

第一届介子束流物理研讨会

国内外介子束流实验的发展现状和 未来计划

汇报人：王晓云

2024年12月28日

X. Y. Wang and X. Liu, Development status and future plan of meson beam experiments at home and abroad, ChinaXiv:202402.00079 (《原子核物理评论》录用)

CONTENTS

汇报提纲

- 01 引言
- 02 国外介子束流实验的发展和现状
- 03 基于HIAF装置的介子束流实验展望
- 04 结论与展望

Part 1

引言

I n t r o d u c t i o n

1.1 强子谱与介子束流实验

强子谱学研究

物理学
发展史上

➤ 原子光谱学曾经对揭示原子结构和量子电动力学(Quantum Electrodynamics, 简称 QED)的发展发挥了重要作用

与此类似

➤ 强子谱成为了我们研究强子内部结构和强相互作用的有效手段
➤ 相关研究成为了粒子物理与中高能核物理学的研究前沿

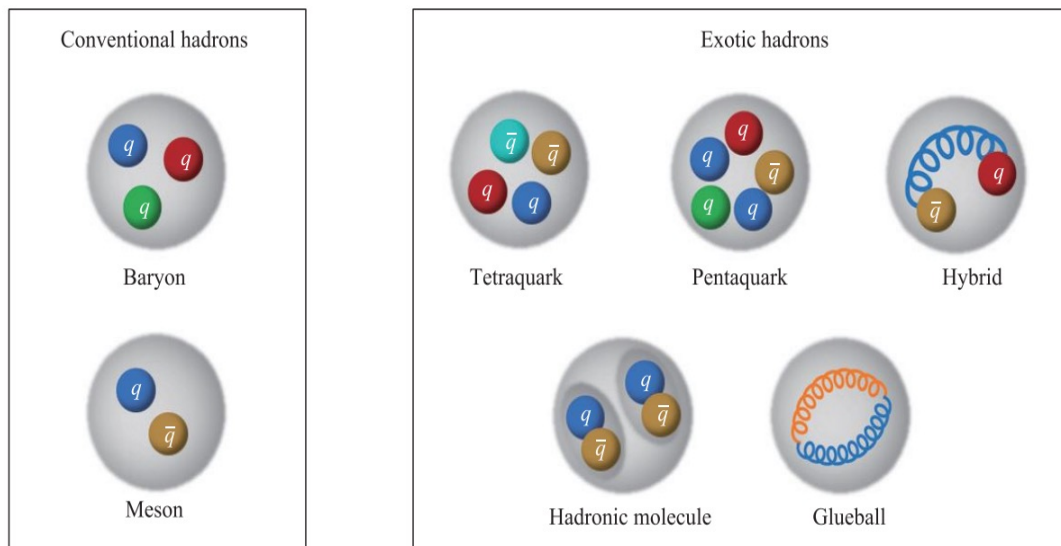


图1. 传统强子与奇特强子态内部结构

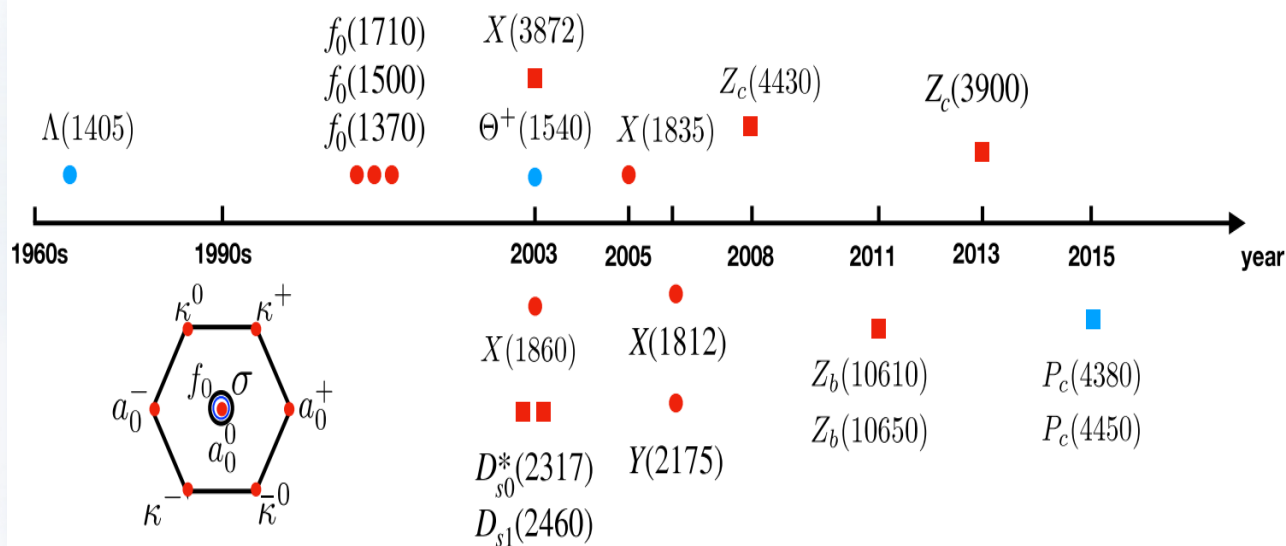


图2. 新强子态实验测量结果

1.1 强子谱与介子束流实验

表 1 PDG 中收录的轻介子谱^[5] (勾选的粒子都被介子束流实验进行过测量)

粒子	J^P	介子束流实验	粒子	J^P	介子束流实验	粒子	J^P	介子束流实验	粒子	J^P	介子束流实验
η	0^-	√	$\rho(1450)$	1^-		$\eta_2(1870)$	2^-	√	$\rho_5(2350)$	5^-	√
$f_0(500)$	0^+		$\eta(1475)$	0^-	√	$\pi_2(1880)$	2^-	√	$f_6(2510)$	6^+	√
$\rho(770)$	1^-	√	$f_0(1500)$	0^+	√	$\rho(1900)$	1^-		$K_0^*(700)$	0^+	√
$\omega(782)$	1^-	√	$f_1(1510)$	1^+	√	$f_2(1910)$	2^+	√	$K^*(892)$	1^-	√
$\eta'(958)$	0^-	√	$f_2'(1525)$	2^+	√	$a_0(1950)$	0^+		$K_1(1270)$	1^+	√
$f_0(980)$	0^+	√	$f_2(1565)$	2^+	√	$f_2(1950)$	2^+	√	$K_1(1400)$	1^+	√
$a_0(980)$	0^+	√	$\rho(1570)$	1^-	√	$\rho_3(1990)$	3^-		$K^*(1410)$	1^-	√
$\phi(1020)$	1^-	√	$h_1(1595)$	1^+	√	$\pi_2(2005)$	2^-	√	$K_0^*(1430)$	0^+	√
$h_1(1170)$	1^+	√	$\pi_1(1600)$	1^-	√	$f_2(2010)$	2^+	√	$K_2^*(1430)$	2^+	√
$b_1(1235)$	1^+	√	$a_1(1640)$	1^+	√	$f_0(2020)$	0^+	√	$K(1460)$	0^-	√
$a_1(1260)$	1^+	√	$f_2(1640)$	2^+	√	$a_4(2040)$	4^+	√	$K_2(1580)$	2^-	√
$f_2(1270)$	2^+	√	$\eta_2(1645)$	2^-		$f_4(2050)$	4^+	√	$K(1630)$?	√
$f_1(1285)$	1^+	√	$\omega(1650)$	1^-		$\pi_2(2100)$	2^-	√	$K_1(1650)$	1^+	√
$\eta(1295)$	0^-		$\omega_3(1670)$	3^-	√	$f_0(2100)$	0^+		$K^*(1680)$	1^-	√
$\pi(1300)$	0^-		$\pi_2(1670)$	2^-	√	$f_2(2150)$	2^+		$K_2(1770)$	2^-	√
$a_2(1320)$	2^+	√	$\phi(1680)$	1^-		$\rho(2150)$	1^-		$K_3^*(1780)$	3^-	√
$f_0(1370)$	0^+		$\rho_3(1690)$	3^-	√	$\phi(2170)$	1^-		$K_2(1820)$	2^-	√
$h_1(1380)$	1^+		$\rho(1700)$	1^-	√	$f_0(2200)$	0^+	√	$K(1830)$	0^-	√
$\pi_1(1400)$	1^-	√	$a_2(1700)$	2^+	√	$f_J(2220)$	$2^+, 4^+$		$K_0^*(1950)$	0^+	√
$\eta(1405)$	0^-	√	$f_0(1710)$	0^+	√	$\eta(2225)$	0^-		$K_2^*(1980)$	2^+	√
$f_1(1420)$	1^+	√	$\eta(1760)$	0^-		$\rho_3(2250)$	3^-	√	$K_4^*(2045)$	4^+	√
$\omega(1420)$	1^-		$\pi(1800)$	0^-	√	$f_2(2300)$	2^+	√	$K_2(2250)$	2^-	√
$a_1(1420)$	1^+	√	$f_2(1810)$	2^+	√	$f_4(2300)$	4^+		$K_3(2320)$	3^+	√
$f_2(1430)$	2^+	√	$X(1835)$	0^-		$f_0(2330)$	0^+		$K_5^*(2380)$	5^-	√
$a_0(1450)$	0^+	√	$\pi_3(1850)$	3^-	√	$f_2(2340)$	2^+	√	$K_4(2500)$	4^-	√

1.1 强子谱与介子束流实验

表 2 PDG 中收录的轻重子谱^[5] (勾选的粒子都被介子束流实验进行过测量)

粒子	J^P	介子束流实验	粒子	J^P	介子束流实验	粒子	J^P	介子束流实验	粒子	J^P	介子束流实验
N(1440)	$\frac{1}{2}^+$	√	$\Delta(1620)$	$\frac{1}{2}^-$	√	$\Lambda(1820)$	$\frac{5}{2}^+$	√	$\Sigma(2010)$	$\frac{3}{2}^-$	√
N(1520)	$\frac{3}{2}^-$	√	$\Delta(1700)$	$\frac{3}{2}^-$	√	$\Lambda(1830)$	$\frac{5}{2}^-$	√	$\Sigma(2030)$	$\frac{7}{2}^+$	√
N(1535)	$\frac{1}{2}^-$	√	$\Delta(1750)$	$\frac{1}{2}^+$	√	$\Lambda(1890)$	$\frac{3}{2}^+$	√	$\Sigma(2070)$	$\frac{5}{2}^+$	√
N(1650)	$\frac{1}{2}^-$	√	$\Delta(1900)$	$\frac{1}{2}^-$	√	$\Lambda(2000)$	$\frac{1}{2}^-$	√	$\Sigma(2080)$	$\frac{3}{2}^+$	√
N(1675)	$\frac{5}{2}^-$	√	$\Delta(1905)$	$\frac{5}{2}^+$	√	$\Lambda(2050)$	$\frac{3}{2}^-$	√	$\Sigma(2100)$	$\frac{7}{2}^-$	√
N(1680)	$\frac{5}{2}^+$	√	$\Delta(1910)$	$\frac{1}{2}^+$	√	$\Lambda(2070)$	$\frac{3}{2}^+$	√	$\Sigma(2160)$	$\frac{1}{2}^-$	√
N(1700)	$\frac{3}{2}^-$	√	$\Delta(1920)$	$\frac{3}{2}^+$	√	$\Lambda(2080)$	$\frac{5}{2}^-$	√	$\Sigma(2230)$	$\frac{3}{2}^+$	√
N(1710)	$\frac{1}{2}^+$	√	$\Delta(1930)$	$\frac{5}{2}^-$	√	$\Lambda(2085)$	$\frac{7}{2}^+$	√	$\Sigma(2250)$?	√
N(1720)	$\frac{3}{2}^+$	√	$\Delta(1940)$	$\frac{3}{2}^-$	√	$\Lambda(2100)$	$\frac{7}{2}^-$	√	$\Sigma(2455)$?	√
N(1860)	$\frac{5}{2}^+$	√	$\Delta(1950)$	$\frac{7}{2}^+$	√	$\Lambda(2110)$	$\frac{5}{2}^+$	√	$\Sigma(2620)$?	√
N(1875)	$\frac{3}{2}^-$	√	$\Delta(2000)$	$\frac{5}{2}^+$	√	$\Lambda(2325)$	$\frac{3}{2}^-$	√	$\Sigma(3000)$?	√
N(1880)	$\frac{1}{2}^+$	√	$\Delta(2150)$	$\frac{1}{2}^-$	√	$\Lambda(2350)$	$\frac{9}{2}^+$	√	$\Sigma(3170)$?	√
N(1895)	$\frac{1}{2}^-$	√	$\Delta(2200)$	$\frac{7}{2}^-$	√	$\Lambda(2585)$?	√	Ξ^0	$\frac{1}{2}^+$	√
N(1900)	$\frac{3}{2}^+$	√	$\Delta(2300)$	$\frac{9}{2}^+$	√	Σ^+	$\frac{1}{2}^+$	√	Ξ^-	$\frac{1}{2}^+$	√
N(1990)	$\frac{7}{2}^+$	√	$\Delta(2350)$	$\frac{5}{2}^-$	√	Σ^0	$\frac{1}{2}^+$	√	$\Xi(1530)$	$\frac{3}{2}^+$	√
N(2000)	$\frac{5}{2}^+$	√	$\Delta(2390)$	$\frac{7}{2}^+$	√	Σ^-	$\frac{1}{2}^+$	√	$\Xi(1620)$?	√

N(2040)	$\frac{3}{2}^+$		$\Delta(2400)$	$\frac{9}{2}^-$	√	$\Sigma(1385)$	$\frac{3}{2}^+$	√	$\Xi(1690)$?	√
N(2060)	$\frac{5}{2}^-$	√	$\Delta(2420)$	$\frac{11}{2}^+$	√	$\Sigma(1580)$	$\frac{3}{2}^-$	√	$\Xi(1820)$	$\frac{3}{2}^-$	√
N(2100)	$\frac{1}{2}^+$	√	$\Delta(2750)$	$\frac{13}{2}^-$	√	$\Sigma(1620)$	$\frac{1}{2}^-$	√	$\Xi(1950)$?	√
N(2120)	$\frac{1}{2}^+$	√	$\Delta(2950)$	$\frac{15}{2}^+$	√	$\Sigma(1660)$	$\frac{1}{2}^+$	√	$\Xi(2030)$?	√
N(2190)	$\frac{7}{2}^-$	√	Λ	$\frac{1}{2}^+$	√	$\Sigma(1670)$	$\frac{3}{2}^-$	√	$\Xi(2120)$?	√
N(2220)	$\frac{9}{2}^+$	√	$\Lambda(1405)$	$\frac{1}{2}^-$	√	$\Sigma(1750)$	$\frac{1}{2}^-$	√	$\Xi(2250)$?	√
N(2250)	$\frac{9}{2}^-$	√	$\Lambda(1520)$	$\frac{3}{2}^-$	√	$\Sigma(1775)$	$\frac{5}{2}^-$	√	$\Xi(2370)$?	√
N(2300)	$\frac{1}{2}^+$		$\Lambda(1600)$	$\frac{1}{2}^+$	√	$\Sigma(1780)$	$\frac{3}{2}^+$	√	$\Xi(2500)$?	√
N(2570)	$\frac{5}{2}^-$		$\Lambda(1670)$	$\frac{1}{2}^-$	√	$\Sigma(1880)$	$\frac{1}{2}^+$	√	Ω^-	$\frac{3}{2}^+$	√
N(2600)	$\frac{11}{2}^-$	√	$\Lambda(1690)$	$\frac{3}{2}^-$	√	$\Sigma(1900)$	$\frac{1}{2}^-$	√	$\Omega(2012)-$?	
N(2700)	$\frac{13}{2}^+$	√	$\Lambda(1710)$	$\frac{1}{2}^+$	√	$\Sigma(1910)$	$\frac{3}{2}^-$	√	$\Omega(2250)-$?	√
$\Delta(1232)$	$\frac{3}{2}^+$	√	$\Lambda(1800)$	$\frac{1}{2}^-$	√	$\Sigma(1915)$	$\frac{5}{2}^+$	√	$\Omega(2380)-$?	
$\Delta(1600)$	$\frac{3}{2}^+$	√	$\Lambda(1810)$	$\frac{1}{2}^+$	√	$\Sigma(1940)$	$\frac{3}{2}^+$	√	$\Omega(2470)-$?	√

1.1 强子谱与介子束流实验

轻强子与介子束流实验

► 从 PDG (Particle Data Group) 中可以发现，所收录的轻强子谱中的**八成以上**粒子及其相关谱学性质都来自介子束流与原子核碰撞实验

介子束流实验在过去几十年的强子谱的研究中扮演着不可或缺的重要角色



图.兰州介子束流实验LOGO

1.2 在研和规划中的介子束流实验

日本J-PARC
实验

JLab 上的介
子束流实验

基于中国强流重离子加速器
装置 (HIAF) 介子束流实验

EIC 上的介子
束流实验

欧洲核子中心的相关
介子束流实验
(COMPASS、AMBER、HIKE)

Part 2

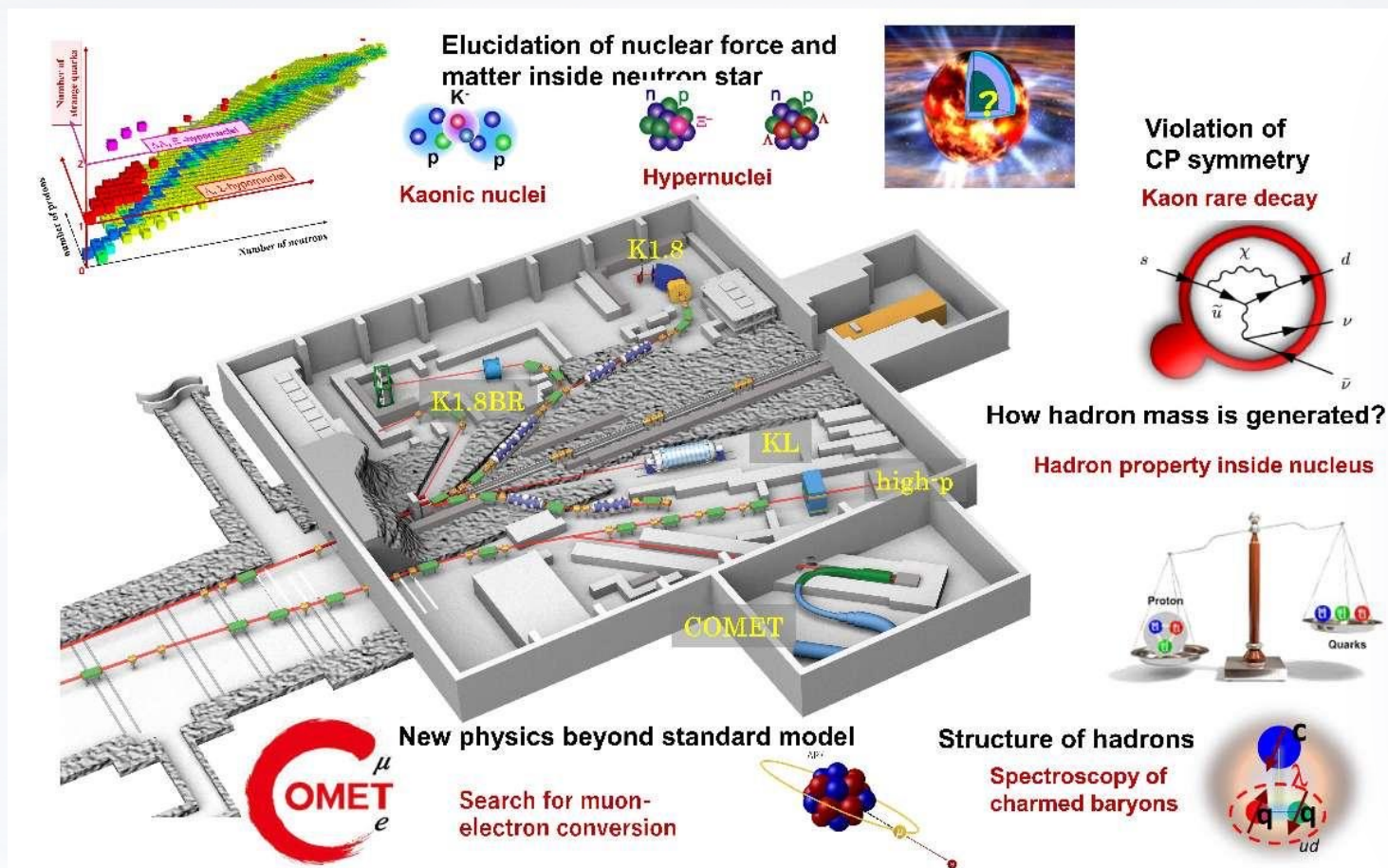
国外介子束流实验的发展和现状

The Development and Current Situation of Foreign Meson Beam Experiments



2.1 日本J-PARC实验

- J-PARC (Japan Proton Accelerator Research Complex) 是位于日本的综合性加速器实验装置。J-PARC 作为一个强子实验设施，目前在几个GeV能量范围内能够提供最高强度的介子 (K 介子和 π 介子) 束流，这为粒子物理和核物理研究提供了极佳的实验平台



J-PARC 的强子实验设备中正在运行的 K 介子束流实验包括低动量带电 K 介子束流 (K1.8/ K1.8BR)、中性 K 介子束流线 (KL) 和主质子束流线(high-p)

2023年，J-PARC 还投入了一条新的主束流线，专门用于进行缪子到电子转换实验 (COMET)

2.1 日本J-PARC实验

- 表3总结了 J-PARC 正在进行实验和即将扩展实验束流线的参数
- 表4收集了 J-PARC 目前已经完成的多个介子束流实验

表 3 J-PARC 强子实验设备的束线规格^[28]

	粒子	动量	强度
目前强子实验束流线			
K1.8	K^\pm, π^\pm	1.0 – 2.0 GeV/c	$\sim 10^6 K^-$ / 粒子束脉冲
K1.8BR	K^\pm, π^\pm	< 1.1 GeV/c	$\sim 5 \times 10^5 K^-$ / 粒子束脉冲
KL	K_L	2.1 GeV/c	$10^7 K_L$ / 粒子束脉冲
high-p	p		$10^{10} p$ / 粒子束脉冲
$\pi 20$	π^\pm	< 31 GeV/c	$10^7 \pi$ / 粒子束脉冲
COMET	μ^-		
扩展实验的束流线			
K1.1	K^\pm, π^\pm	< 1.2 GeV/c	$\sim 4 \times 10^5 K^-$ / 粒子束脉冲
K1.1BR	K^\pm, π^\pm	0.7 – 0.8 GeV/c	$\sim 1.5 \times 10^5 K^-$ / 粒子束脉冲
HIHR	π^\pm	< 2.0 GeV/c	$\sim 2 \times 10^8 \pi$ / 粒子束脉冲
K10	K^\pm, π^\pm, \bar{p}	< 10 GeV/c	$\sim 7 \times 10^6 K^-$ / 粒子束脉冲
KL2	K_L	~ 5 GeV/c	$\sim 4 \times 10^7 K_L$ / 粒子束脉冲

表 4 在 J-PARC 设备上已完成的实验^[28,32-43]

	束流	束流粒子	实验
E03	K1.8	K^-	测量来自 Ξ 原子的 X 射线
E05	K1.8	K^-	通过 $^{12}\text{C}K^- \rightarrow K^+\Xi^-$ 反应研究 ΞN 的相互作用
E07	K1.8	K^-	通过混合使用乳胶探测器和计数器的方法对双奇异系统进行研究
E10	K1.8	π^-	通过双电荷交换反应产生含有丰中子的 Λ 超核
E13	K1.8	K^-	轻超核的伽马射线光谱学研究
E19	K1.8	π^-	通过 π^-p 散射过程寻找五夸克态 Θ^+
E27	K1.8	π^+	通过 π^+d 碰撞过程寻找含 K 介子的束缚态
E40	K1.8	π^\pm	Σp 散射总截面测量
E42	K1.8	K^-	使用更高接收能力的超子谱仪搜索双重子
E15	K1.8BR	K^-	通过 $^3\text{He}K^- \rightarrow \Lambda pn$ 过程寻找 $\bar{K}NN$ 束缚态
E31	K1.8BR	K^-	通过 $K^-d \rightarrow \Lambda \pi^+ \pi^- n$ 反应研究 $\bar{K}N$ 阈值以下的超子共振态
E36	K1.1BR	K^+	对 $\Gamma(K^+ \rightarrow e^+ \bar{\nu}) / \bar{\Gamma}(K^+ \rightarrow \mu^+ \nu)$ 分支比的测量； 使用 TREK 探测器系统寻找惰性中微子

2.1 日本J-PARC实验

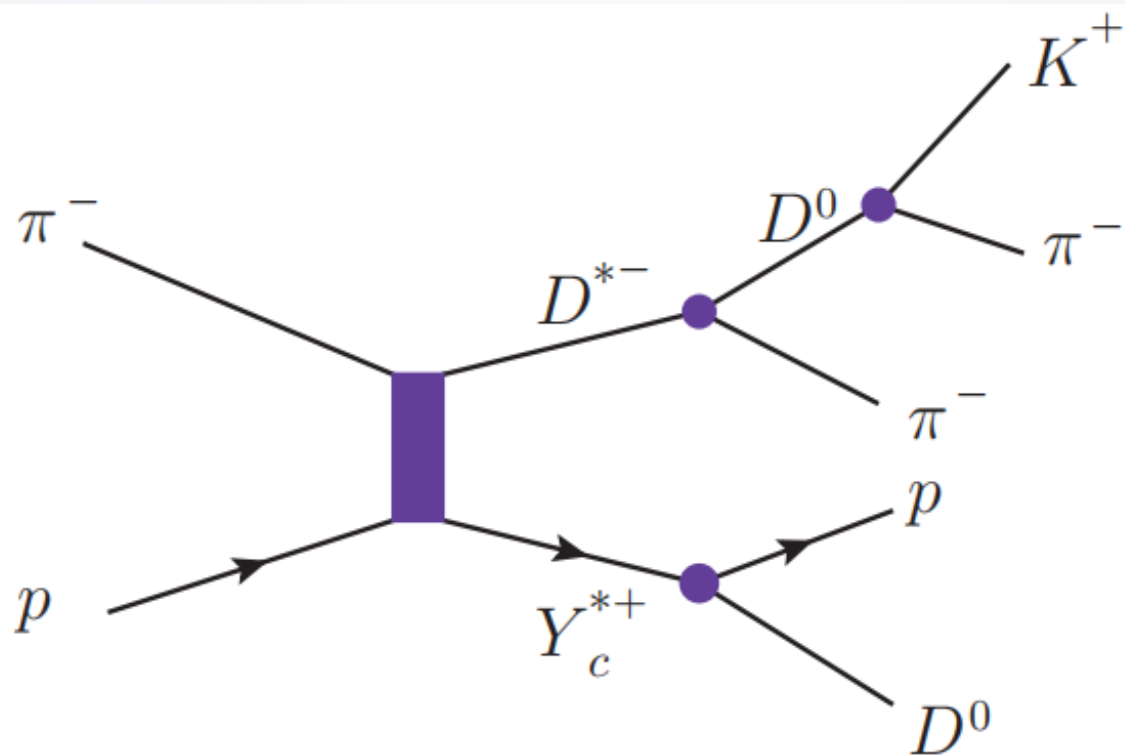
- 表5给出了 J-PARC 目前正在进行的和未来计划中的介子束流实验
- 可以看到，未来 J-PARC 实验仍将研究**强子谱**作为其主要物理目标之一

表 5 在 J-PARC 设备上正在进行和计划开展的实验^[28,43-45]

	束流	束流粒子	实验	实验状态
E08	K1.8	π^+	π 介子与氧原子的双电荷交换实验	计划
E18	K1.8	π^+	$^{12}_\Lambda C$ 的弱衰变与三体弱相互作用过程的测量	计划
E22	K1.8	π^+	核子数 $A=4$ 的 Λ 超核中的弱相互作用研究	计划
E26	K1.8	π^-	在相关反应和 $\omega \rightarrow \pi^0 \gamma$ 衰变中对 ω 质量修正的直接测量	计划
E45	K1.8	K^-	重子谱学中三体强子过程的研究	计划
E70	K1.8	K^-	使用 S-2S 光谱仪进行下一代 E05 系统的运行	计划
E75	K1.8	K^-	通过 Ξ 超核衰变产生 $^5_{\Lambda\Lambda} H$ 的衰变 π 介子谱学研究	计划
E57	K1.8BR	K^-	K 介子与氦和散射中第一能级强相互作用引起的位移和宽度的测量	计划
E72	K1.8BR	K^-	通过 $K^- p \rightarrow \Lambda \eta X$ 散射过程寻找窄共振态 Λ^*	计划
E73	K1.8BR	K^-	通过 $^{3,4}\text{He} K^- \rightarrow ^{3,4}_\Lambda H \pi^0$ 反应测定 $^3_\Lambda H$ 和 $^4_\Lambda H$ 介子核的弱衰变寿命	计划
E80	K1.8BR	K^-	通过 K^- 束流实验研究轻 K 介子谱	计划
E14	KL	K_L^0	$K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 实验测量	正在进行
E16	high-p	p	利用 J-PARC 中的电子对谱仪 研究 QCD 的手性对称性	正在进行
E50	high-p	π^-	通过介子束流实验研究粲重子谱学	计划
E79	high-p	p	寻找同位旋 $I = 3$ 的双重子共振态	计划
E29	K1.1	\bar{p}	通过原子核内的 ϕ 介子束缚态对 ϕ 介子质量修正的研究	计划
E63	K1.1	K^-	E13 实验第二阶段测量	计划
E21	COMET	μ^-	以 10^{-16} 的灵敏度在慢提取束流中进行 $\mu - e$ 转换实验测量	计划

2.1 日本J-PARC实验

- 值得注意的是，随着束流质量的提升和相关设备的升级，J-PARC 实验还计划对双重子共振态和粲重子谱学进行研究；目前，J-PARC 正在进行设备的升级和改造，预计将在**2027年**之前完成相关改进工作。这将进一步提升 J-PARC 的实验能力，为后继研究提供实验支撑



通过 $\pi^- p$ 散射产生过程产生粲重子 $Y_c^{(*)}$ 的费曼图

基于 J-PARC 正在建造的高动量束流线将为实现该反应过程的测量提供动量强度约为 **20 GeV/c** 的高能 π 介子束流。同时，J-PARC 计划使用接受度范围更大的磁谱仪对 D^* 介子和粲重子 Y_c 进行分离，之后利用探测谱仪在大角度范围内对粲重子的衰变末态进行探测，并通过丢失质量谱对粲重子进行重建。

另外，J-PARC 还将对粲重子的衰变分支比、自旋宇称和能级结构等物理量进行测量，为粲重子谱及相关物理问题研究提供数据参考

2.2 欧洲核子中心的相关介子束流实验

COMPASS (Common Muon and Proton Apparatus for Structure and Spectroscopy)
实验是 CERN 的一个重要的大型实验项目

该实验目前已完成了预定的实验计划，并在 2022 年完成了最后一次数据采集



目前，研究人员计划在同一实验大厅开展一个名为 **AMBER** (Apparatus for Meson and Baryon Experimental Research) 的新实验项目。

AMBER 实验计划使用一种新的射频分离的 K 介子束流来进行与 COMPASS 实验相似的物理研究

- 此外，在 CERN 的超级质子同步加速器上还将计划推进 **HIKE** 实验 (High Intensity Kaon Experiments)
- 该项目计划将以前所未有的精度水平，通过测量 K 介子衰变过程对稀有产生过程、CP 破缺、暗物质，对称性以及标准模型检验等物理问题进行探索，从而获得对粒子物理基本性质的更深入理解

2.2.1 COMPASS实验

COMPASS 实验是利用超级质子同步加速器上的高亮度、高极化度的强子束流与不同的靶材料相互作用，来研究强子结构和谱学问题的实验装置

01

Primakoff 物理实验研究。利用 Primakoff 效应的独特动力学筛选条件，可对 QCD 对称性的严格检验、强子的电弱相互作用性质及超标准模型物理方面的问题进行研究

02

介子谱学及相关物理问题的实验研究。COMPASS 项目的主要物理目标是探索质量在 2GeV 以下的轻介子谱学性质和相关物理问题。在过去的实验测量中，COMPASS 给出了一系列相关的实验结果。例如，COMPASS 通过实验测量给出了 $a_1(1640)$ 和 $a_2(1700)$ 分别作为 $a_1(1260)$ 和 $a_2(1320)$ 第一径向激发态的证据

03

针对自旋物理的介子束流与极化靶散射的 Drell-Yan 过程实验测量

2.2.2 AMBER 实验

- AMBER 是在 CERN 的超级质子同步加速器的M2束流线上进行的一项新型固定靶实验，致力于各种基本 QCD 的测量。其核心物理目标是强子性质的研究，包括强子质量来源、电荷半径、部分子结构等与 QCD 手征对称性破缺有关的基本问题。AMBER 项目计划分为两个阶段进行。其中第一阶段实验将解决三个主要的物理问题

01

在 50 GeV 到 280 GeV 能量范围内对质子束轰击氦目标靶产生反质子的散射截面进行高精度测量，以进一步探索暗物质的性质和存在

02

对于质子半径问题，拟采用高能介子束（100 GeV）对质子形状因子进行测量

03

利用能量为 190 GeV 的介子束测量粲偶素的产生截面，并获取 K 介子和 π 介子的部分子分布函数

2.2.2 AMBER 实验

在第二阶段中，计划对 M2 束流线进行升级，以获得更强的介子束流。目前正在讨论两种方案：

一种是通过**射频方法分离现有的 M2 强子束中的介子**，以便将主要的介子束和（反）质子束进行分离；另一种方案是**利用增强的 M2 束流线来增加介子束流的强度**，从而对更多物理目标进行实验测量。

AMBER 的最终目标是通过实验测量，给出**国际领先的关于轻介子谱数据样本**，从而对高能介子打靶过程中产生的奇异介子谱进行细致研究。由于该项目是基于多种轻介子束流和出色的束流鉴别系统，可整体提高实验装置的接收范围、探测效率和粒子鉴别能力。

与目前已有的数据样本相比，AMBER 计划将数据量增加 25 倍。通过这些改进，AMBER 将为研究人员提供更丰富、更精确的数据，从而**为轻介子谱的研究提供重要实验数据**

2.2.2 AMBER 实验

□ 表7中详细列出了 AMBER 项目计划在 M2 束流线展开的相关实验测量和物理目标

表 7 M2 束流线未来计划开展的相关实验 (RF 代表射频分离束流)^[66]。

过程	物理目标	束流能量 [GeV]	束流强度 [s^{-1}]	触发率 [kHz]	束流类型	目标靶	开始时间 (持续时间)	硬件升级需求
μ 介子-质子弹性散射	质子半径的精确测量	100	$4 \cdot 10^6$	100	μ^\pm	高压 H2	2022 年 (1 年)	时间投影室, SciFi 触发器, 硅反符合探测器
硬排斥反应	广义部分子分布的测量	160	$2 \cdot 10^7$	10	μ^\pm	NH_3^+	2022 年 (2 年)	反冲硅改良的极化靶磁体
暗物质搜索的输入	反质子产生截面的测量	20-280	$5 \cdot 10^5$	25	p	LH2, LHe	2022 年 (1 个月)	液氦靶
反质子束流打靶	寻找奇异重夸克	12,20	$5 \cdot 10^7$	25	\bar{p}	LH2	2022 年 (2 年)	靶区谱仪: 径迹室, 量能器
Drell-Yan 过程	确定 π 介子部分子分布函数	190	$7 \cdot 10^7$	25	π^\pm	C/W	2022 年 (1-2 年)	
Drell-Yan 过程 (RF)	确定 K 介子部分子分布函数以及核子横动量相关分布	~ 100	10^8	25-50	K^\pm, \bar{p}	NH_3^+ , C/W	2026 年 (2-3 年)	有源吸收器, 顶点探测器
Primakoff 效应 (RF)	测量 K 介子极化率与 π 介子寿命	~ 100	$5 \cdot 10^6$	>10	K^-	Ni	2026 年 (1 年)	
瞬发光子产生 (RF)	确定介子中的胶子分布函数	≥ 100	$5 \cdot 10^6$	10-100	K^\pm, π^\pm	LH2, Ni	2026 年 (1-2 年)	描述仪
K 介子束流打靶 (RF)	奇异介子谱的高精度测量研究	50-100	$5 \cdot 10^6$	25	K^-	LH2	2026 年 (1 年)	反冲飞行时间探测器 粒子识别 (PID) 技术
矢量介子产生 (RF)	自旋密度矩阵元的研究	50-100	$5 \cdot 10^6$	10-100	K^\pm, π^\pm	从 H 到 Pb	2026 年 (1 年)	

2.2.3 HIKE 实验

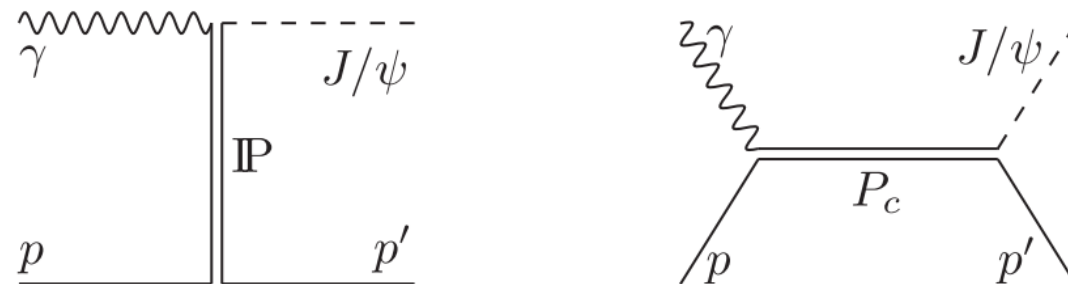
- HIKE (High Intensity Kaon Experiments) 是计划在位于 CERN 的 ECN3 北区实验大厅进行的高强度 K 介子束流实验的装置
- HIKE 的研究范围几乎涵盖了 K 物理能触及的所有方面，包括超稀有 K 衰变的精确测量以及新物理的研究等等

表 8 HIKE 实验计划开展的部分物理和实验目标^[68]

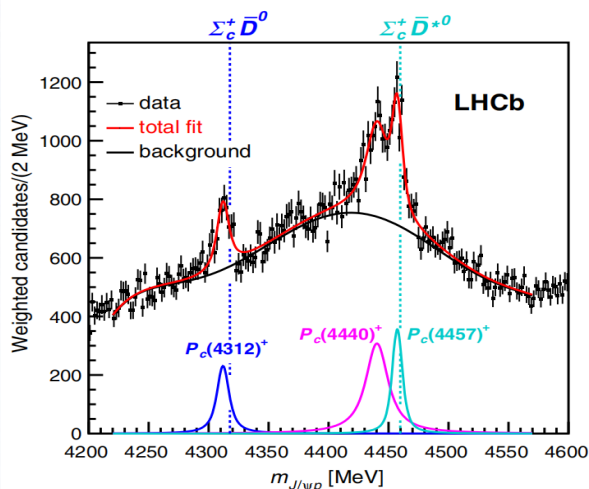
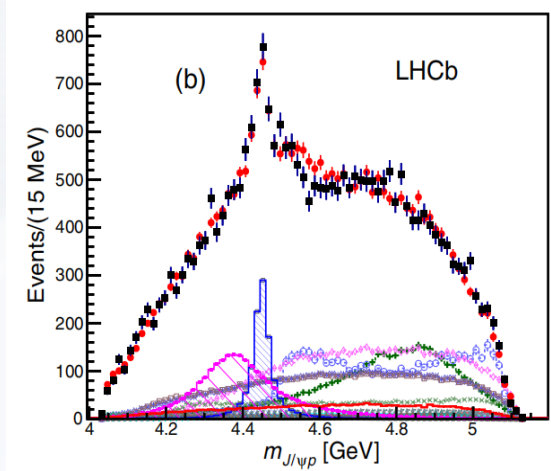
阶段	束流粒子	实验目标
第一阶段	K^+	将 $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$ 分支比的测量精度提高到 5%，并将测量结果与理论值对比
第一阶段	K^+	对 $K^+ \rightarrow \pi^+ e^+ e^-$ 和 $K^+ \rightarrow \pi^+ \mu^+ \mu^-$ 过程进行精确测量
第一阶段	K^+	对稀有衰变 ($K^+ \rightarrow \pi^+ \gamma \gamma, K^+ \rightarrow \pi^+ \gamma \ell^+ \ell^-, K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0 \gamma, K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0 e^+ e^-$) 的实验测量进行改进更新
第一阶段	K^+	研究 K^+ 衰变中弱相互作用粒子的产生
第一阶段	K^+	在束流转储模式下收集数据集，大幅度提高寻找弱相互作用粒子的探测灵敏度，同时为第二阶段做准备
第二阶段	K_L	观察超稀有衰变 $K_L \rightarrow \pi^0 e^+ e^-$ 和 $K_L \rightarrow \pi^0 \mu^+ \mu^-$ 并在 $O(10^{-11})$ 水平上设定衰变分支比上限
第二阶段	K_L	实现 $K_L \rightarrow \mu^+ \mu^-$ 衰变分支比的测量精度达到 1%
第二阶段	K_L	在束流转储模式下进一步收集数据集，并对第三阶段所需的中性束流进行调试
第三阶段	K_L	寻找其它能改变味道的中性流衰变，例如 $K_L \rightarrow \pi^0 \pi^0 \nu \bar{\nu}$
第三阶段	K_L	寻找测量 K_L 衰变到弱相互作用粒子 X 的过程，例如 $K_L \rightarrow X X$

2.3 JLab 上的介子束流实验

美国杰斐逊国家实验室 (Jefferson Lab , 简称 JLab) 是正在运行的主要进行光生实验的机构 , 在强子谱与核子结构研究方面取得了一系列重要实验测量结果



自 2015 年在欧洲核子中心的 LHCb 上发现五夸克态以来 , JLab 近几年一直致力于通过测量 $\gamma p \rightarrow J/\psi p$ 光生过程来寻找这些五夸克态



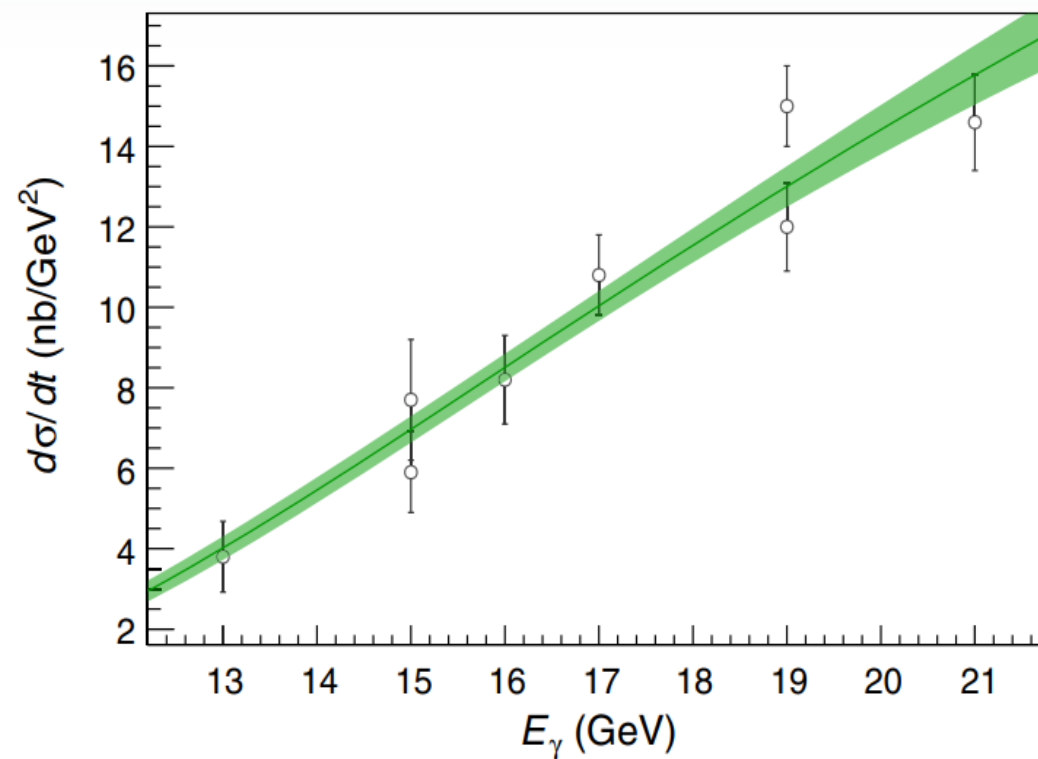
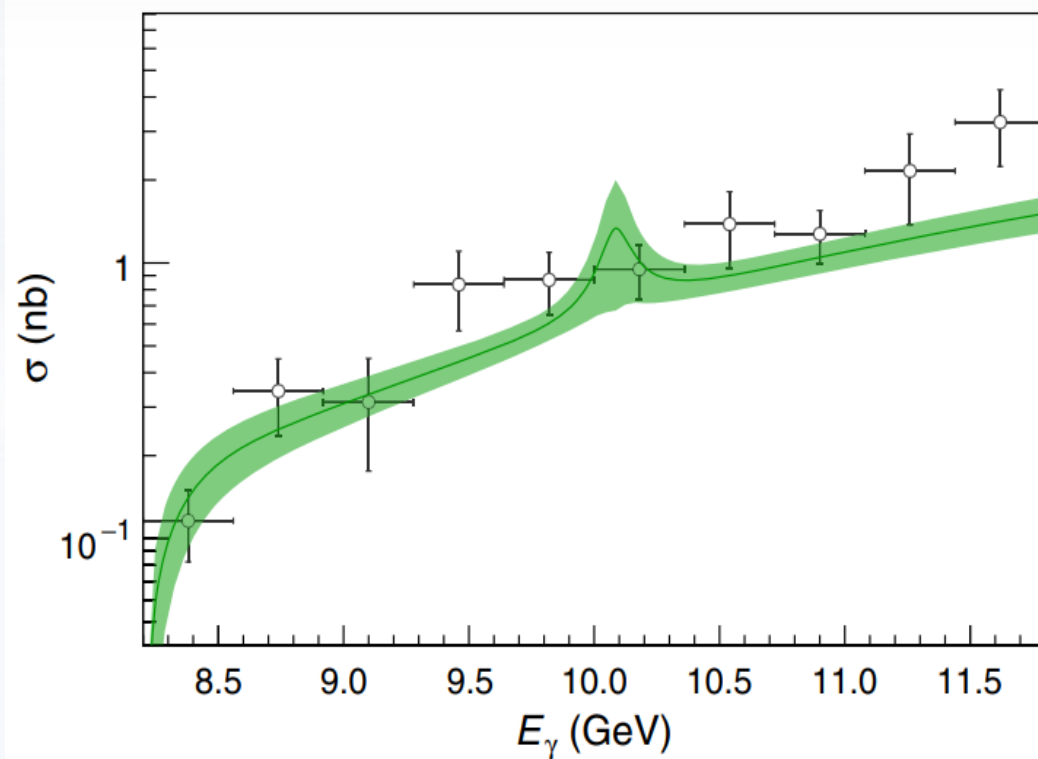
LHCb 实验测量五夸克态

PRL 115, 072001 (2015); PRL 122, 222001 (2019)

- A. Ali et al. [GlueX], Phys. Rev. Lett. 123 , 072001 (2019).
- S. Adhikari et al. [GlueX], Phys. Rev. C. 108, 025201 (2023).
- B. Duran et al. [Hall C], Nature. 615, 813-816 (2023).

2.3 JLab 上的介子束流实验

- 但截止目前，并未发现来自Pc 态的明显信号，只给出了Pc 态衰变到J/ψp的分支比上限
- 以上信息提醒我们，通过强子-强子散射过程研究奇特态强子的产生和性质可能需要重新引起重视



D. Winney *et al.* [JPAC], *Phys. Rev. D.* 100 034019 (2019).

2.3 JLab 上的介子束流实验

- 目前，JLab 实验室已有利用介子束流实验开展奇异强子谱及核子性质研究的实验计划
- 例如，JLab 在 2017年提出，将现有的高能量、高强度的光子束定向到 GlueX探测器前的铍靶上产生 K_L 束流，并将其作用于液氢/液氖冷靶，开展奇异介子谱学研究

在 GlueX 上计划展开介子束流实验的初始阶段，将重点集中在二体和准二体反应道的研究上

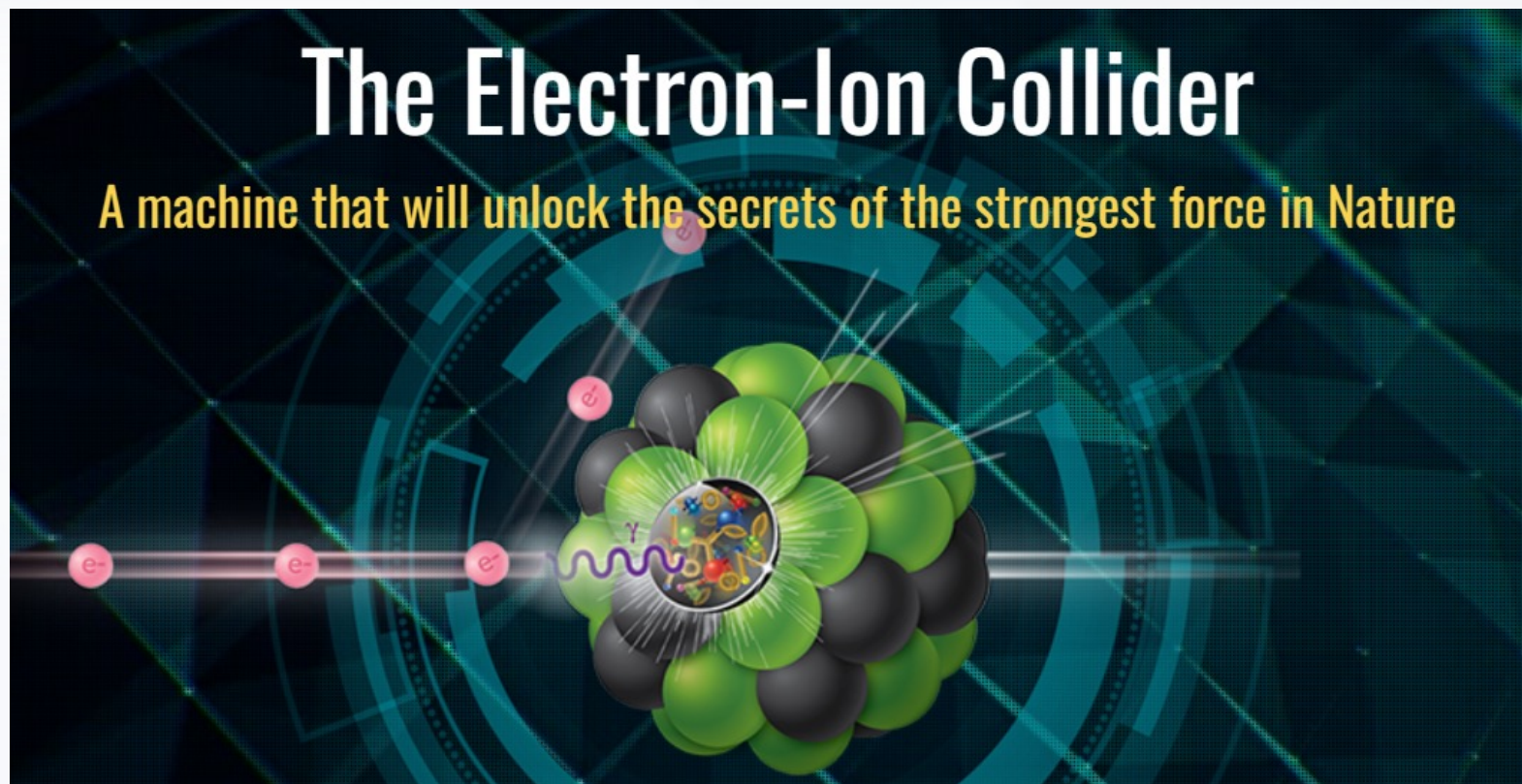
例如 $K_L p \rightarrow \pi + \Lambda$ 和 $K_L p \rightarrow \pi + \Sigma$ 等过程。类比于之前通过 $N\pi$ 末态过程研究核子共振态 N^* 的产生和性质， $K_L p \rightarrow \pi + \Lambda$ 和 $K_L p \rightarrow \pi + \Sigma$ 等过程是研究超子共振态的重要途径，同时也将为更好研究 $K^*(892)$ 和 $K^*(1420)$ 等奇异介子性质提供条件

此外，诸如弹性过程 $K_L p \rightarrow K_S p$ 和电荷交换过程 $K_L p \rightarrow K^+ n$ 等与超子产生相关的反应道也被列进 GlueX 实验的后续规划之中

总之，GlueX 计划展开的介子束流实验将为探索超子共振态和奇异介子的性质提供数据，这将促进对奇异夸克能区介子谱的更好研究

2.4 EIC 上的介子束流实验

- EIC (Electron-Ion Collider) 是美国正在规划中的一个大型加速器项目，由布鲁克海文国家实验室建设
- 建成后的 EIC 设备将提供高能量、高亮度的极化电子-离子对撞实验数据，旨在探索核物质结构和动力学以及 QCD 相关的物理



2.4 EIC 上的介子束流实验

- EIC 将计划于 2025年完成基线性能的最终设计决策并正式施工开始，并于2030 年初开始设备运行
- 在文章《Physics Opportunities with Meson Beams for EIC》中，**基于EIC设备建造一个先进的介子束实验装置**的设想被提出
- 该装置能够提供高能量、高强度的 π 和 K 介子束，**与强子光生或电生实验形成互补**，为深入理解强相互作用和 QCD 理论提供数据

Part 3

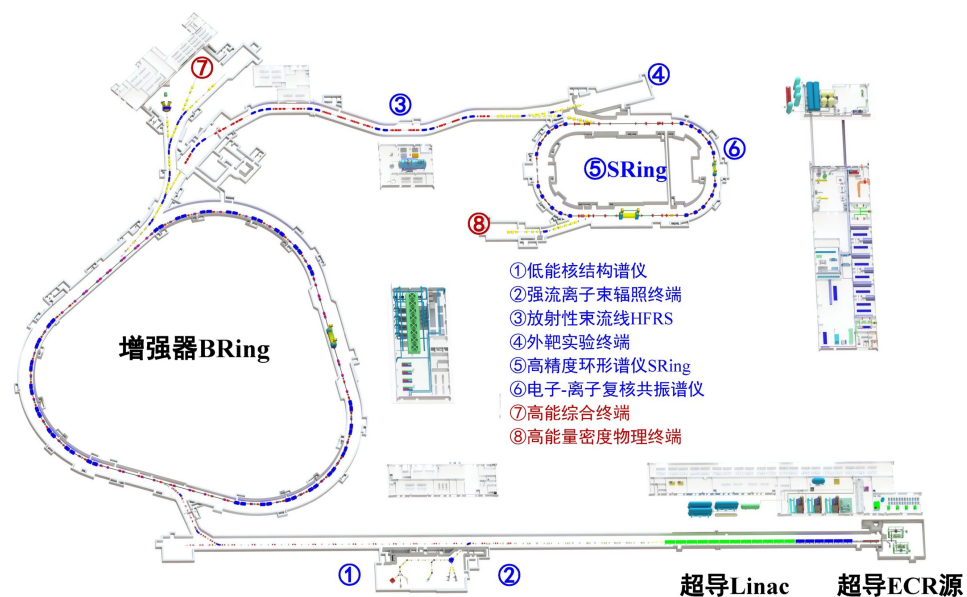
基于HIAF装置的介子束流实验展望

Prospects for Meson Beam Experiments Based on the HIAF



3.1 实验参数估算和测量物理目标初步建议

- ❑ 中科院近代物理研究所正在建设的强流重离子加速器装置（High Intensity heavy-ion Accelerator Facility，简称 HIAF）能够提供高流强、宽能量范围的质子和离子束流
- ❑ 建成后，HIAF 与国际上同类装置比较，能够提供峰值流强最高的中低能重离子束流



3.1 实验参数估算和测量物理目标初步建议

01

通常，任何质子或离子束均可用于产生次级强子束流，其中介子的贡献显著。特别是在次级束流为负分量情况下（即带负电的次级束流），介子成分将占据主导地位

02

通过质子或离子束流产生的带负电的次级束流中，可以期望其组成为 97% 的 π 介子、2% 的 K 介子和不到 1% 的反质子，这种次级束流的强度通常比入射质子束的强度低 2 ~ 4 个数量级

基于 HIAF 的质子束流可能产生的次级介子束流参数

介子束流能量	动量分散	束流强度（以每脉冲的粒子数为单位）
4 GeV	$\pm 3\%$	束流强度预计比主质子束流低 100 倍，约为 2.0×10^{10}
6 GeV	$\pm 3\%$	束流强度预计比主质子束流低 1000 倍，约为 2.0×10^9
8 GeV	$\pm 3\%$	束流强度预计比主质子束流低 4 个量级，约为 2.0×10^8

3.1 实验参数估算和测量物理目标初步建议

- 如果我们采用 4 ~ 8 GeV 能量的 π/K 介子束流与核子碰撞进行散射实验，则其质心能大致在 2.9 ~ 4.0 GeV 之间。这样一个能量范围对于研究轻强子谱学显然是足够了
- 需要指出，针对具体的强子谱学研究所需要的实验束流及相关数据，要在获知 HIAF 详细实验参数基础上进行蒙特卡洛模拟才能确定

未来 HIAF 上的介子束流实验可以测量的部分散射过程

$\pi^- p \rightarrow f_1(1285)n$	$K^- p \rightarrow f_1(1285)\Lambda$	$\pi^- p \rightarrow f_1(1420)n$	$K^- p \rightarrow f_1(1420)\Lambda$
$K^- p \rightarrow a_0(1817)\Lambda$	$K^- p \rightarrow \eta_1(1855)\Lambda$	$K^- p \rightarrow \phi(2170)\Lambda$	$K^- p \rightarrow \eta(2225)\Lambda$
$K^- p \rightarrow K^{(*)}N^{(*)}$	$\pi^- p \rightarrow K^{(*)}\Sigma^{(*)}$	$\pi^- p \rightarrow K^{(*)}\Lambda^{(*)}$	$\pi^- p \rightarrow K^{(*)}\Lambda(1405)$
$\pi^- p \rightarrow K^{(*)}\Lambda(1520)$	$K^- p \rightarrow K^{(*)}\Xi^{(*)}$	$\pi^- p \rightarrow \phi n$	$K^- p \rightarrow \phi\Sigma^{(*)}$
$K^- p \rightarrow \phi\Lambda$	$K^- p \rightarrow \phi(1850)\Lambda$	$K^- p \rightarrow \phi\Lambda(1405)$	$K^- p \rightarrow \phi\Lambda(1520)$

3.2 介子束流实验的特点和与国内其它实验的互补性

- 如前所述，PDG 中收录的八成以上粒子及其谱学数据都与介子束流实验相关，这源于介子束流实验在强子谱学研究的优势或独特性：能够产生种类丰富的轻强子
- 北京正负电子对撞机的 BESIII 实验在强子谱学研究领域取得了一系列重要成果而未来可能建造的具有更高亮度的超级陶粲装置（Super Tau-Charm Facility，简称 STCF）在轻强子谱学研究方面也展现出很好的潜力。BESIII 实验与未来的 STCF 实验在测量和研究强子谱时，主要采取两种途径：

一是通过正负电子对撞直接产生轻强子

正负电子对撞实验过程相对“干净”，对末态粒子的探测较为精确

二是正负电子湮灭所产生的粲偶素、粲强子通过衰变过程来产生轻强子

3.2 介子束流实验的特点和与国内其它实验的互补性

然而，由于通过正负电子湮灭产生轻强子的反应过程是特定强子衰变的结果，并且这一过程受到对称性的限制，因此产生的轻强子的自旋宇称量子数受到了一定的限制

将这两类实验结合起来开展轻强子谱研究，将能够充分展现各自实验的独特性，并实现互补效果

相比之下，介子-核子散射实验以强相互作用为主导，其末态涉及的轻强子的自旋宇称量子数范围更为宽泛，这构成了其在研究轻强子谱方面的独特优势

然而，打靶实验本身存在较高的本底噪声问题，且介子束流中通常混杂有较多的本底粒子，这可能会对介子束流实验的精度造成一定影响

Part 4

结论与展望

Conclusions and Prospects



4.1 结论与展望

- 当前，国际上的相关加速器实验机构都比较重视介子束流实验
- 日本 **J-PARC** 实验已经列出了利用介子束流研究相关物理问题的计划表
- 欧洲核子中心的 **COMPASS** 实验已经完成了所有实验计划和数据采集，并计划建造新的 **AMBER** 实验替代 **COMPASS** 实验
- 欧洲核子中心还提出新的 **HIKE** 实验，通过产生高强度 K 介子束流进行相关物理问题的研究
- 特别值得关注的是，主要开展强子光（电）生实验的 **JLAB** 和 **EIC** 实验机构也都提出了进行介子束流实验的计划
- 并在实验计划书中明确说明只有介子束流实验和强子光（电）生实验共同配合，互为补充，才能更有效发挥光（电）生数据的潜力，为深入揭示和研究强子物理相关问题提供数据

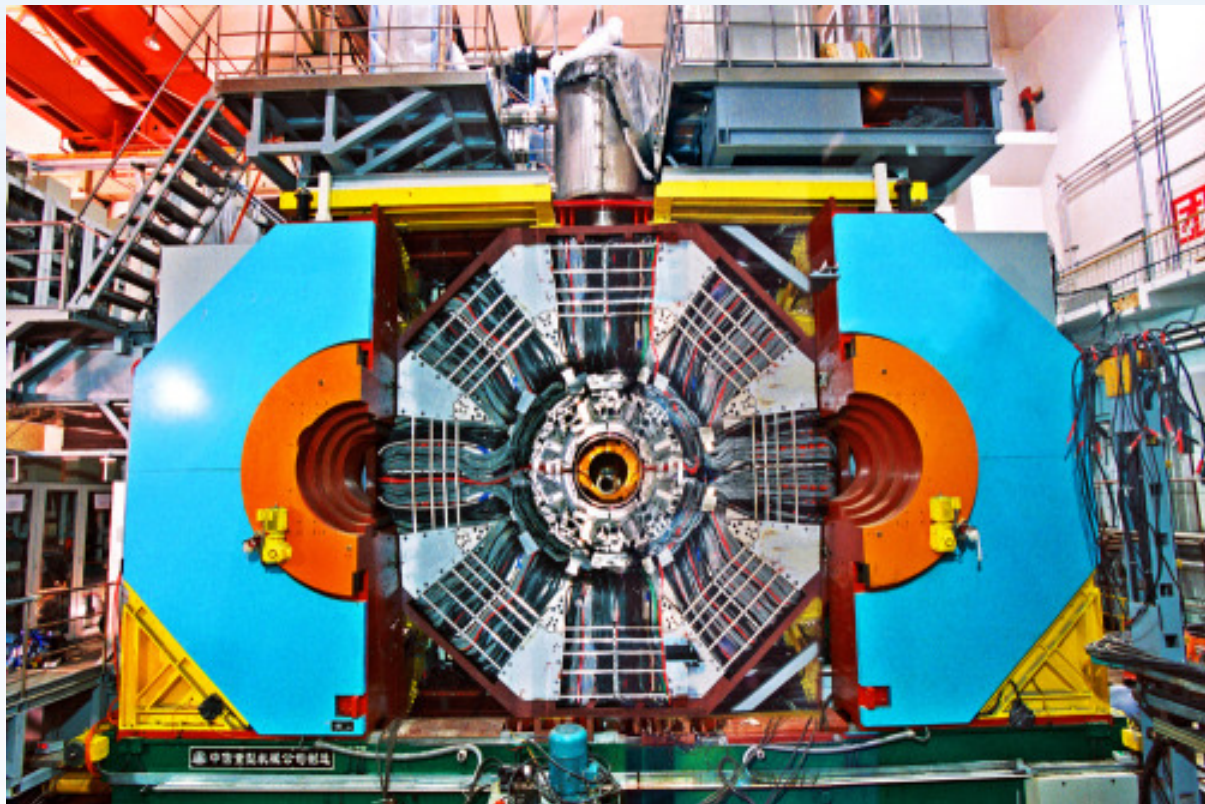
4.1 结论与展望

- ❑ 在过去的几十年中，包括兰州重离子加速器（HIRFL）和北京正负电子对撞机（BEPC）在内的大科学工程装置的建设见证了我国核物理与粒子物理事业的发展 and 进步
- ❑ 未来即将建成的强流重离子加速器装置（HIAF）和计划中的中国极化电子离子对撞机（EicC）也将有力促进我国核物理与强子结构方面的研究再上新台阶



4.1 结论与展望

- ❑ 目前，北京正负电子对撞机上的 BESIII 实验是国际上几大高能物理实验装置之一，在强子谱研究方面取得了一系列标志性成果
- ❑ 然而我们应该认识到以 BESIII 实验为代表的正负电子对撞实验的局限性，介子束流实验可与之互为补充



BESIII

Beijing Spectrometer(BESIII) Experiment

4.1 结论与展望

- ❑ 需要引起重视的是，我们基于国内的 HIAF 装置对可能产生的次级介子束的能量和亮度等关键参数的分析结果表明，基于 HIAF 建造介子束流装置进行轻强子谱学及相关物理的研究是可行的
- ❑ 未来如能在 HIAF 上建成介子束流实验装置并对相关散射过程进行高精度测量，将助推强子谱学及相关物理的研究再上一个新台阶，为深刻理解强相互作用和 QCD 理论提供重要实验支撑



4.1 结论与展望

- 综上所述，我国进行介子束流方面的实验规划和研究**正当其时**
- 鉴于当前国内强子谱研究在国际上所具备的影响力，以及通过几代粒子物理和核物理大科学工程装置的建造和相关实验的开展所具有的人才储备，**建造我国自己的介子束流装置并开展相关强子物理实验应当提上日程**
- 这将是我国强子谱研究在国际上占有一席之地之后继续为提升人们对物质世界认识水平贡献力量**的一个契机**

第一届介子束流物理研讨会

谢谢！
请各位专家老师批评指正！

