

人工智能在核技术领域的应用

焦毅

中国科学院高能物理研究所

2025-11

内容

一. 核物理与核技术方向介绍

- 加速器等大科学装置介绍

二. 人工智能在加速器大装置中的应用

- AI的发展、应用简介
- 重要发展方向

三. 总结

核技术及应用专业

- 核技术及应用专业的专业代码是082703。
- 该专业属于工学门类，具体属于核科学与技术学科类别。
- 核技术及应用专业主要涉及：
 - ✓加速器物理及应用
 - ✓辐射技术及应用
 - ✓核电子学与核探测技术
 - ✓核资源勘查技术及应用
 - ✓核信息处理技术等方向
- 培养具备核技术基础研究和实际应用研究能力的高级专门人才。

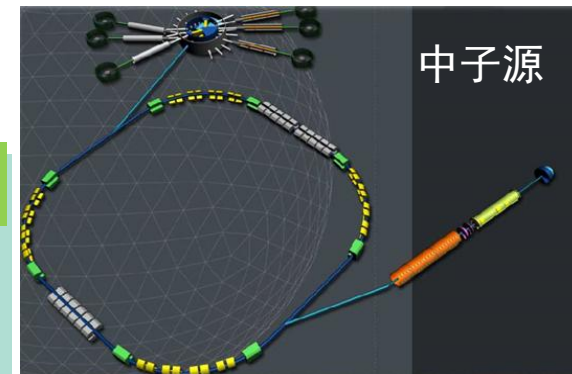
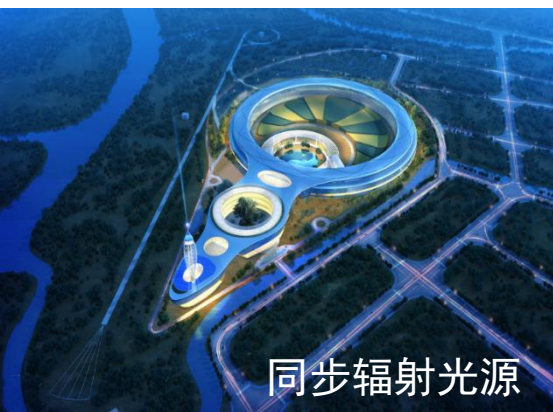
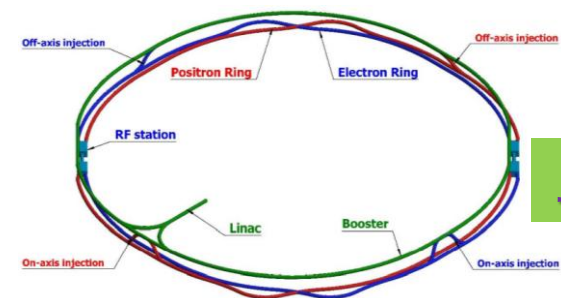
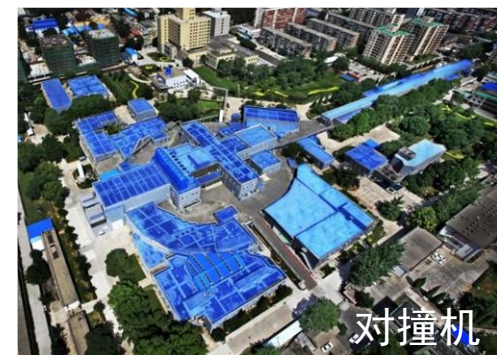
我国的粒子物理与核物理相关的大科学装置

广泛应用于材料科学、生命科学、能源科学、地球与空间科学等领域，成为推动交叉学科创新的重要动力



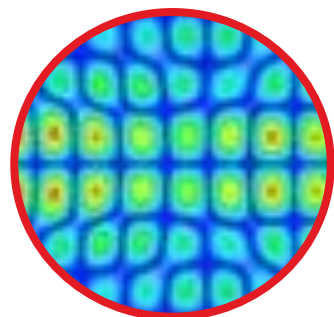
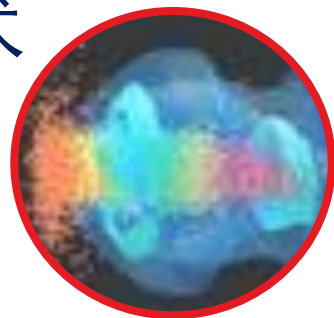
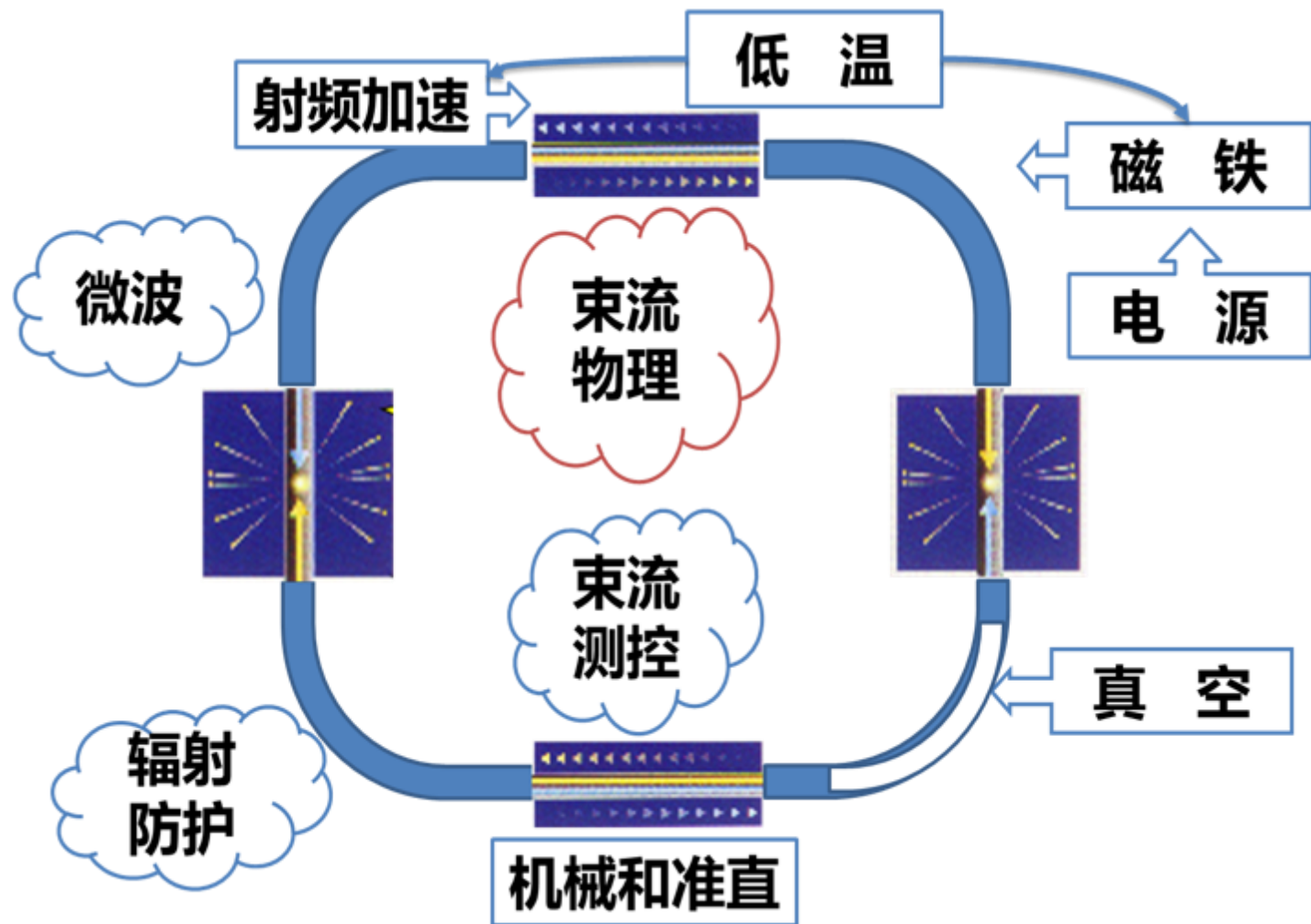
图中一半以上大科学装置基于粒子加速器

粒子加速器 —— 应用广泛

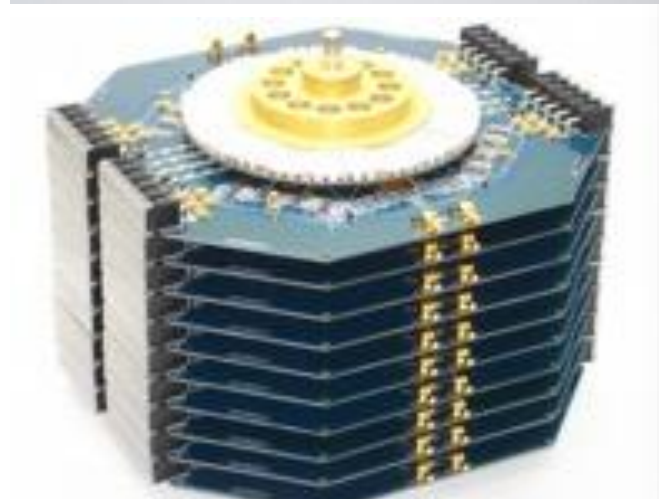
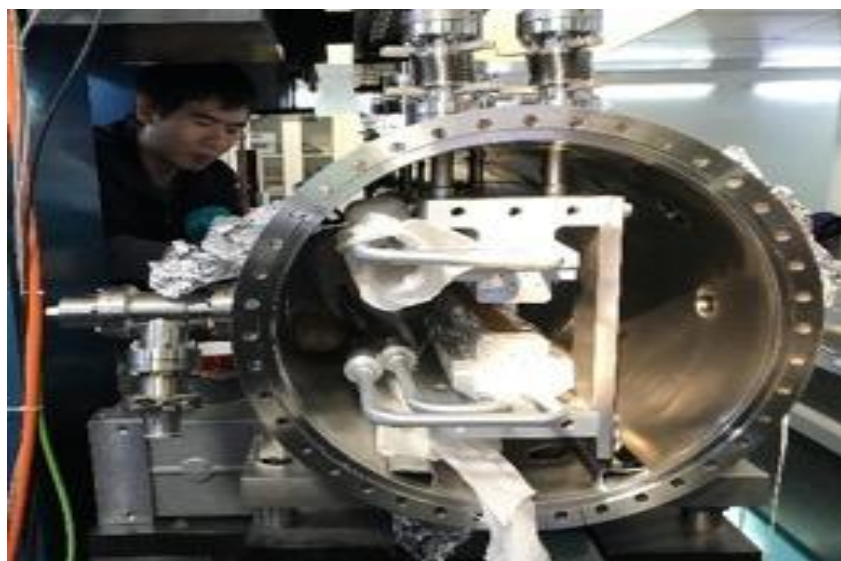
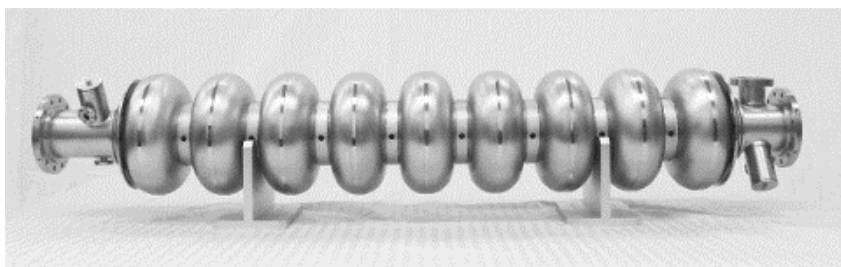
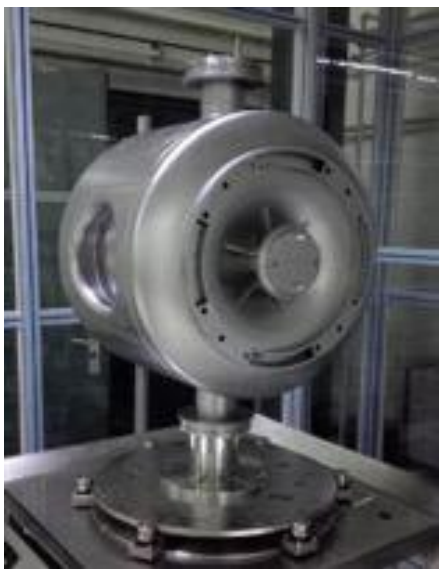


粒子加速器 —— 加速带电粒子的装置

- 如何加速带电粒子 —— 加速器物理与技术

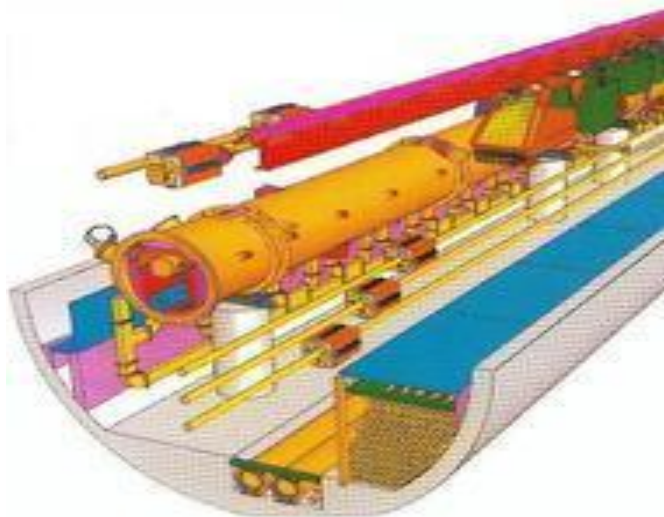


组成加速器的各种部件



粒子加速器：将带电粒子加速至接近光速

爱因斯坦质能公式



$$\beta \equiv \frac{v}{c} \quad \gamma \equiv \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}} \quad \beta = \sqrt{1 - 1/\gamma^2}$$

$$U = \gamma mc^2 \quad p = (\beta\gamma)mc = \beta \left(\frac{U}{c} \right) \quad W = (\gamma - 1) mc^2$$

$$1 \text{ eV} = (1.602 \times 10^{-19} \text{ C})(1 \text{ V}) = 1.602 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$1 \text{ MeV} = 1.602 \times 10^{-13} \text{ J}$$

$$1 \text{ GeV} = 1.602 \times 10^{-10} \text{ J}$$

电子静止能量：0.511 MeV （ $0.511 \times 10^6 \text{ eV}$ ）

北京正负电子对撞机（BEPC）电子能量：2.5 GeV
（ $2.5 \times 10^9 \text{ eV}$ ），达到0.999999979倍的光速



与粒子加速器有关的诺贝尔物理学奖

- 1.1939年：**欧内斯特·劳伦斯，以表彰他发明和发展了回旋加速器，以及人工放射性元素的发现。
- 2.1951年：**约翰·道格拉斯·科克罗夫特和欧内斯特·托马斯·S·沃尔顿，以表彰他们通过使用人工加速的粒子实现了首次核反应。
- 3.1959年：**埃米利奥·塞格雷和欧文·张伯伦，以表彰他们发现了反质子。
- 4.1968年：**路易斯·W·阿尔瓦雷斯，以表彰他通过开发利用氢泡室技术和数据分析对基本粒子物理做出的决定性贡献。
- 5.1976年：**伯顿·里克特和丁肇中，以表彰他们在发现一种新型的重的基本粒子中所作的先驱性工作，即 J/ψ 粒子的发现。
- 6. 1984年：**卡洛·鲁比亚和西蒙·范德米尔，以表彰他们在CERN的实验中发现了W及Z玻色子，这一发现证实了弱力和电磁力的统一，即标准模型的弱电理论。
- 7. 1992年：**乔治·夏帕克，以表彰他在CERN发明了多丝正比室，这一发明开创了电子探测粒子的新时代，特别是多丝正比室在探索物质最内部结构技术上的突破。
- 8. 2013年：**弗朗索瓦·恩格勒和彼得·希格斯，以表彰他们在理论上预言了希格斯玻色子（Higgs boson）的存在。这一发现是在2012年由欧洲核子研究中心（CERN）的大型强子对撞机（LHC）实验中实现的，从理论提出到实验验证历经了近50年的时间。
- 9. 2018年：**热拉尔·穆鲁与唐娜·斯特里克兰共同研发了啁啾脉冲放大技术（Chirped Pulse Amplification, CPA）。这项技术为人类创造了最短、最强的激光脉冲，开辟了新的研究领域。。。

粒子加速器推动着人类文明进步和社会发展

➤探索物质本质的重要工具

20世纪近半数的诺贝尔物理和化学奖与高能粒子加速器有关！

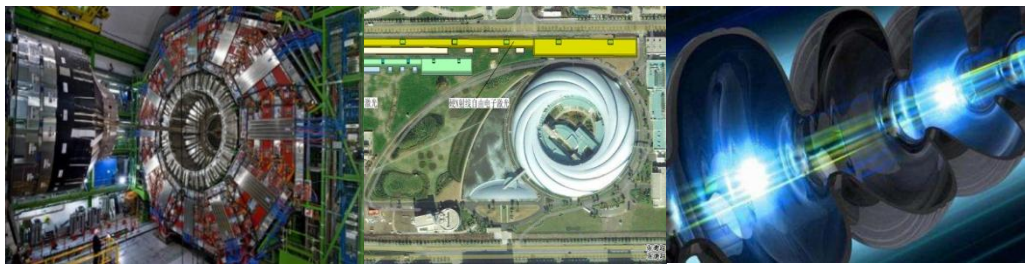
- 高能粒子对撞机
- 强流离子加速器

➤多学科交叉研究的重要平台

- 同步辐射光源
- 散裂中子源

➤具有重要战略意义的高技术

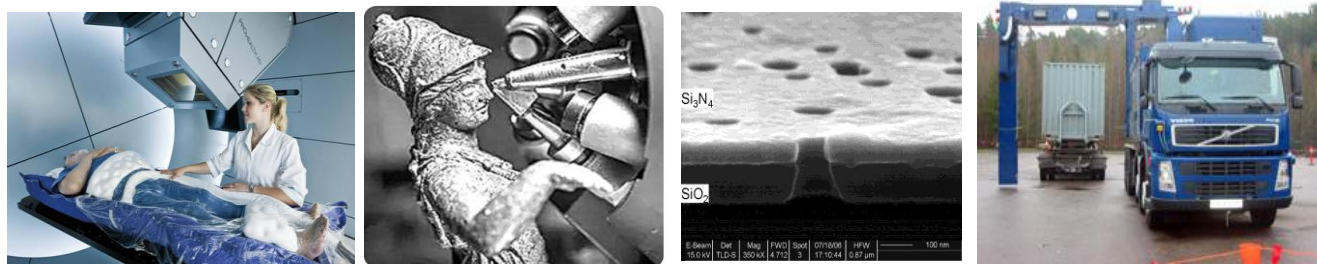
- 自由电子激光
- 洁净核能源



加速器——“顶天立地”

➤国民经济/人类健康等领域应用广泛

医学\生物\材料\考古\芯片\制造业\安防...



我国加速器建设爆发期：北京/合肥/上海/武汉/深圳光源、东莞散裂中子源、深圳自由电子激光、惠州CiADS、数十个质子/重离子放疗装置。。。

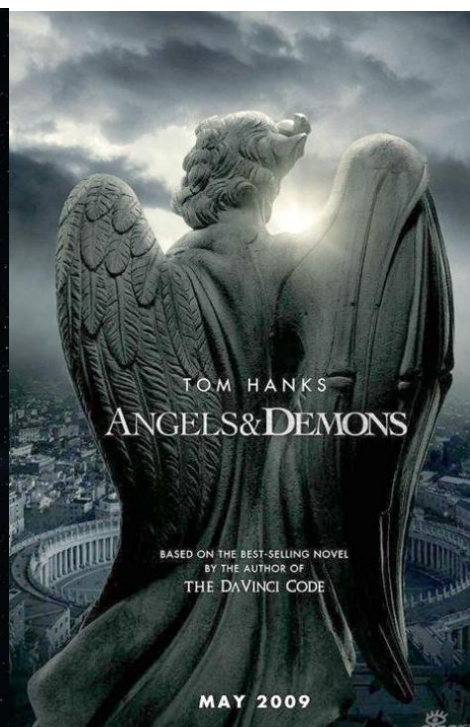
粒子加速器成为科幻作品的重要角色

《三体》《朝闻道》《微观尽头》：加速器是人类文明的里程碑

《时间之墟》：加速器导致时间重启

《天使与魔鬼》：CERN加速器制造反物质武器

《科洛弗悖论》：太空加速器实验导致平行宇宙重叠。。。



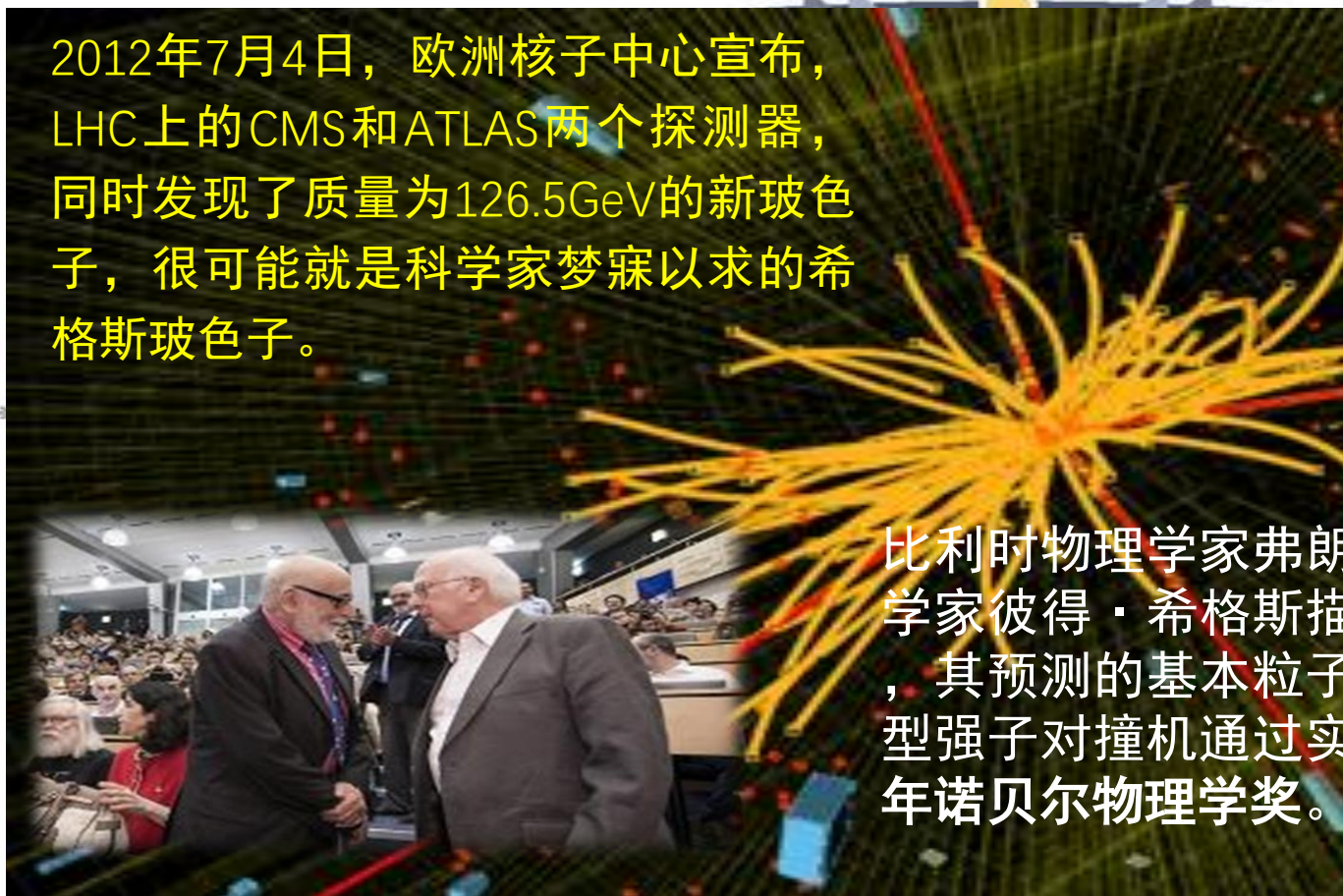
欧洲大型强子对撞机LHC, 27 km, 7 TeV, CERN

2012年7月4日，欧洲核子中心宣布，LHC上的CMS和ATLAS两个探测器，同时发现了质量为126.5 GeV的新玻色子，很可能就是科学家梦寐以求的希格斯玻色子。

未来对撞机
FCC



比利时物理学家弗朗索瓦·恩格勒特和英国物理学家彼得·希格斯描述了粒子物理学标准模型，其预测的基本粒子——希格斯玻色子，被欧洲大型强子对撞机通过实验发现，他们因此获得2013年诺贝尔物理学奖。

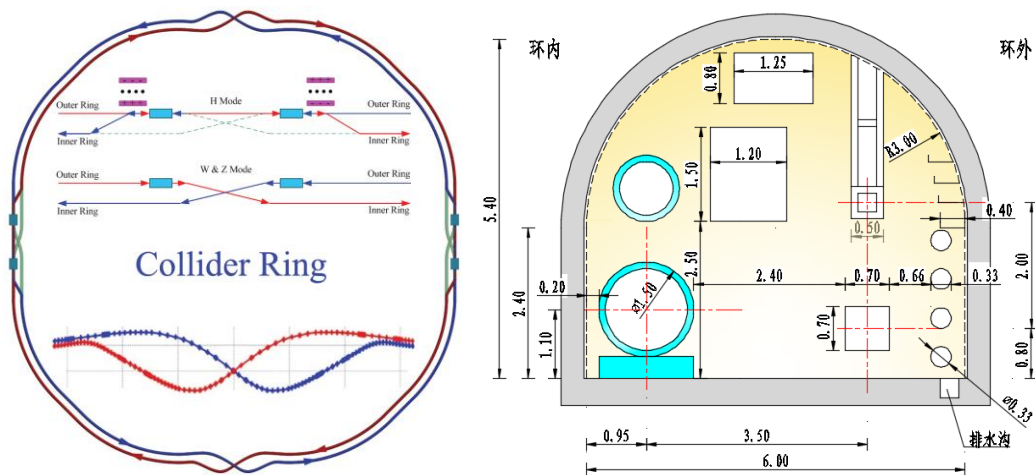


LINAC 3
Ions

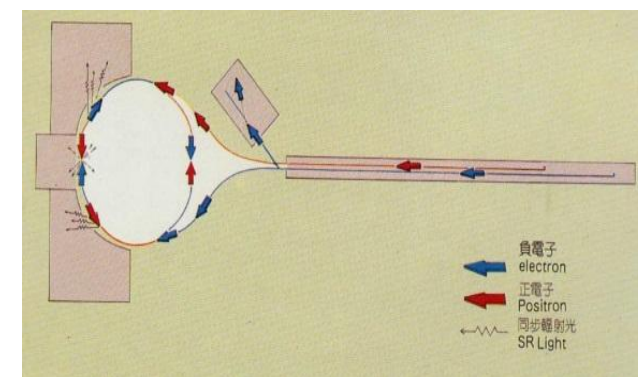
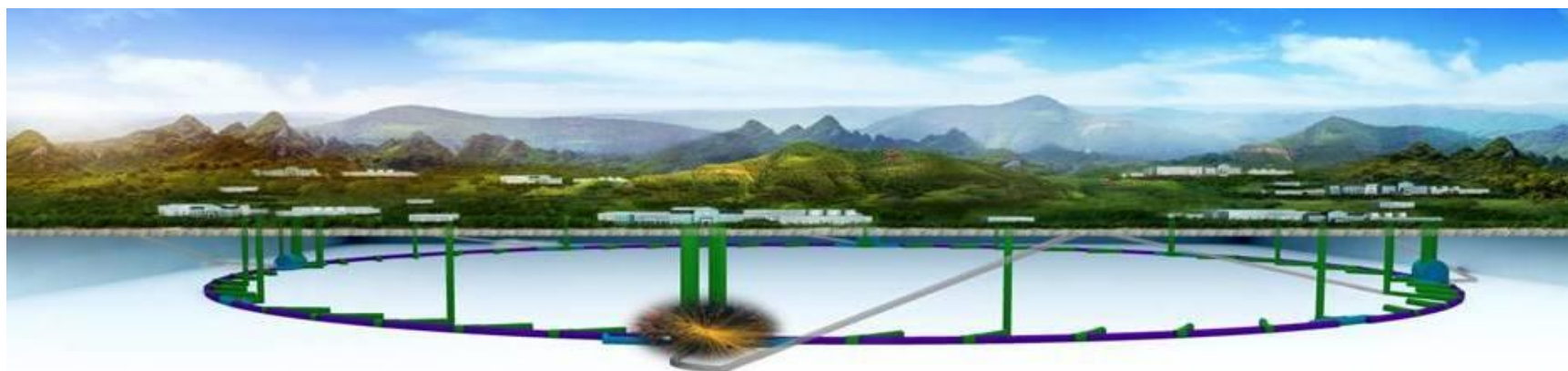


LHC
2005 [78 m]

希格斯工厂： 环形正负电子对撞机 (CEPC)



CEPC: 100 km, 对撞能量 90~240 GeV
BEPC长度的~400倍, 能量的~50倍
目标: 精确研究希格斯粒子, 寻找新物理



北京正负电子对撞机 (BEPC)

北京正负电子对撞机 (BEPC)



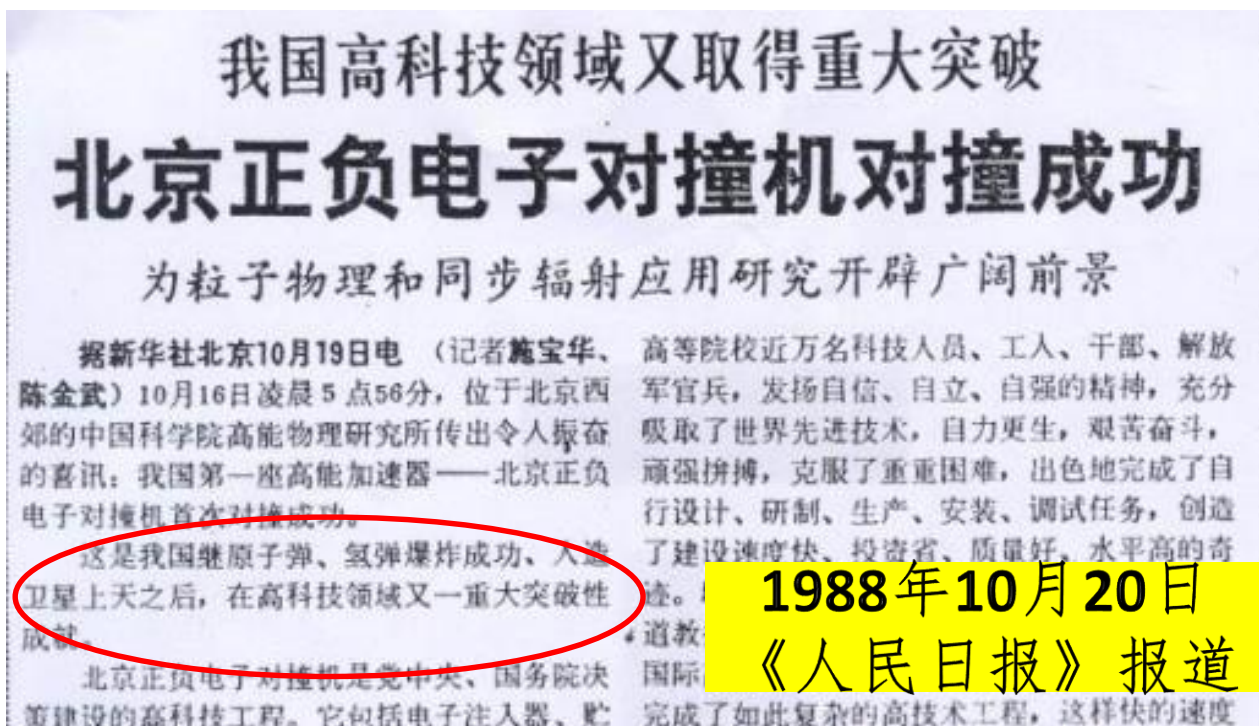
中国科学院高能物理研究所
北京正负电子对撞机国家实验室
邓小平题

1984.10	BEPC 工程奠基
1987.06	注入器—电子直线加速器安装完毕
1987.11	储存环安装完毕
1988.10	在BEPC中实现正负电子对撞
1988.12	在1.55 GeV时亮度达到设计值 $2 \times 10^{30} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$
1989.05	开始高能物理和同步辐射实验
1992.02	Tau轻子质量测量
1999.02	亮度改进项目通过验收, 亮度提高约2倍 $\sim 4.9 \times 10^{30} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$
2001.03	获取5800万 J/ψ 事例 —— 2006年发现X(1835)
2002.03	获取1400万 ψ' 事例
2003.02	1.89 GeV时亮度达到 $1.0 \times 10^{31} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$
2003.05	获取35.5 $\text{pb}^{-1} \psi''$ 事例
2004.05	高能物理实验圆满结束, BEPCII安装建设开始
2005.07	同步辐射实验圆满结束, BEPC正式关机

北京正负电子对撞机 (BEPC)

国家科技进步特等奖

1988年10月16日BEPC 首次实现正负电子对撞，完成了邓小平提出的“我们的加速器必须保证如期甚至提前完成”的目标。10月24 日邓小平在高能所发表了“中国必须在高科技领域占有一席之地”的著名讲话。

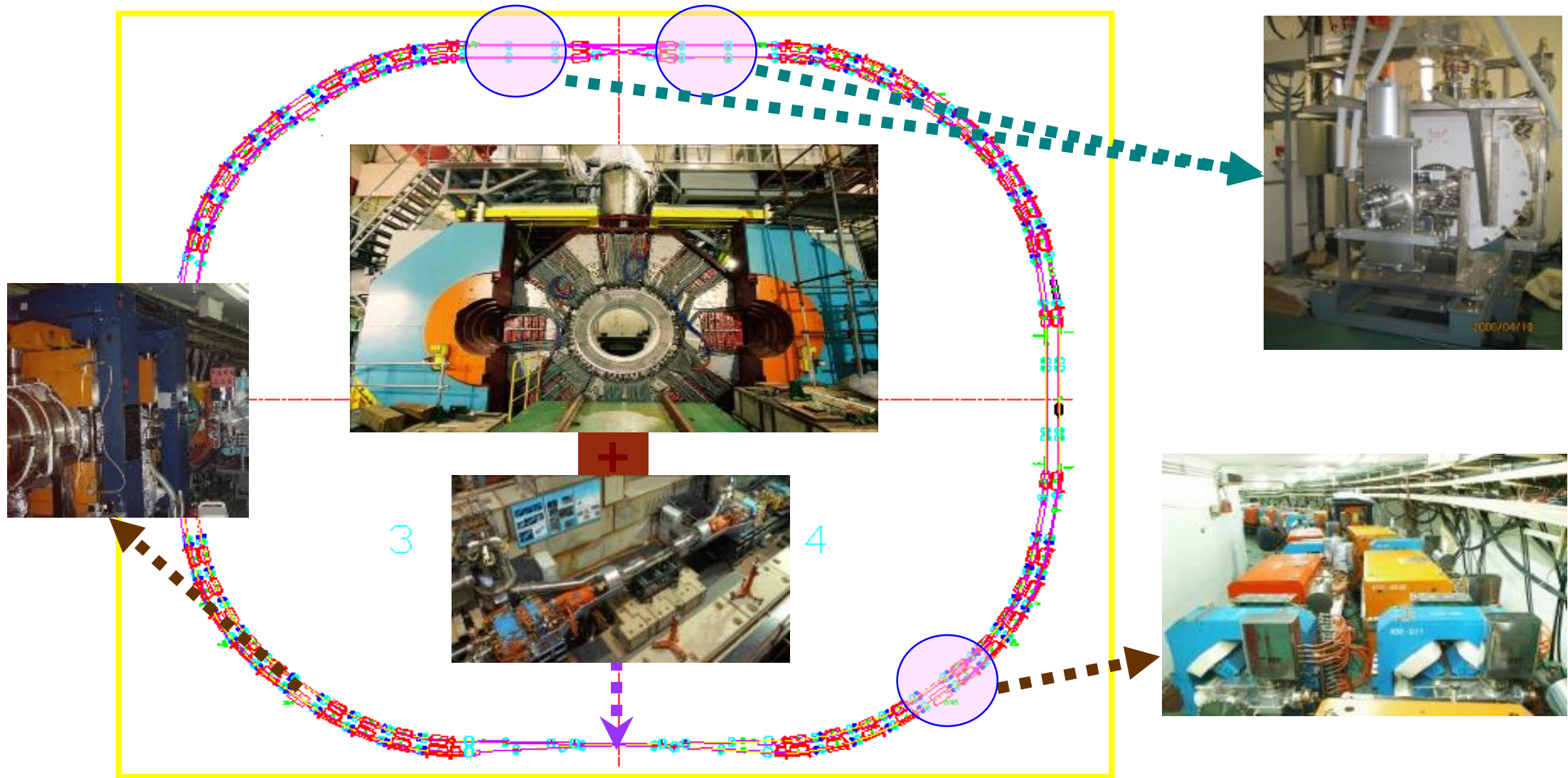


国际八大高能物理研究中心之一

- 1988年建成，1990年通过国家验收，在 τ -粲物理领域国际领先，获得许多重要成果
- “一机两用”，是国内首台同步辐射光源 (BSRF)
- 束流能量：1 - 2.5 GeV，对撞亮度@1.89 GeV: $10^{31}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$



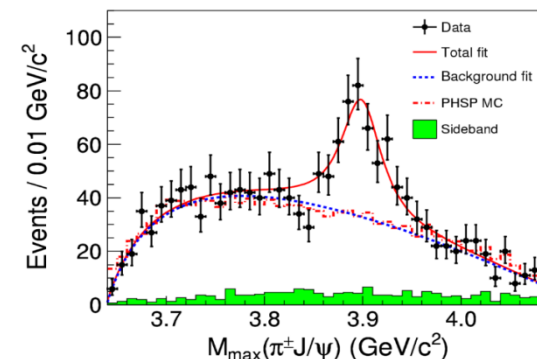
BEPC-II: 亮度提升100倍, “一机三环”结构



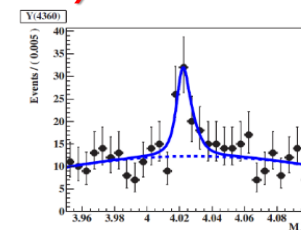
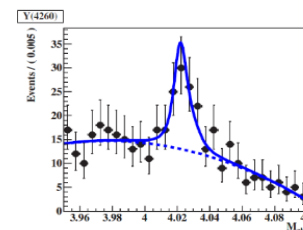
工程于2004年初动工, 2008年7月完成建设任务, 2009年7月通过国家验收

BEPC-II: 成为粲能区世界亮度最高的对撞机

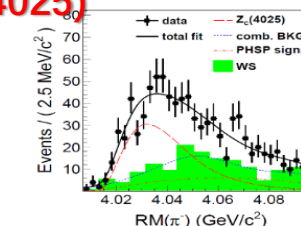
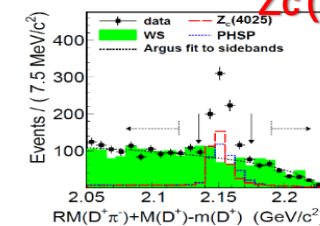
- 2013年发现新粒子 $Z_c(3900)$ ，可能是科学家长期寻找的一种奇特强子。对于检验量子色动力学具有重要意义。
- 随后又发现同位旋三重态的 $Z_c^\pm(4020)$ 和 $Z_c(4025)$ ，表明 Z_c 很可能是一个新的家族！
- 被美国物理学会评为2013年国际物理领域11项重要成果之首。



$Z_c^\pm(4020)$



$Z_c(4025)$



BESIII: PRL110, 252001 (2013)

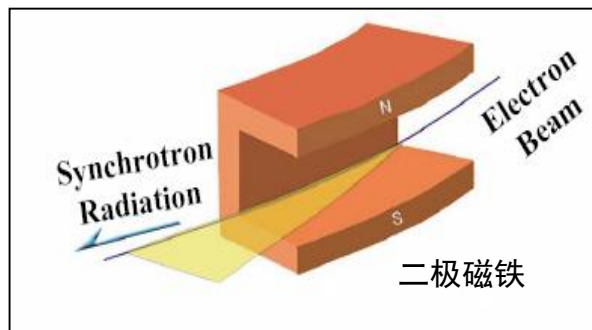
加速器科学装置的一个重要方向：同步辐射光源



$$U_{\text{photon}} \propto E^4 / \rho$$

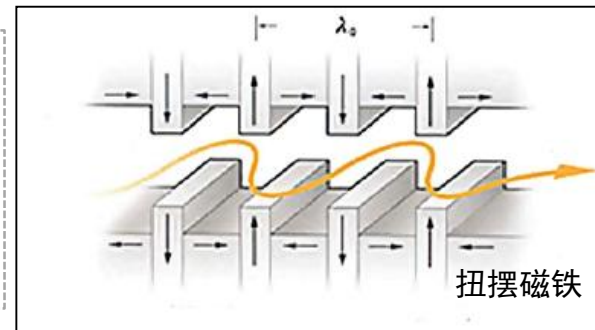
首先在同步加速器上
发现，称为同步辐射

加速器科学装置的一个重要方向：同步辐射光源



利用相对论性电子在磁场中偏转。
电子沿弯转轨道运动产生**高性能同步辐射**：

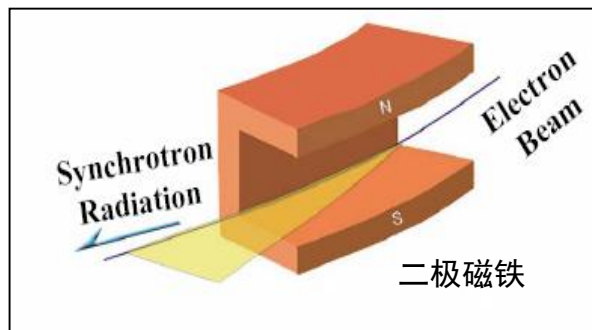
- 宽波段、高准直、高偏振、
高亮度、多用户、高稳定性



$$U_{\text{photon}} \propto E^4 / \rho$$

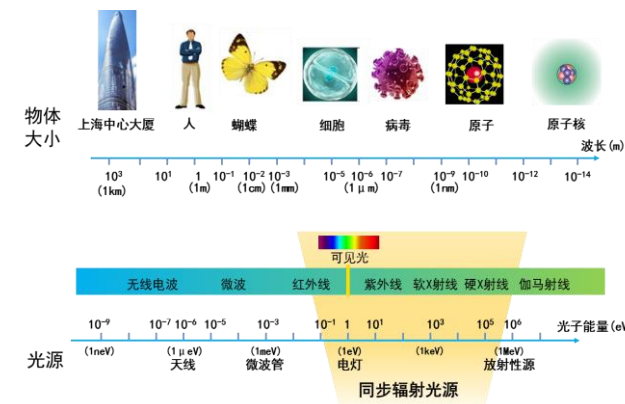
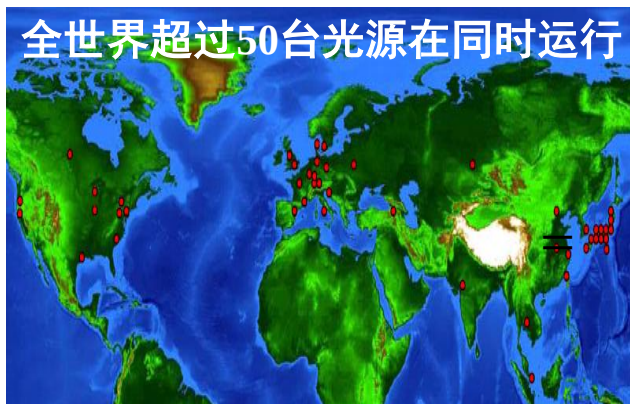
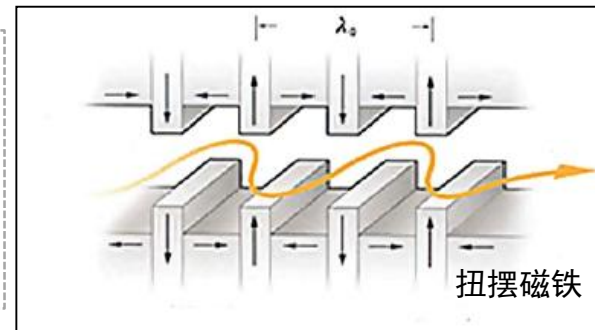
首先在同步加速器上
发现，称为同步辐射

加速器科学装置的一个重要方向：同步辐射光源



利用相对论性电子在磁场中偏转。
电子沿弯转轨道运动产生**高性能同步辐射**：

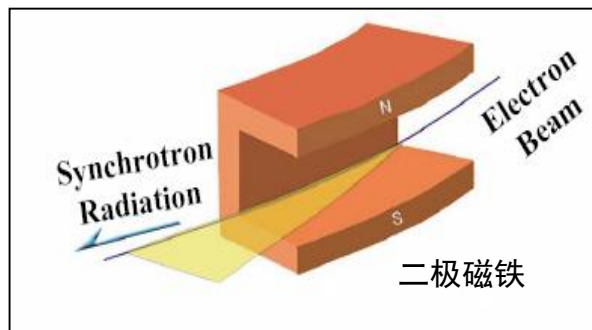
- 宽波段、高准直、高偏振、高亮度、多用户、高稳定性



$$U_{\text{photon}} \propto E^4 / \rho$$

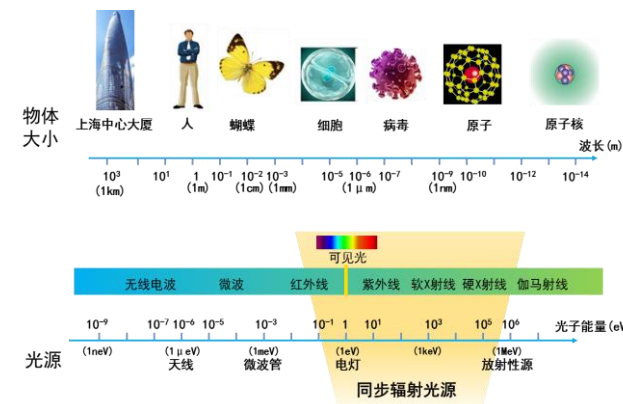
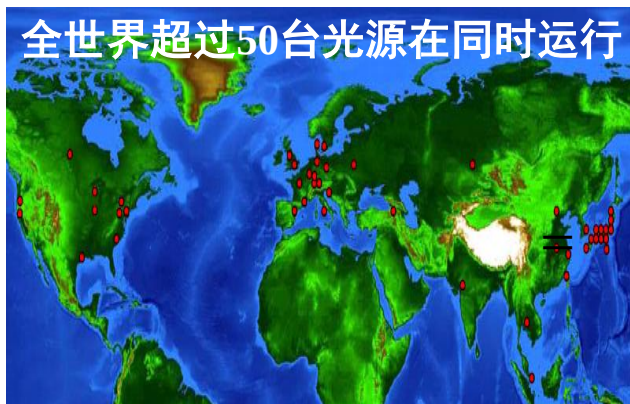
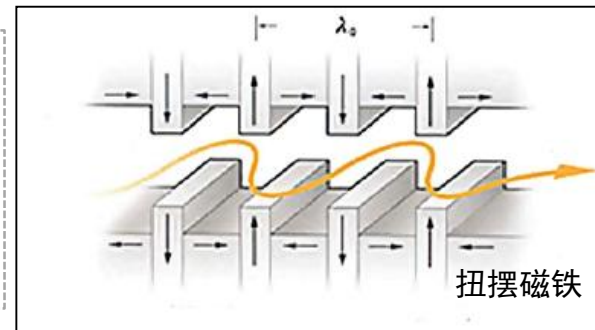
首先在同步加速器上发现，称为同步辐射

加速器科学装置的一个重要方向：同步辐射光源



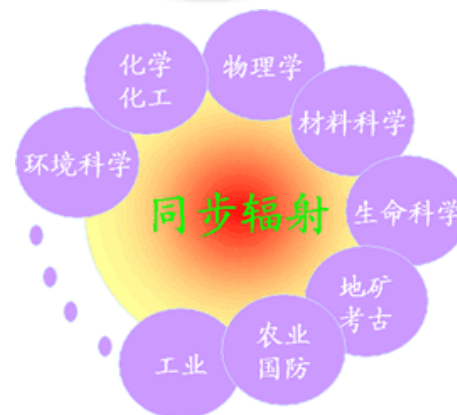
利用相对论性电子在磁场中偏转。
电子沿弯转轨道运动产生**高性能同步辐射**：

- 宽波段、高准直、高偏振、高亮度、多用户、高稳定性



$$U_{\text{photon}} \propto E^4 / \rho$$

首先在同步加速器上发现，称为同步辐射



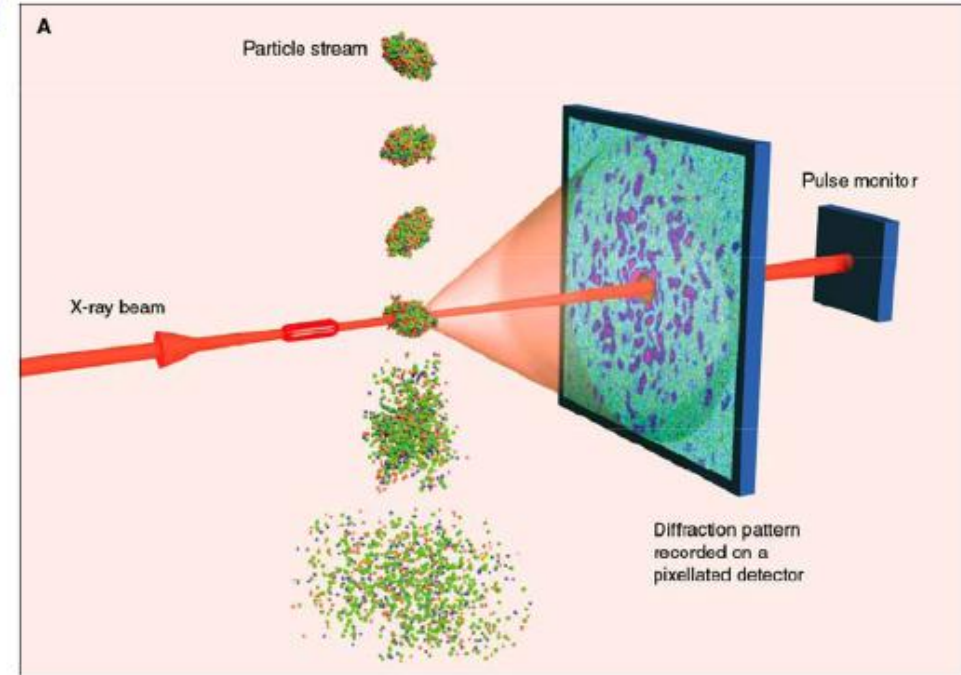
上海光源（2009-）

- 产出研究成果超过4000篇。
- 取得多项国内国际重大突破
- 国家科技创新重要支撑设施

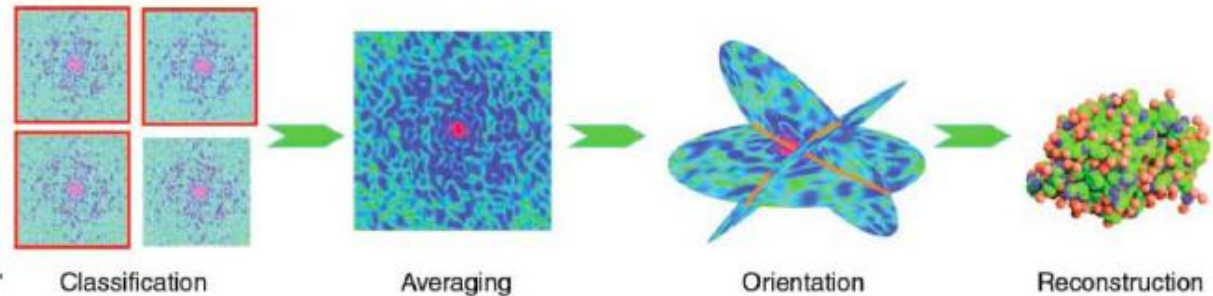
同步辐射光源能做什么？

Structure determination of single molecules before the Coulomb explosion

同步辐射
(用途最广、性能最优越的X射线源)



H. Chapman
(2007)



同步辐射光源能做什么？

- 同步辐射光源是解决重大科学问题的多学科平台

国家需求的支撑



性能先进的平台
核心技术的发展



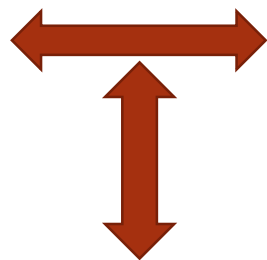
科学前沿的突破



面向世界科技前沿

面向国家重大需求

面向国民经济主战场



关键核心技术的可持续发展

服务国家的重大需求和基础科学研究

同步辐射光源提供的先进实验技术，为解决国家需求和前沿科学问题提供先进的研究手段

技术发展和转化

关键技术是基础，在解决科学问题的同时能得到可持续的发展

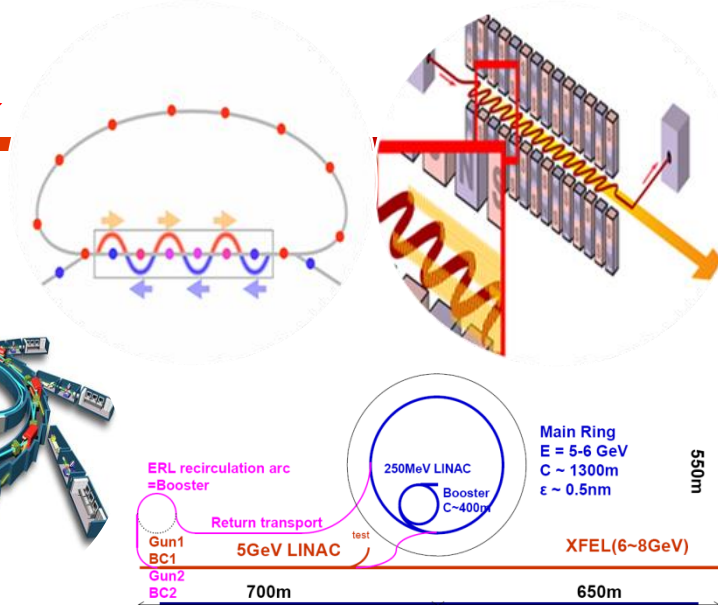
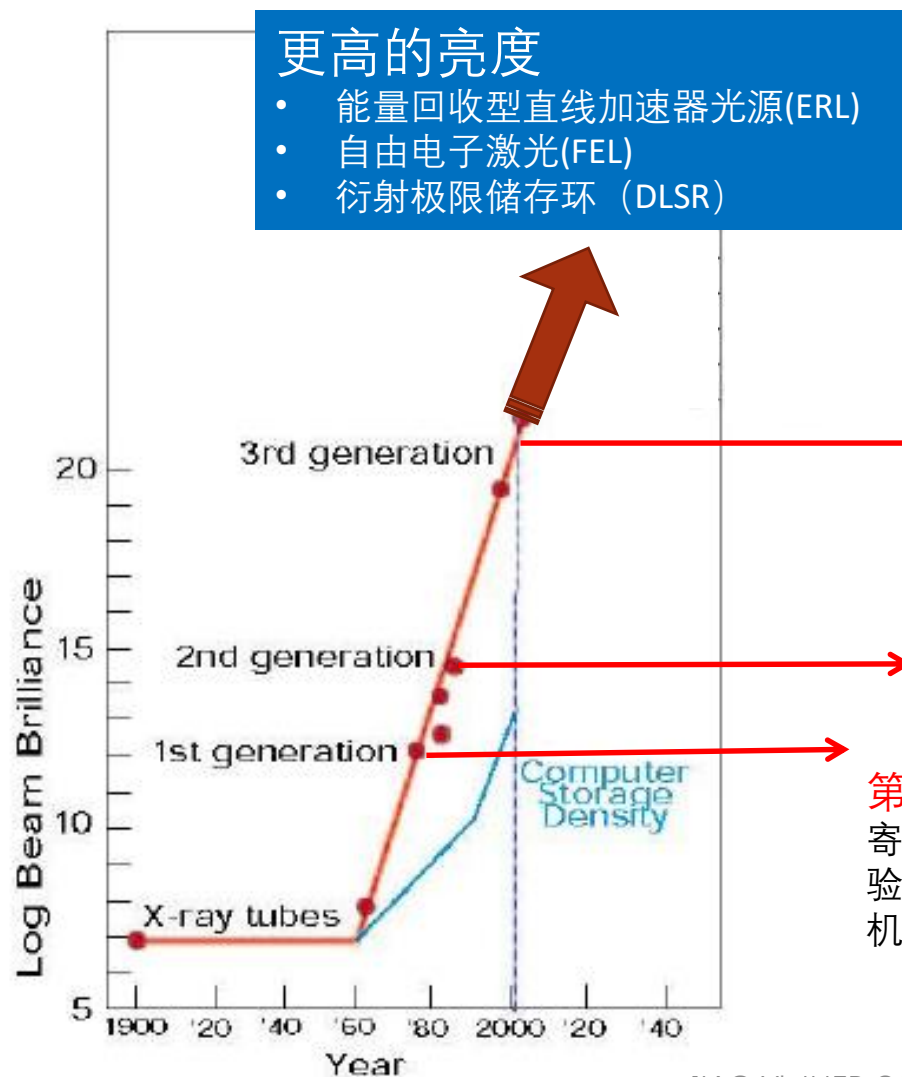
同步辐射光源能做什么？

- 不断创新的前沿研究能力
 - 基于同步辐射的研究已获得5项诺贝尔奖。
- 非常广泛的应用领域
 - 所有与微观结构有关的领域，如物理学、化学、生命科学和医学、材料科学和工程、能源科学和技术、地球和环境科学、纳米科技……
- 对众多用户的巨大支撑能力
 - 欧美四大装置（ESRF、APS、ALS、NSLS）：每年用户 2万人，实验1万个，发表文章5千篇，每年在“Science”、“Nature”、“PRL”上发表论文超过200篇。
- 广泛的工业应用
 - 专用束线、5个专用光源

2009年诺贝尔化学奖：核糖体结构



同步辐射光源：已经历三代发展



第三代
可加装波荡器磁铁的
同步辐射专用光源



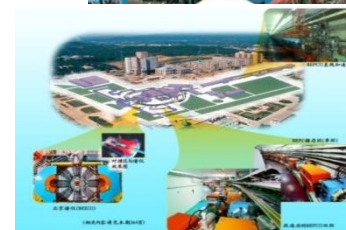
上海同步
辐射光源

第二代
基于同步辐射专用
储存环的专用机



合肥同步
辐射光源

第一代
寄生于高能物理实
验专用的高能对撞
机的兼用机



北京同步
辐射装置

第四代同步辐射光源：衍射极限储存环（DLSR）光源

多弯铁消色散结构, Multi Bend Achromat, MBA

M = 消色散结构中的二极磁铁数目

→ 发射度降低1~2个量级, 接近甚至达到X射线衍射极限

$$\epsilon_0 \propto \frac{E^2}{N_B^3}$$

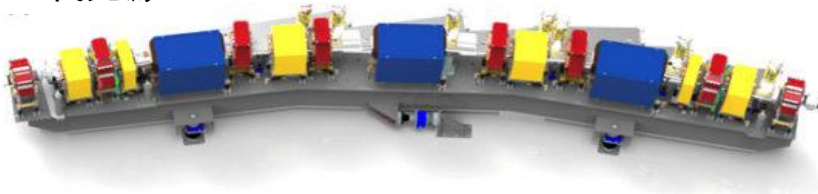
$$\epsilon_r = \frac{\lambda}{4\pi}$$

三代光源的发射度:

1000~5000 pm·rad

四代光源: $\lesssim 100$ pm·rad

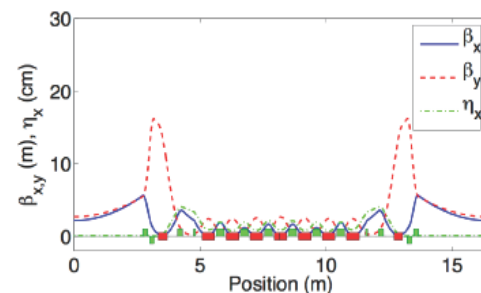
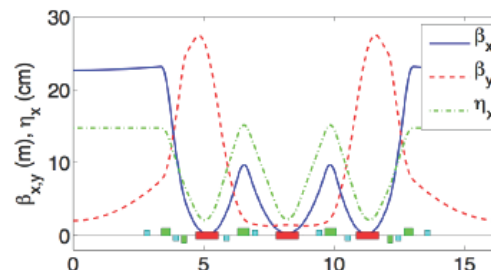
三代光源



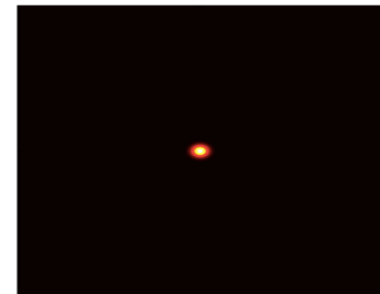
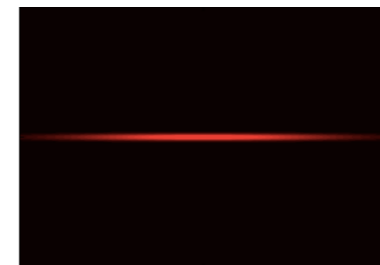
四代光源



元件布局



磁聚焦结构束流光学



1 mm
束斑截面

高能同步辐射光源 (High Energy Photon Source)

- 高能区第四代同步辐射光源, 7BA-lattice
- 建设周期: 2019.06 ~ 2025.12



- 电子能量: 6 GeV
- 发射度: 34.2 pm·rad
- 环周长: 1360.4m
- 光束线: 14+1 (I期)

合肥先进光源HALF (Hefei Advanced Light Facility)

- 基于衍射极限储存环的低能区第四代同步辐射光源



- 电子能量: 2.2 GeV
- 自然发射度: $\sim 85 \text{ pm}\cdot\text{rad}$
- 软X射线波段最高亮度: $\sim 10^{22}$
- 40直线节: 20长+20中
- 环周长: 480m

上海光源及自由电子激光

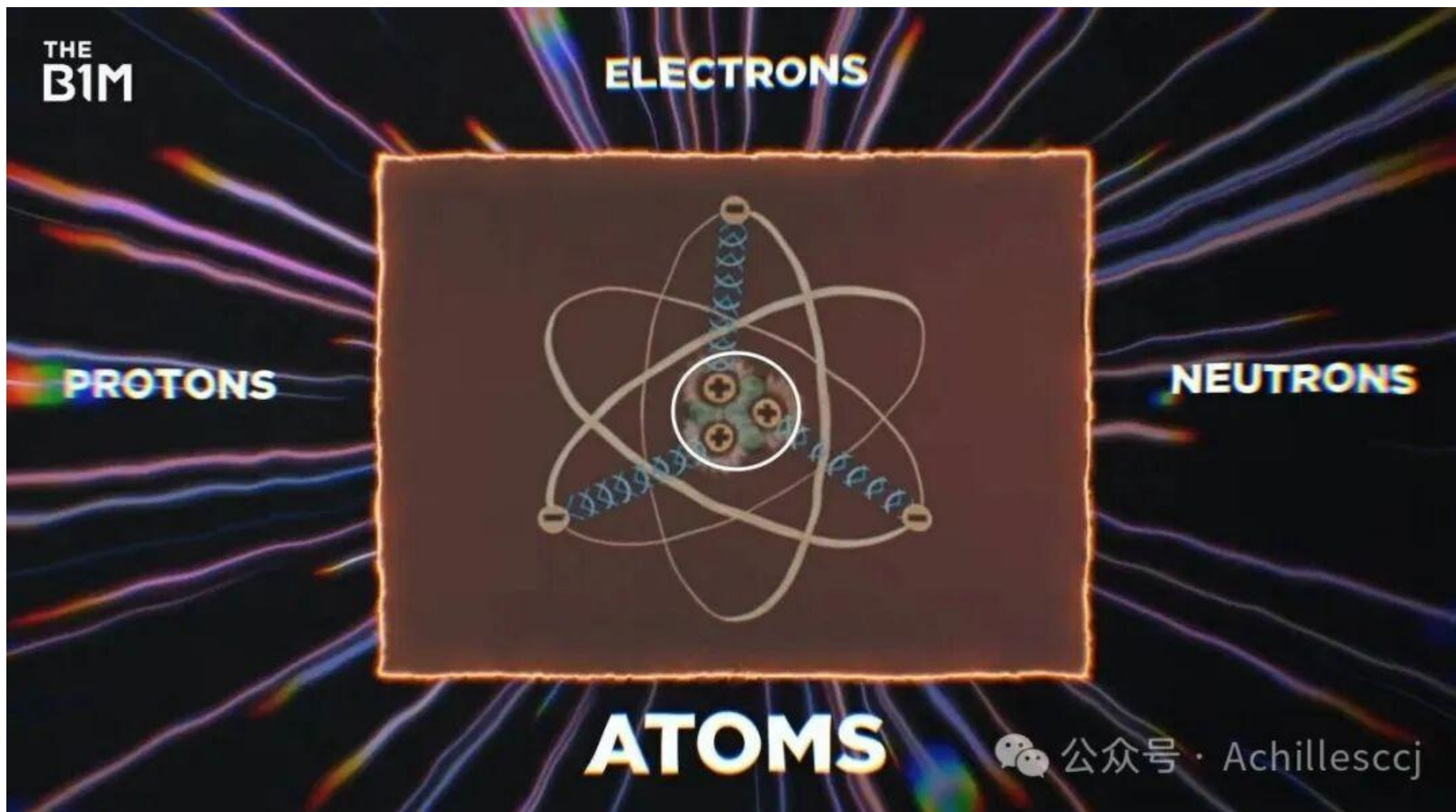


上海同步辐射光源 (SSRF)：包括一台150MeV电子直线加速器，一台周长180m的3.5GeV增强器，高能和低能输运线，以及电子储存环。周长420米。

上海软X射线自由电子激光装置 (SXFEL)：包含840MeV电子直线加速器，一台两级级联的EEHG-HGHG外种子自由电子激光放大器，长度550米。

硬X射线自由电子激光装置 (SHINE)：包括一台能量8GeV超导直线加速器，1个100PW超强超短激光系统，0.4到25keV 3条波荡器线、3条光学束线以及首批10个实验站。总装置长度3110米，隧道埋深29。

中子可以作为微小的探针

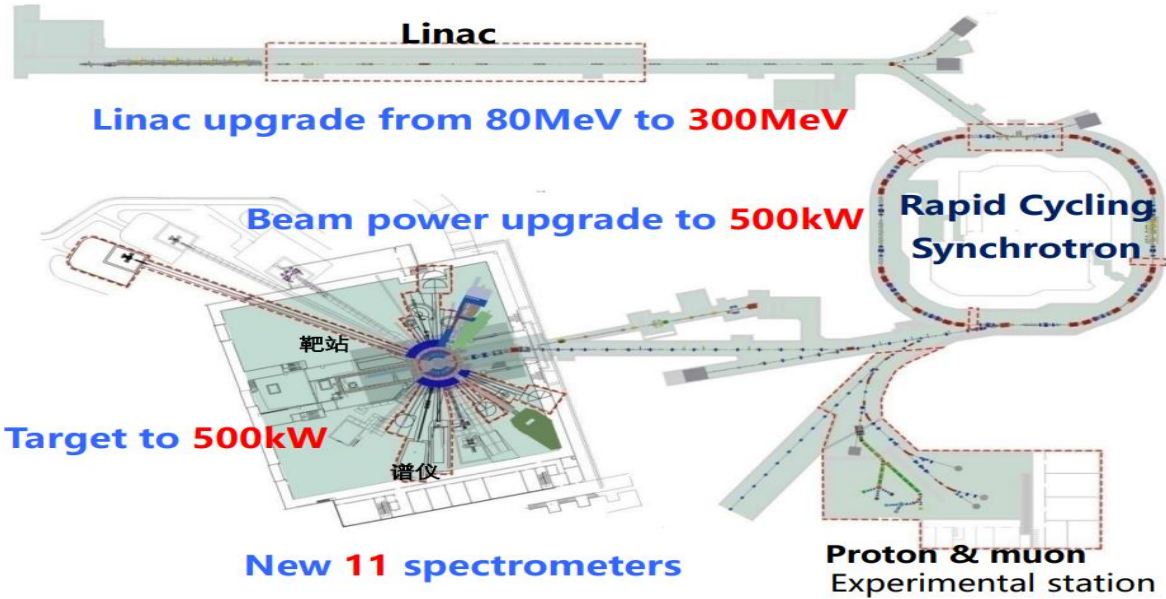


中子特别有趣的地方在于它们能够穿透其他原子。这意味着它们可以像一个微小的探针一样，被用来研究物质及其亚原子层面的结构。

中国散裂中子源 (CSNS, China Spallation Neutron Source)



中国散裂中子源位于东莞市，是中国国家“十一五”期间重点建设的十二大科学装置之首。SNS为中国物质科学、生命科学、资源环境、新能源等方面的基础研究和高新技术研发提供了强有力的研究平台。



	CSNS	CSNS-II
Beam power (kW)	100	500
(Hz)	25	25
Target number	1	1
Average beam current (μA)	62.5	312
Proton beam energy (GeV)	1.6	1.6
RCS injection beam energy MeV)	80	300
Number of Spectrometers	3	11+8

HIAF (High Intensity heavy-ion Accelerator Facility)

强流重离子加速器装置 (HIAF) 作为《国家重大科技基础设施建设中长期规划 (2012 - 2030 年) 》确定的“十二五”建设重点内容之一，由中国科学院近代物理研究所负责筹建。HIAF具备产生极端远离稳定线核素的能力，可提供国际上峰值流强最高的低能重离子束流、最高能量达 4.25GeV/u 的脉冲重离子束流和国际上测量精度最高的原子核质量测量谱仪，为鉴别新核素、扩展核素版图、研究弱束缚核结构和反应机制、测量短寿命原子核质量提供国际领先的研究条件。



- 重离子能量: 4.25GeV/u
- 长度 $>150\text{m}$

CiADS (China Initiative Accelerator Driven System)

加速器驱动嬗变研究装置 (ChiCiADS) 利用加速器提供的高能强流质子束轰击重原子核产生的高通量广谱散裂中子，驱动次临界反应堆运行，将长寿命高放射性核素嬗变成为短寿命放射性核素或者稳定核素，是国际公认的核废料嬗变技术途径的最佳选择。CiADS采用“超导直线加速器 + 高功率散裂靶 + 次临界反应堆”组合的技术路线。

- 建设全球首个实现高功率耦合运行的兆瓦级加速器驱动嬗变研究装置。
- 质子束能量500MeV-1.5GeV
- 全超导加速器驱动系统热功率10兆瓦
- 装置总长度330米



粒子加速器的特点

- 分布范围广：百米到千米
- 设备数量大、种类多： 10^3 - 10^7
 - 离子源、磁铁、电源、真空、射频、束流注入引出
 - 束流测量、辐射防护、水冷系统。。。
- 粒子速度接近光速，无法实现单独束流脉冲的稳态控制
- 空间高度耦合，上游行为对下游影响显著
- 环境复杂、部分区域电磁干扰严重

加速器要求高的运行稳定性

- **MTBF**: Mean Time Between Failures, 平均故障间隔时间
- **MTTR**: Mean Time To Repair, 平均维修时间
- **Availability**: 可用性, A
 - $A = \text{MTBF} / (\text{MTBF} + \text{MTTR}) * 100\%$
 - 可靠性越高, 可维护性越好, 则可用性就越好
 - 可用性与可维护性相关, 因此, 两者之间并不总是正相关, 如下面的情景 (针对7*24连续提供服务的系统)
 - 如果系统每天崩溃1分钟, 那么它的可用性超过99.9%, 但它是高度不可靠的 (MTBF小)。
 - 如果一个系统从来不崩溃, 但是每年要停机两星期, 那么它是高度可靠的 (MTBF大), 但是可用性只有96%。
- 可用性指标对用户装置尤其重要 > 99%

提高系统可用性的基本方法

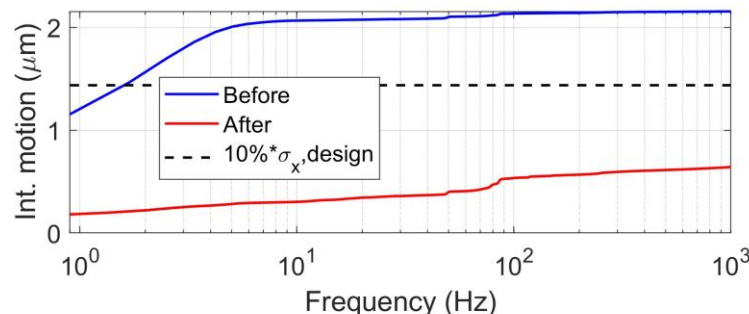
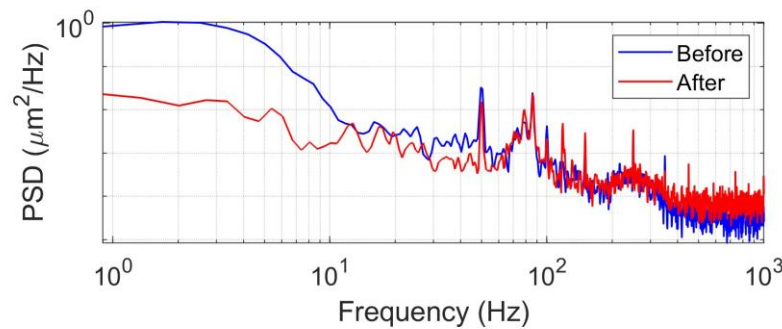
- **防障:** Fault Prevention or Fault Avoidance, 防止或避免系统出现故障
 - 硬件: 高可靠性元件、设备, 防干扰措施
 - 软件: 严格的故障模式及影响分析、高可靠性软件技术等
- **容障:** Fault Tolerance, 使系统在发生故障时仍能正常工作, 即容忍故障。容障的基本技术是冗余
 - 空间冗余, 又称物理冗余, 外加冗余资源减少故障带来的损失
 - 时间冗余, 通过多执行一遍代码, 可以消除暂态故障。此外还有信息冗余, 例如通信协议中的冗余码
- **排障:** Fault Removal, 在系统设计或故障发生时, 采用验证、确认等技术手段来排除故障。
 - 验证 (Verification), 目的是要确认系统**是否符合一系列的设计规范**, 可在系统从设计到实现的各个阶段中实施, 多半是内部流程。 **“正确做事”**
 - 确认 (Validation), 目的是要确认系统**是否符合客户需求**, 一般在系统完成阶段实施。 **“做正确的事”**

(加速器) 大装置设计与控制：面临新的挑战

- 随着实验目标向着更高能量、更高亮度、更大约束时间和更大等离子体体积方向推进，这些装置的规模、耦合性与动态不稳定性呈现出指数级增长趋势。系统内部不再是少数几个变量主导，而是成百上千个参数相互作用、相互制衡，表现出典型的高维非线性动力学特征。这意味着，**传统依赖理论模型推导与人工经验调控的方式，在许多情况下已难以有效胜任。**
 - 一方面，第一性原理模型虽然具备物理完备性，但其计算代价极高、对初始条件敏感、难以实时求解，无法直接用于反馈控制与快速优化；
 - 另一方面，专家经验具有不可替代的直觉价值，但其获取往往需要数十年深度参与装置运行，且经验难以在复杂多目标情形下无偏移地传递，尤其面临设备升级、物理机制拓展与新运行模式探索时，人工调节不但效率低，甚至可能因为认知盲区而导致偏差放大。
- 传统设计—调试—运行范式正面临前所未有的瓶颈：系统复杂度在提升、实验目标在提升、数据规模在提升，而控制能力却未同步提升；装置的“潜在最佳性能”与“现实可操作性能”之间的差距逐渐拉大，许多装置的可用物理运行窗口明明存在，却因为调试效率、模型精度或操作经验限制而无法被充分开发。
- 换言之，我们正处在一个临界点：**仅依靠经典控制思想和人类经验已经不足以高效驾驭下一代大科学装置。**

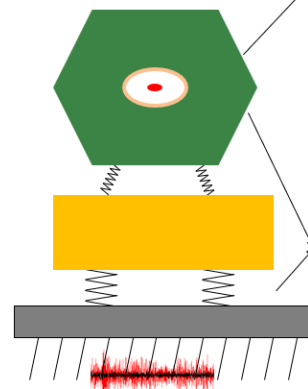
挑战1：系统复杂性与建模困境

- 大型粒子加速器，其运行状态由数百乃至上千个可调参数共同决定，包括磁铁电流、射频腔相位与振幅、真空度、束流位置、强度等。这些参数之间存在高度非线性的耦合关系，导致系统行为极其复杂。一项参数的微小漂移可能通过复杂的传递函数引发连锁反应。例如，一个校正磁铁电源的细微纹波扰动，经过数百米的束线放大后，就可能造成束流轨道的显著偏移，进而导致束流损失上升、实验数据质量下降，甚至对设备造成损伤。



Potential sources

(Tests conducted from 2024.3-2024.9)
Courtesy of Fang Yan, Fengli Long



可能5-2: 束线前馈线圈的电信号
排查实验: 抽查6个线圈 (36-72ppm)

可能5-1: 抖动通过SC (慢轨道反馈) 校正子磁铁电信号传导至束流
排查实验: R30周期所有SC校正子及R02/38/45部分SC校正子 (31ppm-99ppm)

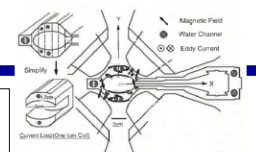
可能1-1: 京密引水渠的水流影响
排查实验: 排查了R35-40周期隧道内每个周期地面的振动 (午间20nm以下)

可能4: 低温液氮/氮管道抖动及压缩机、泵振动传导至超导腔引起束流抖动
排查实验: 管道有套管无法测试, 改测腔束管下支撑抖动 (看到40Hz附近峰值)

可能3: 某些周期或元件振动异常, 排查了R05、R45周期 (无异常)

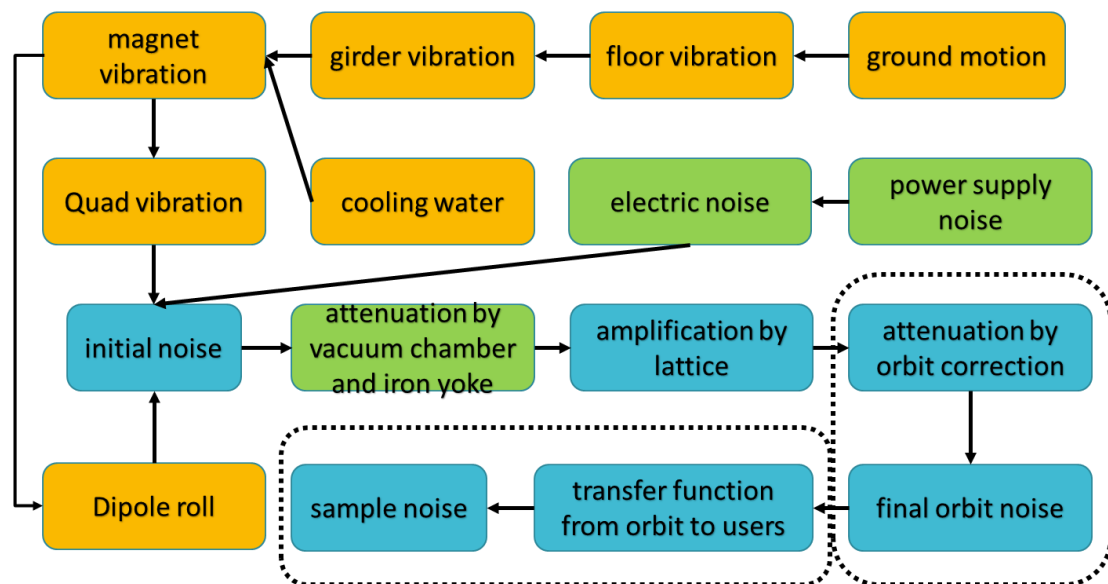
可能2: 1) 地面的振动被四极类磁铁、FC放大
2) 冷却水引起四极类磁铁抖动
3) 冷却水引起真空管道抖动, 切割四极类磁铁磁力线产生的扰动
排查实验: 测试了R18周期所有四极类磁铁、波纹管连接的10条真空管道开水前后的振动对比情况, BPM、FC的振动 (已完成: 振动均小于25nm)

可能1: 束流的抖动通过地基传导, 振源来自于内环动力设施
排查实验: 内环8个水泵房、12个空调机房附近隧道的振动 (已完成测试, 完成了一部分数据处理: 小于几十nm量级)



挑战1：系统复杂性与建模困境

- 大型粒子加速器，其运行状态由数百乃至上千个可调参数共同决定，包括磁铁电流、射频腔相位与振幅、真空度、束流位置、强度等。这些参数之间存在高度非线性的耦合关系，导致系统行为极其复杂。一项参数的微小漂移可能通过复杂的传递函数引发连锁反应。例如，一个校正磁铁电源的细微纹波扰动，经过数百米的束线放大后，就可能造成束流轨道的显著偏移，进而导致束流损失上升、实验数据质量下降，甚至对设备造成损伤。

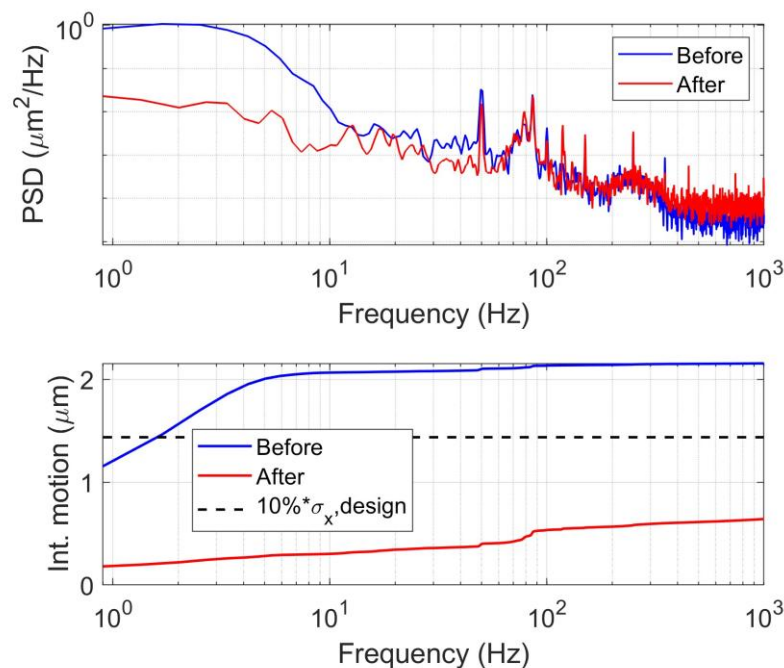


单纯依赖线性化或弱非线性模型的传统控制理论难以精确描述如此高维度、强非线性的动力学系统。

物理学家尽管建立了如束流光学理论、电磁场方程等模型，但由于模型理想化和计算开销巨大，这些模型无法涵盖所有实际影响因素（诸如磁铁铁芯饱和、真空室涡流、支撑结构微振动、冷却水温度波动等）。

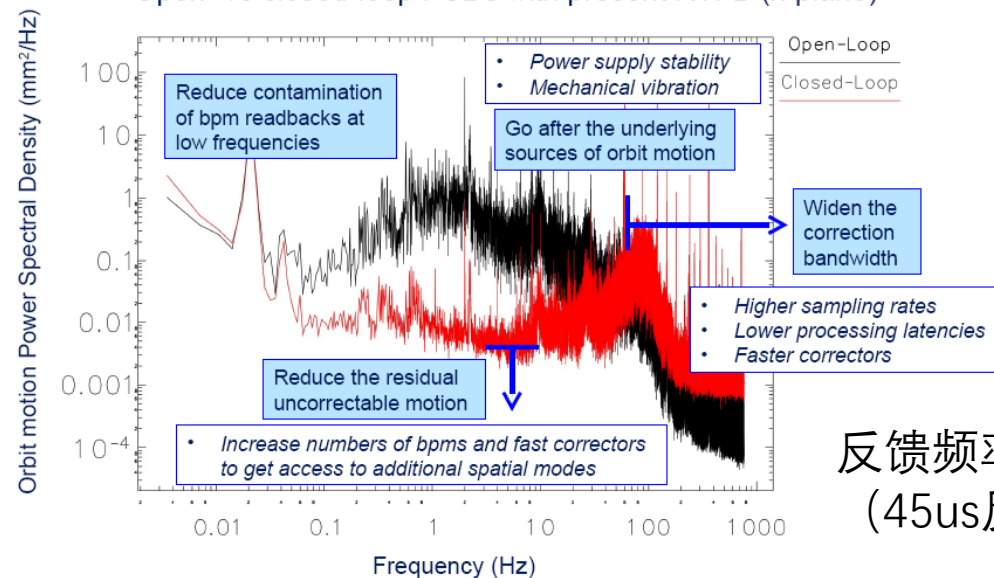
挑战2：实时响应与动态扰动的挑战

- 大科学装置的运行环境充满动态扰动和不确定性，要求控制系统具备极高的实时响应能力。加速器设备会受到多种内外部干扰：外部有地面微震、电网波动（50 Hz交流供电纹波）、环境温湿度变化等；内部有高功率射频器件的相互影响、束流本身对设备的激励反馈等。在HEPS中，为维持粒子束10皮米级发散度和微米级轨道，需要高速反馈系统进行轨道校正，其响应时间要求达到毫秒量级甚至更快。
- 而人工操作的时间尺度通常以秒计，远远无法应对此类快速扰动。在多变量、快时变的情形下往往力不从心，需要操作员持续人工干预，不仅效率低，也难以保证安全裕度。



TARGETS FOR APS-U ORBIT FEEDBACK R&D IN TERMS OF ORBIT MOTION SPECTRA

Open- vs closed-loop PSDs with present RTFB (x-plane)



反馈频率220kHz
(45us反馈一次)

挑战3：多目标权衡与优化效率瓶颈

- 大科学装置的设计与运行需要在多个相互矛盾的目标之间寻找平衡，这本质上是一个高维、非凸的多目标优化问题。以粒子加速器为例，需要同时优化如下指标：
 - 束流亮度最大化：以提高对撞产生的事例数；
 - 束流发射度最小化：以减小束斑尺寸、提高实验分辨率；
 - 能量散度最小化：确保粒子能量一致性，提高测量精度；
 - 束流损失最小化：保护设备和探测器，降低辐射本底；
 - 动力学孔径最大化：保证束流长时间稳定存储。

传统上，研究人员通常采用穷举试探或经验加权的方法来寻找折衷参数——这既耗费大量机器时间，又容易陷入局部最优。

当面对高维参数空间时，全面的人工扫描更是难以实现，往往需要数天甚至数周的机器实验（Machine Study）才能找到一个尚可的操作点，而全局最优解常常不在考虑范围之内。

