

粲偶素与类粲偶素的故事

朱 凯¹ 郭奉坤^{2,3}

(1. 中国科学院高能物理研究所 100049; 2. 中国科学院理论物理研究所 100190;
3. 中国科学院大学 100049)

一、粲偶素的出场

在粒子物理发展史上,1974年11月是一个值得永远铭记的月份。在这个月,位于美国东海岸的布鲁克海文国家实验室和西海岸的斯坦福直线加速器中心的两个实验组同时宣布发现了一个新的粒子。布鲁克海文由丁肇中领导的实验组将之以拉丁字母J命名,而斯坦福由里克特(Burton Richter)领导的实验组则称之为希腊字母 ψ 。从此,这个粒子有了一个独一无二的名字 J/ψ ,而它的发现被称作粒子物理学的“十一月革命”。

在丁肇中的实验中,被加速到接近光速的大量质子像炮弹一样轰击铍靶。爱因斯坦著名的方程 $E=mc^2$ 告诉我们能量可以转化为质量,于是,铍在能量非常高的质子撞击下,反应产生了大量各种各样的粒子。在所有这些产物中,丁肇中的实验只去探测一对电子和正电子(正电子是电子的反物质粒子,与电子质量相同但是电荷符号相反)。1974年夏天,他们在电子和正电子对的能谱上观察到了一个利剑般狭窄的尖峰,尖峰所对应的能量大约为3.1 GeV (31亿电子伏特,相当于质子质量的3.3倍)。能谱上狭窄的尖峰通常是共振态(也就是会衰变的粒子)的信号,峰值对应的能量就是这个粒子的质量。也就是说,丁肇中的实验观测到了一个质量约为3.1 GeV的粒子,而这个粒子前所未见。里克特的实验则完全不同。在他们的实验中,电子与正电子相撞,产生新的粒子。1974年11月10日,他们将电子和正电子的能量调到了合适的大小,也观测到了同样的窄峰。

1974年11月11日,丁肇中和里克特在斯坦福会面了,他们意识到在他们完全不同的实验中显露面目的乃是同一个粒子。

丁肇中和里克特的文章分别于1974年11月12日和13日提交到《物理评论快报》(*Physical Review Letters*)。这个石破天惊的发现的消息迅速传播,吸引了各路实验物理学家和理论物理学家的注意。他们夜以继日地工作:11月18日,意大利弗拉斯卡蒂(Frascati)国家实验室的文章也提交到《物理评论快报》,验证了丁肇中和里克特的发现。这三篇文章于12月2日发表在同一期《物理评论快报》上。11月25日,里克特组发现第二个新粒子(质量大约为3.7 GeV,称为 ψ' ,也称 $\psi(2S)$ 或 $\psi(3686)$)的文章投稿,于12月9日发表。1976年,丁肇中和里克特因 J/ψ 的发现分享了诺贝尔物理学奖。

通过高能物理核物理领域最全的数据库INSPIRE统计,在迄今为止超过2600篇引用 J/ψ 发现的文章中,有超过80篇完成于1974年,其中大量发表于《物理评论快报》。考虑到 J/ψ 的文章11月份才发表,这是一个疯狂的数字,意味着几乎平均每天两篇!在这些文章的作者中,我们能发现一系列光辉的名字:杨振宁、格拉肖(Sheldon Lee Glashow)、萨拉姆(Abdus Salam)、维尔切克(Frank Wilczek)、玻利策(Hugh David Politzer)等当时或后来的诺贝尔物理学奖得主。

J/ψ 的性质是如此古怪:一个由当时已知的夸克(上夸克、下夸克和奇异夸克)组成的如此之重的强子的寿命应该大约是 10^{-24} 秒,然而 J/ψ 的寿命则至少是 10^{-21} 秒。一拥而上的理论物理学家们提出了

各种模型来解释新粒子,包括胶子(夸克间传递强相互作用的媒介粒子)、W玻色子、希格斯玻色子、由一对正反 Ω 超子(由三个奇异夸克组成的重子)束缚到一起形成的复合系统、由当时仍处于假想阶段的粲夸克和它的反物质粒子形成的束缚态(即粲偶素),等等。这其中绝大部分工作已经成为历史的尘埃,而实验证明正确的解释则是粲偶素!

在 J/ψ 被发现之前,已经有理论物理学家猜想存在第四种夸克,也就是粲夸克^①。描述夸克之间强相互作用的理论——量子色动力学(QCD)也已经被弗里茨(Harald Fritzsch)和盖尔曼(Murray Gell-Mann)提出。1974年夏天,杰拉德(Mary K. Gailard)、李昭辉(Benjamin W. Lee)和罗斯纳(Jonathan L. Rosner)在他们的预印本中研究了由粲夸克和反粲夸克束缚到一起构成的介子^②。哈佛大学的阿派奎斯特(Thomas Appelquist)和波利策也在利用QCD研究这样的介子^③,他们的朋友德·儒胡拉(Alvarado De Rújula)为此新造了一个词“粲偶素”(charmonium)。阿派奎斯特在很多地方做了报告宣讲他们的工作,听众中包括康奈尔大学教授威尔逊(Kenneth G. Wilson)。在宣布 J/ψ 发现的当天,威尔逊立刻给阿派奎斯特打电话,建议他立刻将其理论写成文章。阿派奎斯特和波利策的文章很快完稿,并于11月19日投到《物理评论快报》,然而,编辑却毫不留情地直接将文章拒稿了,理由是该期刊不允许作者乱造名词。他们通过格拉肖跟编辑达成了妥协,编辑同意“粲偶素”可以出现在正文中,但是不能用在文章标题里。一番波折后,“粲偶素”正式登上了历史舞台。

而现在,粲偶素是北京正负电子对撞机上的北京谱仪(BES)实验研究的重大科学问题之一。

二、BES的粲偶素研究之路

虽然大千世界林林总总,但目前人们认识的基本相互作用只有四种:强相互作用、弱相互作用、电磁相互作用和万有引力。大家最熟悉的是电磁相互作用,磁铁的磁力、物体之间的摩擦力、可见光或

者红外紫外光、液体的粘滞力或气体的浮力都是电磁相互作用的结果。电磁相互作用还将带正电荷的原子核和带负电荷的电子吸引到一起形成原子,吸引力的强度取决于电荷的大小。强相互作用则是色荷之间的力,顾名思义也是最强的力。就像电子有电荷,夸克(除了电荷之外)有色荷,而且有三种不同的色荷。强相互作用将夸克和色荷与之相反的反夸克吸引到一起,就形成了介子,比如 J/ψ 和 $\psi(2S)$;将三个色荷各不相同的夸克吸引到一起,就形成了重子,比如质子和中子。而在理论层面上,强相互作用由QCD来描述,由于QCD计算的复杂性,答案也并不清晰。

加速器是高能物理学家用来观察强子的超级显微镜。量子力学的不确定原理告诉我们,加速器能够达到的能量越高,能看清的尺寸就越小。如果我们去观察夸克,会发现一个奇怪的现象:超级显微镜放大的倍数越大,探针的能量越高,看到的夸克的色荷就越小。这个特性被称作“渐近自由”,是格罗斯(David Gross)、维尔切克和玻利策在1973年发现的,他们因此获得了2004年诺贝尔物理学奖。这意味着当两个夸克挨得越近的时候它们之间强相互作用反而会变弱。如果色荷很小,理论物理学家就可以用“微扰展开”的方法来进行计算,这有点近似于著名的泰勒展开,就是把相互作用按色荷的幂次展开,忽略掉高幂次的项而只用考虑低阶的效应。

然而,如果我们把两个夸克拉开,随着它们距离的增大,它们看到对方的色荷也在变大,相互作用变得越来越强。就像是夸克之间有一根皮筋,拉得越长皮筋的张力就越大,最终导致按照色荷的幂次展开的办法完全失效。这时,相互作用就变成非微扰的了。另外,强相互作用还有一个非常诡异的特性:虽然强子都是由带色荷的夸克和胶子组成的,但是夸克和胶子从不在外独行,实验上能直接探测到的都是不带色的强子。这个现象被称作“色禁闭”。QCD到底为什么会存在色禁闭目前还不清楚。而色禁闭的存在意味着要研究QCD的性质,则必须研究强子的能谱,也就是到底存在什么样的

强子,它们有多重,寿命有多长,如何衰变等。而任何非微扰的问题都极具挑战性,一类处理的方式是构造唯象模型,比如考虑了色禁闭的夸克模型。

粲夸克的质量大小使得粲偶素中微扰的和非微扰的相互作用都很重要,所以非常适合用来研究QCD。而通过在正负电子直接对撞产生的 $\psi(2S)$ 可以得到许多次生粲偶素($\psi(2S)$ 通过放出光子或轻强子跃迁到能量更低的粲偶素激发态)。在BES之前,国际上已经有一些实验积累了一定的 $\psi(2S)$ 的数据来研究粲偶素。比如工作在SPEAR加速器上的Mark I、Mark II、Mark III和Crystal Ball以及工作在DORIS加速器上的PLUTO和DASP等。这些实验发现了许多新物理态,测量了部分衰变分支比。但它们的数据量小,研究相对较少,得到的结果误差很大。

1992年(或更早),BESI实验组的部分成员开始关注 $\psi(2S)$ 物理。但那时BESI并没有正式为 $\psi(2S)$ 物理采集的数据,所以他们利用两批为刻度探测器而采集的 $\psi(2S)$ 数据开展了一些研究摸索。直至1993~1994运行年,BESI在1993年12月12日到1994年1月6日,26天的时间内首次获取了130万个 $\psi(2S)$ 事例。第二次在 $\psi(2S)$ 峰上取数是从1995年1月1日到4月1日,90天获取了250万个 $\psi(2S)$ 事例。

BESII与BESIII实验继续累积大统计量的 $\psi(2S)$ 数据来进行物理分析。BESII期间,从2001年11月22日至2002年3月13日共取数111天,获取了1400万个 $\psi(2S)$ 事例,直到2006年这一直是世界上最大的样本。BESIII期间,从2009年3月6日至2009年4月14日以及2011年12月31日至2012年3月30日共134天的时间里在 $\psi(2S)$ 的峰上两次取数,一共积累了4.48亿个 $\psi(2S)$ 事例。这是目前世界上最大的 $\psi(2S)$ 样本。

基于这些数据,BES进行了一系列 $\psi(2S)$ 及次生粲偶素物理的研究,在国际上重新唤起了粲偶素物理研究的热潮,并从此使中国在该领域处于国际领先地位。一些主要的物理成果有:关于“ $\rho\pi$ 疑难”的系统研究、 $\psi(2S)$ 的电磁衰变与强衰变之间的相对相

角的测量、大量 $\psi(2S)$ 与 χ_{c1} ^④衰变分支比的测量、首家报道未观测到五夸克态 $\Theta(1540)$ 、 $\psi(2S)\rightarrow\pi^0 h_c$ 的强跃迁过程、 $\eta_c(1S)$ 的质量与宽度的精确测量、 $\psi(3D_2)$ 的态的发现、 h_c 辐射跃迁到轻强子态,等等。其中特别值得一提的是BESIII首次观测到磁偶极跃迁 $\psi(2S)\rightarrow\gamma\eta_c(2S)$ 。这是从BESI就开始的寻找。囿于当时的统计量和探测器精度,在BESI并没有发现任何的迹象,而是历经两次升级之后才终于在第三代探测器BESIII首次有了 10σ 显著性^⑤的发现。至此,BES三代物理学家18年的努力终于有了丰厚的回报。

下面我们来谈一下BES上关于“ $\rho\pi$ 疑难”的系统研究。

三、“12%规则”与“ $\rho\pi$ 疑难”

如同武器专家可以通过炸弹爆炸后弹片的大小与飞行速度研究炸弹内部的爆炸机制一样,高能实验物理学家可以通过分析母粒子衰变成不同子粒子发生的几率大小、末态子粒子的飞行方向等来研究母粒子的结构及衰变发生的动力学机制。BES实验利用正负电子对撞机来获得大量粲偶素的样本,通过研究粲偶素的衰变可以获得关于低能强相互作用的信息。分析这些实验数据,如果发现与我们预期不一致的现象就预示着这里有新的未知的事情发生着,从而为理论模型的进一步发展提供依据。经过研究这些新的现象,人类的知识得到进一步扩展。比如在三代BES实验上都有过系统研究的“ $\rho\pi$ 疑难”就是这样的一个例子。

在粲偶素中,粲夸克和反粲夸克毫不停歇地运动着,湮灭发生在它们在同一点相遇的时候。如此说来,不管是通过光子衰变到一对正负电子,还是通过三个胶子衰变到轻强子,粲偶素的衰变都会同样由其内部的正反粲夸克出现在同一点的几率决定,两种不同的衰变被联系起来。阿派奎斯特和玻利策在他们的开创性论文中指出了这一点。如果这是正确的物理图像, $\psi(2S)$ 和 J/ψ 衰变到相同的轻强子

的分支比^⑥就可以与它们衰变到正负电子对的分支比联系起来。因为 $\psi(2S)$ 可以衰变到 J/ψ 再加上一些轻介子,很显然, $\psi(2S)$ 衰变到正负电子对的分支比就会比 J/ψ 的小。20世纪80年代初的实验结果显示,它们的比值只有12%左右^⑦。因此,理论预期 $\psi(2S)$ 和 J/ψ 通过三个胶子衰变到相同轻强子末态的分支比的比值也应该大约是12%,这被称作“12%规则”。

1983年,Mark II实验(发现 ψ 粒子的是Mark I实验)首次对上述规则进行了系统的检验,发现在很多过程满足此规则的情况下,没有观测到 $\psi(2S)$ 衰变到 $\rho\pi$ 末态的过程。在这里, π 称为派介子,它是最轻的介子,也是最轻的强子,质量只有质子质量的大约七分之一; ρ 则是一个重得多的介子,质量大约是 π 介子的5.5倍。这两个介子的质量加起来仍然比 J/ψ 轻得多,所以 J/ψ 和 $\psi(2S)$ 都可以衰变到它们;根据爱因斯坦的质能关系,多出来的质量会转变成 ρ 和 π 介子的动能。Mark II实验第一次观测到了 J/ψ 到 ρ 和 π 介子的衰变,但是并没有看到一点 $\psi(2S)$ 衰变到同样的末态的信号,测量结果表明 $\psi(2S)$ 与 J/ψ 衰变到 $\rho\pi$ 末态的分支比的比值至少要比12%小20倍,完全出乎意料!所谓的“ $\rho\pi$ 疑难”起始于此。

BES实验根据测得的大量 $\psi(2S)$ 衰变数据资料,在不同末态介子组合模式的两介子衰变过程和辐射衰变过程中做了系统的研究,发现了一系列反常现象。比如,2005年,BESII首次观测到 $\psi(2S)$ 衰变到 $\rho\pi$ 的过程(这是当年在Mark II没有看到的)。结果显示相对于12%规则的压低大概在40倍左右。通过系统分析各类测量结果,既发现了大量满足“12%规则”的衰变道,也发现了大量相对于“12%规则”反常压低、甚至是反常增强的衰变道。这些结果大大扩展了早期文献曾经报道的粲夸克偶素强衰变疑难的物理内容,引发了进一步探究粲夸克偶素强衰变机制的新的理论努力。

我们已经知道描述强相互作用的理论是QCD,为什么还会有这种难以理解的疑难问题存在呢?这本质上是QCD的非微扰特性决定的^⑧。从1997年到2006年间,受BES测量结果的启发,国内外接

连提出了近十个理论模型尝试对新现象进行解释。一个合适的理论模型,在理解粲偶素衰变机制时应该综合考虑各种衰变模式,以期解释所有的实验事实。只有这样的模型,才有可能接近物理现实的。目前的实验数据已经将13个解释“ $\rho\pi$ 疑难”的理论模型中的9个排除,并对另外的4个模型预言与实验进行了全面的对比。我们还需要测量更多的衰变模式,构造最符合物理现实的理论模型,揭示出“ $\rho\pi$ 疑难”背后的物理图像。

四、从粲偶素到类粲偶素

2003年以前发现的粲偶素都很容易地在夸克模型的预言里找到自己的位置(参见图1)。然而,2003年以后的众多发现却似乎无家可归。当把它们性质与夸克模型相比时,总会出现这样那样的问题:比如质量不一致、衰变的模式不符合预期、具有同样量子数的结构数目太多等。我们把这些新发现的、搞不清楚到底怎么回事的结构称为类粲偶素,也称为XYZ态。Z粒子可以是中性的也可以是带电的,且每一个Z粒子会有两个与它除了电荷其他性质几乎一模一样的“伙伴粒子”(物理上有个专有名词把它们统称为同位旋多重态)。而X和Y粒子全都是中性的。其中,Y粒子现在特指矢量粒子,相较于X和Z,它们可以通过正负电子对的湮灭在正负电子对撞实验上大量直接产生。

这些XYZ态中最有意思的一个是2013年在BESIII实验上发现的,被称为 $Z_c(3900)$ (3900表示以MeV为单位的质量)的共振态。前面已经提到过,两个夸克可以组成介子,三个夸克可以组成重子,那么有没有超出这个图像的奇特强子态,比如由4个或更多夸克组成的多夸克态强子呢(见图2)?对这个问题答案的追寻数十年以来一直是多个高能物理实验(包括BES)的目标之一。但是如何寻找多夸克态呢?BESIII的物理学家想到可以通过在正负电子湮灭到 $J/\psi\pi^+\pi^-$ 的末态中 J/ψ 与任意一个带电的 π 介子的组合质量谱中寻找新的共振态粒子。假如有这样的共振态存在,它里面必定含有比较重的

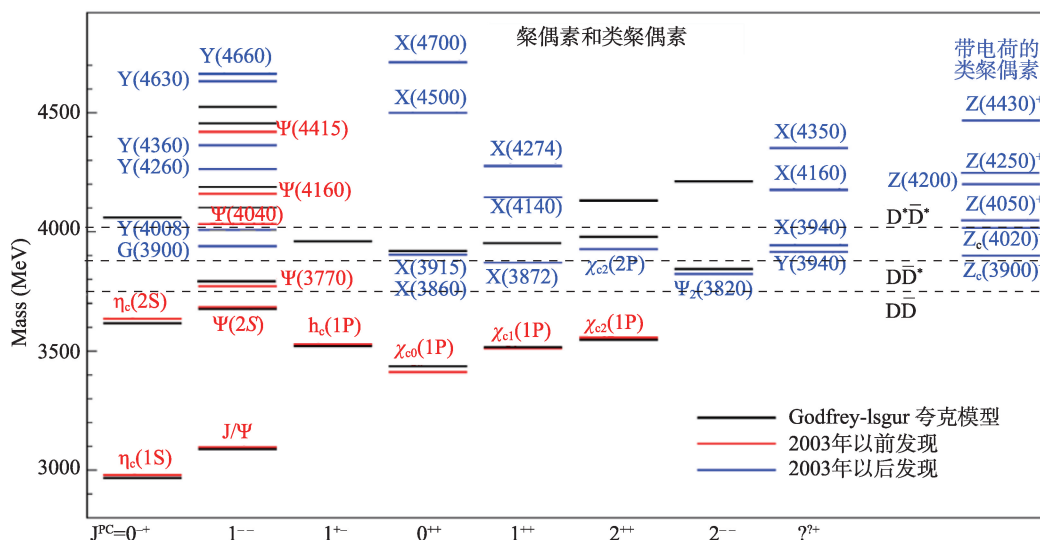


图1 粲偶素家族谱系。横坐标为量子数,其中J表示自旋,P表示宇称,C表示电荷共轭宇称,纵坐标为质量。黑线表示 Godfrey-Isgur 夸克模型中预言的粲偶素质量谱,红线表示2003年以前的实验里发现的粲偶素,黑线表示2003年以后实验上发现的粲偶素和类粲偶素

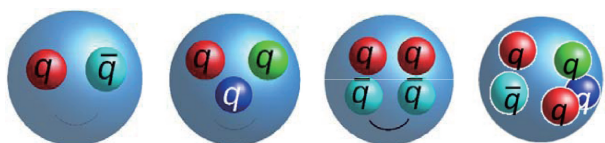


图2 从左到右依次是普通介子、普通重子、四夸克态和五夸克态

粲夸克和反粲夸克(这个共振态衰变之后,这对正反粲夸克组成了末态的 J/ψ 粒子),且带有和电子相同或相反的电荷。因此,它便不可能是由一对夸克和反夸克组成的介子,而是至少含有四个夸克。如果能在 J/ψ 与带电的 π 介子的能谱中看到峰状的结构,它便很有可能是科学家们长期寻找的奇特强子。

早在2011年,BESIII就已经在4.009 GeV的能量点获取了大约 500 pb^{-1} 的正负电子对撞数据^⑨,尝试在其中寻找多夸克态粒子。可惜数据分析显示没有明显的新粒子的迹象。到了2012年的夏天,加速器直线部分进行了一次十分关键的升级。升级完成之后,BEPCII正负电子对撞所能达到的最大质心能量从4.2 GeV提升到4.6 GeV,使得在更高的能量采集数据成为可能。就在这年的12月14日到次年的1月14日之间的一个月, BESIII在比4.009 GeV更高的4.26 GeV这一能量点又获取了 525 pb^{-1} 的正负电子对撞数据。合作组的成员们充满热情地工作,在短短三个多月的时间内就完成了对数据

的质量检查、刻度、物理分析等一系列工作,并在 J/ψ 与 π 介子的组合质量谱中兴奋地发现了一个前所未有的、带电的结构(如图3所示)。这个与粲夸克相关的新结构因为它的质量大约是3.9 GeV(39亿电子伏特,约为质子质量的4.1倍),所以将之命名为 $Z_c(3900)^+$ 。它就很有可能物理学家们长期寻找的四夸克态!就在此时,消息传来,由日本高能加速器研究机构(KEK)主导的Belle实验也在相同的末态中看到了这个粒子。得知这个消息后,BESIII的物理分析工作者更加努力地工作,召开了数次会议研究如何加快分析与发表文章的进程,并成立了专门由资深研究员与教授组成的合作组内部审核

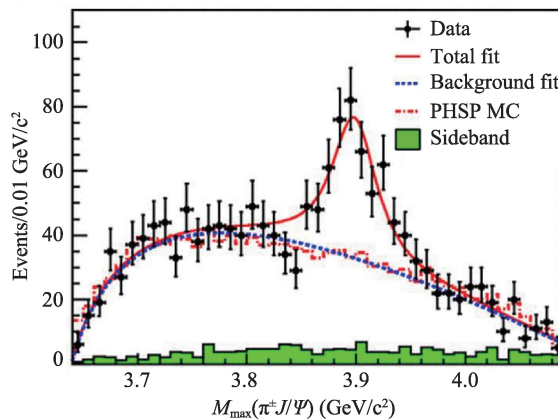


图3 $\pi J/\psi$ 组合质量分布图上清晰可见的 $Z_c(3900)$ 峰状结构

小组。在大家的通力合作下,仅仅用了一个多星期就完成了物理分析文章的系统误差分析、撰写、内部审阅等一系列工作。在2013年3月24日,一篇题为《在质心能量为4.26 GeV正负电子到 $\pi^+\pi^-J/\psi$ 的过程中观察到带电类粲偶素的结构》的BESIII署名文章提交到了arXiv预印本网站上,并投稿至《物理快报评论》。而Belle关于 $Z_c(3900)^+$ 的文章直到3月30日才提交到预印本网站,比BES III晚了近一周。稍后,由美国的实验物理学家通过分析康奈尔大学CLEOc实验的数据也证实了 $Z_c(3900)^+$ 的存在。2018年,美国费米实验室的D0实验上也发现了 $Z_c(3900)^+$ 的踪迹。

$Z_c(3900)^+$ 的发现得到国际物理学界的高度评价——被美国物理学会《物理》杂志评为2013年11个物理学重要发现之首,并引发了大量的理论研究。《自然》杂志发表文章,强调“找到一个四夸克构成的粒子将意味着宇宙中存在奇特态物质”。截止文章撰写之时,依据INSPIRE数据库的统计,BESIII首次发现 $Z_c(3900)^+$ 的文章已有超过660次引用。接下来,BES III合作组针对XYZ的研究在4.0 GeV以上的能量点获取了更多的数据。比如在2013年利用4.26 GeV的数据发现了 $Z_c(3900)^+$ 之后,BES III在经过一个快速扫描之后,确定了正负电子的截面在4.23 GeV更高,于是把能量降低至4.23 GeV又获取了约 1000 pb^{-1} 的数据。在接下来的几年中,BES III有计划、有步骤地在4.15至4.60 GeV的能量区域获取了约 17000 pb^{-1} 的正负电子对撞数据,并利用这些数据在进一步的实验中针对四夸克态做了系统的研究,获得了大量令人激动的结果。比如发现了性质类似、质量略高的 $Z_c(4020)^+$;发现了与 $Z_c(3900)^+$ / $Z_c(4020)^+$ 相对应的中性粒子;发现了它们的新的衰变模式等。

除了 $Z_c(3900)^+$ 和 $Z_c(4020)^+$ 的发现之外,BES III在其他XYZ类粲偶素的研究中也发挥了并正在发挥重要作用。因为Y粒子与光子具有同样的量子数,所以可以在电子和正电子的对撞中直接产生。BES III实验中,将大量的正负电子在类粲偶素

Y(4260)的质量附近相撞,使得对它的研究进入了精细结构的阶段;并将Y(4260)变成了产生 Z_c 和实验上发现的第一个类粲偶素X(3872)的源泉。

寻找超出传统夸克模型图像的奇特强子态一直是BES实验最重要的物理目标之一, $Z_c(3900)^+$ 等类粲偶素的发现为研究强相互作用的物质结构、寻找和研究奇特强子态开启了一扇大门,对于加深人类对物质基本结构的理解具有重要的科学意义。目前,这些XYZ类粲偶素的内部结构还没有定论,需要更深入细致的实验和理论研究。

五、展望未来

从BES I、BES II到BES III,北京谱仪实验一直是世界上运行的最重要的(类)粲偶素研究的高能物理实验。在这30年里,BES在对粲偶素和类粲偶素的研究中功勋卓著,以上我们主要提到的“ $\rho\pi$ 疑难”的研究和 $Z_c(3900)$ 的发现只不过是众多重要成果中与(类)粲偶素相关的两个例子。时光荏苒、光阴似箭,一转眼30年就过去了。BES实验也经过了BES I、BES II、BES III三代探测器的升级换代。目前的BES III实验仍将在更多的能量点继续获取海量的正负电子对撞数据。特别是在2019年的夏天BEPC II加速器将经过改造将最大质心能量从4.6 GeV提升到4.9 GeV,这使类粲偶素的研究有更大的潜力与空间。比如在更高的能量点可以研究在Belle实验中通过 $\pi^+\pi^-\psi(2S)$ 和 $\Lambda_c^+\Lambda_c^-$ 末态发现的Y(4660),也可以寻找含有奇异夸克的多夸克候选者 Z_{cs} 。我们有理由相信,BESIII必将在粲偶素及类粲偶素的物理上做出更多重大的发现与进行更加精确的测量,保持国际领先,为我们了解这一能量区域的强相互作用提供进一步的洞见。

① 第四种夸克的想法最早由原康夫(Yasuo Hara)于1963年提出(基于盖尔曼的八正法思想,他提出四种基本重子,可看作四种味道的夸克的早期版本);1964年,比约肯(James Bjorken)和格拉肖称之为“粲”(charm);随后,通过所谓的GIM(Glashow-Illiopolis-Maiani)机制,粲夸克成为电弱统一理论的重要一环。

② 他们的文章完成于1974年8月,发表于1975年的《现代物理评

- 论》(Review of Modern Physics),发表版本的尾注中增加了对于新发现的粲偶素的讨论。
- ③ 他们关注的问题是“ R 值危机”,关于 R 值的概念及其研究进展介绍,参见《北京谱仪上的 R 值测量》。
 - ④ 在 J/ψ 和 $\psi(2S)$ 被发现以后,实验物理学家又陆续发现了其他一些粲偶素。每一个粲偶素都有自己的名字,比如 η_c , χ_{c0} , h_c 等,不同字母的名字对应于不同的量子数。
 - ⑤ 在粒子物理实验中用 σ 的倍数来表征信号的显著性;一般认为 3σ 的显著性表示“有迹象”,大于等于 5σ 的显著性能称得上“发现”。
 - ⑥ 分支比指的是一个粒子衰变到某些更轻的粒子的可能性,取值在0到1之间,通常写为百分数。
 - ⑦ 现在更精确的测量则为13%左右。
 - ⑧ 在低能量区域的非微扰特性使得强相互作用的物理中存在众多疑难问题,除了本文谈到的XYZ类粲偶素问题、 $\rho\pi$ 疑难之外,比较著名的还有涉及到质子的质子自旋危机和质子半径疑难等。
 - ⑨ pb^{-1} 是一个粒子物理学中的亮度单位。实验获取数据的亮度越高,意味着对撞的次数越多,实验学家也获得了更大统计量的数据可用于物理分析。



科苑快讯

科学家发现吞噬海洋塑料垃圾的微生物

塑料占有所有海洋垃圾中的70%,给无数水生生物带来危险。但还是有一丝希望的——准确来说是很小的希望:科学家发现一种微小的海洋微生物在侵蚀塑料,导致这些垃圾在缓慢地分解。

为了进行这项研究,研究人员从希腊查尼亚(Chania)两处不同海滩收集风化塑料。垃圾已经暴露在阳光下并经历化学变化,使其变得更加脆弱,所有这些都需要在微生物津津有味地咀嚼这些垃圾之前发生。这些塑料碎片,要么是最常见的聚乙烯,也是购物袋和洗发水瓶子用的那种塑料,要么就是聚苯乙烯,即食品包装和电子产品中使用的硬塑料。研究小组将天然存在的微生物或工程微生物(食碳功能增强菌株)浸入海水中,这些微生物能够仅仅通过食用塑料中的碳而存活。然后,科学家们在5个月内分析了这些材料的变化。

科学家在2019年4月的《危害性材料学报》(*Journal of Hazardous Materials*)上做了报告,接触天然微生物



和工程微生物的两种塑料,重量显著减轻。微生物进一步改变了材料的化学组成,导致聚乙烯重量下降7%、聚苯乙烯重量下降11%。这些发现有助于提供一种治理海洋污染的新策略:部署海洋微生物吃掉垃圾。然而,研究人员仍需考量这些微生物在全球范围内的有效性。

(高凌云编译自2019年5月20日 www.sciencemag.org)