

北京正负电子对撞机上开展含粲夸克的重子研究

吕晓睿

(中国科学院大学 100049)

对于物质基本构成问题的研究历史可以追溯到两千多年前,时至今日,普遍接受的理论为粒子物理标准模型。现代粒子物理标准模型将我们周围的物质构成用17种基本粒子,及它们之间的三种相互作用力:强相互作用、弱相互作用和电磁相互作用来描述。在这些基本粒子之中,夸克是组成我们周围物质的基本单元。比如大家最熟悉的质子是由2个上夸克(u)和1个下夸克(d)组成的,这些夸克通过强相互作用束缚在一起。标准模型中共有6种夸克,其中每两种为一代,共有三代,上夸克和下夸克属于第一代。粲夸克(c)和奇异夸克(s)属于第二代。第三代夸克为顶夸克(t)和底夸克(b)。由三个夸克组成的粒子称为重子,而仅包含前两代夸克的重子中,如果至少有一个粲夸克,则称为粲重子。

Λ_c^+ 是粲重子成员中质量最轻的,其质量为2.286 GeV,约为质子质量的2.5倍,质量差别主要来自质子中 uud 夸克中的一个上夸克换成了较重的粲夸克。因此它的夸克组分是一个粲夸克(c)和一对轻夸克(ud),如图1所示。粲夸克是质量较重的夸克,而轻夸克对(ud)的自旋量子数与同位旋都为0。 Λ_c^+ 粒子寿命很短,半衰期约为200飞秒,其中的粲夸克通过弱相互作用的弱衰变模式几乎主导了 Λ_c^+ 的衰变方式。因此,研究 Λ_c^+ 衰变不仅可以用来检验弱相互作用的物理机制,更重要的是可以利用粲重子的跃迁来检验强相互作用机制。 Λ_c^+ 粲重子是粲重子谱学的基石,对 Λ_c^+ 粲重子以及粲重子激发谱知识的积累,将为研究底重子谱以及底重子衰变到 Λ_c^+ 粲重子提供重要的输入信息。

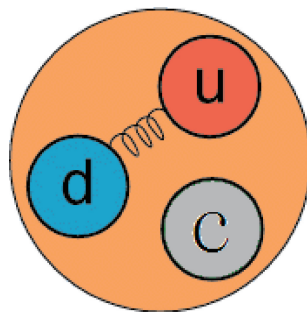


图1 含粲夸克的最轻重子的夸克成分示意图

粲重子最早在1975年美国布鲁克海文国家实验室(BNL)的7英寸低温气泡室中通过探测中微子束流时发现的。由于中微子与探测器物质中的质子发生反应后得到 $\nu p \rightarrow \mu^- \Lambda \pi^+ \pi^+ \pi^-$,其中 $\Lambda \pi^+ \pi^+$ 来自于 Λ_c^+ ,其后在1976年美国费米国家实验室的光束与物质反应时确认了粲重子的存在,特别是最轻的粲重子 Λ_c^+ 的存在。1980年美国斯坦福直线加速器中心上MarkII实验利用正负电子湮灭过程获得了干净清晰的 Λ_c^+ 信号,测量了其产生截面和质量。

自从粲重子 Λ_c^+ 发现之后,20世纪80~90年代实验上陆续开展了 Λ_c^+ 性质的实验测量,但总体上这些实验测量对于准确理解粲重子的内部结构和物理机制仍然不够。在2014年之前, Λ_c^+ 衰变的大部分过程还没有被实验发现,特别是含中子、中性K介子和中微子的衰变末态的过程实验上基本没有测量。即使实验上发现的衰变过程,衰变分支比(即某种衰变模式的概率)的测量主要以 $\Lambda_c^+ \rightarrow p K^- \pi^+$ 衰变作为参考道,开展的相对衰变分支比测量。然而由于或多或少地依赖于模型假设, $\Lambda_c^+ \rightarrow p K^- \pi^+$ 的分支比的实验测量并不准确。这会从整体上使

Λ_0^+ 衰变分支比的结果存在很大的不确定性。以上的实验困难也使得粲重子理论的研究进展缓慢。

粲重子的实验精细研究是亟待解决的重要课题。在北京谱仪 III(BESIII) 实验预研阶段发表的物理黄皮书 *Physics at BES-III* 中, 也提出了研究粲重子的物理内容。但由于当时计划升级的北京正负电子对撞机二代(BEPCII) 的最高能量 4.2 GeV, 尚达不到产生粲重子 Λ_0^+ , 因此粲重子的研究并没有马上开展。

事情转机发生在 2012 年 11 月份, 当时 BEPCII 的加速器专家成功突破加速器的能量设计上限, 使正负电子的单束流的能量达到了 2.3 GeV 运行。如果正负电子束流均采用 2.3 GeV 能量对撞, 这恰好可以满足粲重子 Λ_0^+ 对产生所需的 4.6 GeV 总能量。根据这一进展, 在 2013 年春季合作组研讨会上合作组认真讨论, 研究将对撞机能量调整到 4.6 GeV 能量上运行获取粲重子 Λ_0^+ 的实验数据。虽然合作组内部讨论了需要积累的 Λ_0^+ 的数据量, 但 BEPCII 以前没有长时间在该能量点取数, 无法确保机器能否保持高亮度运行, 获取足够的数量。

经过 BEPCII 上科研工作人员的不懈努力, 2014 年 BESIII 实验成功地在 4.6 GeV 的质心系能量上运行了 35 天, 积累了 567 pb^{-1} 的正负电子湮灭数据。该能量点略高于 $\Lambda_0^+ \bar{\Lambda}_0^-$ 对质量阈值 26 MeV 左右, 因此在该能量下 Λ_0^+ 和 $\bar{\Lambda}_0^-$ 成对产生, 同时没有额外能量产生其他任何伴随强子。这就给我们提

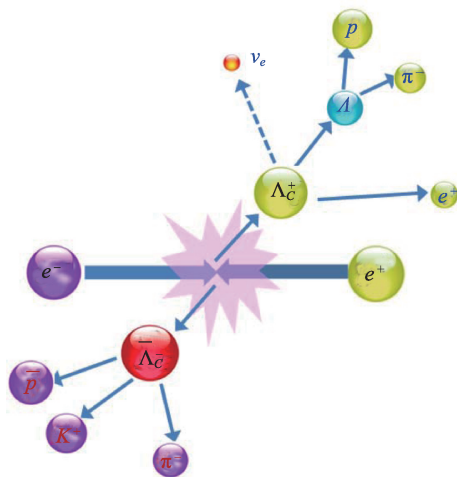


图2 正负电子湮灭产生 $\Lambda_0^+ \bar{\Lambda}_0^-$ 对及后续衰变过程示意图

供了一个非常干净的 Λ_0^+ 的产生环境和非常丰富的运动学约束信息。由于是成对产生, 此时可以利用部分重建一个 Λ_0^+ 的单标记技术和全重建 $\Lambda_0^+ \bar{\Lambda}_0^-$ 对的双标记技术, 开展 Λ_0^+ 的衰变的分支比测量。该测量方法的优点在于不依赖于 $\Lambda_0^+ \bar{\Lambda}_0^-$ 对产生截面或 Λ_0^+ 衰变模型的假设, 且不需要数据积分亮度等输入信息, 因此被认为是最可靠的绝对分支比测量。特别是基于标记的方法来进行测量, 由于准确知道正负电子对的初始能动量, 基于能量动量守恒, 可以利用丢失四动量信息来测量末态包含中子、中性 K 介子或中微子等粒子的信息。BESIII 实验在 $\Lambda_0^+ \bar{\Lambda}_0^-$ 对质量阈值之上的 4.575 GeV, 4.580 GeV 和 4.590 GeV 能量处分别采集了小统计量的扫描数据, 用于研究正负电子湮灭产生粲重子的性质。这些数据量对应约 10 万 $\Lambda_0^+ \bar{\Lambda}_0^-$ 对, 是北京正负电子对撞机建成运行至今 30 多年来首次实现阈值上研究粲重子, 也是国际上首次在阈值上系统开展粲重子的衰变研究, 开启了 BESIII 实验研究的新窗口和新亮点。

总体上 BESIII 实验在粲重子研究方面, 可以分为三个阶段。第一阶段是基于 2014 年在 4.6 GeV 上积累的约 10 万对的 Λ_0^+ 数据, 在 2015 至 2021 年间共发表了 17 篇研究论文, 其中发表在《物理评论快报》(*Physical Review Letters*, PRL) 上的论文 7 篇。第二阶段是在 2019 年 BEPCII 和 BESIII 实验团队进一步升级加速器能量至 4.95 GeV, 并在 2020 至 2021 年在 4.61~4.95 GeV 范围内获取了共 5.8 fb^{-1} 的实验数据, 使 Λ_0^+ 对总数的统计量提高到原来的 8 倍, 达到近 80 万 Λ_0^+ 对数据, 同时该能量范围打开了

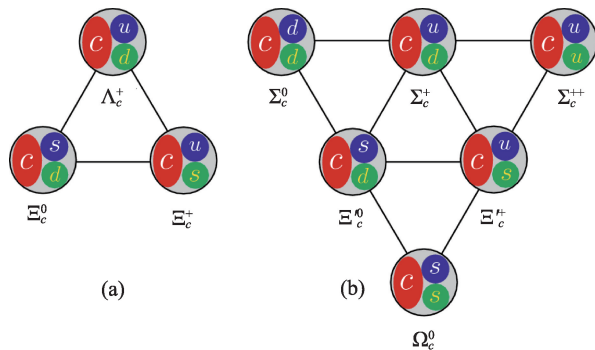


图3 基态粲重子多重态家族[图片来源 EPJC80, 320 (2020)]

粲重子激发态的产生阈值,可以开展激发态粲重子的探索性研究,目前为止,已发表了16篇粲重子相关的研究论文,更多研究正在开展中。第三阶段是计划在2024年夏天完成BEPCh的能量升级和亮度升级改造后,进一步提高最高对撞能量至5.6 GeV,实现基态粲重子(Λ_c^+ 、 Σ_c 、 Ξ_c^0 和 Ω_c^0)产生阈值能量的全覆盖,并基于3倍峰值亮度的升级,在4.6~5.6 GeV能量范围内获取更大统计量的粲重子数据,提高 Λ_c^+ 衰变的测量精度。现就每个阶段的物理成果或计划介绍如下。

1. 第一阶段粲重子研究成果

BESIII实验在2014年4.6 GeV附近获取的 Λ_c^+ 对数据,在国际上首次开展了一系列阈值上粲重子衰变的绝对分支比测量,这是之前实验上对于粲重子研究缺失的,因此取得的相关成果得到了热烈的关注,也大大促进了理论上粲重子研究的新热点。其中主要的研究进展如下:

1) 首次阈值上模型无关地测量了 Λ_c^+ 的12个强子衰变道的分支比,成为 Λ_c^+ 发现30多年来世界上首次在阈值上精确测量绝对分支比,其中重要的参考道 $\Lambda_c^+ \rightarrow pK^-\pi^+$ 测量精度达到6%,与当时BELLE结果精度相当,但比之前粒子数据表(PDG)的精度26%有很大改善。另外11个强子衰变率的结果精度有3到6倍的改善,为世界最精确的结果。该研究工作发表在PRL上,引发了国际同行的重视,是目前为止BESIII实验合作组粲物理组引用数最高的论文。

2) 世界上首次直接测量了 Λ_c^+ 半轻衰变 $\Lambda_c^+ \rightarrow \Lambda e^+ \nu_e$ 和 $\Lambda_c^+ \rightarrow \Lambda \mu^+ \nu_\mu$ 的绝对分支比,结果精度大大好于之前通过间接方法测量的结果。这些工作的结果对理论唯象模型的计算给出了很强的实验限制,推动了理论的相关研究,特别是触发了国际上首次对粲重子半轻衰变的格点QCD计算,其结果与BESIII的测量结果相洽。

3) 首次研究了粲重子含中子末态的衰变过程 $\Lambda_c^+ \rightarrow nK_s^0 \pi^+$,发表了绝对分支比结果。该过程与之前发表的同位旋对称过程 $\Lambda_c^+ \rightarrow pK^-\pi^+$ 和 $pK_s^0 \pi^0$ 的分支比联合起来,可以帮助理解粲重子 Λ_c^+ 衰变中的因子化机制和同位旋对称性,帮助提取相关的强相角,理解末态相互作用。

4) 完成了首次测量 $\Lambda_c^+ \rightarrow e^+ + X$ 的单举分支比,以及最精确绝对测量 $\Lambda_c^+ \rightarrow \Lambda X$ 的单举过程的分支比,为理解粲夸克弱衰变的动力学机制、理解粲重子寿命等方面提供了重要实验数据,特别是对更重粲重子(如双粲重子 Ξ_{cc}^{++})的衰变机制。

除以上列举的研究结果之外,粲重子的其他成果包括:测量了末态含中子过程 $\Lambda_c^+ \rightarrow \Sigma^-\pi^+\pi^0$;观测到粲重子卡比玻压低衰变 $\Lambda_c^+ \rightarrow p\pi^+\pi^-$;卡比玻压低衰变 $\Lambda_c^+ \rightarrow p\eta$ 的证据;首次测量 Λ_c^+ 的产生横极化效应及 $\Lambda_c^+ \rightarrow pK_s^0$ 和 $\Sigma^0\pi^+$ 的衰变不对称度;首次确认 Λ_c^+ 的自旋; $\Lambda_c^+\bar{\Lambda}_c^0$ 阈值附近产生截面精确测量,发现与BELLE实验结果不相符的迹象等。这些研究要么是绝对分支比的精确测量,要么是衰变末态含有无法直接探测的粒子,均体现了BESIII实

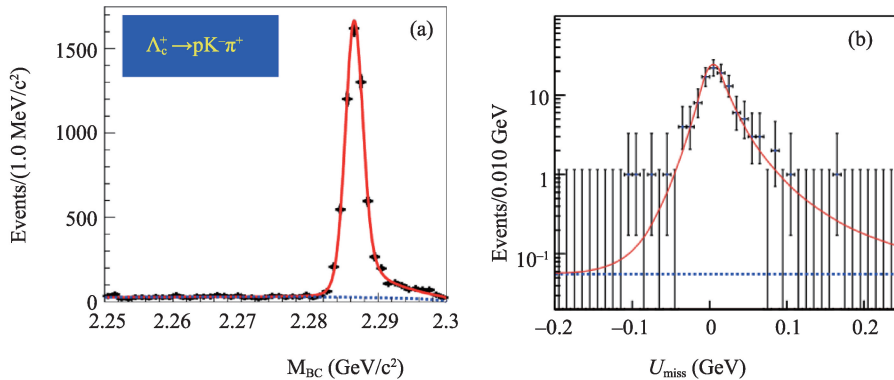


图4 (a) Λ_c^+ 衰变到 $pK^-\pi^+$ 末态的质量谱;(b) Λ_c^+ 半轻衰变 $\Lambda_c^+ \rightarrow \Lambda e^+ \nu_e$ 信号

验阈值测量的独特优势。

2. 第二阶段粲重子研究进展

考虑到2014年粲重子数据取得的瞩目成果,2016年上半年BEPcII和BESIII实验团队开始讨论进一步升级BEPcII的最高对撞能量,使BESIII实验能够在更高 Λ_c^+ 对产生截面处运行取数,同时产生 Λ_c^+ 激发态和粲重子 Σ_c 等。在科学院项目的支持下,2019年夏季检修期间BEPcII团队对加速器的对撞区特种磁铁、弯转磁铁电源系统以及冷却通风系统等进行了升能改造,使对撞能量达到4.95 GeV,并实现了连续注入模式运行,有效提高了取数的积分亮度效率。在2020至2021年疫情期间,实验团队克服疫情的困难,在4.61~4.95 GeV范围内共获取了 5.8 fb^{-1} 的实验数据,使 Λ_c^+ 对数据统计量提高了7倍。基于这些新的 Λ_c^+ 阈值数据,BESIII实验目前主要完成了如下成果:

1) 利用双标记方法及BESIII实验上独有的丢失质量方法,在国际上首次发现含中子的卡比玻压低衰变 $\Lambda_c^+ \rightarrow n\pi^+$,测量了绝对衰变分支比,发现其衰变分支比是 $\Lambda_c^+ \rightarrow p\pi^0$ 衰变分支比的7.2倍以上,这比所有理论预言的比值高了很多。基于相同的测量方法,进一步发现并测量了卡比玻压低过程 $\Lambda_c^+ \rightarrow n\pi^+\pi^0$ 和 $n\pi^+\pi^-\pi^+$ 以及卡比玻允许过程 $\Lambda_c^+ \rightarrow nK^-\pi^+\pi^+$ 的衰变分支比。这是实验上首次观测到这些含中子末态的衰变过程,为揭示 Λ_c^+ 粲重

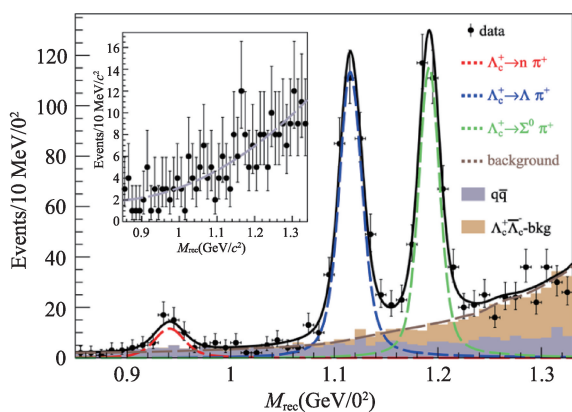


图5 国际上首次发现含中子的卡比玻压低衰变 $\Lambda_c^+ \rightarrow n\pi^+$

子内部动力学信息提供了重要的实验信息输入。

2) 开展了基于螺旋度振幅的4维拟合分析,国际上首次完成了半轻衰变 $\Lambda_c^+ \rightarrow \Lambda e^+ \nu_e$ 和 $\Lambda \mu^+ \nu_\mu$ 的绝对形状因子测量,以及更精确地测量了他们的衰变分支比。这些新结果对格点QCD进行了精确检验,发现在不同 q^2 能区形状因子出现了不一致的问题,这有助于刻度理论上对其他粲重子半轻衰变的计算。

3) 实验上首次发现 Λ_c^+ 第二种半轻衰变模式 $\Lambda_c^+ \rightarrow pK^- e^+ \nu_e$,并测量了其分支比,同时首次给出了其中的中间过程 $\Lambda_c^+ \rightarrow \Lambda(1520)e^+ \nu_e$ 存在的实验证据;首次寻找了 $\Lambda_c^+ \rightarrow \Lambda \pi^+ \pi^- e^+ \nu_e$ 和 $pK_s^0 \pi^- e^+ \nu_e$ 等半轻衰变过程。

4) 利用反中子在量能器上的沉积能量信息,首次开展对 $\bar{\Lambda}_c^- \rightarrow \bar{n} + X$ 过程的单举衰变分支比测量,结果约为33.5%。在正反物质CP对称性下,该结果说明 Λ_c^+ 衰变到质子的比率大于衰变到反质子的比率,更正了之前国际上的预期1:1的比率。此外,通过与 Λ_c^+ 已经发现的含中子遍举衰变过程的分支比对比,表明约有25%的含中子末态的衰变过程尚未在实验上发现。

5) 基于通用的分波分析工具TF-PWA,首次开展了粲重子多体强子衰变 $\Lambda_c^+ \rightarrow \Lambda \pi^+ \pi^0$ 的分波分析研究,发现其中主导的两体过程为 $\Lambda_c^+ \rightarrow \Lambda \rho^+$ 和 $\Sigma(1385)\pi$,测量了它们的分支比,并给出了各个过程的弱衰变不对称参数,得到了非常丰富的物理结果,对于完善理论模型的发展具有重要的指导意义。

6) 在4.6至4.95 GeV的更大能量范围内,精确测量了 $\Lambda_0^+ \bar{\Lambda}_0^-$ 的产生截面及有效形状因子,确认结果不支持BELLE实验在4.63 GeV附近看到的共振结构Y(4630)。这些成果对于理解强子谱学及粲强子内部结构有重要意义。

除此之外,基于新的 Λ_0^+ 数据,BESIII实验发表了一系列单卡比玻压低过程的测量,特别是 $\Lambda_0^+ \rightarrow \Sigma^+ K_s^0$ 的首次测量,以及 $\Lambda_0^+ \rightarrow p\eta, p\eta', p\omega, \Lambda K^+, \Sigma^0 K^+, \Sigma^+ K^+ \pi^-$ 等过程;首次寻找粲重子辐射弱衰变过程 $\Lambda_0^+ \rightarrow \gamma \Sigma^+$;首次通过粲重子衰变寻找暗光子 $\Lambda_0^+ \rightarrow p\gamma'$ 等。

基于第二阶段的粲重子数据, BESIII 实验上 Λ_c^+ 衰变数据已经达到了不断改善卡比玻压低过程的测量精度程度, 这对于深入研究粲重子 CP 破坏机制非常关键。因此理论研究也更加深入, 基于丰富的粲重子 Λ_c^+ 衰变数据, 进而给出了更多其他基态粲重子(如 Ξ_c 和 Ω_c^0 , 以及双粲重子)的计算预言。

3. 第三阶段粲重子研究计划

随着理论与实验研究的不断深入, 我们希望未来理论和实验能够对含粲重子弱衰变过程进行更加精确的计算和测量, 同时双方能够更精细地控制误差, 提高计算和测量精度, 从而为精确检验标准模型, 寻找超出标准模型的新物理提供 stronger 理论和实验支持。这需要 BESIII 实验能够对全部基态粲重子开展阈值上的测量, 同时 BESIII 实验合作组在 2020 年发表的物理白皮书 *Future Physics Programme of BESIII* 中提出在 4.6~4.95 GeV 范围内积累 18 fb^{-1} 的数据, 这大约相当于 250 万的 Λ_c^+ 对统计量。

如同 2014 年之前最轻粲重子 Λ_c^+ 的实验测量现状类似, 粲重子 Ξ_c 和 Ω_c^0 目前的实验数据非常有限, 已经发现的衰变模式很少, 其衰变分支比测量误差很大, 亟待如 BESIII 实验这样的阈值数据研究来填补空白。这对完善我们对粲重子整体的理解和认识至关重要。

考虑以上的物理目标, BEPCII 团队制定了新的加速器升级计划 BEPCII-U, 计划将目前对撞机的

最高能量提高至 5.6 GeV, 这样将覆盖所有基态粲重子的产生能量; 同时对撞机在 4.7 GeV 处的最高瞬时亮度升级为目前的 3 倍, 使 3.773~4.7 GeV 能区内最高瞬时亮度保持在 $1.1 \times 10^{33} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 。这将有效提高 BESIII 在粲重子能区的取数效率, 保障完成物理白皮书提出的取数计划。以上升级计划正在有条不紊地开展, 预期将在 2024 年夏季完成设备升级安装, 其后将进行设备调试和运行取数。

4. 总结

得益于 BEPCII 加速器团队的不懈努力, 使得 BESIII 实验能够在 4.6 GeV 能区上的粲重子阈值研究, 开辟了一个新的北京谱仪实验的研究方向。BESIII 实验高统计量的阈值数据和独特的标记技术, 保证了上最轻粲重子 Λ_c^+ 衰变的高精度研究, 引发了粲重子研究新热点, 成为北京谱仪实验 30 多年来的新亮点。如同 CLEO 实验在对奇异粲介子的开拓性全面研究, BESIII 实验实现了粲重子 Λ_c^+ 的衰变性质的系列研究。目前 PDG 数据表收集的 Λ_c^+ 衰变数据, 最精确的结果主要来自于 BESIII 实验。随着未来 BEPCII 的能量和亮度升级, BESIII 实验在未来的 5~10 年内将有希望对更多粲重子(Ξ_c 和 Ω_c^0) 的衰变性质开展阈值上的系统性研究, 这同样是具有开创性的。这些研究都为精确检验标准模型, 以及寻找超出标准模型的新物理提供重要的实验输入。

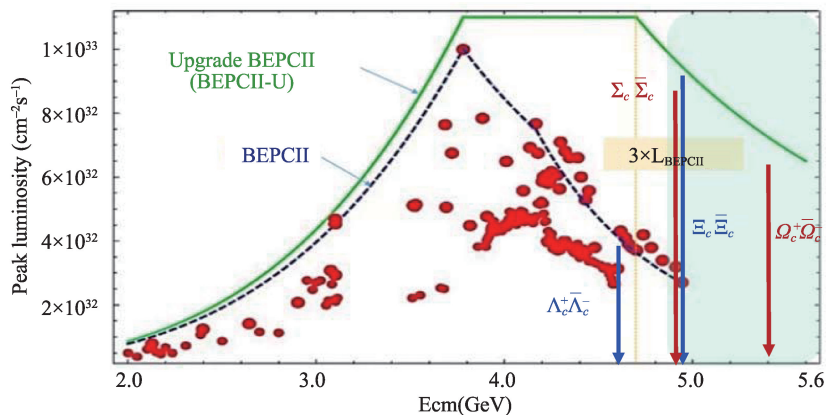


图6 BEPCII-U 能量和亮度升级计划