强子谱学实验

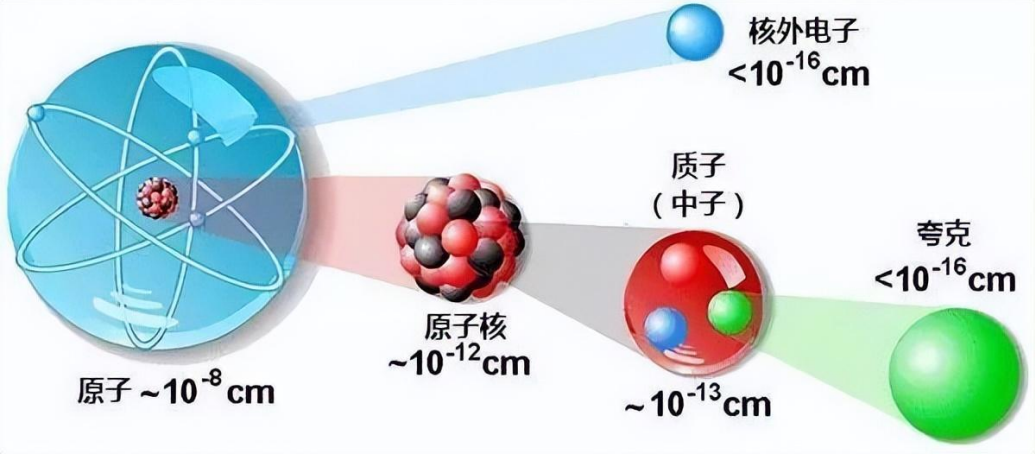
刘北江

中国科学院高能物理研究所

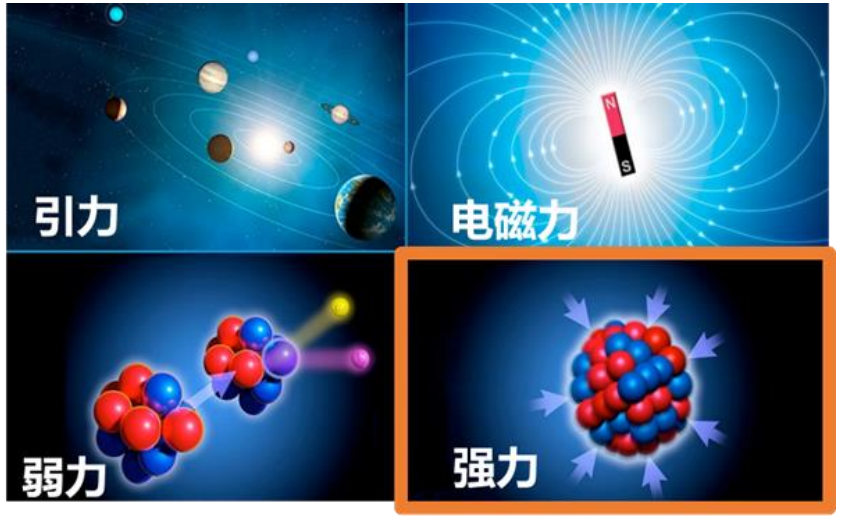
国科物语，2025年12月28日

强子：可见宇宙的主要组成单元

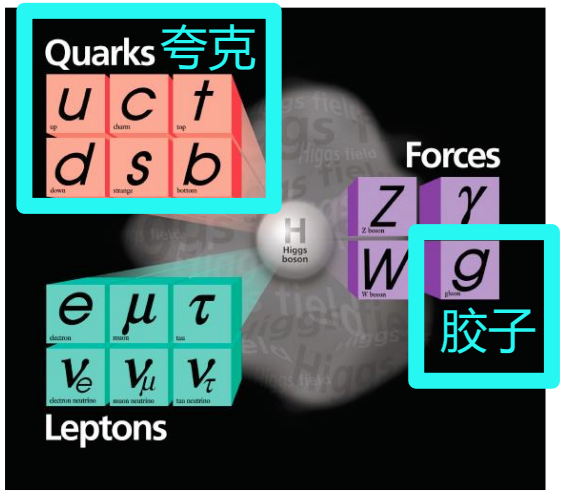
- 强子是由强相互作用支配的夸克和胶子系统
- **强子的性质究竟是如何从夸克和胶子中产生的?**
  - 这个问题至今仍然是物理学尚未解决的难题之一，其答案对于我们理解自然的本质以及构成宇宙万物的物质结构具有深远意义



强子质量只有极小的一部分来自组分夸克（希格斯机制）



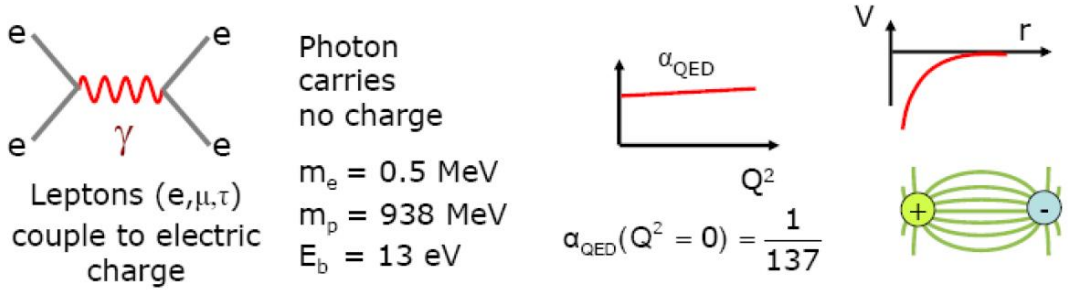
粒子物理标准模型



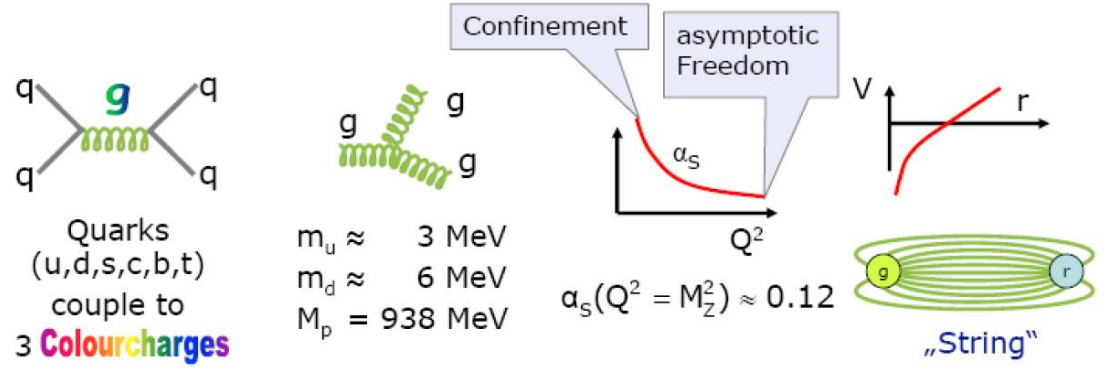
强相互作用

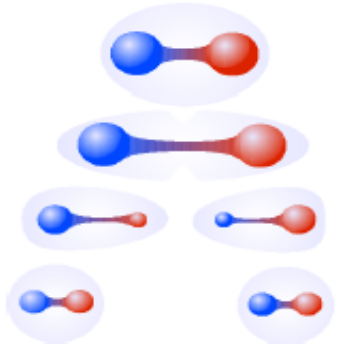
- 强相互作用基本理论是量子色动力学（QCD），标准模型的两大支柱之一
- QCD在高能区的行为已能精确解析，而在低能区由非微扰主导，尚待探索
  - 色禁闭：胶子和夸克无法被单独观测，而总是被限制在强子内部
  - QCD非微扰性质使得强子物理的理论和实验研究面临巨大挑战

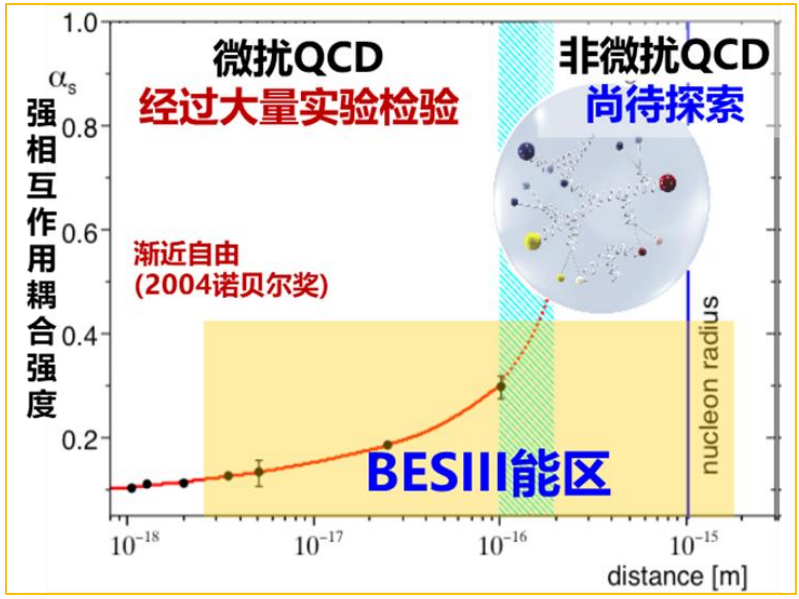
QED:



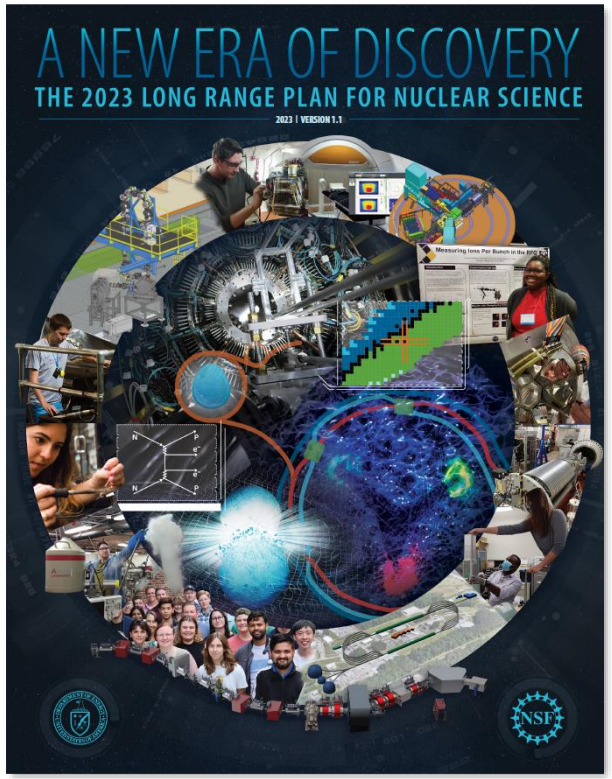
QCD:



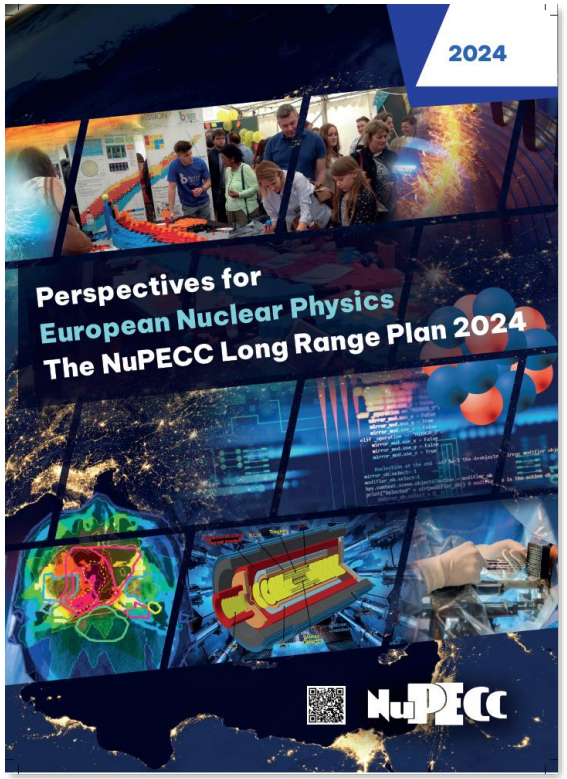




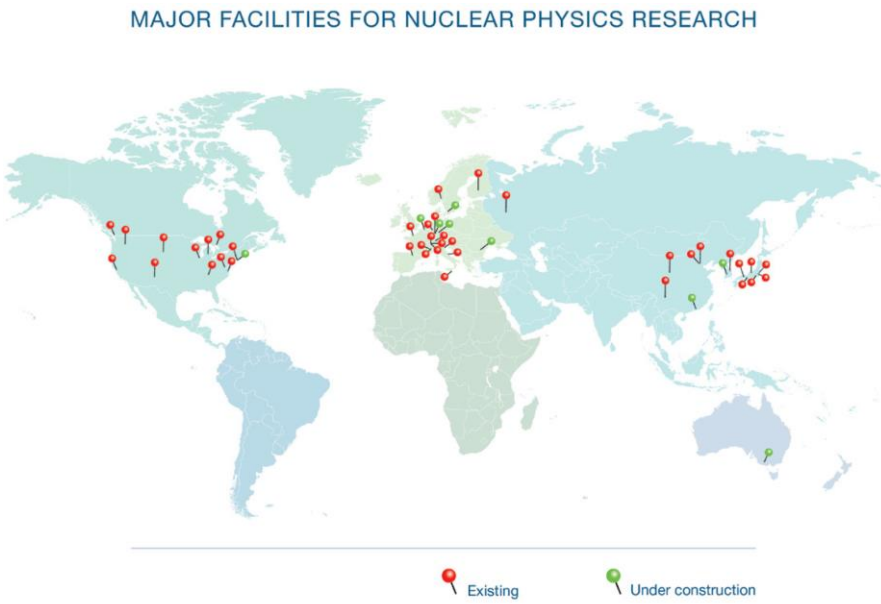
在高精度前沿利用多种探测手段全面理解强子复杂的性质
成为研究可见物质的核心



美国核物理长期战略规划

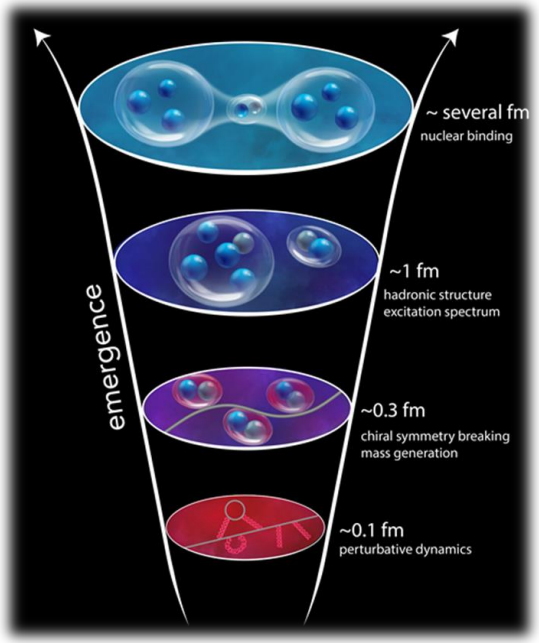


欧洲核物理长期战略规划



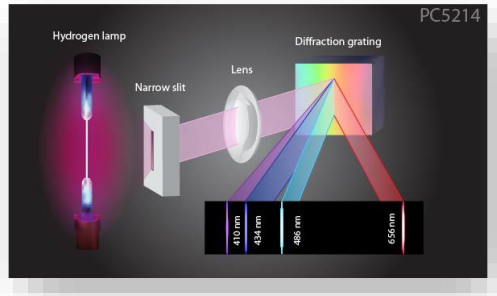
关键科学问题

- 夸克与胶子如何形成强子?
- 宇宙可见物质的质量如何产生?
- 无质量的胶子可以形成有质量的奇特物质吗?
- QCD如何衍生出复杂的强子结构与强子谱?



原子光谱:

Bohr model → QED



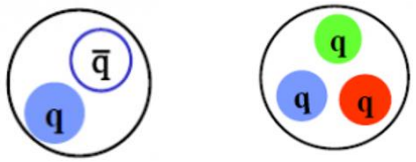
强子谱学:

Quark model → QCD

揭示非微扰QCD的有效自由度

寻找超越夸克模型的奇特强子态
——揭示QCD非微扰性质和色禁闭机制的重要途径

传统夸克模型

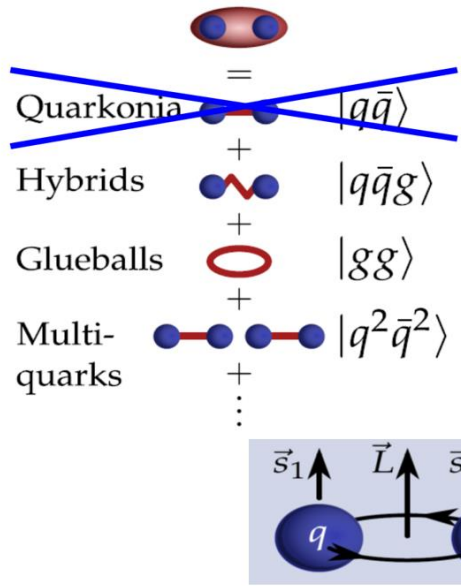


介子　　重子

超越夸克模型的奇特强子态

多夸克态:夸克数≥4　　胶球　　混杂态

- 已知的强子绝大部分可以用夸克模型描述，超越夸克模型的奇特强子态将有力拓展对于强相互作用的认知前沿
- $J^{PC} = 1^{-+}$等奇特量子数无法由常规介子形成，奇特强子态的明确判据
- 国际强子物理研究的前沿热点
  - **Hadroproduction:** GAMS, VES, E852, COMPASS, AMBER
  - **$p\bar{p}$ annihilation:** Crystal Barrel, OBELIX, PANDA
  - **Photoproduction:** GlueX, CLAS



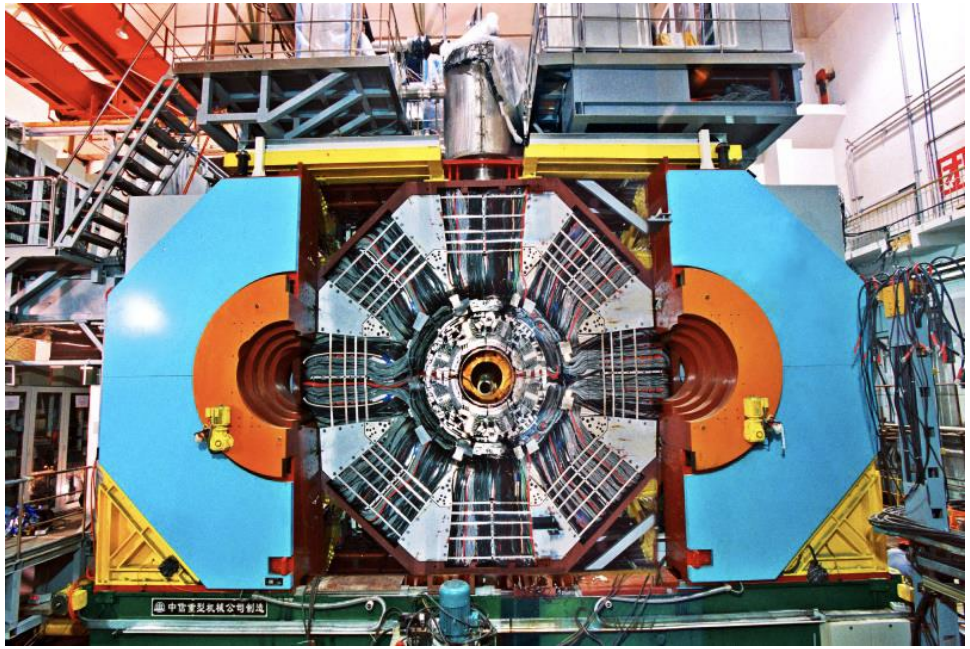
$\vec{J} = \vec{L} + \vec{S}$　$P = (-1)^{L+1}$　$C = (-1)^{L+S}$

Allowed J^{PC}: $0^{-+}, 0^{++}, 1^{--}, 1^{+-}, 2^{++}, \ldots$

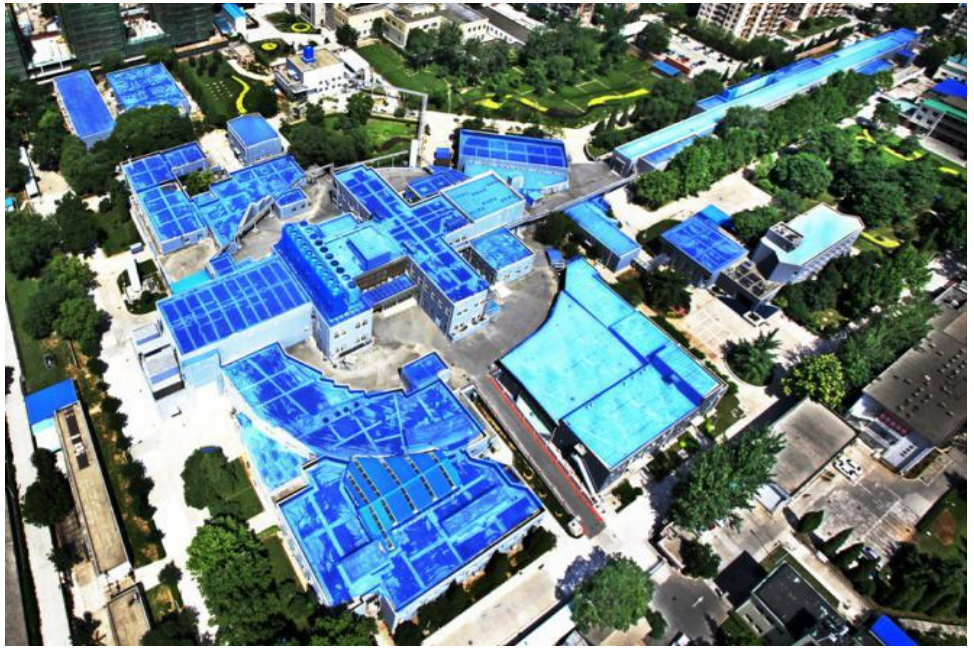
北京谱仪实验（BESIII）

- BESIII是国际一流的研究奇特强子态的实验平台
- 累积了粲能区**世界上最大**的数据样本，是研究强子物理的高精度前沿
- 数据的多样性使BESIII在强子谱学、强子结构、粲物理等方向具有**独特优势**
- BEPCII正在进行亮度和能量的**升级，研究尚未探索的能区**

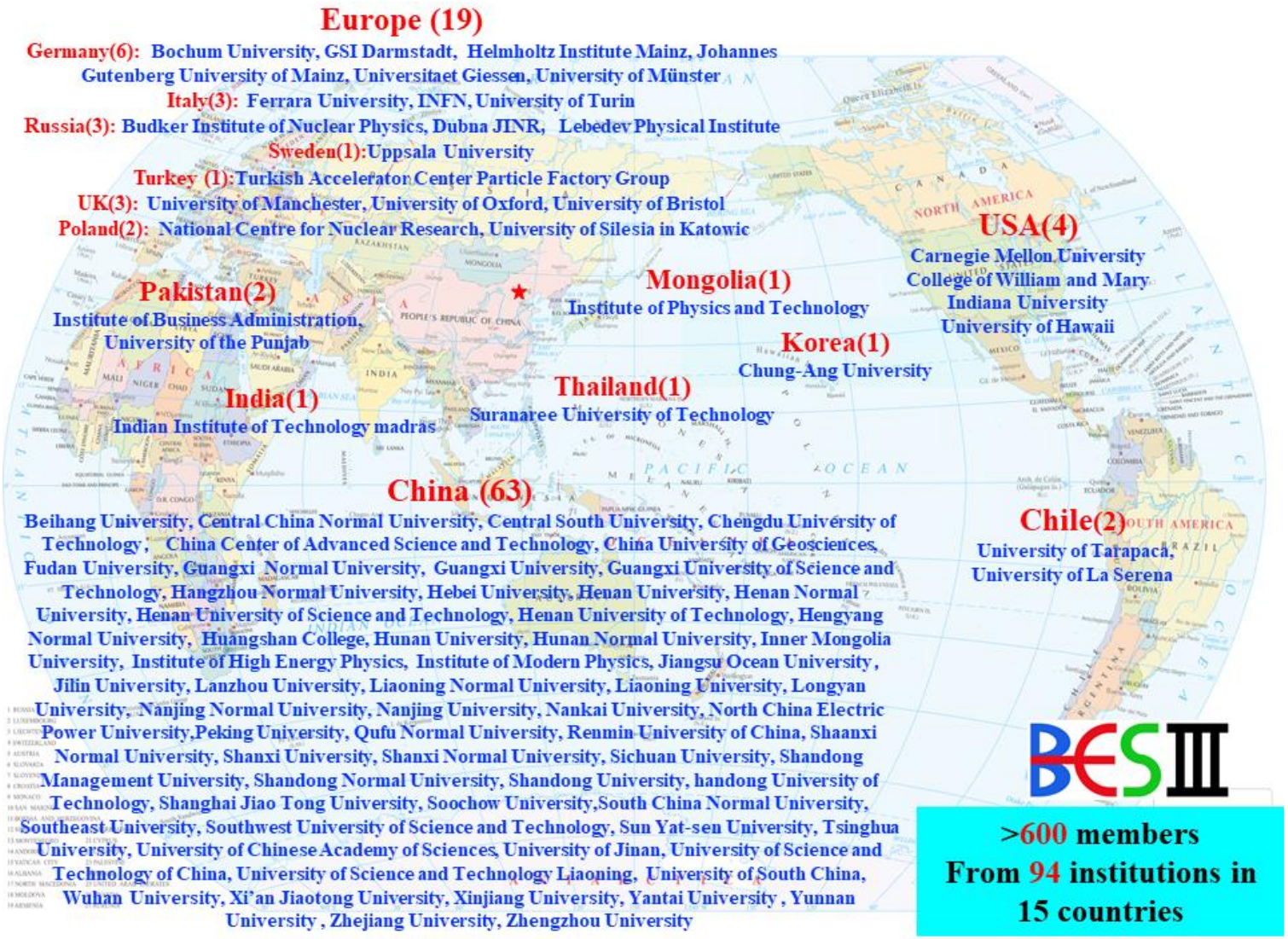
北京谱仪(BESIII)



北京正负电子对撞机 (BEPCII)

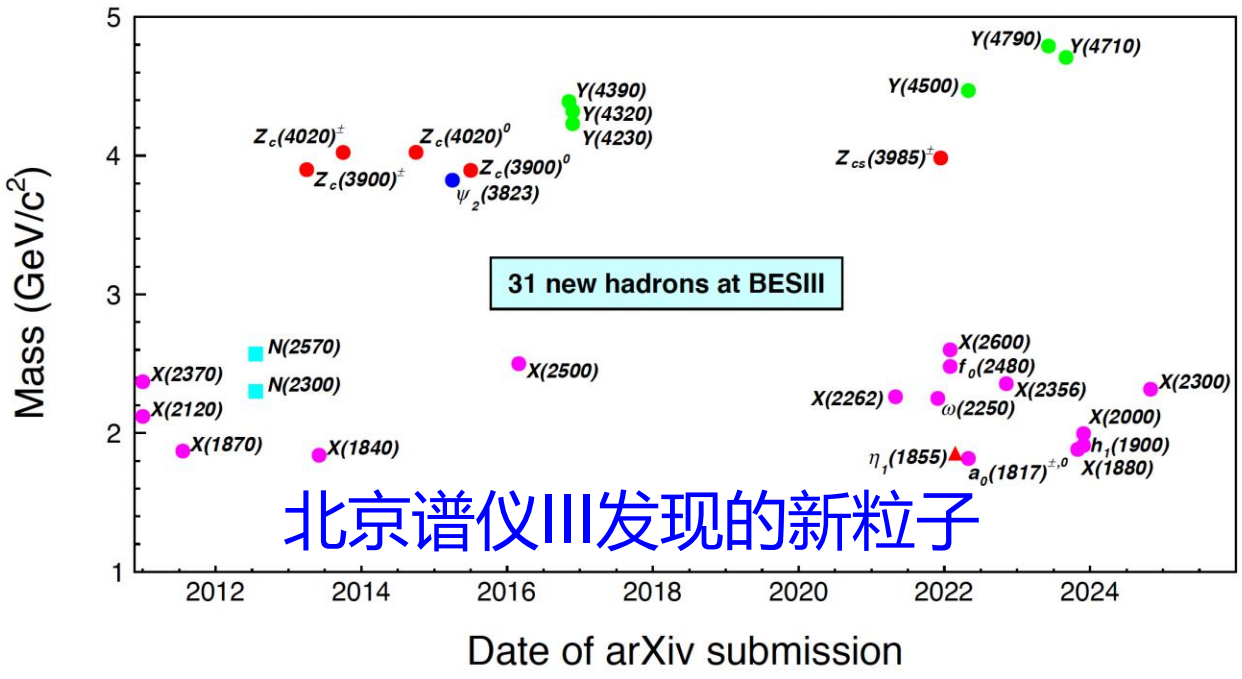


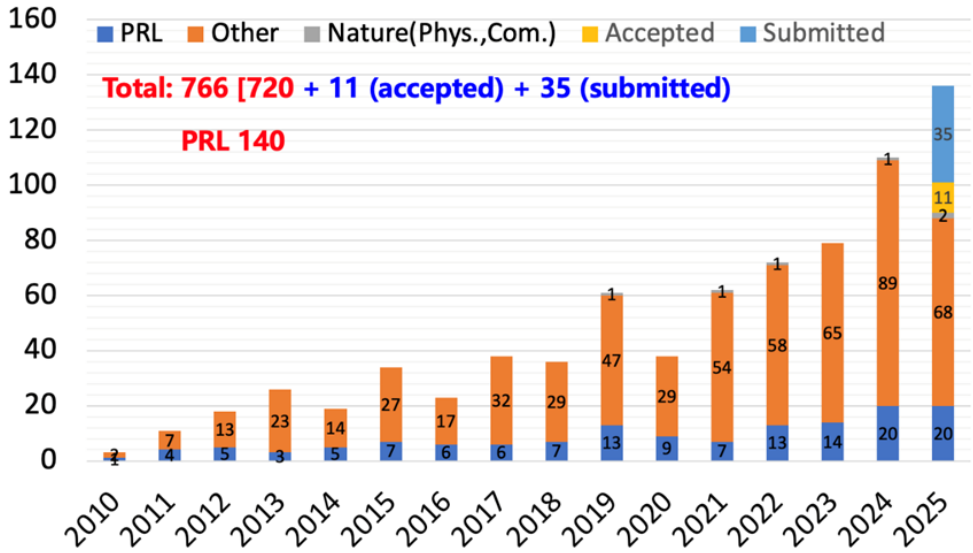
BESIII国际合作组



BESIII的物理成果

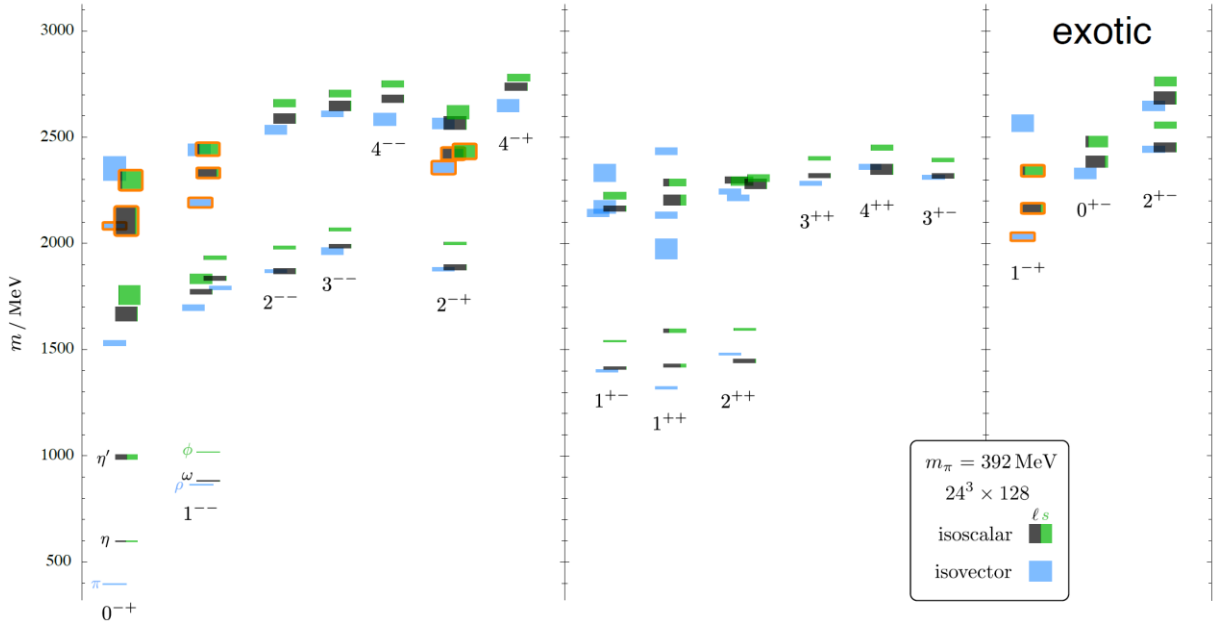
BESIII物理研究产出丰富，取得一系列的重要成果，发表超过700篇科研文章，每年收到超过100个国际会议报告的邀请，成果丰硕期

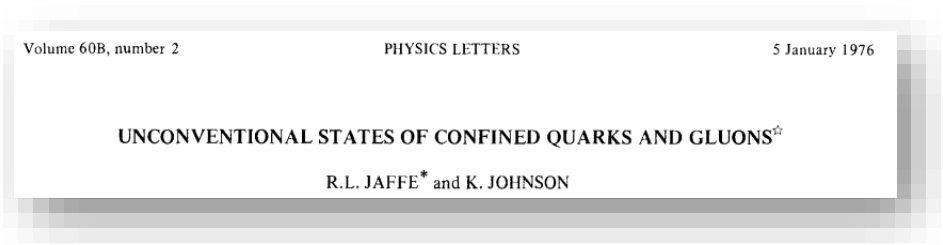




1^{-+}奇特强子态理论预期

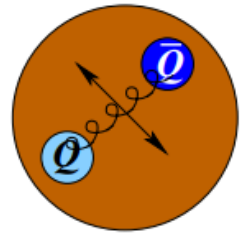
PRD 88 094505(2013)



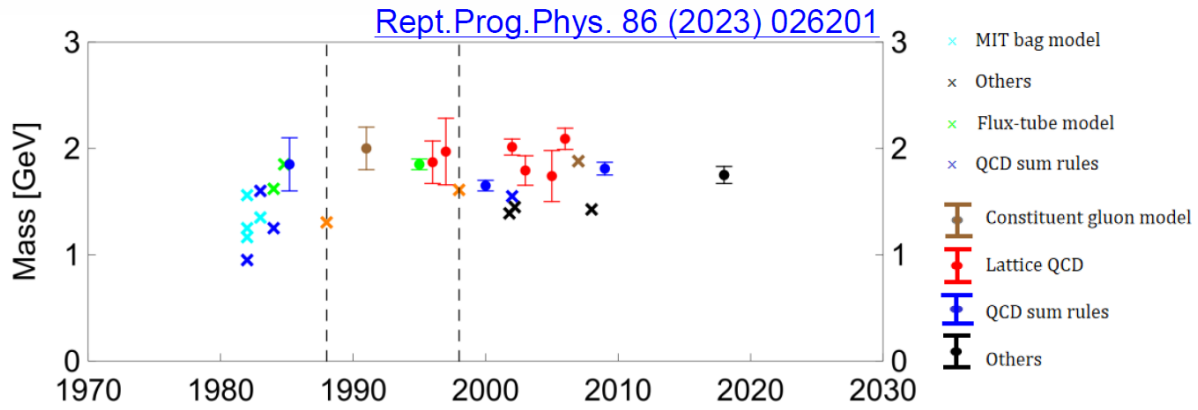

Volume 60B, number 2 PHYSICS LETTERS 5 January 1976

UNCONVENTIONAL STATES OF CONFINED QUARKS AND GLUONS☆

R.L. JAFFE* and K. JOHNSON



Rept.Prog.Phys. 86 (2023) 026201

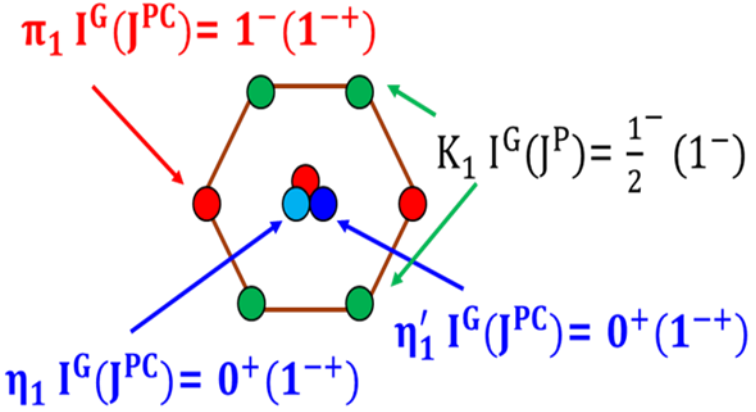


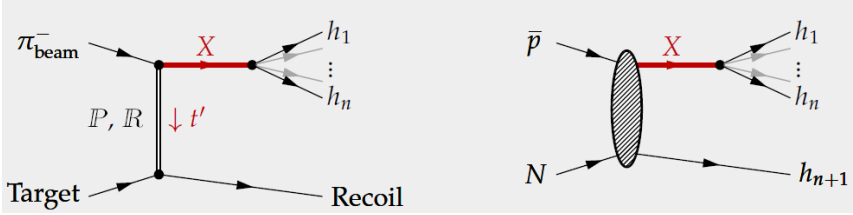
Mass of 1^{-+} hybrid

- 1^{-+}混杂态是格点QCD和唯象模型预言的最轻的、具有奇特量子数强子态
- 混杂态（$q\bar{q}g$）是体现胶子自由度的奇特强子态，对于研究胶子场和理解色禁闭有重要意义
  - QCD的特性：胶子自相互作用→ 激发的胶子场形成新物质形态

1^{-+}奇特强子态实验现状

- 相关实验研究持续了近40年，仅发现3个候选者
  - 同位旋矢量$1^{-+}\pi_1(1400),\pi_1(1600),\pi_1(2015)$
- 寻找同位旋标量1^{-+}是建立完整的1^{-+}奇特强子态谱系的关键



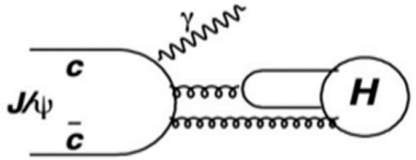


Review: PRC 82, 025208 (2010), PPNP 82, 21 (2015), EPJC 83 (2023) 1125

	Decay mode	Reaction	Experiment
$\pi_1(1400)$	$\eta\pi$	$\pi^-p\to\pi^-\eta p$ $\pi^-p\to\pi^0\eta n$ $\pi^-p\to\pi^-\eta p$ $\pi^-p\to\pi^0\eta n$ $\bar{p}n\to\pi^-\pi^0\eta$ $\bar{p}p\to\pi^0\pi^0\eta$	GAMS KEK E852 E852 CBAR CBAR
	$\rho\pi$	$\bar{p}p\to 2\pi^+2\pi^-$	Obelix
$\pi_1(1600)$	$\eta'\pi$	$\pi^-Be\to\eta'\pi^-\pi^0Be$ $\pi^-p\to\pi^-\eta' p$	VES E852
	$b_1\pi$	$\pi^-Be\to\omega\pi^-\pi^0Be$ $\bar{p}p\to\omega\pi^+\pi^-\pi^0$ $\pi^-p\to\omega\pi^-\pi^0p$	VES CBAR E852
	$\rho\pi$	$\pi^-Pb\to\pi^+\pi^-\pi^-X$ $\pi^-p\to\pi^+\pi^-\pi^-p$	COMPASS E852
	$f_1\pi$	$\pi^-p\to p\eta\pi^+\pi^-\pi^-$ $\pi^-A\to\eta\pi^+\pi^-\pi^-A$	E852 VES
$\pi_1(2015)$	$f_1\pi$	$\pi^-p\to\omega\pi^-\pi^0p$	E852
	$b_1\pi$	$\pi^-p\to p\eta\pi^+\pi^-\pi^-$	

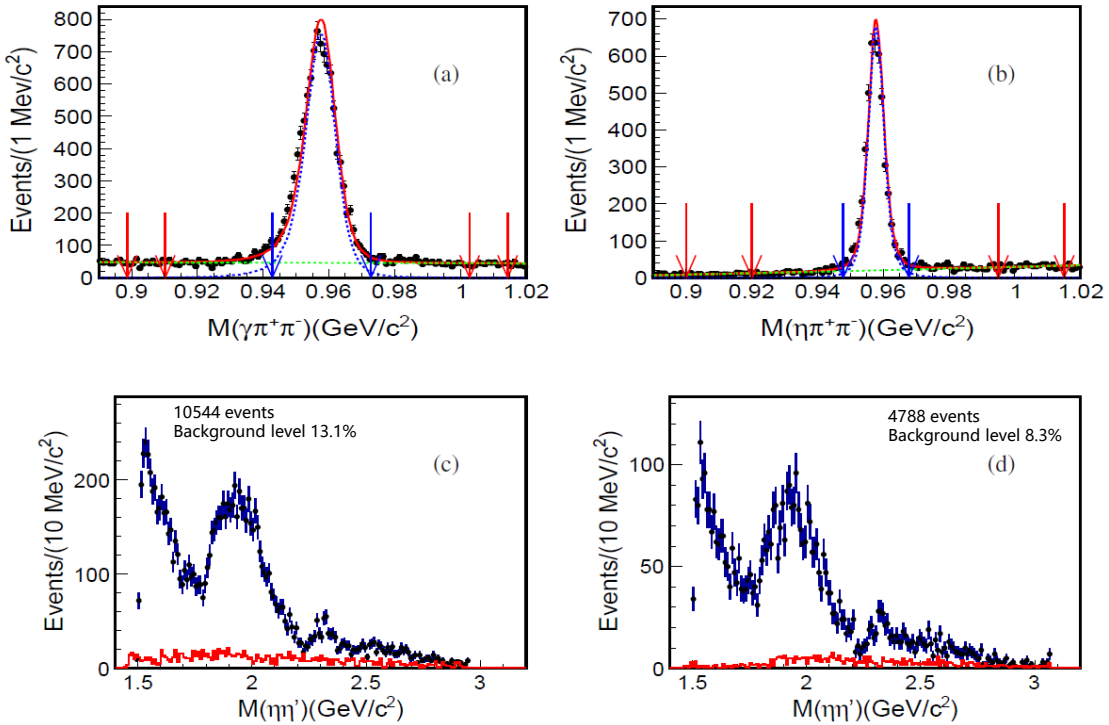
首次发现具有奇特量子数$J^{PC} = 1^{-+}$的新粒子 $\eta_1(1855)$

- BESIII独一无二的研究优势
  - **丰胶子过程、初末态约束、高精度低本底数据**



$\Gamma(J/\psi \to \gamma H) \sim O(\alpha\alpha_s^3)$

$J/\psi \to \gamma\eta\eta', \eta \to \gamma\gamma, \eta' \to \eta\pi^+\pi^-/\ \gamma\pi^+\pi^-,$

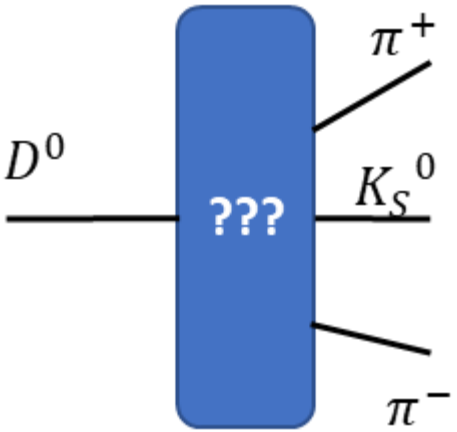


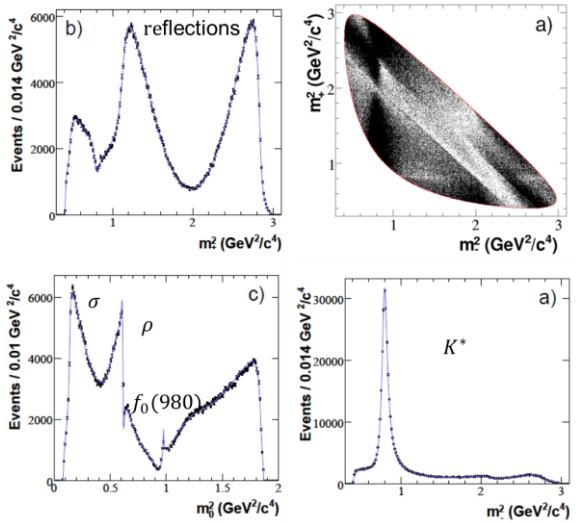
Phys. Rev. Lett. 129, 192002 (2022),
Phys. Rev. D 106, 072012 (2022)

研究方法：
分波分析——强子谱学的关键工具

强子谱学的任务：建立强子态的谱系，揭示非微扰QCD的有效自由度

高精度前沿	• 典型的尺度：O(10^{-15})米，寿命： O(10^{-24})秒，产率： O(10^{-6}) • 高统计量数据（百亿事例，PB级数据集） • 高精度大型探测器（多维异构数据）
复杂性前沿	• 从末态粒子的多维分布中解析粒子的量子属性 • 需要系统研究大量强子，建立对强子物质统一的理论描述



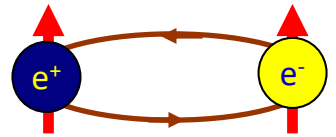


强子谱有丰富的共振态和复杂的叠加、干涉现象

分波分析：对海量数据进行多维拟合，测量共振态参数

研究方法：
分波分析——强子谱学的关键工具

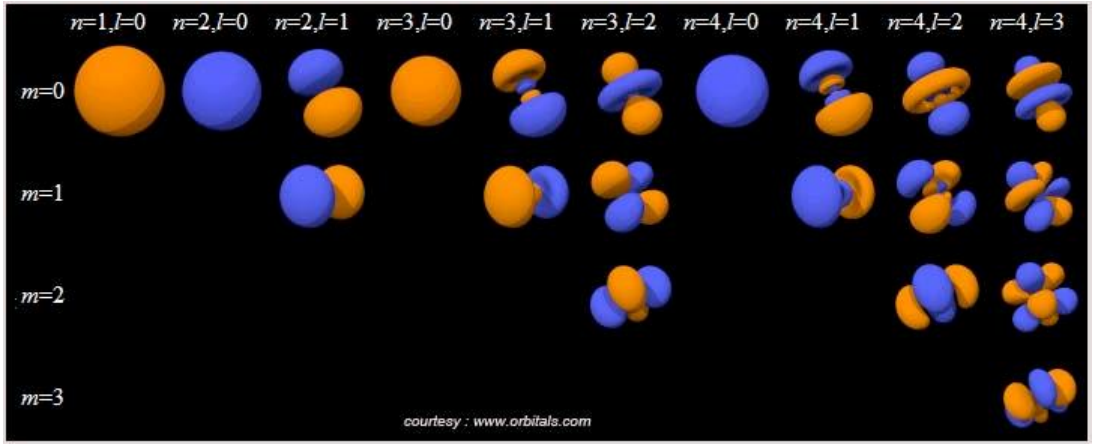
Positronium



$$\psi(\vec{r}, S) = R_{nl}(r)\, Y_{LM}(\theta, \phi)\, \chi(S)$$

- 产生振幅：描述量子数为J^{PC}的共振态X的产生
- 衰变振幅：描述共振态X衰变到末态粒子
- 观测量：末态粒子的四动量

- 对数据的多维分布进行按事例的极大似然拟合，使模型于数据符合→ 确定振幅参数

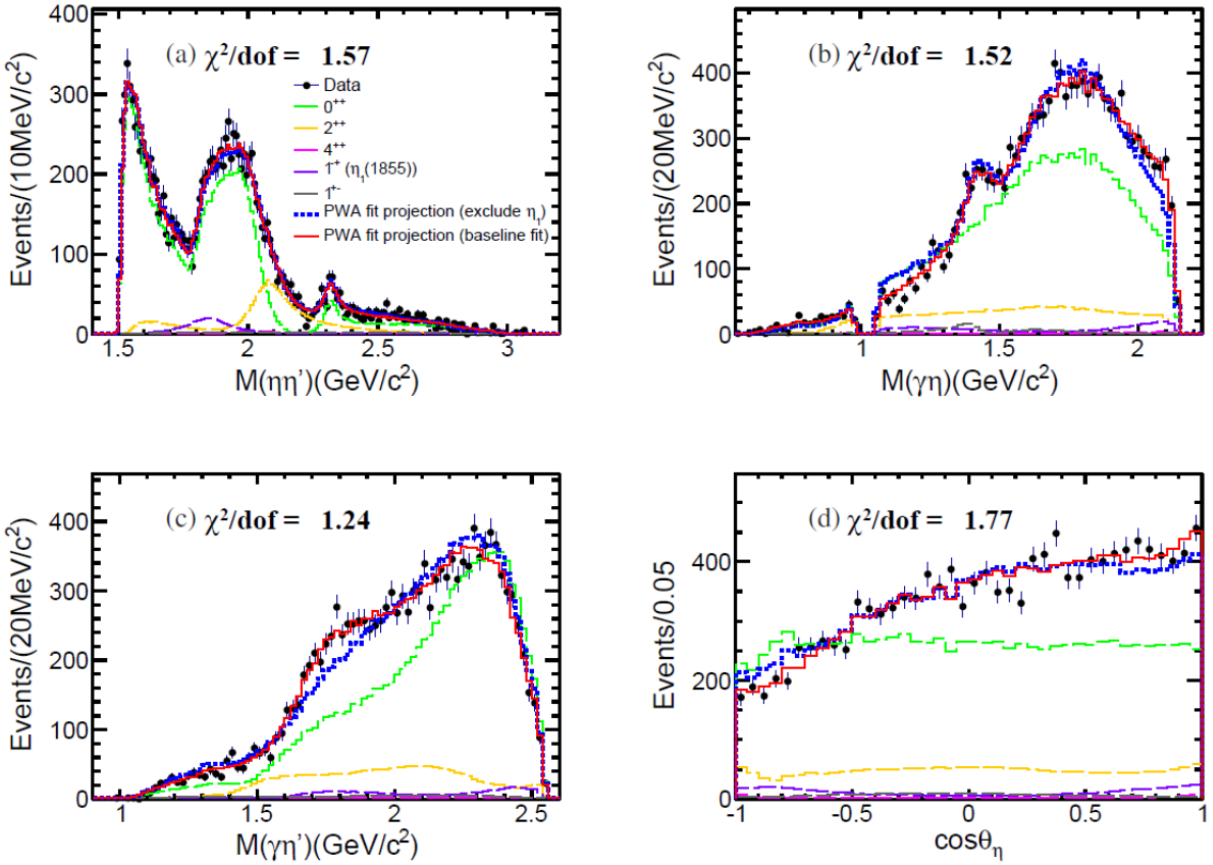


角分布体现了共振态的J^{PC}量子数

首次发现具有奇特量子数$J^{PC}=1^{-+}$的新粒子 $\eta_1(1855)$

通过分波分析得到各个中间共振态的贡献

PRL 129 192002(2022) , PRD 106 072012(2022)



这项研究基于全球首个应用GPU加速的分波分析软件GPUPWA , J. Phys. Conf. Ser. 219, 042031(2010)

首次发现具有奇特量子数$J^{PC}=1^{-+}$的新粒子 $\eta_1(1855)$

PRL 129 192002(2022) , PRD 106 072012(2022)

- 在 $J/\psi \to \gamma\eta\eta'$ 分波分析中首次发现同位旋标量 1^{-+} $\eta_1(1855)(>19\sigma)$

  $M = (1855 \pm 9^{+6}_{-1})\ \mathrm{MeV}/c^2,\ \Gamma = (188 \pm 18^{+3}_{-8})\ MeV/c^2$

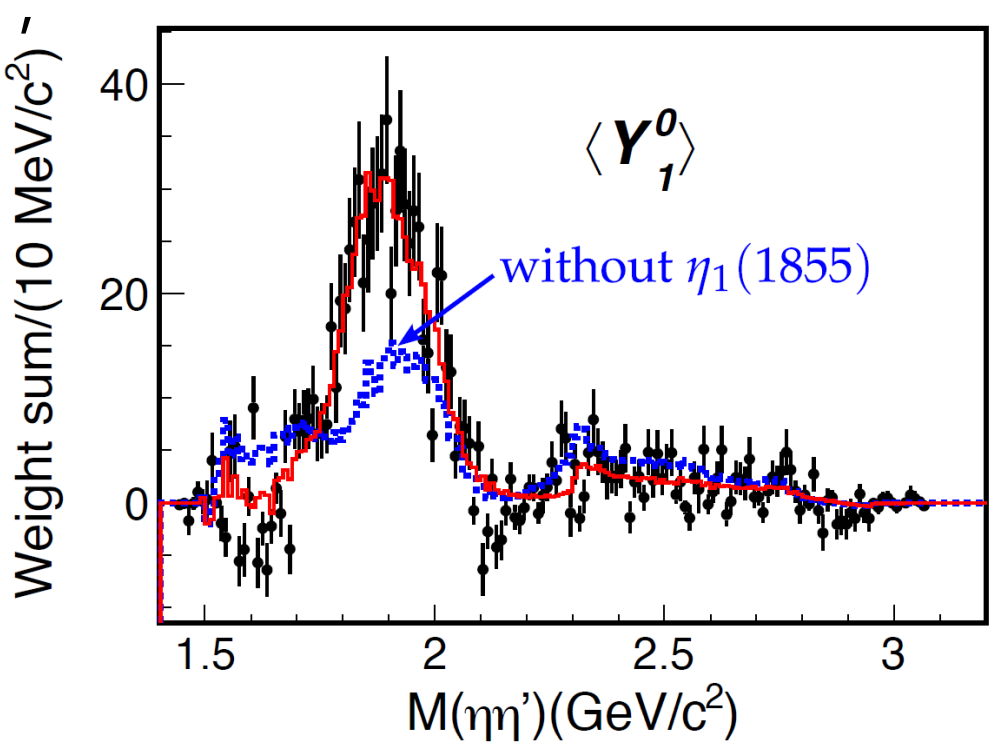
  $B(J/\psi \to \gamma\eta_1(1855) \to \gamma\eta\eta') = \left(2.70 \pm 0.41^{+0.16}_{-0.35}\right) \times 10^{-6}$

  - 质量与理论预言的1^{-+}混杂态一致

- 引发国际强子物理领域的关注:

PRD 107 074028 (2023) ;
Rept.Prog.Phys. 86 026201(2023);
Sci.China Phys.Mech.Astron. 65 (2022) 6, 261011;
CPC 46 , 051001(2022);
CPL 39, 051201 (2022);
PLB 834, 137478(2022);
PRD 106 , 074003(2022);
PRD 106, 036005(2022) ; ...

Hybrid?
$K\bar{K}_1$ Molecule?
Tetraquark?

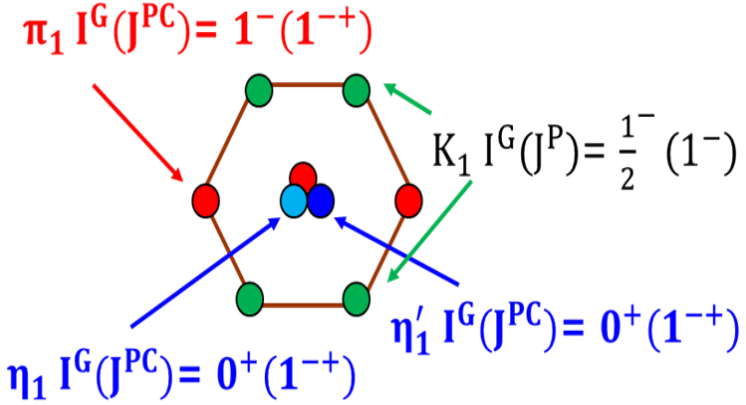


首次发现具有奇特量子数$J^{PC}=1^{-+}$的新粒子 $\eta_1(1855)$

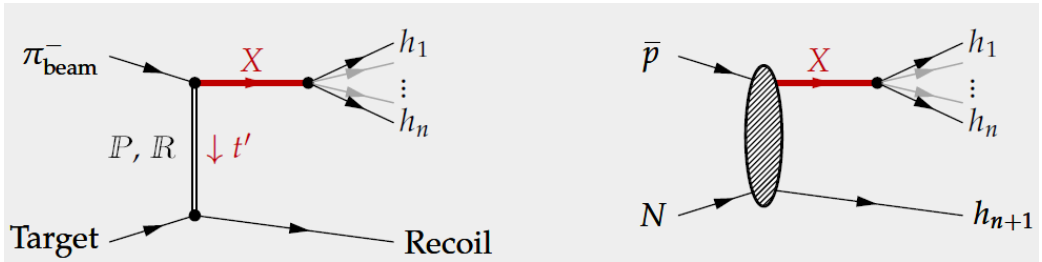
- BESIII发现首个同位旋为0的 1^{-+}粒子$\eta_1(1855)$，标志着一种新类型的奇特强子态
  - **“QCD 50年综述”评价其发现是奇特强子态研究的一项突破**
  - **欧洲核物理长期战略规划将其作为强子谱学近期成果与亮点和未来研究计划**
  - 美国核物长期战略规划白皮书、美国粒子物理战略规划Snowmass2021强子谱学总结报告等引用
- $\eta_1(1855)$ 的发现开启了奇特强子态新的研究方向
  - **其性质亟待探索**：混杂态、分子态、四夸克
  - **建立1^{-+}奇特强子态多重态至关重要**

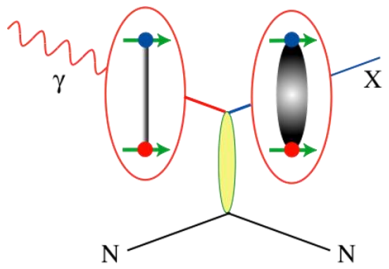
具有奇特量子数的强子态的寻找和研究

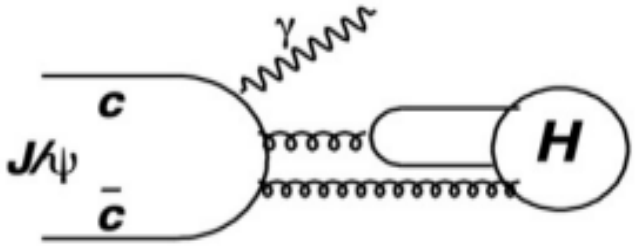
建立1^{-+}奇特强子态多重态至关重要



- π_1： 带电态已发现，中性π_1^0尚未直接观测
- $\eta_1^{(\prime)}$：额外的η_1' 尚待寻找
- K_1： 尚待寻找



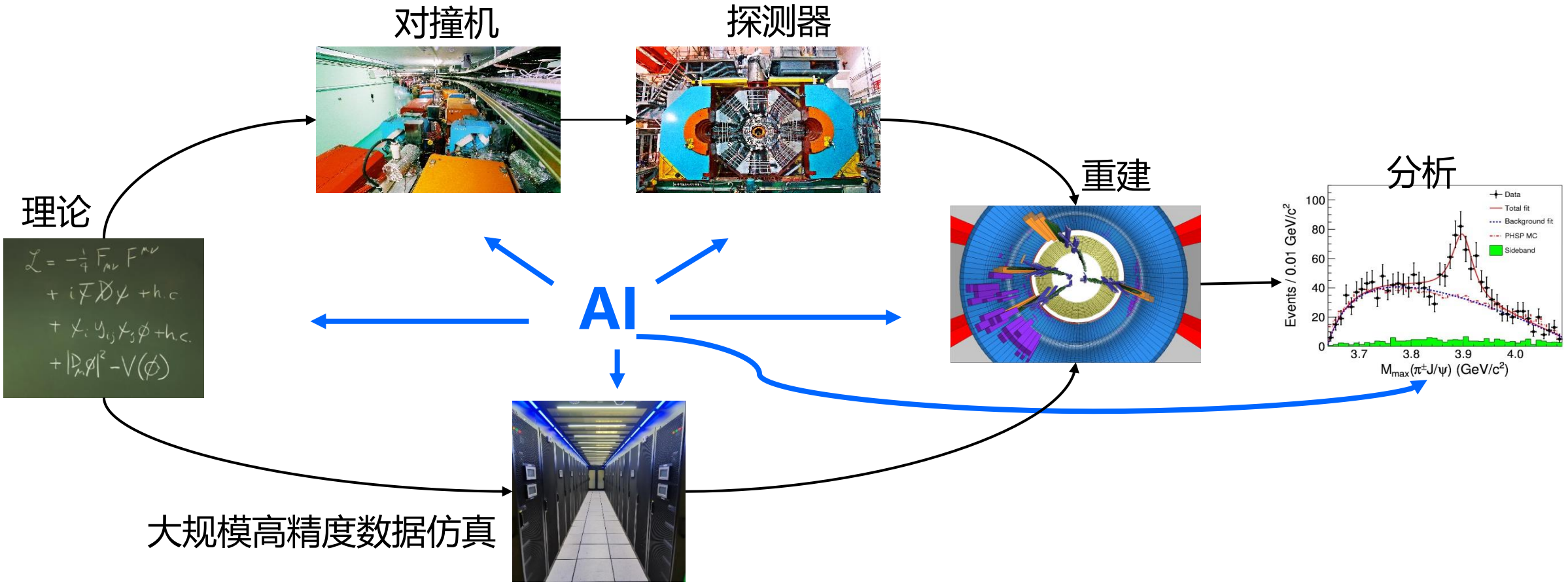




$$\Gamma(J/\psi \to \gamma H) \sim O(\alpha\alpha_s^3)$$

前沿科学与新兴技术交叉的机遇

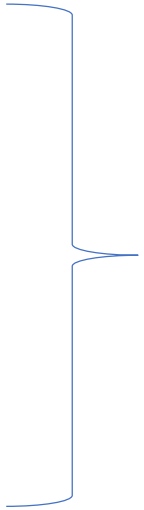
Big Science=Big Data



- 粒子物理大科学装置是拓展人类认知前沿的重要工具
- 如何高效解析海量数据以加速科学发现是粒子物理的重大挑战

- 在高精度前沿利用多种探测手段全面理解强子复杂的性质成为研究可见物质的核心

- 新一代实验装置
- 先进分析技术
- 紧密的理论实验合作



重大科学突破

谢谢