

Belle 实验发现新超子和新粲重子*

高旭阳 沈成平[†]

(复旦大学 现代物理研究所 上海 200433)

2019-10-21 收到

[†] email: shencp@fudan.edu.cn

DOI: 10.7693/wl20200413

Observations of the new hyperon and charmed baryon at Belle

GAO Xu-Yang SHEN Cheng-Ping[†]

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

摘要 过去一年里, 运行在日本高能加速器研究机构的 Belle 实验在重子研究, 尤其是在超子和粲重子研究上取得了一系列重要实验进展, 包括发现了两个超子 $\Xi(1620)$ 和 $\Omega(2012)$ 、一个粲重子 $\Xi_c(2930)$ 等新的重子, 并首次测量了粲重子 Ξ_c 衰变的绝对分支比等, 为完善重子谱和深入理解强相互作用性质提供了关键的实验数据。

关键词 Belle 实验, $\Xi(1620)$, $\Omega(2012)$, $\Xi_c(2930)$, Ξ_c , 分支比

Abstract Belle experiment reported a series of progresses on the hyperons and charmed baryons last year, which include the observation of hyperons $\Xi(1620)$ and $\Omega(2012)$, the observation of charmed baryon $\Xi_c(2930)$, and the first measurement of Ξ_c absolute branching fractions.

Keywords Belle experiment, $\Xi(1620)$, $\Omega(2012)$, $\Xi_c(2930)$, Ξ_c , branching fraction

粒子物理学是研究微观世界物质本质的最前沿基础学科, 致力于研究比原子核更深层次物质的结构、性质和相互作用规律。粒子物理学在过去数十年间取得了相当多的突破性成果, 大型加速器与探测器技术的进步和粒子物理标准模型理论的建立, 极大地加深了人们对微观尺度下物质结构和相互作用的认识。

标准模型中, 夸克和轻子是组成物质的基本粒子, 其中夸克分为三代, 每代两种: 上夸克和下夸克、粲夸克和奇异夸克、顶夸克和底夸克。一个夸克和一个反夸克组成介子, 三个夸克组成重子, 介子和重子统称为强子。原子核中的质子与中子, 就是由三个第一代轻夸克组成的重子。

由一个或两个奇异夸克和轻夸克或由三个奇异夸克组成的重子也叫超子, 含有粲夸克的重子称为粲重子。

到 20 世纪 60 年代初, 人们已经发现了超过 200 个强子, 分类的困难引发了人们对强子结构的思考并尝试寻找更深层次的“基本粒子”和相互作用。1961 年, Y. Neuman 和盖尔曼提出八正法理论, 将介子和重子解释为 SU(3) 群的八维表示或由八维表示直乘分解所得到的表示。由于当时实验上已发现了九个自旋(J)宇称(P)量子数 $J^P = \frac{3}{2}^+$ 的重子, 都可以归入一个十维表示, 并成功预言了第十个成员, 当时尚未发现的由三个奇异夸克组成的 Ω 重子, 理论计算的质量为 1676 MeV, 与三年后布鲁克海文实验室的实验结果 1686 MeV 相差无几^[1](目前最新测量结果为

* 国家自然科学基金(批准号: 11575017, 11761141009, 11975076)、中国科学院粒子物理前沿卓越创新中心(CCEPP)资助项目

1672.45 MeV^[2]。

1964年,盖尔曼和G. Zweig分别独立提出将夸克作为下一层次“基本粒子”^[3]。随后O. W. Greenberg提出了夸克带有“颜色”自由度的设想^[4],盖尔曼和H. Fritzsch等人提出夸克通过交换“胶子”而构成色单态的强子束缚态^[5]。1973年,“夸克”和“颜色”的概念得到深度非弹性散射实验的证实,描述强相互作用的量子色动力学诞生^[6],成为目前为止粒子物理领域最精确理论——标准模型理论——中的重要组成部分(另一部分是描述电磁与弱相互作用的电弱统一理论)。

量子色动力学较为完美地描述了强相互作用和强子的构成,但仍有一些问题尚未盖棺论定。首先,理论模型不仅计算困难,而且很多输入参数依赖于实验结果,受到了实验水平和精度的限制;其次,虽然一些理论做出了很好的预言,但由于实验在客观上不具备相应的条件而无法得到验证,如一些理论预言的产额稀少的重子激发态还没有找到,还有一些重子虽被发现已久,但受限于实验数据统计量始终无法对其性质做出进一步的测量等;再次,实验上也经常会发现一些当前理论模型预言之外的新粒子,它们被称为奇特态粒子,这对理论模型的完善和发展提出了新的挑战。因此,如果实验上取得了新的进展,无论是发现了新的粒子,还是发现了已有粒子新的行为或性质,甚至是对一些粒子参数做出了更高阶精确的测量,都会对理论产生重要的影响。可能会增加现有理论的可信度,可能会催生出新的理论模型,也可能会排除掉已有的一些理论模型,亦可能会影响某些重要理论的关键参数。

目前的高能物理实验主要使用大型的加速器—对撞机—探测器系统,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,因此只有少数几种寿命相对比较稳定到足以抵达探测器并与探测器产生相互作用的粒子可以被探测到,比如质子(p)、电子(e)、K介子、 π 介子、光子(γ)等。在实验分析中,可以根据收集到的这些末态粒子能动量信息,反向逐级地“重建”出母粒子的能动量信息,从而找到中间粒子的共振态信号,本文介绍的新粒子都是通过这种

手段发现的。

Belle实验是目前几个主流的高能物理实验之一,属于高精度前沿。Belle实验上正负电子对撞机的运行能量在B介子对产生阈值附近,可以产生大量的B介子对事例,被称为“B介子工厂”,曾为B介子的电荷—空间反演(CP)对称性破缺等热点物理课题提供了重要的实验结果。除此之外,Belle实验的大数据样本也为其他研究创造了条件,重子能谱及衰变的研究即是其一。

尽管夸克模型在重子基态的分类上取得了成功,但是一些理论预言的激发态仍未在实验中对号入座。寻找这些激发态的候选粒子,将为相关理论计算提供重要的支撑信息。基于此,最近一年,Belle实验发布了一系列重要的超子和粲重子实验结果,包括观测到了 $\Xi(1620)$ 、 $\Xi(1690)$ 、 $\Omega(2012)$ 和 $\Xi_c(2930)$ 等新的共振态,首次测量了 Ξ_c 衰变的绝对分支比等。文章将对这些实验结果逐一回顾。

1 Belle实验发现新超子信号

首先,Belle实验报道了对 Ξ 超子激发态的寻找结果。 Ξ 是含有一个轻夸克和两个奇异夸克的重子,虽然被发现已久,但实验上对于 Ξ 激发态的寻找却进展缓慢。尽管目前已经发现了将近十个可能为 Ξ 激发态的候选粒子,但只有很少一部分的质量宽度与理论预言相符合,且大部分粒子的自旋宇称量子数还没有最终确定^[2]。其中,理论预言的自旋宇称 $J^P = \frac{1}{2}^-$ 的激发态就尚未找到,目前比较可能成为这一激发态的候选粒子主要有 $\Xi(1620)$ 和 $\Xi(1690)$ 。20世纪70年代,实验上首次发现了 $\Xi(1620) \rightarrow \Xi\pi$ 的迹象,但受限于统计量而无法证实^[7]。

2019年,Belle合作组利用收集到的超过 $980 fb^{-1}$ 的大实验数据样本研究 $\Xi_c^+ \rightarrow \Xi \pi^+ \pi^+$ 的衰变过程来寻找 Ξ 激发态^[8],这里 Ξ_c 是由一个粲夸克和两个轻夸克构成的粲重子。经过信号事例选择,在图1中 $\Xi\pi$ 的质量谱上可以清楚地看到3个共振态信号的峰,分别对应 $\Xi(1530)$ 、 $\Xi(1620)$ 和 $\Xi(1690)$ 。

实验测得 $\Xi(1620)$ 的质量为 $(1610.4 \pm 6.0_{-4.2}^{+6.1})$ MeV, 宽度为 $(59.9 \pm 4.8_{-7.1}^{+2.8})$ MeV, 第一项误差为统计误差, 第二项误差为系统误差(下同), 信号显著性为 25 倍标准偏差, 可以确认为“发现”(统计显著性超过 5 倍标准偏差, 意味着信号来自于本底噪声的误判概率小于千万分之六, 因此粒子物理实验上将其作为“发现”的标准)。而 $\Xi(1690)$ 的信号显著性只有 4.0 倍标准偏差, 需后续实验进一步确认。值得注意的是, 实验测得的 $\Xi(1620)$ 和 $\Xi(1690)$ 的质量与夸克模型等理论计算结果存在着差异^[9], 因此除了可能是常规的 Ξ 激发态, $\Xi(1620)$ 和 $\Xi(1690)$ 也可能是奇特态的候选粒子。其中, $\Xi(1620)$ 发现后, 有理论将其解释为 $\Lambda\bar{K}$ 或 $\Xi\bar{K}$ 的分子态^[10], 也有理论将其视作 $\Lambda\bar{K}$ 与 $\Xi\bar{K}$ 的束缚态并给出了此种假设下 $\Xi(1620) \rightarrow \Xi\pi$ 衰变宽度的预测^[11]。目前由于统计量的限制, $\Xi(1620)$ 和 $\Xi(1690)$ 的自旋宇称量子数还没有确定, 将来利用更大统计量的数据样本, 精确地测量它们的质量、宽度、到 $\Xi\pi$ 末态的衰变率以及确定自旋宇称量子数将有助于我们更好地理解它们的自然属性。

其次, Belle 实验在寻找由 3 个奇异夸克组成的超子 Ω 的激发态方面也取得了重要进展, 自从八正法预言的 Ω 被发现后, 实验上一直没有停止对其激发态的寻找, 但目前为止只发现了 3 个 Ω 的激发态, $\Omega(2250)$ 、 $\Omega(2380)$ 和 $\Omega(2470)$ ^[2]。考虑到其他超子基态与第一激发态之间的质量差值普遍在 300 MeV 左右, 那么在 Ω 与 $\Omega(2250)$ 之间应该至少还存在一个 Ω 的激发态, 夸克模型等理论模型预言了其质量很可能在 2000 MeV 左右^[12]。最近, Belle 实验在底夸克偶素 $Y(1S, 2S, 3S)$ 衰变末态 $\Xi^0 K^-$ 和 $\Xi\bar{K}^0$ 的不变质量分布上寻找 Ω 的激发态^[13], 经过信号事例选择, 最终在 ΞK 不变质量分布上 2012 MeV 附近发现了共振态信号(图 2)。计算得到新粒子质量为 $(2012.4 \pm 0.7 \pm 0.6)$ MeV, 宽度为 $(6.4_{-2.9}^{+2.5} \pm 1.6)$ MeV, 信号显著性超过 5 倍标准偏差, 这一共振态信号的质量比基态 Ω 高出约 340 MeV, 很有可能是 Ω 的激发态, 命名为 $\Omega(2012)$ 。根据 $\Omega(2012)$ 质量和衰变模式, 其量

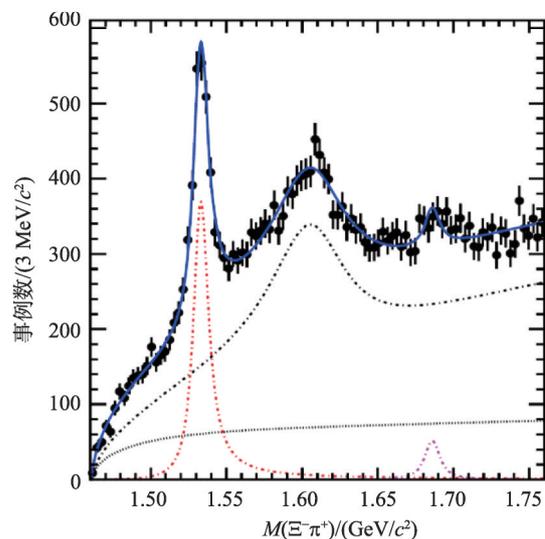


图 1 $\Xi_c^+ \rightarrow \Xi \pi^+ \pi^+$ 过程中, Ξ 与低动量 π^+ 的不变质量分布。点加误差棒表示实验数据, 红色、灰色、粉色和黑色虚线分别表示拟合过程中 $\Xi(1530)$ 、 $\Xi(1620)$ 与相空间、 $\Xi(1690)$ 、非共振态本底的贡献, 蓝色实线为包含各贡献的最终拟合结果

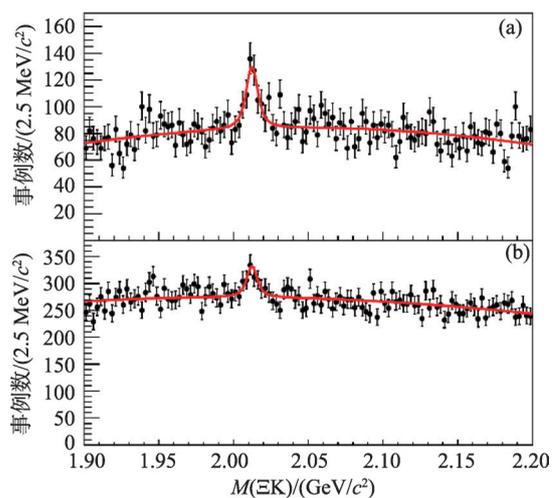


图 2 (a) $\Xi^0 K^-$ 和 (b) $\Xi\bar{K}^0$ 的不变质量分布, 可以清晰地看到在 2.0 GeV 附近的共振态信号。其中点加误差棒表示经过事例选择后的实验数据, 红色实线为包括本底和共振态信号的拟合结果

子数更加倾向于 $J^P = \frac{3}{2}^-$ ^[14]。但同时也有一些理论将 $\Omega(2012)$ 解释为 $K\Xi(1530)$ 的强子分子态, 并预言了这种情况下 $\Omega(2012) \rightarrow K\Xi(1530)$ 的分支比至少会与 $\Omega(2012) \rightarrow K\Xi$ 过程相当^[15]。Belle 合作组因此尝试了在 $K\Xi(1530)$ 不变质量谱上寻找

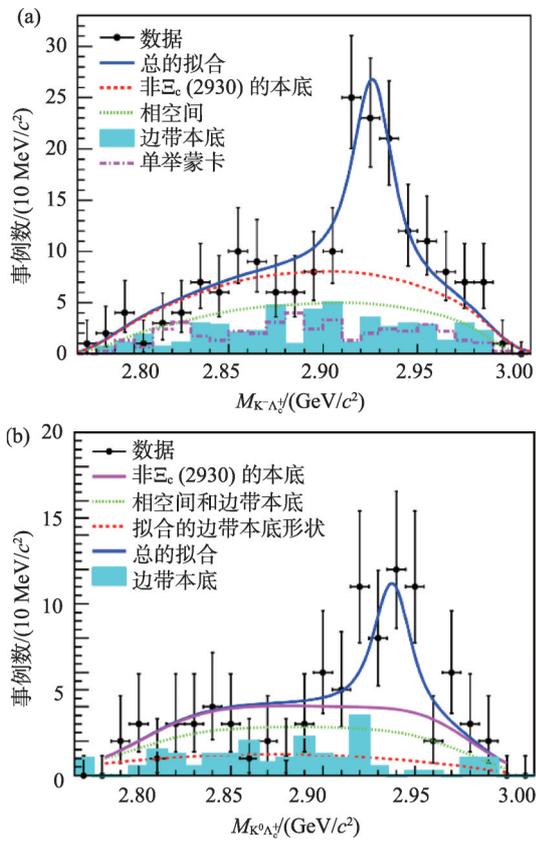


图3 (a) $K^- \Lambda_c^+$ 和(b) $\bar{K}^0 \Lambda_c^+$ 不变质量的分布,在2.93 GeV处可以观测到有明显的共振态信号。点加误差棒表示实验数据,蓝色实线是最终的拟合曲线,其余曲线成分表示本底的贡献和相应拟合的结果

$\Omega(2012)$, 然而没有观测到显著的信号,给出了在90%置信水平下两个衰变过程分支比的比值的上限,仅为11.9%^[16],远小于这种理论模型给出的预言,基本上排除了 $\Omega(2012)$ 是 $K\Xi(1530)$ 强子分子态的理论解释。Belle实验在正负电子直接对撞产生的 ΞK 的末态中也观测到了清楚的 $\Omega(2012)$ 的信号,但相比于正负电子直接对撞的反应过程, $\Omega(2012)$ 信号的信噪比(即信号和本底的比值)在底夸克偶素的衰变中更好,这为将来更好地研究重子激发态指出了新的途径。这里还需要指出的是,在图2显示的 ΞK 质量谱上,在1.94 GeV左右看起来有结构,很可能是更低质量的 Ω 激发态,但是由于目前数据样本统计量有限,还不能确定它是否一定存在,这需要后继更大的实验数据样本去关注。

2 Belle 实验上发现新粲重子信号

同时, Belle 实验在寻找粲重子 Ξ_c 激发态方面也取得了新的重要发现。粲重子由一个粲夸克、两个轻夸克构成,包括 Λ_c (不含奇异夸克)、 Ξ_c (含一个奇异夸克)、 Ω_c (含两个奇异夸克)及它们的激发态。过去的数十年间实验上发现了许多粲重子,为检验量子色动力学和研究轻夸克与重夸克动力学提供了理想的平台。Belle 实验基于采集到的7.7亿B介子对事例,在B介子的衰变过程 $B^- \rightarrow K^- \Lambda_c^+ \bar{\Lambda}_c^-$ 中寻找新的 Ξ_c 粲重子激发态^[17]。经过信号事例选择条件后的 $K^- \Lambda_c^+$ 不变质量分布如图3(a)所示,在2.93 GeV附近观测到了明显的共振态信号,其质量为 $(2928.9 \pm 3.0^{+0.9}_{-12.0})$ MeV,宽度为 $(19.5 \pm 8.4^{+5.9}_{-7.9})$ MeV,信号显著性为5.1倍标准偏差,命名为 $\Xi_c(2930)^0$ 。随后, Belle 实验又在 $\bar{B}^0 \rightarrow \bar{K}^0 \Lambda_c^+ \bar{\Lambda}_c^-$ 过程中在 $\bar{K}^0 \Lambda_c^+$ 不变质量谱上发现了带电的 $\Xi_c(2930)^+$ 的存在迹象^[18], $\Xi_c(2930)^+$ 的信号形状如图3(b)所示,测得 $\Xi_c(2930)^+$ 质量为 $(2942.3 \pm 4.4 \pm 1.5)$ MeV,宽度为 $(14.8 \pm 8.8 \pm 2.5)$ MeV,与 $\Xi_c(2930)^0$ 的质量和宽度值在1倍标准偏差内一致,但信号显著性小于5倍标准偏差,还需后续更高统计量的实验分析进行验证。

值得注意的是,之前几乎所有的粲重子 Ξ_c 的激发态都是在正负电子对撞过程中直接发现的^[1, 2],而 $\Xi_c(2930)$ 却是在B介子衰变过程中发现的,且目前尚未在正负电子直接对撞过程中观测到 $\Xi_c(2930)$ 存在的迹象^[19]。这意味着 $\Xi_c(2930)$ 拥有与其他 Ξ_c 激发态不同的属性。理论上对于 $\Xi_c(2930)$ 的解释众说纷纭,一类将它解释为普通的 Ξ_c 激发态,并预测其自旋宇称量子数为 $J^P = \frac{1}{2}^-$ ^[20]、 $\frac{3}{2}^-$ 或 $\frac{5}{2}^-$ ^[21],另有理论将其解释为 $\Lambda_c \bar{K}$ 分子态^[22]等。但由于其自旋宇称量子数尚未确定,还无法对它的自然属性做出定性的结论。

至此,上述介绍了过去一年中 Belle 实验在寻找超子 Ξ 、 Ω 和粲重子 Ξ_c 的激发态上的重要发现。Belle 实验用丰富的实验手段,分别在粲重子

衰变、底夸克偶素衰变和B介子衰变等过程中发现了 $\Xi(1620)$ 、 $\Omega(2012)$ 和 $\Xi_c(2930)^0$ 等新粒子。这些新粒子有可能成为常规重子激发态的候选粒子，但同时也有着其他理论解释，如 $\Xi(1620)$ 被解释为 $\Lambda\bar{K}$ 、 $\Xi\bar{K}$ 分子态^[10]或 $\Lambda\bar{K}$ 与 $\Xi\bar{K}$ 的束缚态^[11]； $\Omega(2012)$ 被解释为 $K\Xi(1530)$ 分子态^[15]； $\Xi_c(2930)$ 被解释为 $\Lambda_c\bar{K}$ 分子态^[22]等。这些理论揭示了重子谱的复杂性，由于目前Belle实验有限的数据统计量，还无法测量这些新发现的重子激发态的自旋宇称量子数等关键信息，将来用更大的数据统计量去理解它们的自然属性是至关重要的。尽管如此，目前的测量结果为后续重子谱的研究指明了方向，起到了十分积极的作用。

3 对 Ξ_c 绝对分支比的首次测量

Belle 实验在发现上述一系列新重子的同时，也对已发现粲重子进行了更加精确的测量，其中最显著的成果是首次测得了 Ξ_c^0 和 Ξ_c^+ 衰变的绝对分支比。尽管作为最基础的SU(3)反三重态的粲重子 Ξ_c^0 与 Ξ_c^+ 已被发现近30年，但受限于数据样本统计量和测量分析方法，其绝对衰变分支比至今未知，致使粲重子相关能谱、产生和衰变等诸多研究受到限制。为了测量 Ξ_c^0 衰变绝对分支比，Belle 实验利用收集的7.7亿B介子对样本，对 $B^- \rightarrow \bar{\Lambda}_c^0 \Xi_c^0$ 衰变进行了单举和遍举测量。分析首先采用了 B^+ 介子标记的方法测量 $B^- \rightarrow \Xi_c^0 \bar{\Lambda}_c^0$ 单举衰变过程的分支比，图4显示了在 B^- 介子质心系中的 $\bar{\Lambda}_c^0$ 的反冲质量谱，可以清晰地看到 Ξ_c^0 的信号，信号显著性为5.5倍标准偏差。随后在遍举过程中，不再标记信号 B^+ 介子，而是在重建 $\bar{\Lambda}_c^0$ 后，直接通过 $\Xi_c^0 \rightarrow \Xi^- \pi^+$ ， $\Lambda K^- \pi^+$ 和 $p K^- K^- \pi^+$ 重建 Ξ_c^0 粒子，测量得到以下三个连乘分支比： $\mathcal{B}(B^- \rightarrow \bar{\Lambda}_c^0 \Xi_c^0) \mathcal{B}(\Xi_c^0 \rightarrow \Xi^- \pi^+)$ ， $\mathcal{B}(B^- \rightarrow \bar{\Lambda}_c^0 \Xi_c^0) \mathcal{B}(\Xi_c^0 \rightarrow \Lambda K^- \pi^+)$ 和 $\mathcal{B}(B^- \rightarrow \bar{\Lambda}_c^0 \Xi_c^0) \mathcal{B}(\Xi_c^0 \rightarrow p K^- K^- \pi^+)$ 。结合单举和遍举的测量结果，首次给出了 Ξ_c^0 衰变绝对分支比^[23]。随后，Belle 实验又利用类似的分析方法，报道了带电的 Ξ_c^+ 绝对分支比的测量结果^[24]。上

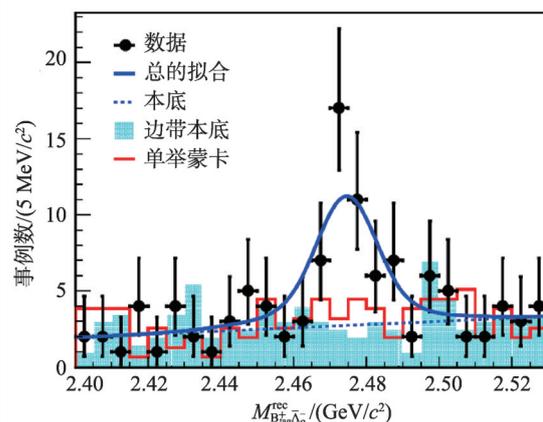


图4 B^- 介子质心系下 $\bar{\Lambda}_c^0$ 的反冲质量分布，点加误差棒表示数据，蓝色实线表示最终的拟合结果。蓝色虚线表示非共振态本底，红色实线表示归一化后的蒙特卡洛模拟结果，青色直方图表示来自边带部分的归一化本底

表1 Ξ_c^0 与 Ξ_c^+ 各衰变过程的分支比

过程	分支比
$\Xi_c^0 \rightarrow \Xi^- \pi^+$	$(1.80 \pm 0.50 \pm 0.14)\%$
$\Xi_c^0 \rightarrow \Lambda K^- \pi^+$	$(1.17 \pm 0.37 \pm 0.09)\%$
$\Xi_c^0 \rightarrow p K^- K^- \pi^+$	$(0.58 \pm 0.23 \pm 0.05)\%$
$\Xi_c^+ \rightarrow \Xi^+ \pi^+ \pi^+$	$(2.86 \pm 1.21 \pm 0.38)\%$
$\Xi_c^+ \rightarrow p K^- \pi^+$	$(0.45 \pm 0.21 \pm 0.07)\%$

述测量结果在表1中列出。 Ξ_c 参与了很多 Ξ_c 和 Ω_c 激发态的衰变过程，是十分重要的含一个奇异夸克的粲重子，可以预见，Belle的实验结果将会被广泛地应用到与 Ξ_c 相关的粲重子产生和衰变的测量分析中。

4 BelleII 实验简介

日本高能加速器研究机构已经将Belle实验升级成超级B介子工厂——BelleII实验，并在2018年4月开始采集数据，目前已经取得了约 6.1 fb^{-1} 的数据量。BelleII实验在Belle实验的成功经验基础上，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BelleII实验^[25]，峰值亮度能够达到 $8 \times 10^{35} / \text{cm}^2 / \text{s}$ ，比Belle实验提高了40倍，是世界上亮度最高的对撞

实验。BelleII实验预计到2027年可以收集到总计50倍于Belle的实验数据,总的积分亮度高达 50 ab^{-1} ,而且可能会在更高能量的底夸克偶素 $\Upsilon(6S)$ 共振态附近采集实验数据样本。届时,利用BelleII实验采集的海量数据样本,寻找新重子和对已发现重子进行更深入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] Tanabashi M *et al.* (Particle Data Group). Phys. Rev. D, 2018, 98: 030001
- [3] 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, 1964; Lichtenberg D B, Rosen S P. Developments in the Quark Theory of Hadrons. Nonantum, MA: Hadronic Press, 1980
- [4] Greenberg O W. Phys. Rev. Lett., 1964, 13: 598
- [5] Fritzsche H, Gell-Mann M, Leutwyler H. Phys. Lett. B, 1973, 47: 365
- [6] Greiner W, Schafer A. Quantum Chromodynamics, 3rd edition. Springer, 2007; Ellis R K, Stirling W J, Webber B R. QCD and Collider Physics. Cambridge University Press, 1996; Muta T. Foundations of Quantum Chromodynamics, 3rd edition. World scientific, 2009
- [7] Briefel E *et al.* Phys. Rev. D, 1977, 16: 2706; de Bellefon A, Berthon A, Billoir P *et al.* Nuovo Cimento, 1975, 28: 289; Ross R T, Buran T, Lloyd J L *et al.* Phys. Lett. B, 1972, 38: 177
- [8] Sumihama M *et al.* Phys. Rev. Lett., 2019, 122: 072501
- [9] Chao K T, Isgur M, Karl G. Phys. Rev. D, 1981, 23: 155; Capstick S, Isgur N. Phys. Rev. D, 1986, 34: 2809
- [10] Chen K *et al.* Phys. Rev. D, 2019, 100: 074006
- [11] Wang Z Y *et al.* Eur. Phys. J. C, 2019, 79: 640
- [12] Pervin M, Roberts W. Phys. Rev. C, 2018, 77: 025202; Oh Y. Phys. Rev. D, 2007, 75: 074002; Engel G *et al.* Phys. Rev. D, 2013, 87: 074504
- [13] Yelton J *et al.* Phys. Rev. Lett., 2018, 121: 052003
- [14] Aliev T M *et al.* Eur. Phys. J. C, 2018, 78: 894
- [15] Lin Y H, Zou B S. Phys. Rev. D, 2018, 98: 056013; Valderrama M P. Phys. Rev. D, 2018, 98: 054009; Huang Y *et al.* Phys. Rev. D, 2018, 98: 076012
- [16] Jia S *et al.* Phys. Rev. D, 2019, 100: 032006
- [17] Li Y B *et al.* Eur. Phys. J. C, 2018, 78: 252
- [18] Li Y B *et al.* Eur. Phys. J. C, 2018, 78: 928
- [19] Aubert B *et al.* Phys. Rev. D, 2008, 77: 012002
- [20] Aliev T M, Azizi K, Sundu H. Eur. Phys. J. A, 2019, 54: 159; Wang K L *et al.* Phys. Rev. D, 2017, 96: 116016; Liu L H, Xiao L Y, Zhong X H. Phys. Rev. D, 2012, 86: 034024; Chen H X *et al.* Phys. Rev. D, 2017, 95: 094008
- [21] Chen B, Liu X. Phys. Rev. D, 2018, 98: 074032; Chen B *et al.* Eur. Phys. J. C, 2017, 77: 154
- [22] Yu Q X *et al.* Eur. Phys. J. C, 2019, 79: 167
- [23] Li Y B *et al.* Phys. Rev. Lett., 2019, 122: 082001
- [24] Li Y B *et al.* Phys. Rev. D, 2019, 100: 031101
- [25] Kou E *et al.* Prog. Theor. Exp. Phys., 2019, 123C01



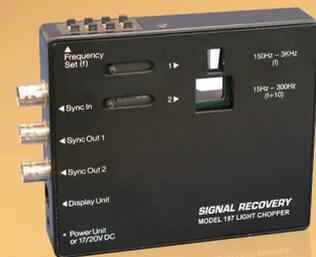
微弱信号检测 半个世纪的骄傲

Model 7210
多通道锁相放大器

全球唯一
通道之最



Model 197光学斩波器



生产商: 阿美特克商贸(上海)有限公司北京分公司
电话: 010-85262111-10 传真: 010-85262141-10
Email: infosi@ametek.cn
网址: www.signalrecovery.com.cn

中国代理商: 北京三尼阳光科技发展有限公司
电话: 010-65202180/81 传真: 010-65202182
Email: sales@sunnytek.net
网址: www.sunnytek.net