

Belle 实验发现新粲重子存在的迹象*

李洋 李郁博 沈成平[†]

(复旦大学现代物理研究所 上海 200433)

2022-10-27收到

[†] email: shencp@fudan.edu.cn

DOI: 10.7693/wl20230404

Evidence of a new excited charmed baryon at Belle

LI Yang LI Yu-Bo SHEN Cheng-Ping[†]

(Institute of Modern Physics, Fudan University, Shanghai 200433, China)

摘要 粲重子是含有粲夸克的一类重子。粲重子存在很丰富的激发态，粲重子谱的研究对理解轻夸克在含重夸克系统中的动力学行为，以及检验重夸克对称性和轻夸克手征对称性具有重要意义。 Λ_c^+ 是质量最轻的粲重子，它是由一个粲夸克、一个上夸克和一个下夸克构成的同位旋单态。最近，日本的 Belle 实验利用在 $Y(4S)$ 中心质量采集的 772×10^6 对 $B\bar{B}$ 介子样本，对 $\bar{B}^0 \rightarrow \Sigma_c(2455)^{0,++}\pi^+\bar{p}$ 衰变过程进行了研究，并在 $\Sigma_c(2455)^{0,++}\pi^+$ 的不变质量谱上发现了一个新的共振结构。在考虑系统误差后，该共振结构最保守的信号显著性为 4.2 倍标准偏差。这意味着，该结构的形成源于统计涨落和各种系统误差的概率不足 0.002%。Belle 实验测得这个新结构的质量为 $(2913.8 \pm 5.6 \pm 3.8) \text{ MeV}/c^2$ ，宽度为 $(51.8 \pm 20.0 \pm 18.8) \text{ MeV}$ 。虽然这个新结构的性质目前还不完全清楚，但它很符合新的 Λ_c 激发态的性质，暂时被命名为 $\Lambda_c(2910)^+$ 。

关键词 Belle 实验，粲重子， Λ_c 激发态， Σ_c 激发态， $\Lambda_c(2910)^+$

Abstract A charmed baryon is a kind of baryon containing at least one charm quark. There exist abundant excited charmed baryons, and the study of charmed baryon spectroscopy is very important for understanding the dynamics of light quarks in the environment of a heavy quark, and for testing heavy-quark symmetry and the chiral symmetry of light quarks. The Λ_c^+ baryon is the lightest charmed baryon, which is an isospin singlet composed of one charm quark, one up quark and one down quark. Very recently, using a data sample of 770 million $B\bar{B}$ events collected at $Y(4S)$ resonance in the Belle experiment, Japan, studies were performed on the decay $\bar{B}^0 \rightarrow \Sigma_c(2455)^{0,++}\pi^+\bar{p}$. A new structure has been found in the invariant mass distribution of $\Sigma_c(2455)^{0,++}\pi^+$ with a significance of 4.2σ including systematic uncertainty, which means that the probability of the emergence of this structure due to statistical fluctuation and various uncertainties is less than 0.002%. Its mass and width are measured to be $(2913.8 \pm 5.6 \pm 3.8) \text{ MeV}/c^2$ and $(51.8 \pm 20.0 \pm 18.8) \text{ MeV}$, respectively. No known excited charmed baryon can match the observed new structure. It is probably a new excited Λ_c baryon, tentatively named as $\Lambda_c(2910)^+$.

Keywords Belle experiment, charmed baryon, excited Λ_c baryon, excited Σ_c baryon, $\Lambda_c(2910)^+$

* 国家自然科学基金(批准号: 11975076, 12161141008, 12135005)资助项目

1 夸克模型和粲重子的研究现状

粒子物理标准模型认为, 夸克和轻子是构成物质世界的基本粒子。自然界中存在6种夸克, 分别是上夸克(u)、下夸克(d)、奇异夸克(s)、粲夸克(c)、底夸克(b)和顶夸克(t)。前三种夸克(u, d, s)的质量比质子轻, 统称为轻夸克; 后三种夸克(c, b, t)的质量比质子重, 统称为重夸克。夸克是自旋为1/2的费米子, 带有分数电荷。此外, 每一种夸克还存在相应的反夸克。正反夸克之间具有完全相同的质量、平均寿命及自旋, 但两者的电荷符号相反。在夸克模型中, 由三个夸克或三个反夸克构成的粒子称为重子, 例如质子和中子; 由一个夸克和一个反夸克构成的粒子称为介子, 例如 π 介子、K介子等。将夸克或反夸克束缚在一起构成重子或介子的力很强, 作用范围很小(约1 fm, 原子核尺寸大小), 称为强相互作用力。因此, 重子和介子统称为强子。

夸克模型从提出到成为一个成功的理论并不是一帆风顺的。20世纪60年代初, 实验上已经发现了200多个强子, 如何对这些粒子进行分类以及它们是否由更基本的粒子组成是物理学家面临的一个重要问题。1961年, M. Gell-Mann和Y. Neuman提出八重法理论, 该理论认为介子和重子属于 $SU(3)$ 群的八维表示或由八维表示直乘分解所得到的表示。八重法理论预言了当时实验上尚未发现的 Ω^- 重子的存在。1964年, 布鲁克海文实验室发现了 Ω^- 重子^[1], 直接验证了八重法理论的正确性。同年, 受 $SU(3)$ 超多重态理论的启发, M. Gell-Mann和G. Zweig分别独立地提出: 所有强子都是由更基本的组分构成^[2]。其中, M. Gell-Mann使用夸克来构造介子和重子。然而, 夸克模型随后面临着一个窘迫的事实: 实验上始终没有发现单个自由夸克的存在。此外, 夸克模型似乎与泡利不相容原理相矛盾。例如, Ω^- 重子是由三个s夸克组成, 这看起来是多个费米子占据了同一个状态。对于上述的两个问题, 虽然物理学家提出了夸克禁闭和“颜色”自由度^[3]的假设, 但当时

夸克模型并没有完全被大家所信服。1974年 J/ψ 粒子被发现^[4, 5]。夸克模型将其解释为一个新的夸克c和其反夸克 \bar{c} 构成的粒子, 这奠定了夸克模型成功的基础。此后, 1977年和1995年分别发现了b夸克^[6]和t夸克^[7]存在的证据, 从而完全验证了夸克模型预言的三代夸克的存在。

粲重子, 顾名思义, 就是含有粲夸克的重子。目前, 实验上已经发现了多个由一个粲夸克和两个轻夸克组成的单粲重子及其激发态^[8]。2017年, LHCb实验发现了由两个粲夸克和一个轻夸克组成的双粲重子^[9]。但是, 实验上至今尚未发现含有三个粲夸克的重子。单粲重子中的每一个轻夸克都属于 $SU(3)$ 味三重态。根据 $SU(3)$ 味对称性, 单粲重子可以分为波函数交换反对称的三重态($\Lambda_c^+, \Xi_c^0, \Xi_c^+$)和波函数交换对称的六重态($\Sigma_c^0, \Sigma_c^+, \Sigma_c^{++}, \Xi_c^{\prime 0}, \Xi_c^{\prime +}, \Omega_c^0$)。在夸克模型中, 通常把两个轻夸克看作一个双夸克系统, 该系统总的轨道角动量 L_l 包括两个轻夸克之间的轨道角动量 L_p 和双夸克系统与粲夸克之间的轨道角动量 L_λ 。在重夸克极限下, 粲夸克的自旋 S_c 以及双夸克系统的总角动量 $J_l = S_l + L_l$ 分别守恒, 这里 S_l 是双夸克系统的总自旋。因此, 粲重子的总角动量为 $J = S_c + J_l$ 。我们可以很方便地使用 S_l 、 L_l 和 J_l 归类所有可能的粲重子基态及其激发态^[10]。例如, P波粲重子可能是($L_p = 0, L_\lambda = 1$)的 λ 态或($L_p = 1, L_\lambda = 0$)的 ρ 态。粲重子谱为我们理解轻夸克在含重夸克系统中的动力学行为, 以及检验重夸克对称性和轻夸克手征对称性提供了一个理想的平台。

Λ_c^+ 是质量最轻的粲重子, 其夸克组分为udc, 属于同位旋 $I = 0$ 的单态。目前, 粒子数据表中列出了6种 Λ_c^+ 的激发态, 包括 $\Lambda_c(2595)^+$ 、 $\Lambda_c(2625)^+$ 、 $\Lambda_c(2765)^+$ 、 $\Lambda_c(2860)^+$ 、 $\Lambda_c(2880)^+$ 和 $\Lambda_c(2940)^+$ ^[8], 这里及下文中, 括号里的数字表示此共振态的近似质量(单位为 MeV/c^2)。在 Λ_c^+ 激发态家族中, 我们对质量最重的 $\Lambda_c(2940)^+$ 的性质仍有很多困惑。2007年, BaBar实验首次在 $D^0 p$ 末态中发现了 $\Lambda_c(2940)^+$ ^[11]。之后, Belle实验发现了 $\Lambda_c(2940)^+ \rightarrow \Sigma_c(2455)^{0++} \pi^+$ 衰变模式^[12]。2017年, LHCb实验在 $\Lambda_c^0 \rightarrow D^0 p \pi^-$ 衰变中进一步证实

了 $\Lambda_c(2940)^+$ 的存在^[13]。根据 LHCb 的测量, $\Lambda_c(2940)^+$ 的自旋(J)宇称(P)量子数可能是 $J^P = \frac{3}{2}^-$, 但也没有完全排除其他的可能性。根据夸克模型的预测, $\Lambda_c\left(\frac{3}{2}^-, 2P\right)$ 态的质量大约在 3000—3040 MeV/c^2 范围内, 而 $\Lambda_c\left(\frac{1}{2}^-, 2P\right)$ 态的质量比 $\Lambda_c\left(\frac{3}{2}^-, 2P\right)$ 态稍低, 但质量差不超过 25 MeV/c^2 ^[14-17]。如果认为 $\Lambda_c(2940)^+$ 是 $\Lambda_c\left(\frac{3}{2}^-, 2P\right)$ 态, 那么它的质量明显低于夸克模型的预期。因此, 实验上进一步确定 $\Lambda_c(2940)^+$ 的自旋宇称量子数以及寻找其他可能的 $\Lambda_c(2P)$ 态, 可以帮助我们理解 $\Lambda_c(2940)^+$ 质量偏低的原因。 Σ_c 是属于六重态粲重子家族中同位旋 $I = 1$ 的三重态, 包括 Σ_c^0 、 Σ_c^+ 和 Σ_c^{++} , 它们的夸克组分为 ddc 、 udc 和 uuc 。相比于 Λ_c 激发态, 实验上观测到的 Σ_c 激发态十分匮乏。粒子数据表中只列出了 $\Sigma_c(2455)$ 、 $\Sigma_c(2520)$ 和 $\Sigma_c(2880)$ 三种 Σ_c 重子^[8]。 Λ_c 和 Σ_c 的激发态都可以通过强相互作用衰变到 $\Lambda_c \pi \pi$, 这是寻找 Λ_c 和 Σ_c 激发态的黄金衰变道之一。实验上可以通过 B 介子衰变或 e^+e^- 直接对撞等过程, 在 $\Lambda_c \pi \pi$ 系统中寻找 Λ_c 和 Σ_c 的激发态, 这对理解 Λ_c 和 Σ_c 重子谱是非常重要的。

2 Belle 实验简介

以上物理实验中使用的 高能加速器和粒子探测器是粒子物理实验研究的主要手段。加速器实验主要分为 高能前沿和高精度前沿两个方向。欧洲核子中心 (CERN) 的大型强子对撞机 LHC 实验是 高能前沿的主要代表。Belle 实验是 高精度实验之一, 位

于日本高能加速器研究机构 (KEK), 其核心装置包括 KEKB 正负电子对撞机和 Belle 探测器。Belle 实验的主要物理目标是研究 B 介子的混合、衰变和电荷—宇称 (CP) 破坏的机制等^[18]。KEKB 正负电子对撞机大部分时间运行在 $\Upsilon(4S)$ 中心质量附近。 $\Upsilon(4S)$ 衰变到 $B\bar{B}$ 的分支比超过 96%^[8]。正负电子对撞产生的大部分粒子的寿命都极其短暂, 几乎在产生的瞬间就已经衰变, 只有少数几种相对比较稳定, 寿命长到足以抵达探测器并与探测器物质产生相互作用的粒子可以被直接探测到, 主要包括: 电子、缪子、 π 介子、K 介子、质子和光子等粒子。Belle 探测器安装在正负电子对撞点处, 用来探测对撞产生的末态粒子。Belle 实验从 1999 年至 2010 年在 $\Upsilon(4S)$ 中心质量采集了 711 fb^{-1} 的数据样本, 约 772×10^6 对 $B\bar{B}$ 介子事例。B 介子的主要衰变模式在夸克层次上是 $b \rightarrow c$, 其中 c 夸克强子化为粲重子的比率大约在 10^{-2} 量级^[8]。因此, Belle 实验积累的大量 $B\bar{B}$ 介子对数据样本为 粲重子谱的实验研究提供了良好的契机。

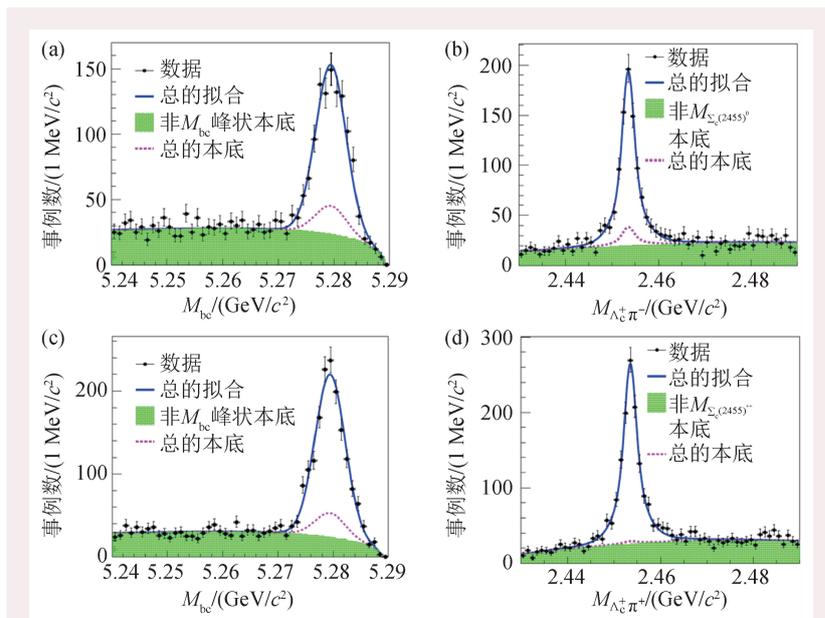


图1 对 $\bar{B}^0 \rightarrow \Sigma_c(2455)^0 \pi^+ \pi^-$ 候选事例二维拟合后, 其在 (a) M_{bc} 和 (b) $M_{\Lambda_c \pi^-}$ 变量维度的投影分布; 对 $\bar{B}^0 \rightarrow \Sigma_c(2455)^{++} \pi^- \pi^-$ 候选事例二维拟合后, 其在 (c) M_{bc} 和 (d) $M_{\Lambda_c \pi^-}$ 变量维度的投影分布。带有误差棒的点表示实验数据, 蓝色实线为最终拟合结果, 绿色直方图为拟合得到的非 M_{bc} 或非 $M_{\Sigma_c(2455)}$ 的组合本底, 粉色虚线为拟合得到的所有的本底贡献^[23]

3 发现新粲重子 $\Lambda_c(2910)^+$ 存在的迹象

1997年,康奈尔大学基本粒子物理实验室的CLEO实验首次发现了B介子衰变末态中含一个粲重子的衰变模式 $\bar{B}^0 \rightarrow \Lambda_c^+ \bar{p} \pi^+ \pi^-$ ^[19]。之后,CLEO实验利用更大统计量的数据样本发现该衰变模式还存在中间共振过程 $\bar{B}^0 \rightarrow \Sigma_c(2455)^{0,+} \bar{p} \pi^\pm \rightarrow \Lambda_c^+ \bar{p} \pi^+ \pi^-$ ^[20]。Belle^[21]和BaBar^[22]实验也曾分别利用 357 fb^{-1} 和 426 fb^{-1} 的数据样本对 $\bar{B}^0 \rightarrow \Lambda_c^+ \bar{p} \pi^+ \pi^-$ 过程进行了研究并寻找可能的中间共振态。两个实验都发现 $\Sigma_c(2455)^{0,+} \pi^\pm$ 和 $\bar{p} \pi^\pm$ 的质量谱与三体相空间分布是不一致的,这表明可能存在中间共振态。特别是Belle实验指出在 $\Sigma_c(2455)^0 \pi^+$ 不变质量谱的阈值附近可能存在新的粲重子激发态或者多个激发态重叠的结构^[21],但由于数据量的限制没有做进一步的研究。目前, $\bar{B}^0 \rightarrow \Sigma_c(2455)^0 \pi^+ \bar{p}$ 和 $\bar{B}^0 \rightarrow \Sigma_c(2455)^+ \pi^+ \bar{p}$ 衰变分支比的世界平均值分别为 $(1.08 \pm 0.16) \times 10^{-4}$ 和 $(1.88 \pm 0.24) \times 10^{-4}$ ^[8]。对 $\Lambda_c(2P)$ 态的寻找, $\bar{B}^0 \rightarrow \Sigma_c(2455)^{0,+} \pi^\pm \bar{p} \rightarrow \Lambda_c^+ \pi^\mp \pi^\pm \bar{p}$ 衰变过程具有分支比较高、本底干净,且中间共振态自旋宇称量子数有所限制等优势。

最近,Belle实验利用其采集的全部 $B\bar{B}$ 介子对数据样本,重新对 $\bar{B}^0 \rightarrow \Sigma_c(2455)^{0,+} \pi^\pm \bar{p}$ 衰变过

程进行了研究^[23]。实验通过 $\Lambda_c^+ \pi^\mp$ 末态重建 $\Sigma_c(2455)^{0,+}$; Λ_c^+ 则通过 $pK^- \pi^+$ 、 pK_s^0 和 $\Lambda \pi^+$ 三个衰变道进行重建。经过事例选择条件后,为了提取 $\bar{B}^0 \rightarrow \Sigma_c(2455)^{0,+} \bar{p} \pi^\pm$ 过程的信号事例数,研究人员对候选 \bar{B}^0 介子事例的束流约束质量谱 M_{bc} 和末态 $\Lambda_c^+ \pi^\pm$ 系统不变质量谱 $M_{\Lambda_c^+ \pi^\pm}$ 进行了二维的最大似然拟合,相应的质量谱及拟合的结果如图1所示。拟合得到的 $\bar{B}^0 \rightarrow \Sigma_c(2455)^0 \pi^+ \bar{p}$ 和 $\bar{B}^0 \rightarrow \Sigma_c(2455)^+ \pi^+ \bar{p}$ 的信号事例数分别为 767 ± 44 和 1213 ± 73 ,即图1中显示的总的拟合结果和总的本底贡献之差,对应的衰变分支比分别为 $\mathcal{B} = (1.09 \pm 0.06 \pm 0.07) \times 10^{-4}$ 和 $\mathcal{B} = (1.84 \pm 0.11 \pm 0.12) \times 10^{-4}$,这里第二项和第三项分别对应统计误差和系统误差。测量得到的分支比与此前世界平均值在误差范围内保持一致,且精度有了很大的提高。

在进一步要求 M_{bc} 和 $M_{\Lambda_c^+ \pi^\pm}$ 的信号区间后,Belle实验在 $\Sigma_c(2455)^0 \pi^+$ 和 $\Sigma_c(2455)^+ \pi^+$ 的不变质量谱上去寻找可能的共振结构。图2显示了总的 $\Sigma_c(2455)\pi$ 不变质量谱,在 $2.91 \text{ GeV}/c^2$ 附近可以看到一个明显的共振结构。这里, $\Sigma_c(2455)\pi$ 是 $\Sigma_c(2455)^0 \pi^+$ 和 $\Sigma_c(2455)^+ \pi^+$ 加和的简写。目前实验上已知的 Λ_c 或 Σ_c 激发态都不能很好地描述该共振结构。因此,该共振结构可能是一个新的 Λ_c 或 Σ_c 的激发态。

为了确定这个共振结构的质量和宽度,Belle实验对 $\Sigma_c(2455)\pi$ 质量谱进行了最大似然拟合,即用非相对论布雷特-维格纳函数来描述该共振结构,本底形状采用二阶切比雪夫多项式,拟合的结果如图2所示。拟合得到该共振结构的质量为 $(2913.8 \pm 5.6 \pm 3.8) \text{ MeV}/c^2$,宽度为 $(51.8 \pm 20.0 \pm 18.8) \text{ MeV}$,统计显著性为6.1倍标准偏差。考虑各种可能的系统误差后,该共振结构最保守的信号显著性为4.2倍标准偏差。这意味着,该结构由于统计涨落和各种系统误差而形成的概率不足0.002%。

目前已知的粲重子激发态中与该共振结构质量最接近的是 $\Lambda_c(2940)^+$,其质量为

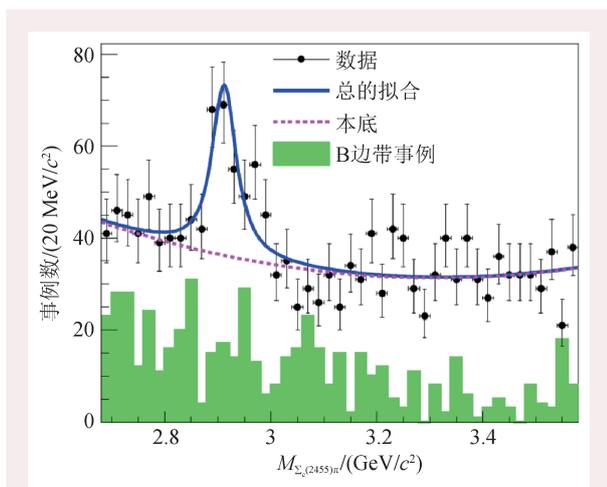


图2 $\bar{B}^0 \rightarrow \Sigma_c(2455)^{0,+} \bar{p} \pi^\pm$ 过程中 $\Sigma_c(2455)\pi$ 的不变质量谱。带有误差棒的点表示实验数据,蓝色实线是最终的拟合曲线,粉色曲线是拟合的本底贡献^[23]

($2939.6_{-1.5}^{+1.3}$) MeV/ c^2 。该共振结构与 $\Lambda_c(2940)^+$ 的质量差为 25.8 MeV/ c^2 ，对应约 3.8 倍标准偏差。由于该共振结构与 $\Lambda_c(2940)^+$ 之间的质量差与夸克模型中预测的 $\Lambda_c\left(\frac{1^-}{2}, 2P\right)$ 和 $\Lambda_c\left(\frac{3^-}{2}, 2P\right)$ 态之间的质量差一致，该结构很可能是 $\Lambda_c\left(\frac{1^-}{2}, 2P\right)$ 态，被命名为 $\Lambda_c(2910)^+$ 。同时，Belle 实验也测量了 $\Lambda_c(2910)^+$ 产生的连乘分支比 $\mathcal{B}(\bar{B}^0 \rightarrow \Lambda_c(2910)^+ \bar{p}) \times \mathcal{B}(\Lambda_c(2910)^+ \rightarrow \Sigma_c(2455)^0 \pi^+) = (9.5 \pm 3.6 \pm 1.6) \times 10^{-6}$ 和 $\mathcal{B}(\bar{B}^0 \rightarrow \Lambda_c(2910)^+ \bar{p}) \times \mathcal{B}(\Lambda_c(2910)^+ \rightarrow \Sigma_c(2455)^{++} \pi^-) = (1.24 \pm 0.35 \pm 0.10) \times 10^{-5}$ 。

4 可能的理论解释和未来展望

此次在 $\Sigma_c(2455)\pi$ 的质量谱上发现的新共振结构 $\Lambda_c(2910)^+$ ，很可能是 $\Lambda_c\left(\frac{1^-}{2}, 2P\right)$ 态，但也不排除是 Σ_c 激发态，或者多个 Λ_c 激发态重叠结构的可能性。在 $\Lambda_c(2910)^+$ 发现之后，文献[24]通过使用量子色动力学求和规则进行研究，支持它是 $\Lambda_c\left(\frac{1^-}{2}, 2P\right)$ 态。如果 $\Lambda(2910)^+$ 和 $\Lambda(2940)^+$ 分别是

$\Lambda_c\left(\frac{1^-}{2}, 2P\right)$ 和 $\Lambda_c\left(\frac{3^-}{2}, 2P\right)$ 态，那么它们的质量为什么低于夸克模型的预期仍需要进一步的理论研究。未来在实验上还需要对 $\Lambda_c(2910)^+$ 进行如下的研究：(1)寻找 $\Lambda_c(2910)^+$ 可能的同位旋伴随态，从而确定它是 Λ_c 激发态还是 Σ_c 激发态；(2)测量 $\Lambda_c(2910)^+$ 的自旋宇称量子数；(3)寻找 $\Lambda_c(2910)^+$ 其他的产生模式，如在 $e^+e^- \rightarrow c\bar{c}$ 连续过程中寻找。进一步理解 $\Lambda_c(2910)^+$ 和 $\Lambda_c(2940)^+$ 的性质需要实验学家和理论学家的共同努力。

日本高能加速器研究机构(KEK)已经将 Belle 实验升级为 Belle II 实验，并在 2018 年 4 月开始采集数据，目前已经在 $Y(4S)$ 中心质量附近采集了约 424 fb^{-1} 的实验数据。Belle II 实验在 Belle 实验成功经验的基础上，采用了新的加速器技术和探测器技术。根据设计参数，采用了纳米尺寸束团技术的 Belle II 实验，峰值亮度能够达到约 $7 \times 10^{35} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ ，比 Belle 实验提高了 30 多倍，是世界上对撞亮度最高的实验^[25]。Belle II 实验预计到 2035 年可以收集到总计 50 倍于 Belle 实验的数据量，总的积分亮度高达 50 ab^{-1} 。届时，利用 Belle II 实验采集的海量数据样本，对粲重子谱的研究将会进入一个新的时代。

参考文献

- [1] Barnes V E *et al.* Phys. Rev. Lett., 1964, 12: 204
- [2] Gell-Mann M. Phys. Lett., 1964, 8: 214; Phys. Rev. Lett., 1964, 12: 155; Zweig G. CERN Report 8419/TH.401, 1964; CERN Report 8419/TH.412; Lichtenberg D B, Rosen S P. Developments in the Quark Theory of Hadrons. Nonantum, MA: Hadronic Press, 1980
- [3] Greenberg O W. Phys. Rev. Lett., 1964, 13: 598
- [4] Aubert J J *et al.* Phys. Rev. Lett., 1974, 33: 1404
- [5] Augustin J E *et al.* Phys. Rev. Lett., 1974, 33: 1406
- [6] Herb S W *et al.* Phys. Rev. Lett., 1977, 39: 252
- [7] Abe F *et al.* Phys. Rev. Lett., 1995, 74: 2626
- [8] Particle Data Group, Zyla P A *et al.* Prog. Theor. Exp. Phys., 2020, 2020: 083C01
- [9] Aaij R *et al.* Phys. Rev. Lett., 2017, 119: 112001
- [10] Cheng H Y. Chin. J. Phys., 2022, 78: 324
- [11] Aubert B *et al.* Phys. Rev. Lett., 2007, 98: 012001
- [12] Mizuk R *et al.* Phys. Rev. Lett., 2007, 98: 262001
- [13] Aaij R *et al.* J. High Energy Phys., 2017, 1705: 030
- [14] Ebert D, Faustov R N, Galkin V O. Phys. Rev. D, 2011, 84: 014025
- [15] Chen B, Wei K W, Liu X *et al.* Eur. Phys. J. C, 2017, 77: 154
- [16] Capstick S, Isgur N. Phys. Rev. D, 1986, 34: 280
- [17] Chen B, Liu X, Zhang A. Phys. Rev. D, 2015, 92: 034005
- [18] Brodzicka J *et al.* Prog. Theor. Exp. Phys., 2012, 2012: 04D001
- [19] Fu X *et al.* Phys. Rev. Lett., 1997, 79: 3125
- [20] Dytman S A *et al.* Phys. Rev. D, 2002, 66: 091101
- [21] Park K S *et al.* Phys. Rev. D, 2007, 75: 011101; Kim H O *et al.* Phys. Lett. B, 2008, 669: 287
- [22] Lees J P *et al.* Phys. Rev. D, 2013, 87: 092004
- [23] Li Y B *et al.* Phys. Rev. Lett., 2023, 130: 031901
- [24] Azizi K, Sarac Y, Sundu H. Eur. Phys. J. C, 2022, 82: 920
- [25] Kou E *et al.* Prog. Theor. Exp. Phys., 2019, 2019: 123C01

以经典124的模拟性能... ... 提供双相锁定

推介SR2124 — 终极模拟锁相放大器

- 具124性能的双相锁定
- 低噪声，全模拟设计
- 带直流偏置的正弦波输出源
- 0.2 Hz 至 200 kHz 范围
- 2.8 nV/√Hz 输入噪声

我们听到了你的声音。 多年来研究人员一直恳求我们开发一个类似1960年代PAR124的全模拟仪器。于是我们推出了SR124单相模拟锁定。然后你们又问，“双相版如何？”现在我们很高兴地宣布SR2124双相模拟锁定的到来。

在低温传输测量中，双相至关重要。在这种测量中，相移可能意味着欧姆接触已开始出现问题。而且我们的CPU-停止架构可确保无任何导致样品自热的数字噪声。为便于差分电导测量，我们在正弦输出中添加了直流偏置。我们的低噪声输入确保您快速获得答案。

感谢您的反馈。



请扫描二维码了解更多产品详情

SR2124 双相模拟锁定 ... \$8745



Stanford Research Systems

1290-D Reamwood Ave. Sunnyvale, CA 94089 · www.thinkSRS.com
Phone (408) 744-9040 · Fax (408) 744-9049 · info@thinkSRS.com

先锋科技股份有限公司
电话: 86-10-6263-4840
Email: sales@teo.com.cn

欧陆科技有限公司
电话: 86-10-6800-8213/16/17
Email: euro-tech.bj@euro-tech.com

北京东方科泰科技发展有限公司
电话: 86-10-6497-1708
Email: sales@bost-ltd.com