

# 上海加速器光源与质子治疗装置

主讲人：赵振堂

中国科学院上海高等研究院

2023年05月23日

## 大会PPT提示：

- 1、演讲PPT中请勿出现国家领导人照片、头像
- 2、演讲PPT中请勿出现国家地图
- 3、演讲ppt中请勿使用包括国旗国徽、党旗党徽、天安门等国家象征

# 目录

## CONTENT

01. 加速器X射线光源

02. 上海同步辐射光源

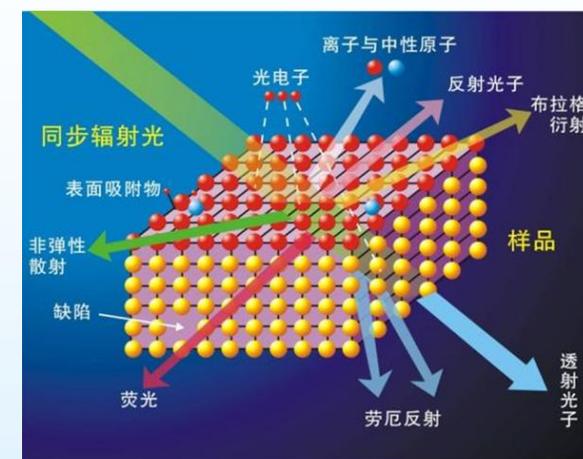
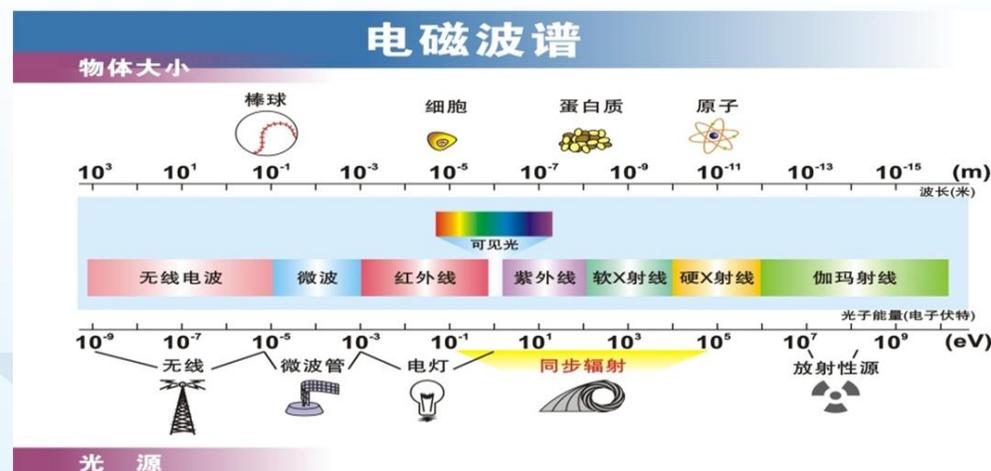
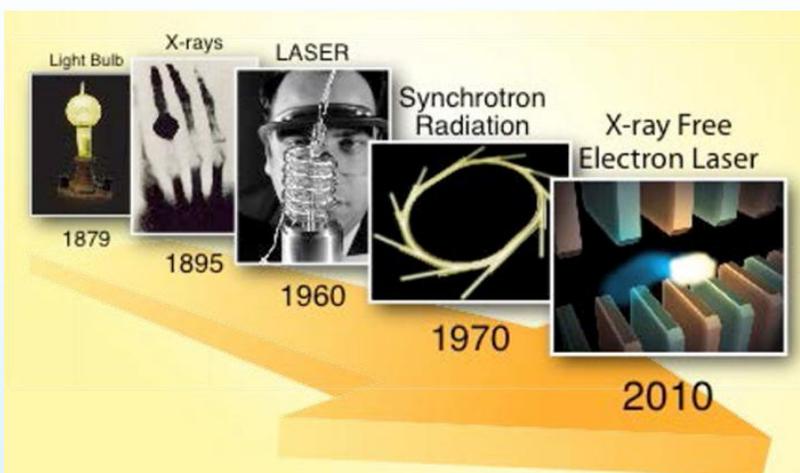
03. 上海X射线自由电子激光

04. 上海质子治疗装置

# 加速器光源概述

# X射线光源：人类探索物质世界最重要的工具

- 1895 -X射线：对物质结构的认识深入到原子水平。
- 1960 -激光：改变了20世纪科学与技术发展的模式。
- 1974 -同步辐射：为众多科学领域基础和应用研究提供先进手段。
- 2009 -X射线自由电子激光：在原子分子水平、动态认知世界。

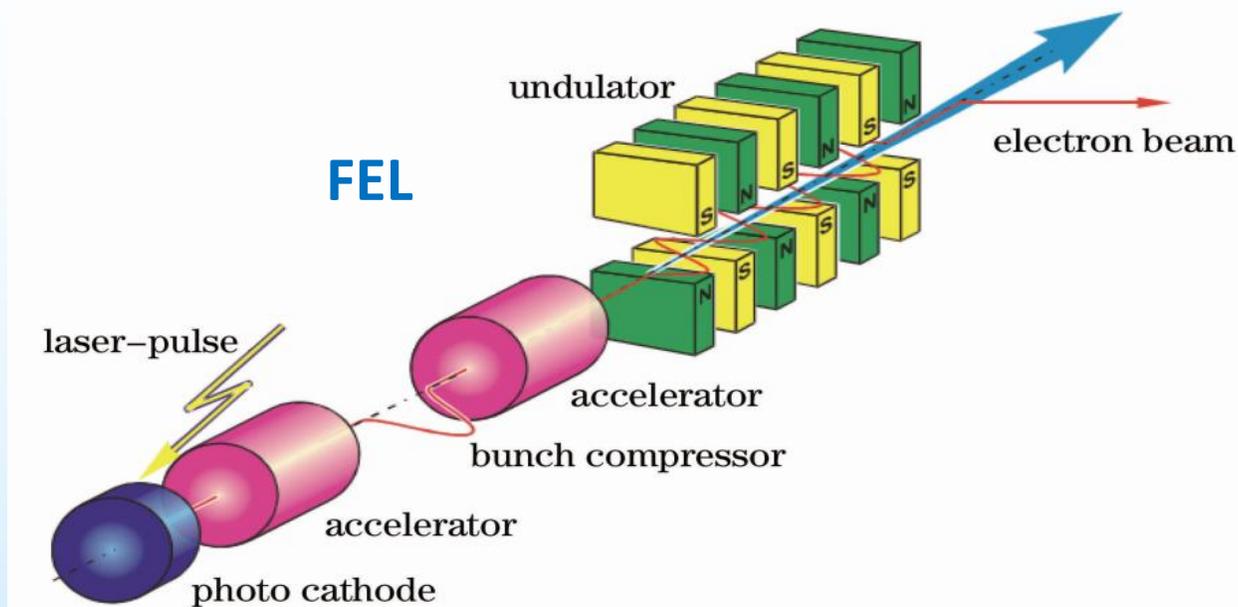
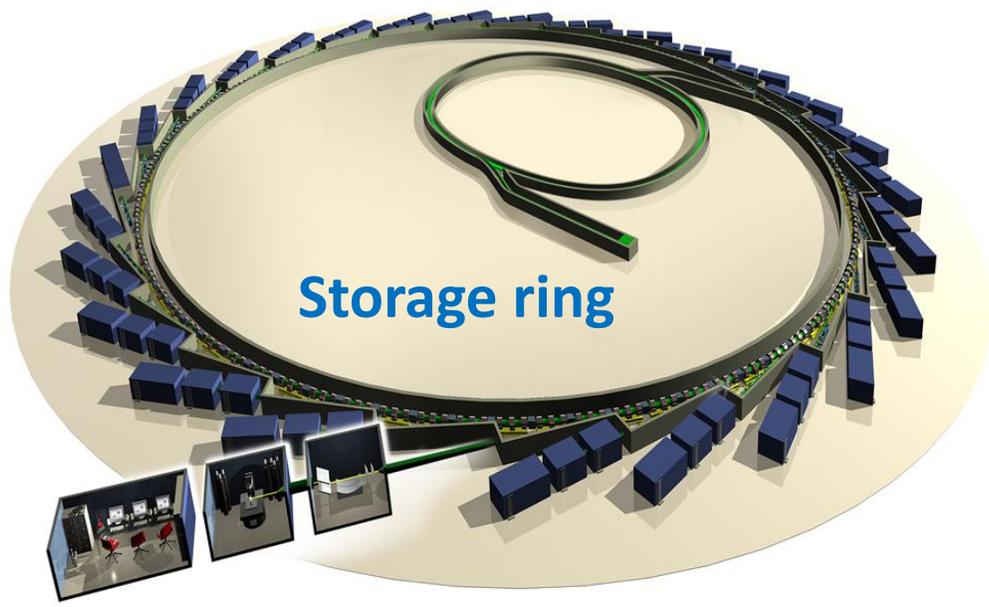


科学家利用同步辐射光与样品的相互作用，探索未知的微观世界

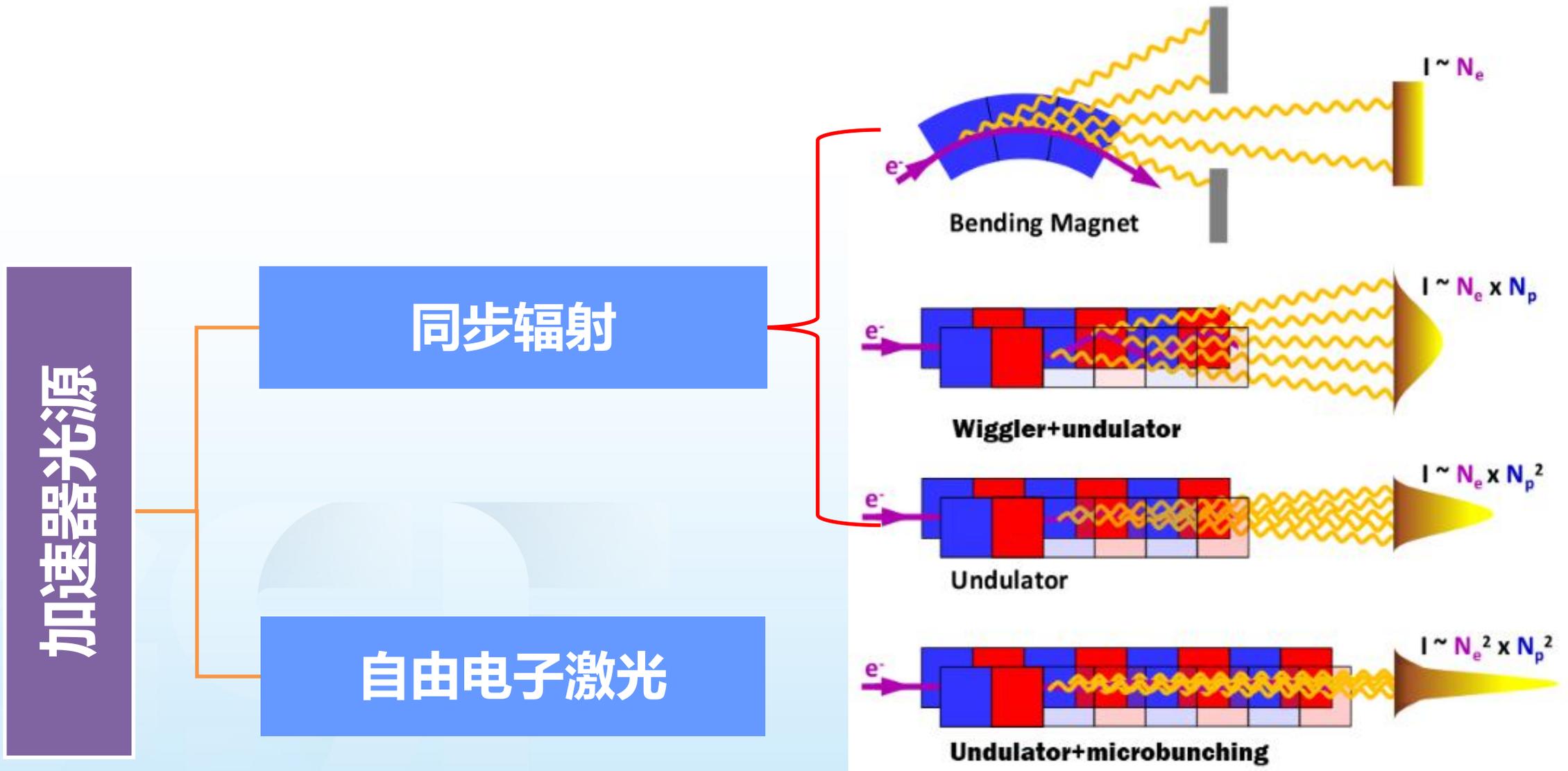
## 加速器X射线光源：同步辐射光源与自由电子激光

# 加速器光源: 高品质的巨型X光机+超级显微镜

- 加速器光源以其高亮度、高准直性、及波长可调等不可替代的优点，成为支撑众多学科前沿基础研究与高新技术研发不可或缺的实验手段。



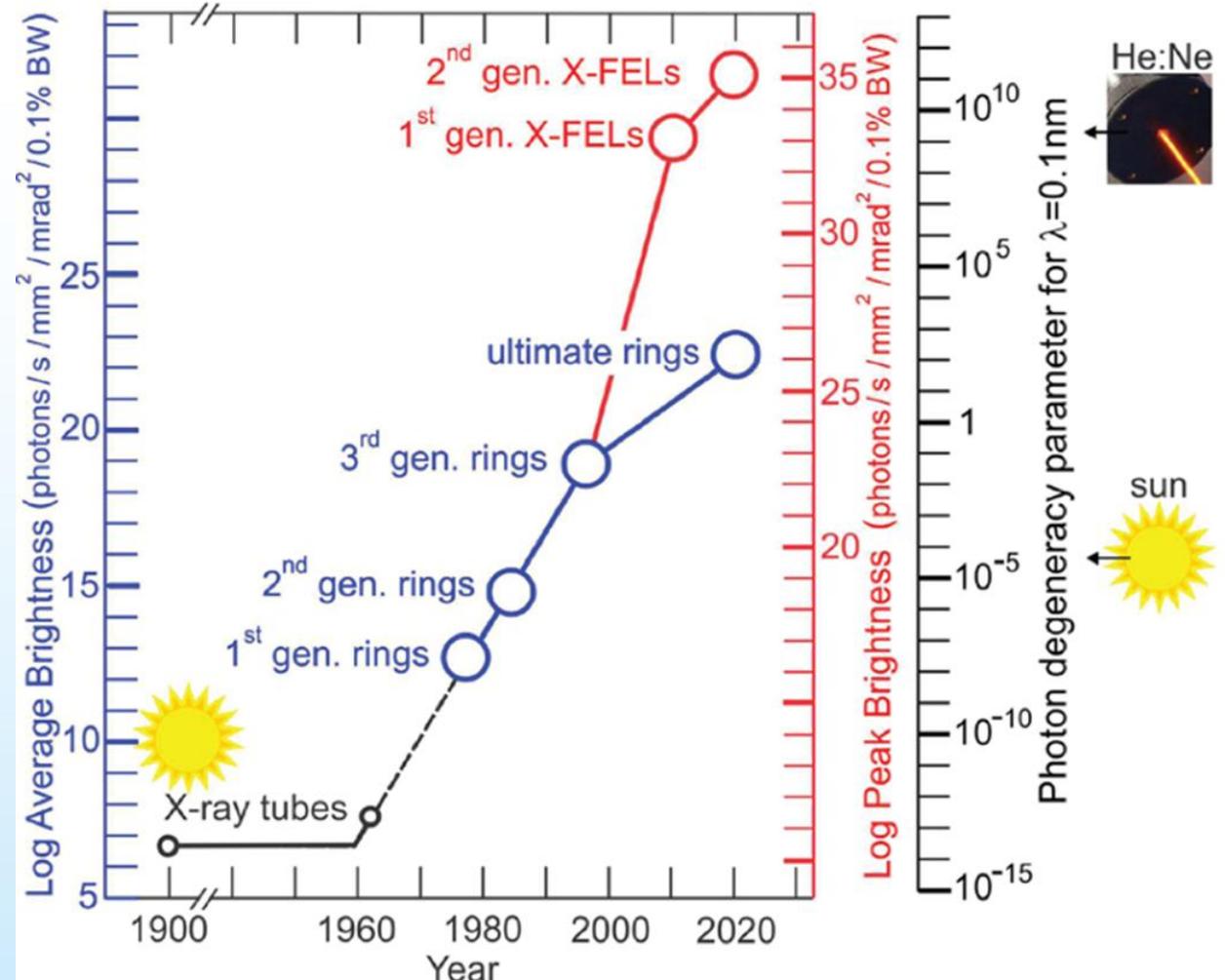
# 同步辐射与自由电子激光的物理机制



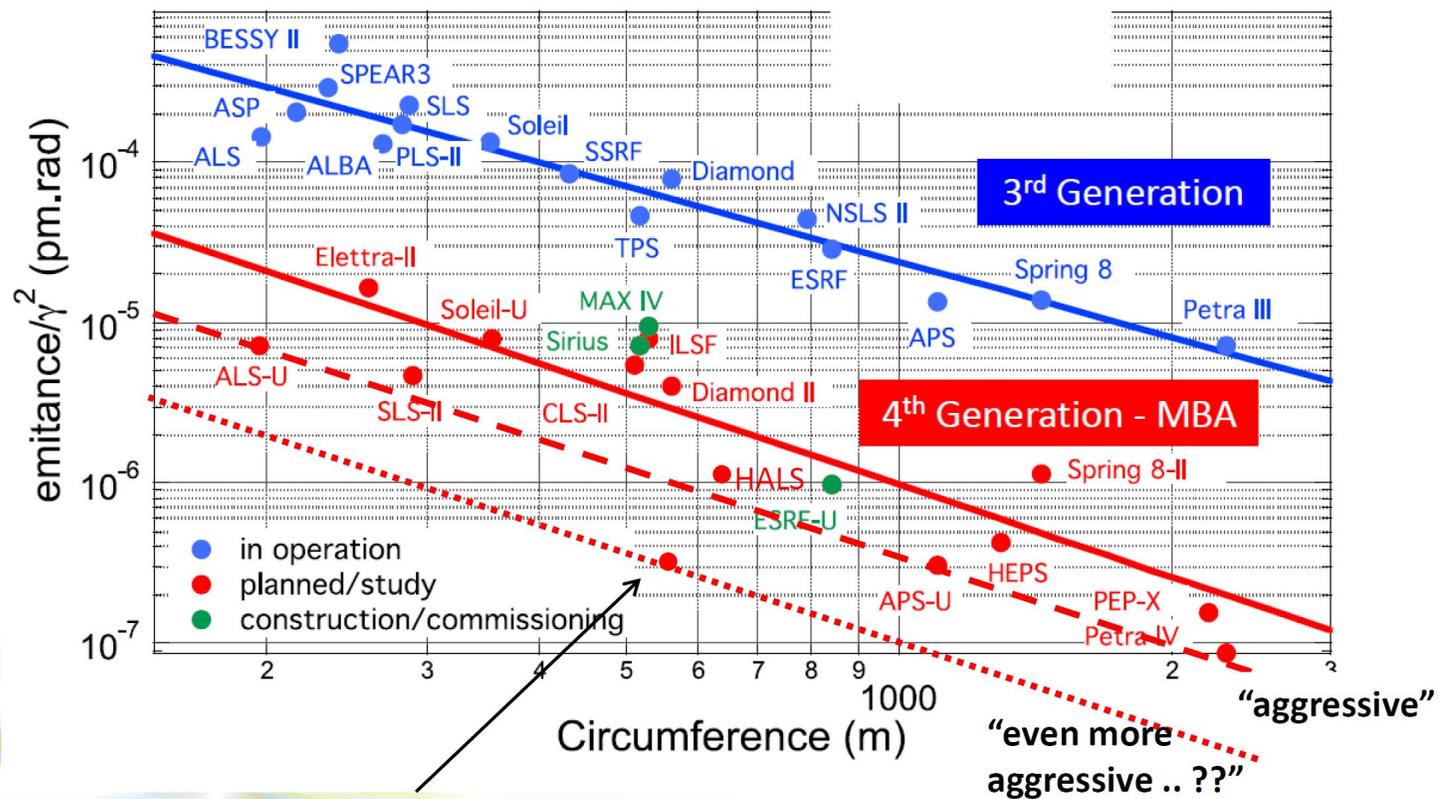
# 同步辐射光源的发展历程

- 同步辐射光源历经三代的发展，目前正处于第四代光源的快速发展过程之中，以MBA聚焦结构为主要特征，相对于第三代，辐射亮度提高50-100倍，相干性大幅度提高。

	典型亮度	特点
第一代	$10^{11} \sim 10^{13}$	寄生于对撞机，以高能物理实验为主，兼用作光源。
第二代	$10^{15} \sim 10^{17}$	针对同步辐射应用设计的专用光源，弯铁辐射为主。
第三代	$10^{18} \sim 10^{20}$	低发射度储存环，以插入件辐射为主的专用光源，装置性能跨越式提高。
第四代	$10^{21} \sim 10^{22}$	储存环束流发射度趋近衍射极限，辐射亮度和相干性大幅度提高。



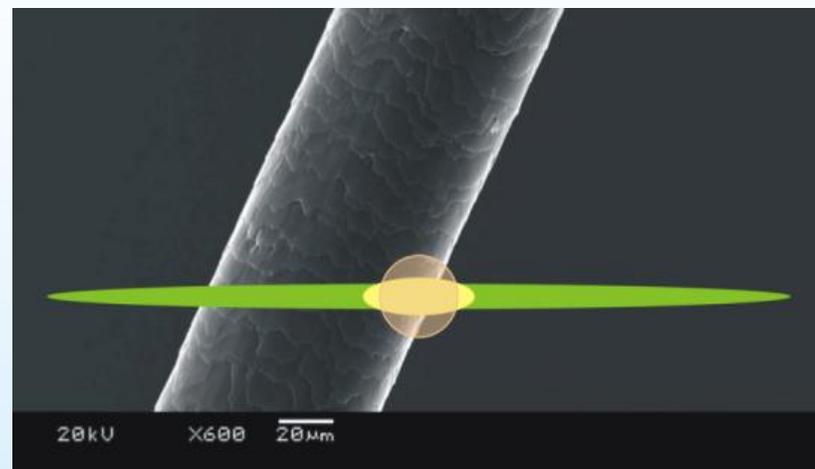
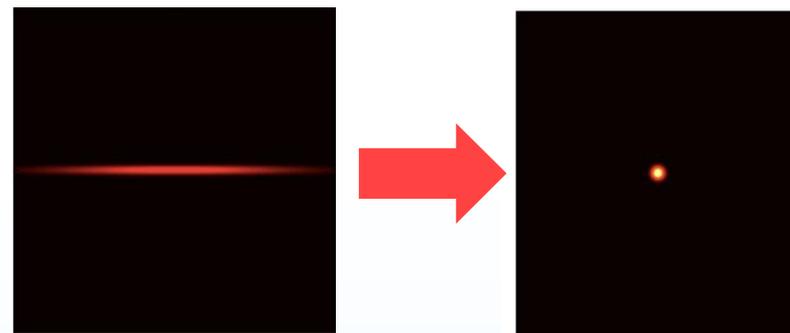
# 第三代与第四代同步辐射光源的性能特点



10 pm at 3 GeV in 550m ?

Courtesy of R. Bartolini

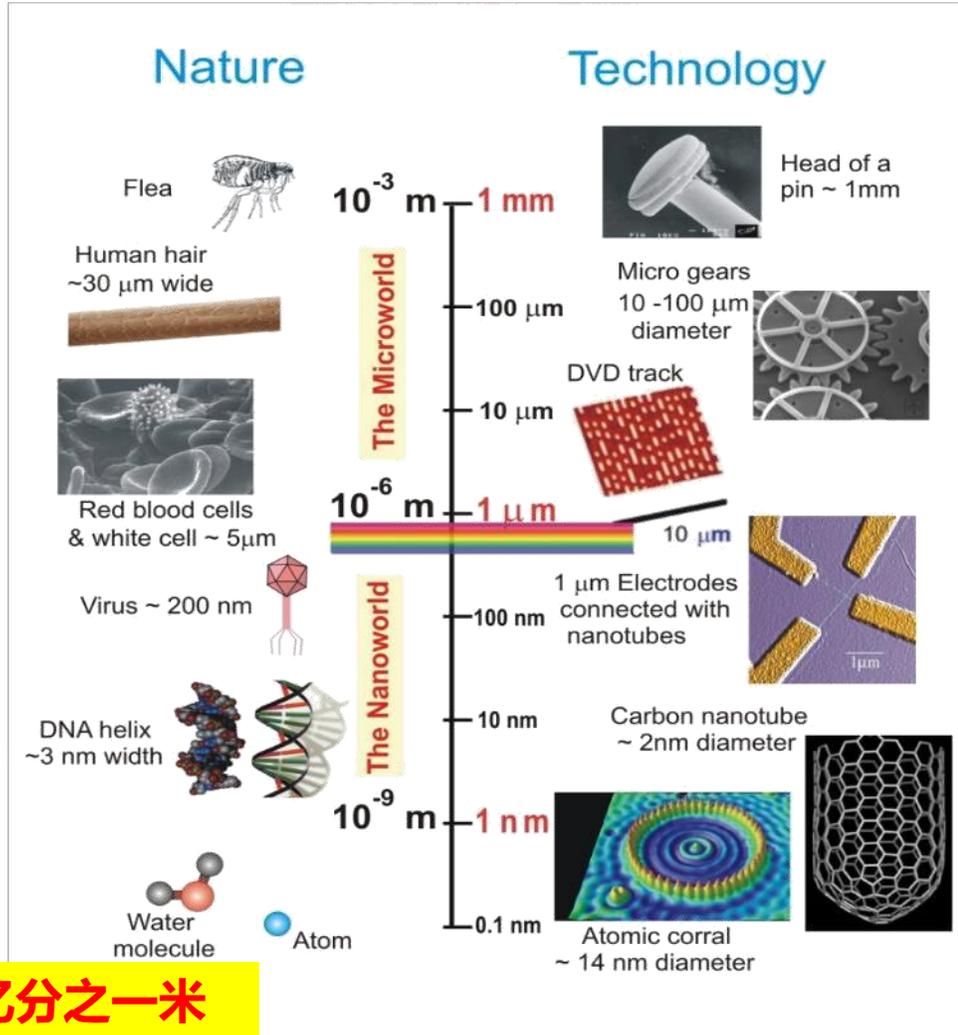
第三代与四代同步辐射光源发射度比较



第三代与四代同步辐射光源光斑比较

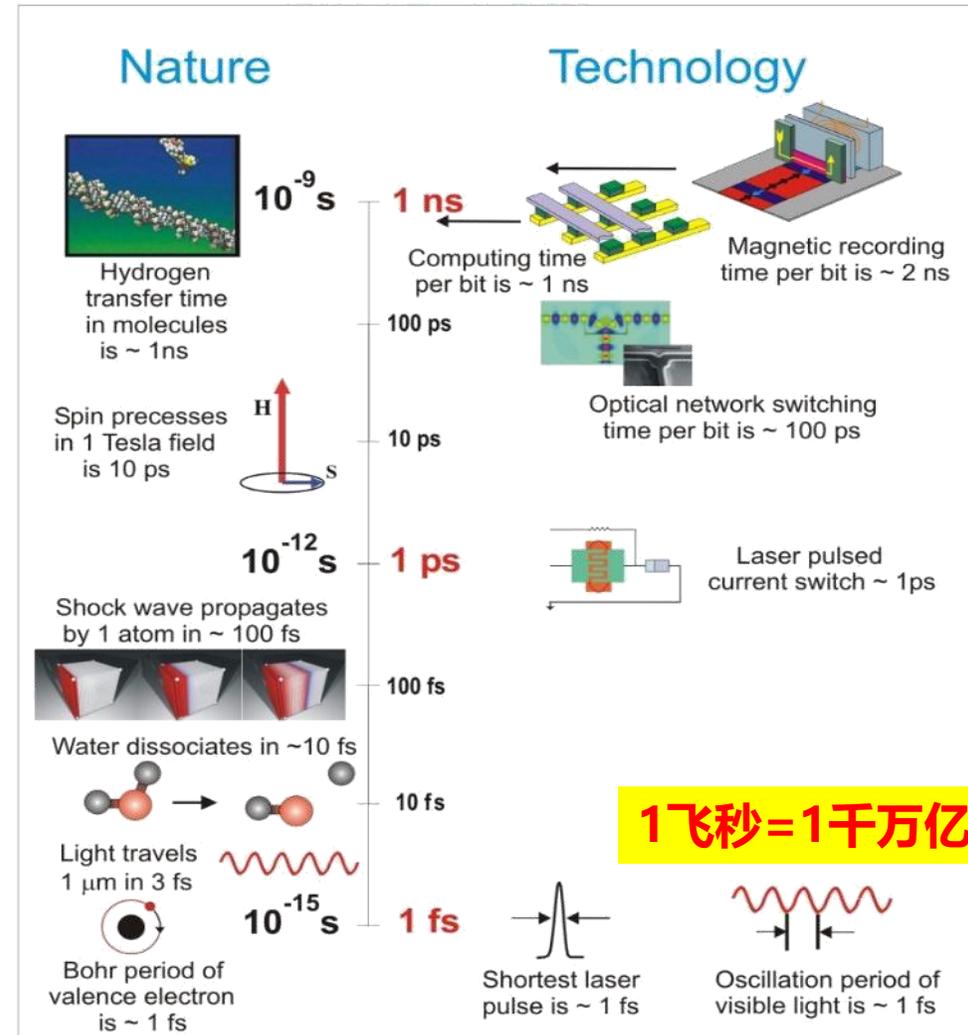
# 科学研究进入超小（纳米）超快（飞秒）的新时代

## Ultra-Small



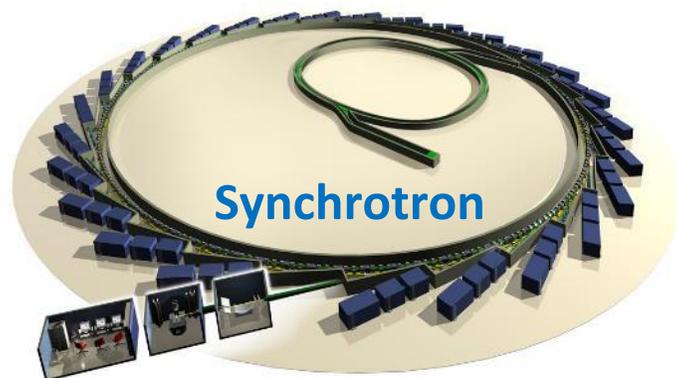
1纳米=10亿分之一米

## Ultra-Fast

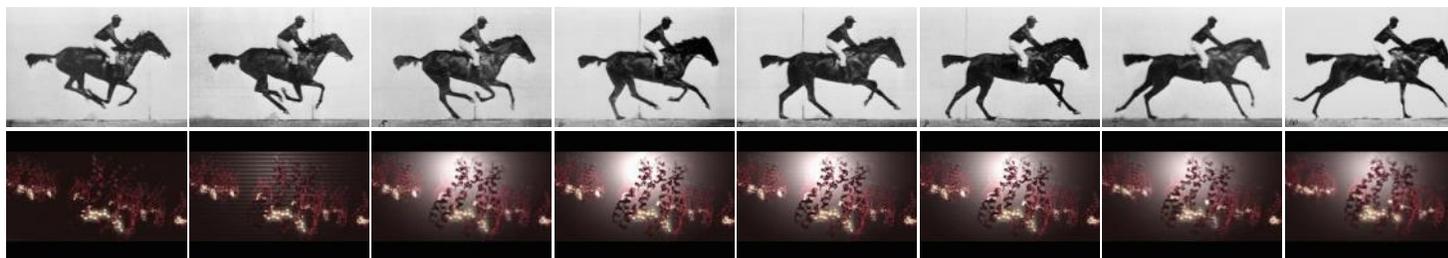
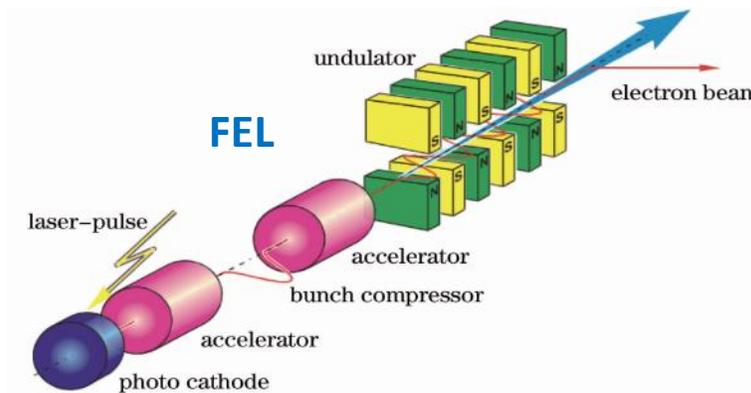


1飞秒=1千万亿分之一秒

# 加速器光源集群：同步辐射光源+自由电子激光



+



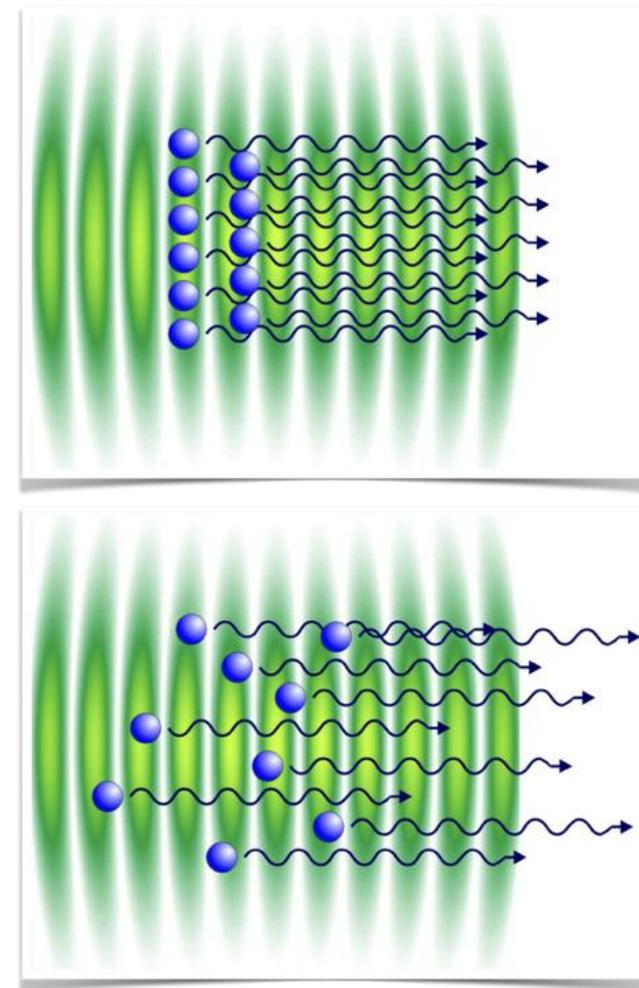
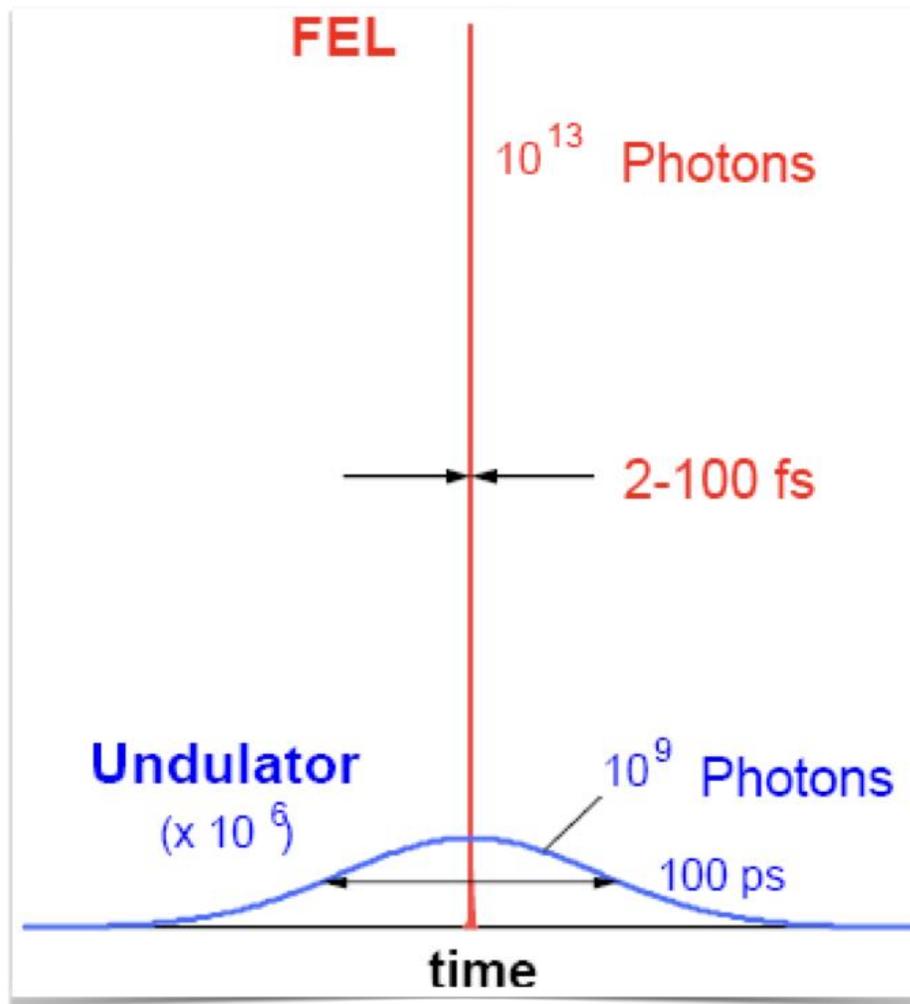
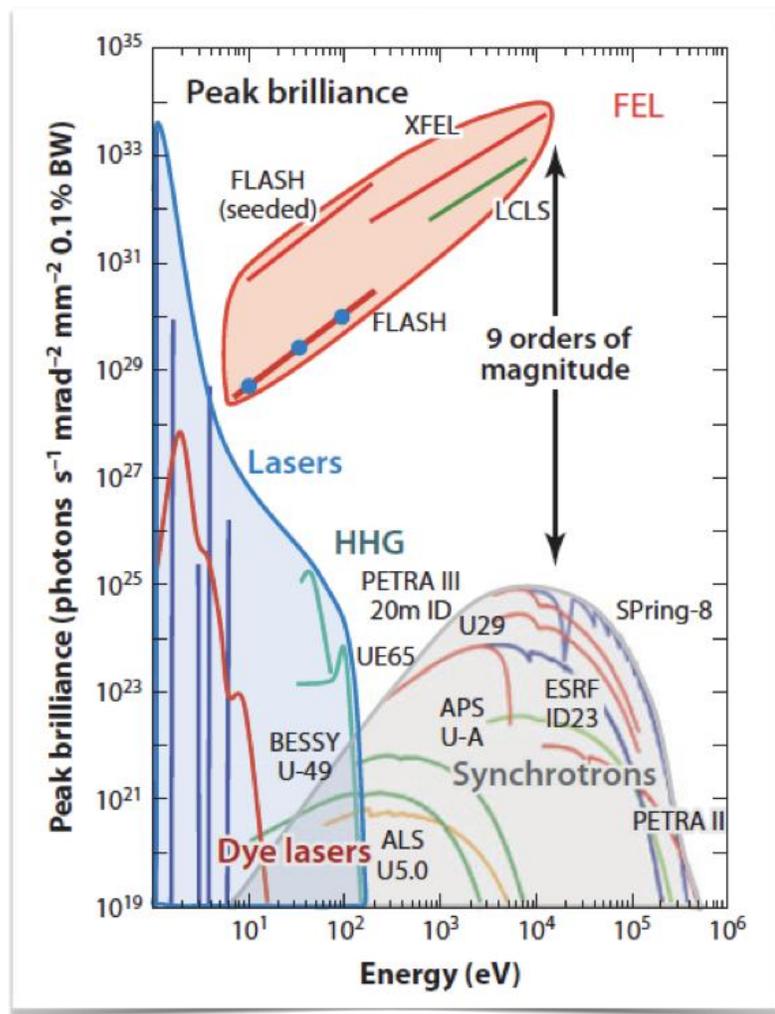
Making photos and movies for molecules

# 同步辐射与自由电子激光辐射特性

Higher intensity

Shorter pulse

Full coherence



XFEL: one of the fundamentally most powerful tools for science

# 上海同步辐射光源

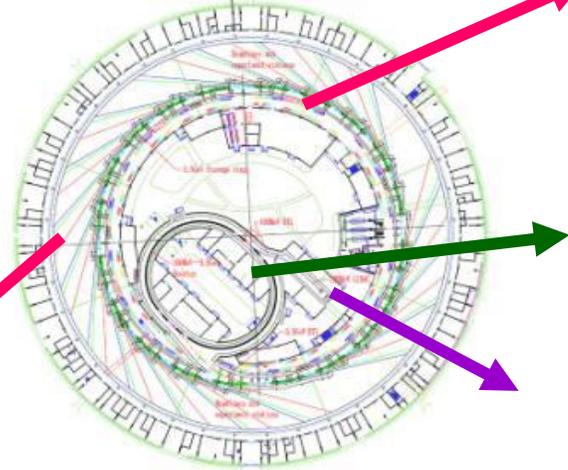
# 上海同步辐射光源



# 上海光源：中能第三代同步辐射光源

上海光源含一台150MeV电子直线加速器、一台全能量增强器、一台3.5GeV储存环、~40条光束线站，由国家、上海市和中科院三方投资，总投资超过35亿人民币。经过一期及后续工程建设，目前有29线43站服务用户，还有8线16站在建，含中石化投资建设3线5站。

20条光束线25站运行



3.5GeV电子储存环总长432m



全能量增强器 C=180m



150MeV电子直线加速器

电子能量： 3.5 GeV  
周长： 432 m  
流强： **>200±0.5mA (恒流)**  
自然发射度： 4.2 nm-rad  
束流寿命： ~ 20 hrs  
插入件直线段： 18个  
最大辐射功率： ~ 600 kW  
运行光束线站： 29线43站  
在建光束线站： 8线16站

**\*上海光源是我国目前服务用户最多、成果产出率最高的大科学装置**

# 上海光源建设历程

1993年

12月丁大钊、方守贤、冼鼎昌三位院士建议在我国建造第三代同步辐射光源

1995年

3月中科院和上海市商定，共同向国家建议建设第三代同步辐射光源-上海同步辐射装置

1999年

1月至2001年3月，实施了上海同步辐射装置预制研究项目

2004年

12月25日上海光源工程正式动工

2009年

5月6日上海光源正式对用户开放

1995年

2月谢希德、杨福家和王志勤等政协委员在上海市政协八届三次会议上提交“在上海建造第三代同步辐射光源”的提案，得到市委、市府领导的积极支持

1995年

6月28日，成立了“上海同步辐射装置”可行性研究工作组。工作组由陈森玉(组长)、徐洪杰(副组长)和曹珊珊三同志组成

2004年

7月28日，中国科学院和上海市人民政府联合发文，成立了上海光源工程领导小组、工程指挥部、工程经理部和工程科技委员会。路甬祥同志任工程领导小组组长，韩正同志任副组长；江绵恒同志任工程指挥部总指挥，杨雄同志任副总指挥；徐洪杰同志任工程经理部总经理，赵振堂、丁浩同志任副总经理；方守贤院士任工程科技委员会主任，冼鼎昌院士、杨福家院士、陈森玉院士任副主任；陈森玉院士为工程总顾问

2009年

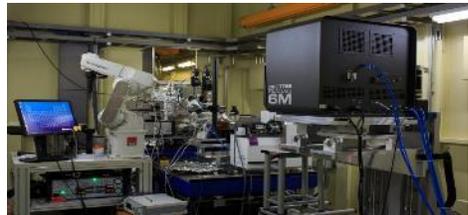
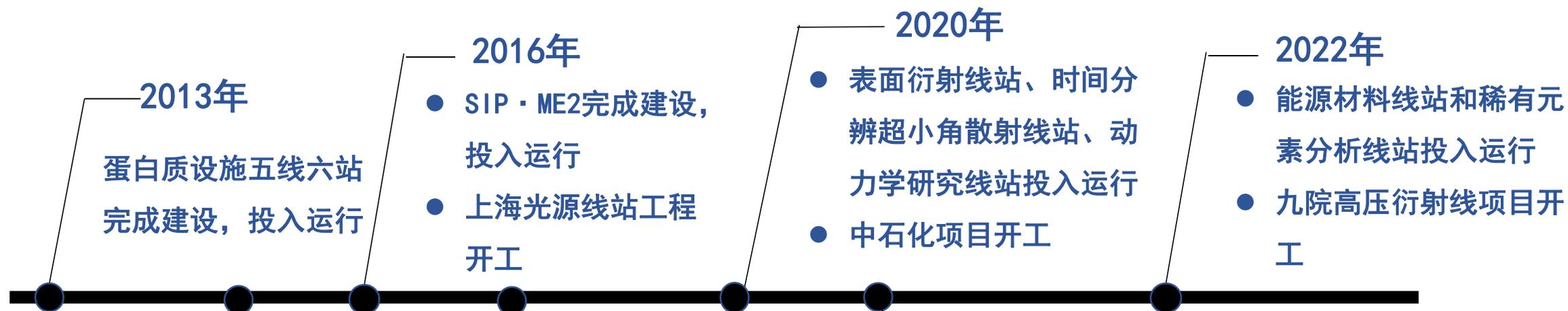
4月29日，上海光源工程竣工

2016年

11月20日，上海光源二期工程开工



# 上海光源后续项目建设历程





## 2009年

上海光源建筑面积50857平方米，负责装置运行开放；



## 2014年

软X射线自由电子激光试验装置开工；

## 2019年

上海光源建筑面积增加到107100.5平方米，新增“上海光源线站工程”、“软X射线自由电子激光用户装置”、“活细胞成像平台”、“质子治疗装置”、“硬X射线自由电子激光装置”；



2009年



常规磁场弯铁的DBA磁聚焦结构单元实景照片

2019年



超高磁场弯铁的DBA磁聚焦结构单元实景照片

# 上海光源储存环主要参数

参数名称	单位	改造前状态	改造后的状态
束流能量	GeV	3.5	3.5
环周长	m	432	431.9893
谐波数		720	720
工作点 (H, V)		22.22, 11.29	22.222, 12.153
自然发射度	nm.rad	3.89	4.22 (含超导扭摆器)
动量紧缩因子		$4.27 \times 10^{-4}$	$4.2 \times 10^{-4}$
自然能散度		$9.8 \times 10^{-4}$	$11.1 \times 10^{-4}$
每圈辐射损失	MeV	1.44	1.70 (含超导扭摆器)
阻尼时间 (H, V, S)	ms	7.05, 7.02, 3.51	5.98, 5.94, 2.96
直线节长度		4×12, 16×6.5	4×12, 16×6.5, <b>2×1.9</b>
标准直线节光学参数 ( $\beta_x, \beta_y, \eta$ )	m	3.6, 2.5, 0.11	3.6, 2.5, 0.11
短直线节光学参数 ( $\beta_x, \beta_y, \eta$ )	m	—————	<b>9.20, 4.12, 0.22</b>
自然束团长度	mm	3.8	4~8
束流流强 (多束团/单束团)	mA	200 ~ 300 / 5	200~300 / <b>20</b>
常规/超高二极铁磁场强度	T	1.27/--	1.27/2.29
常规/超高二极铁经典光子能量	keV	10.3/--	10.3/18.7

## 磁聚焦结构 (Lattice) 改造

- SuperB单元改造 (C03, C13)
- 长直线节双腰改造 (ID11, ID16)

## 上海光源首批3种5台插入件 (2009年)



**BL12SW超硬多功能线站-SCW**



**BL17U高性能膜蛋白晶体学线站-CPMU**



**BL13SSW 稀有元素分析线站-Wiggle**



## 上海光源增至6种21台插入件 (2021年)

**BL13U 纳米探针线站-IVU (4m)**



**BL20U1、20U2能源材料线站-IVU、EPU**

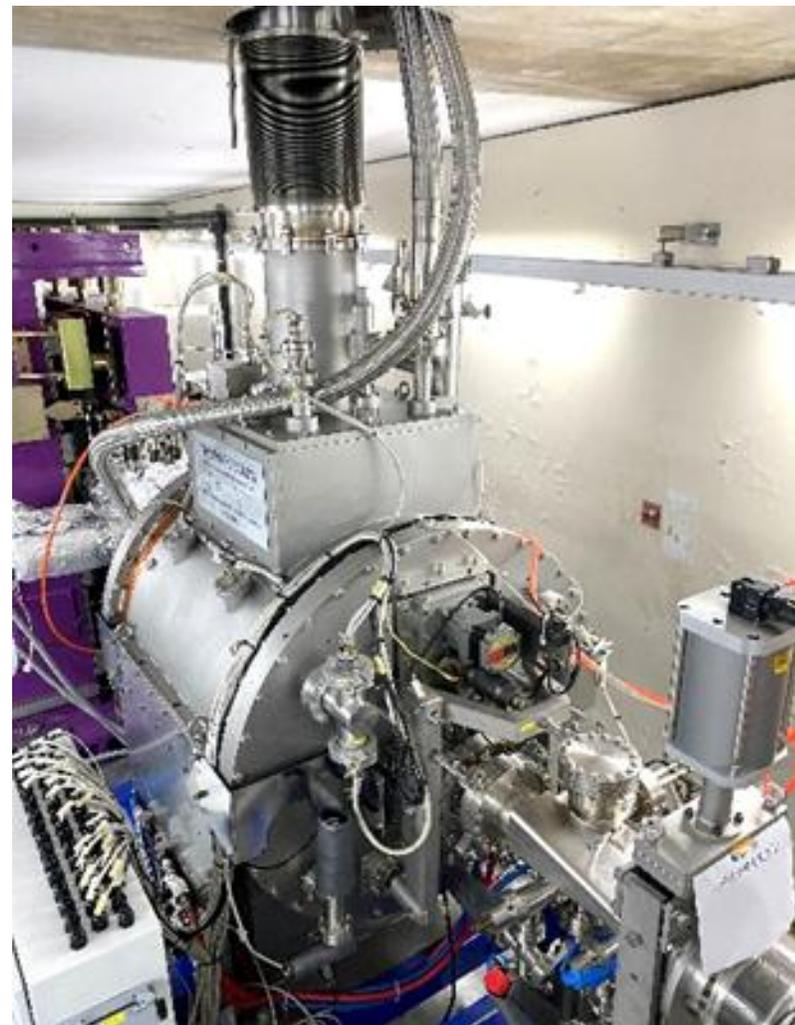


**BL07U纳米自旋与磁学线站-DEPU**



单元	线站名称	能量范围	插入件类型	周期长度	最小间隙	最大磁场	长度
02	表面衍射线站	4.8-28 KeV	CPMU	20mm	6-30mm	1.09T	2.2m
02	生物大分子晶体学光束线站	7-15 KeV	IVU22N69	22mm	6-30mm	0.9T	2m
03	高分辨角分辨光电子能谱线站	7-70 eV	EPU200	200mm	16-80mm	0.7T	4.4m
05	动力学结构研究线站	5-25 KeV	IVU22	22mm	6-30mm	0.9T	2.6m
07	纳米自旋与磁学线站	50-2000 eV	Double EPU	58mm 90mm	16.5-150mm 18.8-150mm	0.78T 0.85T	5m
08	软X射线谱学显微光束线站	192 - 2182 eV	EPU10	10cm	3cm	0.6T	4.3m
09	“梦之线”	20-2000 eV (水平偏振)	EPU58/148	58mm 148mm	16.5-120mm 22-130mm	0.78T 0.67T	5m
10	时间分辨超小角散射线站	8-15 KeV	IVU20	20mm	6-30mm	0.84T	2.1m
10	P2	7-18 KeV	IVU22	22mm	6-30mm	0.84T	2.1m
12	超硬多功能	30-150 KeV	SCW	48mm		4.2T	2.5m
13	稀有元素分析线站	5-50 KeV	Wiggler	100mm	15-60mm	1.57T	1.5m
13	硬X射线纳米探针线站	5-25 KeV	IVU	20mm	6-20mm	0.86T	4.5m
14	XAFS光束线站	3.9 ~ 23 keV (聚焦模式)	wiggler8	8cm	14mm	1.3T	1.7m
15	硬X射线微聚焦及应用光束线站	5-20 keV	IVU25B		6-16mm	0.94T	2.7m
16	快X射线成像线站	8.7-30 KeV	CPMU	18mm	6-30mm	1.025T	3.6m
16	中能谱学线站	2.1-16 KeV	IVU	26mm	6-30mm	1.12T	3.6m
17	膜蛋白线站	5-25 KeV	CPMU	20mm	6-30mm	1.09T	3.7m
18	蛋白质微晶体结构光束线站	5-18 keV	IVU25C		6-16mm	0.96T	2.7m
19	蛋白质复合物晶体结构线站	7-15 keV	IVU20A		5-16mm	1.04T	2.2m
19	生物小角散射线站	7-15 keV	IVU20A		5-16mm	1.04T	2.2m
20	能源材料线站	130 eV-18 KeV	IVU24	24mm	6-30mm	0.96T	2.1m
			EPU60	60mm	14.5-80mm		1.9m

# 超导扭摆器、波荡器、三次谐波腔





# 上海光源现已运行29线·43站

二期 (试运行)

## 首批光束线站

- 软X射线谱学显微线站 (BL08U1A)
- X射线成像及生物医学应用线站 (BL13W1)
- XAFS线站 (BL14W1)
- 衍射线站 (BL14B1)
- 硬X射线微聚焦线站 (BL15U)
- X射线小角散射线站 (BL16B1)
- 生物大分子晶体学线站 (BL17U)

## 蛋白设施五线六站 梦之线

- 高通量晶体结构线站 (BL17B)
- 蛋白质微晶体结构线站 (BL18U)
- 蛋白质复合物结构线站 (BL19U1)
- X射线小角散射线站 (BL19U2)
- 红外谱学与时间分辨线站 (BL01B)
- “梦之线” (BL09U)

- 硬X射线通用谱学线站
- X光学测试线站
- 动力学研究线站
- 表面衍射线站
- 超小角线站
- 纳米自旋与磁学线站
- P2生物防护蛋白质晶体学线站
- 高性能膜蛋白
- 快速X光成像
- 纳米三维成像
- 激光伽马
- 能源材料线站
- 稀有元素分析线站

2009年5月

2012年1月

2015年 2016年3月

2019年1月

2021年12月

2022年10月

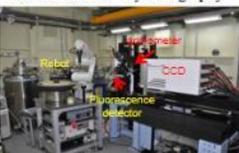
## 分支线站

- 软X射线干涉光刻分支线站 (BL08U1B)

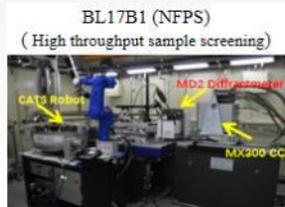
BL08U1A-STXM(Phase I)



BL17U1 (Phase I)  
Macromolecular crystallography



BL17B1 (NFPS)  
(High throughput sample screening)



BL18U1 (NFPS)  
(Micro-crystallography)



BL19U1 (NFPS)  
(Complex-crystallography)



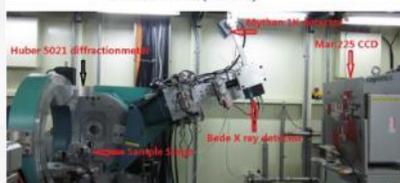
## ME2·SIP

- 近常压软X射线原位谱学线站 (BL02B)
- 原位高分辨电子结构线站 (BL03I)

BL09U1- ARPES and PEEM(Dreamline)



BL14B1-XRD(Phase I)



BL14W1-XAFS(Phase I)



# 上海光源线站布局图



预计将有38线60站服务用户

# 上海光源支撑相关学科领域的科学研究



# 上海光源开放运行以来，用户已超过36000人，机时供不应求

截至2022年12月，已服务全国约700家单位约3500个课题组的3万7千多名用户，在生命、能源、材料、物理等诸多领域，产出了一批重大成果。

2019.4.26

2014.12.25

2010.1.13

2009.5.6

24684位用户

第10000位用户

中科大的滕脉坤课题组

第1000位用户

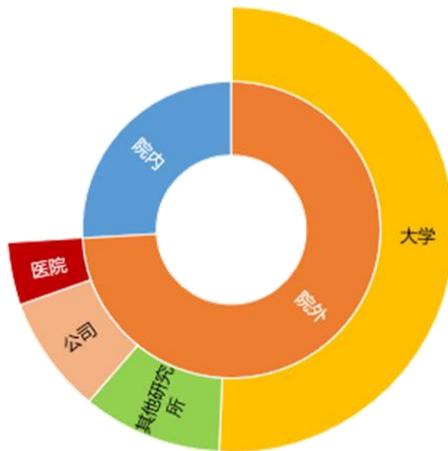
接待首批光源用户



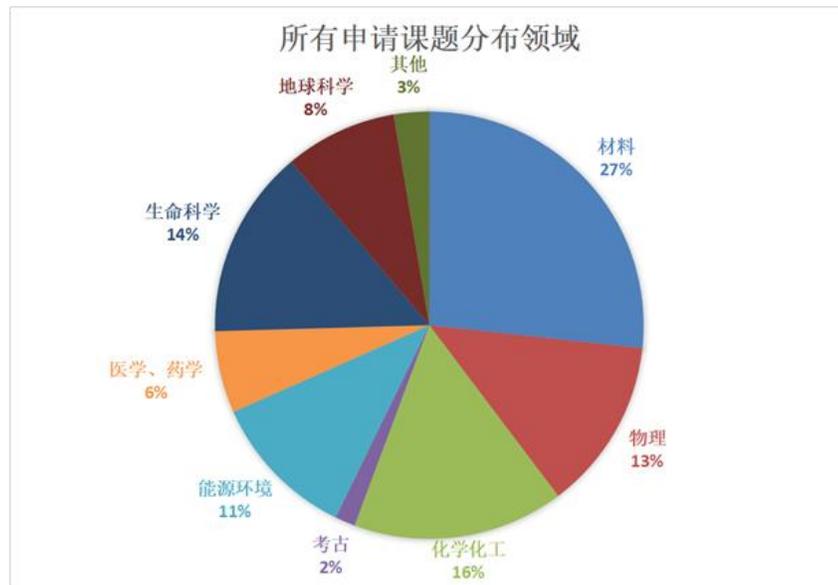
首批包括中科院长春应用化学所、上海交通大学、中科院高能物理所等单位的近20位用户



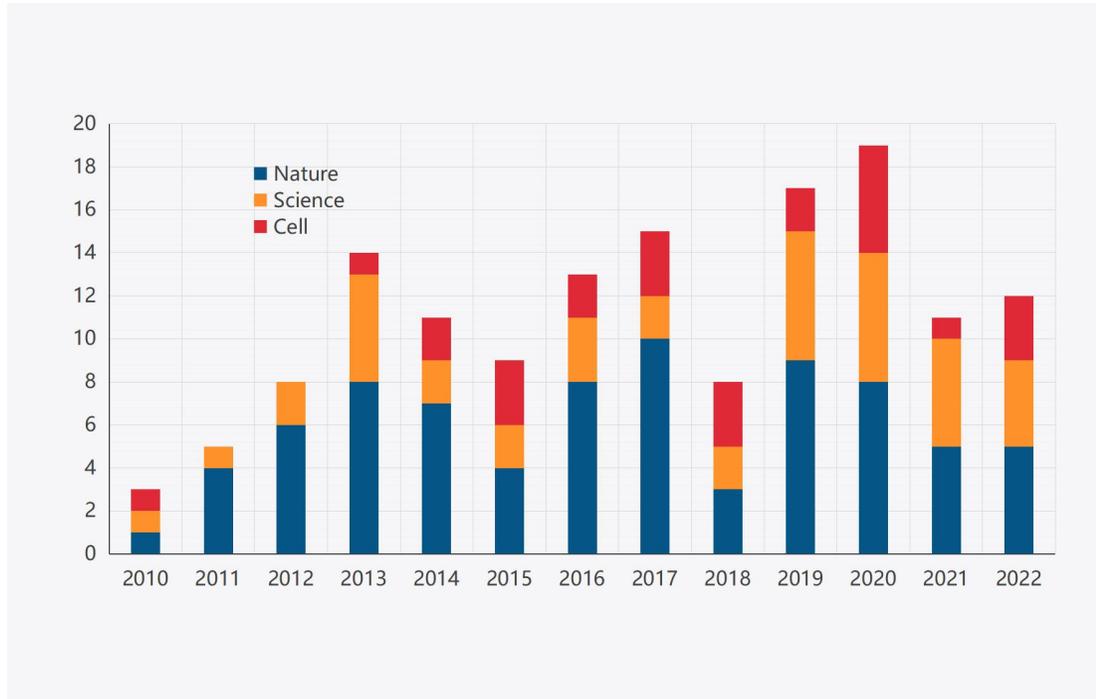
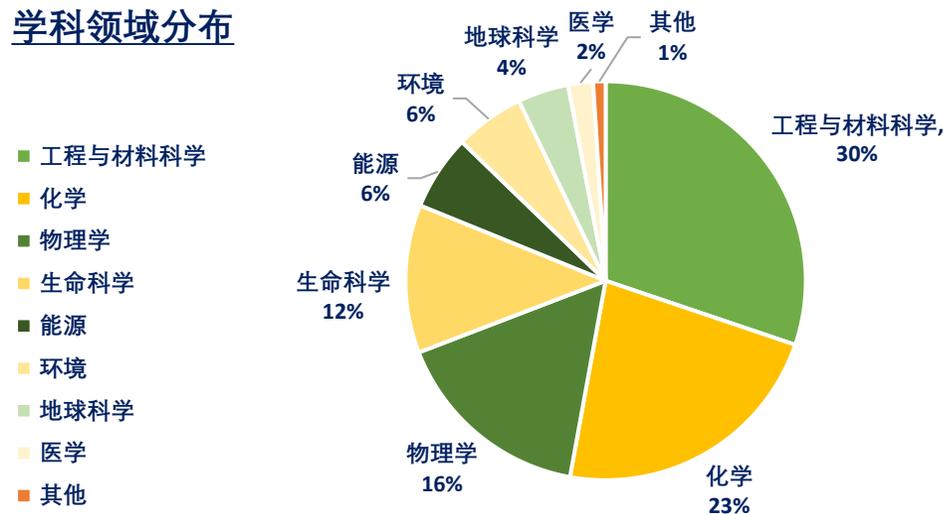
高压先进科学中心的晏浩课题组



国际用户：  
 新加坡3  
 澳大利亚5  
 韩国17  
 日本6  
 瑞典2  
 丹麦1  
 加拿大5  
 美国5  
 葡萄牙1  
 泰国1  
 俄罗斯1  
 法国2  
 新西兰1  
 沙特阿拉伯1  
 德国2  
 瑞士1



## 学科领域分布



1200

SCI-I IF>5 SSRF -User publication

## ◆ 用户期刊论文统计

1000

800

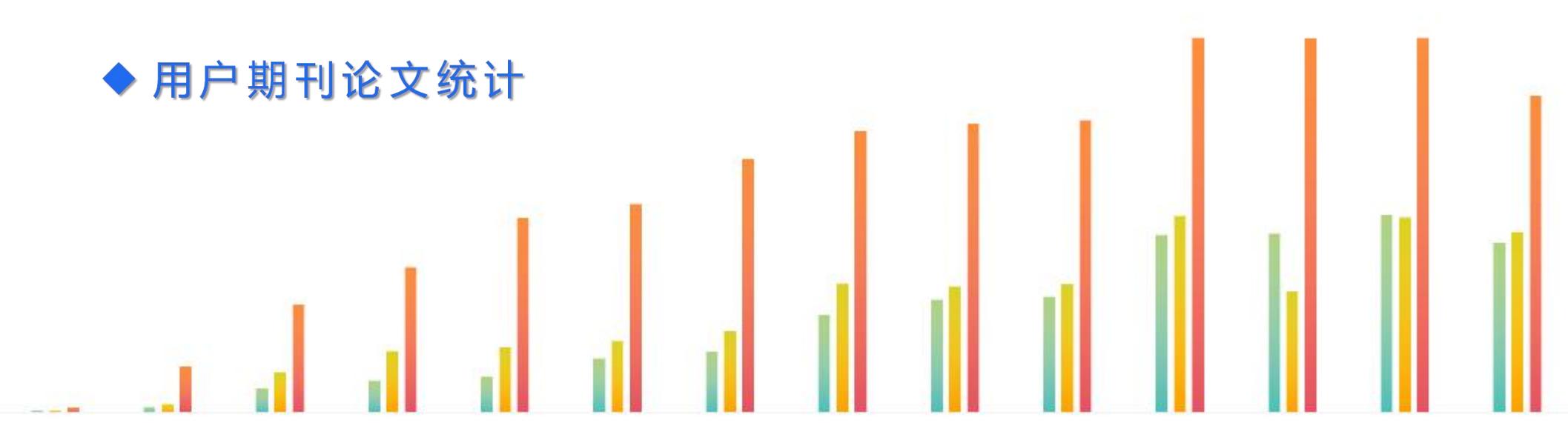
600

400

200

0

2009 2010 2011 2012 2013 2014 2015 2016 2017 2018 2019 2020 2021 2022



# 上海光源支撑重大成果产出

## 中国十大科技进展新闻

- (2014年) 甲烷高效转化研究获重大突破  
中科院大连化物所包信和组
- (2014年) 首次获人源葡萄糖转运蛋白结构  
清华大学颜宁研究组
- (2015年) 首次发现外尔费米子  
中科院物理所丁洪组
- (2017年) 发现三重简并费米子  
中科院物理所丁洪组
- (2019年) 硅藻捕光机制  
植物所沈建仁&匡延云
- (2022年) 二氧化碳人工合成葡萄糖和脂肪酸  
电子科大夏川、中科院深圳先进院于涛、中国科学技术大学曾杰组

## 中国科学十大进展

- (2012年) TAL效应蛋白特异识别DNA的机理  
清华大学施一公和颜宁组
- (2014年) 甲烷高效转化研究获重大突破  
中科院大连化物所包信和组
- (2015年) 首次发现外尔费米子, 中科院物理所丁洪组
- (2015年) 研制出碳基高效光解水催化剂, 苏州大学康振辉组
- (2017年) 实验发现三重简并费米子, 中科院物理所丁洪组
- (2017年) 实现氢气的低温制备和存储, 北京大学马丁组
- (2019年) 硅藻捕光机制, 植物所沈建仁&匡延云
- (2019年) 阐明铈离子对提升钙钛矿太阳能电池寿命的机理  
北京大学周欢萍&严纯华
- (2020年) 我国科学家积极应对新冠肺炎疫情取得突出进展

# 上海光源支撑重大成果产出

## 国外奖项：成果、进展、突破

- 一项成果入选美国《科学》“十大科学突破”引用  
TAL效应蛋白质特异性识别DNA的机构基础（2012，清华 颜宁）
- 一项成果入选欧洲《物理世界》十大突破  
发现外尔金属（2015，物理所，丁洪）
- 一项成果入选美国物理学会标志性进展  
发现外尔半金属（2015，物理所，丁洪）
- 一项成果入选美国化学会十大科研成果  
“单原子催化”（2016，大化所 张涛）
- 一项成果入选美国《物理评论》125周年49篇精选论文  
发现外尔费米子（2015，物理所，丁洪）

## 一项国内十大科技新闻

- 我国首个抗新冠病毒抗体药物（2021，清华大学，张琳琦）

## 四项中国生命科学十大进展

- 硅藻捕光机制（2019，植物所，沈建仁&匡延云）
- 揭示抗结核新药的靶点和作用机制及潜在新药的发现（2019，上科大，饶子和）
- 首个新冠病毒蛋白质三维结构的解析及两个候选药物的发现  
（2020，上科大，饶子和）
- 冠状病毒的跨种识别和分子机制。（2021，微生物所 高福，郁峰共一）

## 三项中国十大医学科技新闻

- 埃博拉病毒入侵人体机制被破解（2016，微生物所，高福）
- 首款抗新冠病毒特效药上市（2021，清华大学，张林琦）
- 中国自主研发新冠疫苗安全有效（2021，微生物所，高福）

## 两项中国高校十大科技进展

- 植物分枝激素独脚金内酯的感知机制（2016，清华大学，谢道昕）
- “界面单位点”新型催化剂结构与氧气中微量CO的高效去除（2019，中国科技大学，路军岭）

# 上海光源支撑重大成果产出

## 国家自然科学奖

### 一等奖

- 纳米限域催化  
(2020年, 中科院大连化物所包信和组)

### 二等奖

- 植物油菜素内酯等受体激酶的结构及功能研究  
(2017, 清华大学, 柴继杰)
- 金属纳米材料的表面配位化学  
(2018, 厦门大学, 郑南锋)
- 纳米材料蛋白冠的化学生物学特性及其机制  
(2018, 中科院国家纳米中心, 陈春英)
- 面向能源转化与存储的有机和碳纳米材料研究  
(2018, 南开大学, 陈永胜)

## 国家科学技术进步奖二等奖

高世代声表面波材料与滤波器产业化技术  
(2018, 清华大学, 潘峰)

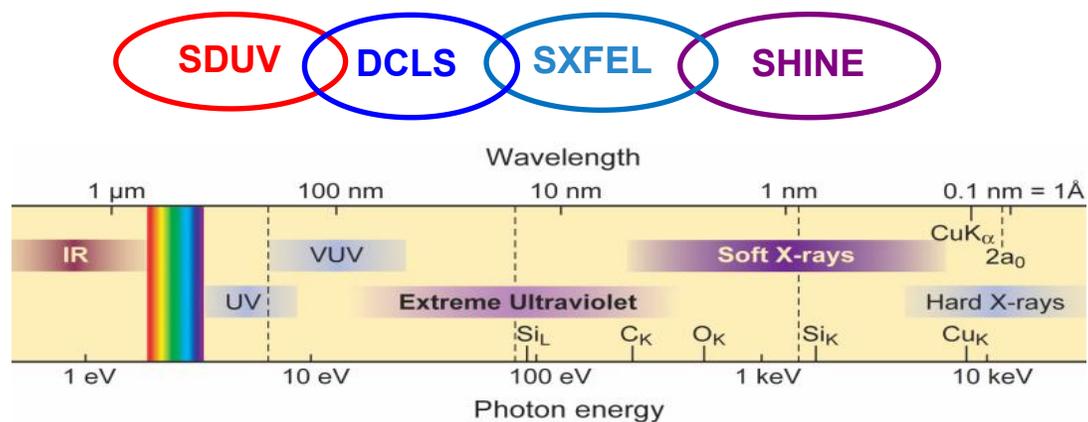
## 国家技术发明奖二等奖

高性能铜合金连铸凝固过程电池调控技术及应用  
(2014, 大连理工, 王同敏)

高性能铝合金架空导线材料与应用  
(2018, 上海交通大学, 孙宝德)

# 上海X射线自由电子激光

# 我国短波长自由电子激光装置



上海深紫外自由电子激光平台  
(SDUV、2000-2014)

大连极紫外相干光源  
(DCLS、2014-2017)

软X射线自由电子激光装置  
(SXFEL、2014-2021)

硬X射线自由电子激光装置  
(SHINE、2018-2025)

# 我国建设的高增益自由电子激光

	SDUV-FEL	DCLS	SXFEL-UF	SHINE
Facility type	Test facility	User facility	User facility	User facility
Status	De-commissioning	Operation	Operation	Construction
Wavelength	150-350nm	50-150nm	2.0nm	0.05-3.0nm
Length	65m	150m	540m	3100m
Accelerator	S band	S band	S+C band	L band/SRF
Beam energy	100-200MeV	300MeV	1.5GeV	8GeV
FEL principle	HGHG, EEHG	HGHG	EEHG, SASE	SASE, EEHG
Location	Shanghai	Dalian	Shanghai	Shanghai
First lasing	2009	2016	2020	2025

# 上海软X射线自由电子激光装置



- SXFEL装置总长：532m  
分为两个阶段建设：
- 试验装置 (840MeV)
  - 用户装置 (1.5GeV)

# 上海软X线自由电子激光装置

- 上海软X射线自由电子激光装置在国家发改委、中科院和上海市的支持下分阶段建成，是我国第一台、也将是未来数年内唯一一台XFEL装置。
- 目前建有1.5GeV的C波段直线加速器、2条波荡器线、2条相干X射线光束线以及活细胞荧光超分辨显微镜站、生物成像、超快物理等5个实验站。



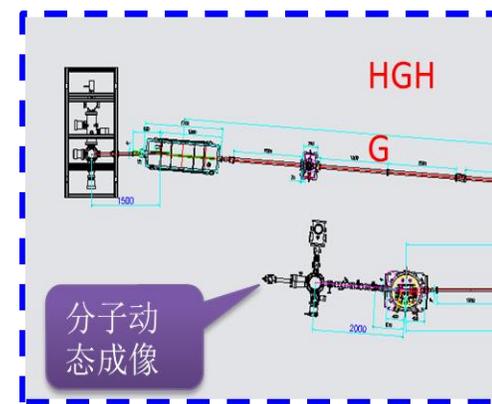
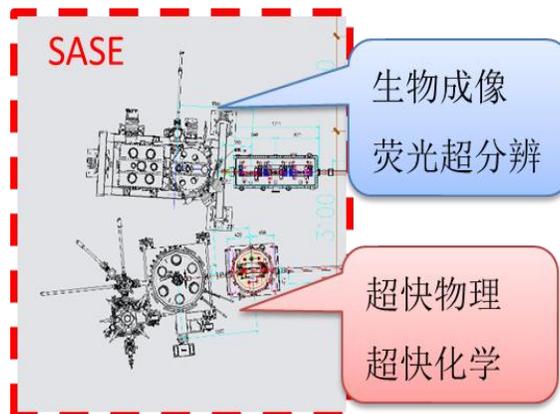
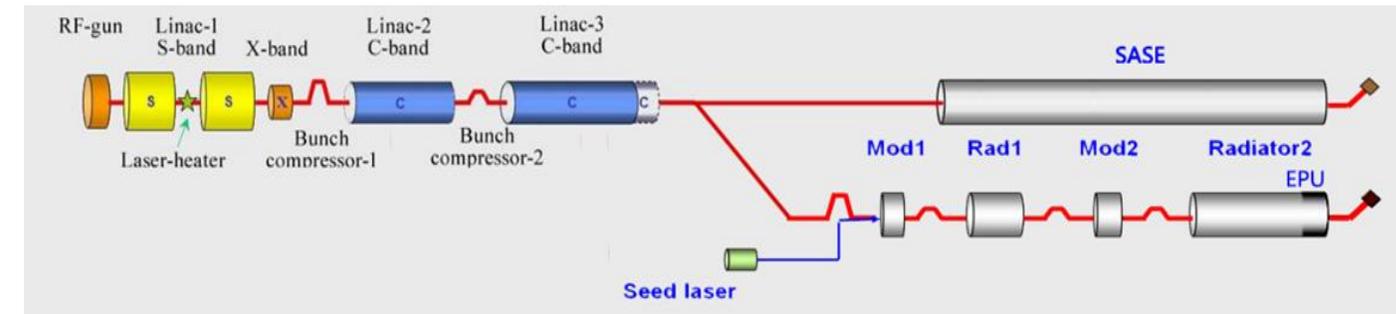
与SSRF集成布局，优势互补



# 上海软X射线自由电子激光装置

➤ **设施总投资约10亿，由国家发改委、科学院和上海市分三个项目共同支持**

- 软X射线自由电子激光试验装置：应物所/高研院承担；
- 上海软 X 射线自由电子激光用户装置：应物所/高研院 & 上科大承担；
- 活细胞结构与功能成像等线站工程：上科大 & 应物所/高研院承担。



# 1.5GeV C-band 直线加速器+ 波荡器系统



# 上海软X射线自由电子激光装置 (SXFEL)



种子型FEL波荡器线

SASE-FEL波荡器线



# 上海软X射线自由电子激光装置 (SXFEL)

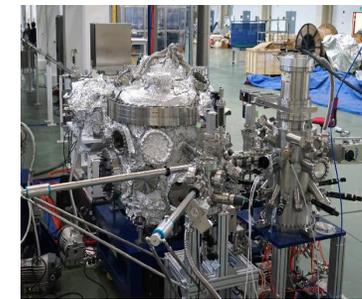
## (FEL性能参数和实验站)

	SASE beamline	HGHG beamline
Energy range	1.2-12 nm (100-1000 eV)	2.4~24nm (50~500eV)
Pulse energy	330 $\mu$ J @100eV, 47 $\mu$ J @620eV	64 $\mu$ J @56eV , 5 $\mu$ J @500eV
Photon flux /pulse	4.6 $\times 10^{11}$ @620eV ~1.3 $\times 10^{13}$ @100eV	5 $\times 10^9$ @500eV ~2.9 $\times 10^{12}$ @50eV
Energy resolution ( $\Delta E/E$ )	0.04%~0.2%	0.008%~0.04%
Energy resolving power of diagnostic spectrometer ( $E/\Delta E$ )	~3 $\times 10^4$ @620 eV	~4 $\times 10^3$ @200eV
Spot size	~3 $\mu$ m	~10 $\mu$ m
Pulse width (fs)	117fs@620eV	50 fs@300eV
Rep-rate	1~50 Hz	1~50 Hz

Bioimaging



Ultra-fast Physics



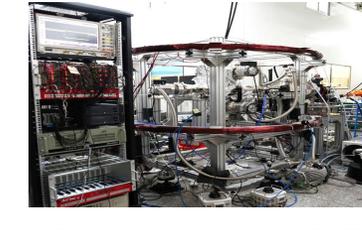
Ultra-fast Chemistry



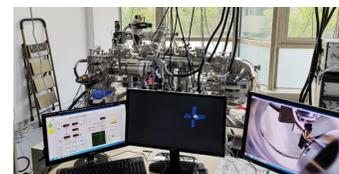
APXPS



AMO



CVI



# 上海软X射线自由电子激光装置

2021年 完成首次出光并获得首批实验数据

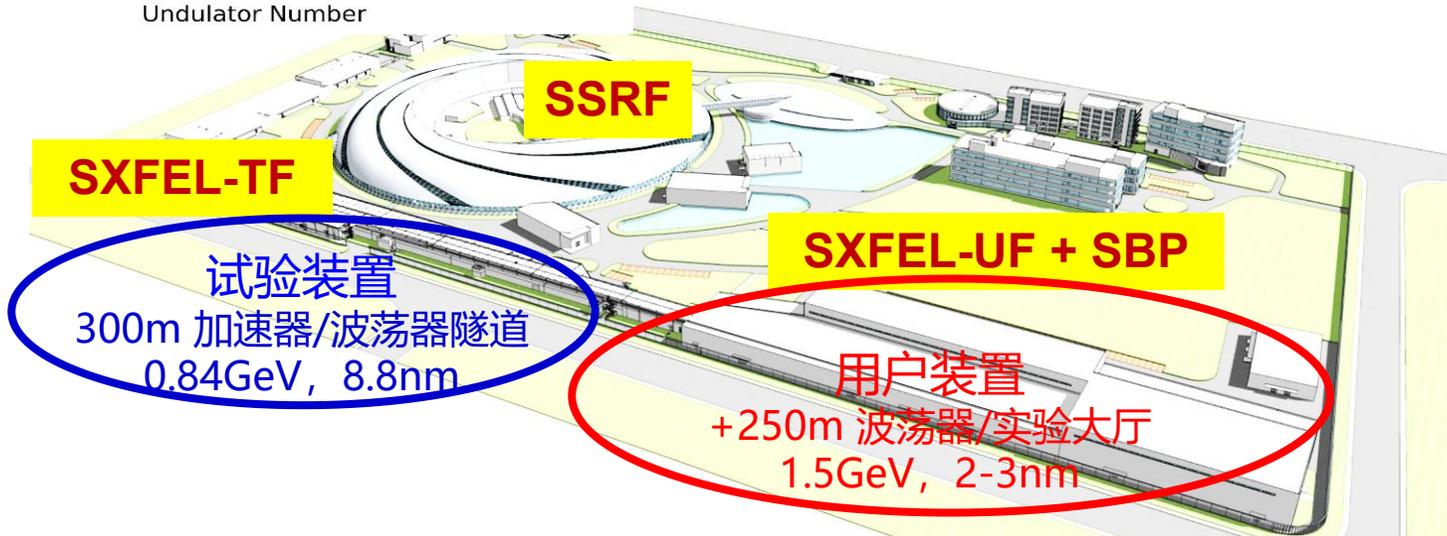
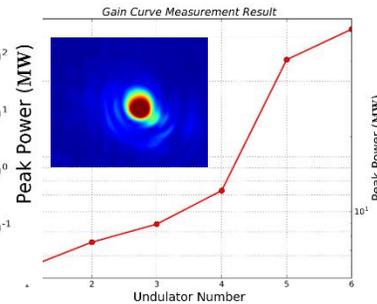
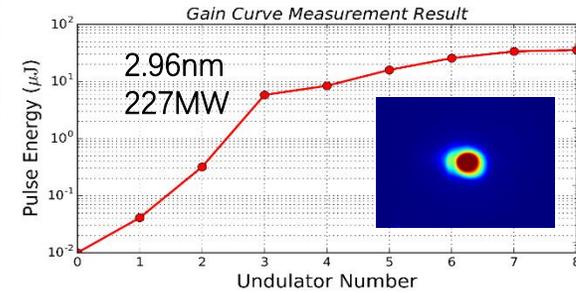
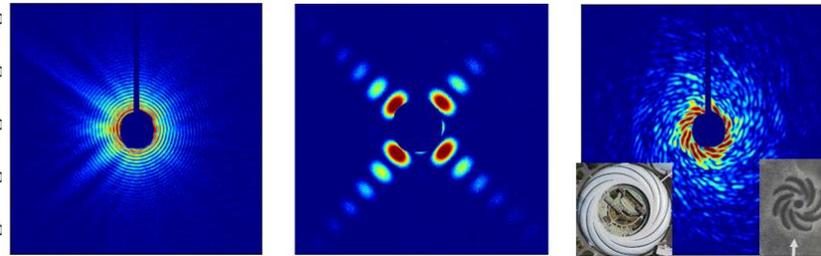
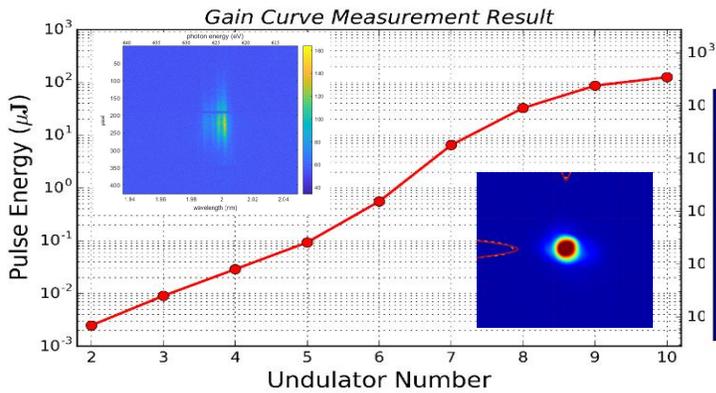
在国际三大软X射线FEL装置中首个实现“水窗”波段全覆盖

获得首批相干衍射图样，重构分辨率达到18.5nm，为国际先进水平

2022年 装置调试指标全部完成

验证基于反向渐变波荡器的谐波自种子技术，实现最短3nm的FEL饱和放大，完成专家测试。

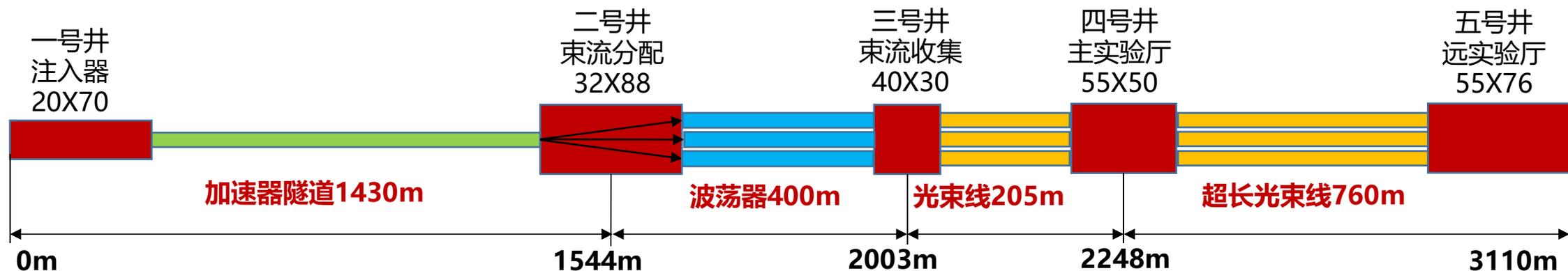
实现了国际上谐波次数最高、波长最短的回声型FEL出光放大，完成专家测试。



- 2022年试验装置投入运行。
- 2023年开放用户实验。

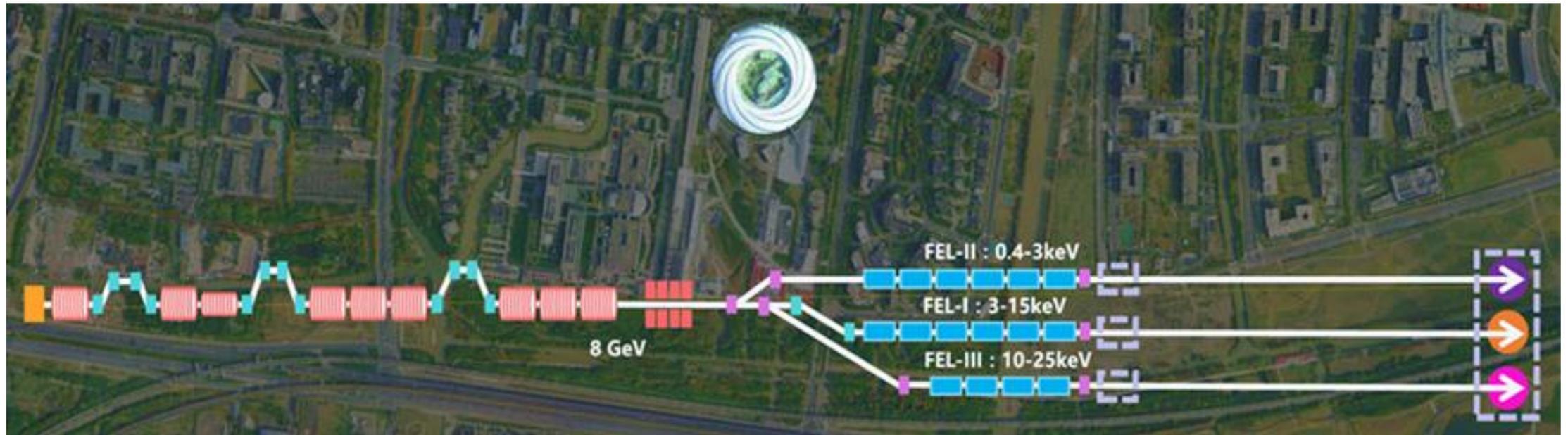
# 上海硬X射线自由电子激光装置(SHINE)

- SHINE: Shanghai High Repetition rate XFEL and Extreme light facility
- “十三五”国家重大科技基础设施建设项目，由国家和上海市共同投资，项目法人单位为上海科技大学，共建单位为上海高等研究院和上海光机所，2018年开工建设，预计2025年出光。
- 主要建设内容：超导加速器（8GeV），首批建设三条波荡器束线和10个实验站，100PW超强激光，建安及配套的公用设施，总长3.1公里。

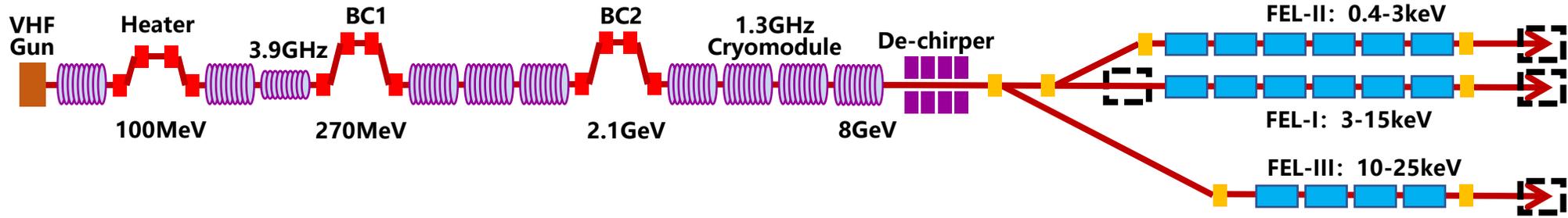


装置总长~3.1km，位于地下30m  
光子能量：0.4-25 keV  
重复频率：1 MHz





# SHINE加速器及FEL布局与参数

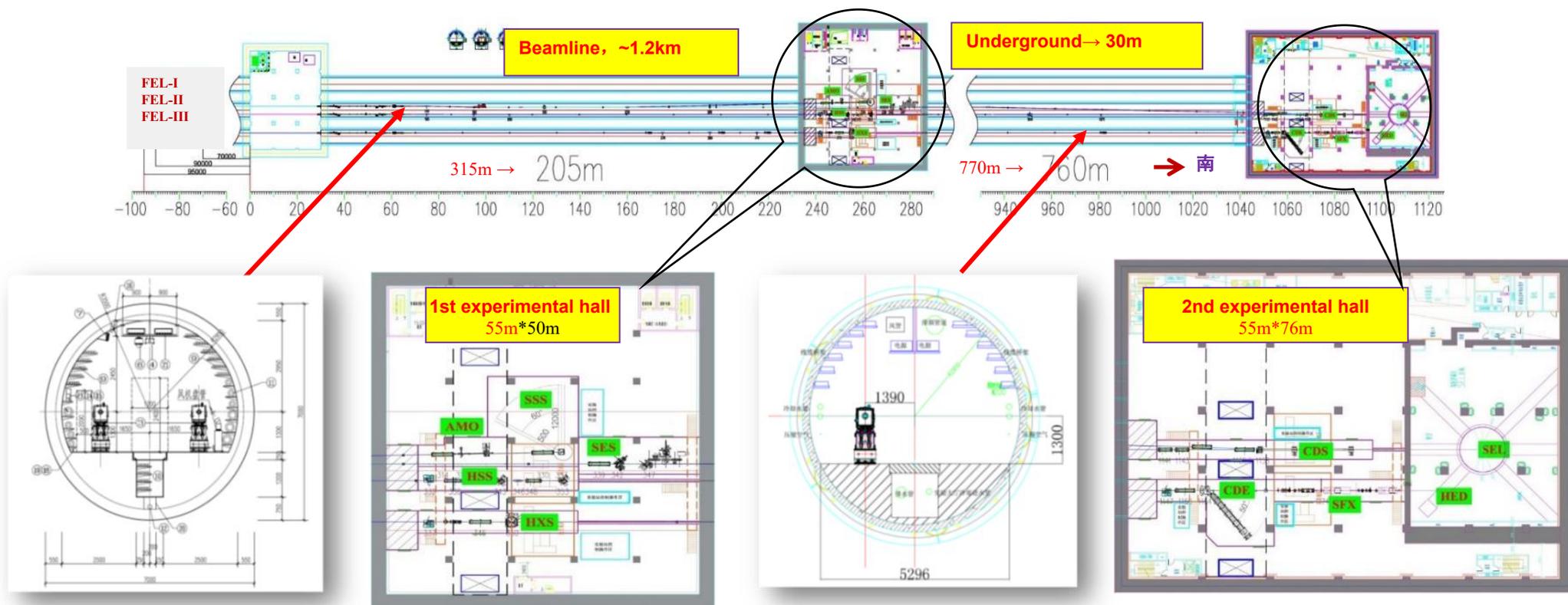


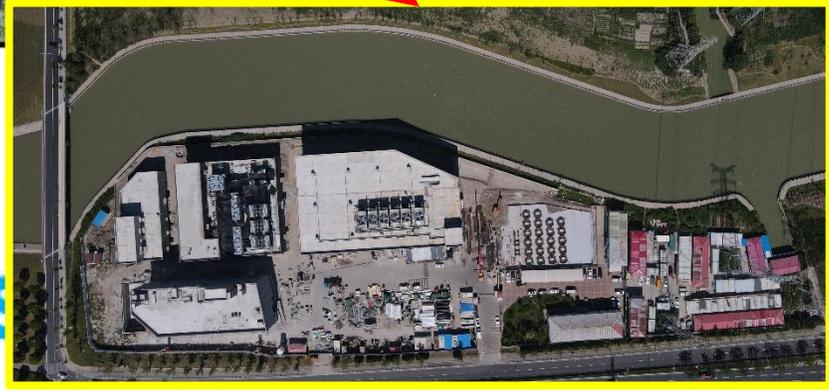
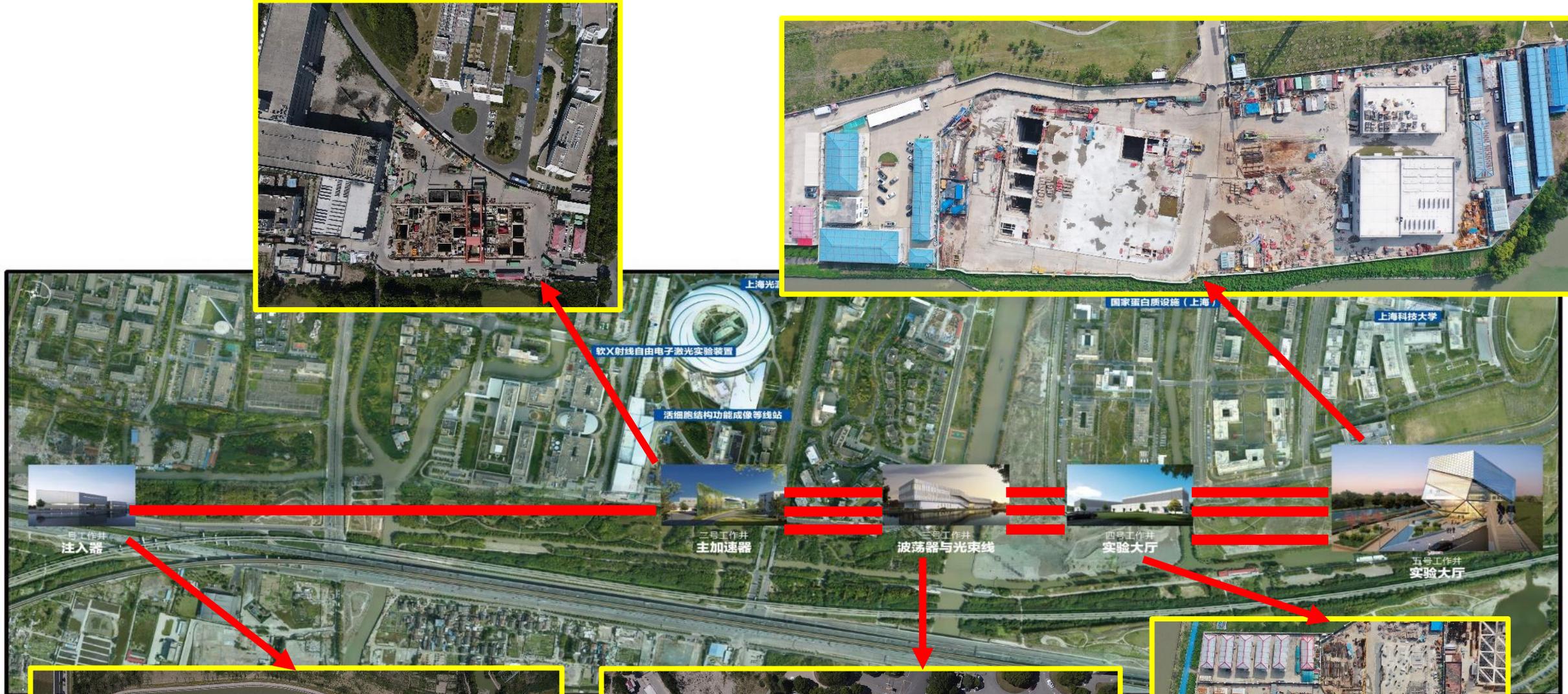
	Nominal
Beam energy/GeV	8.0
Bunch charge/pC	100
Max rep-rate/MHz	1
Beam power/MW	0.8
Photon energy/keV	0.4-25
Pulse length/fs	20-50
Peak brightness	$5 \times 10^{32}$
Average brightness	$5 \times 10^{25}$
Total facility length/km	3.1
Tunnel diameter/m	5.9
2K Cryogenic power/kW	12
RF Power/MW	2.28

FEL Line	Nominal	Objective
<b>FEL-I</b>		
Photon energy/keV	3-15	3-15
Photon number per pulse @12.4keV	$>10^{10}$	$>10^{11}$
Max pulse repetition rate/MHz	0.66	1
<b>FEL-II</b>		
Photon energy/keV	0.4-3	0.4-3
Photon number per pulse @1.24keV	$>10^{12}$	$>10^{13}$
Max pulse repetition rate/MHz	0.66	1
<b>FEL-III</b>		
Photon energy/keV	10-25	10-25
Photon number per pulse @15keV	$>10^9$	$>10^{10}$
Max pulse repetition rate/MHz	0.66	1

# SHINE首批束线站

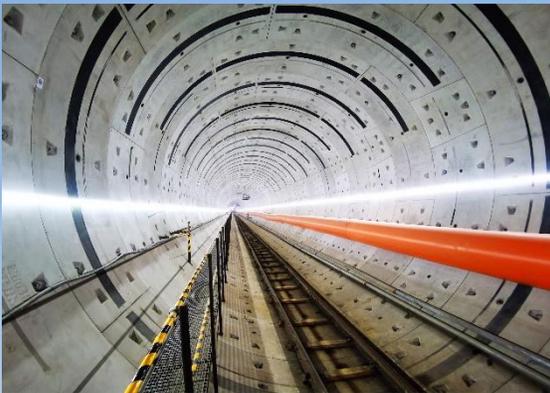
- 相干衍射实验站
- 原子分子反应成像实验站
- 单分子/单颗粒相干衍射实验站
- 物质电子结构实验站
- 软X射线高分辨共振散射实验站
- 极端光物理线站
- 串行晶体学实验站
- 硬X射线超快谱学实验站
- 硬X射线高分辨共振散射实验站
- 高能密度科学实验站





# SHINE加速器隧道





1.4km隧道贯通



# 建设上海光子大科学装置集群，支撑前沿研究取得系列重大突破





**SHINE**

**SXFEL**

**SSRF**

**SSRF, SXFEL and SHINE**

# 上海质子治疗装置

# 质子治疗发展

- 1903年，英国科学家William Henry Bragg 发现带电粒子的布拉格峰现象
- 1919年，英国科学家Ernest Rutherford 发现质子
- 1946年，美国科学家Robert R. Wilson提出质子和重离子治疗建议的建议
  - 1955年，美国Berkeley实验室, 进行了第一例质子临床治疗
  - 1990年，第一台专用装置在美国Loma Linda大学医学中心开始质子治疗
- 到2014年底，世界上超过11.8万人接受了质子治疗，到2021年底已达到28万人；接受重离子治疗的人数也已接近5万人。
- 临床数据表明，5万名患者的有效率达到95%以上，5年存活率高达80%，被评估为疗效最好、副作用最小方法；
- 结合多种治疗技术的发展，质子重离子放疗不断提高治疗的精确度和效果；
- **针对儿童及青少年肿瘤患者，以质子治疗来代替X射线治疗已是发展趋势；**



R.R. Wilson, "Foreword to the Second International Symposium on Hadrontherapy," in *Advances in Hadrontherapy*, (U. Amaldi, B. Larsson, Y. Lemoigne, Y., Eds.), Excerpta Medica, Elsevier, International Congress Series 1144: ix-xiii (1997).

millionths of an erg, each proton loses 48 millionths of an erg in the last centimeter. Hence, to produce 1 r.e.d. averaged over the last centimeter of depth requires  $83/48 \times 10^6 = 1.72$  million protons per square centimeter. To produce 1,000 r.e.d. will require 1.72 billion protons per square centimeter. This corresponds to a current of  $2.75 \times 10^{-10}$  amp./cm.<sup>2</sup> of protons for a one-second exposure or  $4.6 \times$

**Radiological Use of Fast Protons**  
 ROBERT R. WILSON  
 Research Laboratory of Physics, Harvard University  
 Cambridge, Massachusetts

**E**XCEPT FOR electrons, the particles which have been accelerated to high energies by machines such as cyclotrons or Van de Graaff generators have not been directly used therapeutically. Rather, the neutrons, gamma rays, or artificial radioactivities produced in various reactions of the primary particles have been applied to medical problems. This has, in part, been due to the very short penetration in tissue of protons, deuterons, and alpha particles from present-day high-energy machines. However, per centimeter of path, or specific ionization, and this varies almost inversely with the energy of the proton. Thus the specific ionization or dose is many times less where the proton enters the tissue at high energy than it is in the last centimeter of the path where the ion is brought to rest. These properties make it possible to irradiate inter- or intra-tumorally a strictly localized region.

Radiology 47: 487-491, 1946

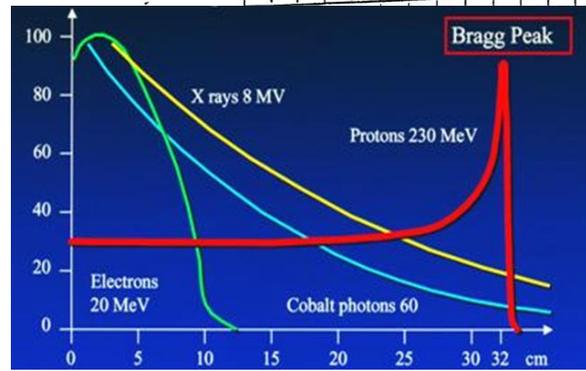
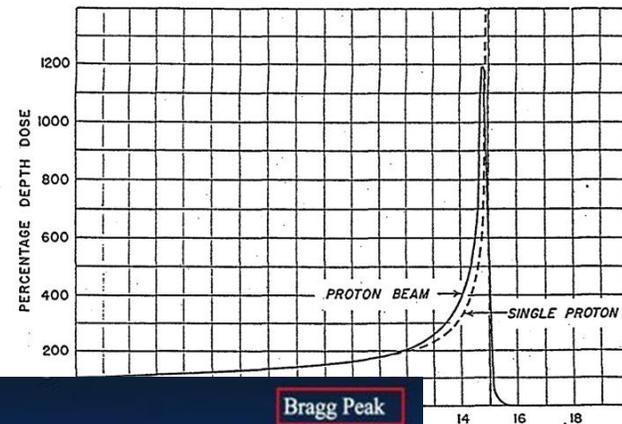


Figure 140 Mev proton. The full range of 140 Mev protons in tissue.

# 1946年Wilson首先提出质子重离子放疗

当时还没有加速器能够提供足够能量的质子束流

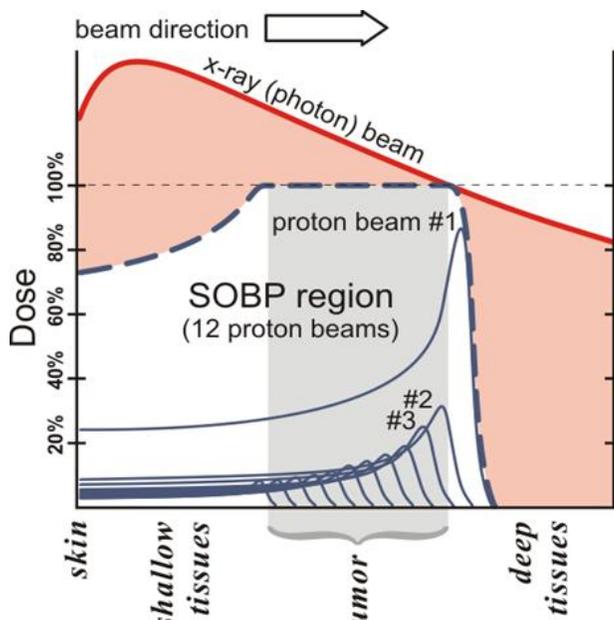
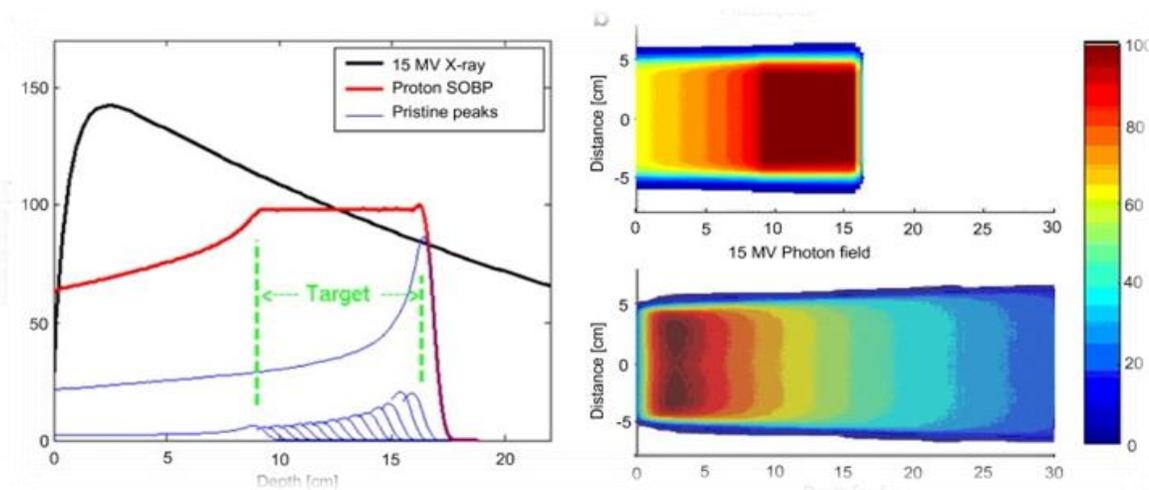


# 质子治疗的优势

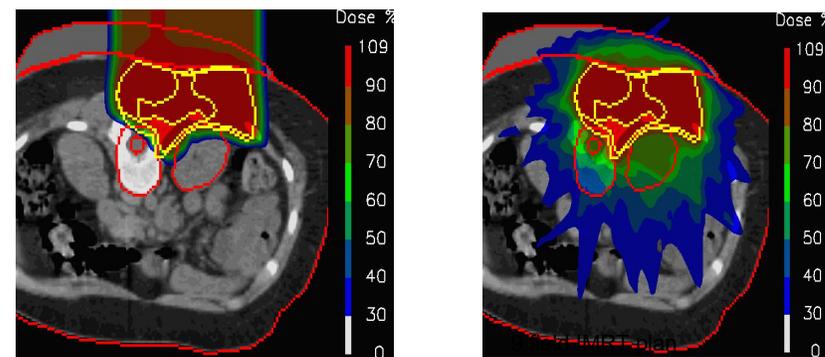
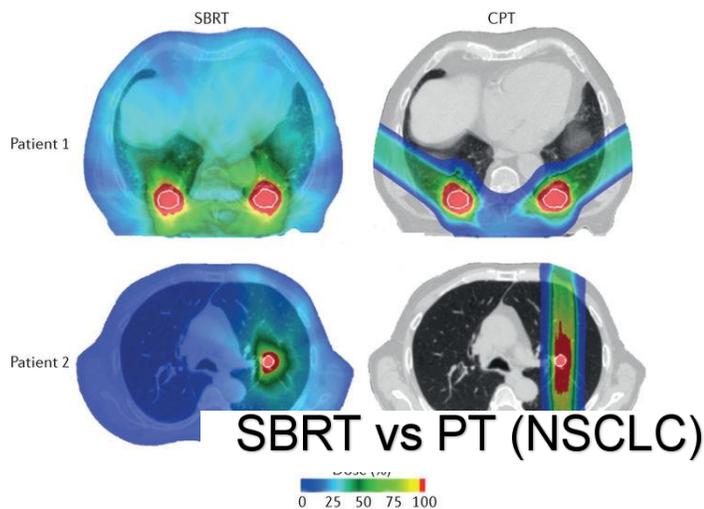
➤ 更好的疗效、更低的副作用、更易于与化疗、靶向、免疫疗法结合

- 物理剂量分布优势
- 降低正常组织损伤
- 提高肿瘤控制率

## 质子和其他射线水中能量损失的比较



## 肉瘤病例比较（12岁儿童）



患者接受的总体剂量只有光子放疗的1/6

# 质子治疗肿瘤的类型



- 头颈部肿瘤（耳鼻喉科、口腔颌面外科等）
- 颅底部肿瘤（髓膜瘤、脊索瘤）
- 食道癌，与化疗法并用
- 纵隔肿瘤（胸腺肿瘤、后纵隔肿瘤）
- 肺癌
- 肝癌
- 胆管癌（与化疗并用）
- 肾癌
- 不可切除的局部进行性胰腺癌
- 前列腺癌
- 软组织肿瘤（恶性）
- 直肠癌术后局部复发
- 子宫颈癌、子宫体癌
- 转移性肿瘤（肺、肝病灶数量在3个以内）

# 治疗装置发展情况

截止2023年4月

## ➤质子治疗装置

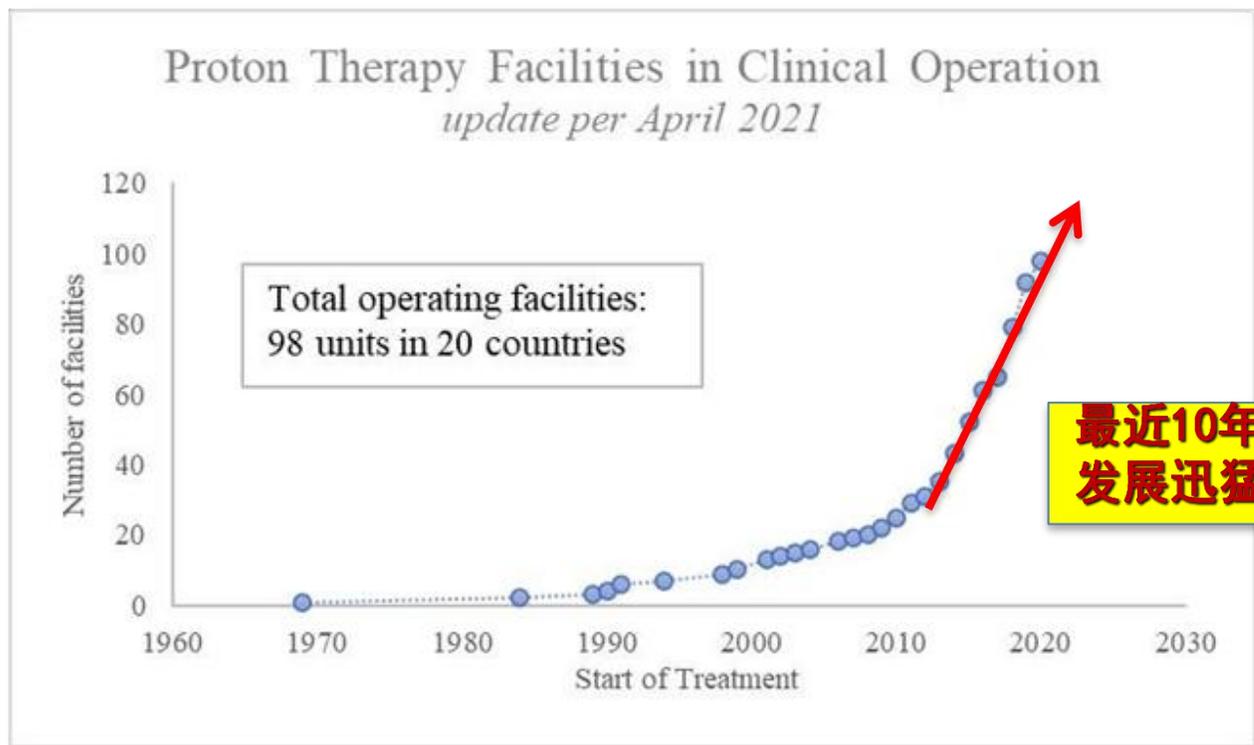
- 103个装置在运行 (美国有44个, 日本有18个)
- 32个装置在建

## ➤碳离子治疗装置

- 9个装置在运行
- 4+7个装置在建

## ➤质子碳离子一体治疗装置

- 6个装置在运行
- 1个在建



- 装备发展迅猛，已形成产业，是先进放疗的发展方向之一。
- 技术发展迅速，提高精度（IGRT、调强扫描）、提高效率、降低成本、扩展适应症。
- 据统计，还有超过80家单位筹备引进质子治疗装置。

# 两种典型的质子治疗装置

- 质子加速器：回旋加速器、同步加速器、
- 束流输运系统：旋转机架，降能器
- 治疗系统：扫描与散射治疗头、机器人治疗床、摆位与定位、治疗计划、治疗终端、联锁与信息系统等



质子同步加速器



旋转治疗室



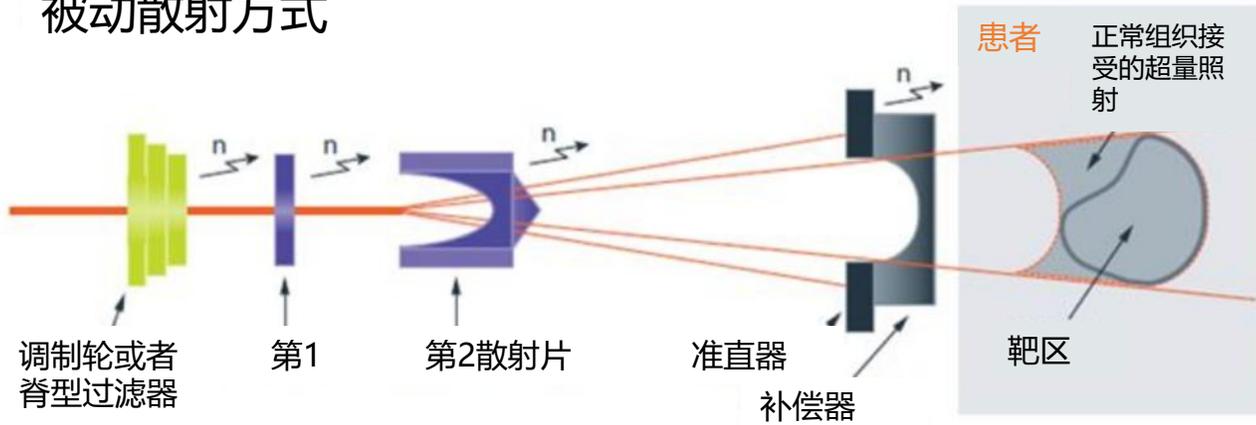
回旋加速器

# 束流照射方式

eam:

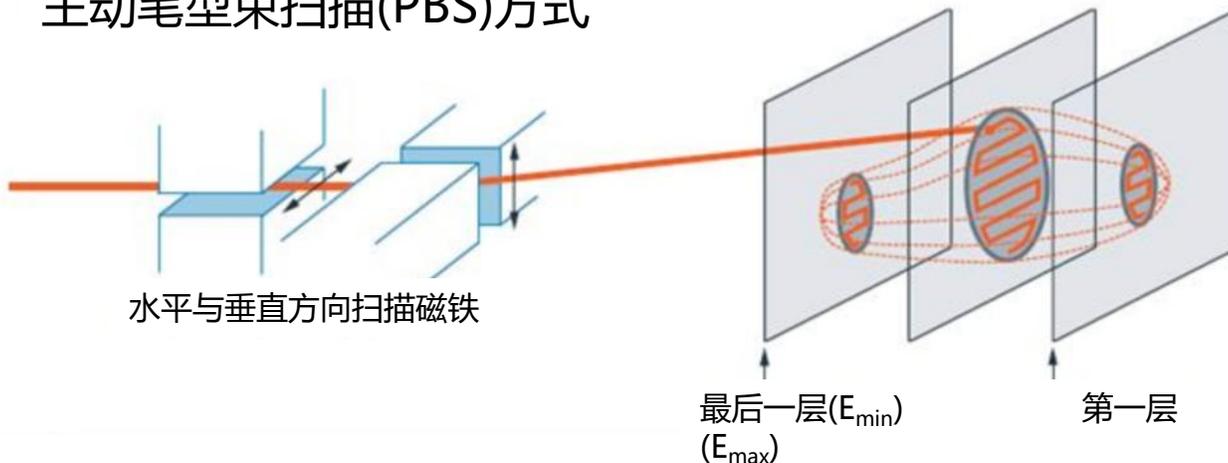


## 被动散射方式



- + 控制技术简单
- + 治疗运动器官肿瘤较容易
- 靶区附近正常组织会接受超量剂量，靶区适形较PBS差。
- 较高的中子剂量
- 需要定制患者准直器和补偿器

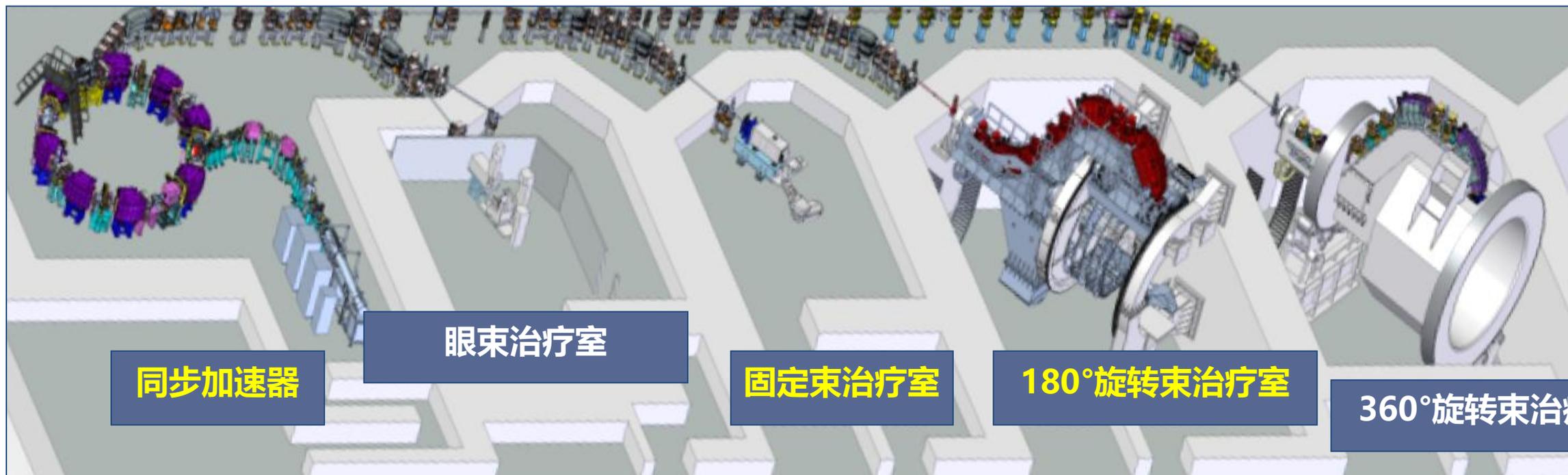
## 主动笔型束扫描(PBS)方式



- + 无需定制患者准直器和补偿器
- + 中子剂量低
- + 适形几乎任意靶区形状，患者正常组织接受较少照射剂量
- + 通过IMPT（调强质子放疗）进一步提高剂量分布
- + 未来可实现适应性放疗
- 控制技术复杂
- 治疗运动器官肿瘤技术较复杂

# 上海质子治疗装置

- 基于同步加速器的质子治疗装置，包括：
  - 加速器：同步加速器、束流输运线、直线注入器
  - 治疗室：固定束、180°旋转束、360°旋转束、眼部肿瘤
  - 治疗计划系统、治疗控制系统、治疗定位系统、质控系统



# 主要技术参数

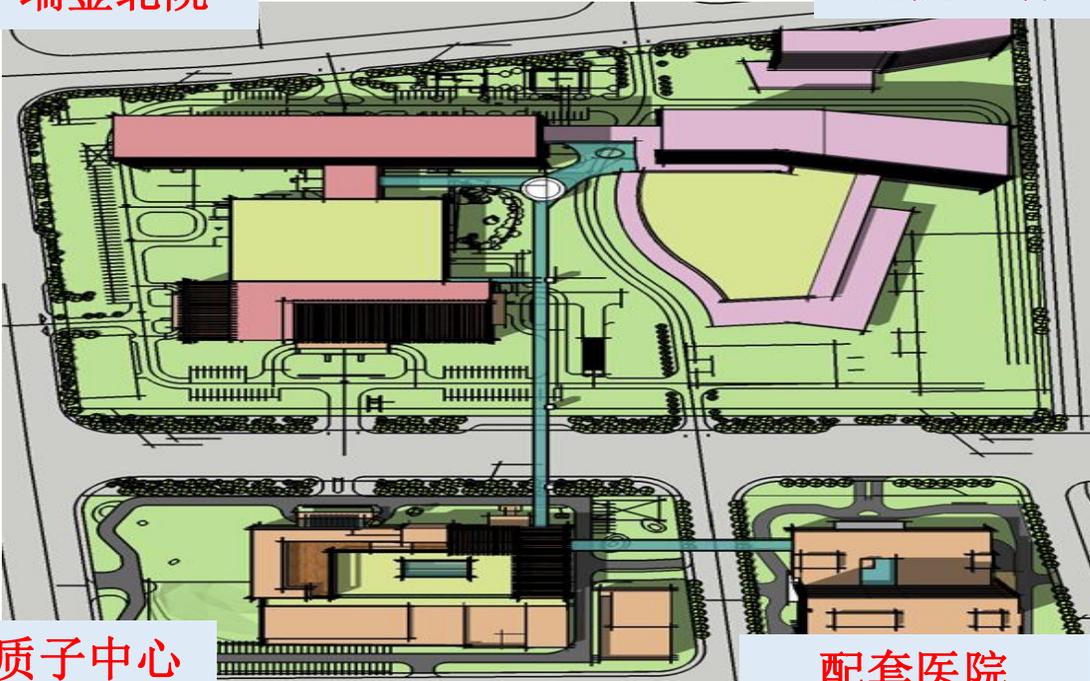
参数名称	参数值
质子能量范围:	70~235 MeV
加速器最高能量:	250 MeV
能量设定点数:	约90
质子水中射程:	0~30.0 g/cm <sup>2</sup>
SOBP(展宽Bragg峰宽度):	1~14 cm
治疗剂量率:	1 Gy/min/Liter
单次引出质子数:	4~8×10 <sup>10</sup>
同步加速器结构:	8极铁, 类FODO结构
加速器主环周长:	24.6 m
注入 / 引出方式:	多圈累积注入 / 三阶共振慢引出
升能时间:	0.7
重复频率:	0.5~0.1 Hz 可变
二极铁磁场范围:	0.27~1.74 T
最大治疗照野:	30 cm × 40 cm
束流配送方式:	点扫描
最大扫描速度:	2 cm/ms

# 上海瑞金质子肿瘤中心

- 建筑面积：26075 m<sup>2</sup>，  
其中：地下 (13000 m<sup>2</sup>)，地上(13000 m<sup>2</sup>)
- 建设周期: 12/2014/-11/2016

瑞金北院

北院二期

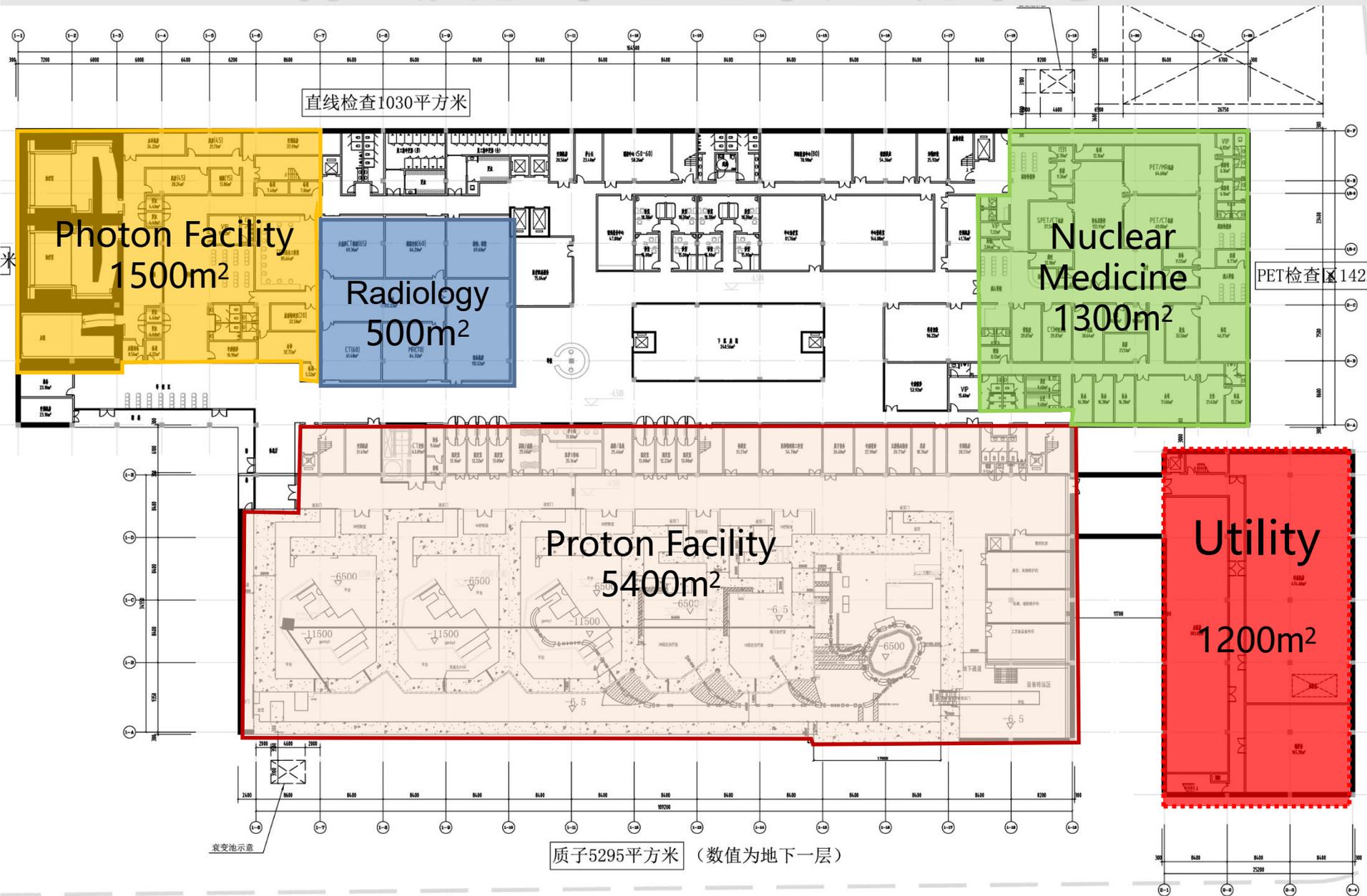


质子中心

配套医院

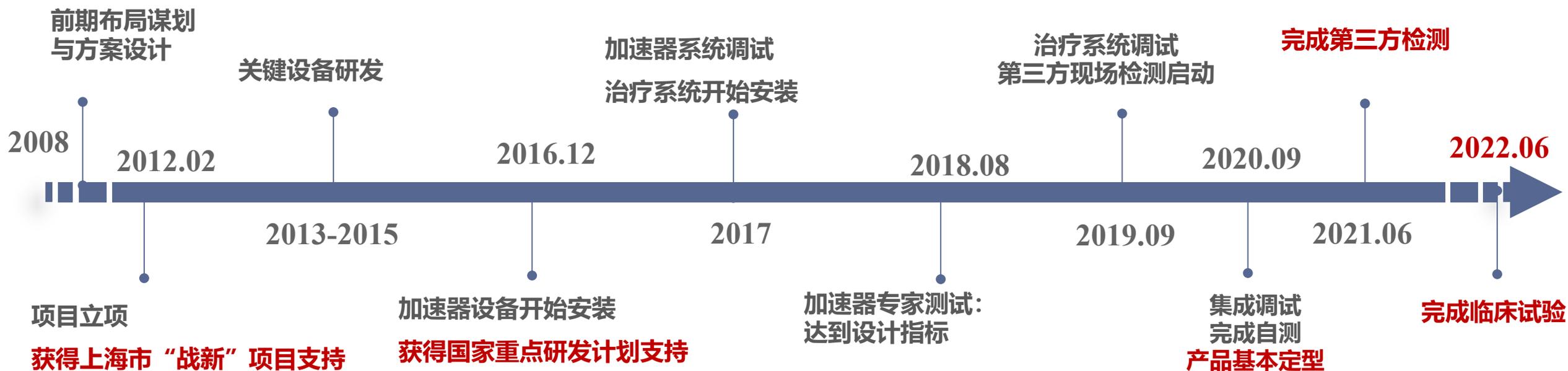


# 瑞金质子中心地下建筑布局



# 总体研制进展概况

- 完成加速器、固定束治疗室、180度旋转束治疗室（第一注册单元）的研制、注册检测、临床试验，以及产品注册；
- 完成360度旋转治疗系统设备安装与系统联调，正在进行带束调试和自检；
- 完成了眼束治疗系统的设备安装、束流性能调试和参数初步测试。



# 质子治疗装置加速器系统

- 国内首台医用同步质子加速器，工作能量为70-235MeV；各项技术指标已达到设计要求，与国外同类装置处于同一水平；
- 质子加速器系统包括：注入器、同步加速器、公共输运线、固定束与旋转束输运线等；
- 5年来，加速器运行稳定可靠，开机率达到95%以上，平均修复时间（MTTR）小于0.5小时。



# 质子加速器系统



直线注入器



同步加速器



高能运输线

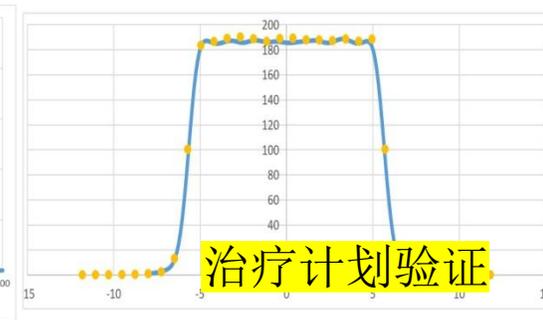
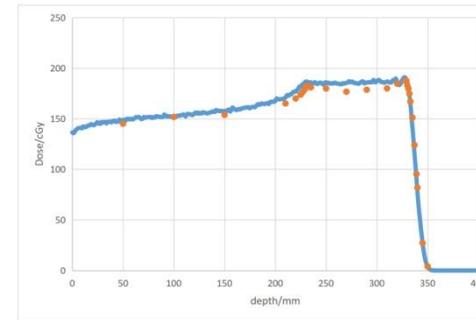
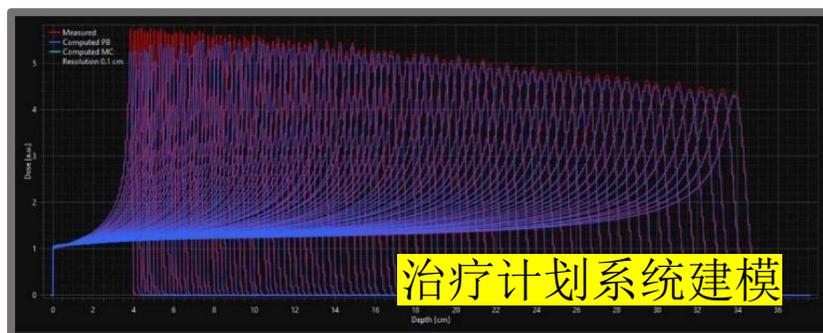
# 固定束与180度旋转束治疗系统



固定束治疗室 (实景)



180°旋转束治疗室 (实景)



# 固定束治疗系统

- 提供水平治疗角度质子束
- 配有Kv级X光图像引导系统，快速自动配准
- 配合六维机器人治疗床调整治疗角度
- 适合治疗头部、前列腺等肿瘤，也可结合旋转束治疗室治疗其他肿瘤
- 治疗系统体积小，大幅降低辐射屏蔽要求和基建成本
- 在研发初期，为验证笔形束扫描系统提供条件



# 旋转束治疗系统



旋转束治疗室

## ➤ 旋转机架

- 180° 半周旋转，治疗室空间宽敞，便于摆位等操作，患者舒适度较高
- 性能达到国际先进水平：占地面积较小，旋转部分重量仅为96吨，等中心点精度高（ $\pm 0.5\text{mm}$ ， $\pm 1\text{mm}$ ）

- 与六维治疗床配合，可提供任意治疗角度
- 配有Kv级X光图像引导系统，快速自动配准
- 配有呼吸运动管理系统，用于治疗呼吸运动器官肿瘤
- 适合所有传统放射治疗适应症：包括头颈部肿瘤、非小细胞肺癌、肝癌等体部肿瘤

# 360度旋转机架与治疗系统

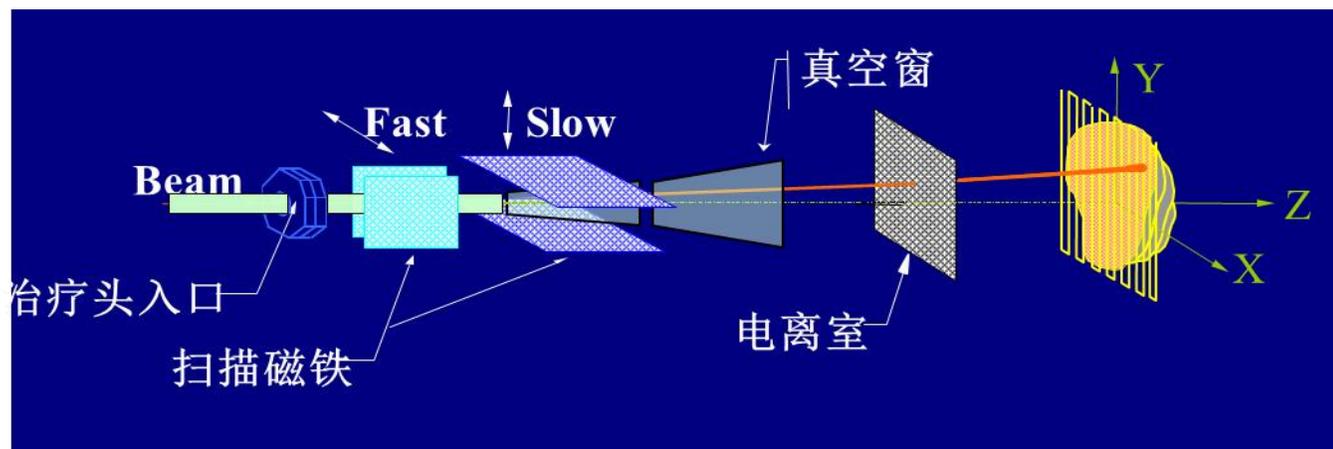
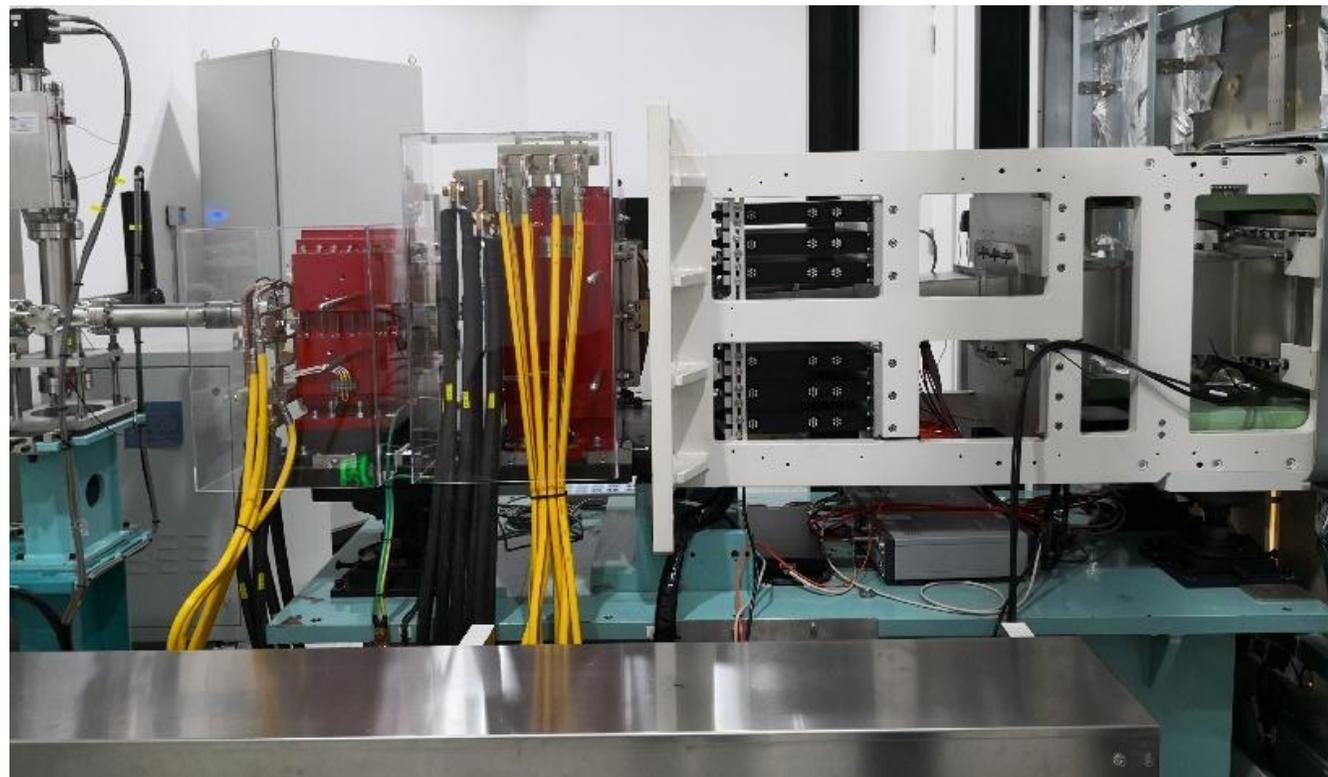
**360°紧凑型旋转机架:** 总长9.5米, 直径8.8米, 旋转重量93吨, 等中心点精度实测 $< \pm 0.5\text{mm}$



- 适应症广泛, 较半周治疗室更高效实施质子调强治疗IMPT
- 先进的CBCT智能三维定位系统, 还可外加In-room CT
- 基于靶区运动幅度的AI呼吸门控系统, 与CBCT配合, 治疗精准快速

# 点扫描治疗头

最大射程	34 g/cm <sup>2</sup>
最大SOBP长度	30 g/cm <sup>2</sup>
照野	40 cm (ScanU) 30 cm (ScanV)
SAD	2.87m (ScanU) 2.42m (ScanV)
扫描速度	2cm/ms (ScanU) 0.5cm/ms (ScanV)
束斑尺寸 (FWHM)	5 – 14 mm
剂量相对精度	+/-2%
剂量重复性	0.5%
平坦度	5%



# 固定（旋转）治疗室治疗流程



# 上海质子治疗装置注册检测

## (北京医疗器械检验所)



### 检 验 报 告

报告编号: W-E-0776-2018

委托方 上海艾普强粒子设备有限公司

样品名称 质子治疗系统

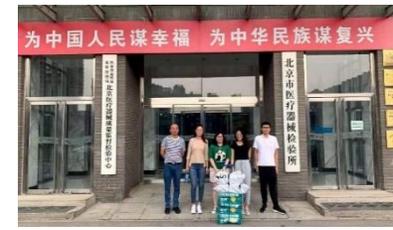
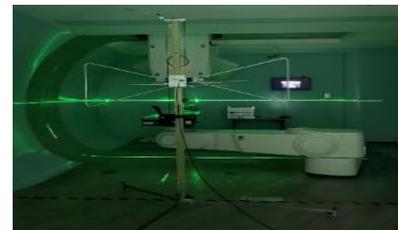
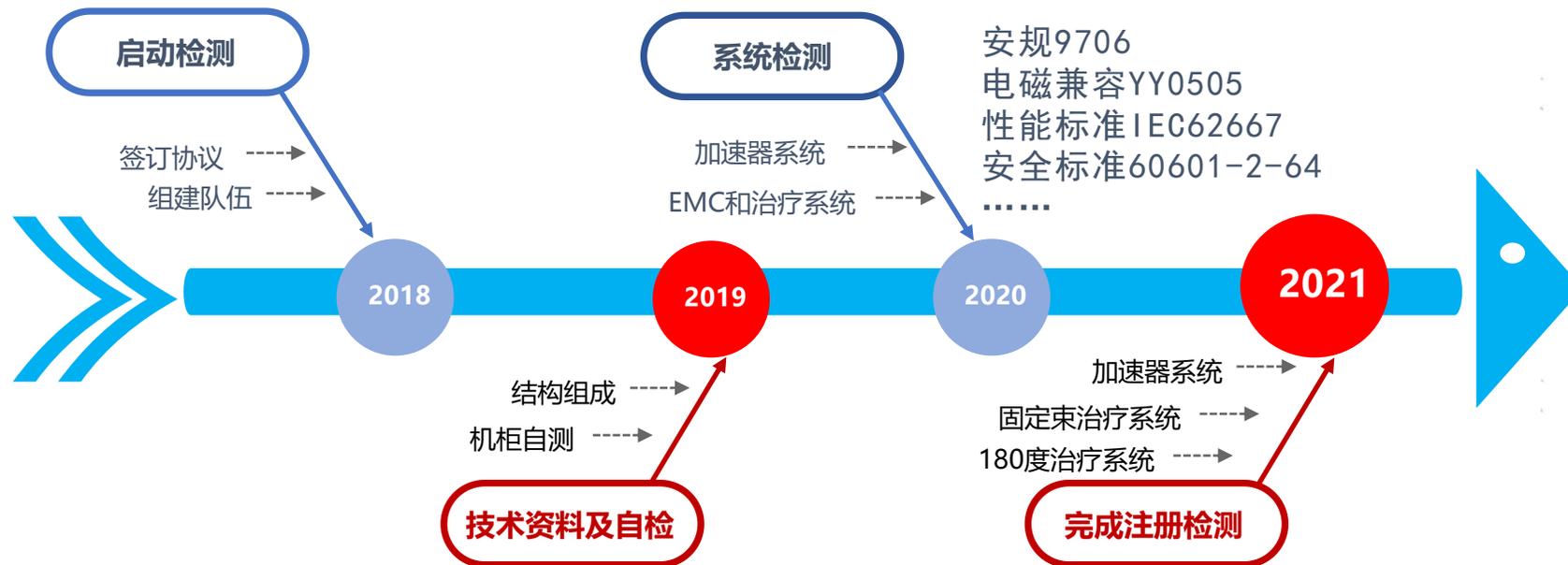
型 号 SAPT-PS-01

检验类别 注册检验 ( )

注册补充检验 ( )

其他检验 (√) 委托检验

国家食品药品监督管理局北京医疗器械质量监督检验中心







2022-6-3 临床试验最后三名患者完成治疗

# 注册取证

- 2022年8月29日 向国家药监总局预提交注册申请资料
- 2022年9月19日 向国家药监总局正式提交注册申请
- 2022年9月19-21日 通过上海市药监局GMP体系核查
- 2022年9月26日 获国家药监总局批准上市，取得注册许可证



GMP体系核查现场



## 中华人民共和国医疗器械注册证

注册证编号：国械注准20223051290

注册人名称	上海艾普强粒子设备有限公司
注册人住所	上海嘉定工业区叶城路1411号2幢一层A区
生产地址	上海市嘉定区兴贤路1180号1幢
代理人名称	/
代理人住所	/
产品名称	质子治疗系统
型号、规格	SAPT-PS-01
结构及组成	质子治疗系统包括加速器系统 and 治疗系统两部分。其中加速器系统包括注入器系统、低能传输系统、主加速器系统、高能束流传输系统、辅助电气系统；治疗系统包括固定束治疗系统、180°旋转束治疗系统和治疗计划系统。详见附件。
适用范围	该产品提供质子束进行放射治疗，适用于治疗全身实体恶性肿瘤及某些良性疾病，具体适应症应由临床医师根据实际情况确定。
附件	产品技术要求
其他内容	/
备注	1、产品上市后继续开展临床研究，关注患者治疗的短期疗效、长期疗效以及不良事件，最长随访周期宜达到5年。 2、进一步加强产品网络安全漏洞评估工作。

审批部门：国家药品监督管理局



批准日期：二〇二二年九月二十六日

生效日期：二〇二二年九月二十六日

有效期至：二〇二七年九月二十五日

# 总结

- 加速器光源是支撑科技发展的利器，是世界上数量和用户最多的加速器大科学装置，目前仍然处于蓬勃发展的新时期；
- 上海加速器光源经过近30年的发展，已初步形成了同步辐射光源、软X射线自由电子激光和高重频硬X射线自由电子激光的光子大科学装置集群；
- 上海同步辐射光源自2009年向用户开放以来，支撑我国科学家在科学研究上取得了一些列重大重要成果；
- 上海软X射线自由电子激光装置于2023年开始向用户开放，上海硬X射线自由电子激光装置于2018年开工建设，预计2025年首次出光、2027年建成。
- 作为加速器大科学装置的技术溢出，上海质子治疗装置已作为国产医疗器械通过国家药监局审查，取得注册许可证、获批上市。

感谢聆听！

# 6 Nobel Prizes based on SR based X-ray work!

## Chemistry

- 1936: **PETER DEBYE**
- 1962: **MAX PERUTZ** and **SIR JOHN KENDREW**
- 1964: **DOROTHY HODGKIN**
- 1976: **WILLIAM LIPSCOMB**
- 1985: **HERBERT HAUPTMAN** and **JEROME KARLE**
- 1988: **JOHANN DEISENHOFER**,  
**ROBERT HUBER** and **HARTMUT MICHEL**
- 1997: **PAUL D. BOYER** and **JOHN E. WALKER\***
- 2003: **PETER AGRE**, and **RODERICK MACKINNON\***
- 2006: **ROGER KORNBERG\***
- 2009: **VENKATRAMAN RAMAKRISHNAN**,  
**THOMAS STEITZ** and **ADA YONATH**
- 2012: **Robert J. Lefkowitz**, and **Brian K. Kobilka**
- 2020: **Emmanuelle Charpentier** and **Jennifer A. Doudna**

## Physics

- 1901: **WILHELM RÖNTGEN**
- 1914: **MAX VON LAUE**
- 1915: **SIR WILLIAM HENRY BRAGG**  
and **SIR WILLIAM LAWRENCE BRAGG**
- 1917: **CHARLES BARKLA**
- 1924: **KARL MANNE SIEGBAHN**
- 1927: **ARTHUR COMPTON**
- 1981: **KAI SIEGBAHN**

## Medicine

- 1946: **HERMANN JOSEPH MULLER**
- 1962: **FRANCIS CRICK**, **JAMES WATSON**  
and **MAURICE WILKINS**
- 1979: **ALAN M. CORMACK** and  
**SIR GODFREY N. HOUNSFIELD**

- 1997 J.E. Walker (*F1 – ATPase*)
- 2003 R. McKinnon (*Cellular ion channels*)
- 2006 R.D. Kornberg (*RNA polimerase*)
- 2009 V. Ramakrishnan, T. Steitz, A. Yonath (*Ribosome*)
- 2012 R. Lefkowitz, B. Kobilka (*G-protein coupled receptor*)
- 2020 E. Charpentier and J.A. Doudna (*Genome editing*)

基于同步辐射光源