

# 今夕何夕,见此“粲”者

## CERN前主任卢西亚诺·马亚尼谈 北京谱仪 BESIII

Philip Ball 著 马俊力<sup>1</sup> 译

(1. 中国科学院高能物理研究所 100049)

随着2012年希格斯玻色子的发现,粒子物理标准模型理论完美收官。标准模型涵盖对所有已知的亚原子粒子及其相互作用的描述。如今,大部分高能物理领域的研究者将其兴趣集中在了对标准模型之外“新物理学”的实验搜索上,然而认为标准模型已经被彻底理解却是错误的。许多已知粒子间的相互作用和结合方式仍不清楚,特别是在能量高至足以产生最奇特的粒子家族成员时仍然存在问题,例如在产生夸克(组成强子的六种成分,强子包括普通原子核中的质子和中子)和轻子(包括电子在内的一族粒子)的大质量种类时。

运行在中国科学院高能物理研究所内的北京正负电子对撞机(BEPC)是探索这些问题的装置之一。它于1988年开始运行,其上配备的探测器称为北京谱仪(BES)。该站点还设有北京同步辐射装置,提供高强度X射线进行凝聚态物理研究。2008年它们升级成为新一代装置: BESIII探测器和 BEPCII加速器,并持续运行至今。目前,该设施是研究新型奇特强子态——尤其是包含粲夸克的强子态——性质和行为的主要国际中心之一。

意大利物理学家卢西亚诺·马亚尼(Luciano Maiani)在1999至2003年担任欧洲核子研究中心CERN主任,是高能物理领域的世界级专家之一,曾在粲夸克的发现中发挥了核心作用。近期,《国家科学评论》(*National Science Review*, NSR)就 BEPCII最新研究工作的意义以及未来发现的前景对他进

行了采访。

**NSR:**跟之前的装置相比, BEPCII和 BESIII在能量区间、束流强度、探测灵敏度等方面有哪些提升?

**Maiani:** BEPCII属于一类特殊的粒子加速器——对撞环。这类装置最初是在20世纪60年代由奥地利物理学家布鲁诺·图舍克(Bruno Touschek)在意大利实现的。在这台机器中,两束粒子,也就是——一束电子( $e^-$ )和一束正电子( $e^+$ , 电子的反粒子),在极端真空下被加速并保持在两个环形轨道上。在轨道相交的地方,电子和正电子对头碰撞。在少数情况下,电子和正电子靠得如此之近,以至于它们会彼此湮灭,继而产生大量的亚原子粒子,于是就可以通过适当的粒子探测器进行研究。 BESIII就是这样一种探测器,它测量湮灭事件中产生粒子的能量、飞行方向、电荷和其他物理特性,从而确定它们的性质和它们之间的关联。对撞环的特征包括束流能量和亮度,前者决定能产生的粒子的最大质量,后者与束流中粒子的密度有关,决定对撞发生的频率。

BEPC可以产生含有一对正反粲夸克的粒子,例如伯顿·里克特(Burton Richter)和丁肇中发现的 $J/\psi$ 介子(这使他们获得了1976年的诺贝尔奖)。粒子探测器的性能取决于其测量粒子能量的精度,也就是“能量分辨率”,以及它们检测中性粒子(如光子)的能力,其中对中性粒子的探测在鉴别正负电子湮灭产生的新粒子中非常重要。 BEPCII和 BESIII这两个装置名称中, II和 III即表示相较于最初的设

计, BEPC 的亮度以及 BES 的能量分辨率和中性粒子探测能力都逐步提高。

**NSR:** 请您简要说明一下 BESIII 是如何工作的。

**Maiani:** 正负电子对湮灭会产生一个不稳定的粒子, 称为“共振态”, 它表现为在以能量为变量, 发生湮灭的概率分布(即“谱”)上的一个鼓包, 其宽度与粒子的寿命成反比。(根据海森堡的不确定性原理, 能量的不确定性与粒子的寿命成反比。)通过这种方式, 我们可以测定数量级在  $10^{-20}$  到  $10^{-23}$  秒的粒子的寿命, 这个时间尺度是我们的直接测量方法所永远无法达到的。20 世纪 70 年代, 加利福尼亚州斯坦福市的 SLAC 对撞机就是用这样的方式, 首次观察到了  $J/\psi$  粒子和许多其他粲夸克-反粲夸克束缚态。

除共振态之外, 许多其他粒子也会在湮灭中产生。共振态衰变产生的末态粒子中的其中几个本身也可能来自一个不稳定粒子的衰变。为了鉴别这个母粒子, 我们需要绘制这几个末态粒子总质量的分布图。该分布中的一个鼓包以及相应的宽度就给出了母粒子的质量和寿命。通过这种方式, BESIII 发现了命名为  $Z_c(3900)$  和  $Z_c(4020)$  的共振态, 这里括号中的数字表示以兆电子伏(MeV)为单位的的质量。与  $J/\psi$  不同, 这两个共振态是带电的, 这一事实意味着, 它们由一对正反粲夸克加上一对较轻的夸克组成。这些  $Z_c$  共振态的亚核粒子组分中, 包含至少两对夸克-反夸克, 比如  $Z_c^+$  是由一对  $c\bar{c}$  和一对  $u\bar{d}$  组成的。它们是最早被发现的此类粒子之一。

**NSR:** 世界上还有其他与 BESIII 运行方式类似的装置吗? 与其他装置, 比如欧洲核子研究中心的探测器相比, BESIII 的探测能力怎么样?

**Maiani:** BESIII 所研究的粒子属于由一对  $c\bar{c}$  夸克(称为粲偶素)加上其他成分组成的粒子。这类粒子被称为隐粲粒子, 因为它们的净粲量子数为零, 即粲夸克和反粲夸克的数量正好“抵消”。在像欧洲核子研究中心的大型强子对撞机(LHC)这样的高能强子对撞机中, 隐粲粒子也可以产生——但它们总是在具有大量其他粒子背景的事例中出现, 因

此很难看到这些共振态。低本底是 BEPCII 等正负电子对撞机的一个关键特征。

在此类设施(称为陶-粲工厂)中, BEPCII 目前拥有世界上最高的亮度。此外, 俄罗斯新西伯利亚 Budker 研究所的 VEPP2000 对撞机亮度较低, 它正计划在未来几年进行大幅升级。位于日本筑波市高能加速器研究机构(KEK)的 B 介子工厂的 Belle 探测器工作在更高能量下, 它可以选择初始粒子之一(电子或正电子)辐射光子失去能量, 从而正负电子湮灭的质心能量进入陶粲能区的事例, 从而研究隐粲粒子。

Belle 和 LHCb 两个实验组都取得了关于奇特强子态的有价值的成果。但就亮度和分辨率而言, BEPCII 和 BESIII 稳居全球隐粲粒子研究的前沿。

## 检验夸克间相互作用的理论

**NSR:** 人们已经建立起了一套完整的理论——量子色动力学(QCD)——从而根据轻夸克和胶子间的相互作用来描述“轻”强子的特性。但是在这个理论中似乎仍有疑难, 这其中的关键问题是什么?

**Maiani:** QCD 已经在质子对高能电子的大角度散射(深度非弹性散射)等现象中进行了检验。在这些条件下, 主导 QCD 相互作用的耦合系数很小——这种特性被称为渐近自由, 其发现使戴维·格罗斯(David Gross)、戴维·普利策(David Politzer)和弗兰克·维尔泽克(Franck Wilczek)获得了 2004 年的诺贝尔奖。在这些条件下, 可以与量子电动力学(描述物质-光相互作用的量子理论)非常类似地处理相互作用, 理论可以令人满意地描述实验结果。但是夸克结合成重子和介子(强子)的机制属于 QCD 作用机制中相互作用非常强的那部分, 此时如何在基本理论与夸克结合方式的细节之间建立联系尚未明确。这使得对强子谱的研究变得极其有趣, 因为这些实验可以为我们提供有关如何建立束缚态中, 特别是与最简单的  $c\bar{c}$  态(也即粲偶素)相比, 多夸克介子(例如共振态  $Z_c^+$ )中夸克结合的主要作用力的线索。因此, 多夸克态谱学是量子色动力

学中一个新的、很大程度上尚未探索的前沿。

**NSR:** 在低能轻强子体系中,似乎也预测了一些奇特的粒子和态,比如“胶球”。这些又是什么,为什么它们也很重要?

**Maiani:** 在QCD中,强相互作用由胶子传递。胶子是一种自旋为1的无质量粒子,它在许多方面类似于传递电磁力的光子,然而胶子之间还能够产生强烈的相互作用。因此人们设想,可能存在仅由胶子组成的束缚态,称为“胶球”,它在所有可能的基本粒子对称性下都是中性的。从理论上讲,很难将胶球与具有“单态”构型的夸克-反夸克态区分开来,在这种态中,夸克的排列使得所有可能的与对称性相关的量子数也呈现中性。目前,在极少数的几种情形下,观测到的单态粒子要比夸克模型预测的更多——这些粒子被认为是难以捉摸的胶球的候选者。

**NSR:** BESIII的主要目标之一似乎是探索重夸克(如粲夸克)相关的物理,而您在发现粲夸克的过程中发挥了关键作用。您能向我们讲讲这件事的经过吗?

**Maiani:** 如果强子就像默里·盖尔曼(Murray Gell-Mann)和乔治·茨威格(George Zweig)在1963年最初提出的那样,仅由三种夸克类型(上夸克、下夸克和奇异夸克)组成,这意味着由特定玻色子为中介,弱相互作用将诱导所谓卡比博跃迁的发生,其中u夸克通过弱相互作用粒子W与d和s夸克的特定组合相互转换,这种机制是尼古拉·卡比博(Nicola Cabibbo)提出的。1968年,人们的注意力集中在了所谓的“中性流过程”上,这种过程在弱相互作用的第一阶近似中是被禁止的,但可以通过在理论中加入“修正”效应来产生,其振幅原则上可以无限增加。1970年,谢尔登·格拉肖(Sheldon Glashow)、约翰·伊利奥普洛斯(John Iliopoulos)和我(按照姓氏首字母,三人合称为GIM)提出这些过程可能涉及第四种夸克,称为“粲”(c)。(这种夸克之前被其他人出于完全不同的理由提出过。)这个想法将一个三夸克理论中的难题变成了一种估算第四种夸克质量的方法。

在理论预测中粲夸克的质量足够大,因而可以解释20世纪60年代对包含粲夸克的介子的寻找为何没有成功。GIM机制是迈向电磁和弱相互作用统一理论的重要一步,它使得强子(受强相互作用控制)也能被包括在这一理论框架内。1974年 $J/\psi$ 粒子的发现证实了粲夸克的存在。

## 粲偶素的世界

**NSR:** 在粲物理中,“粲偶素”这一概念似乎占有中心地位。什么是粲偶素?

**Maiani:** 基于电弱理论对GIM机制所提出的中性流过程进行计算,结果确认了粲夸克具有大的质量: $M_c \approx 1.8 \text{ GeV}$ 。随着QCD的出现,粲夸克的大质量展现出了新的理论意义。众所周知,电子-正电子对可以形成被称为“电子偶素”的束缚态。1974年,托马斯·阿佩尔奎斯特(Thomas Appelquist)和戴维·普利策研究了由QCD力束缚的正反粲夸克对形成的类似态,并将其称之为“粲偶素”。这个想法被谢尔登·格拉肖、阿尔瓦罗·德·鲁茹拉(Alvaro de Rujula)和霍华德·乔治(Howard Georgi)用以解释此前刚刚发现的 $J/\psi$ 为什么非常之窄,这意味着该粒子可能是人们发现的第一个粲夸克构型(以隐粲的形式)。在接下来的几年里,许多研究者对继 $J/\psi$ 之后,在正负电子对撞机中发现的众多粲偶素进行了精确的定量计算。此后,正反底夸克对共振态的发现,又在更高质量上重现了这种成功。

**NSR:** 这一系列与粲夸克相关的可能存在的粒子、共振态和它们之间的跃迁实在让人眼花缭乱,您能否指出一些关键的问题,引导我们游览这一粲粒子“动物园”?

**Maiani:** 重夸克对很难被QCD力产生或摧毁。奇特强子态的第一个例子是一些共振态,其衰变产物包含一个粲偶素(即一对 $c\bar{c}$ ),但这些共振态不在QCD精确计算得出的粲偶素谱上。这种共振被称为“出乎意料的粲偶素”,并暂时分类为X、Y和Z态。2003年,日本的Belle实验组发现了第一个出乎意料的粲偶素X(3872);这种态衰变成 $J/\psi$ 和 $\pi\pi$

子。然而, X(3872)不可能是粲偶素,因为它的质量不符合预测,并且它的 $\pi$ 介子衰变不遵循纯粲偶素所遵循的规则。第二个出乎意料的粲偶素 Y(4260)是由美国 SLAC 的 BaBar 实验发现的,其质量也不符合粲偶素谱预期。2007年,第一个带电的出乎意料的粲偶素 Z(4430)由 Belle 实验找到,但同时 BaBar 实验的结果给这一共振态是否真正存在打上问号。2014年,欧洲核子研究中心的 LHCb 实验在更高的统计量下确认了 Z(4430)是一个真正的共振态。

2013年, BESIII 在末态含粲偶素的过程中发现了另外两种带电共振态  $Z_c(3900)$ (衰变为 $\pi$ 介子和  $J/\psi$ ) 和  $Z_c(4020)$ (衰变为 $\pi$ 介子和另一种与  $J/\psi$  具有相同自旋但相反宇称的粲偶素,表示为  $h_c$ )。在过去的 10 年中, BESIII 在对 Y 态的研究上产出了丰富的成果,并发现了 X(3872)、Y(4260)和  $Z_c(3900)$  态之间的相似性。

即便如此,关于在 X、Y 和 Z 共振态中夸克如何组织还没有达成共识。一种可能是“紧致的四夸克态”,其中一对夸克“ $cq$ ”通过 QCD 力与一对反夸克“ $\bar{c}\bar{q}$ ”结合,就像一个粲夸克和一个反粲夸克结合成介子那样。通过更高的统计量和分辨率, BESIII 可能有助于区分此模型和其他模型。

## 对新物理的寻找

**NSR:** 在 BESIII 发现新物理(也就是说,超出标准模型的物理)的前景如何? 你能推测一下它可能会发现什么吗? 例如,是否可能揭示暗物质,或者宇宙中物质和反物质数量不对称的起源?

**Maiani:** 关于暗物质,一个有吸引力的设想是暗物质由不与标准模型中的力耦合的新粒子组成。可能会存在一种新的光子,称为“暗光子”,对它而言,所有已知粒子所携带的“电荷”为零(意味着它们不与其相互作用)。但是由于量子力学效应,这个暗光子可以在很短的时间内表现得像普通光子一样,从而与电子、缪子( $\mu$ )等发生小的耦合。这意味着正负电子对撞机产生的一小部分粒子可能是暗光子,它们会在一些测量结果中,比如末态正负电子对的质量谱中,产生异常信号。以前的低

能量对撞机对暗光子的耦合强度和数量设置了限制。 BESIII 可以大大扩展探索这种耦合的范围,甚至可能发现暗光子的信号。

物质/反物质对称性在基本相互作用和大尺度宇宙中都被破坏——例如,太阳是由物质构成的,但是没有证据表明存在由反物质构成的反恒星或反星系。我们不知道这两种不对称是否相关,或者是否可以用前者来解释后者。 BESIII 可以通过测量粲介子弱衰变中的物质/反物质不对称性,将粲衰变中的不对称性与奇异介子和底介子中已知的不对称性进行比较,来阐明这个基本问题。目前,这个领域尚有很大的探索空间。

## 挑战时代下的合作组

**NSR:** 尽管中方成员占主导地位, BESIII 显然是一个高度国际化的合作组。作为欧洲核子研究中心的前任主任,您无疑非常清楚维护如此庞大的项目所面临的挑战。这其中会有怎样的挑战? 在新冠流行、国际旅行充满不确定性的时期,这些问题是否变得更加复杂?

**Maiani:** 在召集和运行国际合作的复杂实验方面,中国科学院高能物理研究所有着非常好的记录。 BESIII 实验的规模与 CERN 相比较小,但是它们的运行规则是相同的。就像 CERN 一样,新冠肺炎给线下合作带来了困难。但在目前,即便外方团队的工作地点被限制在各国境内,他们仍然可以在一定程度上做出贡献,例如数据分析、设备性能模拟等。如果能像现在的 CERN 一样,哪怕只是部分地恢复国际旅行,也会有很大帮助。

**NSR:** 与美国、欧洲和日本相比,中国在这一领域的研究有什么不同(如果有的话)? 每个地区是否都有自己独特的“口味”?

**Maiani:** 在过去的四年里,我大部分时间都在北京(高能物理研究所)和上海(上海交通大学)工作。除了生活方式、食物等方面的明显(有时是令人兴奋的)差异之外,我发现在研究领域、方法和灵感来源方面,科学是具有共通性的。

**NSR:** 研究人员,尤其是年轻的研究者,如何能在具有如此庞大团队的项目中展现自己?人们是否需要一种不同的精神,将科学成果视为团队无私合作的产物,而不是像许多其他领域一样,采取个人主义的方法?

**Maiani:** 人们必须将 BESIII 等大型合作组视为自己的“实验室”,它为小团队提供不同领域的研究条件(仪器、精密测量、数据分析、唯象学等)。在每个团队中,个人的才能、技能和独创性都可以大放异彩并受到赞赏。年轻的博士后可以向资深研究员展示解决当前问题的方法。通过这种方式,就像过去一样,一个年轻人可以获得声誉,让她或他在“实验室”内外承担更大的责任。法比奥拉·贾诺蒂

(Fabiola Gianotti)和王贻芳就是通过这样的途径,分别成为了 CERN 和高能物理研究所的主任。

注:本文为 NSR Interview 文章 *The search for charmed states of matter* 的中文版本,英文原文(*National Science Review*, Volume 8, Issue 11, November 2021, nwab008, <https://doi.org/10.1093/nsr/nwab008>)收录于 NSR“BESIII 物理”专题。

1. 著名物理学家、教育家王竹溪教授根据《诗经·绸缪》中的诗句“今夕何夕,见此粲者”,将“charm quark”译为“粲夸克”。这篇对粲夸克发现者之一马亚尼教授的采访讲述了粲夸克的发现以及对含粲物质寻找和研究的迷人历程,以及我国北京谱仪实验在这些研究中的卓越贡献。

扩展阅读:《现代物理知识》2019年第4期刊登“北京谱仪实验30年专题”,请感兴趣的读者进一步阅读。

封底说明

## 我国科学家发现距今 14.6 万年的龙人

在河北地质大学的地球博物馆里,陈列着一个人类的头骨化石,这可是该校的镇馆之宝。说起这个头骨化石,还有着一段离奇的故事。让我们将时光倒退到 1933 年的哈尔滨,那时的哈尔滨还在日寇的铁蹄下。一天,几名修建哈尔滨东江大桥的劳工在挖土时挖出了一个人类的头骨,于是劳工将这个头骨交给了在一旁站岗的一名中国士兵,而这名士兵听说过有关北京人头盖骨的事,于是就将这颗头骨藏了起来,并在日本人的眼皮底下悄悄带回家,并连夜将头骨包好,藏进一眼废弃的井中,并用土掩埋。转眼时间过去了八十多年,这件事也渐渐被人们遗忘了。时间到了 2017 年,当年的那名士兵早已故去,而他的后人恰巧在一次外出时在广西偶遇我国研究古人类的一名专家,于是说起此事,后在这名专家的初步鉴定下,这是一个古人类的头骨化石。这枚头盖骨在科学界一直受到广泛的关注,但围绕这个头盖骨众说纷纭,一直没有定论。后来随着科学手段的更新,科学家利用先进的科学仪器对这枚头骨进行了探测分析研究,这才使得这个沉寂了许久的古人类化石逐渐被掀开神秘的面纱。根据研究测定,这是个男性的头骨,年龄大约 50 岁,生活在距今大约 14.6 万年,而这一时期正是智人与其他古人类分道扬镳各自演化的关键时期。科学家发现这枚头骨大且粗壮,许多特征与

智人很相似,其脑容量达到 1420 毫升,这也与智人的脑容量不相上下。科学家推测,当时这群生活在高纬度的远古人类体格非常的结实强壮,这样才能抵御高纬度寒冷的气候。科学家还对化石及其所处环境进行了稀土元素浓度与 Sr 同位素分析,利用非破坏性 X 射线荧光分析检查其元素的分布情况。科学家还建立了特征、标本的数据库,利用计算机技术进行比对和分析,来找寻其与智人、尼安德特人、海德堡人、直立人等其他远古族群的演化关系。最终,科学家认为这是一支新的人类物种,这枚头盖骨也被命名为:“龙人”。龙人这脉支系与智人有着比尼安德特人更为接近的亲缘关系,拥有更近的共同祖先。而龙人与智人才是关系密切的姐妹群,这一成果颠覆了传统上认为智人与尼安德特人是姐妹群的观点。研究表明古人类可能早在 100 万年前就已经分开,并从此各自走向不同的演化之路。科学家还表示,根据新的演化系统分析,非洲是远古人类出走的诞生之地,而亚洲极有可能是古人类落脚的汇聚之所。该成果已在 Cell 出版集团旗下的 *The Innovation* 杂志发表,引起了国内外众多古人类学家的注意。接下来科学家们将在我国东北地区展开大规模的挖掘工作,以期挖掘和找寻到更多的化石与线索,让我们拭目以待更多的成果诞生。(博文)