

# 当比原子还小的东西裂开时

## ——BESIII上粲偶素衰变研究

朱 凯

(中国科学院高能物理研究所 100049)

导言:原子的古希腊原义是“不可分割的”,被公元前五世纪的哲学家德谟克利特视为构成世界的基本单元。从某种程度上来说,这种看法有相当大的合理性。因为原子非常非常非常小——典型的原子半径约为纳米级( $10^{-9}$ 米)。一个原子与一个乒乓球之间的体积比,大致相当于一颗篮球与地球之间的体积比。但是,我们这篇文章的主角们比最小的原子还要小上8亿亿倍!它们叫粲偶素,是一种在自然界中并不存在的粒子——仅在物理学家的高能实验中才能产生。我将讲述它们在北京谱仪III(英文缩写为BESIII)这个大舞台上华丽现身与变身的故事。

### 一、什么是粲偶素

现代物理已经证实了原子并非组成物质的基本单元,它们可以分割,是由更加基本的质子、中子与电子组成;而质子和中子,也并非构成物质的基本单元,它们由夸克与胶子组成。至于夸克和胶子是不是构成物质的基本单元,现在还未可知。但目前在高能物理学界被广泛接受的“标准模型”将夸克与胶子,还有电子、中微子等其他粒子视为基本粒子。

在英语中,夸克(quark)除了表示一种基本粒子,还可以表示一种德国产的奶酪食品。可能是由于这个原因,当它作为基本粒子用时,也被物理学家们赋予了六种“味道”,分别是:番茄味、烧烤味、焦糖味……啊,不对,作为粒子,夸克的六种味道是:上、下、奇异、粲、底、顶——物理学家们起的名字还真是让人没有食欲——分别用英文字母u, d, s, c, b, t来表示。不管怎么说,质子和中子是由上夸克与下夸克两种夸克组成的,所以也可以说上夸克与下夸克在自然界中无处不在,它们是六种夸克中最轻的两种。而粲夸克——它在自然界中的占比很小——则比上、下夸克要重1000倍左右。由一个粲夸克和一个反粲夸克构成的粒子就是粲偶素。如图1所示,类比于双人滑选手,当正反粲夸克在一起时的自我旋转指向不同、相互绕动的方式不同、之间的距离不同时,可以组合成不同的粲偶素。

粲偶素们在一起就构成了和睦的粲偶素大家庭,尽管有些理论预期的家庭成员还未在实验中找到,也有些家庭成员的特征还不清楚——例如它们精确的质量与寿命,物理学家还是尝试给他们画了一张全家福(实际上此全家福里只包含了质量较轻的部分粲偶素),如图2所示。每一个小框里就是一

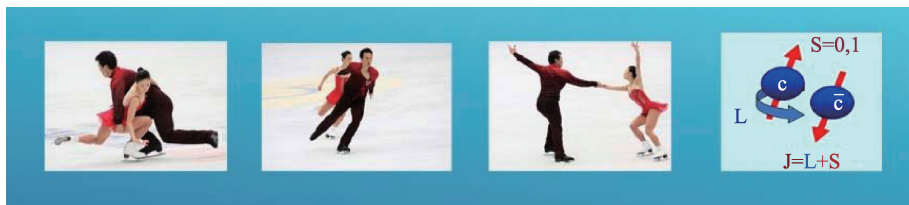


图1 两位滑冰运动员不同的旋转、之间的位置、相互绕动等决定了不同的势能大小

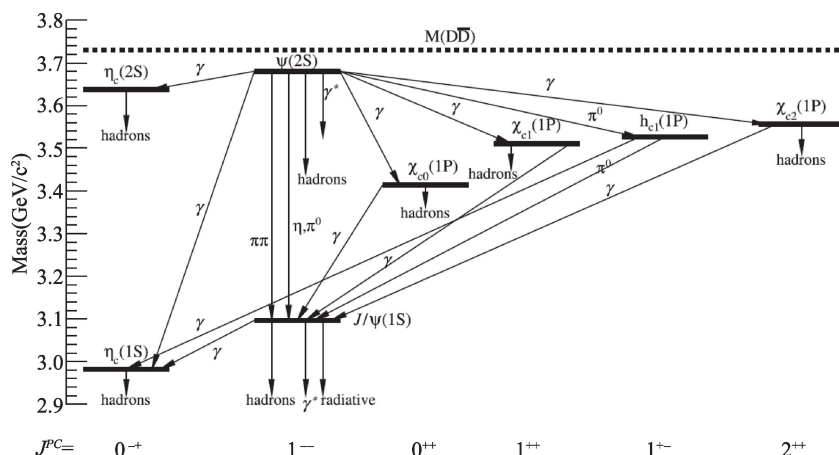


图2 粲(正反D介子对)阈以下粲偶素全家福

个粲偶素的名字,其中 $\eta$ 、 $\psi$ 、 $\chi$ 是希腊字母,分别读作“伊塔”“婆塞”“凯”。纵坐标标示的是这些粒子的质量,由下至上按从小到大的顺序排列,也就是越靠下的粒子越轻。 $\text{GeV}/c^2$ 是质量单位, $\text{GeV}$ 的意思是 $10^9$  eV亦即10亿电子伏,而 $c$ 是光速。横坐标标示的是这些粒子的自旋与宇称之类的“量子数”——它们只能是整数或半整数——用来标记量子世界中粒子的特征,类似于人类世界中的人种与性别。

## 二、为什么要研究粲偶素

有的读者看到这里会问了:你这个什么粲偶素看上去的确还蛮高大上的,跟我每天早上吃的包子不一样。但研究它有什么意义呢?能让我的包子变得更香嘛?

在深入探讨世俗的包子味道之前,让我来问读者您一个问题吧。您知道我们这个宇宙,从最基本的角度出发,是由什么维系着的吧?没错,它们是由物质与物质之间的相互作用(也就是我们常用的“力”)所维系的。目前物理学家公认有四种基本力:引力、电磁力、弱力、强力。引力大家都很熟悉,就是它让苹果砸到了牛顿老师的头上。电磁力是我们日常生活中最常见的力,不仅是明显的与电与磁相关的现象,还有许多一眼看上去与电与磁八竿子打不着的现象都是电磁力作用的结果。例如我

们能看见包子(光现象)、能拿起包子(依靠摩擦力)、闻到包子的气味及尝到包子的味道(分子间相互作用),它们的背后都是电磁力在起作用。至于弱力,它参与放射性衰变,与物质的稳定性密不可分。强力则是四种力中最强的,是它把原子核撮合在了一起。如果读者看过大刘的小说《三体》应该知道,里面有个外星人制造的超级飞行器——“水滴”——就是利用仅发生强相互作用的物质制成的,因此它无比坚硬、无比致密、无比光滑。当然,科幻小说只是科幻小说,现实中的地球物理学家们对强相互作用的认识还远远达不到利用它来制备材料的地步。在这四种基本的相互作用力中,物理学家理解得最好的要数电磁力,在将量子力学与场论的结合后,物理学家成功地把电磁力与弱力统一在一起了,发展出了计算电磁力的量子场论——量子电动力学,它可以让理论与实验在极高精度上契合。而对于强作用力,虽然目前也有被广泛接受与采用的相应量子场理论——量子色动力学(这个色……是颜色的色,但其实只是借用了红、绿、蓝来表征三个指标而已,将之换成天、地、人或者日、月、星也没有关系)——但关于强作用力仍有许多未解之谜。目前量子色动力学的最大问题在于:尽管在高能量区域它的正确性已经通过了实验检验,但在低能量区域,人们的能力有限,还不能精确推导,很多问题主要靠猜测。这是为什么呢?因为人们认识一个物

体通常采取的方法是打开它观察其内部结构。对应地,在理论计算时我们也按照某种规则对一个复杂系统进行分解研究。但是低能强子实际上是分不开的,亦即夸克不能单独出现在我们面前——由于单个夸克带有颜色,所以这个规律也被称为“色禁闭效应”。如此一来,我们不得不依赖一些间接的方法。与玉石的鉴定类似:专家通过原石表面的纹路来推测其内部是否蕴有宝石,这里我们也通过对粒子的“可见”性质来推测它们的内部结构和性质。那什么样的粒子,适合拿来研究低能区的强相互作用呢?答案是:质量不大不小的粒子。由爱因斯坦著名的质能公式 $E=mc^2$ 大家知道:粒子的质量等价于它静止时的能量,我们在谈论它的质量时实际上也就是在谈论它对应的能量。类比于学习难度曲线理论——学习效果与学习难度之间存在一个中间的平衡点,学习者在适度的难度下能够获得最佳的学习效果,而过低或过高的难度都可能导致学习效果的下降;而粲偶素的质量恰好处于高能与低能交界的地方,既不高也不低,因此向来被视为研究强相互作用力的绝佳实验室。

读到这里大家想必已经明白,研究粲偶素主要是为了更好地理解基本相互作用力中的强相互作用力,为了更好地了解宇宙深层次运行的规律。听上去作者有点像个大忽悠,在这里给大家指了指星辰大海并顺手画了一个大饼。因为粲偶素的研究看上去“与能否让包子变得更香”的确没有关系——决定包子香不香的基本相互作用力是电磁力。但是,理想还是要有的,万一实现了呢。一旦我们在基础科学领域有了新突破——对强相互作用有了更深入的理解——很可能意味着我们将在能源、材料、交通等一系列应用科学上突飞猛进。也许某一天,我们会因此能在火星上种麦子、养猪、蒸包子。到那时候,回头来看看今天的大饼,也许会由衷地说一句:“这饼真香!”

### 三、北京谱仪 III 上如何研究粲偶素

前文已经说过,天然的粲偶素是非常稀有的,

高能物理实验学家们用一种叫“加速器”的实验装置可以大量“制造”出粲偶素。而北京正负电子对撞机,作为“大国重器”,正是这样的一台正负电子加速器。它通过交变的电场,将正电子与负电子加速到极高的、接近光的速度,然后通过磁场将它们聚焦,引导它们在合适的位置发生相互碰撞,产生粲偶素。这个粲偶素的制备过程与核弹爆炸的过程相反——核爆是把质量转化为能量,而制备粲偶素是把能量转化为质量——其加速运行功率以兆(百万)瓦为单位。而对于磁场聚焦的难度,一个通常的比喻是用地球上的一支步枪瞄准月球上的一只苍蝇——我觉得这个比喻很好,因为月球上没有空气,苍蝇在上面会成为死苍蝇——如果苍蝇还能飞来飞去,这个瞄准的难度可就太大了。北京谱仪 III 作为大型通用的质谱探测器,将对撞点几乎是全空间地包裹起来,收集碰撞产生粒子以及这些粒子衰变产生的次级粒子的信息,用于下一步的物理分析。北京谱仪 III 的示意图如图 3 所示。图的左下角画了一个普通成年人,用来表示谱仪的大概尺寸。图的右边列出了谱仪的各主要子探测器以及它们的性能指标。

粲偶素粒子是一种极其不稳定的粒子,加速器物理学家辛辛苦苦将它们产生出来,它们则立刻就衰变掉了。目前已知电子与质子的寿命几乎是无穷的,铀 235 的寿命大概是 7 亿年,人的寿命是百年(假设无病无灾不烟不酒),中子的寿命大概是 878 秒,而粲偶素家族中寿命最长的  $J/\psi$  粒子的寿命仅有中子寿命的 2 百万亿亿分之一。一个粲偶素粒子会衰变成两个或者更多质量更轻的粒子,有时这些由衰变产生的粒子还会再次发生衰变,就这样呈链式一直衰变下去,直至成为一些比较稳定的、能够在探测器中被探测到的粒子。这些粒子被称为末态粒子,它们有的是带电的,例如电子与质子;有的是电中性的,例如光子与中子。BESIII 探测器通过利用这些粒子与物质的相互作用产生的电信号或者光信号将它们的信息记录下来,然后通过它们在电场或磁场中的行为计算得到它们的动量与能量,接着由这些末态粒子的行为反推粲偶素的内部结



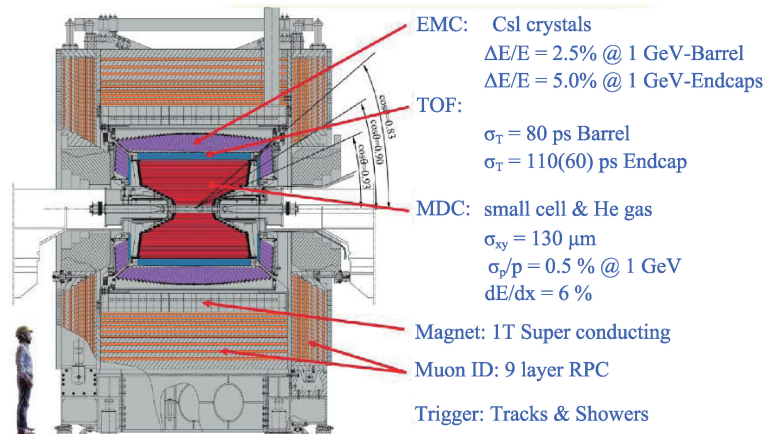


图3 北京谱仪 III 示意图及主要性能参数

构以及在衰变时的相互作用是如何发生的。

在粲偶素衰变中有一类特殊的衰变,它们叫做跃迁过程。与高能级的氢原子可以通过放出光子跃迁到低能级的氢原子类似,粲偶素的跃迁过程并非通过正反粲夸克湮灭而发生,而是保留了正反粲夸克,从一个较重的粲偶素衰变到一个较轻的粲偶素,并伴随放出一个光子(此时叫辐射跃迁)或轻介子。大多数粲偶素并不能在北京正负电子对撞机上直接产生。因此,为了研究这些粲偶素的衰变,一个方法是将正负电子的对撞能量调节在与 $\psi'$ 质量相等的地方,在北京谱仪 III 上获取大量(其实应该是海量,目前已经获取 27 亿)的 $\psi'$ 样本,再利用 $\psi'$ 跃迁到低质量的粲偶素来产生它们,并籍此研究它们的衰变。

#### 四、回顾与展望

接下来我们回顾一些对于北京谱仪 III 上粲偶素来说重要的时间节点以及发表的一些重要文章(图 4 中的第 X 篇按北京谱仪 III 发表文章排序)。自从 2009 年 3 月北京谱仪 III 开始正式在 $\psi'$ 峰上取数以来,北京谱仪通过 $\psi'$ 衰变测量了 $h_c$ 相关的系列分支比、观测到 $\chi_{c0}$ 衰变到两个矢量粒子的过程、在考虑了干涉效应的情况下精确测量了 $\eta_c$ 的质量与宽度、首次观测到 $\psi'$ 通过 M1 跃迁到 $\eta_c(2S)$ ,并且观测到 $\psi(3770)$ 衰变到 $\eta J/\psi$ 。2008 年及 2019 年发布的黄皮书与白皮书,为下一步物理研究指明了方向。

自从 2010 年北京谱仪 III 发表第一篇物理分析文章以来,截止目前(2023 年 6 月)一共发表了 96 篇与粲偶素衰变相关的文章。图 5 统计了一个历年来发表粲偶素文章情况。这些测量有许多是世界上的首次测量或者是最精确的测量,包括了粲偶素的

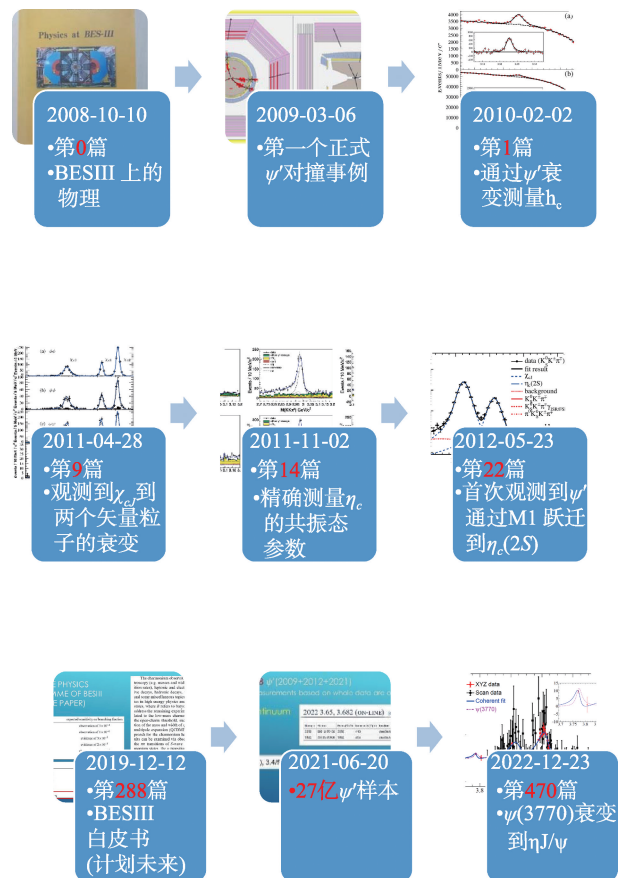


图4

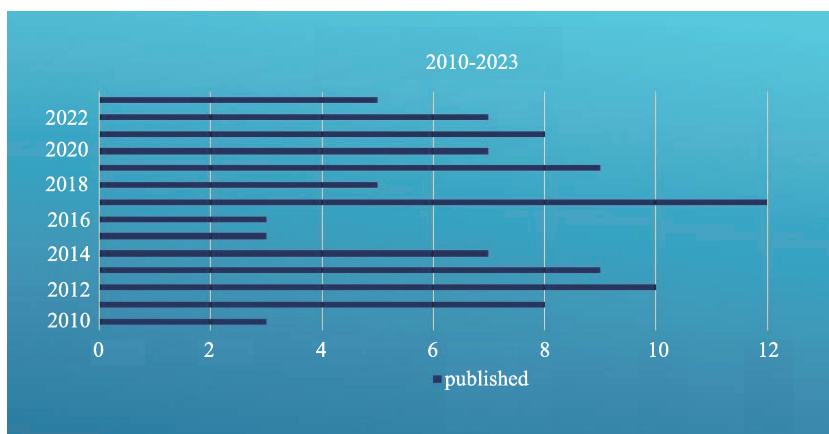


图5 历年 BESIII 发表文章统计

粒子参数或者各种衰变过程的几率,对我们理解粲偶素的产生、衰变机制、内部结构等提供了丰富且重要的信息,为进一步理解低能区域强相互作用力的性质夯实了实验基础。

目前北京谱仪 III 已经获取世界上最大的 27 亿

$\psi'$  样本。我们有理由相信,利用这批样本及在北京谱仪 III 上获取的其他样本,北京谱仪 III 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。



### 科苑快讯

## 令科学界震撼的新物质——水合固体

我们早就知道,生物材料会吸收周围的水分。但美国哥伦比亚大学的一项研究表明,松果、真菌和其他植物和树木等天然材料周围的水对其特性的影响,比以前所知的要重要得多,而且研究人员认为它们都属于一种新发现的物质——“水合固体”。

多年来,物理和化学领域一直认为,固体材料的性质从根本上由其所组成的原子和分子决定的。这一原则也适用于真菌、细菌和木材等物质,许多生物材料的特性实际上是由渗透在这些材料中的水创造的。水形成固体,并继续定义固体的性质,同时保持其液体特性。

这些材料被研究人员称之为“水合固体”,他们说“从渗透其空隙的流体中获得结构刚性,这是该固体状态的定义特征”。对生物物质的新认识,有助于回答困扰科学家多年的问题。

该论文作者之一哈雷尔森(Steven G. Harrellson)说:“如果你把生物材料想象成摩天大楼,分子积木就是支撑摩天大楼的钢构架,分子积木之间的水就是钢构架内的空气。我们发现一些摩天大楼不是由钢构架支撑的,而是由框架内的空气支撑的。”

水合作用在 20 世纪 70 年代被发现,但它对生物物质的影响被认为是有限的。而该论文的论点是,水合力几乎完全决定了生物物质的特征,包括它的软硬程度,比如一扇门在潮湿的天气里会膨胀。

研究小组发现,把水放在前面和中间,可以让他们用非常简单的数学来描述熟悉的有机材料所显示的特征。该团队发现的公式很简单,可以预测这些特性,而以前关于水如何与有机物相互作用的模型,需要先进的计算机模拟。

这一发现适用于我们周围的大部分世界,也就是占我们生活世界 50%~90% 的吸湿性生物材料,即允许水进出的生物材料,包括全世界所有的木材,还有其他我们熟悉的材料,比如竹子、棉花、松果、头发、指甲、植物花粉粒、动物外皮,以及帮助这些生物生存和繁殖的细菌和真菌孢子。而论文中创造的术语“水合固体”适用于任何对周围环境湿度有反应的天然材料模式。研究人员认为,应该把树木和植物看作是糖和蛋白质固定在适当位置的水塔。

(高凌云编译自 2023 年 6 月 21 日 SciTechDaily 网站)