

重子 CP 破坏：反物质消失疑难之钥

沈胤发 秦 溱

(华中科技大学物理学院 430074)

一、反物质都消失了？

首先，我们需要理解，什么是反物质？普通物质由基本粒子(以下简称为粒子)组成，而反物质是由基本反粒子(以下简称为反粒子)组成的物质，反粒子与粒子的质量相同，但电荷相反。一个典型的例子是，带负电荷的电子 e^- 的反粒子为带正电荷的正电子 e^+ 。当粒子和反粒子相遇时，它们会以完美的效率湮灭为光子，即转化为100%的纯能量。半克反物质与物质湮灭，释放的能量即相当于一颗投掷到广岛的“小男孩”原子弹，足以摧毁一座城市。

接下来，让我们插上想象的翅膀，回到宇宙最初的起点。根据当今的天文学观测和宇宙学理论，物理学家认为，我们所在的宇宙是“炸”出来的。起点亦是“奇点”——根据物理学家的推测，在奇点处，即在“大爆炸”发生时，时空表现出奇异性，温度

和密度等物理量趋于无穷大，我们还不理解为什么会发生这样的爆炸，已知的物理定律在这一点上似乎失效了。尽管目前物理学家尚未建立起描述奇点处物理规律的完整理论框架，但对于奇点之后的宇宙演化，我们已有了相当程度的理解。

在大爆炸发生约 10^{-35} 秒后，宇宙已经由一个奇点迅速膨胀至一颗西柚这么大(直径约10 cm)，并且处在一个温度约为千亿亿摄氏度(作为对比，太阳的表面温度只有约五千五百摄氏度)的环境中。在这一初期宇宙中，各种基本粒子及其反粒子——如光子、电子、正电子(电子的反粒子)，甚至是大名鼎鼎的希格斯玻色子等——都在不断发生激烈的碰撞，产生并湮灭。

宇宙不断膨胀，形象地说，就如同一口越来越大的“锅”，里面沸腾着“基本粒子汤”。在这口剧烈沸腾的“汤”里，各种粒子及其反粒子互相搅拌着，保持动态平衡。随着宇宙不断扩大，温度逐渐降低，“汤”也逐渐冷却。出于对称性的考虑，“汤”里粒子和反粒子的浓度应该是相等的。

如果这些数量相等的正反粒子完全互相湮灭成光子，那么宇宙中就只剩下光子在孤零零地跑着——它不会欣赏到跳着优雅维也纳华尔兹的脉冲双星，不会遇见锻造金属的“宇宙炼金术师”恒星，也不会赶上“一鲸落而万物生”的超新星葬礼，更不会在138亿年后，被一个名为“人类”的会思想的芦苇所捕捉到，解码它身上所蕴藏的远古信息。那将会是一个多么冰冷而又无趣的宇宙！

我们今天看到的是一个深邃又多彩的宇宙。因此，可以推测，必定存在某种机制，使得粒子和反粒子的行为出现了差异，从而产生了不对称性，导

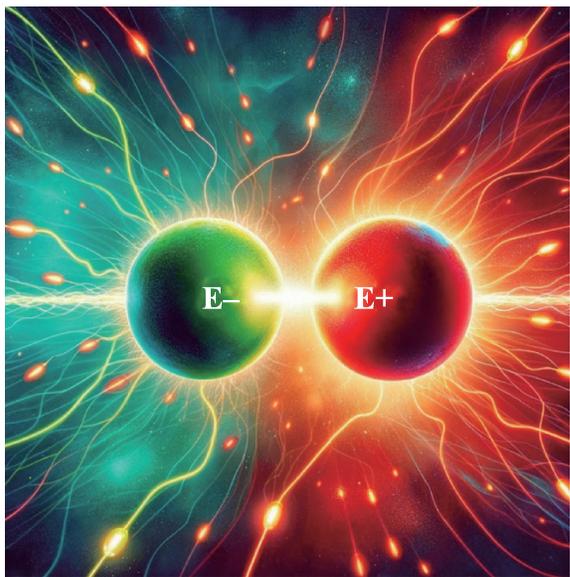


图1 正负电子湮灭为光子

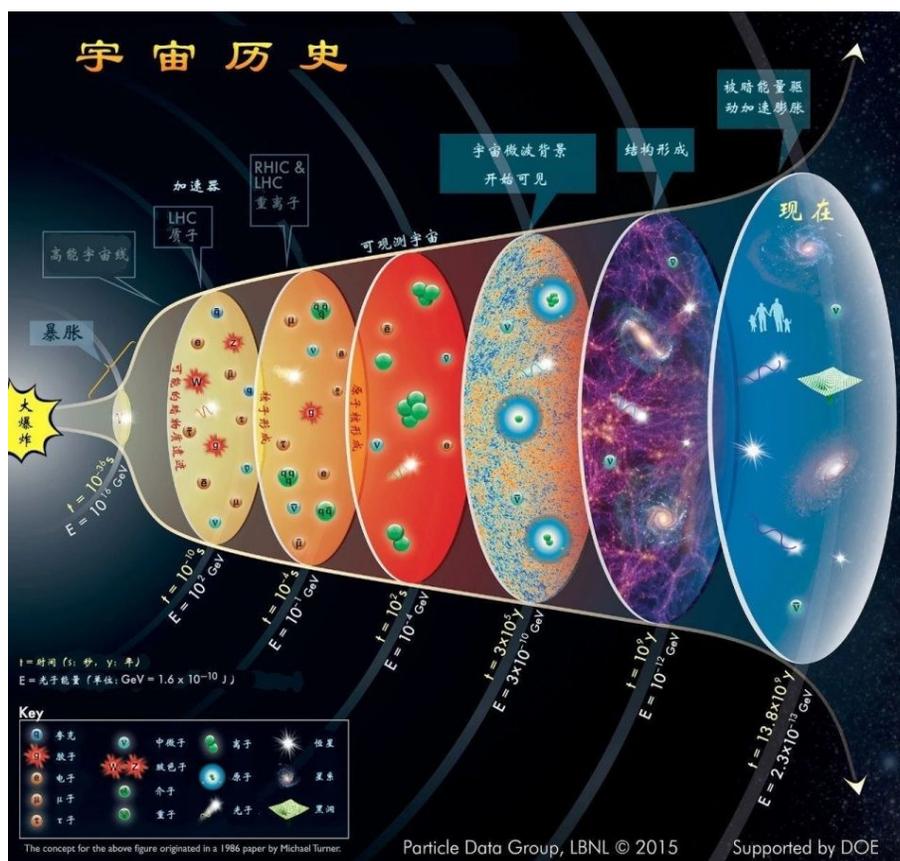


图2 宇宙的演化历史

致物质在这场史诗般的对决中战胜了反物质，塑造了今天这个璀璨壮丽的宇宙。那么，这究竟是什么样的机制呢？

苏联物理学家萨哈罗夫(Sakharov)曾对此进行过先驱性研究，他指出，要产生这种正反物质的不对称性，必须满足三个关键条件^[1]：(1) 存在使重子

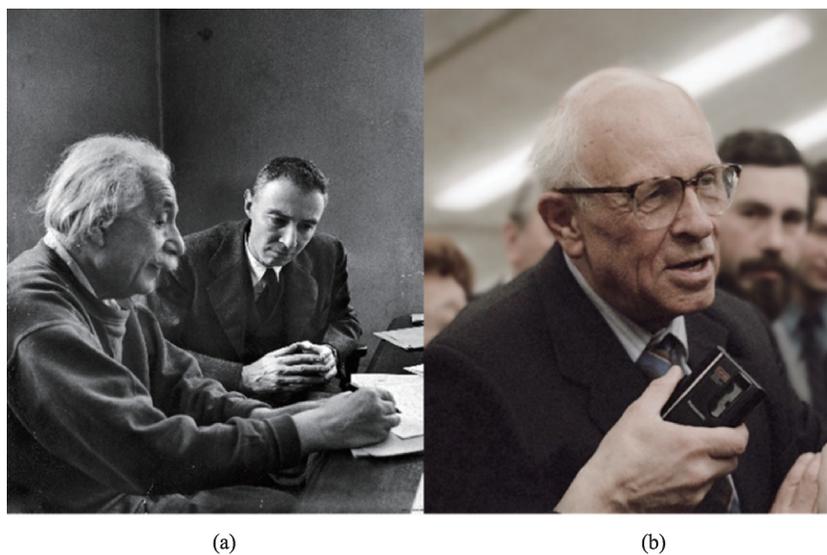


图3 爱因斯坦与奥本海默(a); 萨哈罗夫(b)

数不守恒的相互作用,即反应前后的重子数不相等;(2)脱离热平衡,从而正反物质的不对称性不会因被“搅匀”而消除;(3)存在C和CP对称性破坏。(注:萨哈罗夫曾参与苏联核武器的研制,后来转而反对核武器扩散,是一位类似于美国的奥本海默(Oppenheimer)那样的科学家。)

二、CP对称性及其破坏

什么是C和CP破坏?简单来说,它是指在粒子相互作用中,一种离散对称性被打破的现象。更具体地说,C代表“电荷共轭变换”(Charge Conjugation),亦即将某个粒子转变为其反粒子,例如,将带负电的电子变为带正电的正电子,或者将带正电的质子变为带负电的反质子。而P则是“宇称变换”(Parity),它涉及空间方向的翻转,比如将向左的箭头变为向右的箭头。

因此,CP变换就像是让一个粒子照一个“魔镜”,这个“魔镜”除了像普通镜子一样让其左右翻转,还会将粒子变成其反粒子。按照传统的经验,粒子与“魔镜”中的反粒子会做着类似的动作。如果存在某些原因,使得镜子内外的世界表现出截然不同的行为,那将会是一个匪夷所思却又极其有趣的现象。

在物理学史上,最早被发现破缺的离散对称性是P对称性。当时,物理学家们面临着一个谜题:有两种粒子,它们在衰变过程中表现出相反的宇称,

但在其他性质上却又极为相似,这就是著名的“ θ - τ ”之谜。而解开这个谜题的,正是李政道和杨振宁两位先生。他们在查阅了大量资料并反复论证后,大胆假设,这两种粒子实际上就是同一个粒子,只是在弱相互作用中宇称不守恒,因此表现出截然不同的衰变模式^[2]。

当时,许多著名物理学家对这一猜想表示怀疑。量子力学的奠基人之一、1945年诺贝尔物理学奖得主、被称为“上帝之鞭”的泡利曾说道:“我不相信,上帝是个弱的左撇子。”然而,戏剧性的是,科学的突破往往来自于那些最不被看好的地方。宇称破缺的猜想引起了实验物理学家吴健雄女士的关注。她立刻着手设计了一项实验,观察钴原子核的衰变,并最终显著的证据证明了这一猜想的正确性,震惊了物理学界^[3]。随后,李政道和杨振宁因此获得了1957年的诺贝尔物理学奖。

这一发现使得离散对称性的研究成为当时物理学的前沿领域之一。随后,物理学家们在 π 介子和 μ 子的弱衰变中也观察到了宇称不守恒的现象。这些发现促使费曼(Feynman)和盖尔曼(Gell-Mann)等学者提出关于弱相互作用的左手流理论^[4]。根据当今的物理学理论,带电流弱相互作用中P对称性呈现出最大程度的破缺,即只有左手粒子或右手反粒子参与弱相互作用。

尽管在弱相互作用中发现了宇称破缺,包括苏联的全才物理学家朗道(Landau)在内的科学家们仍

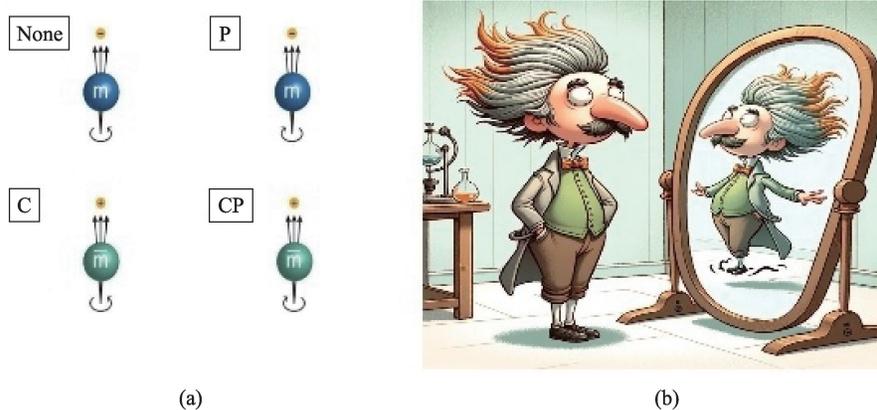


图4 C、P以及CP变换(a);CP破坏(b)

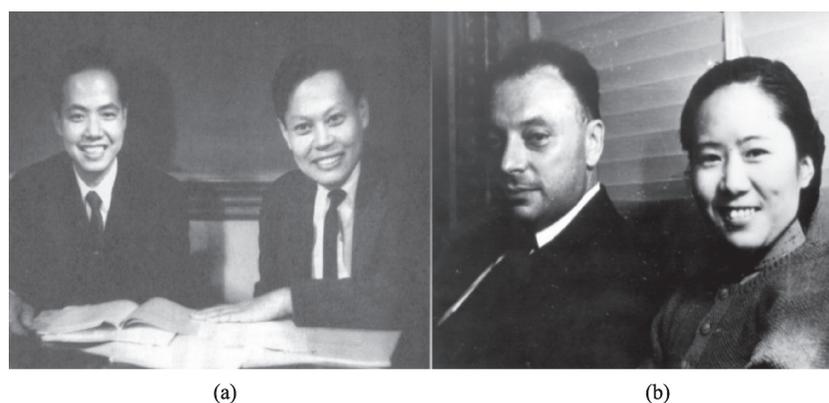


图5 李政道和杨振宁(a); 泡利和吴健雄(b)

然认为,CP对称性在弱相互作用中是守恒的。然而,科学的发展正是在不断地论证与推翻中前进的。1964年,在美国布鲁克海文(Brookhaven)国家实验室,实验物理学家们通过观察中性 K 介子的衰变,首次发现了弱相互作用中的CP破坏现象^[5]。这一发现最终获得了1980年的诺贝尔物理学奖。有意思的是,促使李政道和杨振宁两位先生提出宇称不守恒猜想的粒子,正是带电的 K 介子,它们内部均含有一种名为“奇异夸克”(strange quark)的基本粒子。如此说来, K 介子确实是“奇异”粒子,因为它总能给我们带来各种意想不到的惊人发现。

就像当年发现宇称破缺那样,CP破坏的首次发现激发了物理学家们的极大兴趣,推动他们在各种粒子中探索CP破坏现象。在发现中性 K 介子的CP破坏后的数十年中,科学家们陆续在 B 介子、 B_s 介子和 D 介子系统中观测到了CP破坏现象。

实验与理论如同物理学发展的两条腿:实验学家们不断地在寻找和验证CP破坏的证据,而理论学家们则根据这些实验结果提出解释CP破坏的理论机制,并通过对比实验数据来验证这些理论。1973年,理论物理学家小林诚(Makoto Kobayashi)和益川敏英(Toshihide Maskawa)在尼古拉·卡比博(Nicola Cabibbo)工作^[6]的基础上,提出了一种新的机制来解释CP破坏的起源^[7]。他们认为,CP破坏源于不同种类夸克(基本粒子之一,包括上文提到的奇异夸克)之间的弱相互作用,而这种相互作用

的强度可以通过卡比博-小林-益川(Cabibbo-Kobayashi-Maskawa)矩阵来定量描述。该机制的预言已经被实验所证实,这也使得两位物理学家在2008年获得了诺贝尔物理学奖。到目前为止,小林-益川机制仍是唯一被实验所证实的CP破坏机制。

值得一提的是,该机制预测至少需要六种不同种类的夸克才能导致CP破坏,而其中的第四种夸克——粲夸克(charm quark)——直到1974年才在实验中首次被发现(尽管在此之前,为了解释中性 K 介子只有极小可能衰变到两个 μ 子,理论家提出必须有粲夸克的存在,即GIM机制),这也展示了他们理论预言的前瞻性和大胆性。

三、重子的CP破坏

尽管实验在不断发现CP破坏现象,并且这些CP破坏的大小都可以通过卡比博-小林-益川矩阵



图6 美国布鲁克海文国家实验室



图7 小林诚(a); 益川敏英(b)

加以解释,物理学家对CP破坏的研究仍未止步。原因之一在于,卡比博-小林-益川矩阵所能提供的CP破坏程度远不足以解释当天文学观测到的正反物质不对称性。简而言之,在宇宙中重子生成之时,卡比博-小林-益川矩阵所能提供的CP破坏在很大程度上取决于“跨代”夸克之间的相互作用,即非对角元的大小及其复相位(定量地可以用一个叫“Jarlskog 不变量”的物理量进行描述,考虑到文章篇幅,此处不展开介绍)。然而,从图8可以看出,这些非对角元相对于对角元来说非常小,导致该矩阵近似于一个单位矩阵,从而大大减弱了其所能产生的CP破坏。由此可以推断,很有可能还存在新的CP破坏起源,等待我们去探索和发现。

此外,当前发现的CP破坏现象主要局限于介子系统,而作为日常可见物质主要成分之一的重子系统(如构成原子核的质子和中子),其CP破坏却尚未在实验中得到确认。因此,探索重子系统中的CP破坏已成为当今粒子物理学研究的前沿课题之一。

基于此背景,华中科技大学研究粒子物理理论的科研团队指出, Λ_b 重子的某种衰变模式可能呈现出显著的CP破坏^[8]。有趣的是,这种衰变模式的CP破坏效应利用了量子物理学中的一个独特现象——两个跃迁振幅之间的干涉,类似于电子在双缝干涉实验中产生的干涉现象。由于 Λ_b 重子的组成部分之一底夸克(bottom quark)与其衰变产物上夸克(up quark)之间耦合的特殊性,这种干涉效应可能导致在 Λ_b 重子系统的衰变中展现出较大的CP破坏。这

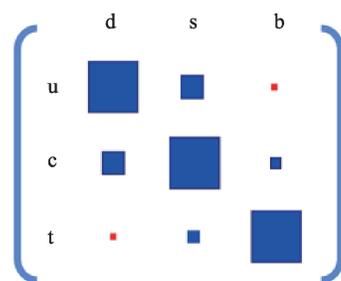


图8 卡比博-小林-益川矩阵示意图,方块大小表示相应的相互作用强度。图中字母分别表示当前已发现的6种夸克:上夸克(up quark, u),粲夸克(charm quark, c),顶夸克(top quark, t),下夸克(down quark, d),奇异夸克(strange quark, s),底夸克(bottom quark, b)

为实验物理学家首次在重子系统中发现CP破坏提供了全新的研究思路 and 方案。

位于欧洲核子中心(CERN)的大型强子对撞机(LHC)如同一座 Λ_b 重子的“工厂”,其正开足马力,以史无前例的速度,在大批量生产 Λ_b 重子并且精确记录它们的衰变信息。它的其中一个科学目标,就是寻找和研究重子的CP破坏现象。这同时也将为验证华科团队的理论设想提供确切的实验结果。未来一旦发现重子的CP破坏,将标志着CP破坏研究迈入一个新的里程碑。这对于我们理解宇宙的结构和演化规律,乃至人类自身的起源,都具有深远的意义。

四、“首尾共生,始终如一”

电弱统一理论的奠基人之一、1979年诺贝尔物理学奖得主格拉肖(Glashow)曾经画过一条咬着自己尾巴的蛇,寓意不同尺度的对立与统一。而CP

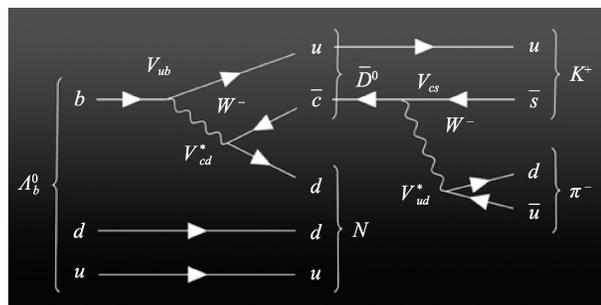
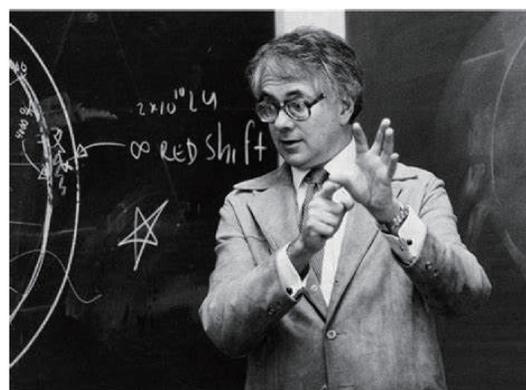
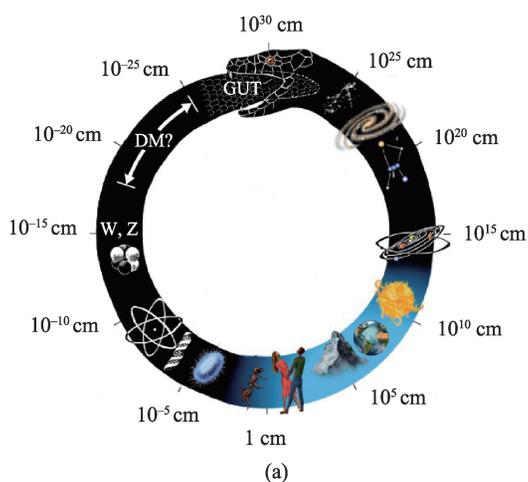


图9 Λ_b 重子衰变的示意图,其中 V_{ub} 、 V_{cs} 等表示相应的卡比博-小林-益川矩阵元



图10 LHCb实验室,其是大型强子对撞机的四个主要实验室之一



(b)

图11 格拉肖(a)与他的“衔尾蛇”(b)

破坏的研究正是其中的一个典型代表,它宛如一座桥梁,连接着极小的微观粒子和极大的宏观宇宙,仿佛一条无始无终的“衔尾蛇”。

消失的反物质到底去哪了?我们至今尚未有确切的答案。但是,可以借用“数学界的亚历山大”,大数学家希尔伯特(Hilbert)的一句名言来表达对未来的信心:“我们必须知道,我们必将知道(*We must know, we will know*)”。

参考文献

- [1] Sakharov A. Violation of CP Invariance, C asymmetry, and baryon asymmetry of the universe[J]. Pisma Zh. Eksp. Teor. Fiz., 1967, 5: 32-35.
- [2] Lee T, Yang C. Question of Parity Conservation in Weak Interac-

tions[J]. Physical Review, 1956, 104:254-258.

- [3] Wu C, Ambler E, Hayward R W, et al. Experimental Test of Parity Conservation in β Decay[J]. Physical Review, 1957, 105:1413-1414.
- [4] Feynman R P, Murray G. Theory of Fermi interaction[J]. Physical Review, 1958, 109:193-198.
- [5] Christenson J H, Cronin J W, Fitch V L, et al. Evidence for the 2π Decay of the K_2^0 Meson[J]. Physical Review Letter, 1964, 13:138-140.
- [6] Nicola C. Unitary Symmetry and Leptonic Decays[J]. Physical Review Letter, 1963, 10:531-533.
- [7] Makoto K, Toshihide M. CP Violation in the Renormalizable Theory of Weak Interaction[J]. Progress of Theoretical Physics, 1973, 49:652-657.
- [8] Shen Y, Wang J, Qin Q. Possible large CP violation in charmed Λ_b decays[J]. Physical Review D (Letter), 2023, 108(11):L111901.