

HIAF上超级 η 工厂计划

陈旭荣

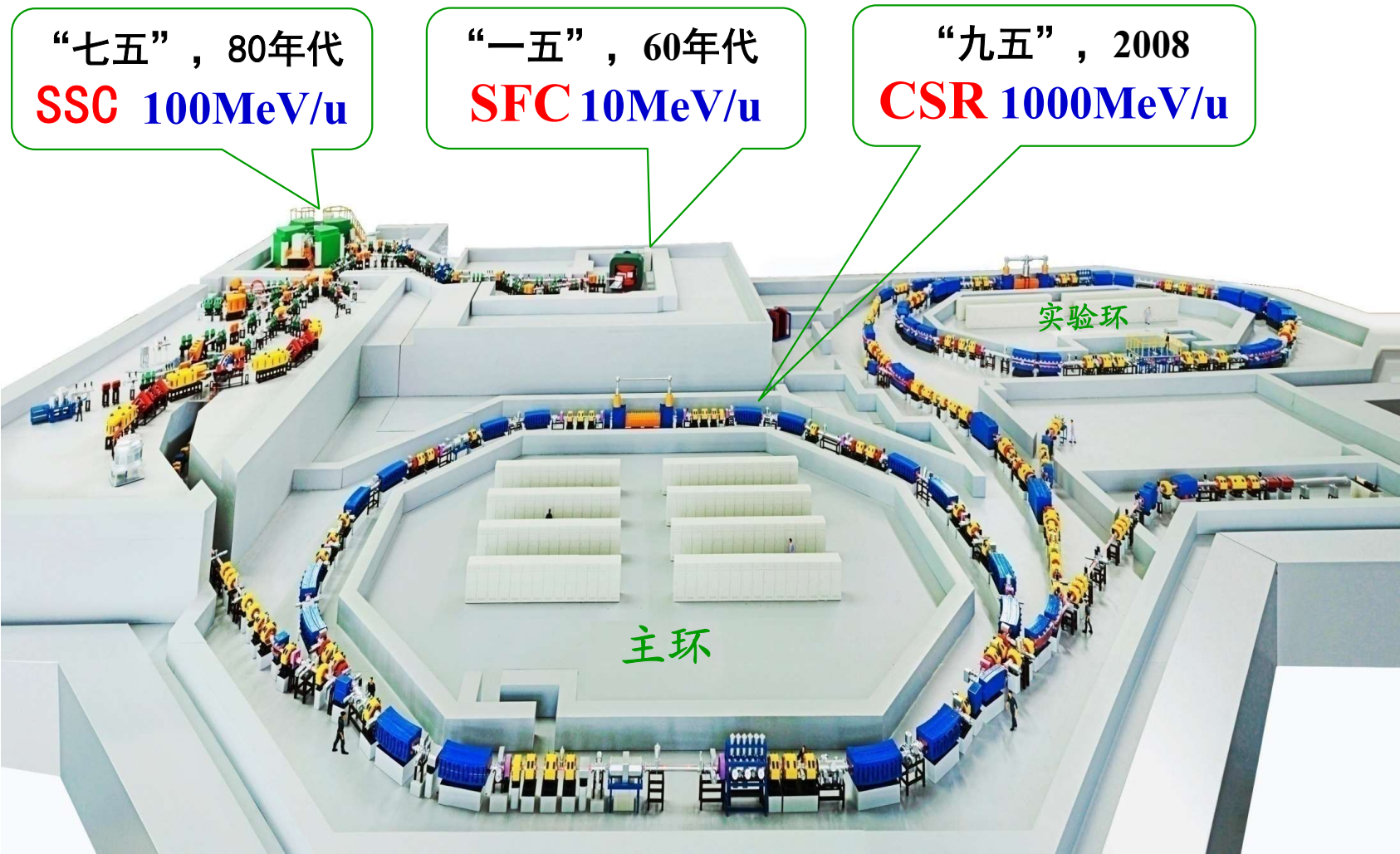
中科院 近代物理研究所

2021.1.24

提纲

- I. 近物所HIRFL和HIAF质子束流
- II. CSR和HIAF强子谱
- III. HIAF: 超级 η 工厂及其物理
- IV. 重要物理模拟和探测器设计
- V. 总结与展望

I. 近物所HIRFL和HIAF 质子束流



“七五”，80年代
SSC 100MeV/u

“一五”，60年代
SFC 10MeV/u

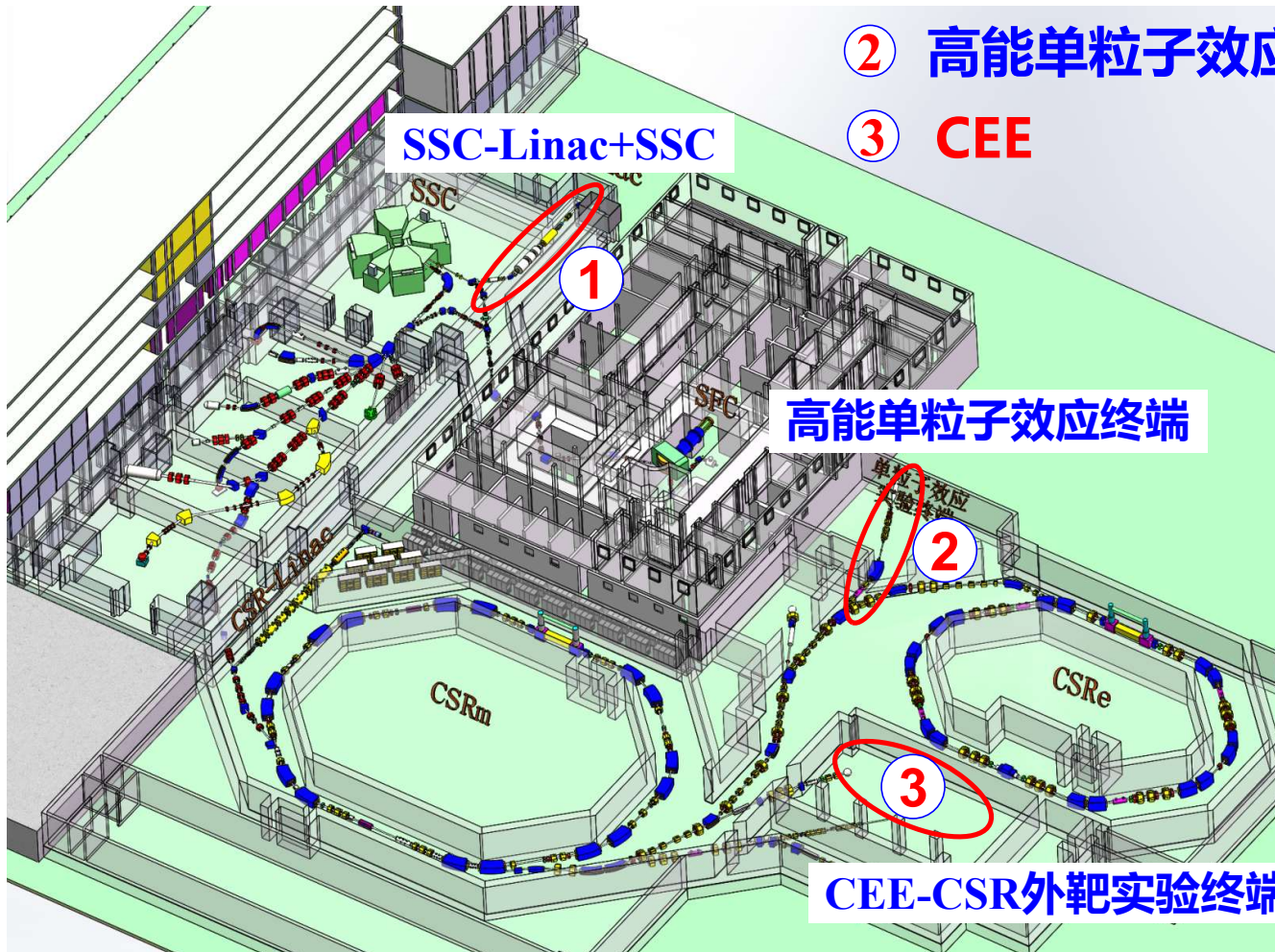
“九五”，2008
CSR 1000MeV/u

兰州重离子加速器 HIRFL

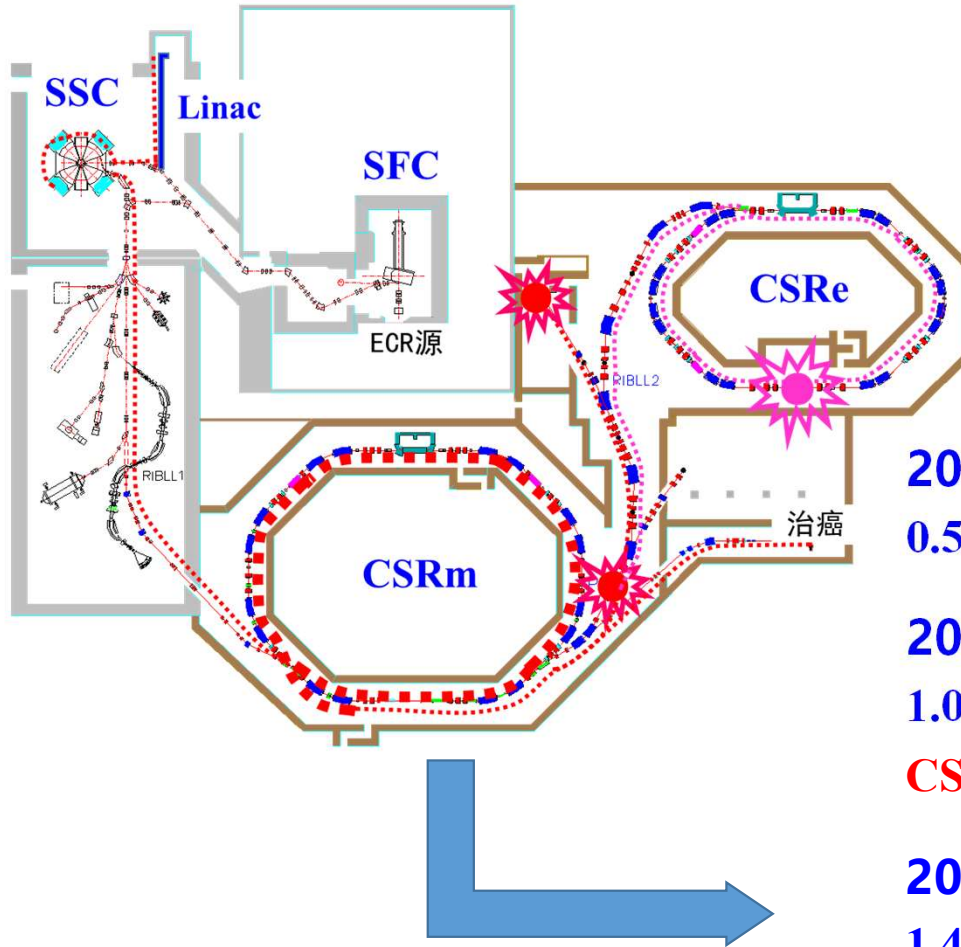
HIRFL装置升级改造

提升性能、缓解机时

- ① SSC-Linac
- ② 高能单粒子效应终端
- ③ CEE



HIRFL装置升级改造



2020年完成:

0.58 MeV/u → 5.97 MeV/u(SSC)

2021年完成:

1.025MeV/u → 10.7MeV/u(SSC)

CSRm (383MeV/u, U⁷¹⁻⁷²)

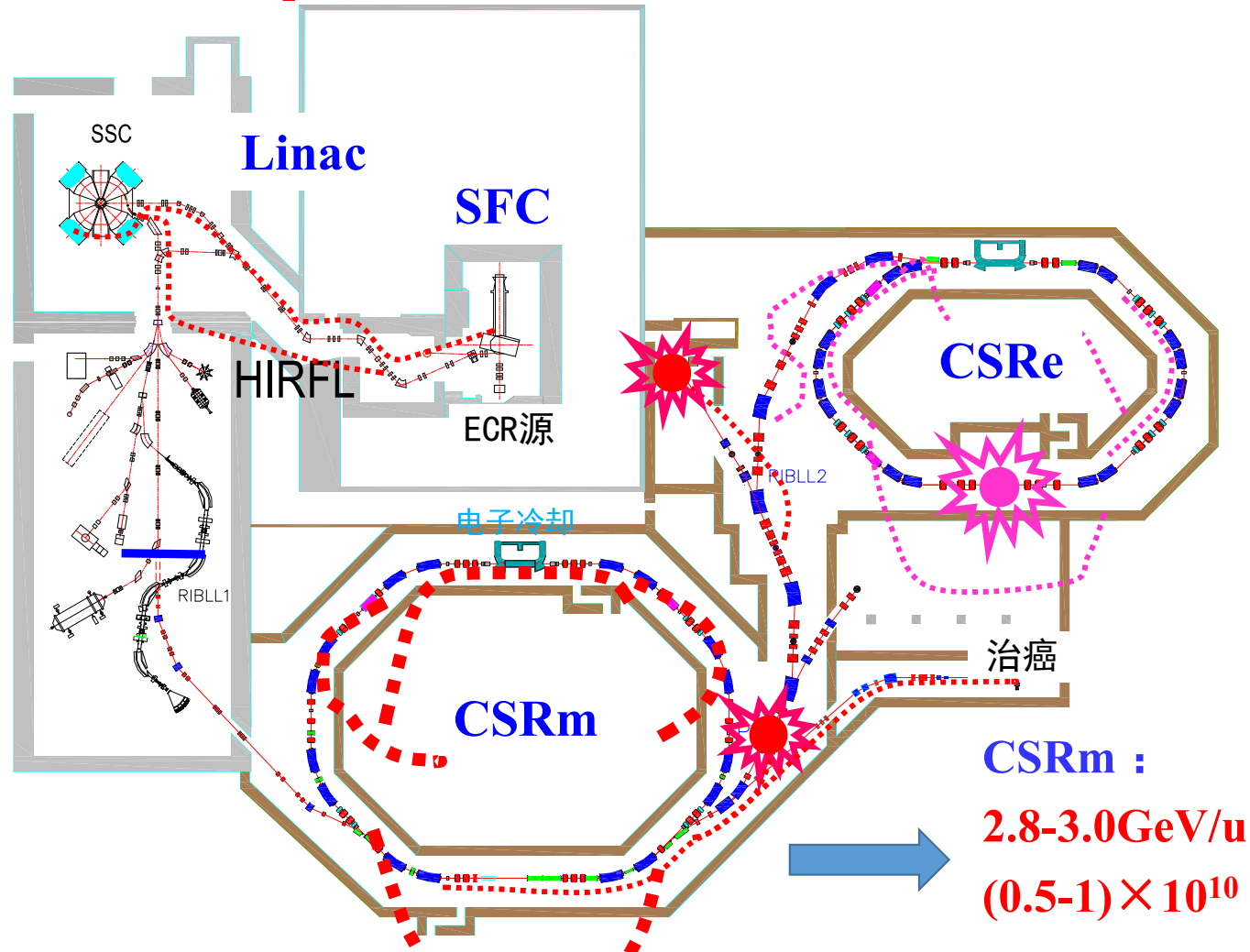
2022年完成:

1.48MeV/u → 14.7MeV/u(SSC)

CSRm (500MeV/u, U⁷⁶⁻⁷⁷)

HIRFL质子束-方案一

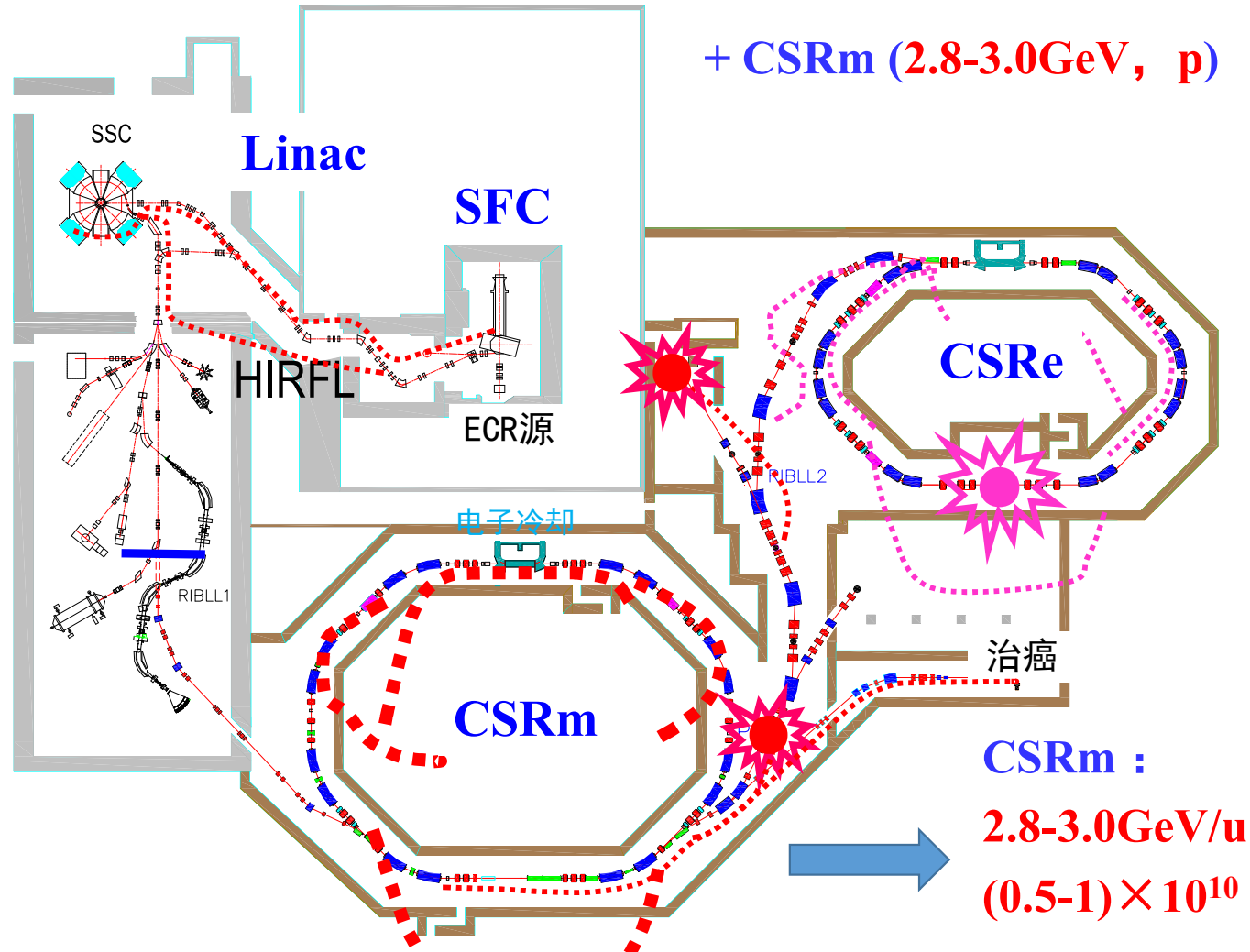
SFC (10.0MeV/u, H_2^+) + 剥离膜(10.0MeV, p) + CSRm (2.8-3.0GeV, p)



HIRFL质子束-方案二

Linac (1.48MeV/u, H_2^+) + SSC (15.5 MeV/u, H_2^+) + 剥离膜(15.5MeV, p)

+ CSRm (2.8-3.0GeV, p)



强流重离子加速器-HIAF

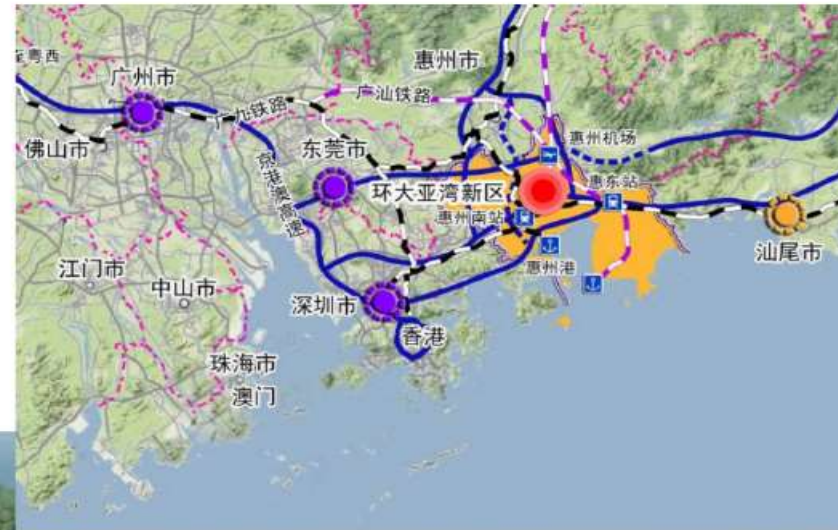
国家重大科技基础设施中长期发展规划建设项目

强流重离子加速器-HIAF

HIAF能提供国际上脉冲流强最高的重离子束流和精度最高的核质量环形谱仪，将使我国重离子核科学研究从过去的“紧跟”和“并行”，最终实现“引领”，形成在国际上具有重大影响的重离子科学研究中心

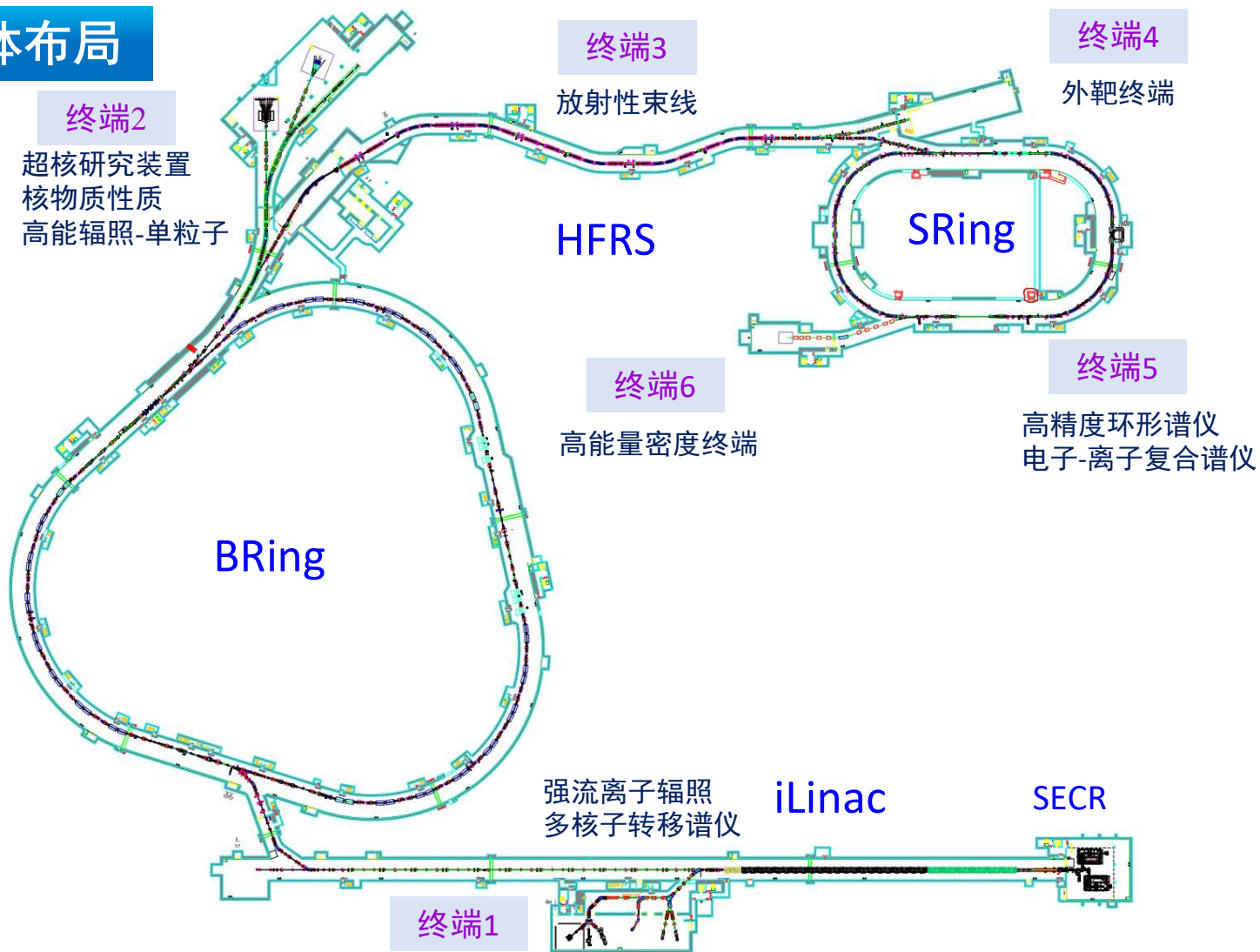
◆ Pre-Civil Infrastructure Started 2017

◆ Projects Starting in mid of 2018



强流重离子加速器-HIAF

总体布局



强流重离子加速器-HIAF

束流参数

典型离子设计指标

离子	最高能量 (GeV/u)	脉冲流强 (ppp) 设计指标	脉冲流强 (ppp) 实际计划指标
p	9.3	2.0×10^{12}	$(0.6-1.0) \times 10^{13}$
$^{18}\text{O}^{6+}$	2.6	1.0×10^{11}	6.0×10^{11}
$^{78}\text{Kr}^{19+}$	1.7	7.5×10^{10}	4.0×10^{11}
$^{209}\text{Bi}^{31+}$	0.85	3.0×10^{10}	3.0×10^{11}
$^{238}\text{U}^{35+}$	0.8	3.0×10^{10}	2.0×10^{11}
$^{238}\text{U}^{76+}$	2.45		4.0×10^{10}

小结：基于CSR和HIAF的可能实验计划

- CSR装置经过适当改造后，可以提供质子束流：2.8 GeV质子束流，流强 $10^{10} \sim 10^{11}$
- 惠州大型加速器集群BEIF是规划中的，以国家“十二五”重大科学工程项目“强流加速器装置（HIAF）”和“加速器驱动嬗变系统（CIADS）”为基础的世界规模最大、性能领先的以核物理研究为主的大型加速器集群。HIAF提供质子束流9.3GeV打固定靶，流强 $10^{12} \sim 10^{13}$
- 我们的计划分两步：
 - CSR上初步的强子谱实验：~2024年
 - HIAF上强子谱和 η 超级工厂研究：~2030年

II. CSR和HIAF强子谱物理

●HIAF $E_p=9.3$ GeV, $W \sim 4.5$ GeV, 亮度 $10^{34} \sim 10^{35}$

原则上, HIAF可以产生所有的轻强子谱

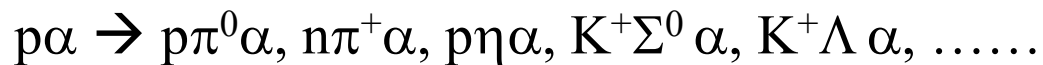
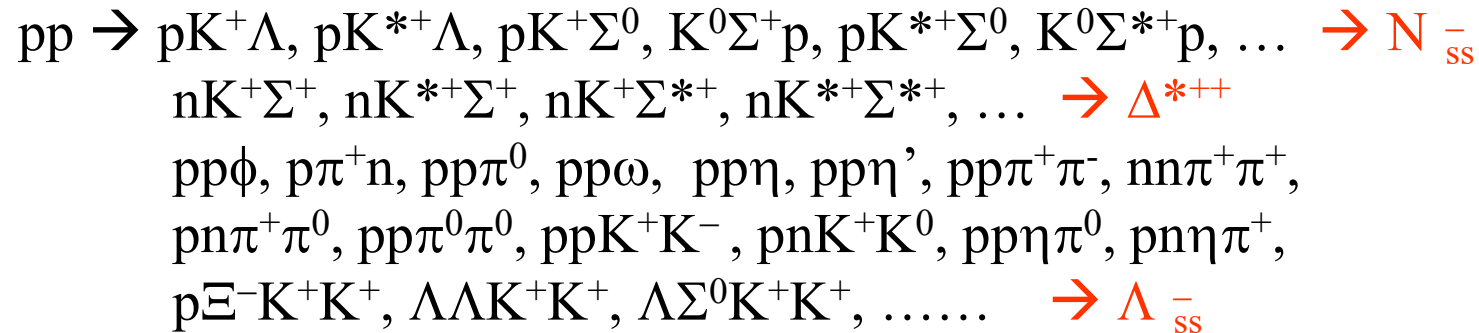
1. 丰富的介子谱
2. 核子共振态: 寻找“失踪”共振态特别是 Δ^{*++} 重子激发态
3. 双重子态: 验证 $d^*(2380)$, 寻找更多的双重子态和六夸克态
4. 重子内的五夸克成分及隐奇异核子共振态
5. 超核物理

J-PARC: $\sqrt{s} = 10$ GeV
RHIC: $\sqrt{s} = 200$ GeV
LHC: $\sqrt{s} = 14$ TeV

关键物理目标、主要反应道与束流要求

目标	过程	质心系能量	质子束流能量	极化	计算依据
双重子态	$pp \rightarrow \pi d$ $pp \rightarrow d\pi\pi$ $pp \rightarrow (pp\pi^+\pi^+)\pi^-\pi^-$	$\sim 2.6 \text{ GeV}$	$\sim 3 \text{ GeV}$	必须	以 $d^*(2380)$ 计算。如需寻找其他更高的态，质心能量需加上与 $d^*(2380)$ 的质量差
重子内的五夸克成分； 隐奇异核子共振态	$pp \rightarrow pp\phi$, $pn \rightarrow d\phi$ $pp \rightarrow pp\eta'$ $pp \rightarrow pK^+\Lambda(1405)$ $pp \rightarrow pK^+\Lambda(1520)$	$\sim 3.2 \text{ GeV}$	$\sim 4.6 \text{ GeV}$	更好	
“失踪”重子共振态； 超子—核子相互作用	$pp \rightarrow pn\pi^+$ $pp \rightarrow pK^+\Lambda$ $pp \rightarrow pK^+\Sigma^0$	$\sim 3.5 \text{ GeV}$	$\sim 5.6 \text{ GeV}$	更好	3.5GeV接近可观测核子共振态的上限。3.2GeV即可有得到大量有价值的的数据。
介子谱	$pp \rightarrow ppm^*$ $pp \rightarrow pYK^*$	$\sim 3.5 \text{ GeV}$	$\sim 5.6 \text{ GeV}$	更好	1.5GeV以下介子。如精度较高，可能观测到奇特轻介子。

- **COSY**有多个探测器，但都有局限性。兰州**CEE@CSR/HIAF**在重子谱研究方面大有可为。



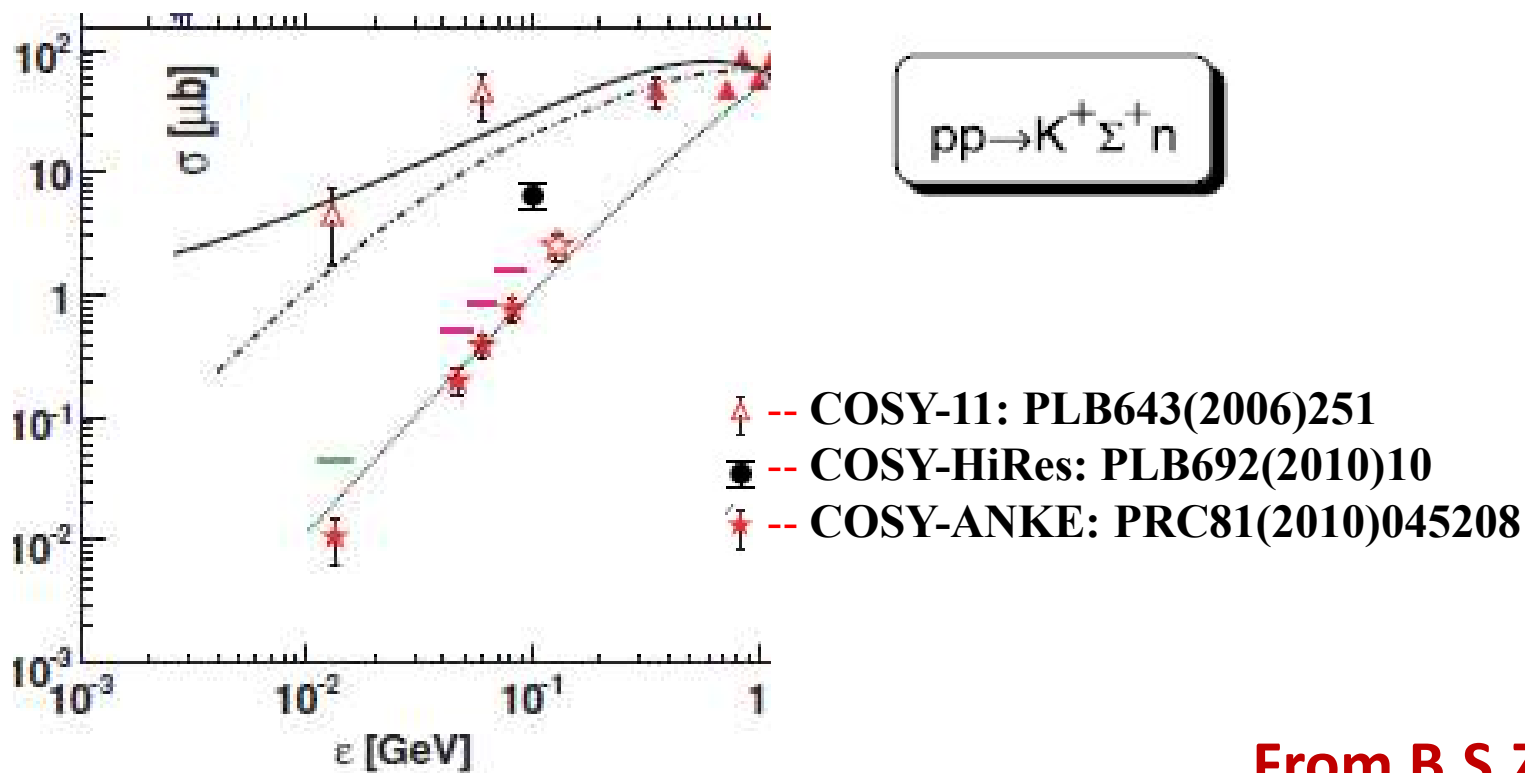
其中 $pp \rightarrow n K^+ \Sigma^+$ 为寻找与 ρ^+p 及 $K^+\Sigma^+$ 耦合强的“失踪”的 Δ^{*++} 重子激发态，完善 (uuu) 重子谱，可起到国际上独一无二的作用。

目前 $\Delta^{*++}(\text{uuu})$ 重子谱只有7~10个确立的成员

同时可以寻找各种 **dibaryon**

From B.S.Zou

COSY探测器局限性典型实例：3个探测器测量结果差3个量级



From B.S.Zou

重离子碰撞奇异产生的基本过程，3个量级的不确定性！

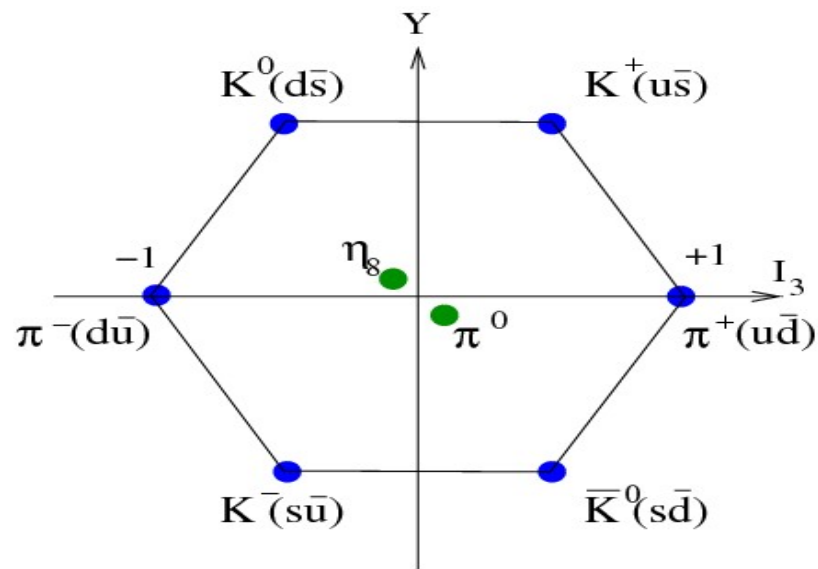
III. 超级 η 工厂及其物理

- **对称性**: 普遍存在于自然界中, 是现代物理学中的一个核心概念。对称性破缺往往蕴含着新物理
- **色禁闭**: QCD色禁闭的一个直接后果是传统的微扰论在低能标下的失效, 对该区域强相互作用的定量理解仍然是当代粒子物理学的最具挑战的问题之一
- 精确的实验和理论研究, 将有助于我们理解低能量QCD对称性结构以及QCD对称性破缺的来源

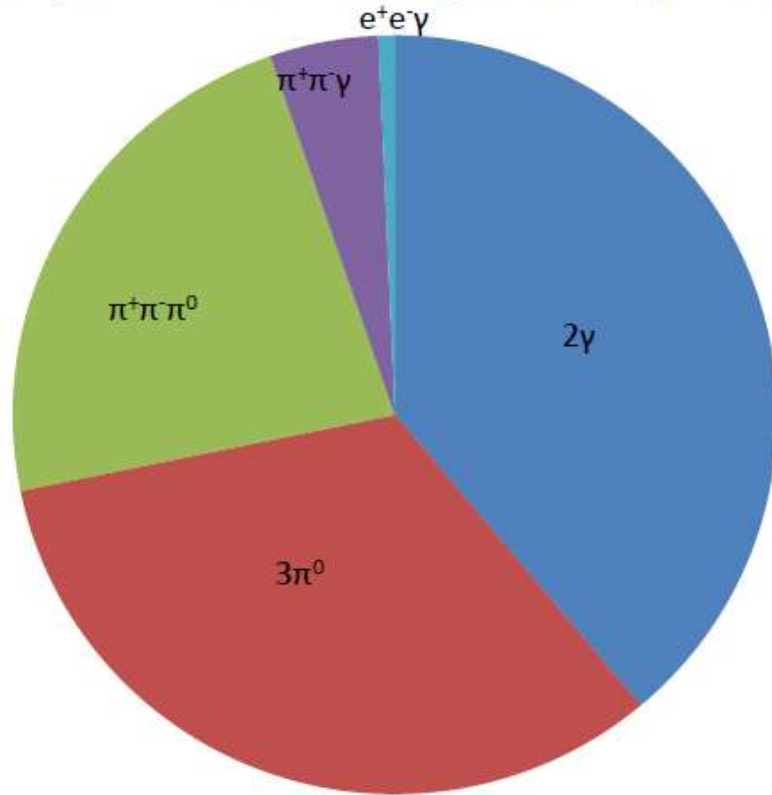
➤ 低能量下QCD的对称性最清晰的表现是在轻赭标介子多重态 π^0 、 η 和 η'

➤ 对 π^0 、 η 和 η' 系统的精确测量将会对物理学产生深远的影响

8个goldstone玻色子 (eta'不属于goldstone玻色子)



Major Observed η Decay Branching Ratios



- 高精度测量 η 和 η' 的稀有和禁迁衰变的分支比和上限
- 它将提供一个检测QCD基本对称性的灵敏探针，例如，手征对称性、电荷共轭对称性C、宇称P、时间反演对称性T以及CP和CPT对称性

图：浅蓝色代表衰变分支比为0.7%，其他所有稀有衰变在图中没有显示。

η and η' in PDG 2017

η

**Charge conjugation (C), Parity (P),
Charge conjugation \times Parity (CP), or
Lepton Family number (LF) violating modes**

Γ_{24}	$\pi^0 \gamma$	C	< 9	$\times 10^{-5}$	CL=90%
Γ_{25}	$\pi^+ \pi^-$	P,CP	< 1.3	$\times 10^{-5}$	CL=90%
Γ_{26}	$2\pi^0$	P,CP	< 3.5	$\times 10^{-4}$	CL=90%
Γ_{27}	$2\pi^0 \gamma$	C	< 5	$\times 10^{-4}$	CL=90%
Γ_{28}	$3\pi^0 \gamma$	C	< 6	$\times 10^{-5}$	CL=90%
Γ_{29}	3γ	C	< 1.6	$\times 10^{-5}$	CL=90%
Γ_{30}	$4\pi^0$	P,CP	< 6.9	$\times 10^{-7}$	CL=90%
Γ_{31}	$\pi^0 e^+ e^-$	C	[a] < 4	$\times 10^{-5}$	CL=90%
Γ_{32}	$\pi^0 \mu^+ \mu^-$	C	[a] < 5	$\times 10^{-6}$	CL=90%
Γ_{33}	$\mu^+ e^- + \mu^- e^+$	LF	< 6	$\times 10^{-6}$	CL=90%

[a] C parity forbids this to occur as a single-photon process.

η'

**Charge conjugation (C), Parity (P),
Lepton family number (LF) violating modes**

Γ_{28}	$\pi^+ \pi^-$	P,CP	< 1.8	$\times 10^{-5}$	90%
Γ_{29}	$\pi^0 \pi^0$	P,CP	< 5	$\times 10^{-4}$	90%
Γ_{30}	$\pi^0 e^+ e^-$	C	[a] < 1.4	$\times 10^{-3}$	90%
Γ_{31}	$\eta e^+ e^-$	C	[a] < 2.4	$\times 10^{-3}$	90%
Γ_{32}	3γ	C	< 1.1	$\times 10^{-4}$	90%
Γ_{33}	$\mu^+ \mu^- \pi^0$	C	[a] < 6.0	$\times 10^{-5}$	90%
Γ_{34}	$\mu^+ \mu^- \eta$	C	[a] < 1.5	$\times 10^{-5}$	90%
Γ_{35}	$e \mu$	LF	< 4.7	$\times 10^{-4}$	90%

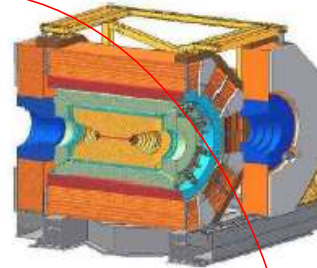
η 实验

e^+e^-
Collider

KLOE-2 at DAΦNE



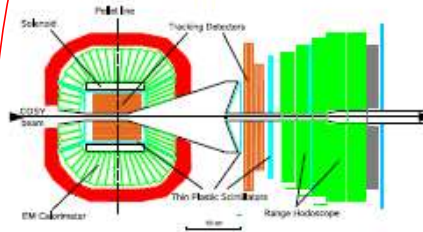
BESIII at BEPCII



Low energy
 η -facilities

Fixed-target

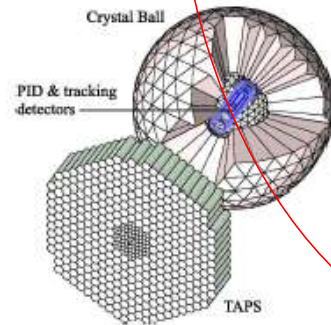
WASA at COSY



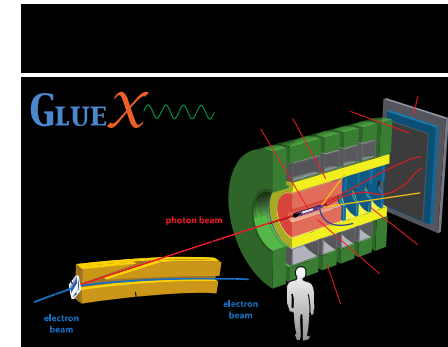
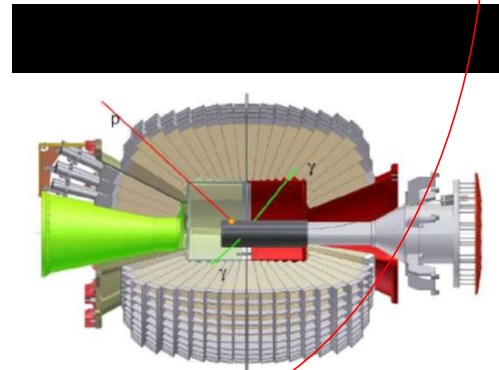
hadroproduction

High energy η -
facility

Crystall Ball at MAMI



photoproduction



国内外 $\eta^{(\prime)}$ 实验数据

实验	η 个数	η' 个数	备注
KLOE	10^8	0.5×10^6	$e^+e^- \rightarrow \phi(1020) \rightarrow \gamma \eta$
KLOE - II	3×10^8	1.5×10^6	$e^+e^- \rightarrow \phi(1020) \rightarrow \gamma \eta$
COSY	5×10^8	No	$pp \rightarrow pp\eta$
MAMI	2.5×10^8	6×10^6	$\gamma p \rightarrow p \eta$
GlueX at JLab 12	$4.5 \times 10^7/\text{年}$	$\sim 10^7/\text{年}$	$\gamma p \rightarrow p \eta$
BESIII	$\sim 10^6$	7×10^6	10 billion J/ψ at BESIII
REDTOP	$2 \times 10^{12}/\text{年}$?	$pp \rightarrow pp\eta, pn \rightarrow pn\eta$
REDTOP II	$\sim 10^{13}/\text{年}$	$\sim 10^{12}/\text{年}$	$pp \rightarrow pp\eta, pn \rightarrow pn\eta$
HIAF	$3 \times 10^{13}/\text{年}$	$\sim 10^{12}/\text{年}$	$pp \rightarrow pp\eta$

注: Fermi Lab REDTOP I: $E_p = 1.9 \text{ GeV}$, Intensity = $10^{11}/\text{s}$

η 超级工厂的三类物理目标

- 第一类：对称性的破坏
- 第二类：寻找新粒子和新作用力
- 第三类：中低能核物理精确测量

参考：<https://arxiv.org/abs/1910.08505> <https://arxiv.org/abs/2007.00664>

第一类：寻找对称性的破坏

1. 使用Dalitz图解研究CP和C破坏
2. 违反CP（类型I：P和T奇数，C偶数）
3. 违反CP（类型II：C和T奇数，P偶数）
4. 通过缪子的极化研究CP破坏
5. 通过 γ 极化测量或 $\eta \rightarrow \pi^+ \pi^- e^+ e^-$ 衰变研究CP破坏
6. 通过缪子的极化来研究T破坏
7. CPT破坏
8. 违反CPT的非厄密拉格朗日量
9. 轻子味破坏
10. 双重轻子味破坏
11. CP破坏 $\eta \rightarrow \pi\pi$

C violating/parityconserving (CVPC) physics

	P	PV
C	C, P, CP Strong, EM $\eta \rightarrow 2\gamma,$ $\eta \rightarrow 3\pi^0,$ etc.	C, PV, CPV Weak (at 2-loop level) EDMs, $\eta \rightarrow 2\pi$
CV	CV, P, CPV Weak (at 2-loop level) $\eta \rightarrow 3\gamma,$ $\eta \rightarrow 2\pi^0\gamma,$ etc.	CV, PV, CP Weak PV experiments, μ and β decay asymmetries

- C-violation known only in weak interactions
- Strong and EM forces conserve C-parity

第二类：新粒子和新作用力

1) 直接寻找暗光子

暗的（或有时很重的）光子 A' 是 $U(1)$ 矢量玻色子，是可能的新的力的媒介。从几个反常的天体物理学观察来看，这种粒子的质量有望达到 GeV 尺度。如果它低于 η 介子的质量，则可以通过以下过程进行观察：

$$\eta \rightarrow \gamma A' \rightarrow \gamma + l^+ l^-$$

从实验的角度来看， η 和 A' 的质量约束将有助于消除背景。因此，HIAF寻找暗光子将和在杰弗逊实验室(JLab)和弗拉斯卡蒂(Frascati)分别用光子和电子束流的新实验互补。

2) 寻找标量粒子 – dark Higgs

要研究的过程是：

$$\eta \rightarrow \pi^0 H \text{ 用 } H \rightarrow e^+ e^- \text{ 或者 } \mu^+ \mu^-$$

该过程只能在标准模型中通过分支比率为 10^{-9} 的双光子交换图进行。轻质标量粒子的存在将 μ 子耦合到夸克上，将增加过程出现的可能性，甚至增加几个数量级，从而改变过程的动力学。HIAF预期灵敏度大于 10^{-10} ，足以验证该模型。

3) 寻找类轴子粒子

类轴子粒子 (ALP) 是QCD轴子的扩展, 很久以前就被假定用来解决强CP问题。它们可以根据以下过程从 η 或 η' 介子的衰变中获得:

$$\eta \rightarrow \pi^- \pi^+ a \text{ 或 } \eta \rightarrow \pi^0 \pi^0 a$$

ALP是耦合到光子的伪标量粒子。根据理论模型, 它们可以衰变成 $\gamma\gamma$, 轻子或夸克。HIAF的预期灵敏度取决于模型, 可以达到的 g_γ (ALP与光子的耦合参数) 的值约为 10^{-8} 。

4) 寻找真正的缪偶素(muonium)

缪偶素是一个 $\mu^+\mu^-$ 的束缚态 - 一对具有约 $2M_\mu$ 限定的质量。预计它会分解为具有较大分支比的 e^+e^- 对, 涉及的过程是:

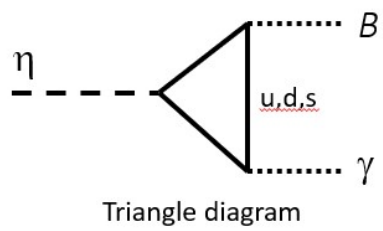
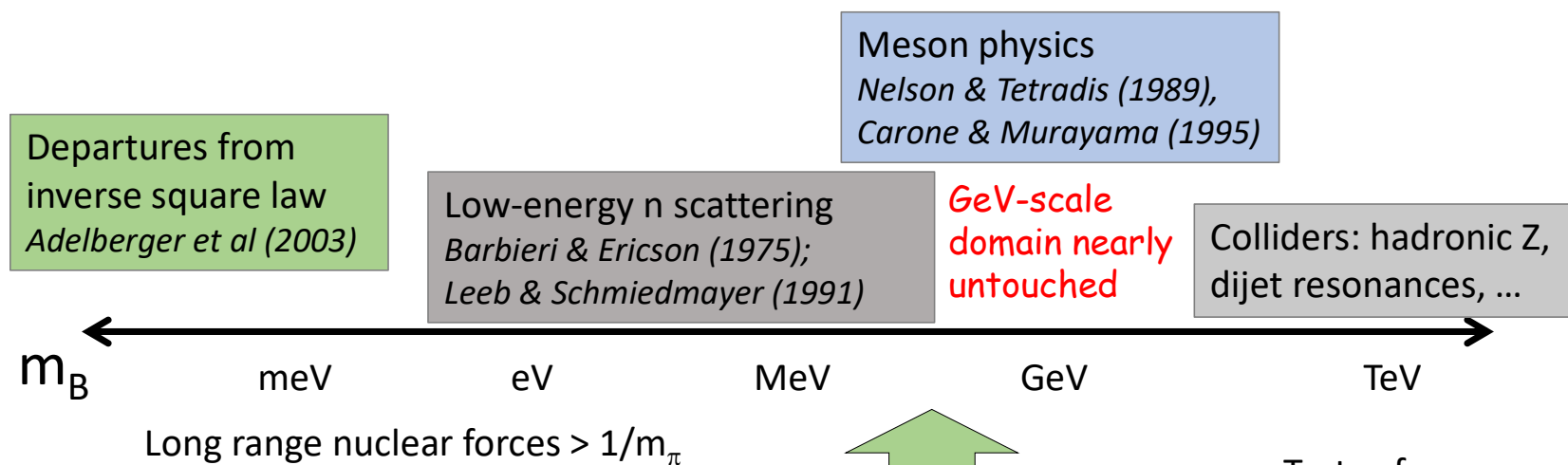
$$\eta \rightarrow \gamma (\mu^+\mu^-) |_{2M_\mu} \rightarrow \gamma e^+ e^-$$

目前, 实验上尚未观察到此过程。真正的缪偶素的检测将是一个重要的发现, 并将代表QED的另一个重要检验。如果 η 衰变成真正的缪偶素的分支比大于 10^{-9} , 则将相对容易观察到。

5)寻找新的作用力：规范玻色子

B = gauge boson coupled to baryon number

Discovery signals depend on the B mass: \sim MeV – GeV range



Is it possible to discover light weakly-coupled forces hiding in nonperturbative QCD regime?

$\eta \rightarrow \gamma B, B \rightarrow \gamma \pi^0$ 和 $\eta \rightarrow \gamma B, B \rightarrow \gamma + 1^+ 1^-$

Range of interest for η decays: $m_\pi < m_B < m_\eta$

6) 寻找轻子夸克

轻子夸克是传递同一代夸克和轻子之间新相互作用的粒子。它们是三色玻色子，带有轻子和重子数。HIAF将在以下过程中观察其影响：

$$\eta \rightarrow \mu^+ \mu^- \text{ 和 } \eta \rightarrow \text{gamma } e^+ e^-$$

标准模型所观察到的和预测的衰变率之间的任何差异都将表明可能是轻子夸克带来的额外的贡献。在标准模型的各种扩展中都存在轻子夸克，例如技术色理论（technicolor）或一些基于Pati-Salam模型的大统一理论：SU(5) 或E6。

7) π^0 衰变产生暗光子

$$\pi^0 \rightarrow \gamma A' \rightarrow \gamma \gamma \gamma$$

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu A' \rightarrow \mu^+ \nu e^+ e^- ; \quad K^+ \rightarrow \mu^+ \nu A' \rightarrow \mu^+ \nu e^+ e^-$$

HIAF产生 π^0 约 10^{15} /年，在连续QCD背景中出现两个光子不变质量中的一个bump,是产生暗光子的特征。

● KTeV实验已确定BR ($\pi^0 \rightarrow e^+ e^-$) = $(6.44 \pm 0.25 \pm 0.22) 10^{-8}$ 。和标准模型有 3.3σ 偏差。

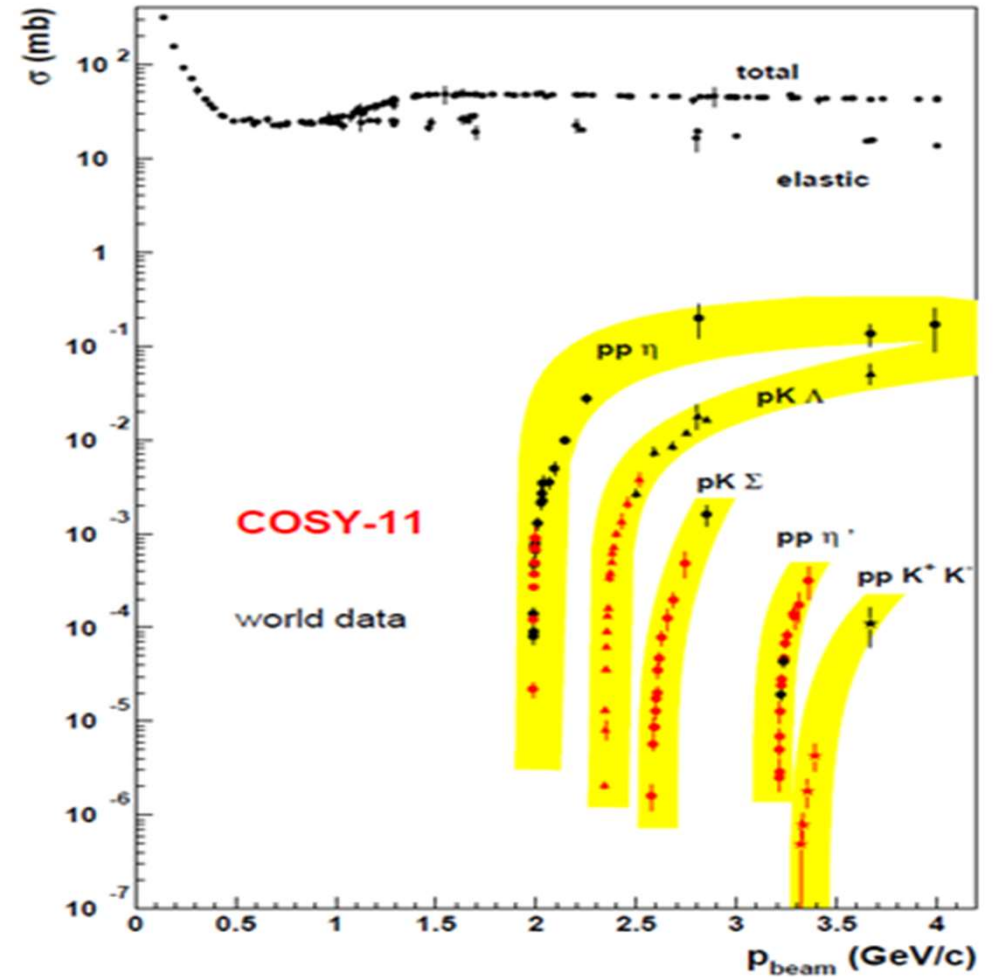
● HIAF的高统计量数据能够确认或否定这个偏差，可能揭示新物理。

第三类：中低能核物理精确测量

- 原子核模型
- 手性微扰理论
- 非微扰QCD
- 由于u-d夸克质量差异而导致同位旋对称性破缺
- 八重态-单态混合角
- $\pi\pi$ 相互作用
- 电磁跃迁形状因子 ($g-2$ 的重要输入)

IV. 重要物理模拟和探测器设计

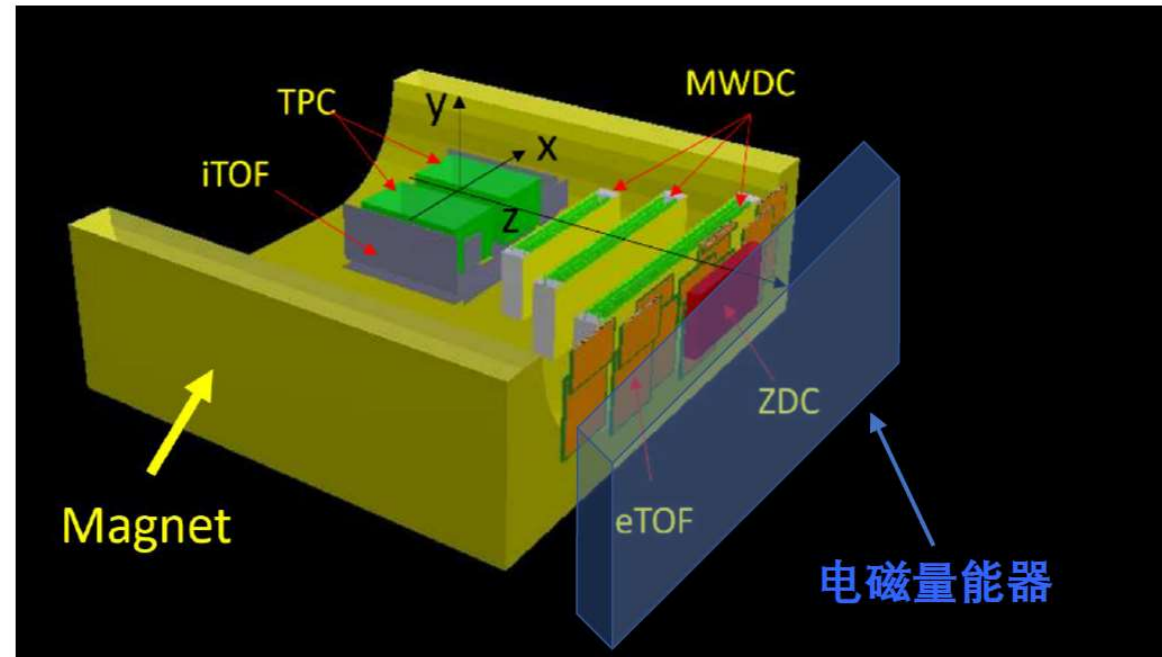
- pp过程强子谱模拟
- $pp \rightarrow pK^+\Lambda$, $nK^+\Sigma^+$
- η 介子衰变过程中的重要物理模拟:
- 末态粒子包括p, e, μ , π , γ (电子和光子的探测尤为重要)
- 末态粒子能量范围和角度分布:
动量小于1 GeV/c; 从相空间来看, 角度范围 $[5^\circ, 170^\circ]$
- 探测器要求: 大的接受角覆盖 $[5^\circ, 170^\circ]$; 好的能动量分辨 ($<5\%$)



探测器设计

- 基于CEE探测器，增加一个电磁量能器：预算几千万元(RMB)？

装置/类型	能量分辨率
BESIII	$\sim 2.5\% / \sqrt{E(\text{GeV})}$
WASA at COSY	$\sim 5\% / \sqrt{E(\text{GeV})}$
Shashlik	$\sim 8\% / \sqrt{E(\text{GeV})}$



V. 结论与展望

●强子物理计划:

1. 在CSR和HIAF上开展强子谱研究，利用CEE探测器和电磁量能器 (2024 -)
2. 世界上基于高功率质子加速器的 $\eta^{(\prime)}$ 物理实验研究刚起步， $\eta^{(\prime)}$ 超级工厂有丰富的物理，科学意义重大 (2030 -)
3. EicC: 核子的一维和三维结构；质量结构 (2038 -)

●Kaon/pion工厂，muon和phi工厂

- 在目前和未来EicC之间的时间窗口，开展强子物理实验，为将来包括EicC在内的大科学装置培养优秀人才
- 联合国内外强子物理实验和理论的力量，共同推动超级 η 工厂!

首届HIAF强子谱和eta工厂研讨会：2020年12月28日

欢迎批评指正！