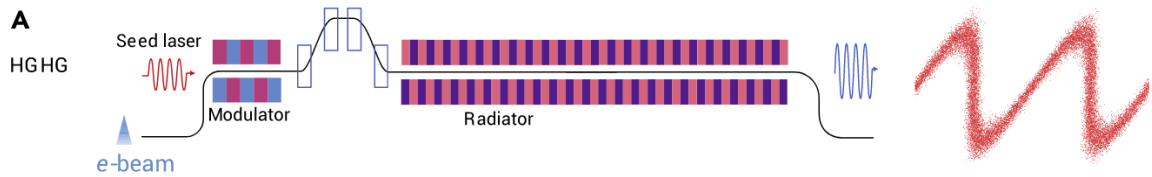
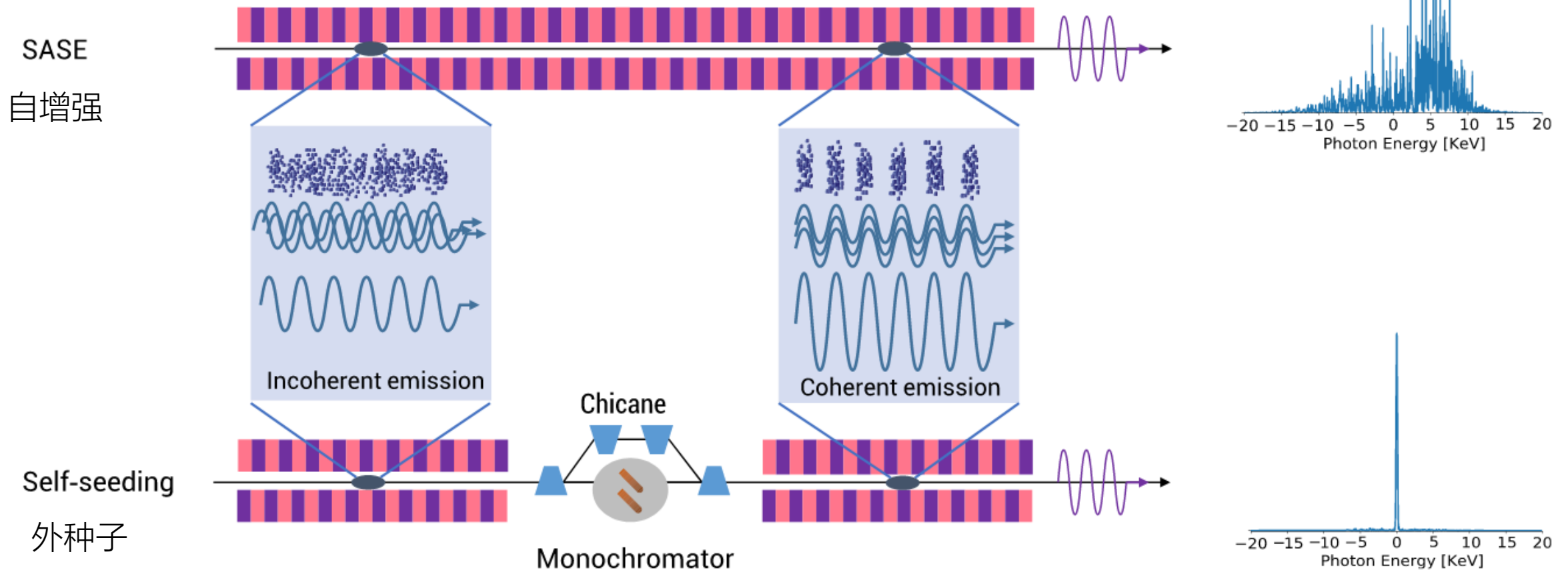
激光

同步辐射光源

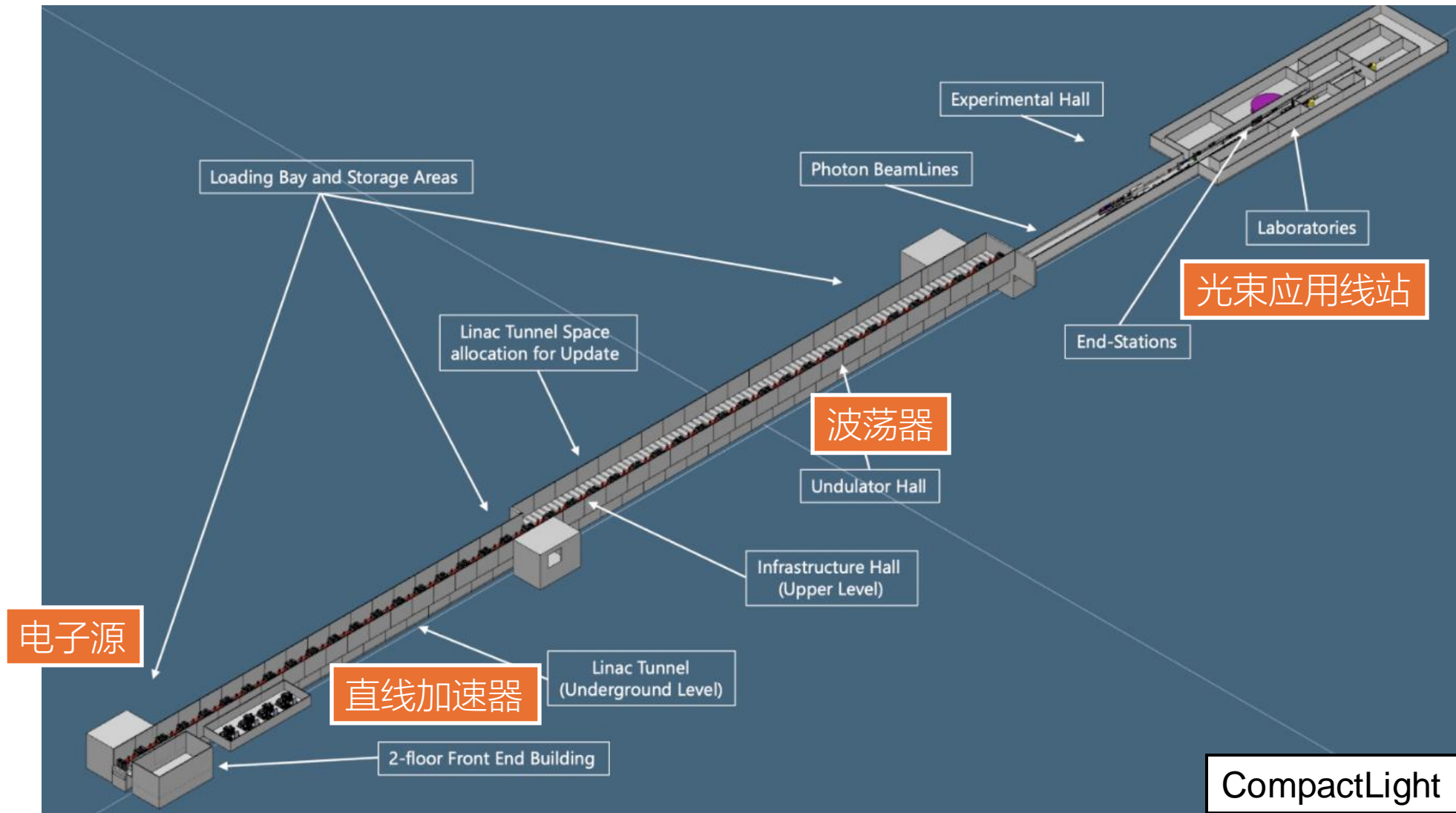
X射线自由电子激光

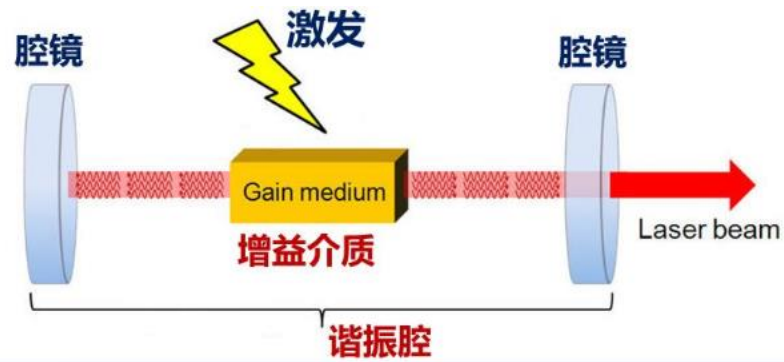


Self Amplified Spontaneous Emission

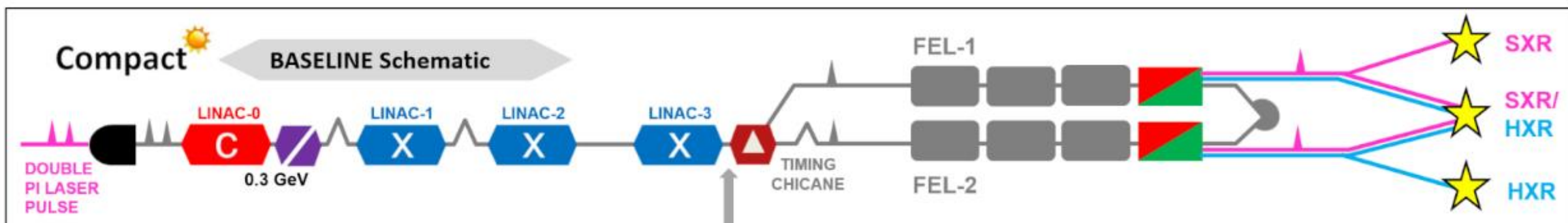


一个FEL由哪些部分组成？

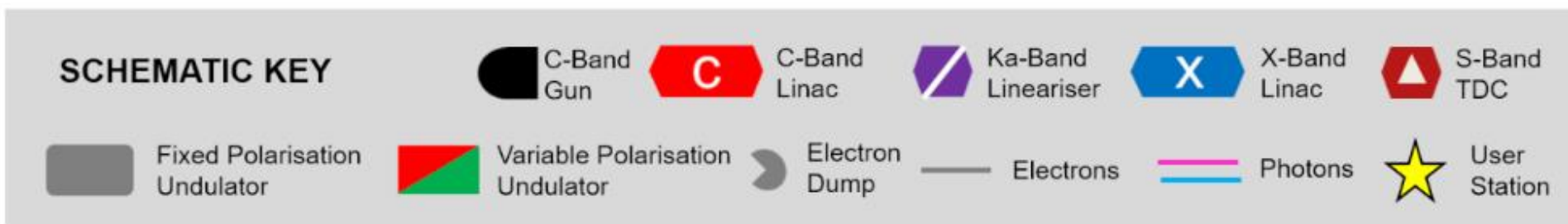




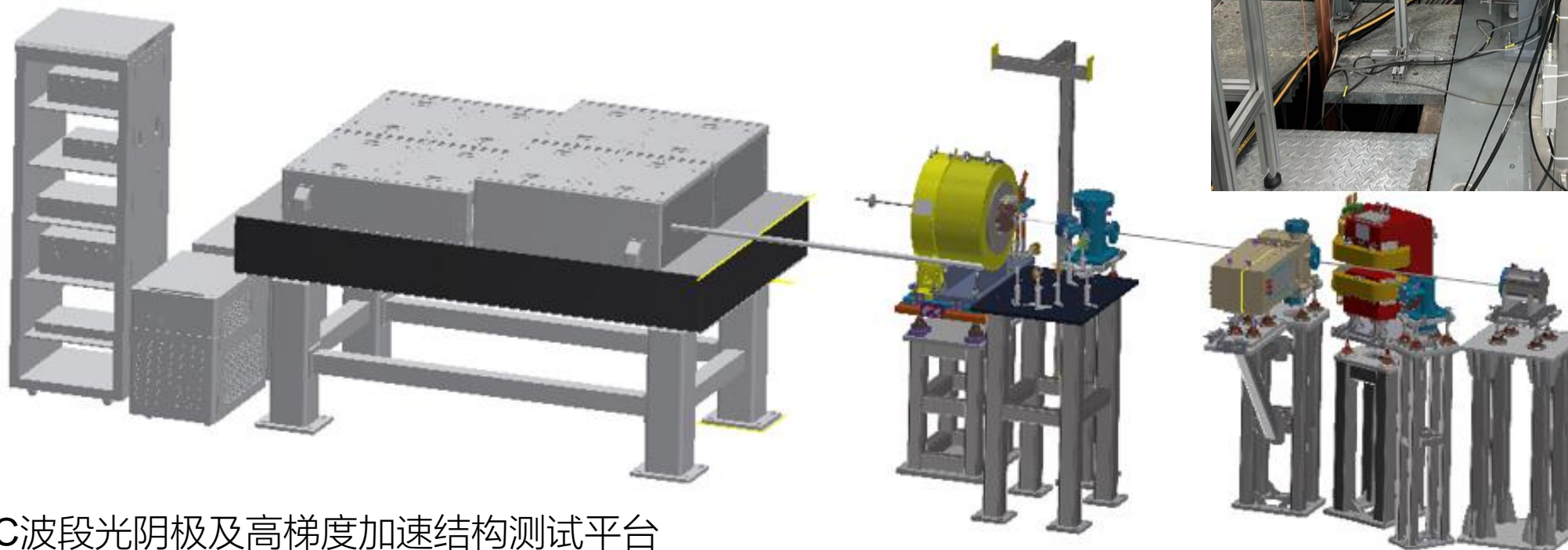
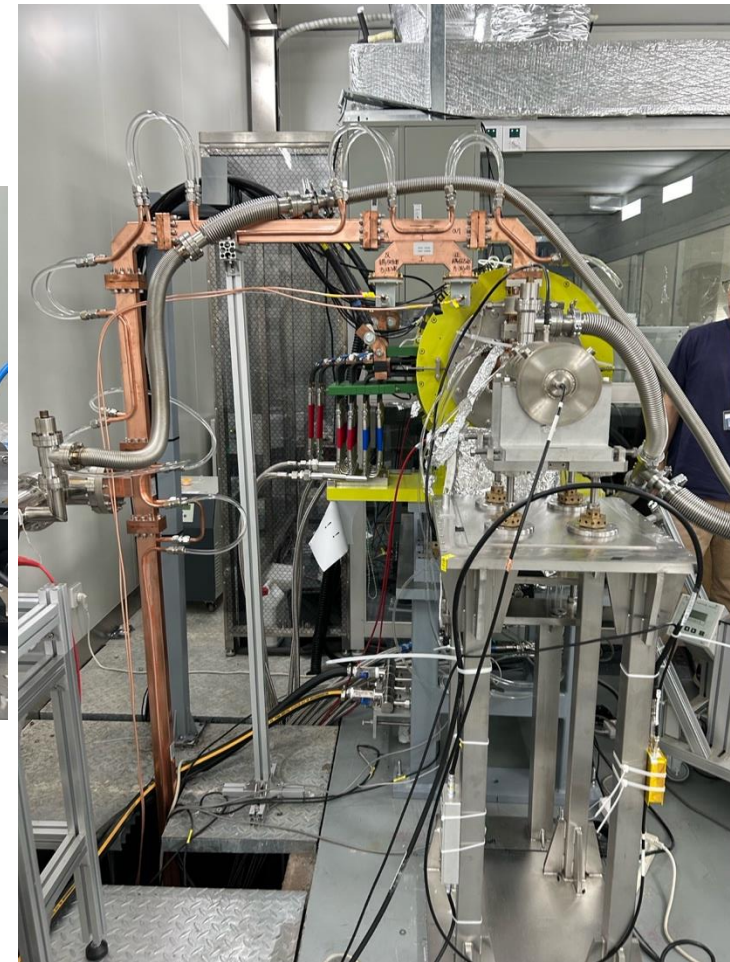
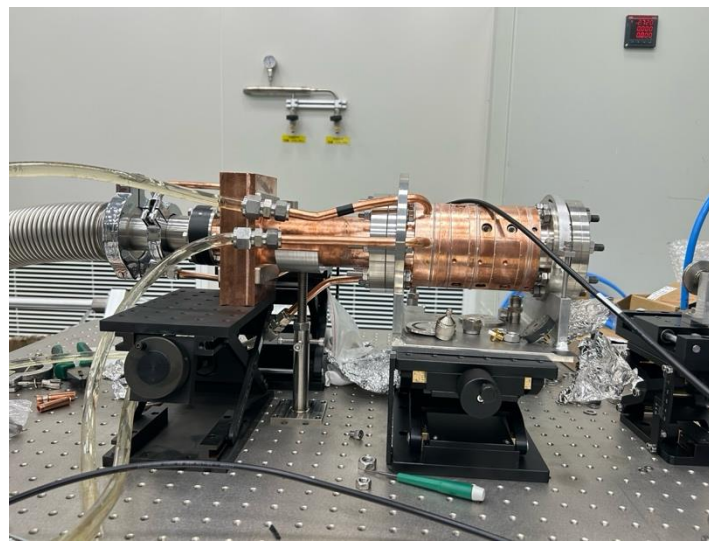
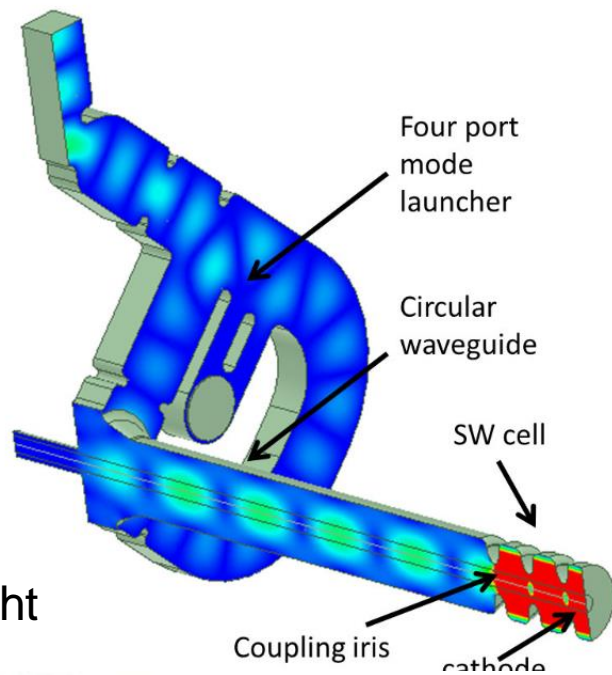
CompactLight布局示意图



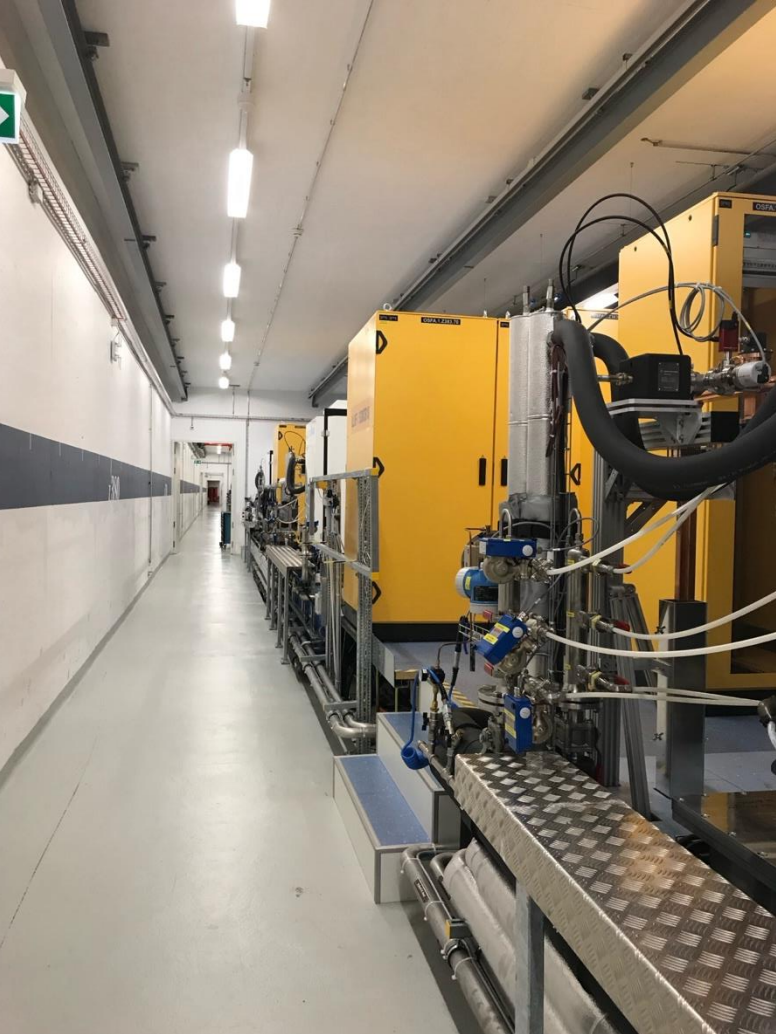
0.97 to 2.4 GeV @ 250 Hz (SXR/SXR)
2.75 to 5.5 GeV @ 100 Hz (HXR/HXR)



光阴极电子枪



高频系统及直线加速器

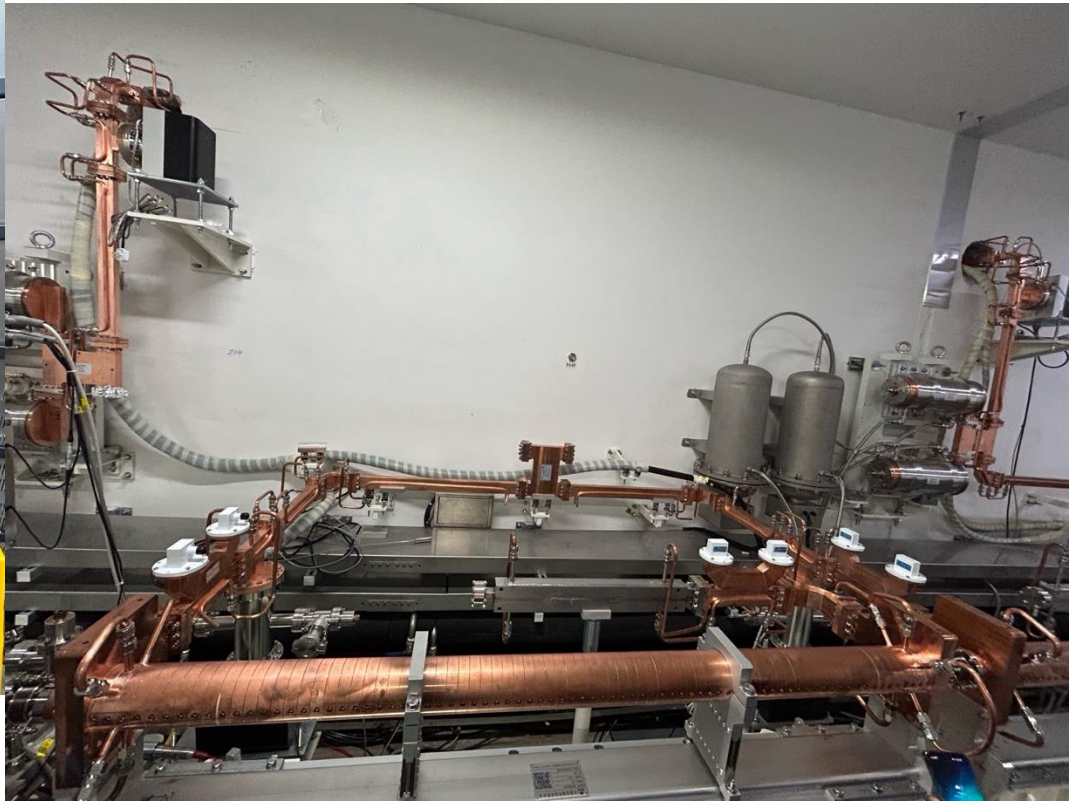


SwissFEL功率源大厅

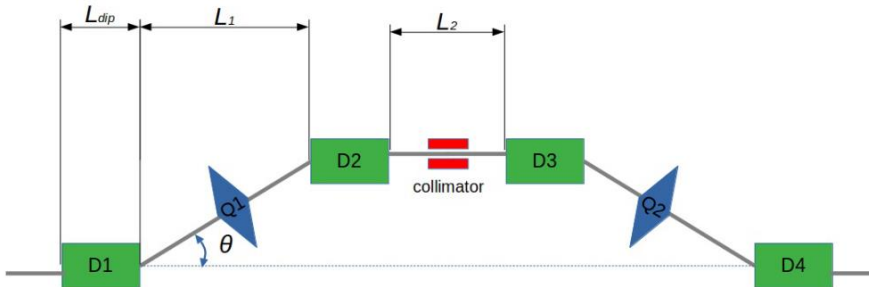
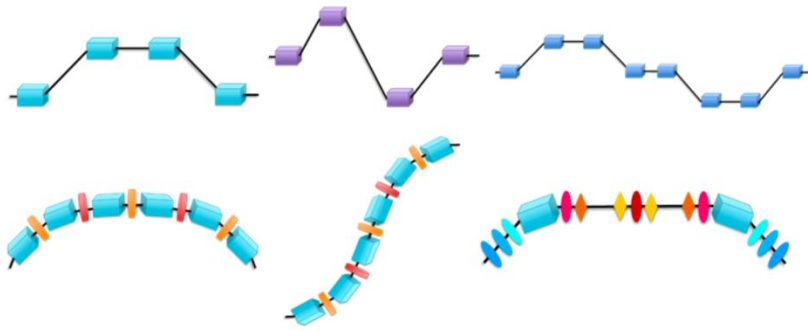
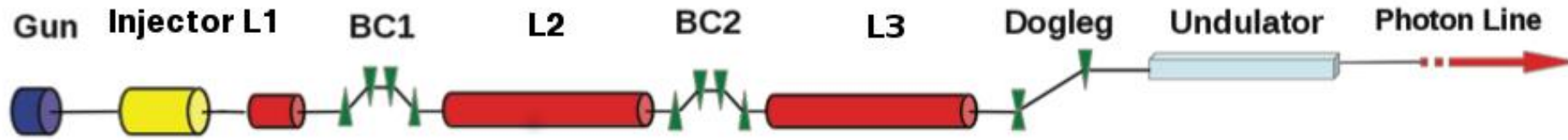


C波段测试平台功率源

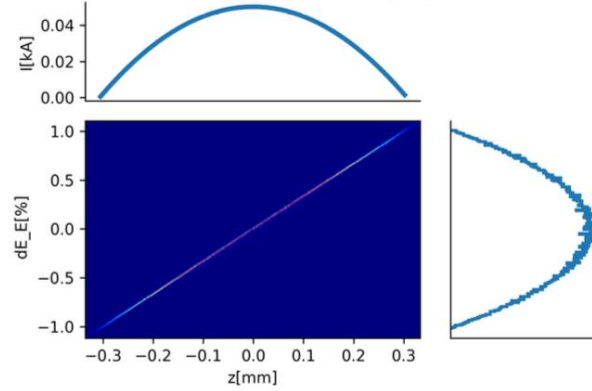
上海软X射线隧道内加速结构



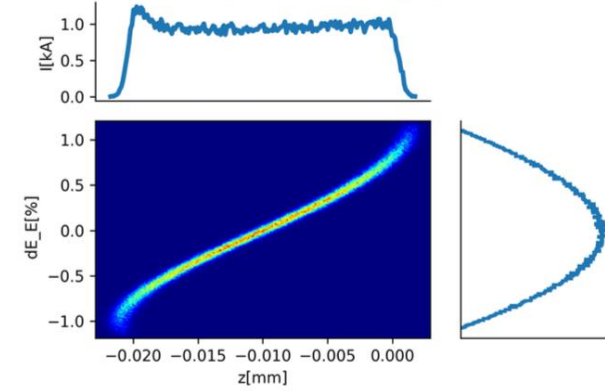
束团压缩



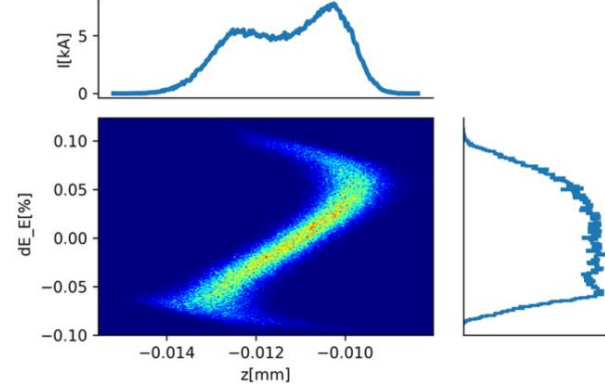
Inj: $E=0.12$ GeV $I_{\text{peak}}=0.05$ kA
 $\sigma_{z}=0.15$ mm $\sigma_{dE_E}=0.50\%$



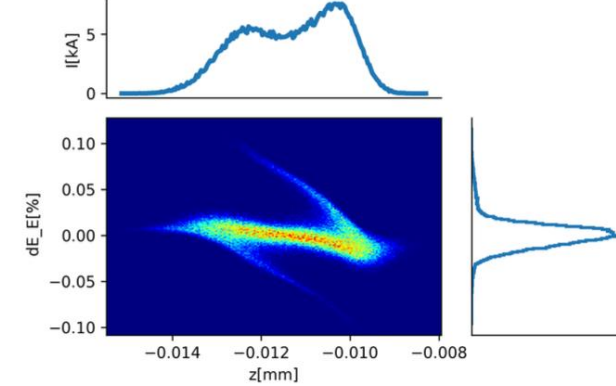
BC1: $E=0.252$ GeV $I_{\text{peak}}=1.24$ kA
 $\sigma_{z}=0.01$ mm $\sigma_{dE_E}=0.53\%$



BC2: $E=3.619$ GeV $I_{\text{peak}}=7.77$ kA
 $\sigma_{z}=0.00$ mm $\sigma_{dE_E}=0.05\%$



HX: $E=5.864$ GeV $I_{\text{peak}}=7.56$ kA
 $\sigma_{z}=0.00$ mm $\sigma_{dE_E}=0.02\%$



Following an electron bunch for free electron laser(LBNL)

What is an X-ray Free Electron Laser or XFEL? (SLAC)



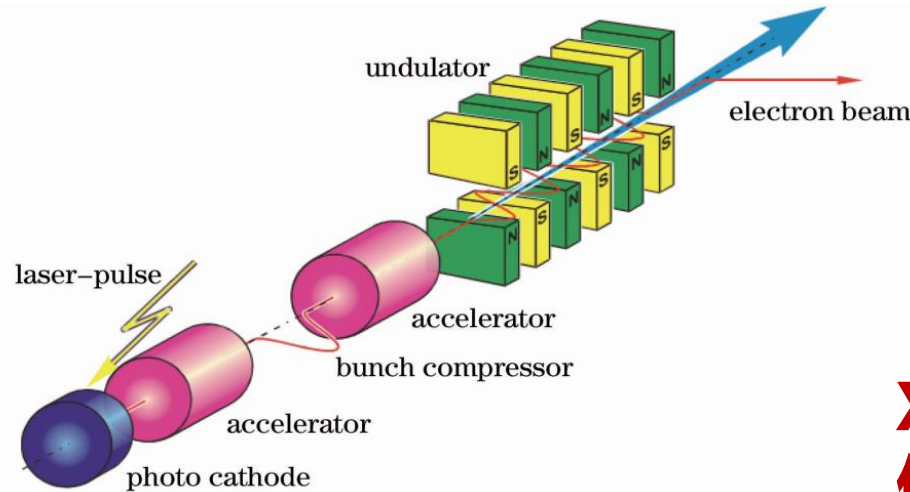
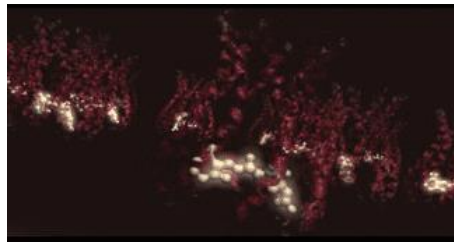
WHAT IS AN

XFEL



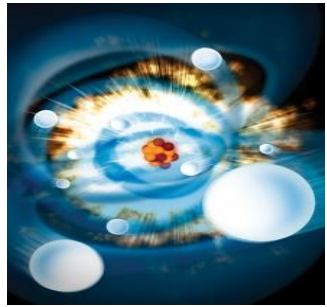
Location	Facility name	Photon energy (keV)	Pulse length ^a (fs)	Pulse energy ^b (mJ)	Repetition rate (Hz)	Flux (ph s ⁻¹) ^f	Start of operation
Japan	SACLA BL2,3	4–20	2–10	0.1–1	60	$2\text{--}9 \times 10^{13}$	2011
	SACLA BL1	0.04–0.15	60	0.1	60	$3\text{--}9 \times 10^{14}$	2015
Italy	FERMI FEL-1	0.01–0.06	40–90	0.08–0.2	10 (50)	$1\text{--}6 \times 10^{15}$	2010
	FERMI FEL-2	0.06–0.3	20–50	0.01–0.1	10 (50)	$1\text{--}5 \times 10^{14}$	2012
Germany	FLASH1	0.02–0.3	50–200	0.03–0.5	$(1\text{--}800) \times 10^e$	$0.08\text{--}1 \times 10^{18}$	2005
	FLASH2	0.01–0.3	50–200	0.03–0.3	$(1\text{--}800) \times 10$	$0.05\text{--}2 \times 10^{18}$	2015
Korea	PAL-XFEL	2.5–15	5–50	0.8–1.5	60	$0.4\text{--}2 \times 10^{14}$	2016
		0.25–1.2	5–50	0.2	60	$0.6\text{--}3 \times 10^{14}$	2016
Switzerland	SwissFEL	1.8–12.4	10–70	1	100	$0.5\text{--}3 \times 10^{14}$	2017
		0.2–2	10–70	1	100	$0.3\text{--}3 \times 10^{15}$	2021
Germany	European XFEL-SASE1,2	3–25	10–100	2	$2,700 \times 10^d$	$0.1\text{--}1 \times 10^{17}$	2017
	European XFEL-SASE3	0.2–3	10–100	2	$2,700 \times 10$	$0.1\text{--}2 \times 10^{18}$	2017
USA	LCLS	0.3–12	2–500	2–4	120	$0.03\text{--}1 \times 10^{16}$	2009
	LCLS-II	1–25	10–100	2–4	120	$0.1\text{--}3 \times 10^{15}$	2022 ^e
	LCLS-II	0.2–5	10–200	0.02–1	10^6	$0.04\text{--}1 \times 10^{19}$	2022 ^e
	LCLS-II-HE	0.2–13	10–200	0.02–1	10^6	$0.01\text{--}1 \times 10^{19}$	2026 ^e

自由电子激光在基础研究中的应用



- 超快时间分辨：飞秒
- 超高空间分辨：埃
- 超强峰值亮度： 10^{33}

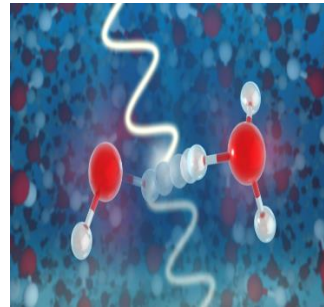
X射线自由电子激光的出现，促进了多个学科前沿的发展。



Nature 2010

原子分子

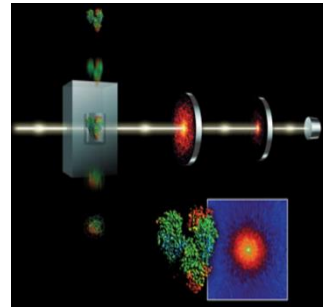
XFEL第一个实验



Science 2020

超快化学

水分子自由基的形成



Science 2018

结构生物学

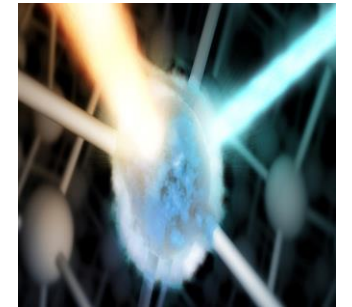
细菌光敏蛋白的变化



Nature 2017

材料科学

冲击波导致晶格错位

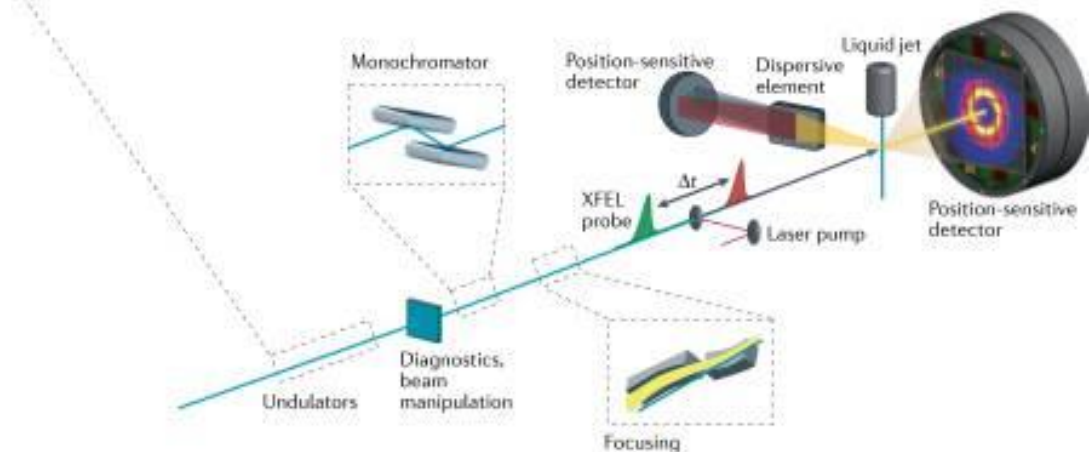
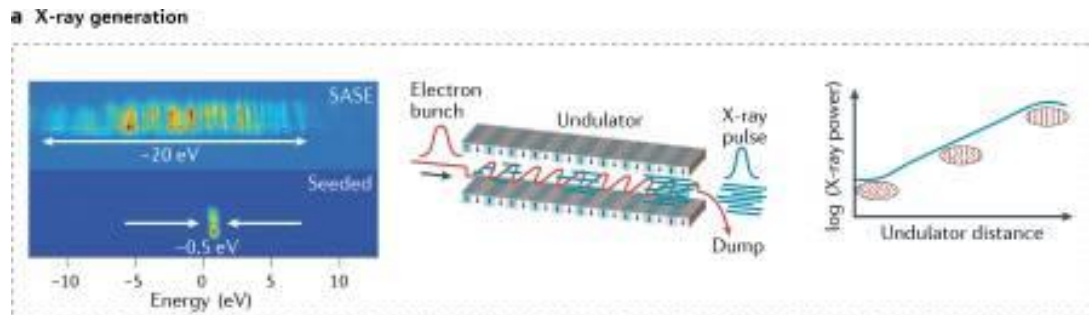


Science 2020

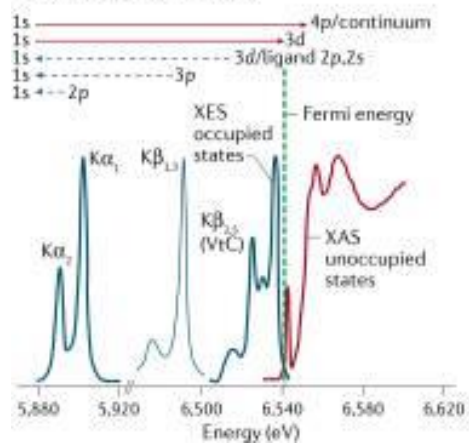
非线性光学

X射线受激拉曼

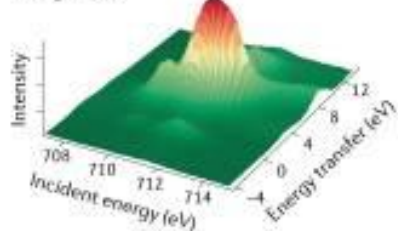
典型的泵浦实验



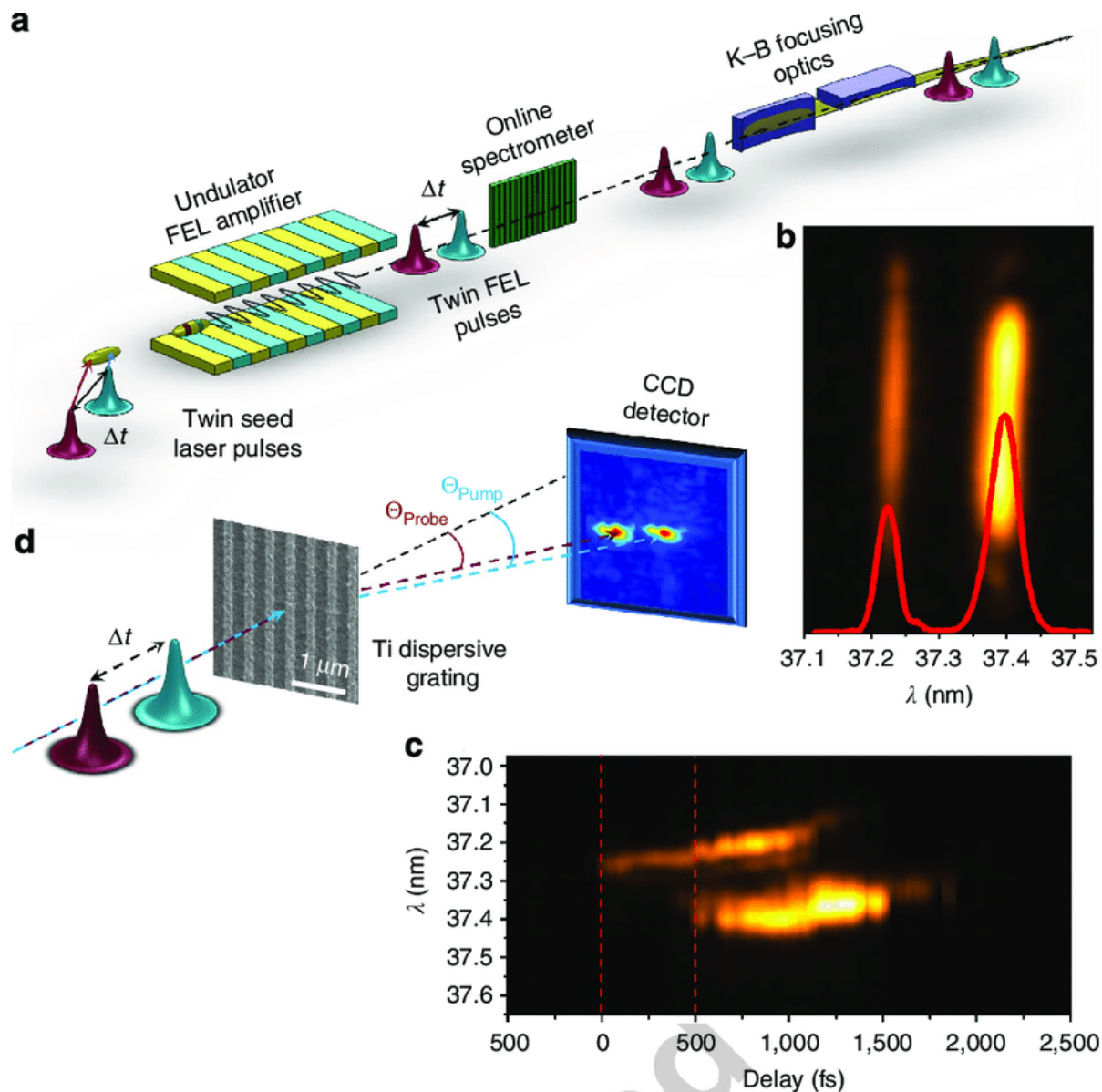
b Hard X-ray spectroscopy



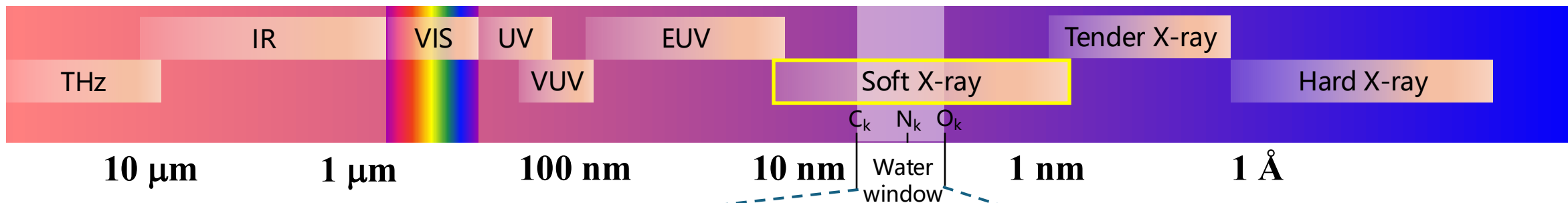
L-edge RIXS



双束泵浦实验



上海SXFEL装置科学及工业应用



物质科学研究

超快物理化学

Energy-momentum plots for various materials: Gold (导体), MoSe_2 (半导体), Bi_{2212} (超导体), Graphene (二维材料), and Bi_2Se_3 (拓扑绝缘体). The relationship $\epsilon_k = c^2/k$ is noted. A band structure diagram is also shown.

生命科学研究

利用“水窗”波段 (2.3-4.4 nm) 的软X射线进行生物样品成像具有最好的衬度

Graph showing Attenuation length [μm] vs Wavelength [nm] for Water and Protein. The 'Water window' is highlighted between approximately 2.3 and 4.4 nm. A micrograph (a) shows a biological sample with a $5\ \mu\text{m}$ scale bar.

工业应用研究

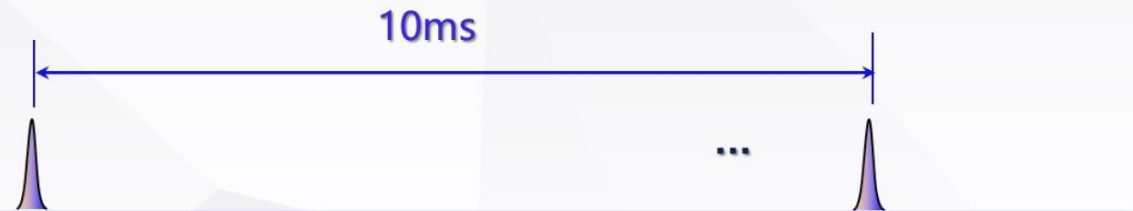
EUV及BEUV镀膜材料损伤阈值、反射率map和消相干技术等

Graph showing reflectance vs Wavelength (nm) for 200, 100, and 50 periods. The bandwidth is noted as $<1\%$. A photograph shows a large circular mirror component.

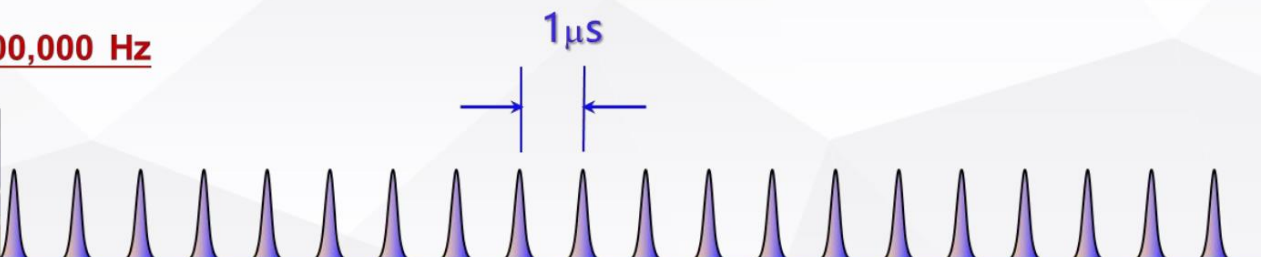
深圳S³FEL装置 (在建)

- 超导软X射线自由电子激光
- 2023年启动建设

低重复频率
自由电子激光 100 Hz



高重复频率
自由电子激光 1,000,000 Hz

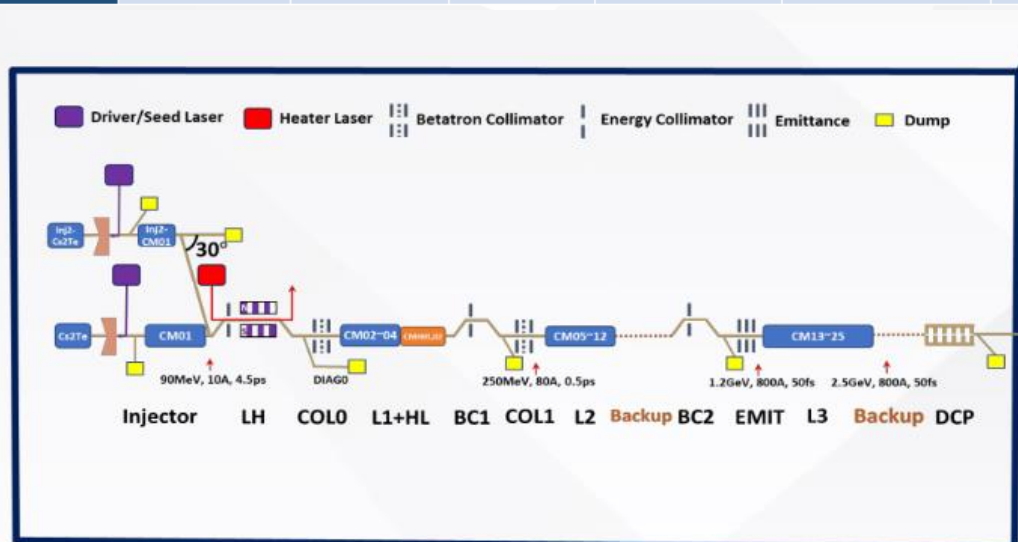


预览图

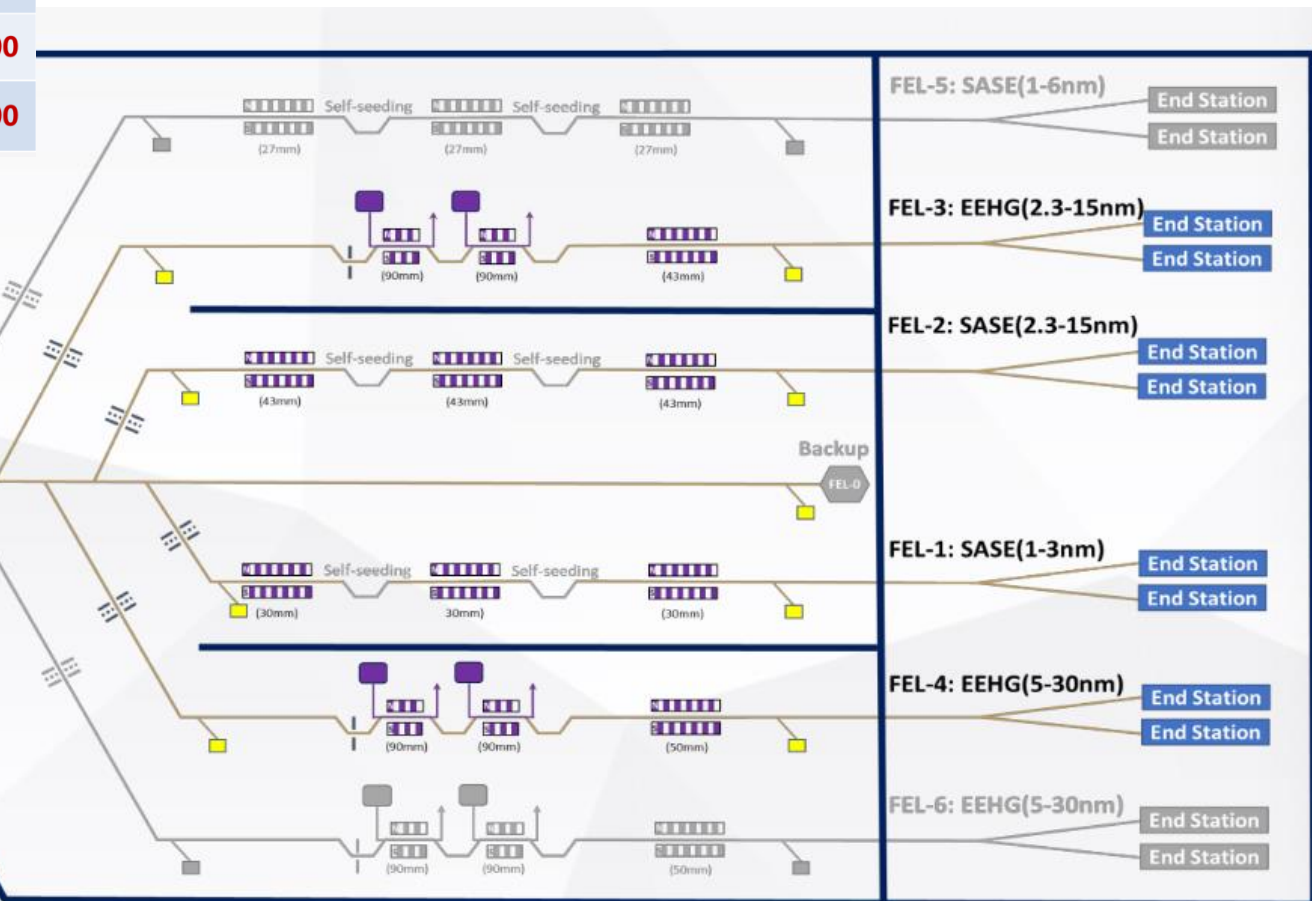


深圳综合粒子研究院

装置名称	优势波段	所属国家	加速器类型	电子束能量 /GeV	光子能量	重复频率 /Hz
European XFEL	硬X射线	欧盟	超导 SRF	17.5	8.4-30 keV	27,000
FLASH	软X射线	德国	超导 SRF	1.25	14-300 eV	5,000
LCLS-II	硬X射线	美国	超导 SRF	4 (upgrade to 8)	0.2-5 keV	1,000,000
SHINE	硬X射线	中国	超导 SRF	8	0.4-25 keV	1,000,000
本项目 S ³ FEL	软X射线	中国	超导 SRF	2.5	0.04-1keV	1,000,000



加速器



波荡器/FEL

实验线站

Length: 1.6 km

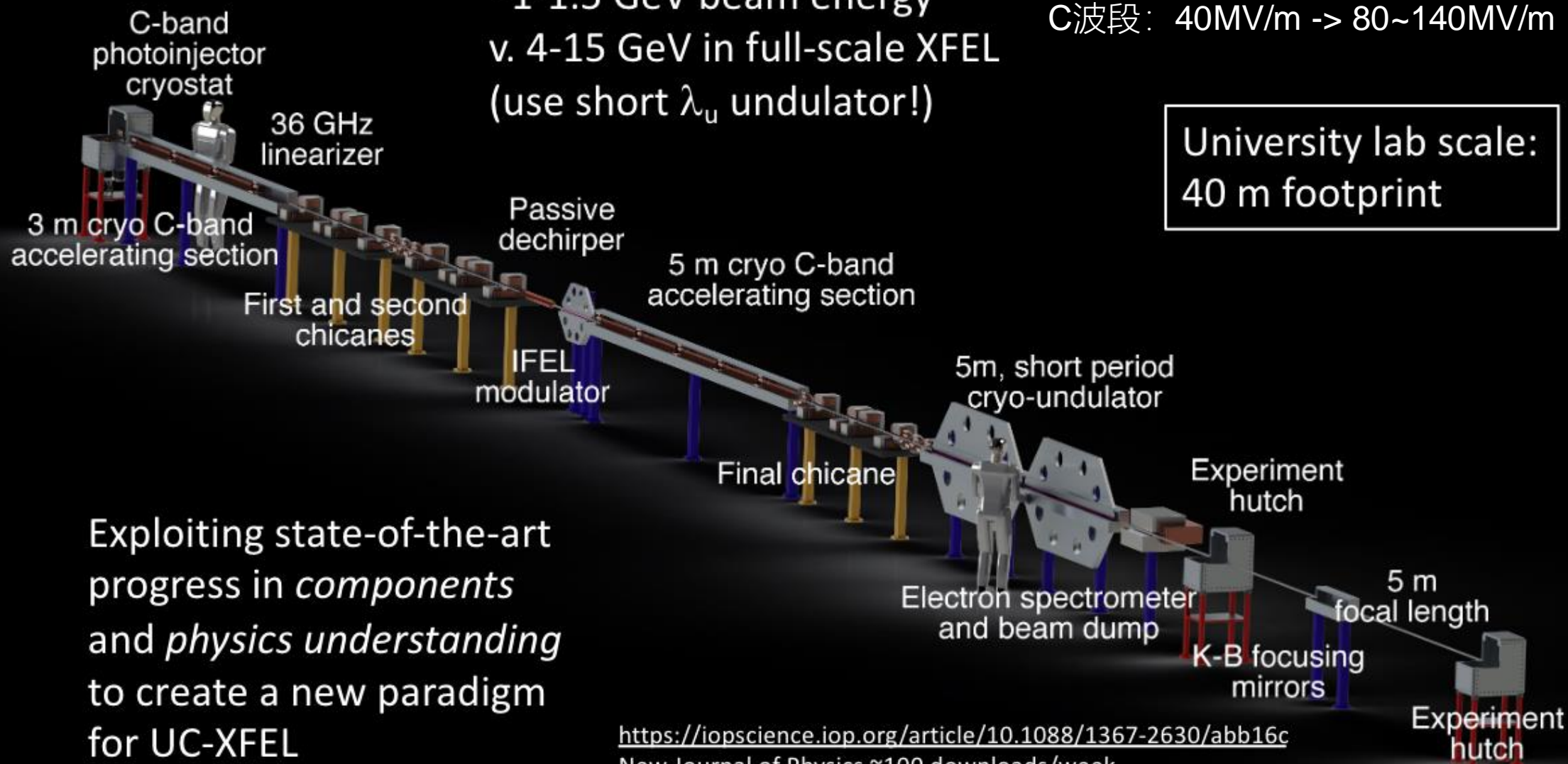
基于低温铜结构的实验室规模XFEL

紧凑

大幅提升加速梯度：
C波段：40MV/m -> 80~140MV/m

~1-1.5 GeV beam energy
v. 4-15 GeV in full-scale XFEL
(use short λ_u undulator!)

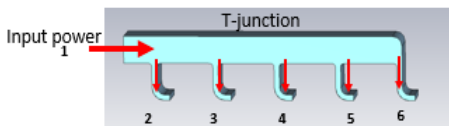
University lab scale:
40 m footprint



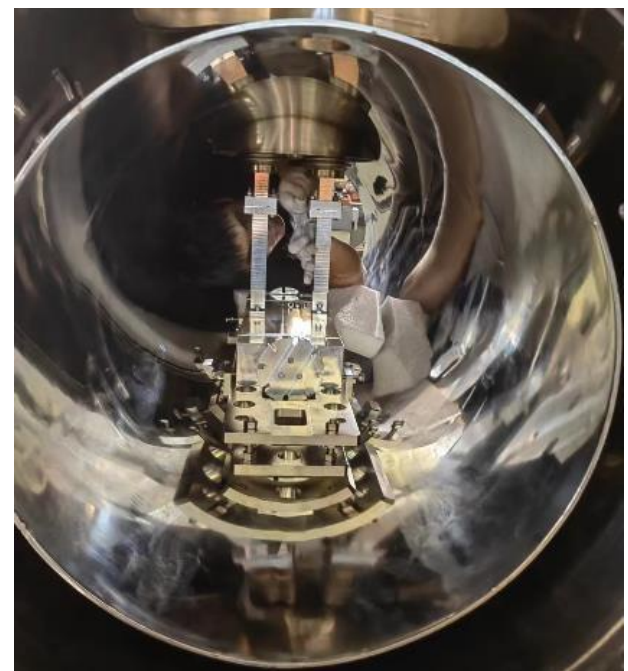
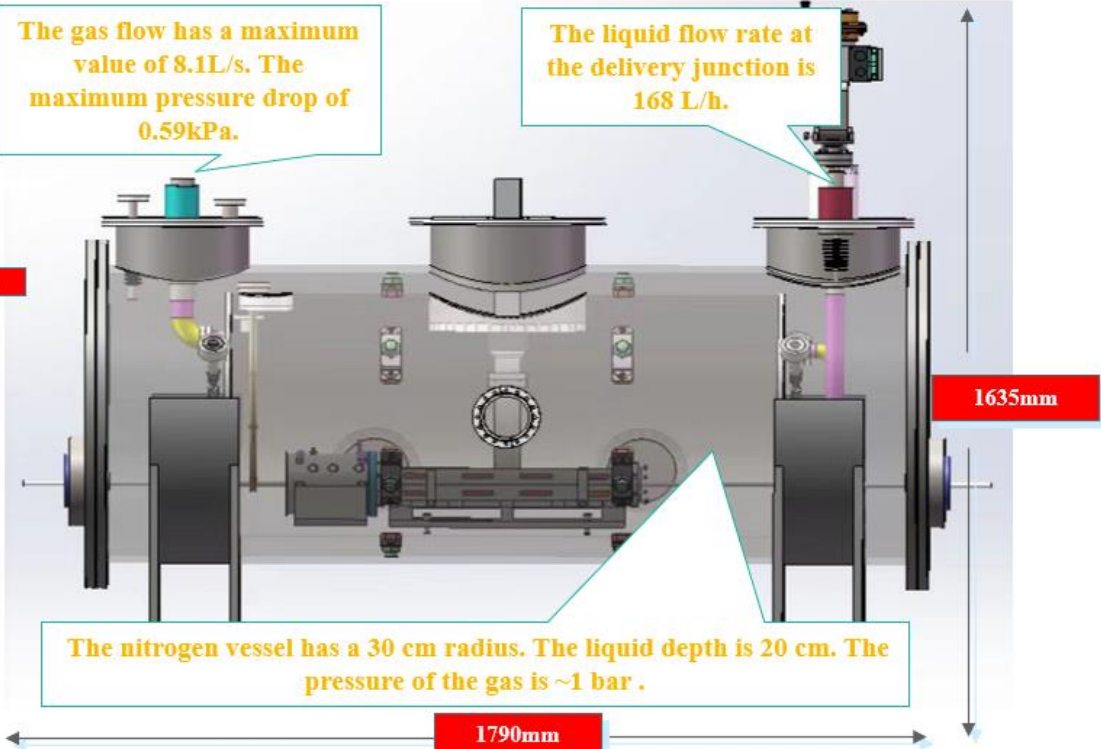
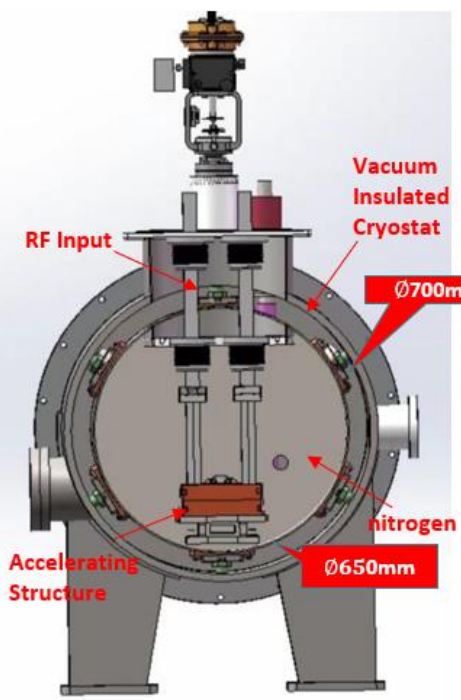
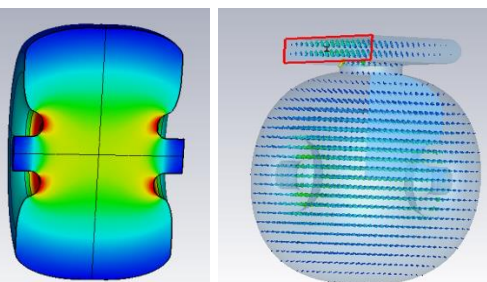
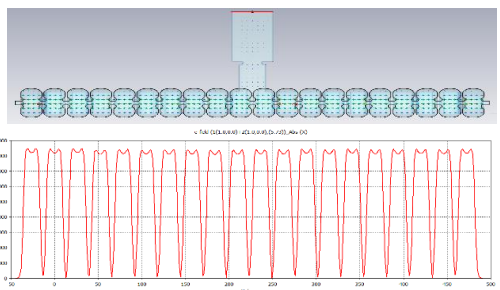
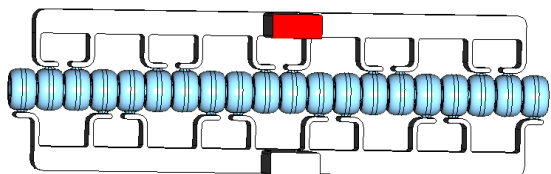
Exploiting state-of-the-art progress in *components* and *physics understanding* to create a new paradigm for UC-XFEL

<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1367-2630/abb16c>
New Journal of Physics ~100 downloads/week

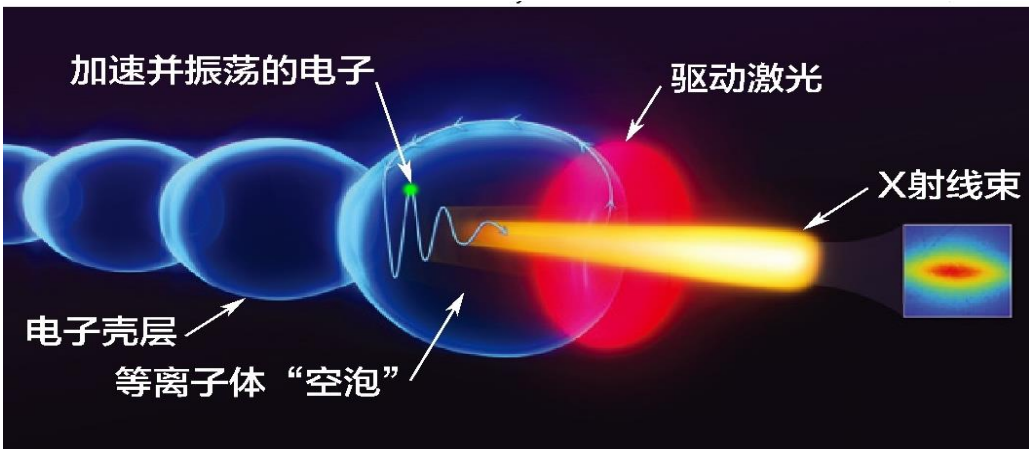
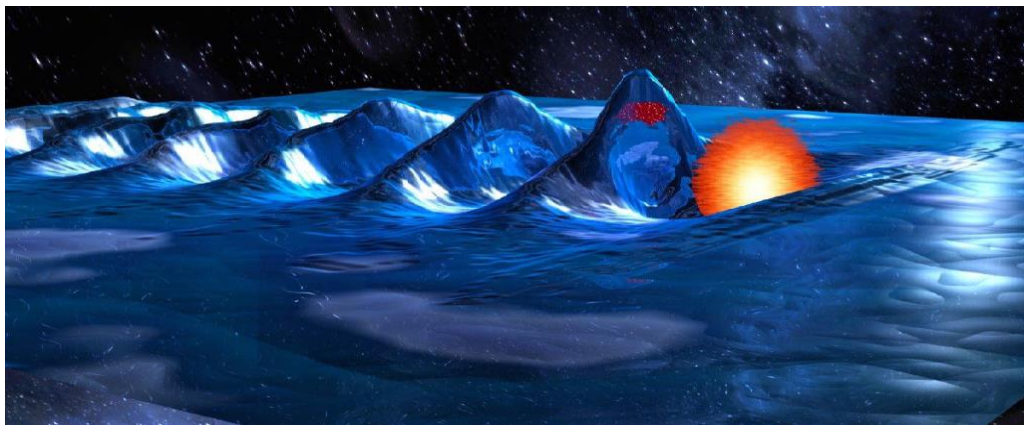
高能所的低温铜研究



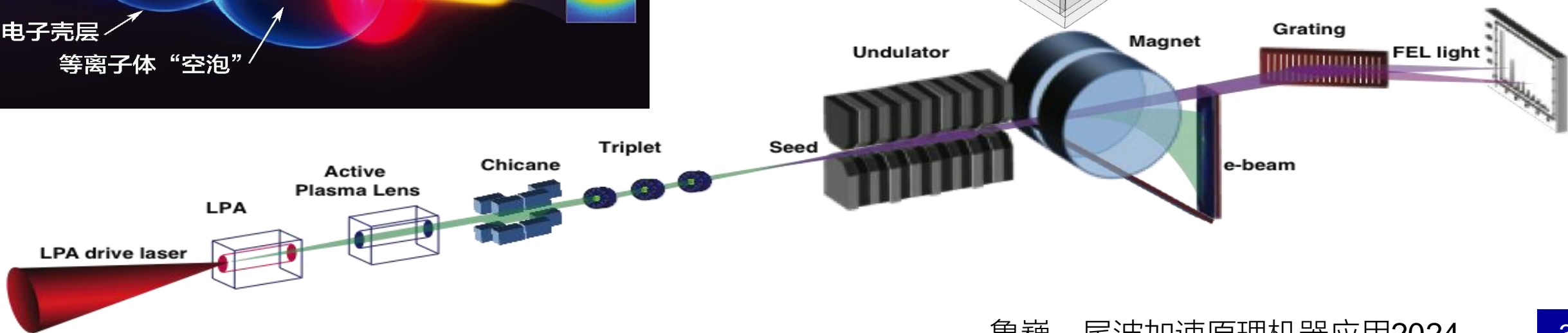
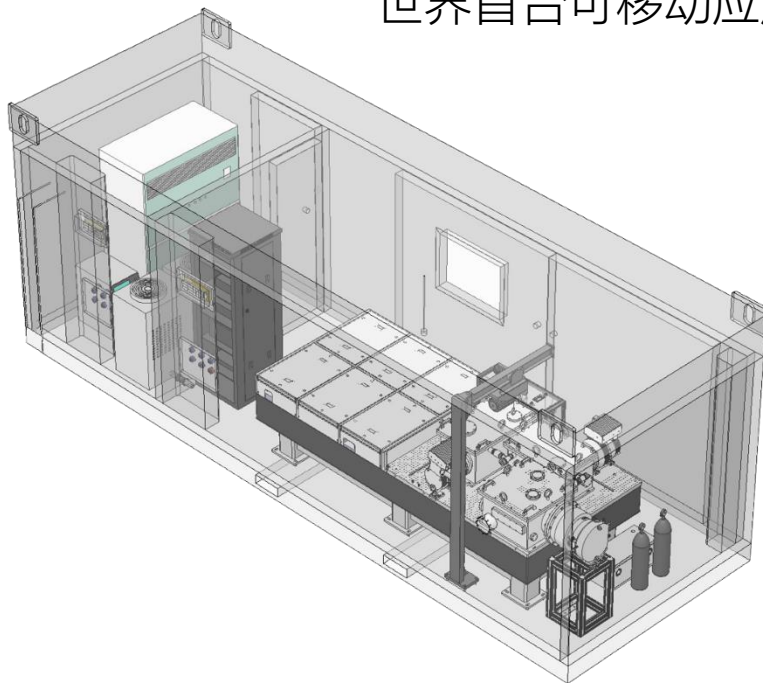
n	S ₁₁ (dB)	S ₁₂ (dB)	S ₁₃ (dB)
5	-20.82785	-0.82785	-7.81755



基于激光尾场加速 (LWFA) 的FEL



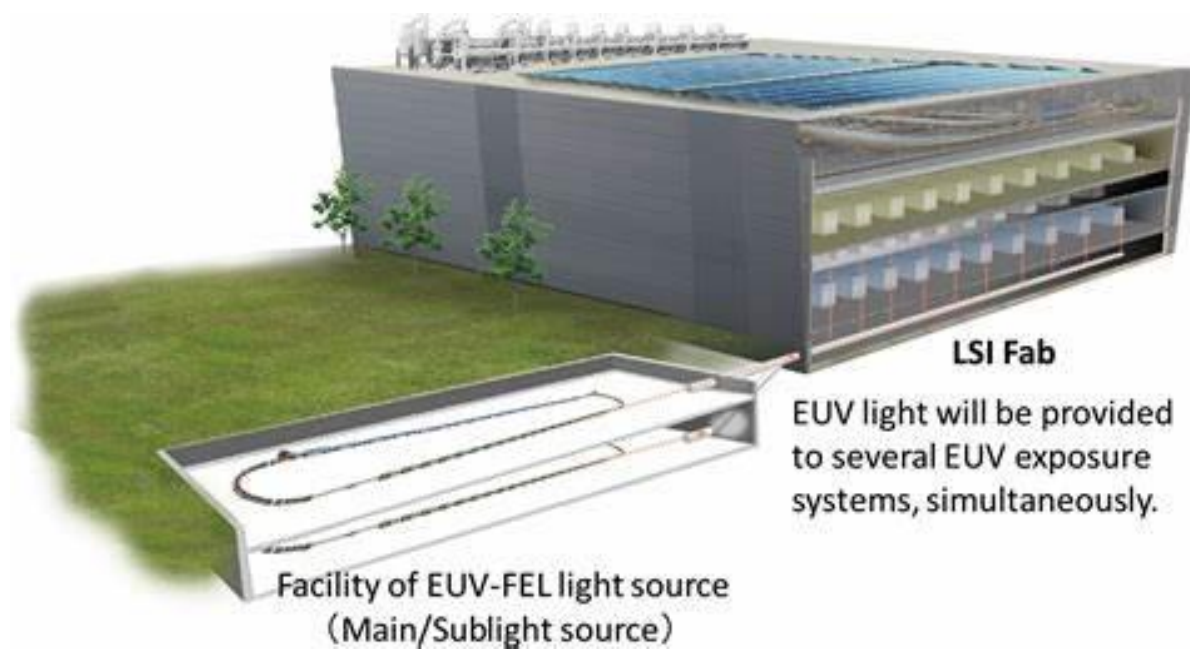
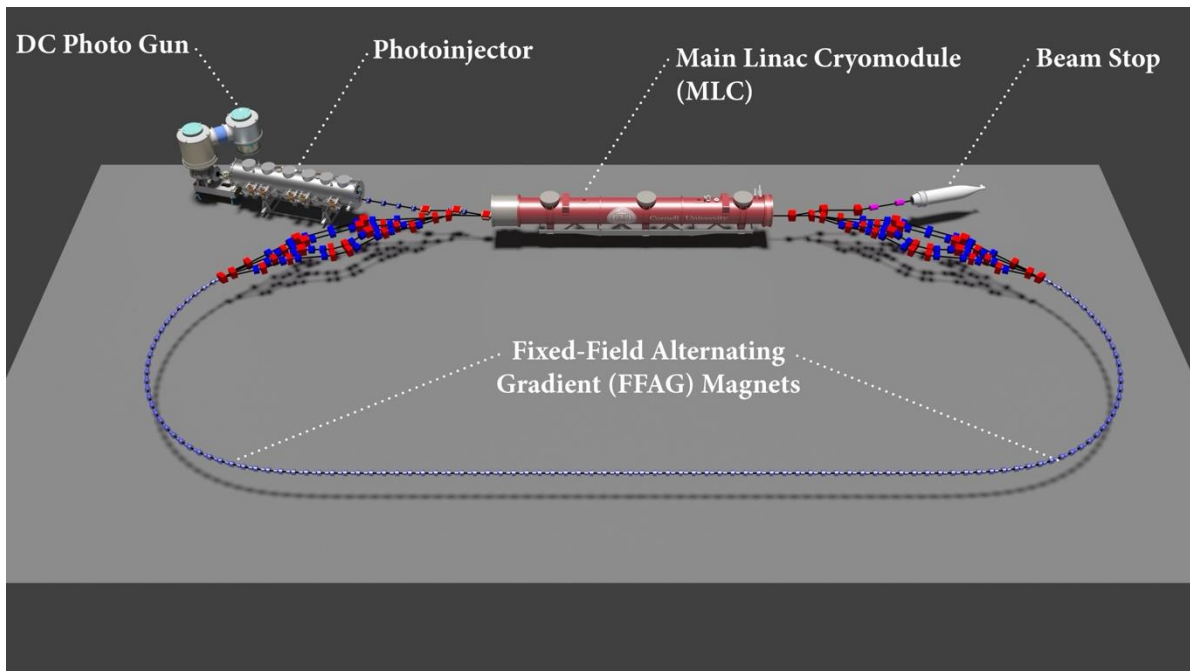
世界首台可移动应用级“激光尾波加速器”



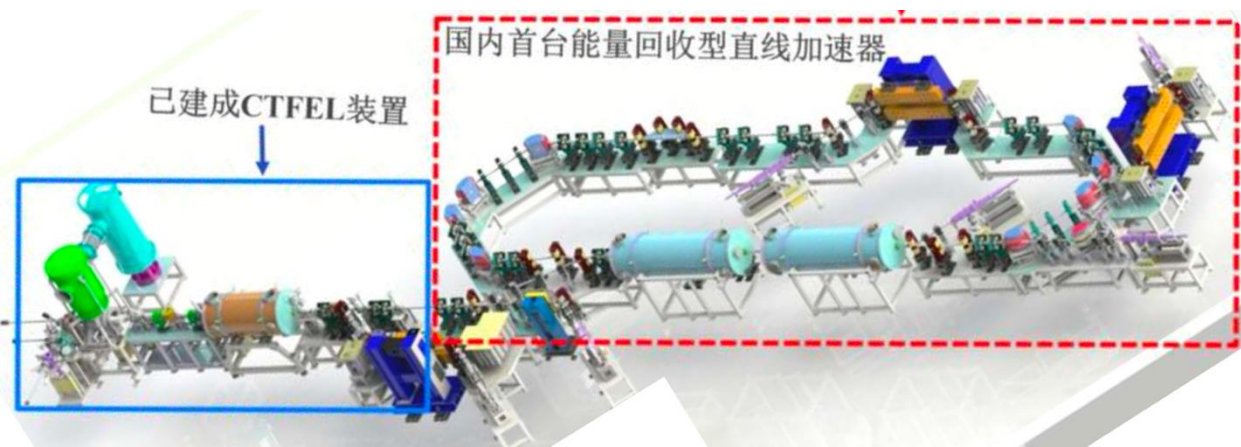
基于能量回收直线加速器 (ERL) 的EUV-FEL

美国CBETA (99.8% @ 2019-06-24)

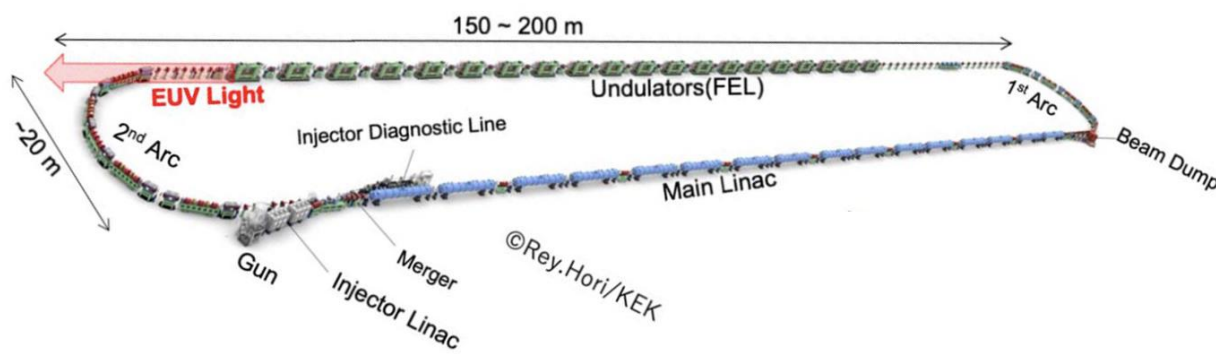
效率



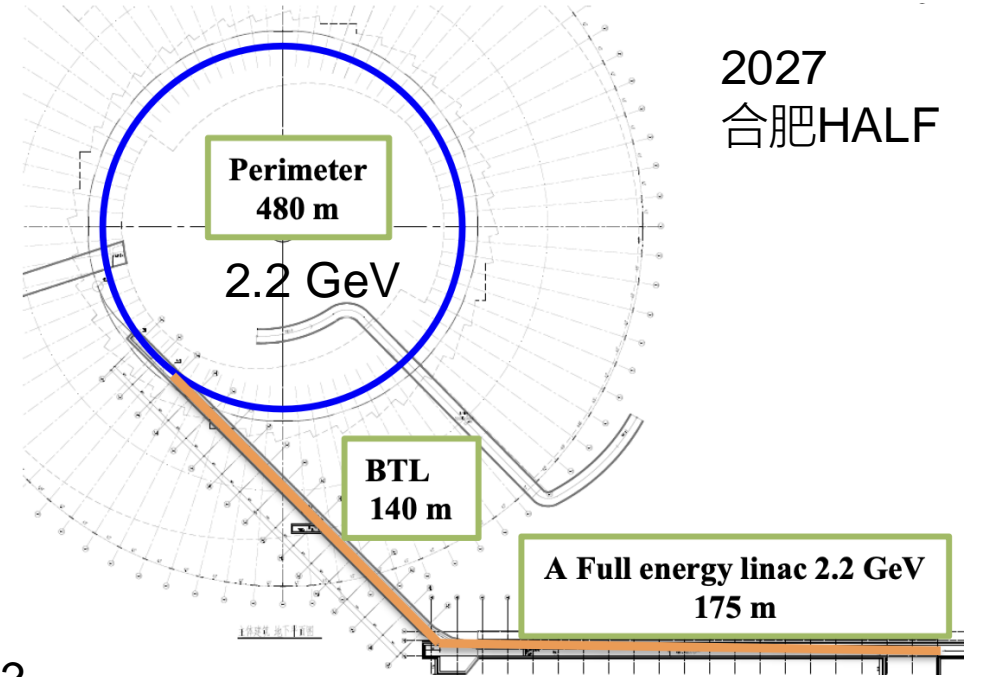
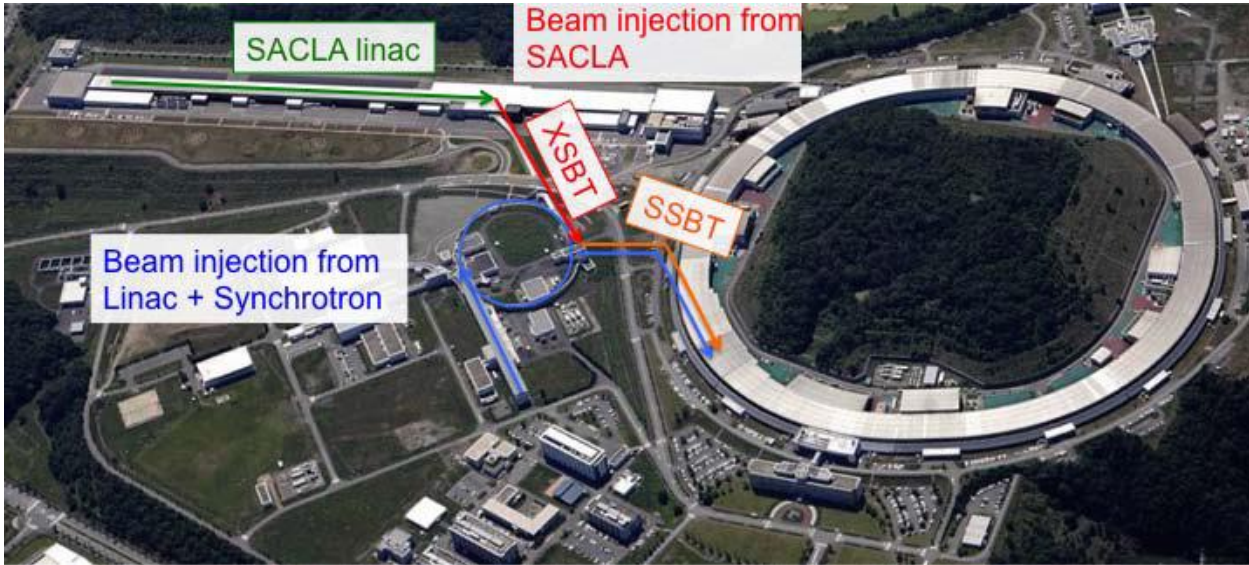
中国工程物理研究院太赫兹设施ERL升级



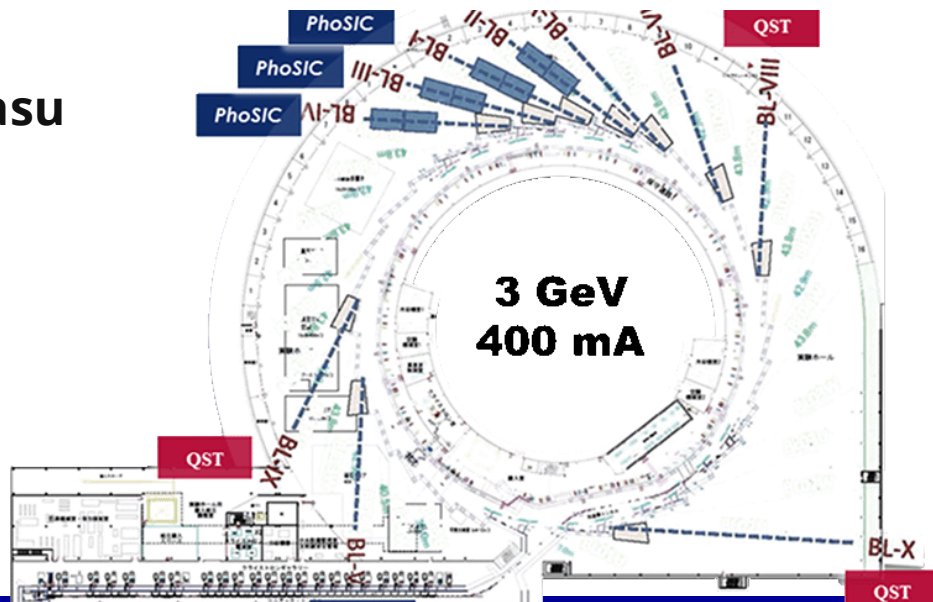
日本KEK的能量回收型直线加速器



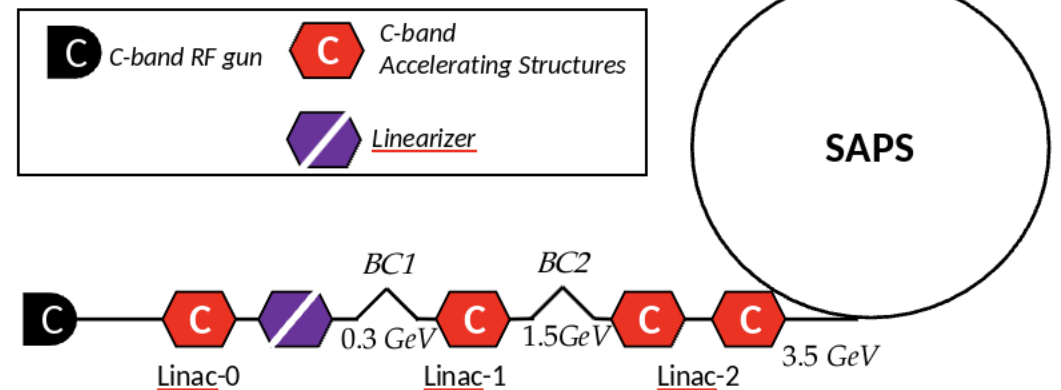
FEL与极限衍射环合二为一



2024
NanoTerasu



202?
南方先进光源SAPS



» 小结与讨论

■自由电子激光与普通激光及同步辐射光源相比具有以下优势：

- 1. **波长可调：**自由电子激光的波长可以通过调整电子束的能量或者磁铁结构的参数来灵活调整，覆盖从微波到X射线的广泛波长范围，而普通激光和同步辐射光源的波长相对固定。
- 2. **高亮度：**自由电子激光能产生非常高亮度的光束，亮度远超过传统的激光和同步辐射光源，使其在探测和成像等应用中具有显著优势。
- 3. **高峰值功率：**自由电子激光能够产生极高峰值功率的脉冲光，这对于研究超快过程和非线性光学现象等领域非常重要。
- 4. **宽波段覆盖：**自由电子激光能够覆盖从远红外到硬X射线的宽波段范围，而同步辐射光源通常在特定波段内工作，普通激光的波长覆盖范围也较窄。
- 5. **调制灵活：**自由电子激光的脉冲宽度、重复频率等参数可以灵活调制，满足不同实验的需求，而普通激光和同步辐射光源的这些参数较为固定。

■自由电子激光在应用及自身发展上的趋势：

- 1.自由电子激光的应用本身的研究尚处于初期，且当前世界上XFEL设施还较少
- 2.基于新加速原理（低温铜，激光等离子体）等技术的XFEL将大大减少其投入及体积
- 3.基于ERL方向的EUV-FEL是光刻工厂有力的竞争对手