



“缪子束加速和对撞技术及其应用”论坛，2022年4月16-17日

缪子束产生、冷却和加速关键核心技术 及预研建议

(质子束制备的高流强、高品质缪子束)

赵红卫

中国科学院近代物理研究所



报告内容

一、简介

二、缪子束产生

三、收集、传输、冷却

四、加速

五、高场超导磁体

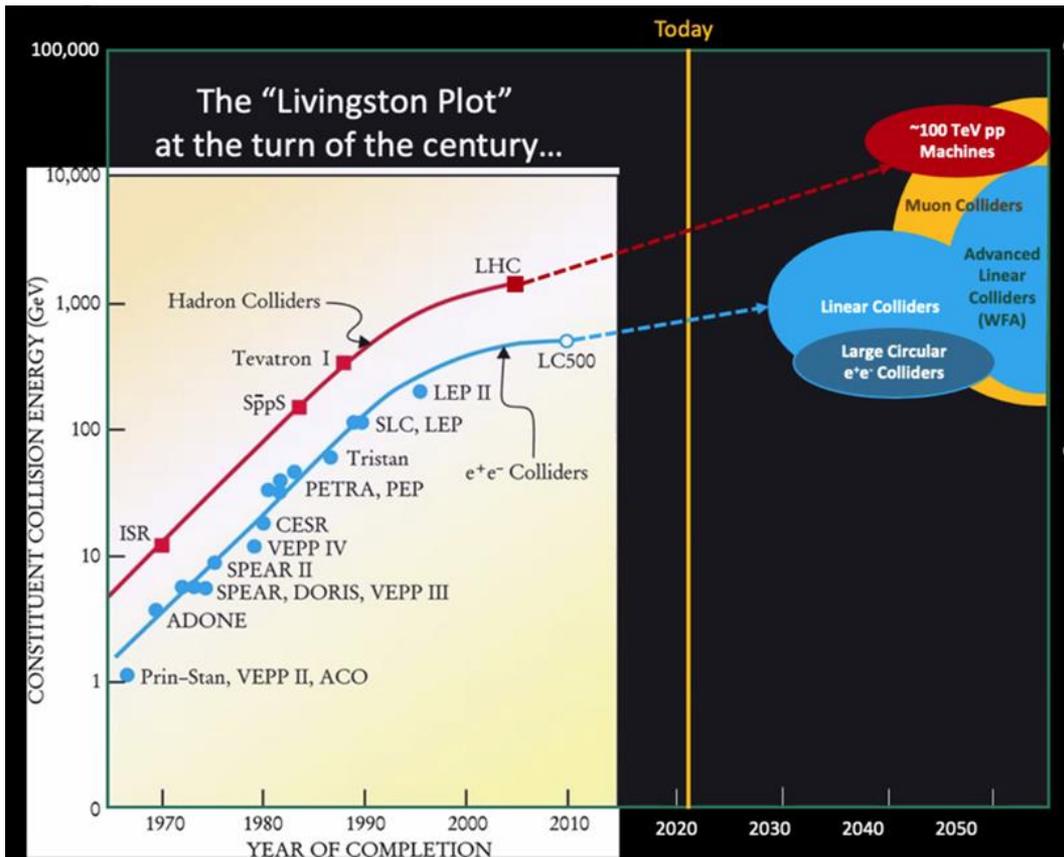
六、结束语

**关键核心技术
需预研的技术**

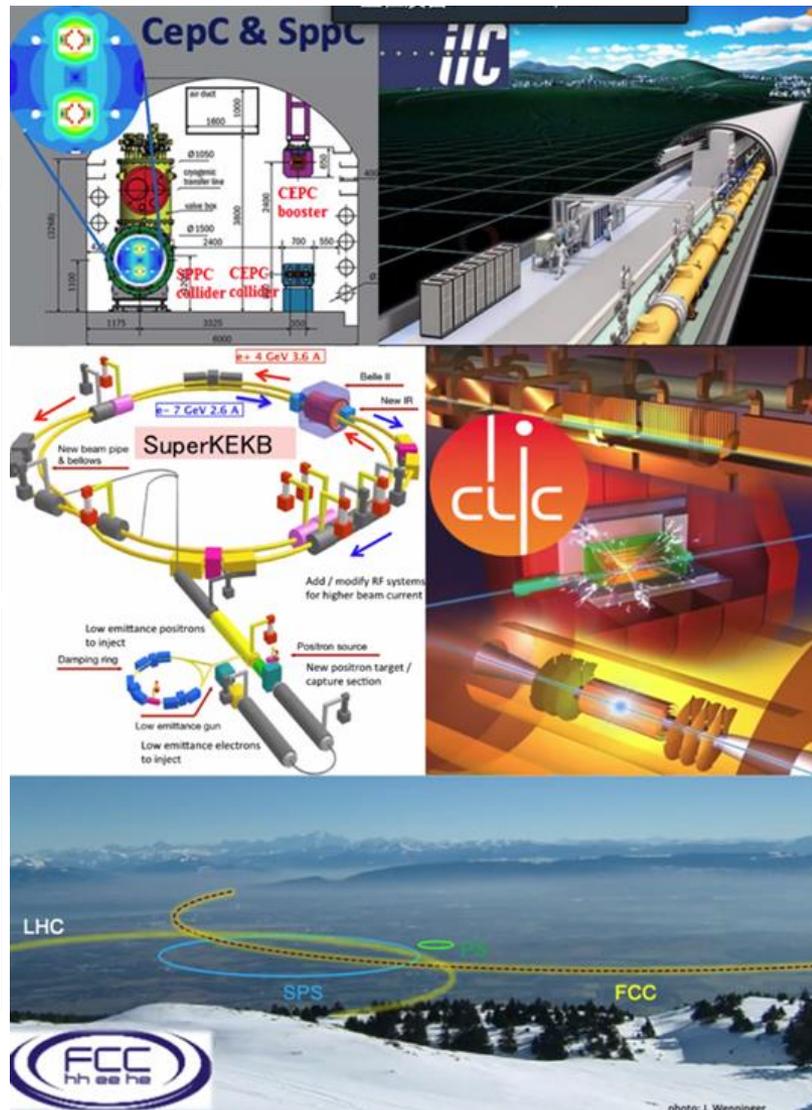


一、简介 高流强、高品质缪子束及其对撞机成为热点

高能加速器未来如何发展？



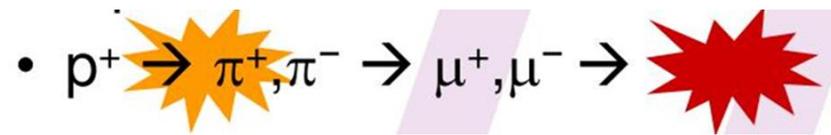
Mark Palm, BNL, MT27 talk



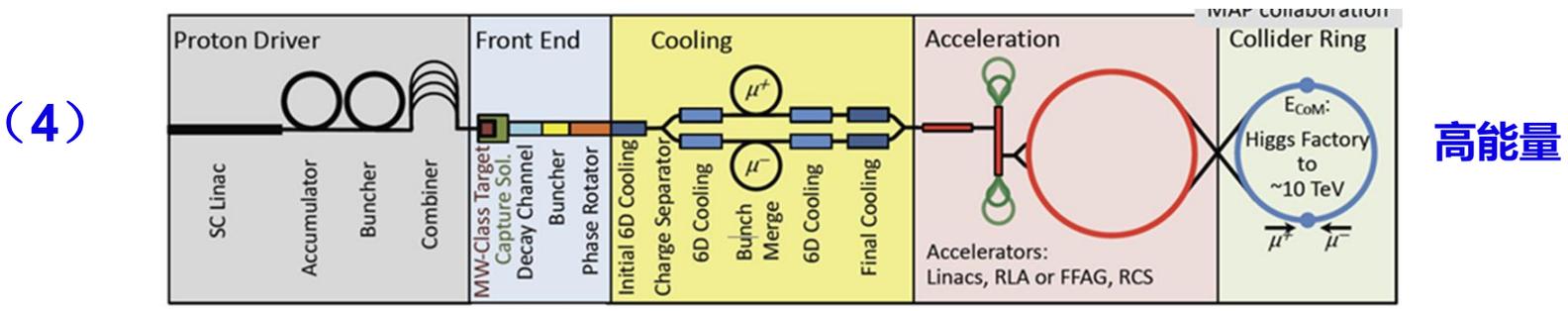
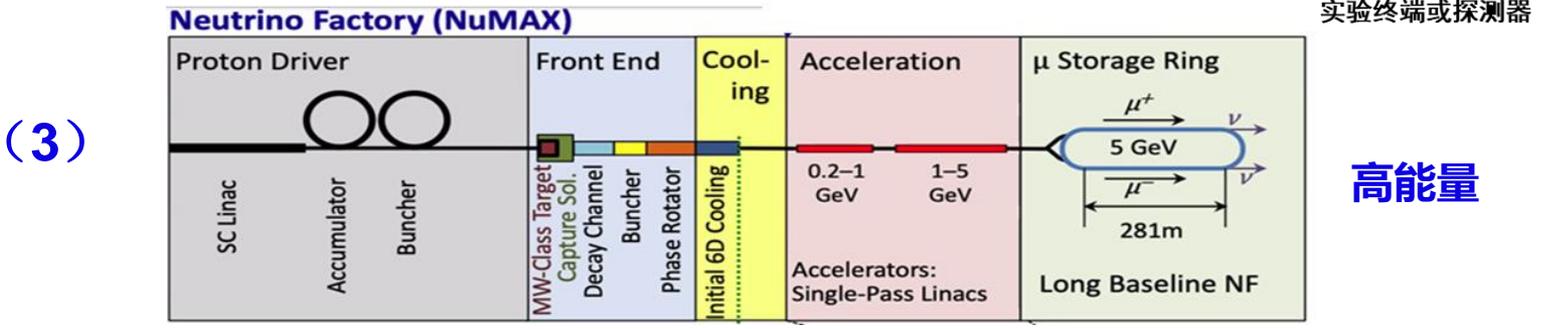
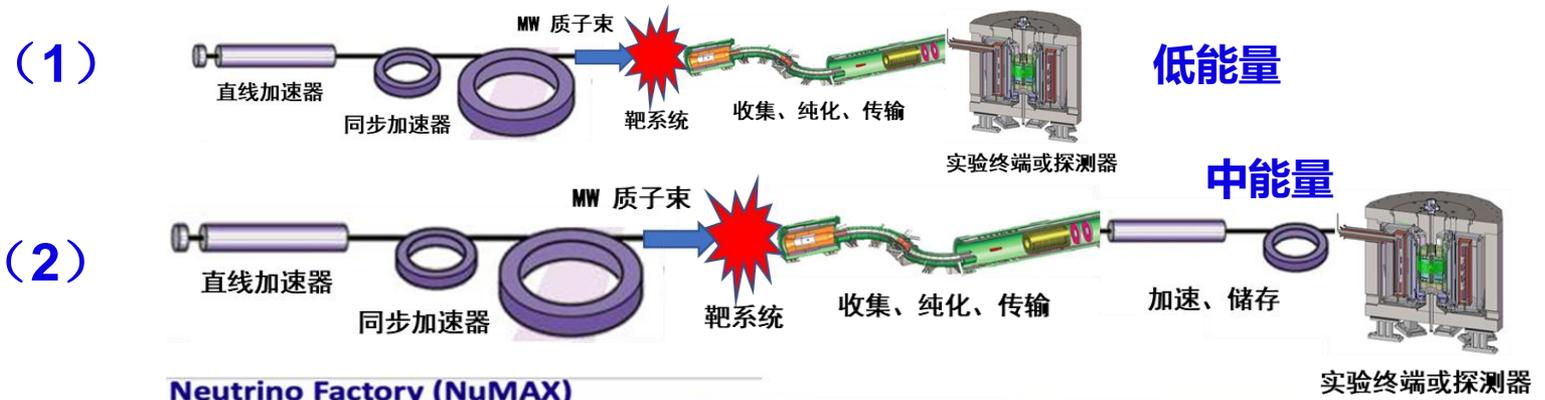
缪子对撞机技术挑战最大！



质子束制备的高流强、高品质缪子束



不同应用需求

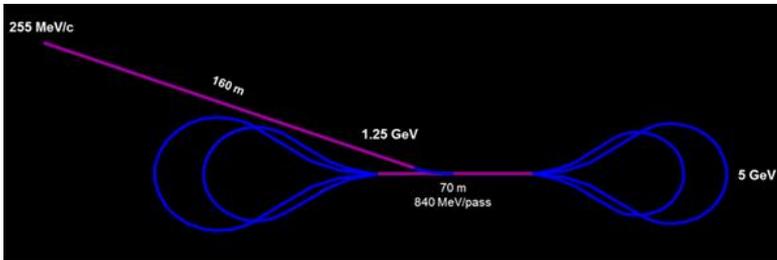
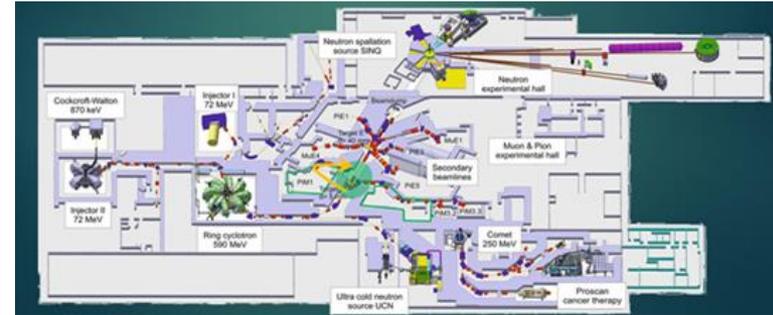
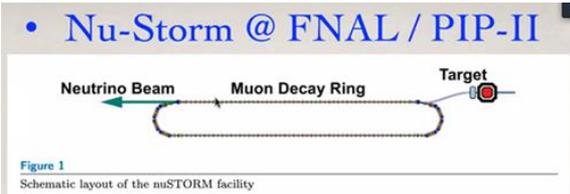
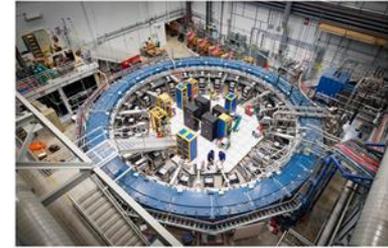
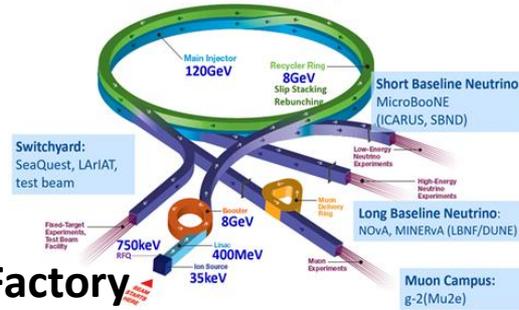




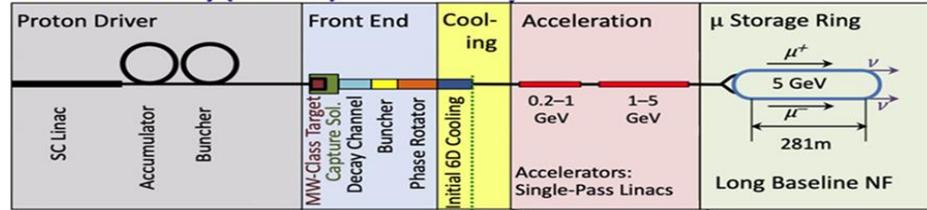
美欧在缪子束产生、加速、对撞领域已40多年研究积累

- 1980s—1990s, proposals, workshops μ production, cooling
- 1997-1998: Neutrino Factory and Muon Collider Collaboration (NFMCC).
- 2007: IDS-NF
International Design Study for a Neutrino Factory
- 2012: Muon Accelerator Project (MAP);
- 2021: IMCC, Snowmass

Fermilab Accelerator Complex and Experiments

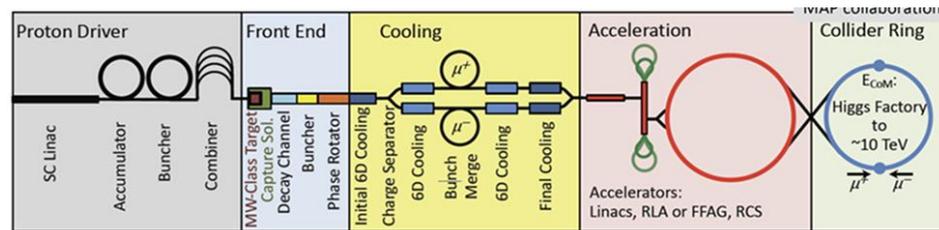
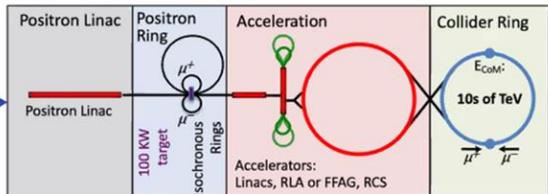


Neutrino Factory (NuMAX)



LEMMA: e^+e^- (at rest) $\rightarrow \mu^+\mu^-$ (at threshold)

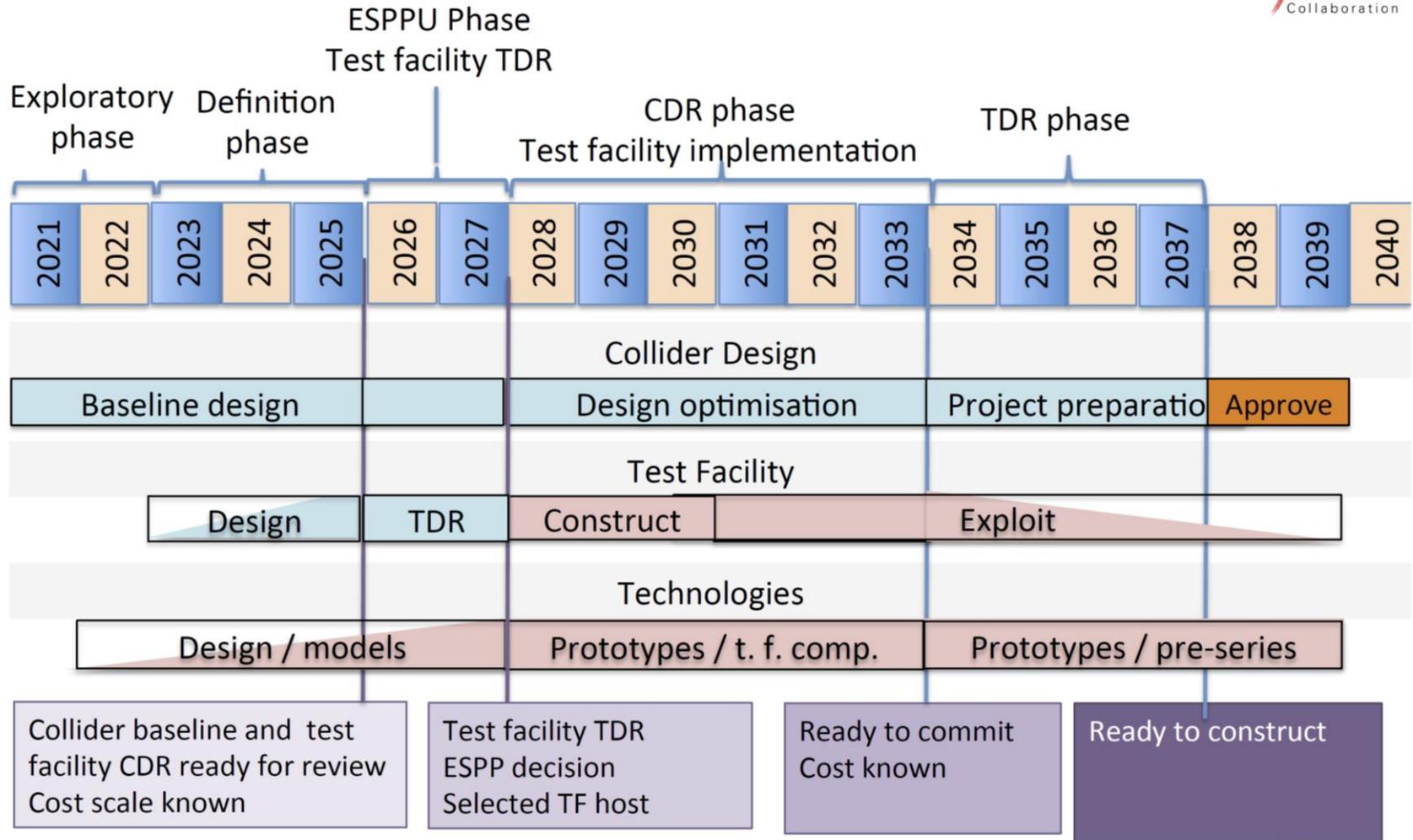
Low Emittance Muon Accelerator (LEMMA): 10^{11} μ pairs/sec from e^+e^- interactions. The small production emittance allows lower overall charge in the collider rings – hence, lower backgrounds in a collider detector and a higher potential CoM energy due to neutrino radiation.





美欧发起的缪子对撞机20年预研和设计初步计划

Technically Limited Long-Term Timeline





为什么缪子加速器或对撞机挑战最大？

■ 高流强高品质缪子束很难制备

- 需要MW (1-5 MW)级质子束打靶，产生次级束， $p \rightarrow \pi \rightarrow \mu$
- 产生的缪子束动量分散大、发射度大
- 产生的杂质粒子多， $p, \pi^{+-}, e^+, e^-, \mu^+, \mu^-$ ，中微子等，能量较高
- 要获得高流强、高纯度、高品质缪子束或用于对撞，需选择收集、高纯度、聚束、冷却...

■ 缪子束不稳定、寿命短、衰变

- 缪子束各种操作过程必须快速（收集、聚束、冷却、加速..）
- 衰变产生的各类杂质粒子产生极高本地，测量诊断和探测难度大
- 衰变产生的大量高能电子对加速器部件、探测器危害极大
- 各类高能量杂质粒子产生极强的电离辐射，对环境和设备产生极高的辐射剂量，辐射屏蔽难度极大

.....

- 产生、收集、聚束、冷却、加速等动力学过程研究少，许多核心技术缺乏或极不成熟。前所未有的难度！



我国缪子束产生、加速和应用才起步，需规划和预研

- 高能所、科大、清华、复旦、近物所、物理所、中山大学...., 曾提出计划、设计或参与研究

布局规划和预研

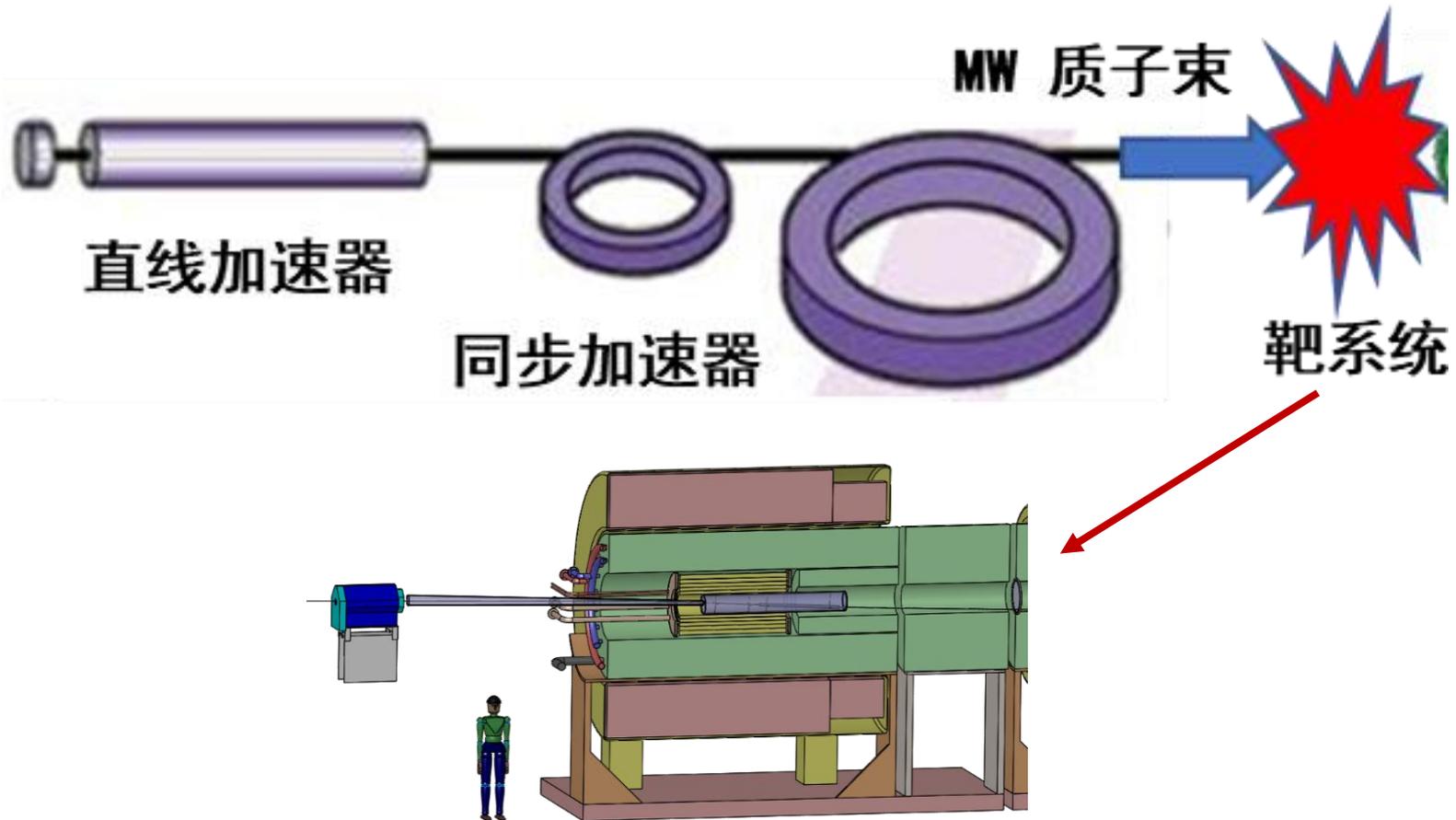
- ① 物理目标和应用需求，提出对 μ 束需求
- ② 加速器与探测器总体及概念设计
- ③ 加速器动力学研究、发展模拟程序和全过程模拟
- ④ 关键核心技术预研
 - μ 束产生、收集、传输、冷却、加速....
 - 特别注重提出新的理论、新设计概念、全新技术方案、应用新技术，才可能赶上或超越



二、高流强缪子束产生关键技术

最基本条件

1. MW (1-5 MW)级强流高功率质子加速器
2. 缪子束产生靶



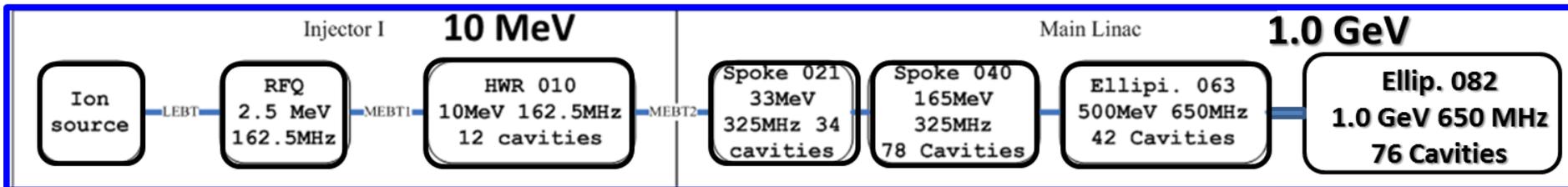


二、高流强缪子束产生

MW级质子加速器

■ 强流高功率超导质子直线加速器 (1-10 MW, < 3 GeV)

强流高功率质子超导直线加速器整体结构示意图



离子源

射频四极 (RFQ)
加速器

半波 (HWR)
超导高频腔

轮辐型 (Spoke)
超导高频腔

椭球型 (Ellip.)
超导高频腔

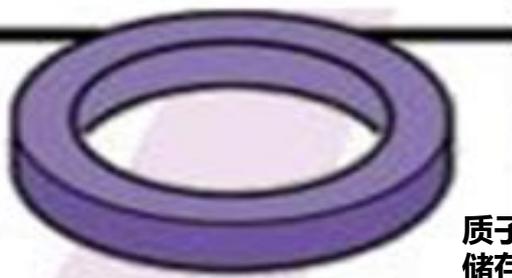
■ 高能量高功率快循环同步加速器 (1-5 MW, > 3 GeV)



质子超导直线加速器



质子同步加速器
增强器、累积环



质子同步加速器
储存环、聚束器

■ 世界上正在运行或建造的MW级质子加速器

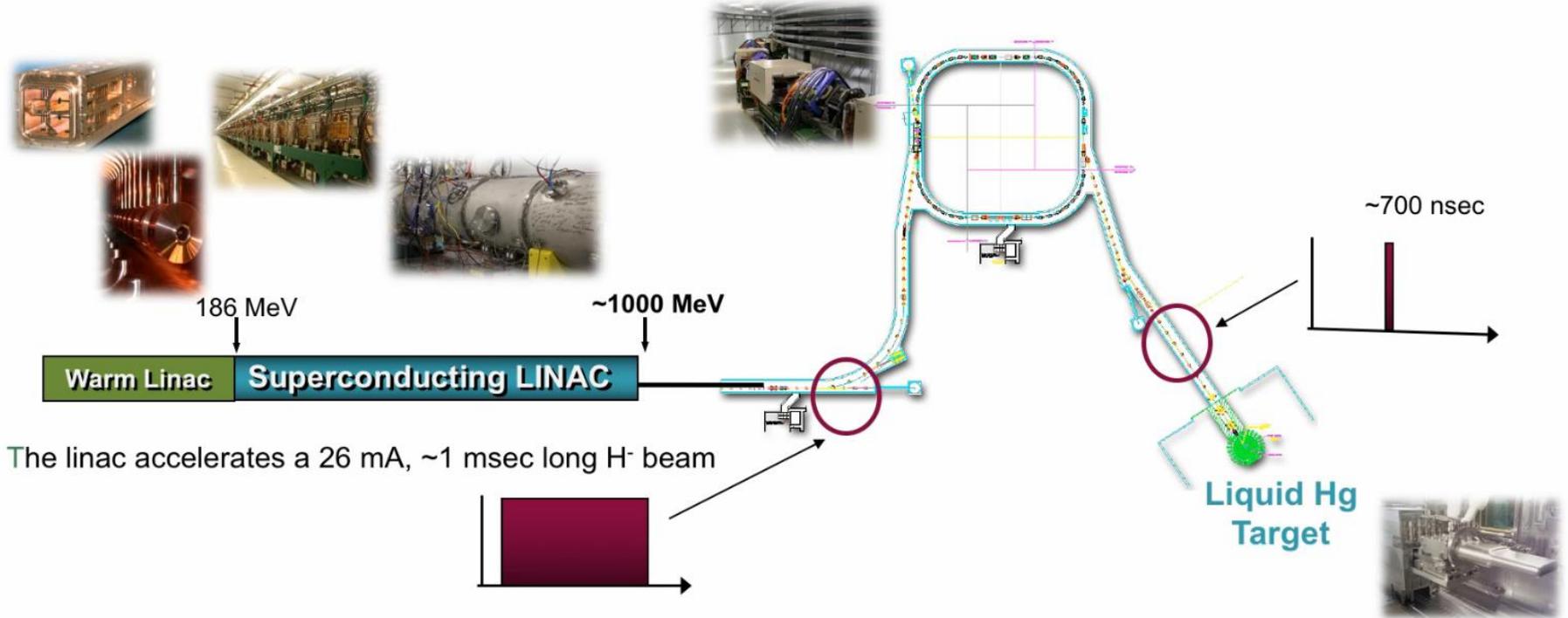
SNS, PSI, JPARC, Fermi lab, ESS, CIADS



美国SNS平均功率1.4 MW 脉冲质子束

SNS Overview: Short Pulse Neutron Source

The accumulator ring compresses the pulse to ~700 nsec



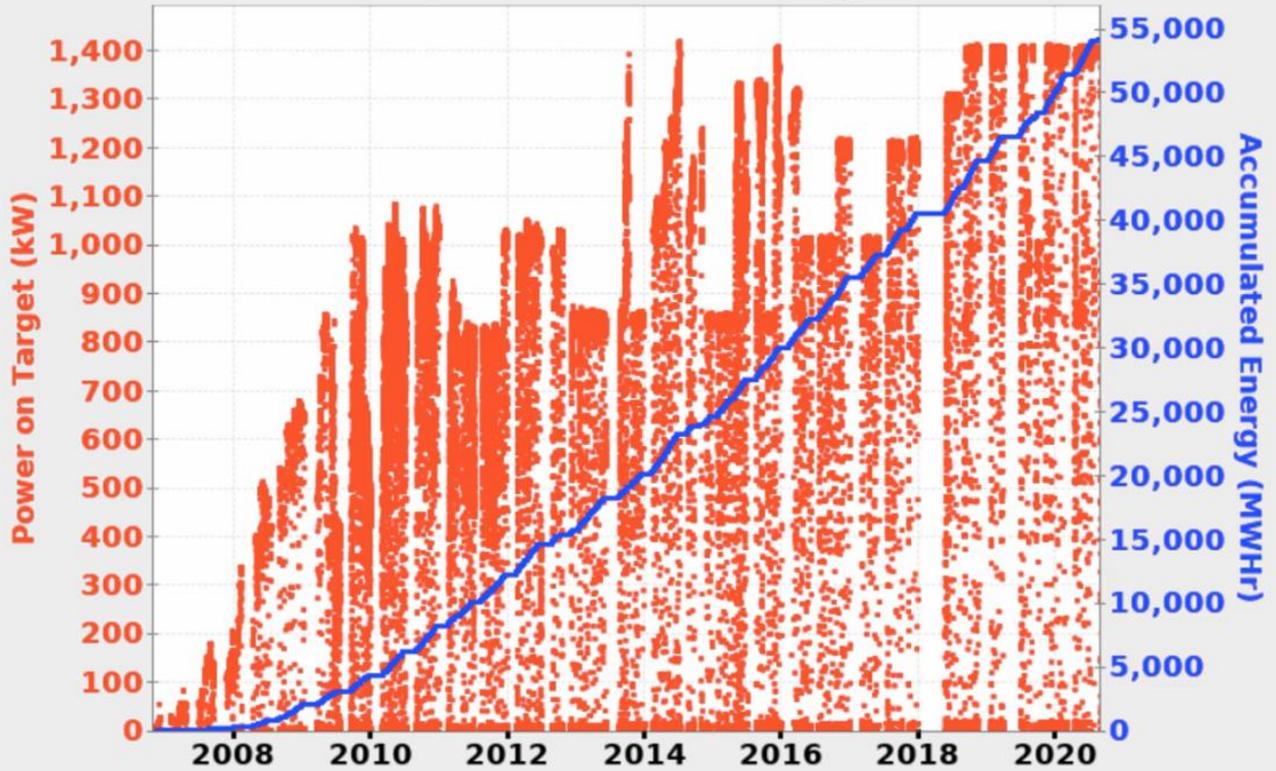
1.4 MW proton beam power on target at 60 Hz



美国SNS 1.4 MW 质子束长期稳定运行

Power and Energy on Target

History: from 01-Nov-2006 to 24-Aug-2020



Statistics FY20

Total hours: **5000 h**

Downtime : **250 h**

Availability: **95%**

SCL Downtime

Total: **100 h**

Cryomodules, cavities' trips
retune: **37.8 h**

Andrei Shishlo, ORNL, HB2021 talk

SNS如此运行效率、可靠性、稳定性、束流功率，除PSI 高功率回旋加速器外，世界上没有其他装置暂时能够超越

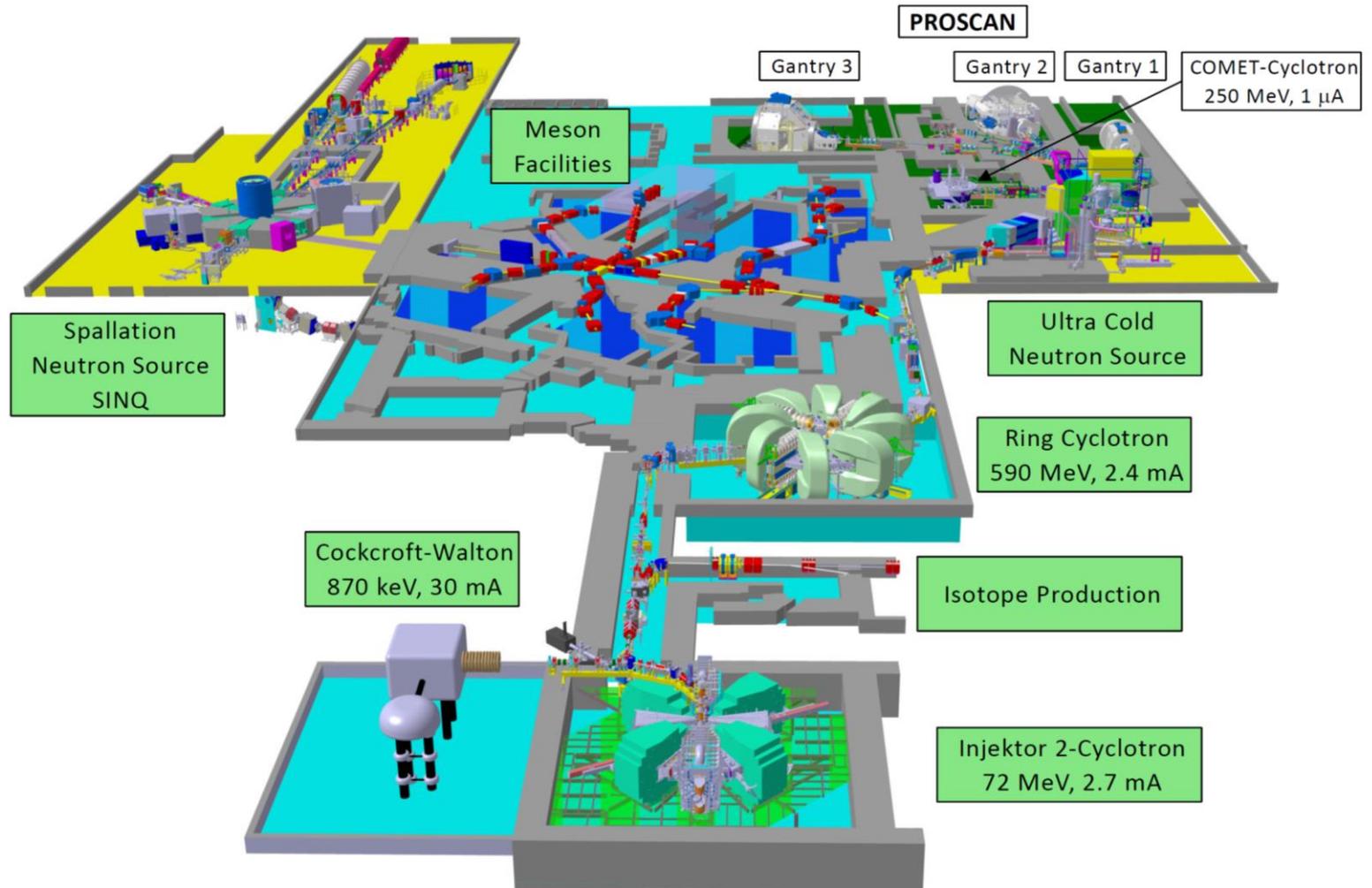


PSI 1.4 MW 回旋加速器

PAUL SCHERRER INSTITUT



High Intensity Proton Accelerator Facility



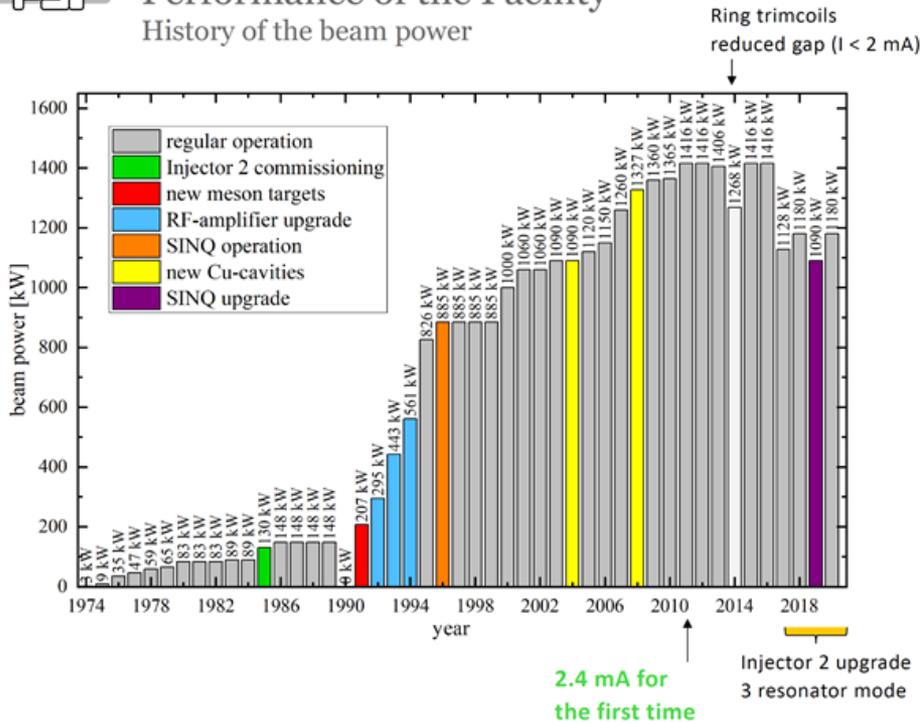
Joachim Grillenberger, PSI, Snowmass workshop talk



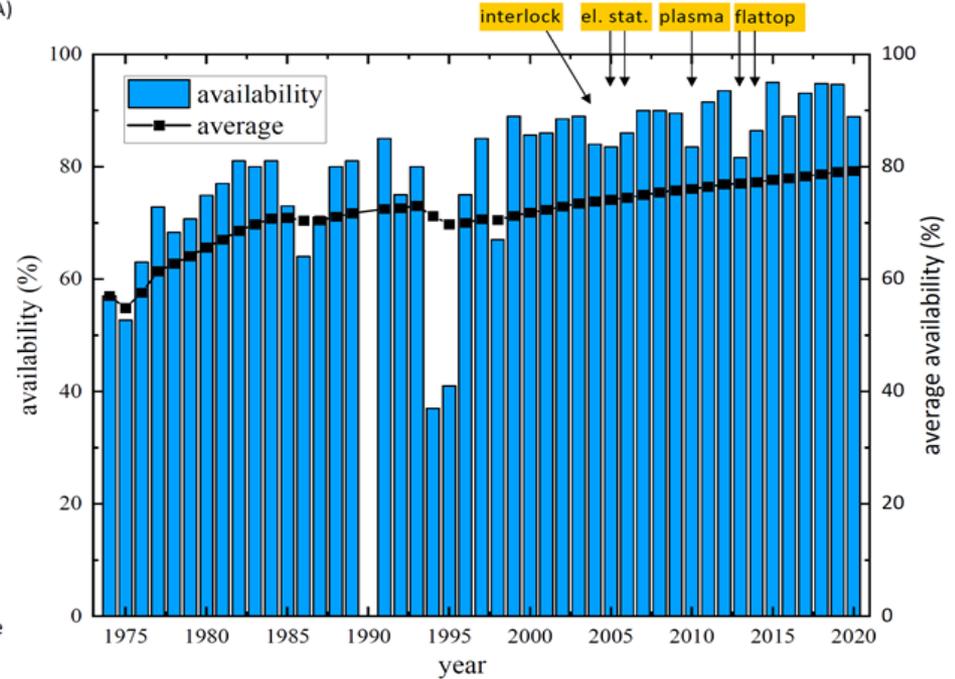
PSI 回旋加速器 1-1.4 MW Availability



Performance of the Facility History of the beam power



- Of uttermost importance for users
- Bobs up and down between 90 and 95%

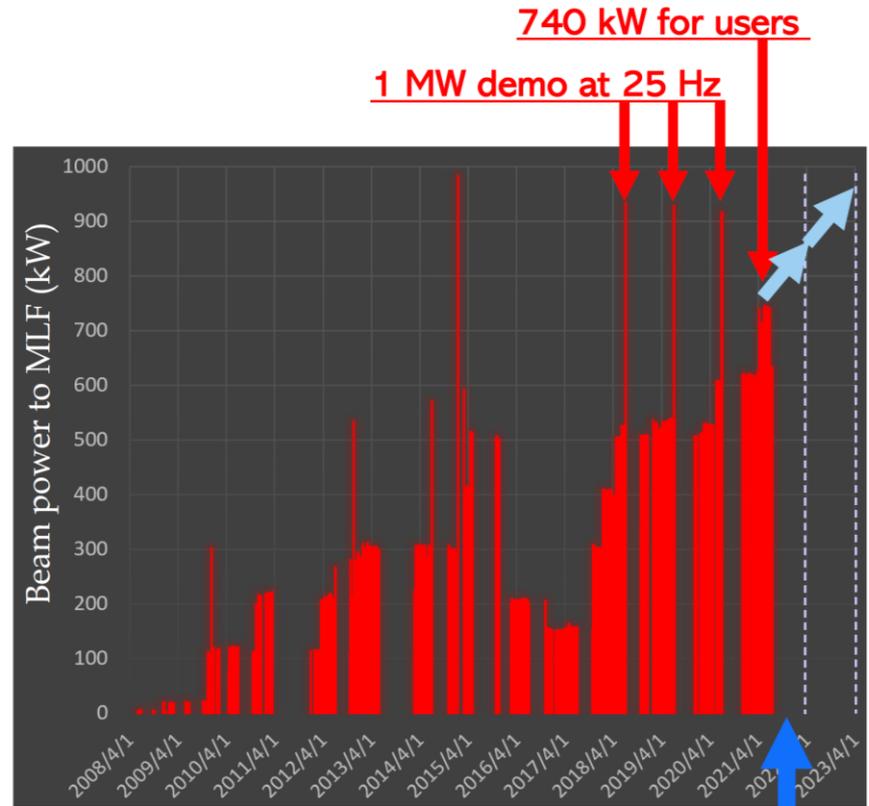
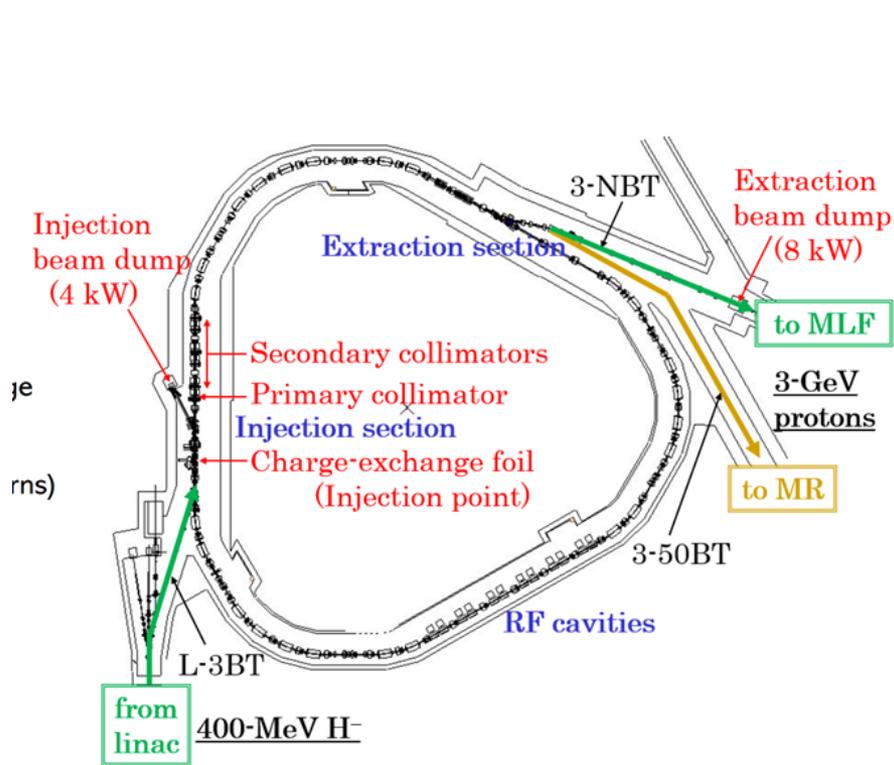


Joachim Grillenberger, PSI, Snowmass workshop talk



J-PARC 1 MW 3 GeV 快循环质子同步加速器

RCS 3 GeV, 25 Hz, 8.3×10^{13} ppp, 短时间达到1 MW

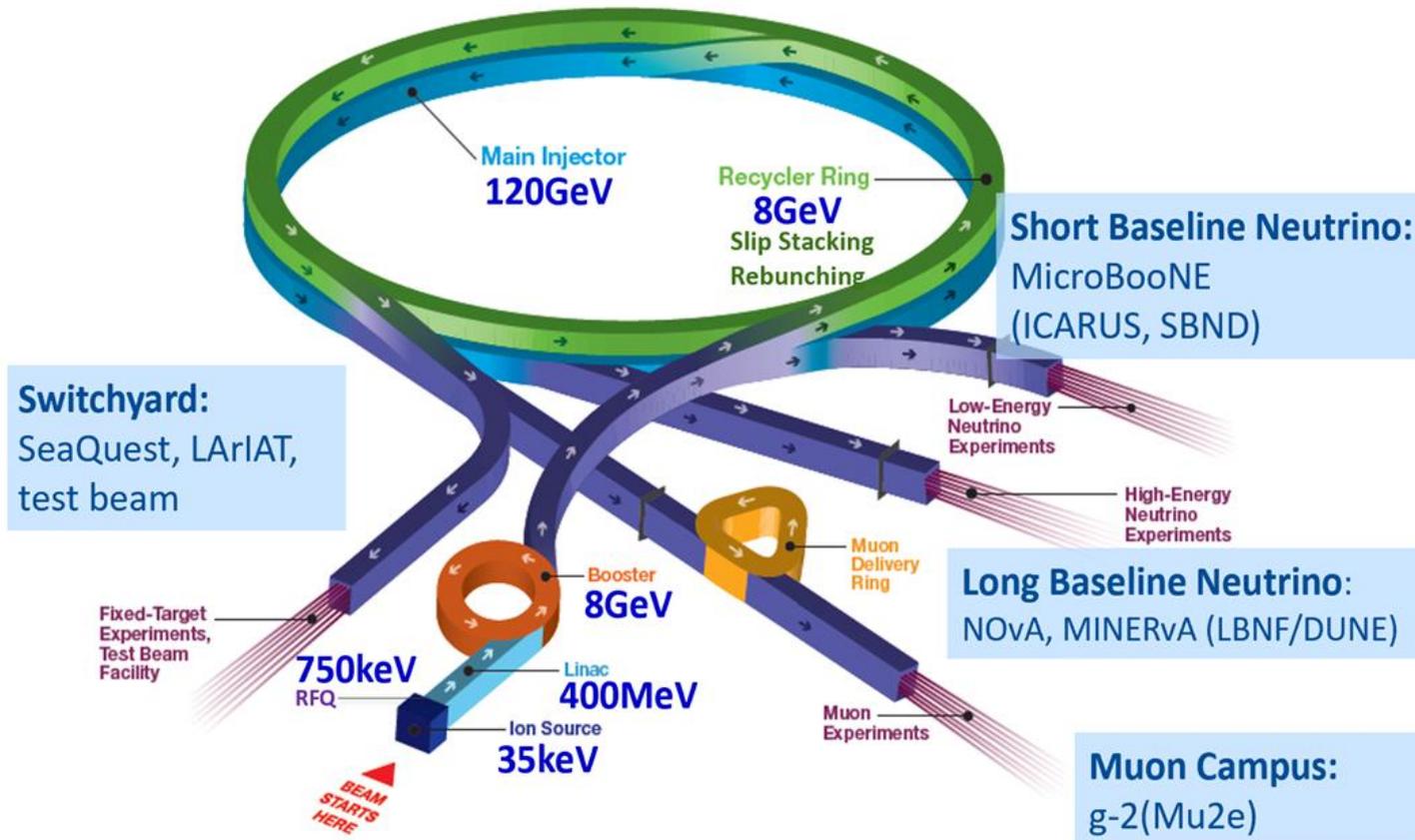


Hideaki Hotchi, J-PARC, HB2021 talk



Fermilab 高能质子加速器集群装置

Fermilab Accelerator Complex and Experiments



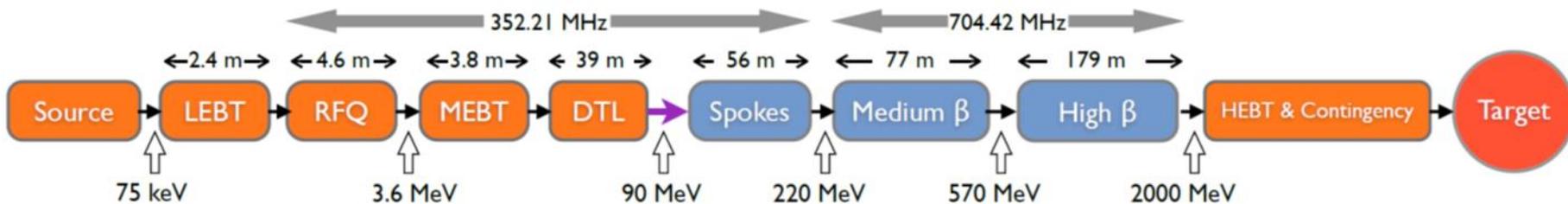
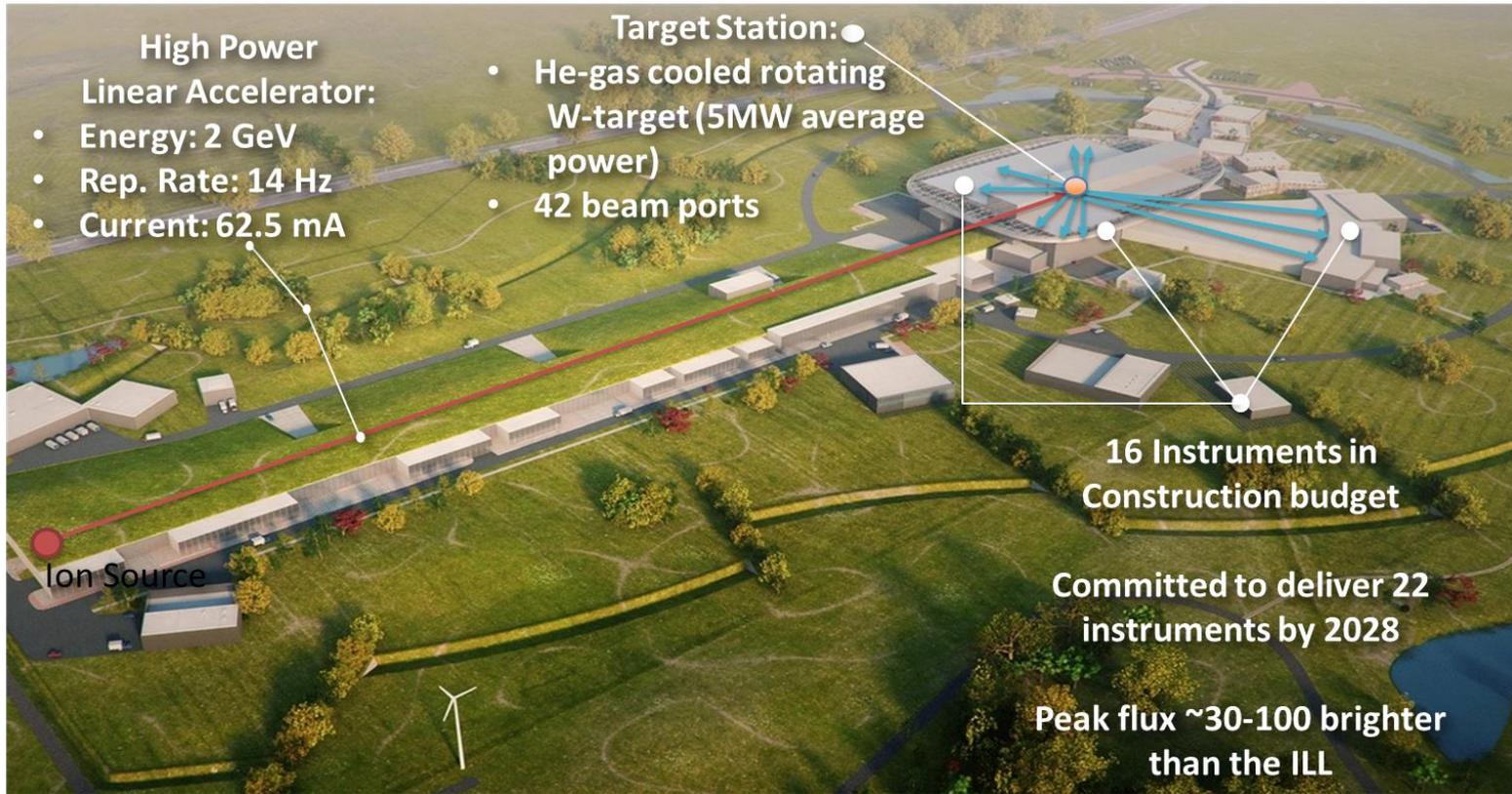
Jeffrey Eldred, FNL, HB2021 talk

- **现在:** 120 GeV/0.8MW, 5.4×10^{13} ppp, 正在升级1.2 MW, 7.5×10^{13}
- **未来-2027:** 120 GeV/2.4 MW, DUNE, long-baseline neutrino



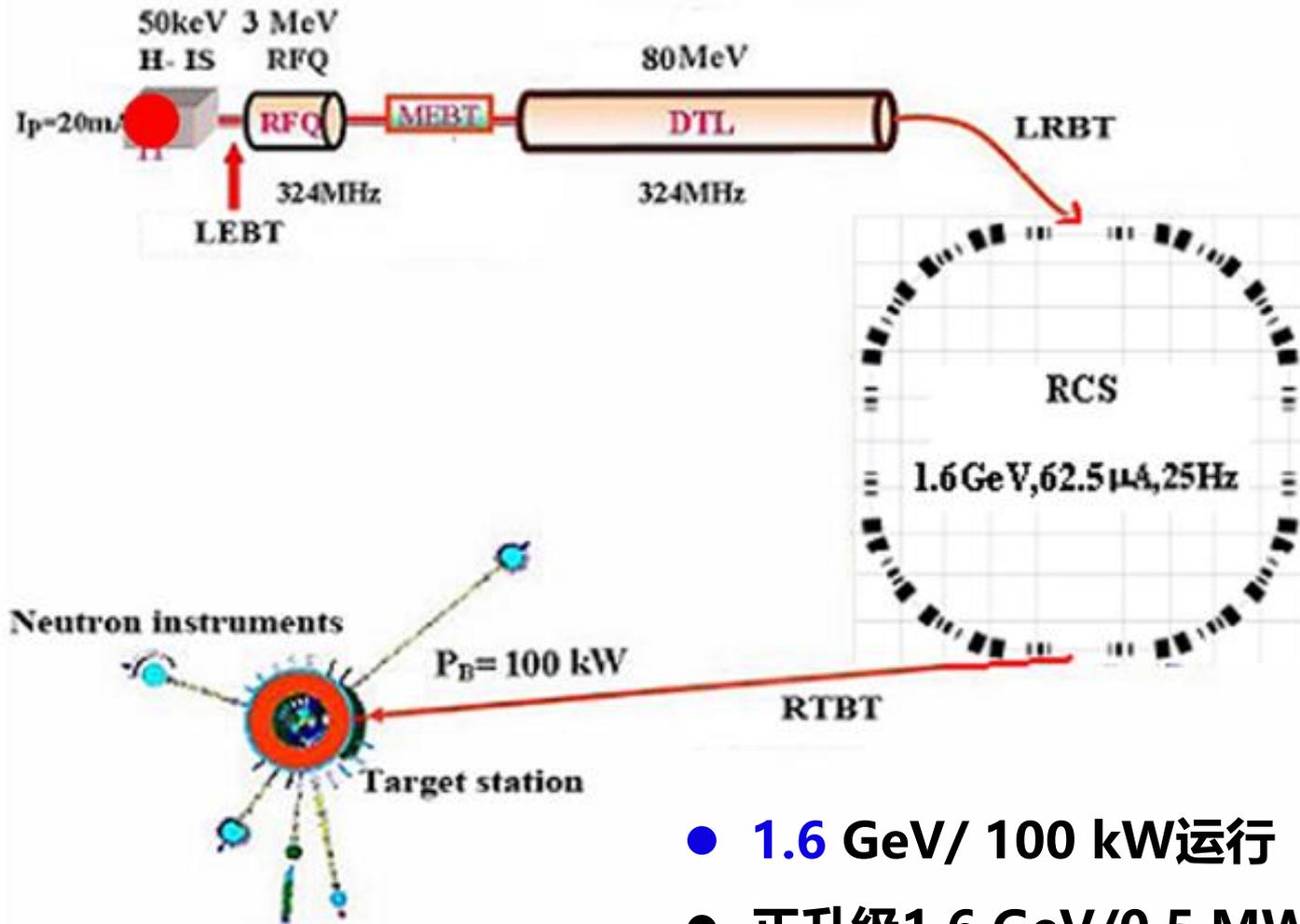
5 MW 欧洲散裂中子源ESS

脉冲超导直线加速器, 2 GeV/5 MW, 建造





中国散裂中子源 CSNS



- 1.6 GeV/ 100 kW运行
- 正升级1.6 GeV/0.5 MW
- 有产生缪子束计划

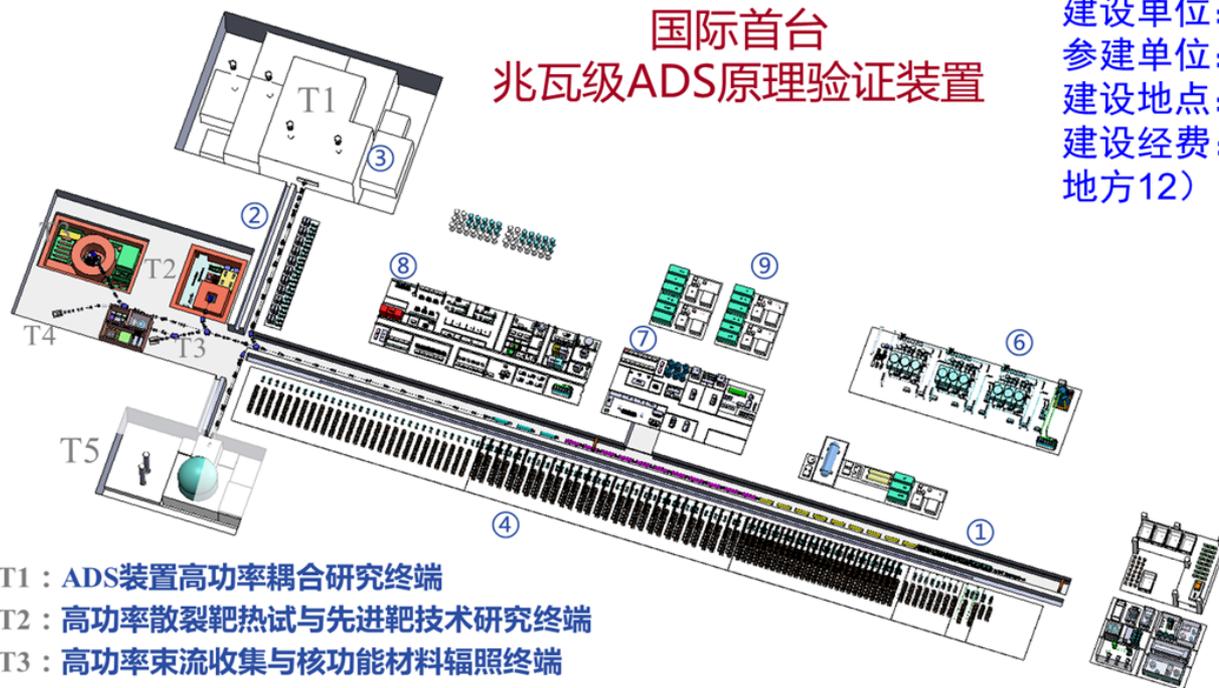


中国加速器驱动嬗变研究装置CiADS

正在建造 2021-2027

国际首台
兆瓦级ADS原理验证装置

建设单位：近代物理研究所
参建单位：高能所，原子能院，中广核
建设地点：广东惠州
建设经费：~40亿（发改委18+中核10+地方12）



- T1：ADS装置高功率耦合研究终端
- T2：高功率散裂靶热试与先进靶技术研究终端
- T3：高功率束流收集与核功能材料辐照终端
- T4：ADS加速器可靠性研究与ADS核数据库终端
- T5：预留基于加速器与小型实验堆耦合的稀有同位素与ADS燃料研究终端位置

项目	设计参数
系统	
系统总功率(次临界包层+加速器束流)	10 MW
单次连续运行时间	> 24 小时
超导直线加速器	
加速粒子	质子
束流能量	250 ~ 500 MeV
束流功率	2.5 MW
运行模式	CW / Pulse
高功率散裂靶	
散裂靶功率	≤ 2.5 MW
单质子中子产额	1.3-6 n/p
次临界堆芯/包层	
K_{eff}	$\sim 0.75 / \sim 0.96$
加速器驱动下的包层功率	$\sim 7.5 / \sim 9.76$ MW (系统总功率 ≤ 10 MW)

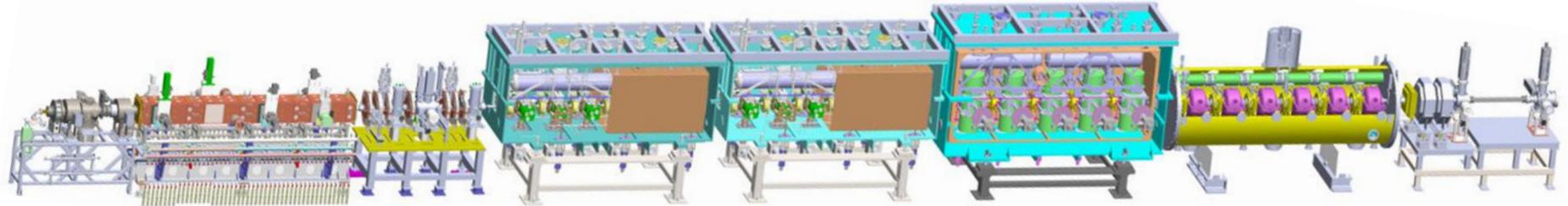
- 0.5 GeV/ CW 5 mA, 2.5 MW 质子超导直线加速器
- 可升级1.5 GeV/CW 5-10 mA, 5-15 MW, 高功率CW质子束
- 10年内中国唯一可超过 1 MW 强流高功率质子加速器



世界首台25MeV连续波质子超导直线加速器

近物所、高能所等多个单位合作 (先导专项A)

- 首次实现25MeV/0.17mA连续质子束稳定加速 (2017)



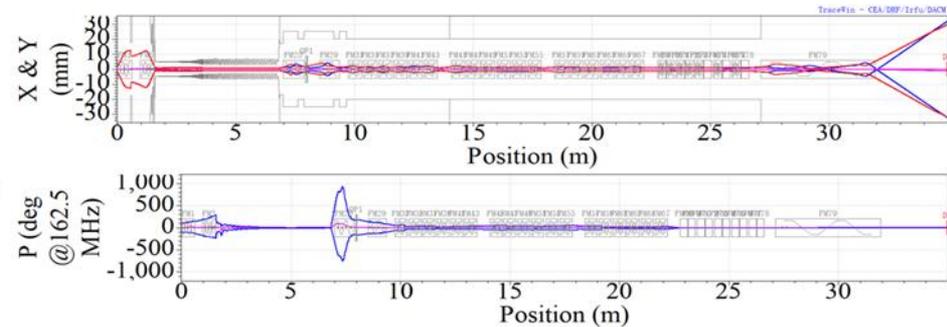
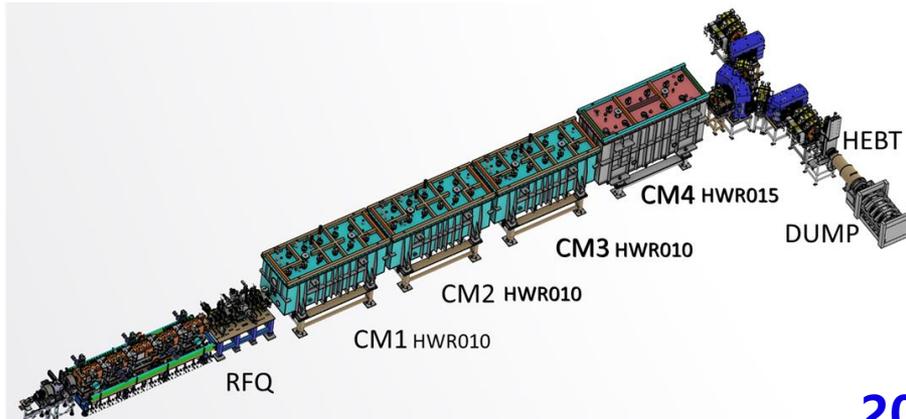
RFQ加速器

近物所

加速器全长约30米

高能所

超导加速段, 23只超导腔, 23台超导螺线管

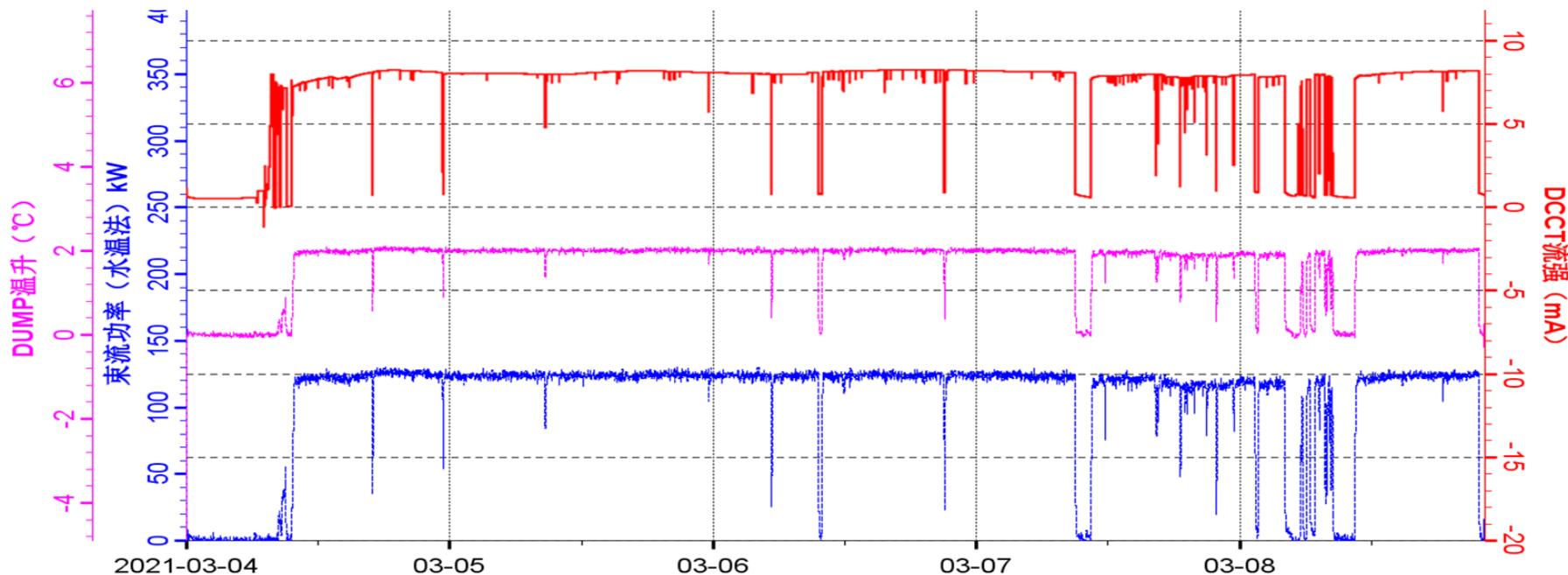


20MeV@10mA束流包络设计



17.27 MeV/ 7.3mA CW束流108小时连续运行测试

超导直线加速器连续波质子束126 kW, 108小时连续运行测试, 束流可用性93.6%。 **国际首次!**



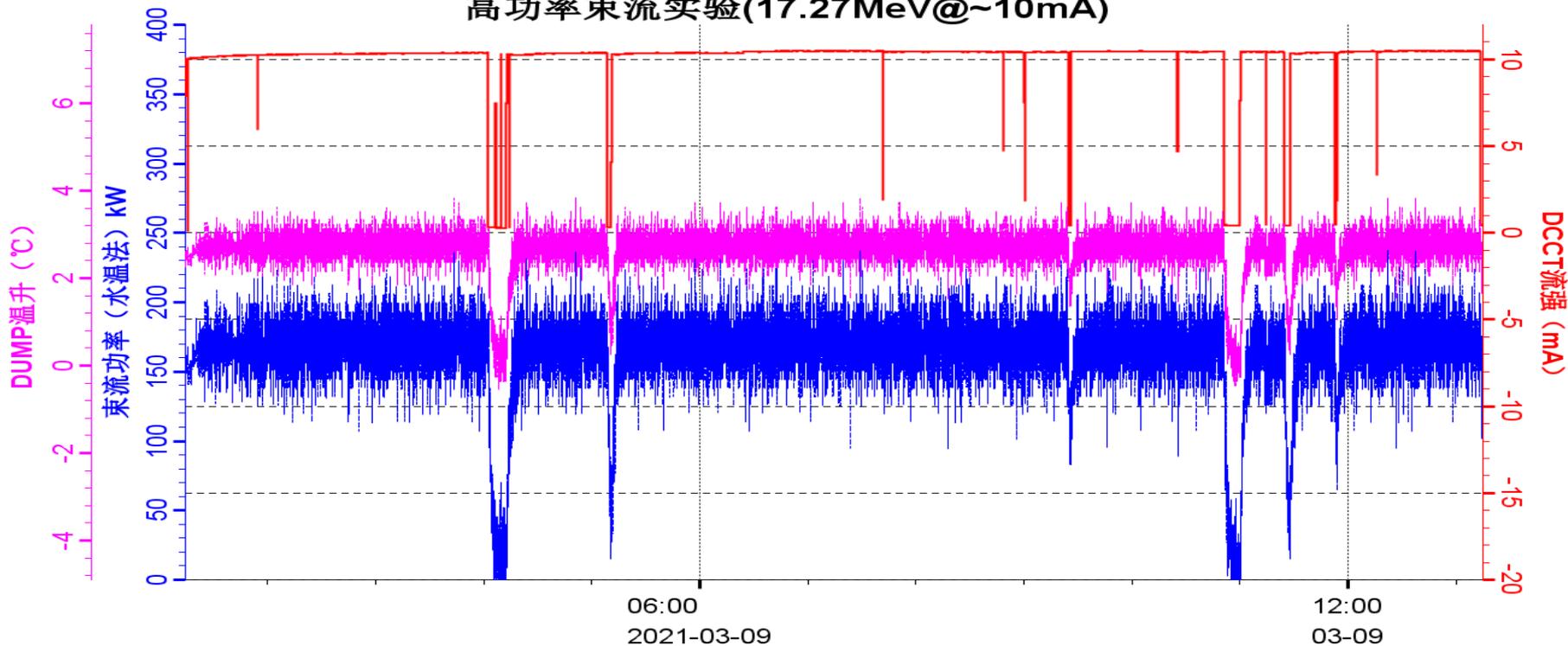
2021年3月4日9点42分至3月8日21点43分



17.27MeV@10mA CW束流12小时连续运行测试

超导直线加速器连续波质子束10 mA 稳定加速, 国际首次

高功率束流实验(17.27MeV@~10mA)



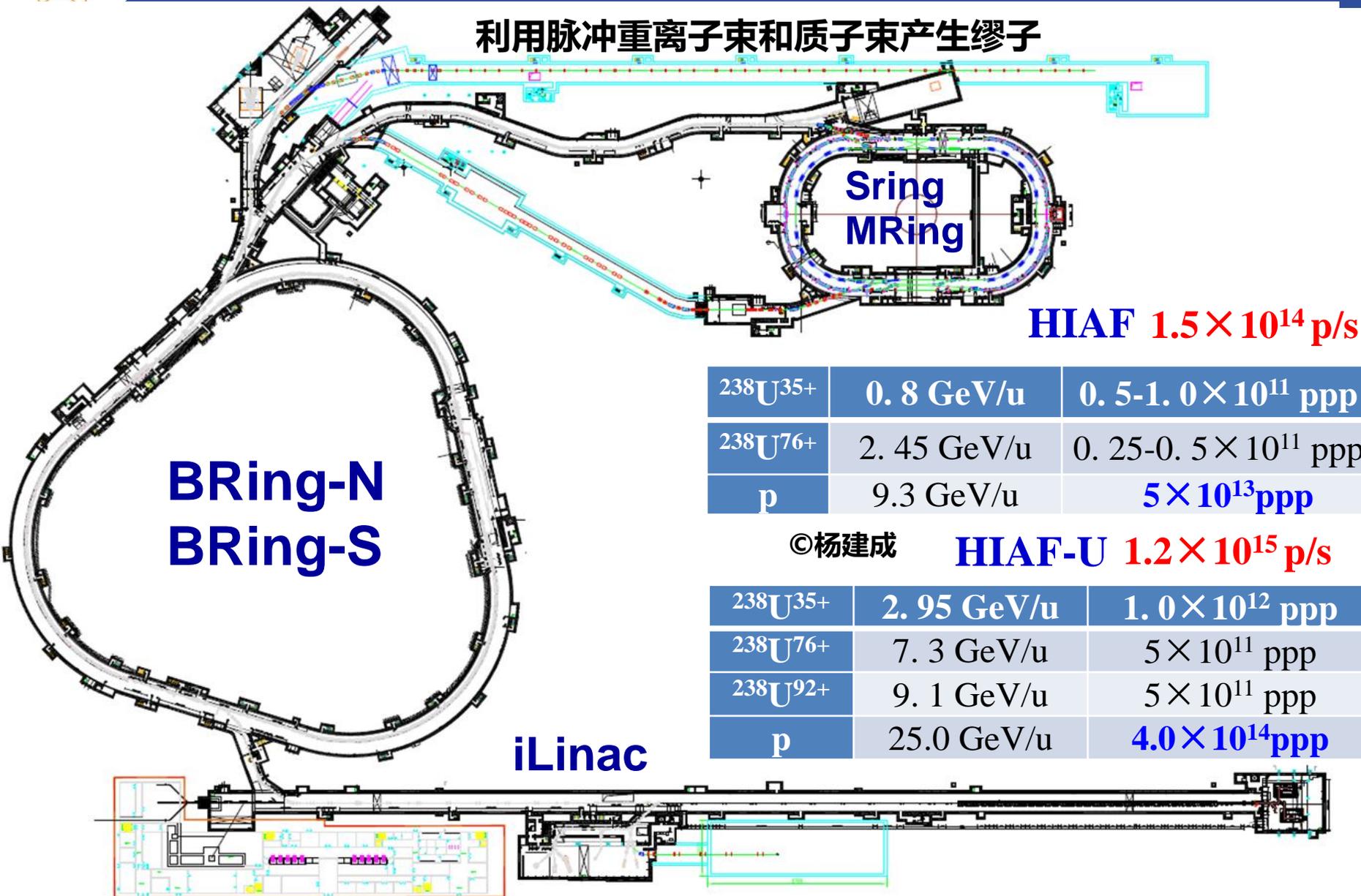
2021年3月9日1点11分至3月8日13时13分

首次验证了全超导直线加速器加速10mA连续波质子束的可行性



HIAF及其升级后将可能用于缪子束产生

利用脉冲重离子束和质子束产生缪子



HIAF 1.5×10^{14} p/s

$^{238}\text{U}^{35+}$	0.8 GeV/u	$0.5-1.0 \times 10^{11}$ ppp
$^{238}\text{U}^{76+}$	2.45 GeV/u	$0.25-0.5 \times 10^{11}$ ppp
p	9.3 GeV/u	5×10^{13} ppp

©杨建成 **HIAF-U** 1.2×10^{15} p/s

$^{238}\text{U}^{35+}$	2.95 GeV/u	1.0×10^{12} ppp
$^{238}\text{U}^{76+}$	7.3 GeV/u	5×10^{11} ppp
$^{238}\text{U}^{92+}$	9.1 GeV/u	5×10^{11} ppp
p	25.0 GeV/u	4.0×10^{14} ppp



MW级强流质子直线加速器挑战

核心问题和挑战（高流强）

- 强流束动力学---束流损失控制
- 超导腔体设计、加工、表面处理、机械稳定性...
- 频率、相位、幅度动态变化和稳定（腔体调谐、束腔作用...）
- 束流动力学--低电平控制--束流损失探测--机器保护—故障自动恢复
- 高功率束流Dump
- MW 级功率长期稳定可靠运行
- ...

近物所通过20MeV@10mA超导质子直线研制和调试，积累了经验，解决了大部分束流动力学和高功率下运行的核心问题。

目前国际上质子超导直线加速器束流功率 < 1.5 MW

未来期望达到 5-10 MW



MW级高能量质子同步加速器挑战

核心问题和挑战（高流强）

- 强流高功率质子束快循环束3D涂抹注入、累积、储存
- 快ramping引起的强涡流效应和束流不稳定性
- 强流下束流损失控制 10^{14-15} ppp
- 束流集体不稳定性、束团压缩、聚束
- 强流高功率束慢引出
- 束流动力学--低电平控制--束流损失探测--机器保护—故障自动恢复
- MW级高功率条件下长期稳定可靠运行
-

目前国际上质子同步加速器束流功率 < 1.5 MW

未来期望达到 4-5 MW



缪子束产生靶系统

■ 质子打靶产生 π 介子，衰变产生 μ

■ μ 种类

- 表面缪子， π^+ 停留在靶内

μ^+ , 低能量 $< 29.8 \text{ MeV}/c$, 高极化 $\sim 100\%$, 高密度低Z薄靶 ($\sim 150 \text{ mg}/\text{cm}^2$), 如石墨, B_4C , Be_2C ...

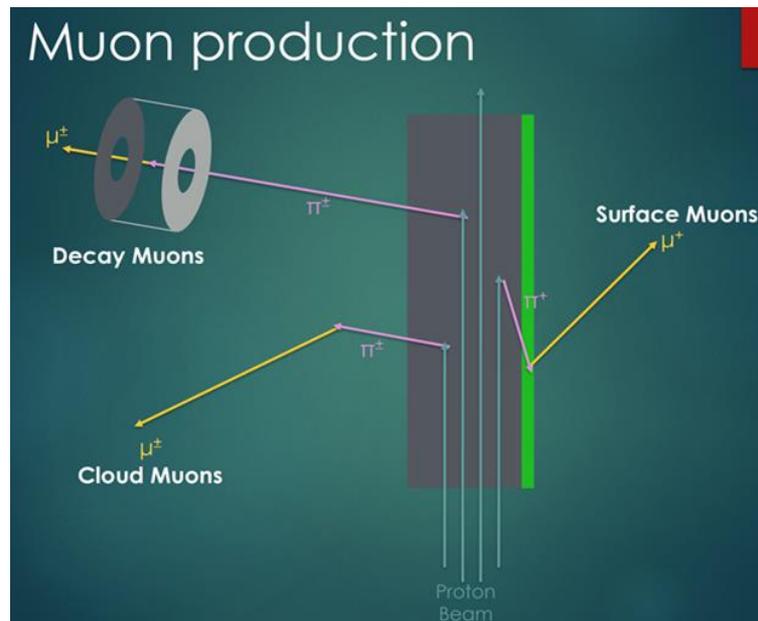
- “云” 缪子， π 在靶附件衰变产生

杂质粒子多, 包括 $p, \pi, e^+, e^-, \mu^+, \mu^-$ 等 需要聚焦、收集、选择、纯化, 能量较高

- 衰变缪子， π 在传输过程中衰变产生

动量散度大、发射度大, 能量较高, 强度较高; 需要次级传输线收集、聚焦、冷却

- π 介子产生取决于质子束能量、功率、靶...



■ 应用需求

- 表面缪子：凝聚态物理测量，低能量 μ 子应用和精确测量

- 衰变和“云”缪子：粒子物理实验测量研究，传输后加速、对撞..

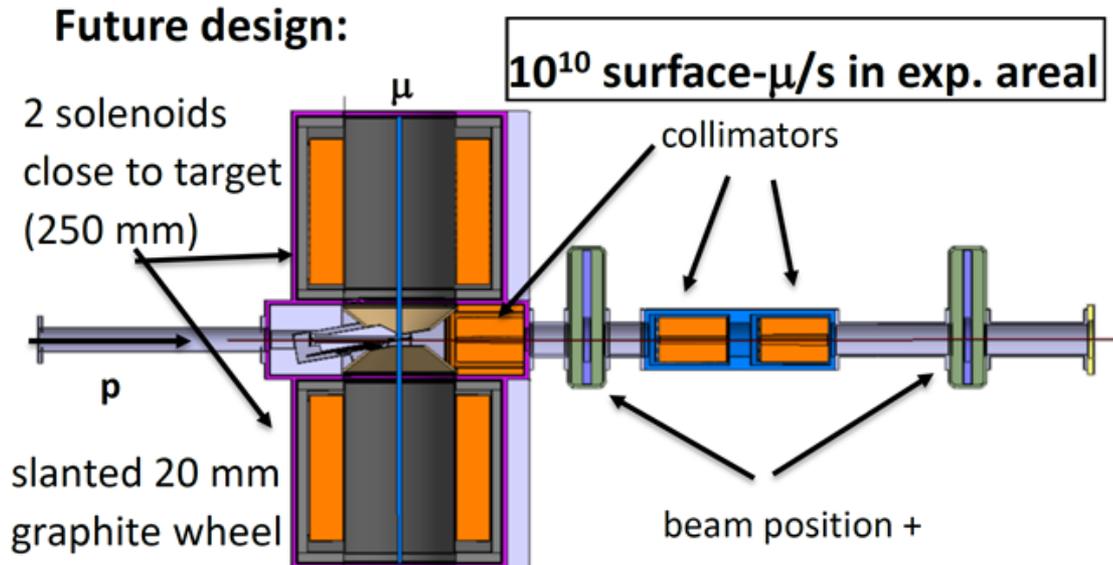
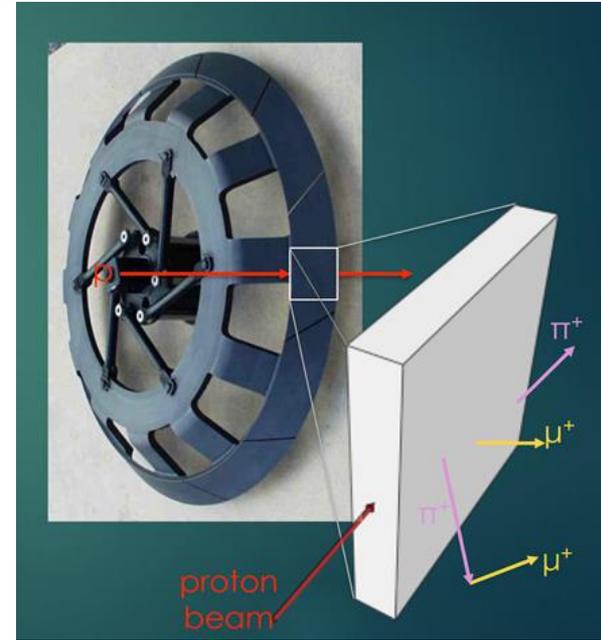
■ FNAL, BNL, PSI, CERN, J-PARC, ISIS, TRIUMF等, 中国几乎没有积累, 预研

Daniela Kiselev,
PSI, HB2021 talk



PSI产生世界上最强 Surface μ 旋转石墨靶

- 590 MeV/1.2 MW质子束
- 多晶石墨旋转靶, 40 mm 厚 (E)
- 1 Hz转动
- 50 kW质子束功率能量沉积
- $4.3 \times 10^8 \mu/s$, surface μ
- 改造期望达到 $10^{10} \mu/s$



Daniela Kiselev,
PSI, HB2021 talk



美国MAP计划设计的 μ 对撞机缪子靶系统

C Target Option

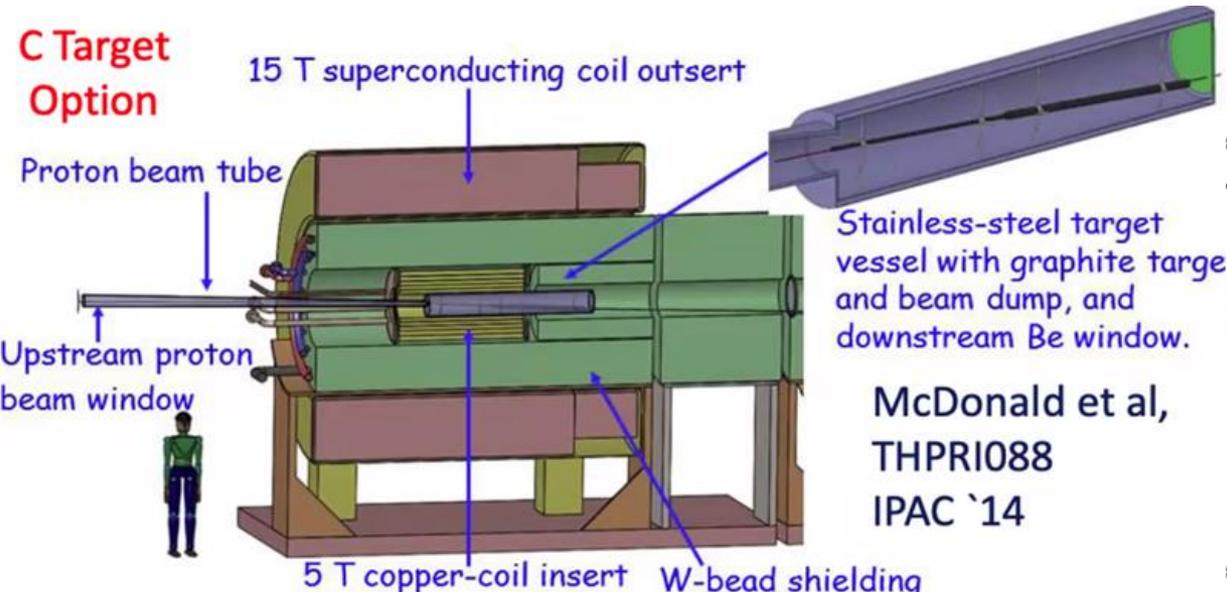


Table 2: Parameters of the Target System

Parameter	Value
Solenoid field on target	20 T at $z = 0$
Final solenoid field	2 T at $z = 5$ m
Stored magnetic energy	3 GJ
Final radius of secondary beam	23 cm
Target density	1.8 g/cm ³
Target length	80 cm
Target radius	8 mm
Target (and beam) tilt angle	65 mrad
Dump length	120 cm
Dump radius	2.4 cm

- 6-7GeV/4 MW质子束, $\sim 10^{15}$ p/s
- 60 Hz, ϕ 4 mm rms, pulse 3 ns
- 产生 μ 能量 50-180 MeV, $\sim 10^{14}$ μ /s
- 石墨靶、液态金属jet靶
- Target + Dump
- 超导螺线管组 20T—30 T, $\phi > 1$ m

问题与挑战

- 靶冷却 (4 MW, 水与液态金属)
- 强辐射与屏蔽, 辐射对超导体 > 10 MGy
- 高功率短脉冲质子对靶热冲击
- 靶寿命; 前后束窗寿命(Ti/Al, Be)
- 高场螺线管杂散场影响

.....



报告内容

一、简介

二、缪子束产生

三、收集、传输、冷却

四、加速

五、高场超导磁体

六、结束语

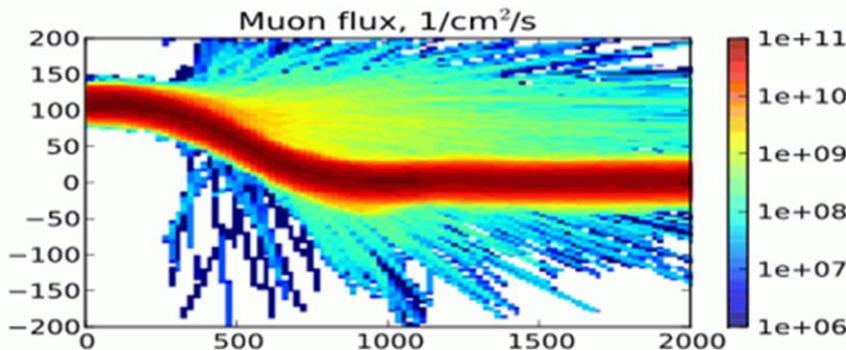
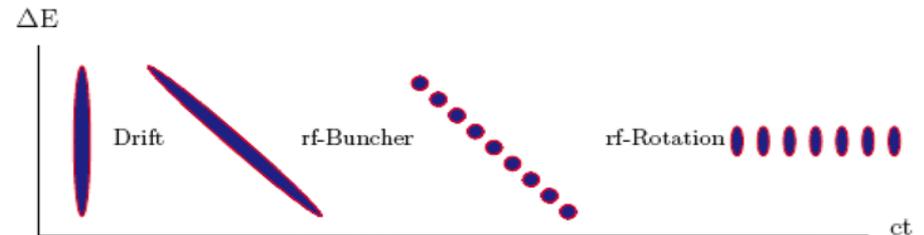
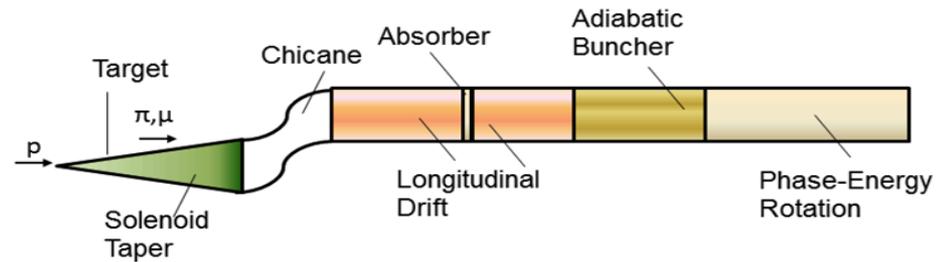
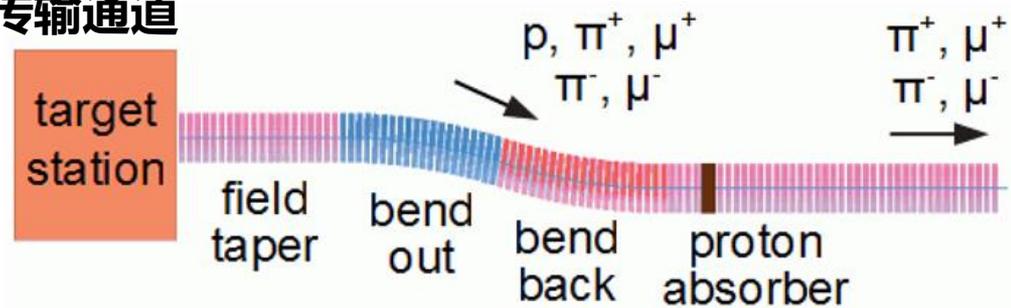
**技术挑战最大，特别是冷却
需要新的思想和理论！
全世界基础和技术积累很少！
中国这方面基础更少！**



缪子束收集和传输

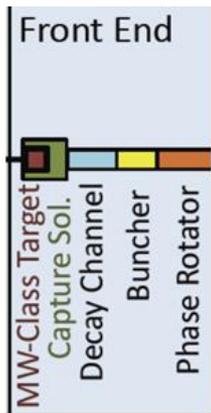
μ 对撞机前端收集、选择、传输设计

- 由Taper形和弯曲超导螺线管组成的传输通道
- 收集、选择、聚束、传输，降损失
- 操作多种粒子 (π^+ π^- μ^+ μ^- , p)
- 纵向聚束、相空间旋转，为cooling
- 包括p-beam dump
- $L=150-200$ m, $\Phi=1-1.5$ m
- 强辐射保护和屏蔽



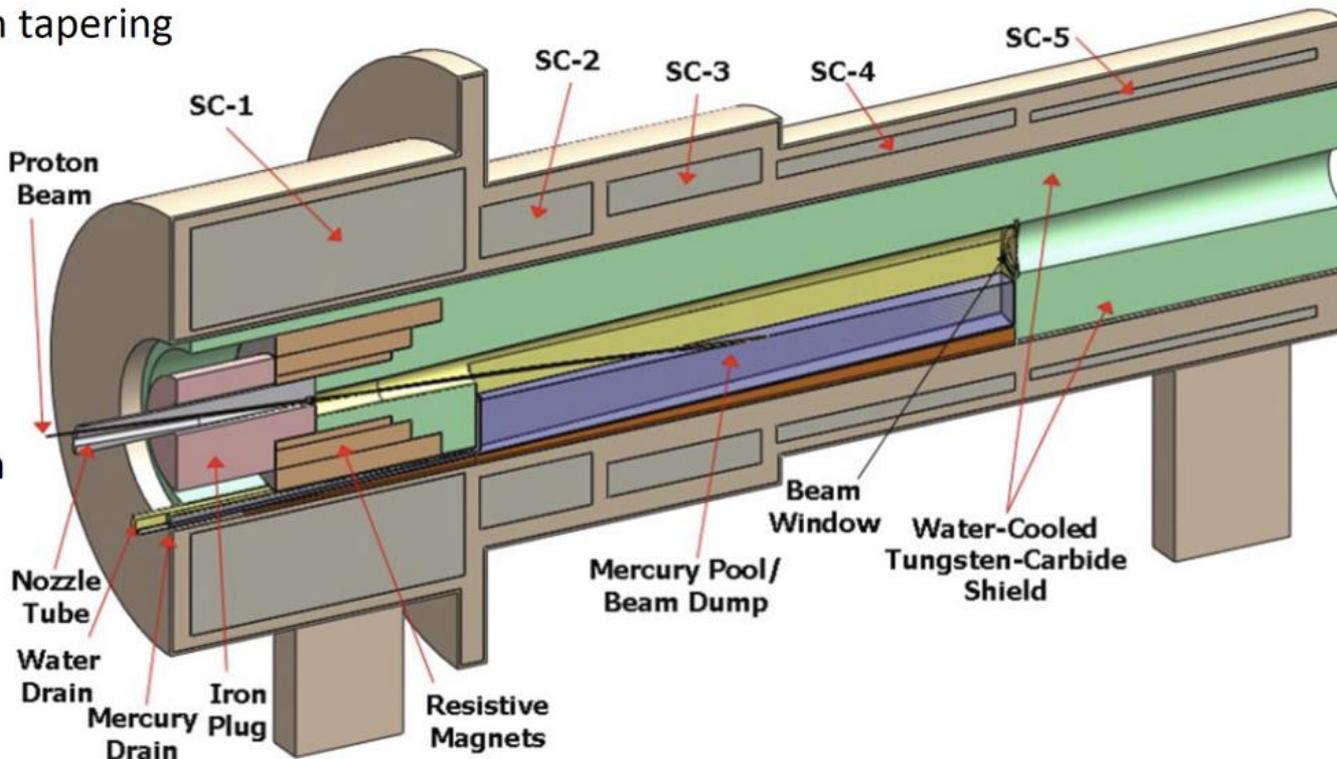


美国MAP计划μ对撞机前端靶与Taper 结构和螺线管



High field to efficiently collect pions/muons:
20 T then tapering

2-4 MW proton beam requires **radiation protection**



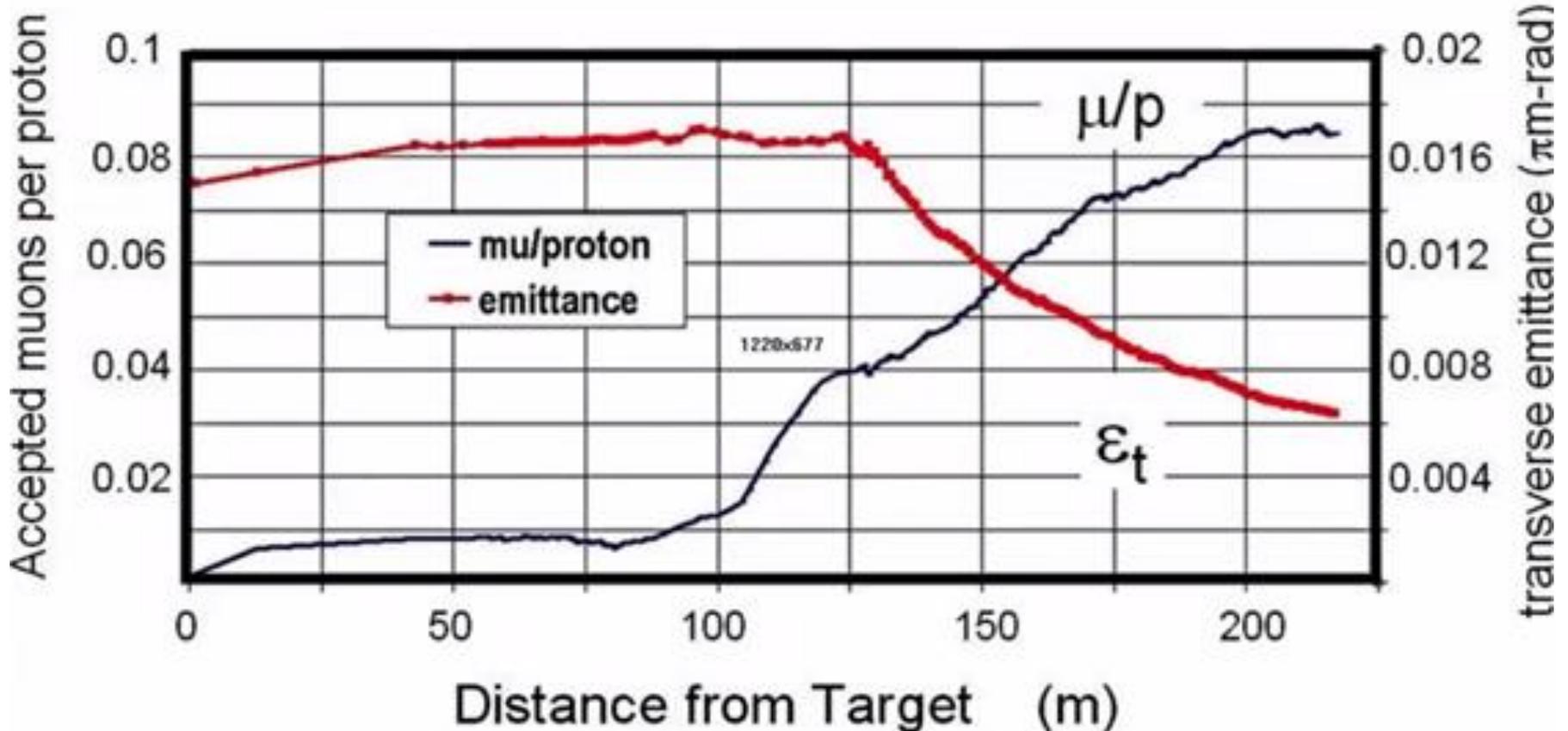
Large aperture $O(1m)$ to allow shielding

Copper insert reduced requirement for cold solenoid and provides some shielding



MAP计划模拟收集和传输后的缪子束发射度

高束流强度下产生的 μ 束发射度比常规粒子大2-3量级



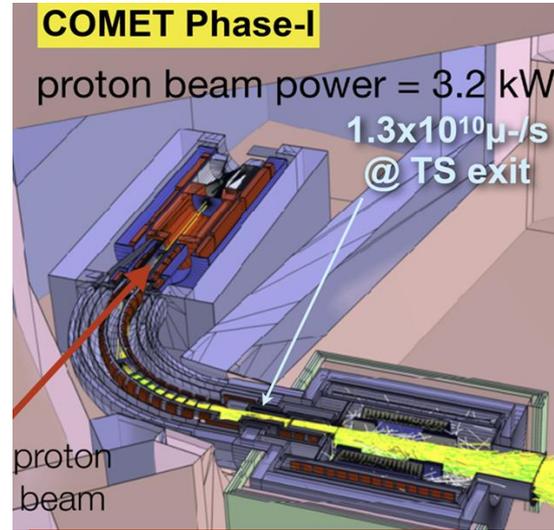
Mark Palm, BNL, MT27 talk



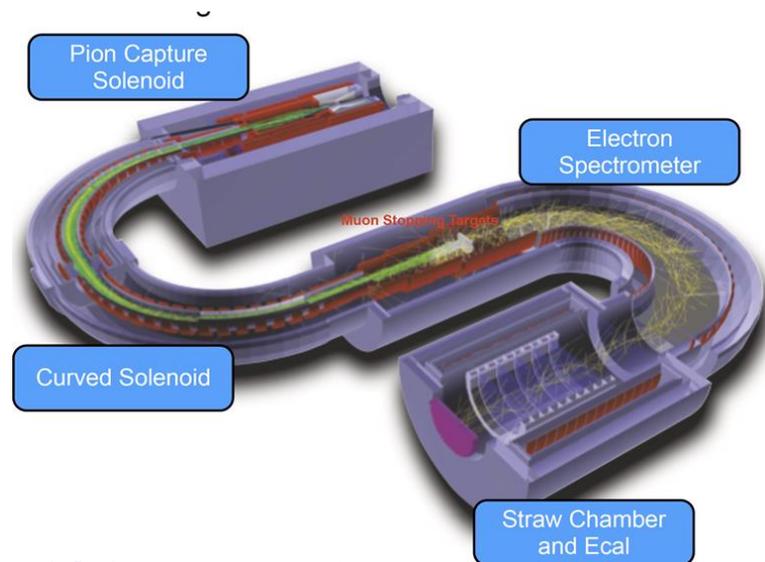
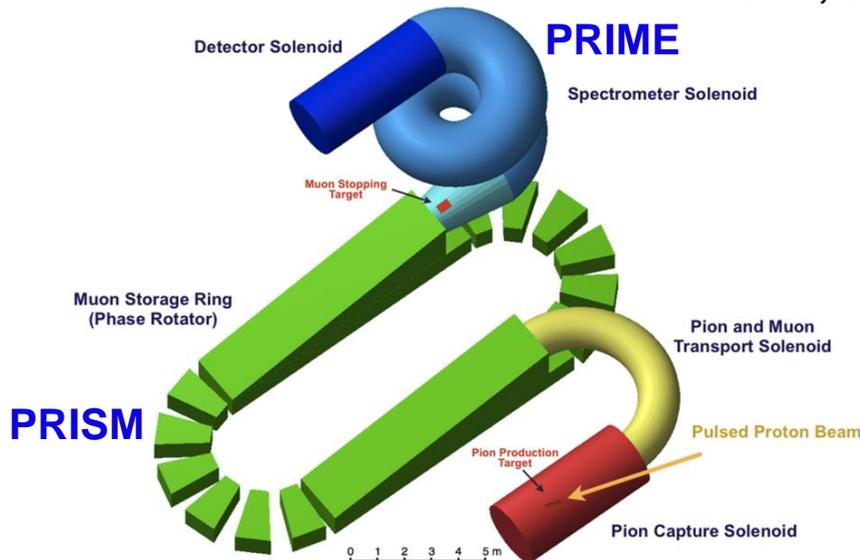
日本 JPARC COMET 缪子束收集和传输

COMET phase-I 建造
 392 MeV, 3.2 kW proton
 $1.3 \times 10^{10} \mu/s$

COMET phase-II PRISM/PRIME
 3-8 GeV, 4MW proton, 100-1000 Hz
 $2 \times 10^{12} \mu/s$, 40 MeV/c



Akira Sato, Osaka University, Snowmass meeting, 2021

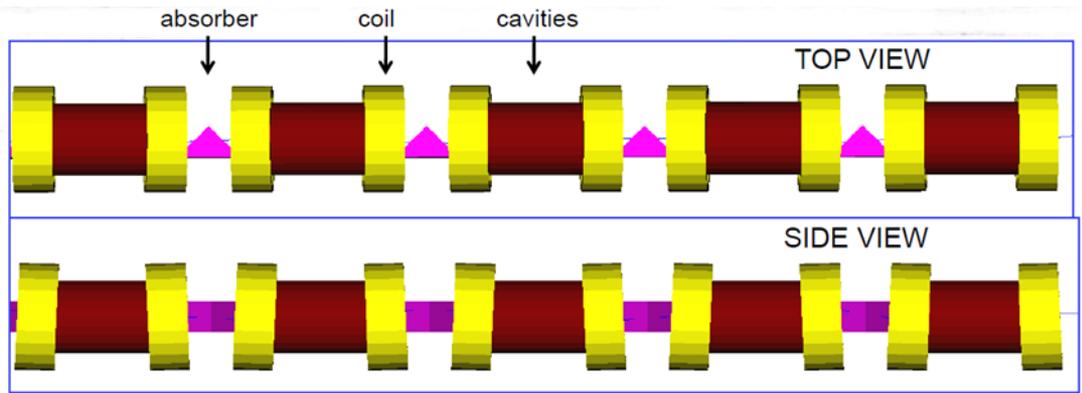
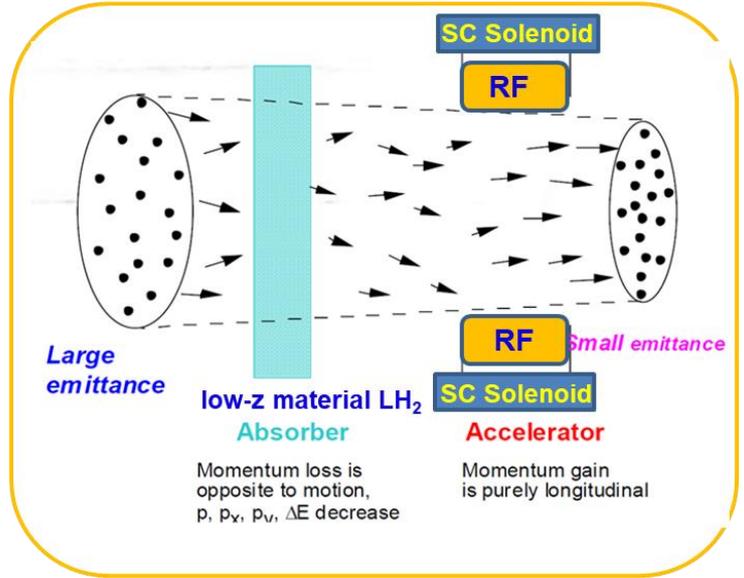
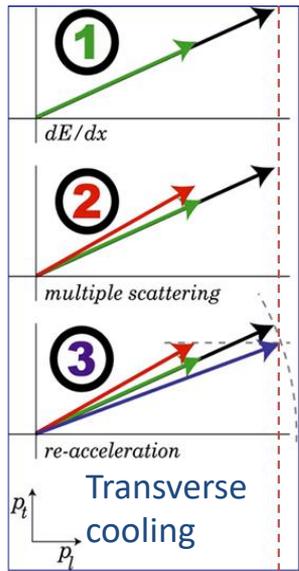


产生、俘获收集, 选择, 传输, 储存、相位旋转...



高流强缪子束冷却

- μ 束极其发散，动量散度和发射度大，需6D冷却和强磁场约束；
- μ 束寿命短，需快速冷却，常规束流冷却太慢；需高梯度，快操作；
- **电离冷却**： μ 束与低z材料电离作用减小动量，束斑大小不变，同时 μ 束多次库伦散射增加其散度，高梯度的射频场加速能量补偿，高场超导螺线管进行束流压缩和聚焦；
- 多个直线冷却段持续冷却，几百米长；
- 6D冷却需30-50 T、内孔 >0.5m 超导螺线管；
- 高梯度射频腔处于强磁场区域，射频325-650 MHz, 梯度25-30 MV/m峰值功率：2-4 MW
- 4D冷却基本原理初步验证
- 需进一步验证，**挑战极大!**



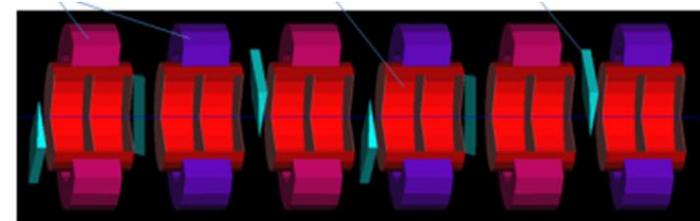
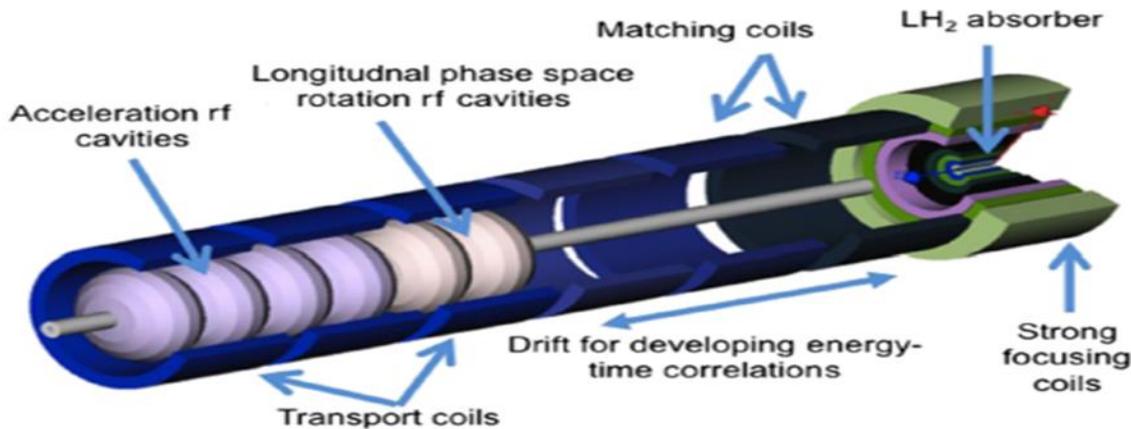
$$\frac{d\epsilon_N}{ds} \approx \underbrace{-\frac{1}{\beta^2} \left\langle \frac{dE_\mu}{ds} \right\rangle \frac{\epsilon_N}{E_\mu}}_{\text{Cooling}} + \underbrace{\frac{\beta_\perp (0.014 GeV)^2}{2\beta^3 E_\mu m_\mu X_0}}_{\text{Heating}}$$



μ束冷却模拟和初步设计

RF system for muon capture and cooling

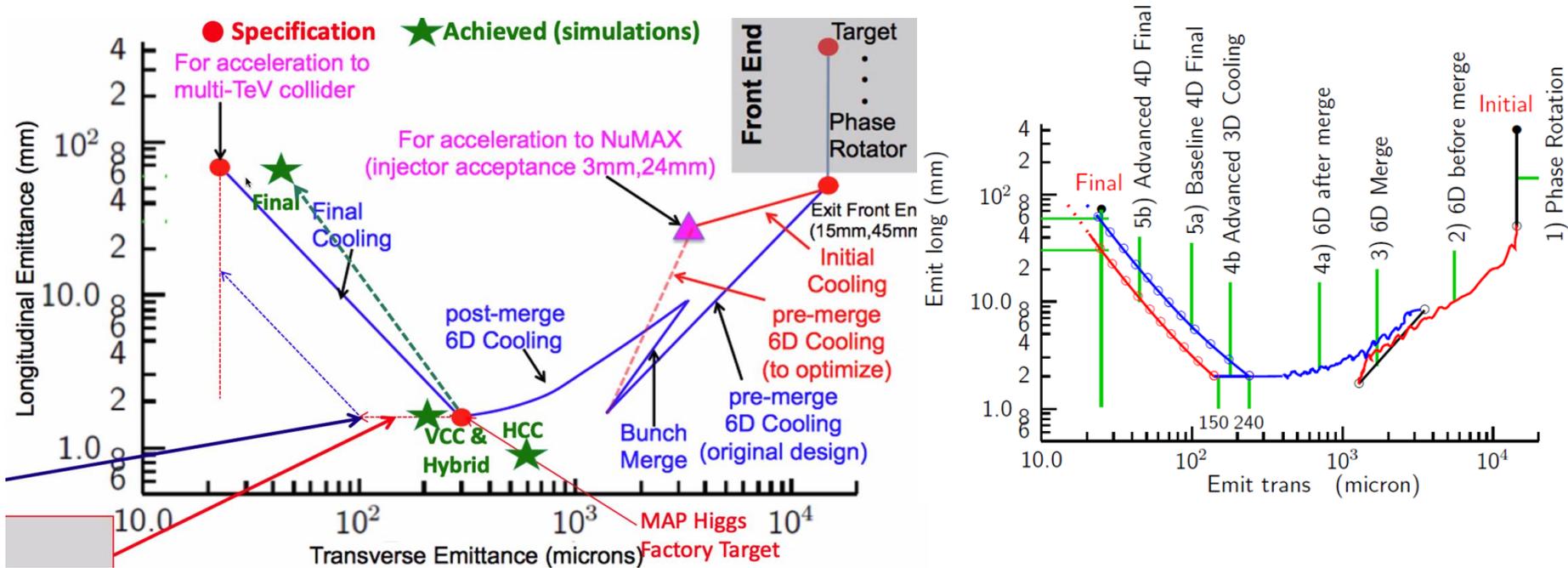
Region	Length [m]	N of cavities	Frequencies [MHz]	Gradient [MV/m]	Magnetic field [T]	Peak RF power [MW/cav.]
Buncher	21	54	490 - 366	0 - 15		1.3
Rotator	24	64	366 - 326	20		2.4
Initial Cooler	126	360	325	25	2	3.7
Cooler 1	400	1605	325, 650	22, 30	2-3, 4-6	
Bunch merge	130	26	108 - 1950	~ 10		
Cooler 2	420	1746	325, 650	22, 30	2-5, 8-13	
Final Cooling	140	96	325 - 20			
Total	~1300	3951				=> ~12GW



D. Schultze, CERN,
Snowmass meeting 2021



μ束冷却目标和计划



David Neuffer, Fermilab, Snowmass meeting 2021 talk

Minimize ϵ_t by large B, small P_μ

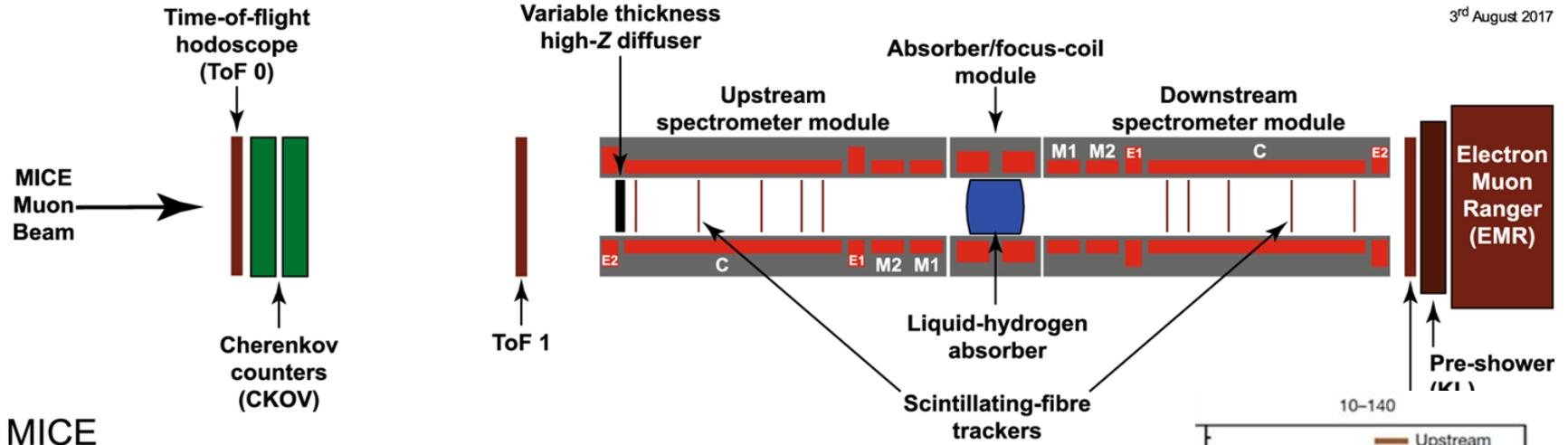
$B \rightarrow 30T +$

$P \rightarrow <100\text{MeV}/c$



μ束电离冷却首次初步验证

3rd August 2017

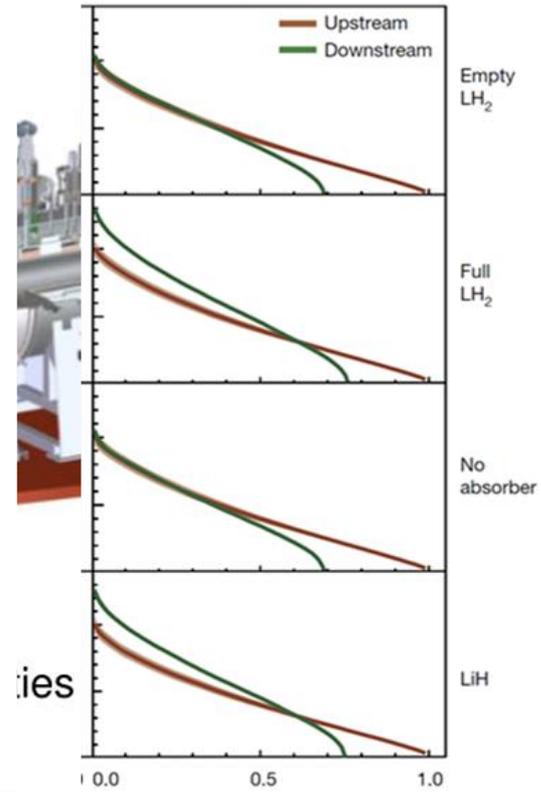
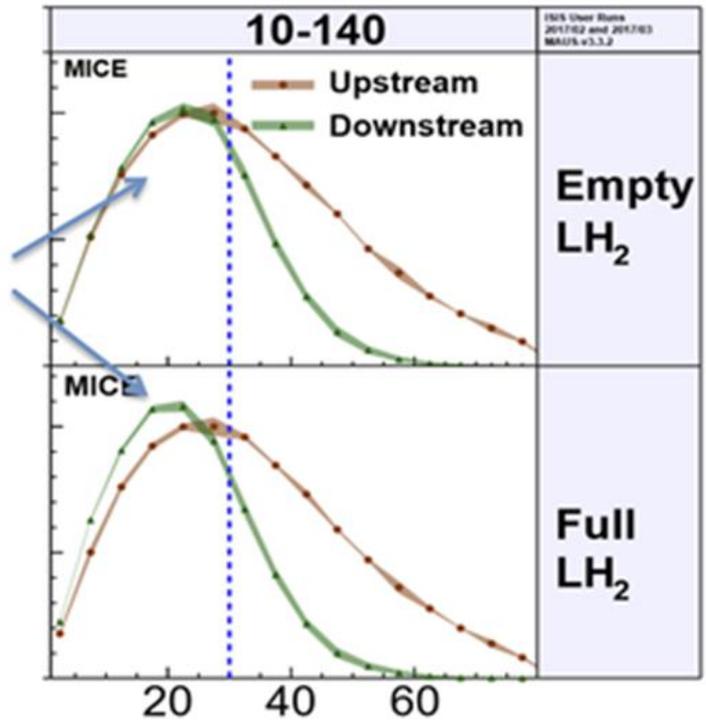


MICE

Nature Vol578,
53-59, 2020

More particles at smaller amplitude after absorber is put in place

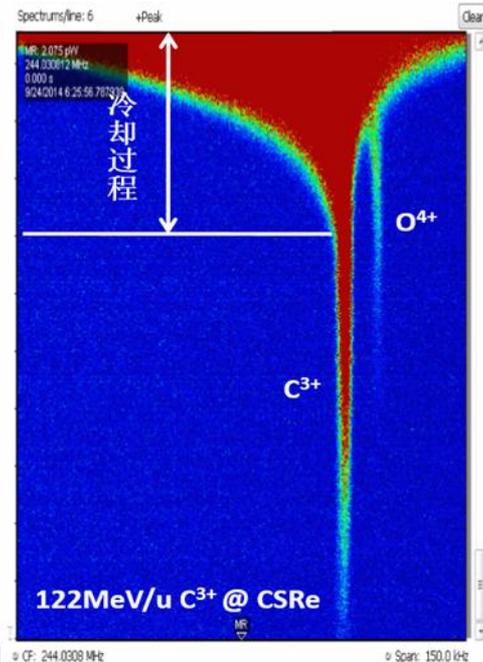
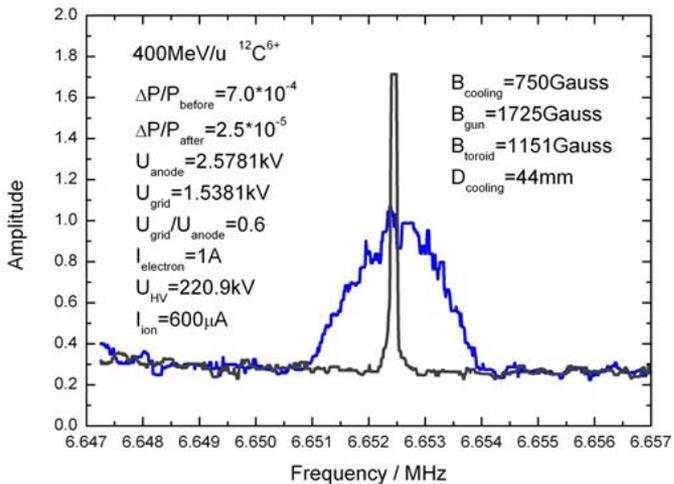
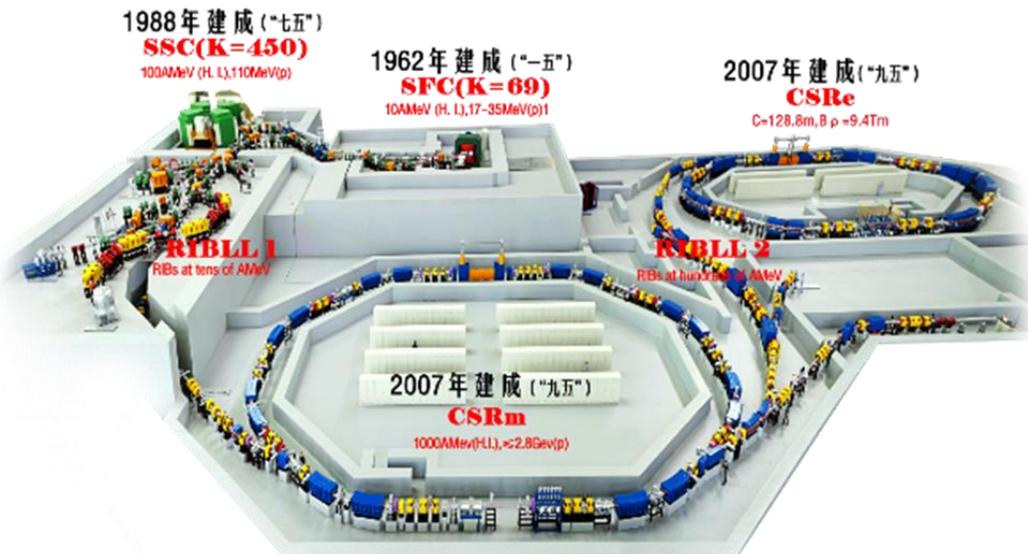
Principle of ionisation cooling has been demonstrated





我国束流冷却基础

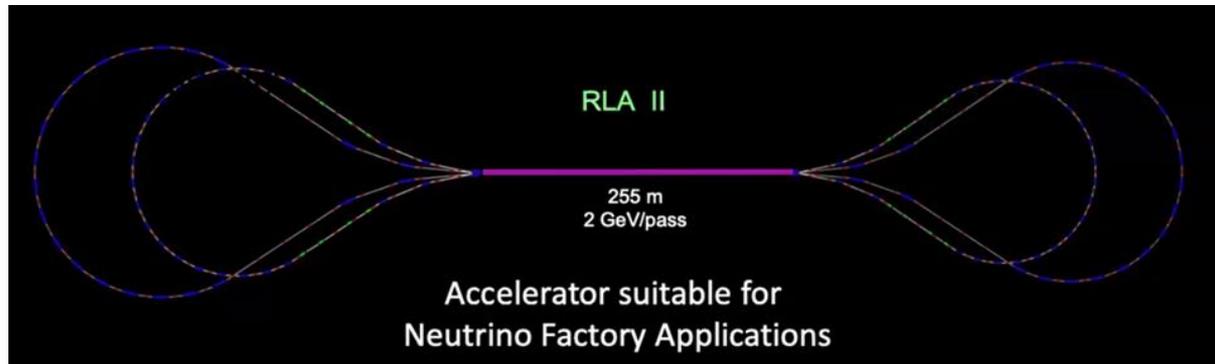
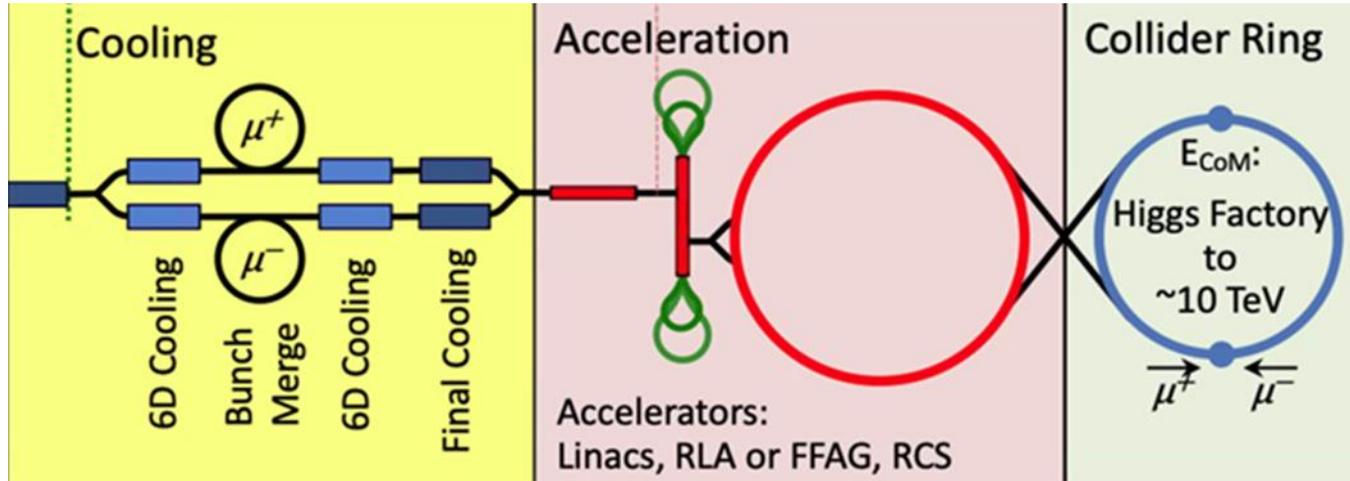
电子冷却、随机冷却和激光冷却已成功应用于兰州重离子加速器上





四、高强度 μ 束加速

常规加速技术，国内外基础较好
SRF-linac, RLA, FFAG, RCS



与 μ 束产生和冷却比， μ 束常规加速技术积累较深厚

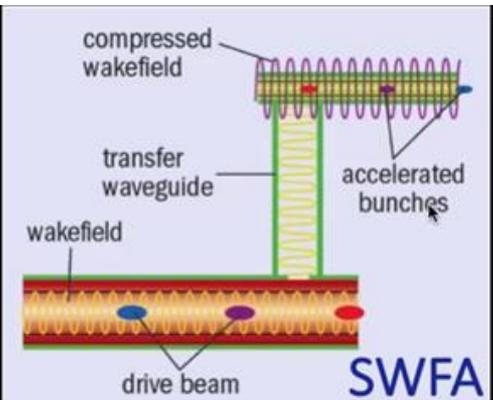
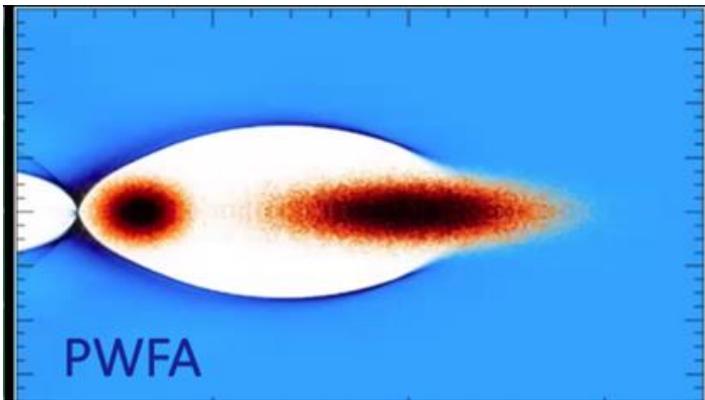
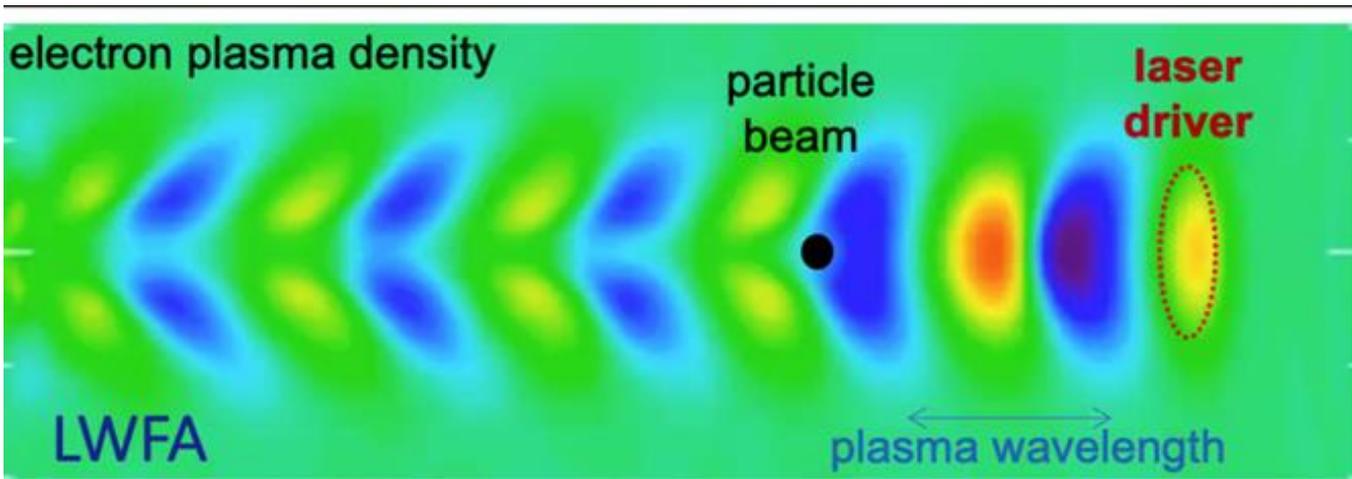
挑战是快速加速、损失控制、亮度、强辐射保护、高场超导磁体和高场快循环超导磁体等



μ 束尾场加速 — 新加速方法加快预研

- 激光尾场加速 (LWFA)
- 粒子束驱动等离子体尾场加速 (电子质子、重离子)
- ...

加速梯度高比常规高2-3量级





五、μ束对撞机高场超导磁体 (1)

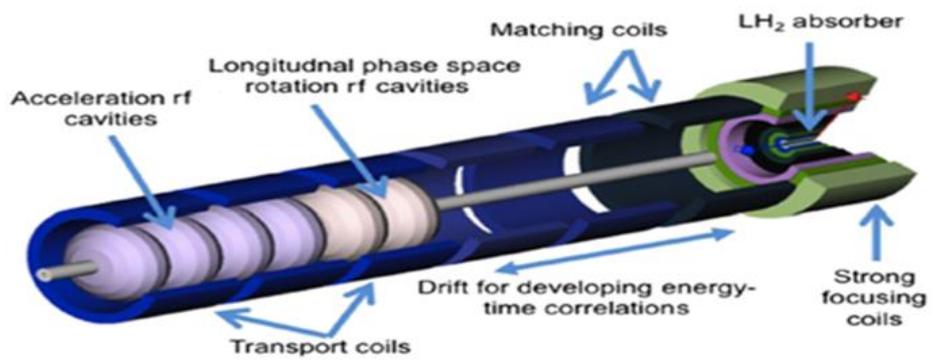
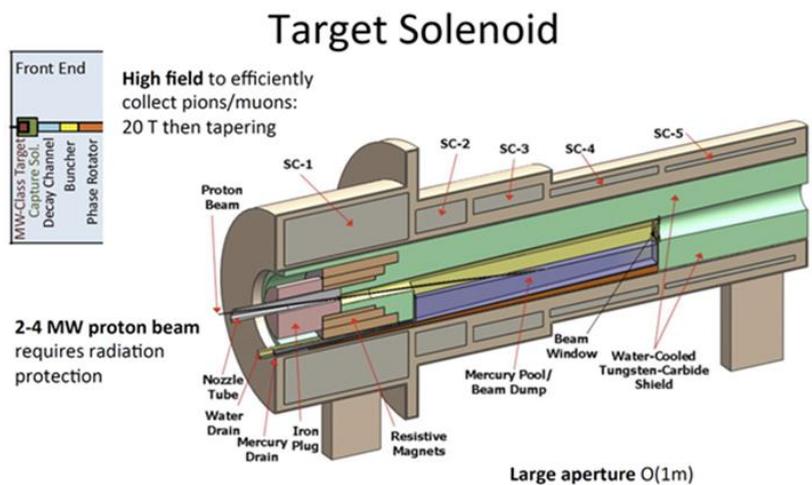
■ 二极铁: 10-12 T, 磁间隙80-180 mm, 难度不是很大

■ 挑战一: 靶区和缪子冷却所需超导螺线管

靶区: φ1-1.5 m, 20-30 T 超导螺线管

电离冷却区: φ0.5-1 m, 30-50 T 超导螺线管

只能依赖高温超导
暂无技术方案



D. Schulter, CERN, Snowmass meeting 2021



五、 μ 束对撞机高场超导磁体 (2)

- 挑战二：TeV-class μ 束快速加速 (RCS) ，需求1000 T/s 二极铁
 - 1000 T/s 二极铁和对应电源；高温超导磁体？
 - Fermilab 样机线圈 (HTS-REBCO) 达到274 T/s

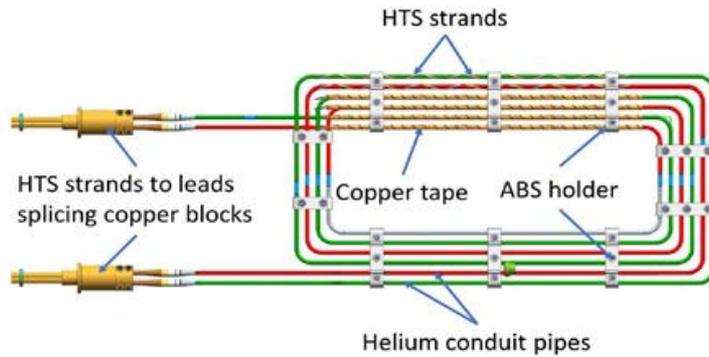


Fig. 3 Arrangement of 3 – turn HTS magnet power coil..

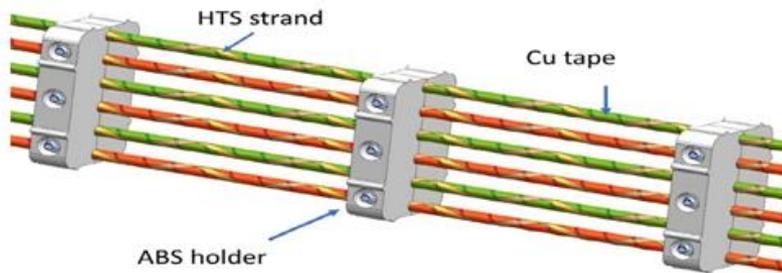


Fig.4 Details of HTS conductor coil assembly. .

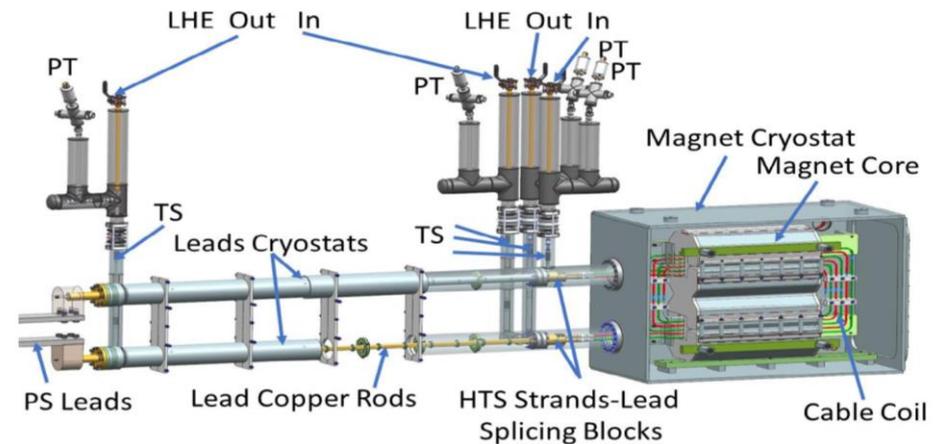


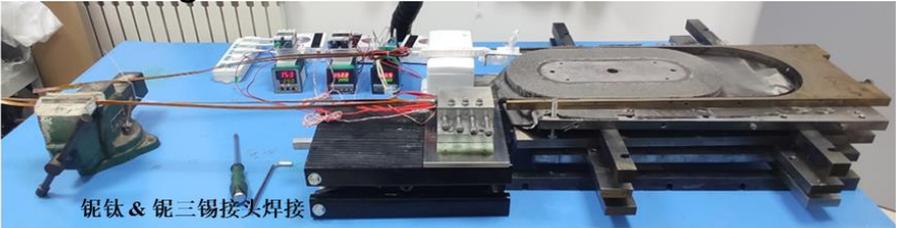
Fig.5 HTS magnet test system arrangement .

Henryk Piekarz, FNAL, MT27, 2021 poster



高能所10+ T 超导二极铁样机、China-CERN HL-LHC CCT

Nb₃Sn + NbTi 10+ T Dipole



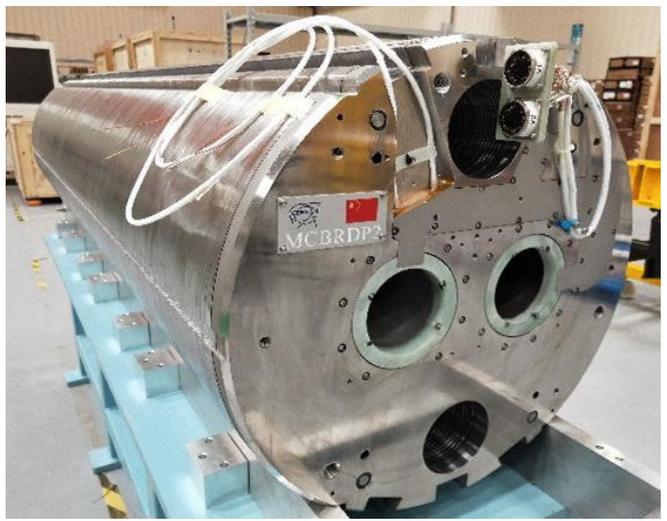
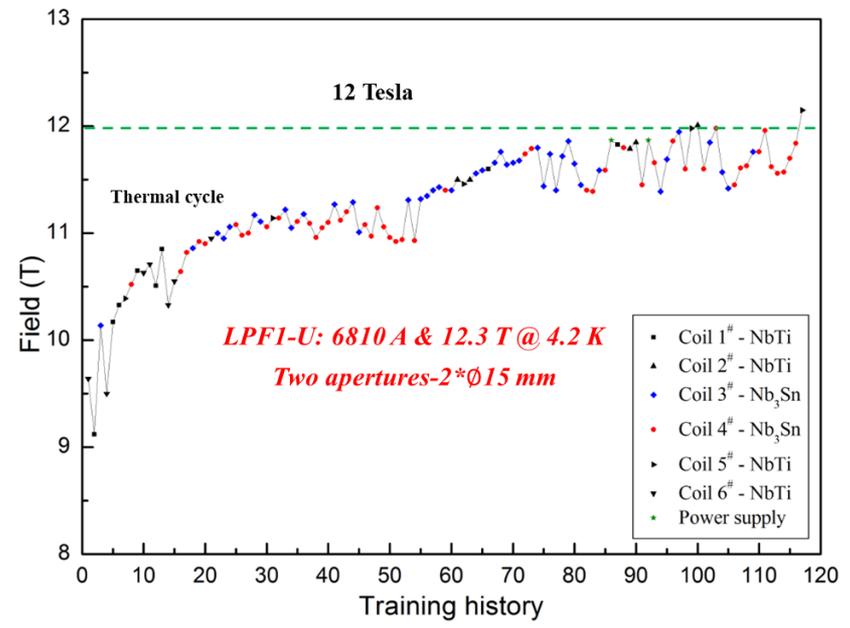
铌钛 & 铌三锡接头焊接



浸胶完成后的线圈 (铌钛、铌三锡、IBS)

磁体组装极预紧力施加

Latest test result of the LPF1-U Magnet



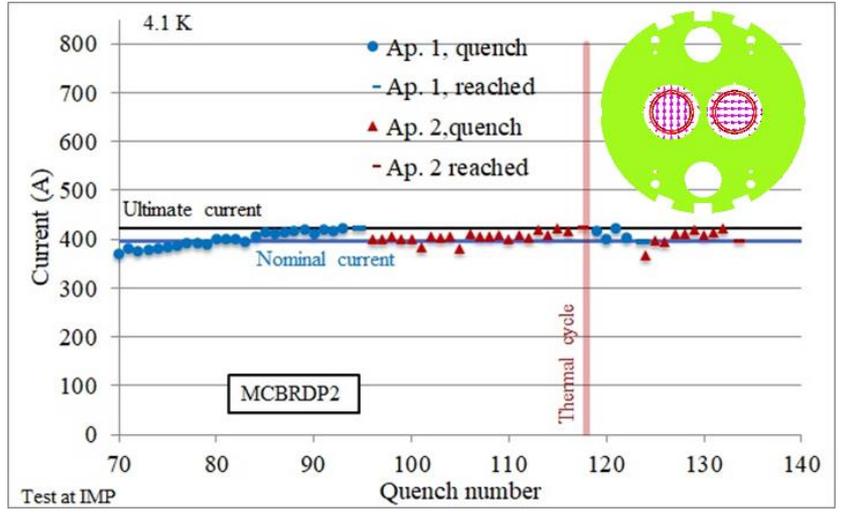
HL-LHC CCT 双孔二极校正铁样机

©徐庆金

高能所
近物所

.....

国内做12台





高能所和电工所合作研制铁基超导线圈样机

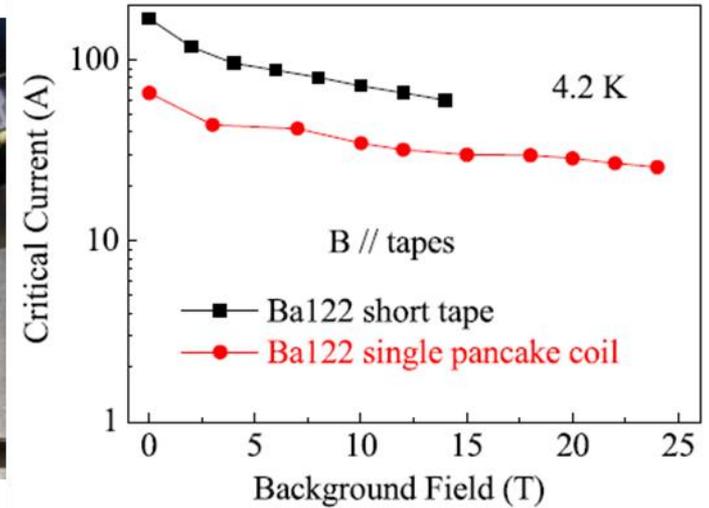
IOP Publishing
 Superconductor Science and Technology
 Supercond. Sci. Technol. 32 (2019) 04LT01 (5pp)
<https://doi.org/10.1088/1361-6668/ab09e4>

Letter

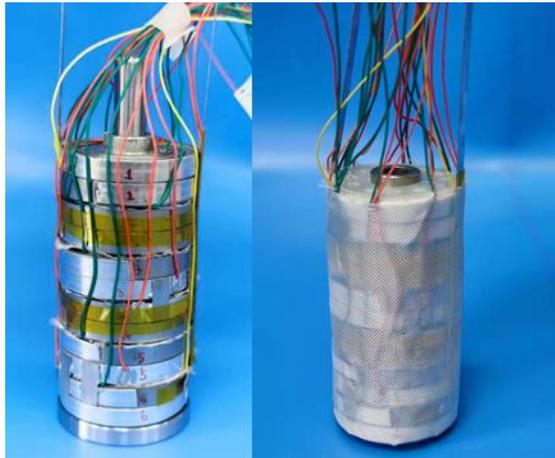
First performance test of a 30mm iron-based superconductor single pancake coil under a 24T background field

Dongliang Wang^{1,2,5}, Zhan Zhang^{3,5}, Xianping Zhang^{1,2},
 Donghui Jiang⁴, Chiheng Dong⁵, He Huang^{1,2}, Wenge Chen⁴,
 Qingjin Xu^{3,6} and Yanwei Ma^{1,2,6}

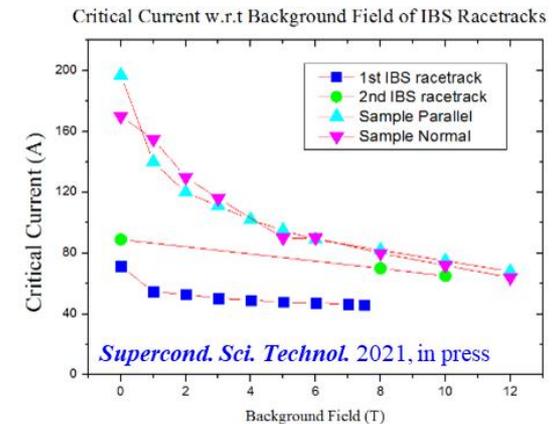
¹ Key Laboratory of Applied Superconductivity, Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, People's Republic of China
² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, People's Republic of China
³ Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, People's Republic of China
⁴ High Magnetic Field Laboratory, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, People's Republic of China



首个铁基超导螺线管线圈 (ø30)



30 T IBS 内插线圈



racetrack coil with 100m IBS tape and test at 10T

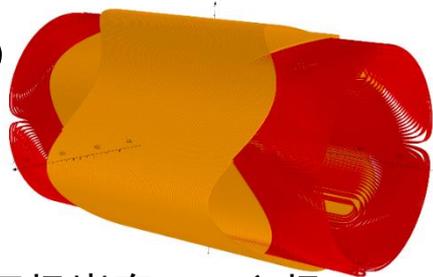
©徐庆金

Supercond. Sci. Technol. 2021, in press

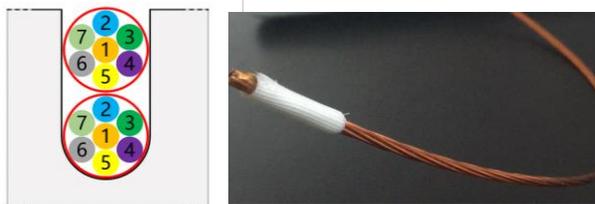


HIAF大孔径CCT四极/六极/八极组合超导磁体

- 大孔径 (NbTi线圈内径 400mm)
- 多极线圈组合
- 三组线圈共用低温恒温器
- 高磁场分布精度



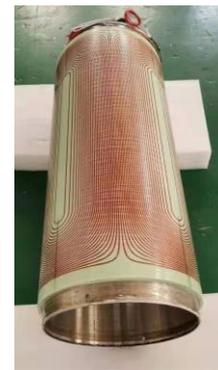
四极嵌套CCT六极



6+1 NbTi绝缘超导电缆



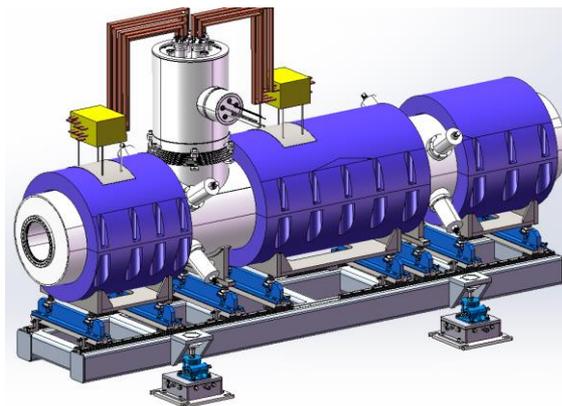
八极线圈



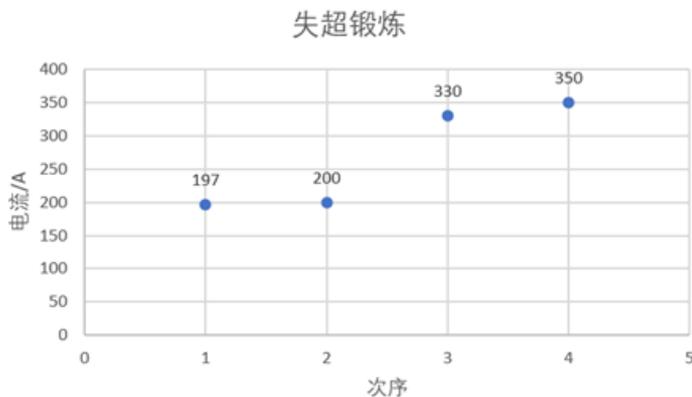
四极线圈



四极八极两组合超导磁体样机



三组合多极透镜低温恒温器



©吴巍

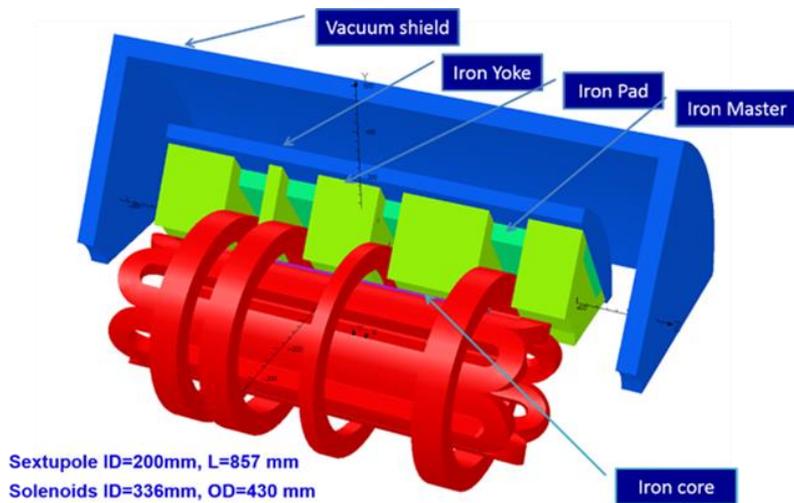
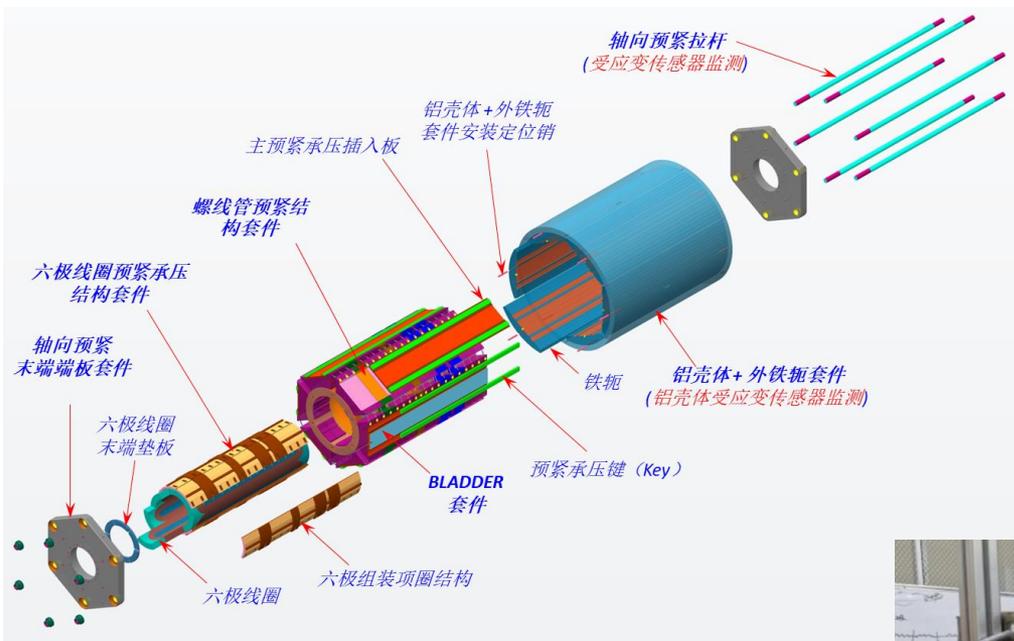
● 样机磁体达到设计磁场



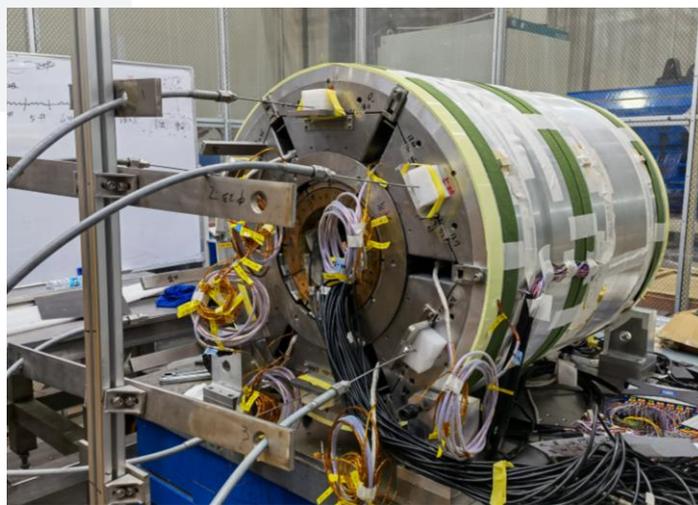
近物所FECR Nb₃Sn 超导磁体

与LBNL合作设计，DOE禁止合作
预紧力和应力导向的机械结构设计

国际首台4th G ECR 离子源
磁体最高磁场11.8 T



1/2 样机
磁体



全尺寸
coldmass
磁体



结束语

- **高流强、高品质缪子束技术我国起步晚，差距大；**
- **建议根据物理研究目标和应用需求，提出对 μ 束技术指标要求，加速器与探测器进行总体及概念设计；**
- **布局并资助基于缪子束的相关物理及应用研究；**
- **开展高流强、高品质缪子束产生、收集、传输、冷却和加速关键技术预研**
- **发挥CSNS、HIAF、CIADS在缪子源方面的作用，规划线站和谱仪，适时建设，开展实验研究；**
- **特别提倡在高流强高品质缪子束产生、冷却和加速等方面完全创新的理论、方法和技术研究。**

谢谢！ 请指正