

LHCb上的CP破坏研究

陈缮真

2023年8月3日
科创培训

目录

01

正物质
与反物质

.....

02

反物质的
发现历程

.....

03

对正反物质
不对称的研究

.....

04

LHCb上的
CP破坏研究

1

正物质与反物质

原子的结构

一个原子包括：

- 带有正电荷的原子核
- 带有负电荷的核外电子

电荷有正负，磁极有南北，都是对称的

为什么原子核却都带有正电荷？

而核外电子都带有负电荷？

有没有和已知物质粒子在某些性质上对称的物质？



亚瑟·舒斯特的猜想

物理学家亚瑟·舒斯特在1898年猜想，就像电荷有正负、磁极有南北一样，物质粒子可能也会有它的对称伙伴

舒斯特把这种猜想中的粒子叫做反粒子

由反粒子组成的物质就叫反物质

AUGUST 18, 1898]

NATURE

367

LETTERS TO THE EDITOR

[The Editor does not hold himself responsible for opinions expressed by his correspondents. Neither can he undertake to return, or to correspond with the writers of, rejected manuscripts intended for this or any other part of NATURE. No notice is taken of anonymous communications.]

Potential Matter.—A Holiday Dream.

WHEN the year's work is over and all sense of responsibility has left us, who has not occasionally set his fancy free to dream about the unknown, perhaps the unknowable? And what should more frequently cross our dreams than what is so persistently before us in our serious moments of consciousness—the universal law of gravitation. We can leave our spectroscopes and magnets at home, but we cannot fly from the mysterious force which causes the rain-drops to fall from the clouds, and our children to tumble down the staircase. What is gravity? We teach our students to accept the fact and not to trouble about its cause—most excellent advice—but this is vacation time, and we are not restricted to lecture-room science.

Lassalle's particles are not satisfactory; they are too materialistic for the holiday mind; but I have always been fascinated by a passage occurring somewhere in Maxwell's writings, where Lord Kelvin is quoted as having pointed out that two sources or two sinks of incompressible liquid will attract each other with the orthodox distance law.

Let us dream, then, of a world in which atoms are sources through which an invisible fluid is pouring into three-dimensional space. What becomes of this fluid? Does it go on for ever increasing the volume of that all-pervading medium which already fills a vast, but not necessarily infinite, space? When we speak of the constancy of matter, we mean only the constancy of inertia, and how are we to prove that what we call matter is not an endless stream, constantly renewing itself and pushing forward the boundaries of our universe? The conception of atoms as sources of fluid does not, however, necessarily involve such a perpetual increase of substance, for an equal number of sinks may keep withdrawing the increment.

These sinks would form another set of atoms, possibly equal to our own in all respects but one; they would mutually gravitate towards each other, but be repelled from the matter which we deal with on this earth. If matter is essentially dynamical, and we imagine the motion within an atom to be reversed, the question arises whether the reversed motion is similar to the original one; in other words, whether the new atom so formed may by a change of position be brought into coincidence with the old one. And if this is not the case, we must ask ourselves whether the new atom will behave gravitationally like the old one. If atoms are sources of liquid there would be no reciprocity, and the sinks would form another and so far unrecognised world. But sources and sinks compel us to the supposition of a fourth dimension, which belongs to the domain of nightmares, not of dreams, and we try to shake ourselves free from the idea.

I, for one, cannot quite succeed in this effort, for something has been left behind, which is not easily got rid of, when once its symmetrical beauty is perceived. Surely something is wanting in our conception of the universe. We know positive and negative electricity, north and south magnetism, and why not some extra terrestrial matter related to terrestrial matter as the source is to the sink, gravitating towards its own kind, but driven away from the substances of which the solar system is composed. Worlds may have formed of this stuff, with elements and compounds possessing identical properties with our own, undistinguishable in fact from them until they are brought into each other's vicinity. If there is negative electricity, why not negative gold, as yellow and valuable as our own, with the same boiling point and identical spectral lines; different only in so far that if brought down to us it would rise up into space with an acceleration of 981 . The fact that we are not acquainted with such matter does not prove its non-existence; for if it ever existed on our earth, it would long have been repelled by it and expelled from it. Some day we may detect a mutual repulsion between different star groups, and obtain a sound footing for what at present is only a random flight of the imagination.

Even now some might argue that we possess some substantial evidence of repulsive forces. In our glorification of the Newtonian system we are apt to overlook some obvious facts which the law of gravitation fails to explain. One of these is the rota-

tional velocity of our solar and of many stellar systems, which cannot be self-generated. Unless we threw our laws of dynamics overboard, or imagine the rotation to have been impressed by creation, we must conclude that some outside body or system of bodies is endowed with an equal and opposite angular momentum. What has become of that outside body, and how could it have parted company with our solar system, if attractive forces only were acting? Another unexplained fact is found in the large velocities of some of the fixed stars, which, according to Prof. Newcomb's calculations, cannot be explained by gravitational attractions only.

The atom and the anti-atom may enter into chemical combination, because at small distances molecular forces would overpower gravitational repulsions. Large tracts of space might thus be filled unknown to us with a substance in which gravity is practically non-existent, until by some accidental cause, such as a meteorite flying through it, unstable equilibrium is established, the matter collecting on one side, the anti-matter on the other until two worlds are formed separating from each other, never to unite again.

Matter and anti-matter may further coexist in bodies of small mass. Such compound mixtures flying hither and thither through space, coming during their journey into the sphere of influence of our sun, would exhibit a curious phenomenon. The matter circulating in a comet's orbit, the anti-matter repelled and thrown back into space, forming an appendage which is always directed away from the sun. Has any one yet given a satisfying explanation of comets' tails; is the cause of coronal streamers known, and can any one look at a picture of the great prominence of the 1885 eclipse, and still believe that gravitational attraction or electric repulsion is sufficient to account for its extravagant shape? But this is not a scientific discussion. I do not wish to argue in favour of the existence of anti-atoms, but only to give my thoughts a free course in the contemplation of its possibility.

What is inertia? When the atom and anti-atom unite, is it gravity only that is neutralised, or inertia also? May there not be, in fact, potential matter as well as potential energy? And if that is the case, can we imagine a vast expanse, without motion or mass, filled with this primordial mixture, which we cannot call a substance because it possesses none of the attributes which characterise matter ready to be called into life by the creative spark? Was this the beginning of the world? Is our much-exalted axiom of the constancy of mass an illusion based on the limited experience of our immediate surroundings? Whether such thoughts are ridiculed as the inspirations of madness, or allowed to be the serious possibilities of a future science, they add renewed interest to the careful examination of the incipient worlds which our telescopes have revealed to us. Astronomy, the oldest and yet most juvenile of sciences, may still have some surprises in store. May anti-matter be commended to its care! But I must stop—the holidays are nearing their end—the British Association is looming in the distance; we must return to sober science, and dreams must go to sleep till next year.

Do dreams ever come true? ARTHUR SCHUSTER.

Live Frog taken out of a Snake.

YOUR correspondent, Colonel Major, may be interested to hear of another instance of a Batrachian returning alive from the stomach of a snake. A grass snake of about 24 inches, kept in captivity, had not fed for three weeks: it was then given a very large specimen of the common frog, full-grown; this was swallowed at once, in the usual way by taking the hind leg first. In about an hour and a half the frog was a third of the way down the snake's body. Then, on the snake being played with and handled, after some minutes the lump began to move up and towards the head of the snake, the mouth opened and rapidly towards the frog; rather of colour, and not very happy-looking, out slid the frog; rather of colour, and not very happy-looking, but quite able to hop about in a shuffling fashion, though decidedly shaky on his legs. To an amphibian imprisonment without air could not be very hurtful for a few hours, were it not for the poison of the gastric juices. When the grass snake was left again with the frog it re-swallowed its prey. A snake will often take half an hour swallowing a frog; the distension of the jaws during the operation is extraordinary to witness. In about an hour's time the frog will be a third of the way down the snake's body.

Badenweiler, August 14.

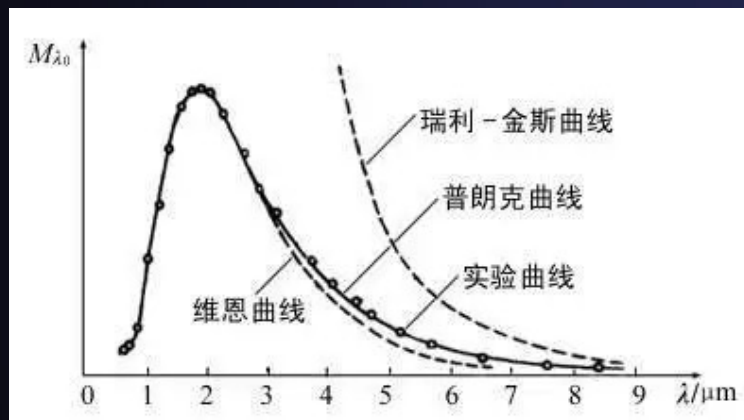
ROSE HAIG THOMAS.



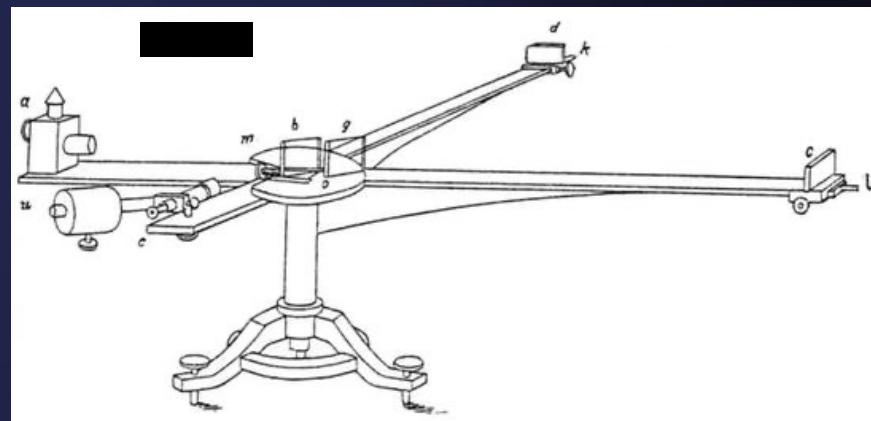
20世纪初物理学的两朵乌云



黑体辐射问题



迈克尔逊-莫雷实验问题



20世纪初物理学的两朵乌云



黑体辐射问题

量子力学

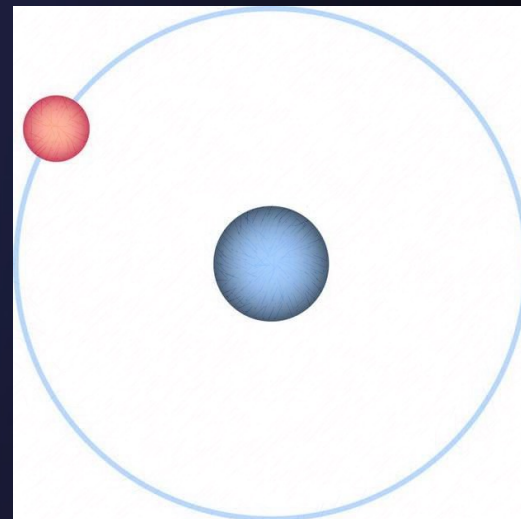


迈克尔逊-莫雷实验问题

相对论

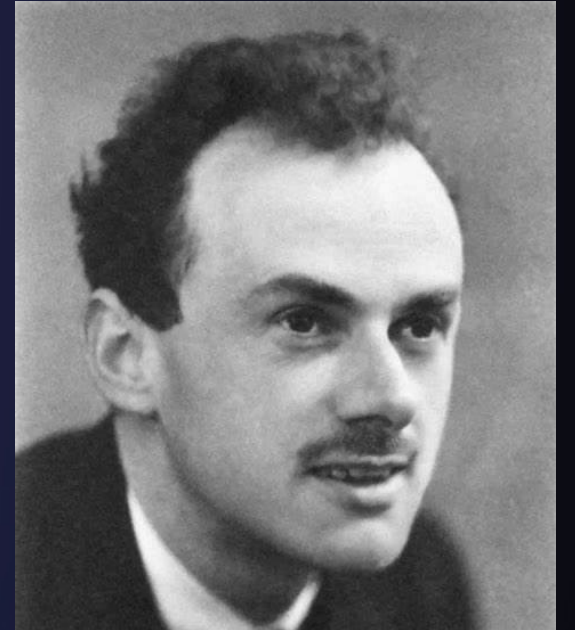
狄拉克方程

- 1928年，保罗·狄拉克在研究氢原子能级分布时，考虑了有自旋角动量的电子作高速运动时的相对论效应，写下了电子的量子理论的方程式
- 狄拉克方程同时满足：
狭义相对论（洛伦兹协变性）
与 量子力学（薛定谔方程）
- 但是，狄拉克方程能得到两个自由粒子的解：
- $$E = \pm \sqrt{p^2 + m^2}$$
- 能量为正的解对应电子的运动。能量为负的解是什么？



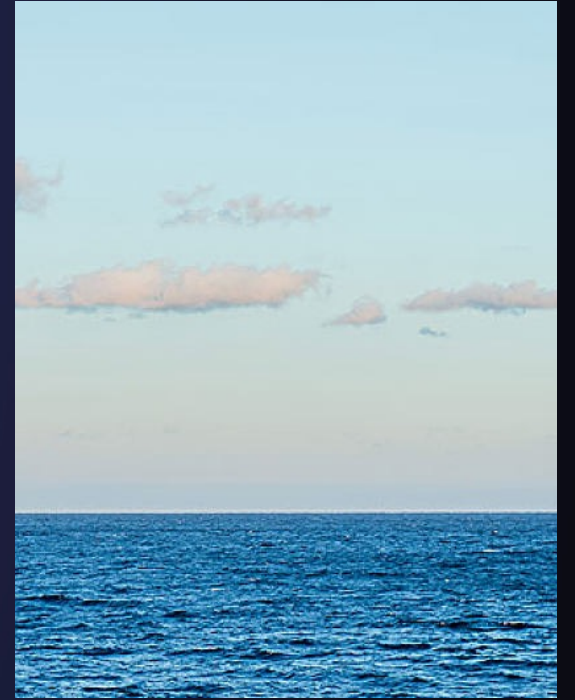
狄拉克的解释：“狄拉克之海”中的空洞

- 狄拉克认为：正负的能量态就相当于正负的能级
- 电子应当可以通过辐射出一个光子的方式从正能级跃迁到负能级，也可以通过吸收一个光子的方式从负能级跃迁到正能级。
- 这种想法的问题：能量应该越低越稳定，那么电子应该主动跃迁到负能级，不应该在正能级。
但现实是，电子都在正能级上
- 狄拉克认为：也许“真空”并不是真正的“空”，而是充满了无法被观测到电子，这些电子把负能级填满了，就像是海平面以下的海水一样，这就是“狄拉克之海”



狄拉克的解释：“狄拉克之海”中的空洞

- 如果有一个能量恰到好处的光子，打到狄拉克之海上，正好被“海”中一个负能量电子吸收掉，使之从负能级“跃出海面”，那么，看到的景象就是光子在真空的“海”中消失，电子从真空的“海”中脱离了出来，变成了一个普通的电子。而此时原本的狄拉克之海中，就会留下一个“空洞”。
- 原本电中性的“海”，因为少了一个带负电荷的电子，就等同于多了一个正电荷，在外界看来，海中的“空洞”就像是出现了一个带正电荷的“电子”
- 完整的景象：一个光子，打到“海”面上，消失了，但同时出现了一对正负电子



费曼等人的解释：向时间反方向运动的粒子

- 理查德·费曼和厄恩斯特·斯蒂克尔堡等人：向时间反方向运动的粒子
- 普通电子：沿时间的正方向运动
正电子：沿时间的反方向运动
- 在沿时间正方向运动的观察者看来：
沿时间的反方向运动的粒子会左右颠倒、电荷相反
- 一个极端的假设：单电子宇宙
宇宙或许就只有一个电子，只不过这个电子一直在从宇宙诞生的那一瞬间到宇宙消亡的那一瞬间之间来回穿梭，所以宇宙中所有电子都完全相同



对负数解的两种解释

- 狄拉克：狄拉克之海中的空穴
- 费曼等人：向时间反方向运动的粒子
- 两种解释的共同实质：认为普通粒子都有对称伙伴，也就是反物质粒子
- 反物质粒子与普通粒子相比：左右颠倒、电荷相反

- 两种解释都是科幻作品中的常客

如：《新世纪福音战士》中创造出狄拉克之海的第十二使徒

诺兰导演的电影《信条》描绘了沿时间反方向运动的场景

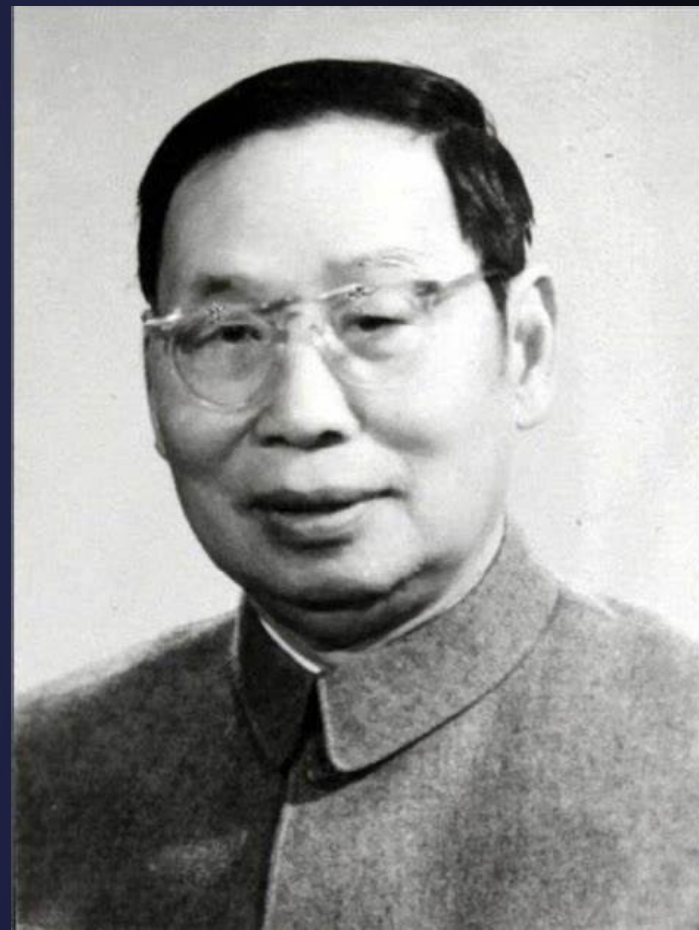


2

反物质的发现历程

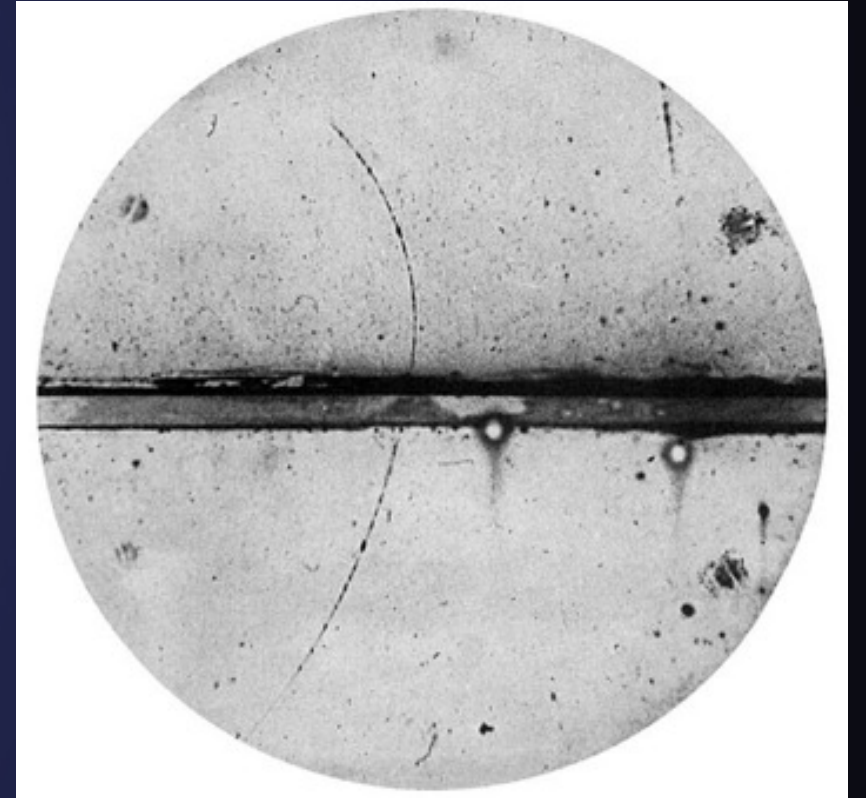
赵忠尧的实验

- 1930年，在美留学的赵忠尧发现，一些物质在经过被硬 γ 射线撞击之后，会朝着不同的方向辐射出一个能量为 0.5MeV 的 γ 光子，而 0.5MeV 的能量恰好对应了一个电子的质量。
- 后来研究表明，赵忠尧观测到现象是由于部分硬 γ 射线经过原子核附近时，在真空中激发出了一对正反电子，而正电子与电子相遇时湮灭，释放出的一对光子。
- 很可惜，赵忠尧在当时没能意识到，这是人类历史上第一次观测到了一对正反物质粒子的产生与湮灭。



卡尔·安德森的实验

- 1932年，赵忠尧在美国时的同事、物理学家卡尔·安德森在观测宇宙射线穿过铅板后在磁场中的云室里留下的轨迹的照片时，发现了一种“与电子很像，但是带正电”的粒子。安德森把这种粒子正式命名为“正电子”，这是人类第一次发现反物质
- 在安德森观测到的正电子在云室中留下的轨迹的照片中，正电子从下往上运动，在磁场中穿过一层薄薄的铅板之后，改变了轨迹弯曲的曲率。轨迹弯曲的方向表明，正电子与正常电子所带的电荷相反。



宇宙中有没有大规模的反物质结构？

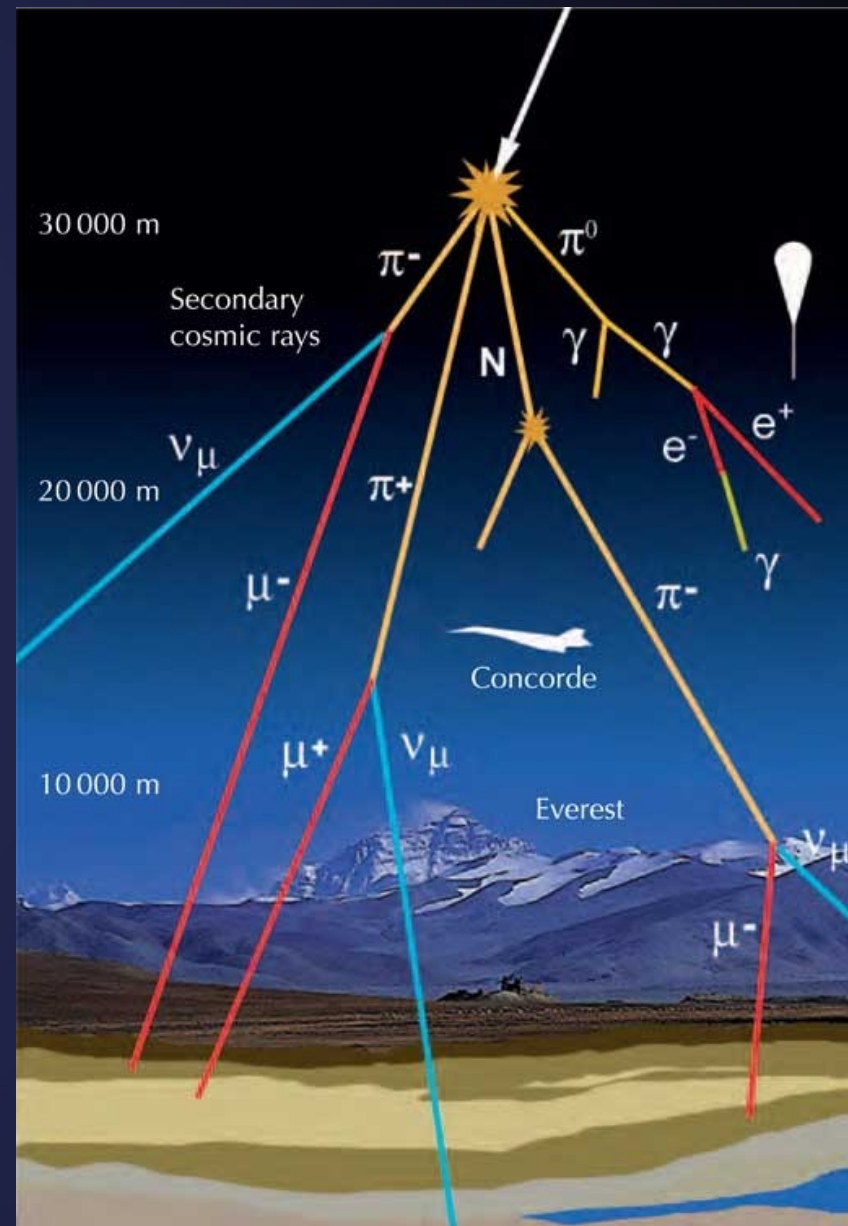
- 狄拉克因狄拉克方程获得1933年诺贝尔奖。他在他的诺贝尔奖演讲《电子和正电子的理论》的结束语中，说到：
- “如果我们接受了正电荷与负电荷关于基本自然规律完全对称的观点，我们必须接受地球（以及整个太阳系）主要由负电子和正质子构成只是一个巧合。很有可能有一些星体正好相反，是由正电子和负质子构成的。事实上，宇宙中这两类星体可能各占一半。这两类星体应该展现出完全相同的光谱，以至于我们现有的天文观测手段完全无法将它们区分开来。”
- 这个猜想对不对？

宇宙大爆炸与演化

- 宇宙大爆炸理论：我们的宇宙开始于一个密度和温度都无限高，均匀并别各向同性的纯能量状态，这个状态被称为奇点
- 暴胀过程：基本粒子被创造了出来，纯能量转化成了大量高速运动的粒子 – 反粒子对，宇宙中此时的粒子和反粒子的数量相等
- 宇宙进一步的膨胀和冷却，逐渐形成了质子和中子等粒子，并演化成星辰
- 这个过程中，正物质与反物质始终是一样多吗？
- 反物质在哪里？

宇宙线

- 宇宙线是指来自于宇宙深处的高能粒子
- 在很多粒子都是在宇宙线中被发现的——包括反物质粒子
- 但是——在宇宙线中发现的反物质粒子真的是来自于宇宙深处吗？
- 不一定！宇宙线在大气层内会发生簇射
- 想要直接探测宇宙线，需要去太空！



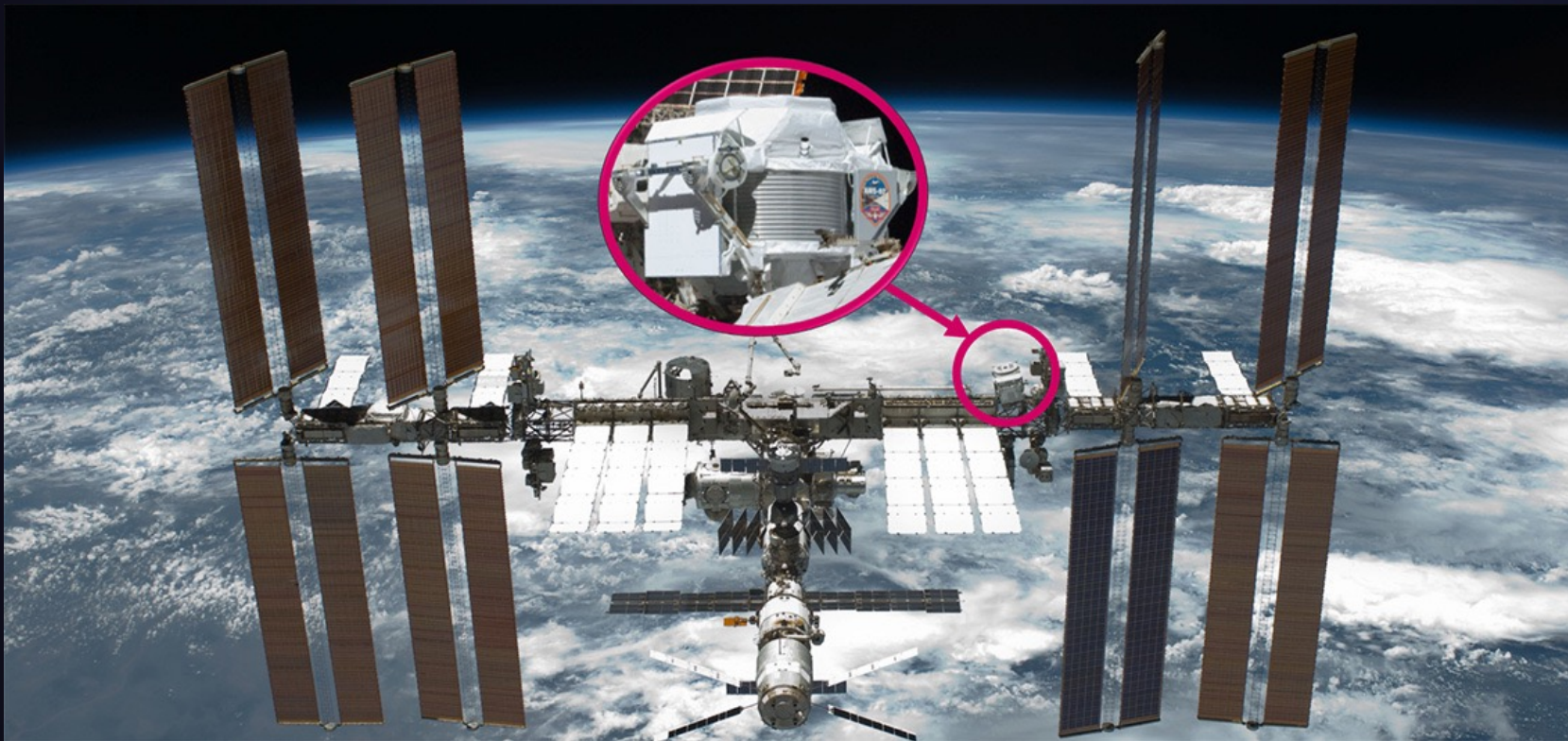
阿尔法磁谱仪 (AMS) 实验

- 1995年，华裔诺贝尔物理学奖得主丁肇中提出了在太空建立一个探测暗物质和反物质的粒子探测器的计划
- 1998年，丁肇中带领的团队完成了第一版太空探测器的设计，并把这个探测器命名为阿尔法磁谱仪 (AMS-01)，并在当年6月份由发现号航天飞机送上了太空



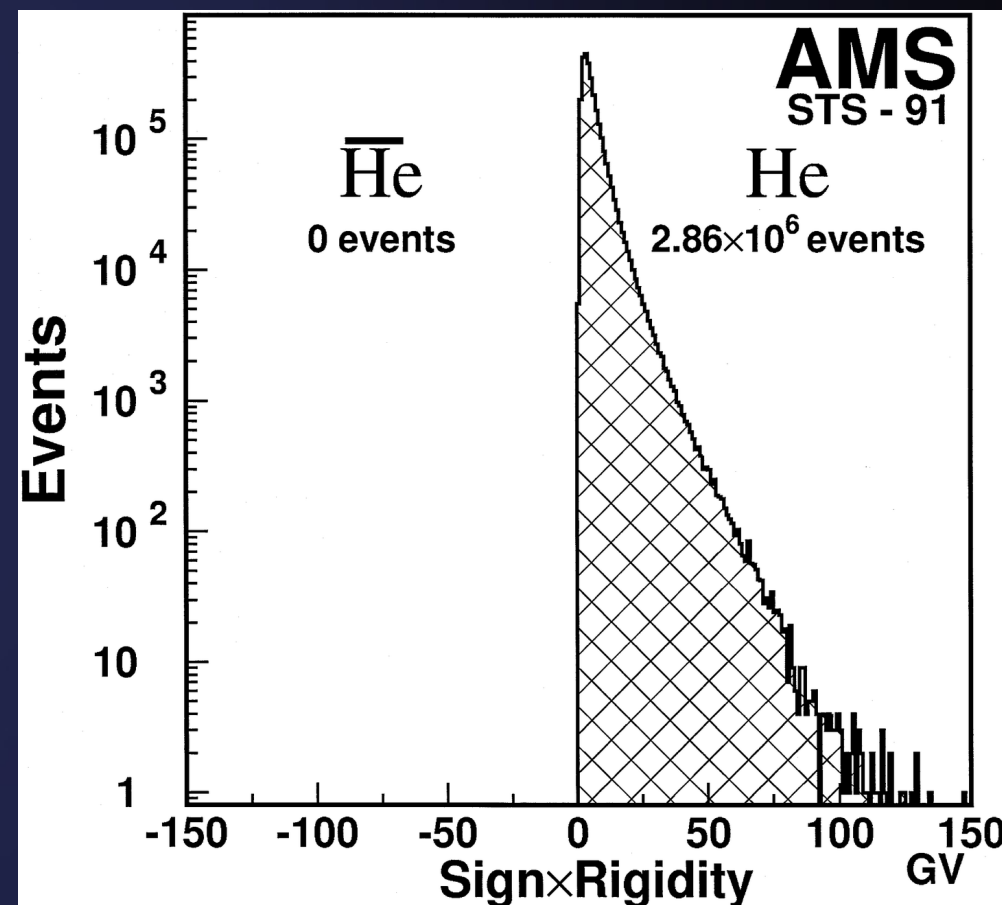
阿尔法磁谱仪（AMS）实验

- 为了更进一步的研究宇宙中的暗物质和反物质，丁肇中带领的团队又研制出了AMS-02，并安置在了国际空间站上。从2011年5月AMS-02被安置到国际空间站上至今，它已几乎连续收集了十年的数据。



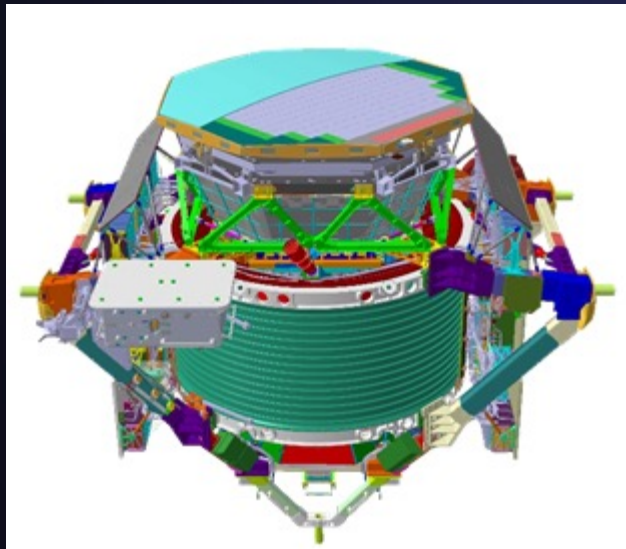
AMS（阿尔法磁谱仪）的实验结果

- AMS-01在太空上探测了氦原子核以及它的反粒子的数量。
 - 因为氦原子核相对比较复杂，如果发现了它的反粒子，那几乎不可能由正物质，通过核反应产生的，因此如果反氦原子核被发现，就可以作为宇宙中存在宏观的反物质结构的证据
- AMS-01的结果发现，宇宙空间里的射线中氦原子核有非常多个，但是反氦原子核一个都没有
- AMS-02的数据仍然不能表明宇宙中有宏观的反物质结构存在



AMS实验与高能所

- 中科院高能所是AMS实验的发起团队之一，中国科学家为AMS实验特别是首个太空大型磁体永磁体的研制以及物理分析等做出重要贡献
- 高能所AMS课题组在宇宙线电子、正电子和反质子的分析中发挥了重要作用
- 同时，在AMS升级研制任务中，中国科学家也承担关键性的任务，包括整个硅微条的设计、测试和生产

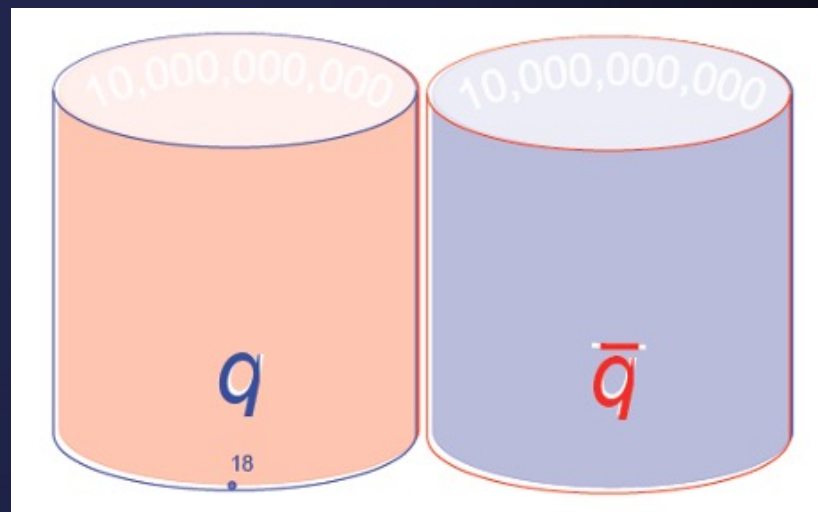
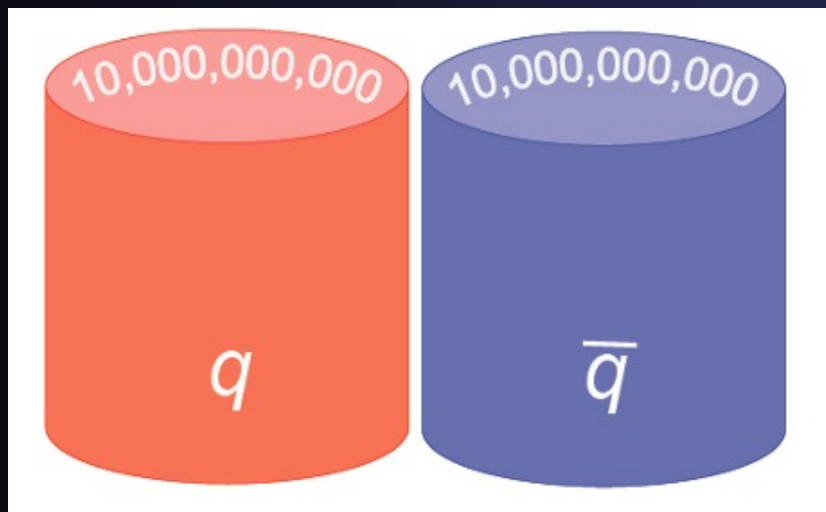


宇宙中有没有大规模的反物质结构？

- 正反物质湮灭会释放大量能量
- 我们已知的太阳系、银河系，乃至更广阔的宇宙结构都是正物质构成的，如果在这样一个正物质宇宙中存在宏观反物质结构，那么正物质结构和反物质结构之间应该会有一个边界
- 在这个边界上，一定会有大量的正反物质粒子互相湮灭，持续释放出巨大的能量。然而人类观测到的宇宙中并没有这样的边界存在
- → 在人类可认知的宇宙中不存在宏观的反物质结构
- 狄拉克或许错了

宇宙演化中的正反物质不对称

- 宇宙膨胀和冷却过程中，原先产生的正反粒子对大量的湮灭
- 通过对重子数目和光子数目的比值进行研究发现，宇宙演化过程中，每100亿个正反粒子对湮灭的过程中，会有18个正物质粒子被留了下来
- 正反物质的行为是不完全对称的！



萨哈洛夫的三个条件

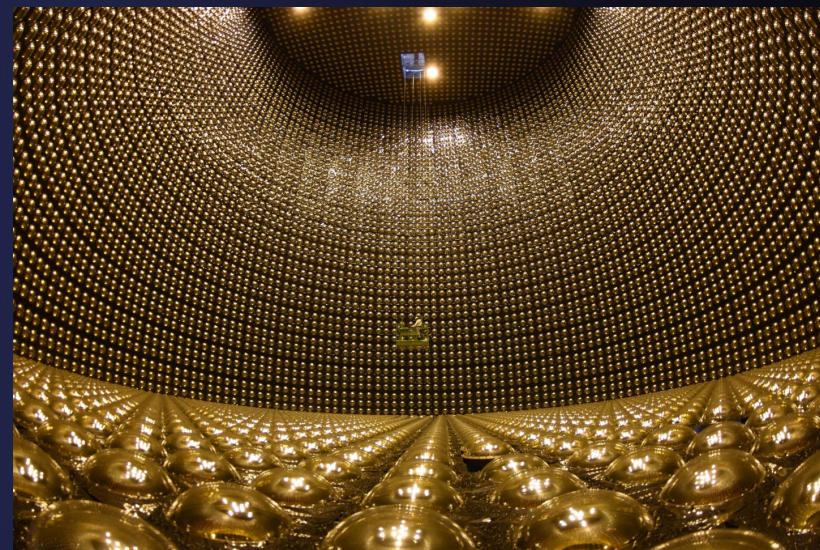
- 前苏联的氢弹之父、物理学家萨哈洛夫（Andrei Sakharov）提出了重子数产生（即，宇宙由正反物质相等变成正物质主导）所需要的三个条件，分别是：
- （1）：存在一个破坏重子数守恒的过程
 - 对质子衰变的研究，尚未发现
- （2）：存在破坏“电荷共轭变换”（C）不变性和“电荷共轭－空间反演联合变换”（CP）不变性的相互作用
 - 已发现，但目前的发现尚不足以描述宇宙演化所需的不对称性
- （3）：（1）和（2）应该发生在偏离热平衡的状态
 - 如果宇宙处于热平衡状态，那么重子数的平均值会保持为不变，即为0

重子数

- 科学家们假设，每一个正物质重子都带有+1的被称为“重子数”的量子数，而每一个反物质重子都带有-1的重子数。
- 在宇宙大爆炸之初，宇宙的重子数总数应该是0，因为此时正物质与反物质数量应该相等。
- 现在的宇宙，重子数则是一个正数。
- 那么如今产生正反物质的不对称的过程就可以等价于破坏重子数守恒的过程，或者说，是重子数产生的过程。

重子数守恒破坏的实验研究

- 主要途径：探测质子衰变
- 代表性的实验：日本的神冈/超级神冈实验
- 几十年的研究还没有收集到一个质子衰变的事件
 - 因此，质子的寿命也被认为是在一亿亿亿年以上。
 - 宇宙的寿命只有一百多亿年，质子的寿命远超宇宙的寿命
- 破坏重子数守恒的过程仍然需要科学家们的探索



3

对正反物质不对称的研究

宇称不守恒——李政道与杨振宁的理论



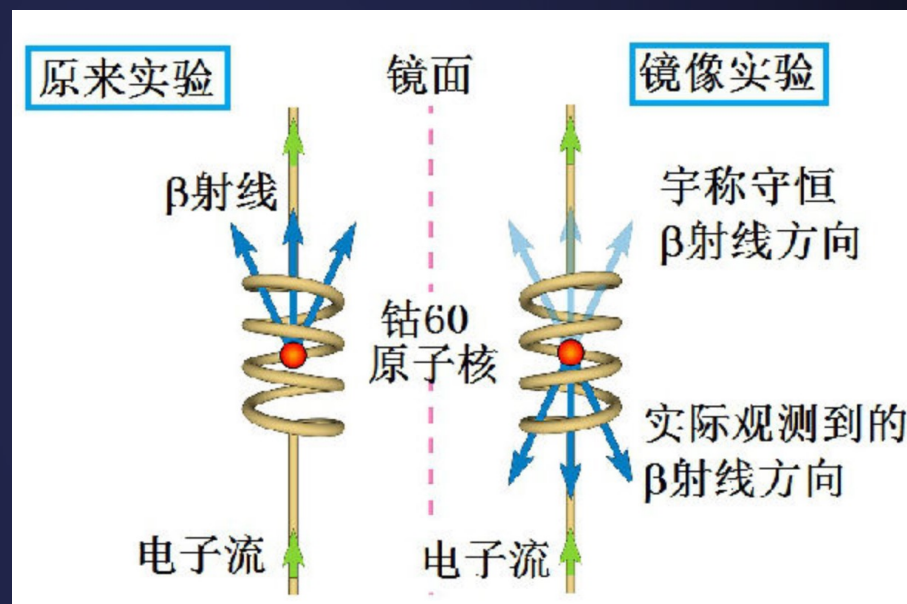
- 诺特定理：对于力学系统的某种对称性，都存在一个守恒量与其对应
- 两种质量相同，看起来像是同一种的粒子 θ^+ 粒子和 τ^+ 粒子（后来被证实其实就是同一种粒子，现在叫做 K^+ 介子），却有着不同的宇称量子数和不同的衰变产物
 - π ：宇称-1， θ^+ ：宇称+1，衰变成 $\pi\pi$ ， τ^+ ：宇称-1，衰变成 $\pi\pi\pi$
- 为了解释上述问题，1956年，李政道和杨振宁提出：
 - 在弱相互作用中，微观的粒子的行为可能不存在宇称量子数的守恒。
- 宇称的守恒对应的对称性是“左”和“右”的对称，李政道和杨振宁的推测也就是说在微观世界中，“左”和“右”的物理规律并不完全相等同。

吴健雄实验

- 1957年，华裔科学家吴健雄女士等科学家在对钴60 (^{60}Co) 衰变的观测中证实了宇称不守恒

- 吴健雄利用两套装置中互为镜像的钴60设计了一个实验，一套装置中的钴60原子核自旋方向转向左旋，另一套装置中的钴60原子核自旋方向转向右旋，结果发现在极低温的情况下两套装置中放射出来的电子数有很大差异

- 同年，李政道和杨振宁因为弱相互作用中宇称不守恒的提出，获得了当年的诺贝尔物理学奖



宇称共轭 (P) 与 电荷共轭 (C)

- 宇称共轭：粒子自旋左旋 $\leftrightarrow$ 右旋
- 电荷共轭：粒子 $\leftrightarrow$ 反粒子
 - 算符C作用在状态 $|\psi(x, t)\rangle$ 上，得到反粒子状态 $|\psi^C(x, t)\rangle$

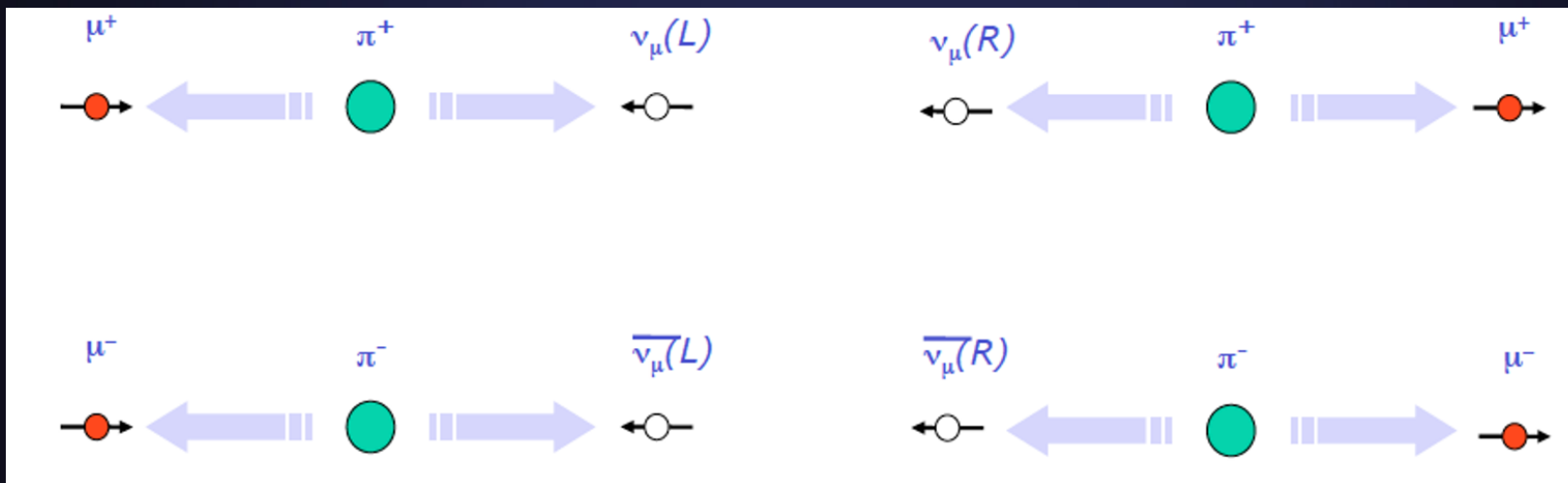
$$C|\Psi(\mathbf{r}, t)\rangle = |\Psi^C(\mathbf{r}, t)\rangle$$

$$C^2|\Psi(\mathbf{r}, t)\rangle = |\Psi(\mathbf{r}, t)\rangle$$

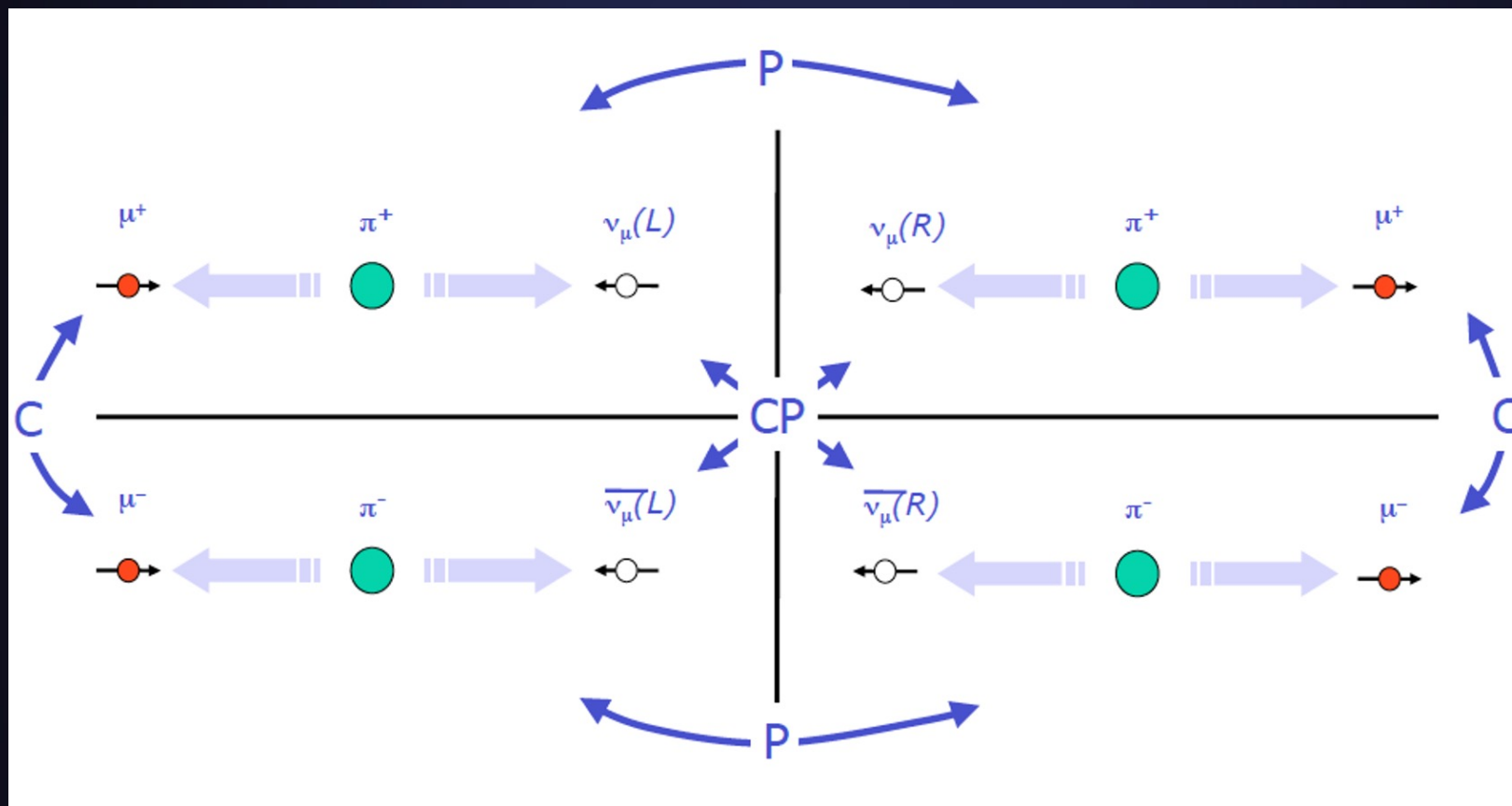
- 如果一个粒子是自身的反粒子，则它是C的本征态：
 - e.g. $C|\pi^0\rangle = \pm 1|\pi^0\rangle$

中微子自旋问题

- 莱德曼等人实验，观察 $\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$ 自旋
 - π 自旋为0， $\mu^+ \nu_\mu$ 自旋均为1/2， $\mu^+ \nu_\mu$ 螺旋度相同

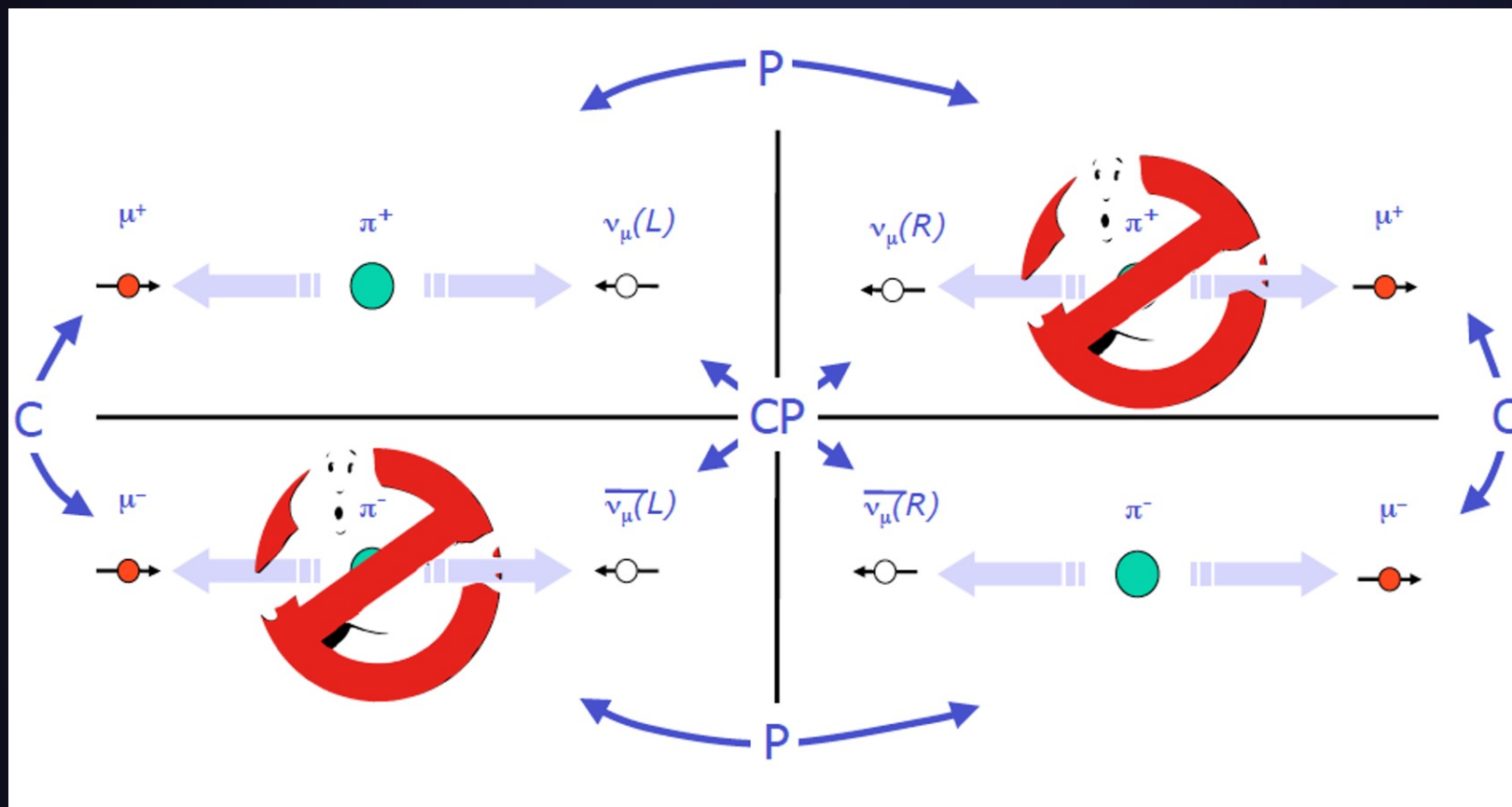


中微子自旋问题



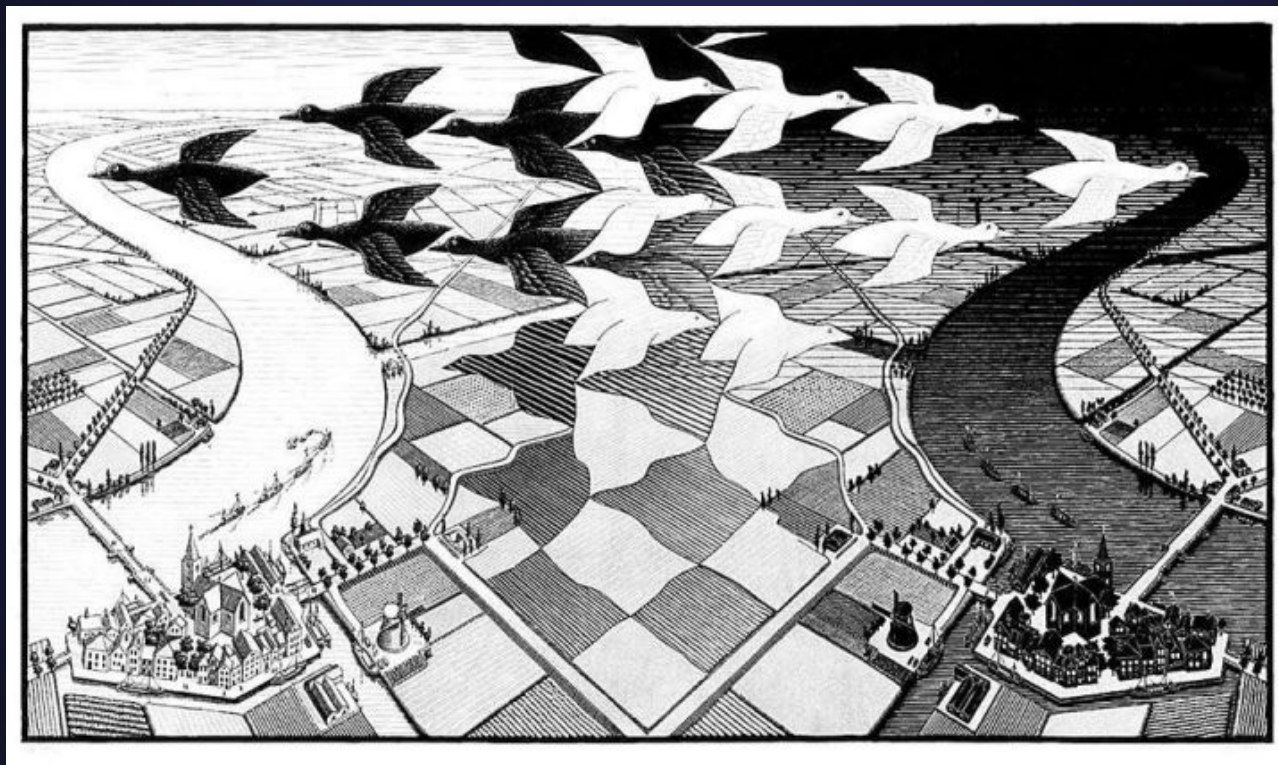
- 如果C/P守恒，期望观察结果：左旋/右旋的中微子/反中微子都存在

中微子自旋问题



■ 宇称 (P) 不对称! 电荷 (C) 不对称! 电荷-宇称 (C-P) 联合对称似乎保持

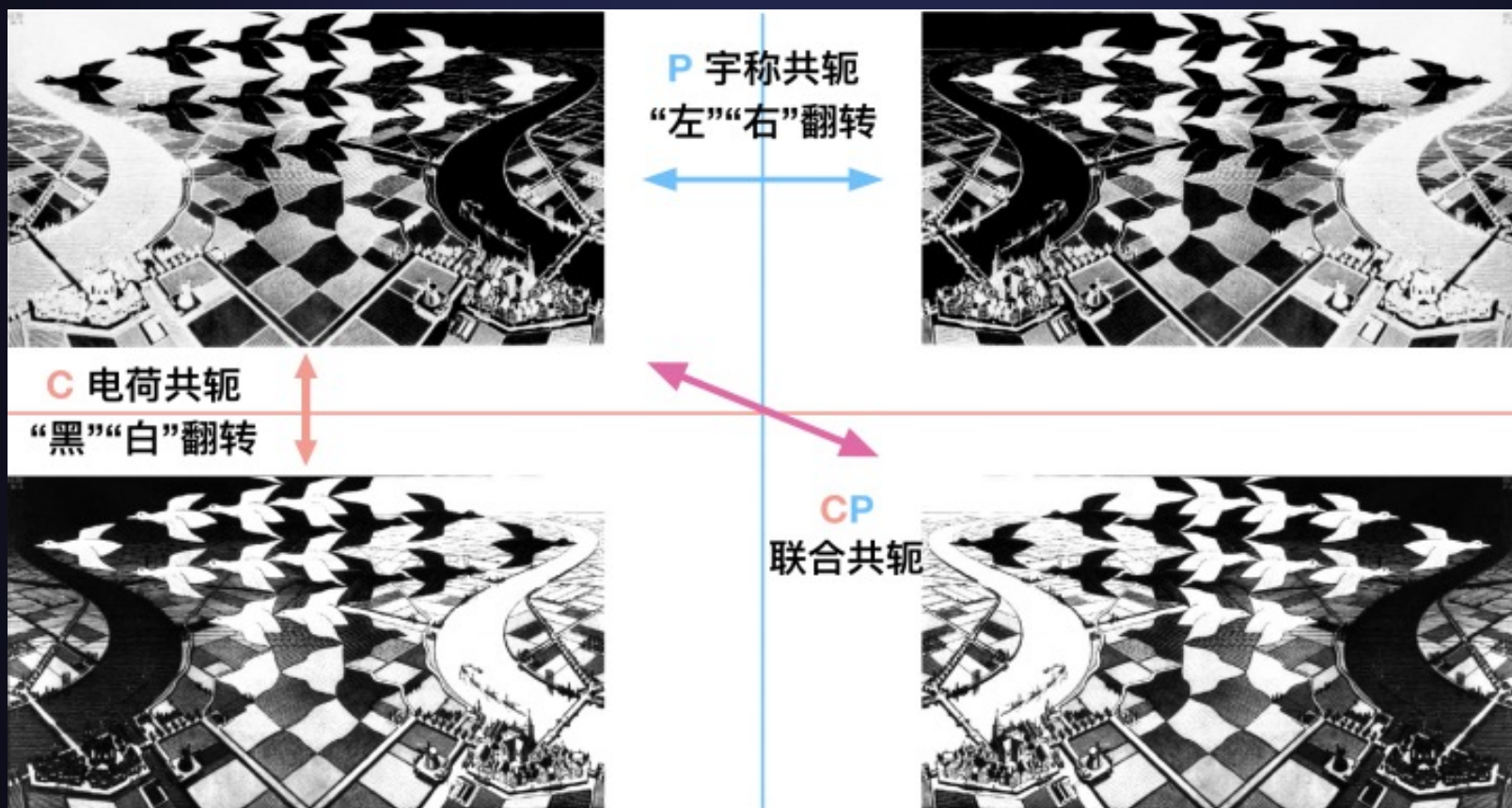
电荷 - 宇称联合对称性



- 埃舍尔的作品《白天与黑夜》

电荷 - 宇称联合对称性

- 以埃舍尔的画作类比，宇称共轭对应左右翻转，电荷共轭对应黑白翻转
- 电荷-宇称联合共轭似乎和原图一致

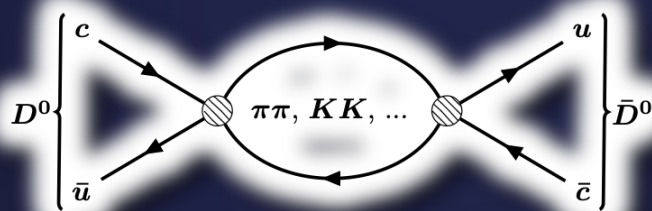
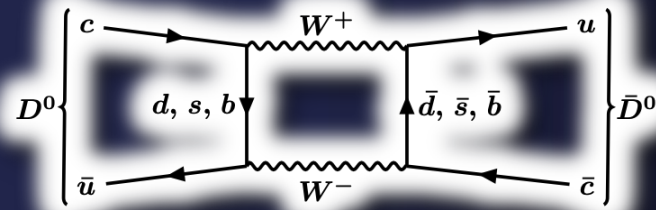
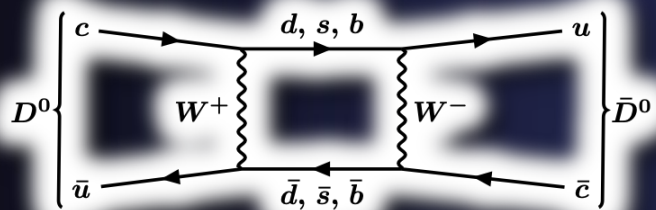


电荷－宇称联合对称性的破缺

- 列夫·朗道以及李政道和杨振宁认为，电荷－宇称（C-P）两个量子数的联合，应该保持着良好的对称性。
 - 电荷－宇称对称性的守恒可以使得粒子和反粒子遵循着相同的物理规律
- 但是，1964年，詹姆斯·克罗宁和瓦尔·菲奇在电中性K介子的衰变中，发现本应衰变称三个 π 介子的长寿命K介子，却有一些衰变称了两个 π 介子。
 - 这种衰变模式是电荷－宇称对称性的守恒所不允许的
 - 如何去理解？

中性介子混合

- 反粒子不是自身的中性介子 (K^0 、 D^0 、 B^0 、 B_s^0) 可以通过交换两个W粒子或者长程作用变成自身的反粒子:



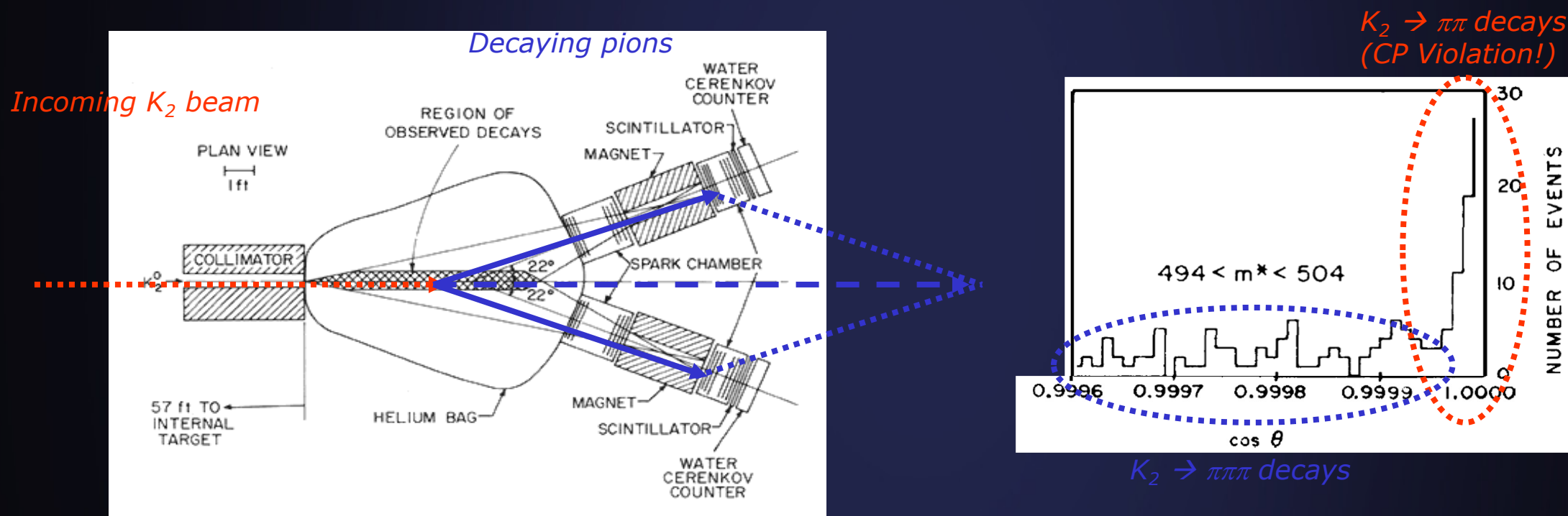
- 在传播的过程过，粒子处于味本征态的混合态

中性介子的味本征态、质量本征态、CP本征态

- 对于反粒子不是自身的中性介子 (K^0 、 D^0 、 B^0 、 B_s^0)，以味本征态（或称弱相互作用本征态）形式产生，但以质量本征态形式衰变
- 质量本征态定义了粒子的质量、寿命
- 最常见的，在K系统中，有 K_S 和 K_L 两种质量本征态
- 1956年利昂·莱德曼等人实验发现：
 - 一部分中性K介子衰变成两个 π 介子，另一部分衰变成三个 π 介子
 - 因一个中性K介子的质量非常接近三个 π 介子质量之和，所以衰变成三个 π 介子的中性K介子寿命远超另一种中性K介子，因此被称为长寿命K介子 K_L ，另一种则被称为短寿命K粒子 K_S
- 1964年詹姆斯·克罗宁和瓦尔·菲奇实验发现
 - 并不是所有 K_L 都衰变成三个 π 介子，也并不是所有 K_S 都衰变成两个 π 介子
- 为什么？

克罗宁-菲奇实验

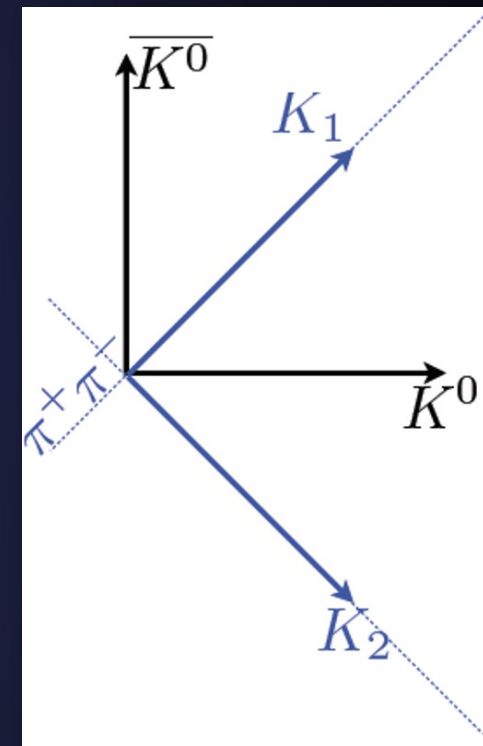
- 测量 K_L 衰变的两个末态粒子的动量之和



- 如果 K_L 衰变产物全是三个 π 介子，那么在束流方向不应有峰

中性介子的味本征态、质量本征态、CP本征态

- $K^0 = \bar{s}d, \bar{K}^0 = s\bar{d}$
- $CP|K^0\rangle = +1|\bar{K}^0\rangle, CP|\bar{K}^0\rangle = +1|K^0\rangle$, K^0 和 $\bar{K}^0$ 不是CP本征态
- 已知: $\pi^+\pi^-$ CP量子数为偶, $\pi^+\pi^-\pi^0$ CP量子数为奇
- 若衰变到特定CP量子数状态, 需构建CP本征态:
 - $|K_1\rangle = 1/\sqrt{2}(|K^0\rangle + |\bar{K}^0\rangle)$
 - $|K_2\rangle = 1/\sqrt{2}(|K^0\rangle - |\bar{K}^0\rangle)$
- 则有
 - $CP|K_1\rangle = +1|K_1\rangle$
 - $CP|K_2\rangle = -1|K_2\rangle$
- 即 K_1 的CP量子数为偶, K_2 的CP量子数为奇
- 若CP量子数守恒, 则 K_1 只能衰变成两个 π 介子 (预期短寿命), K_2 只能衰变成三个 π 介子 (预期长寿命)



中性介子的味本征态、质量本征态、CP本征态

- 克罗宁-菲奇实验发现，99.99%的 K_L 衰变成三个 π 介子，但是有0.01%的 K_L 衰变成两个 π 介子！
- 说明质量本征态 (K_S 、 K_L) $\neq$ CP本征态 (K_1 、 K_2) $\rightarrow$ CP violation!

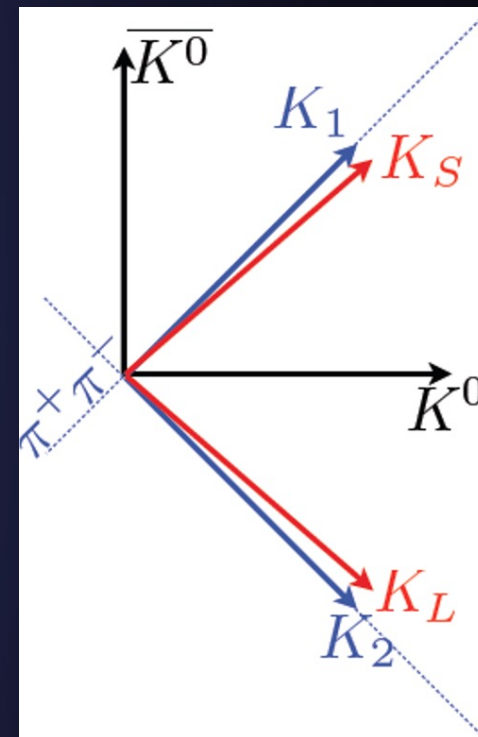
- 构建质量本征态

- $|K_S\rangle = p|K^0\rangle + q|\bar{K}^0\rangle$
 - $|K_L\rangle = p|K^0\rangle - q|\bar{K}^0\rangle$

- 其中 $|q|^2 + |p|^2 = 1$,
且若在混合中存在CP破坏, 则 $|q/p| \neq 1$

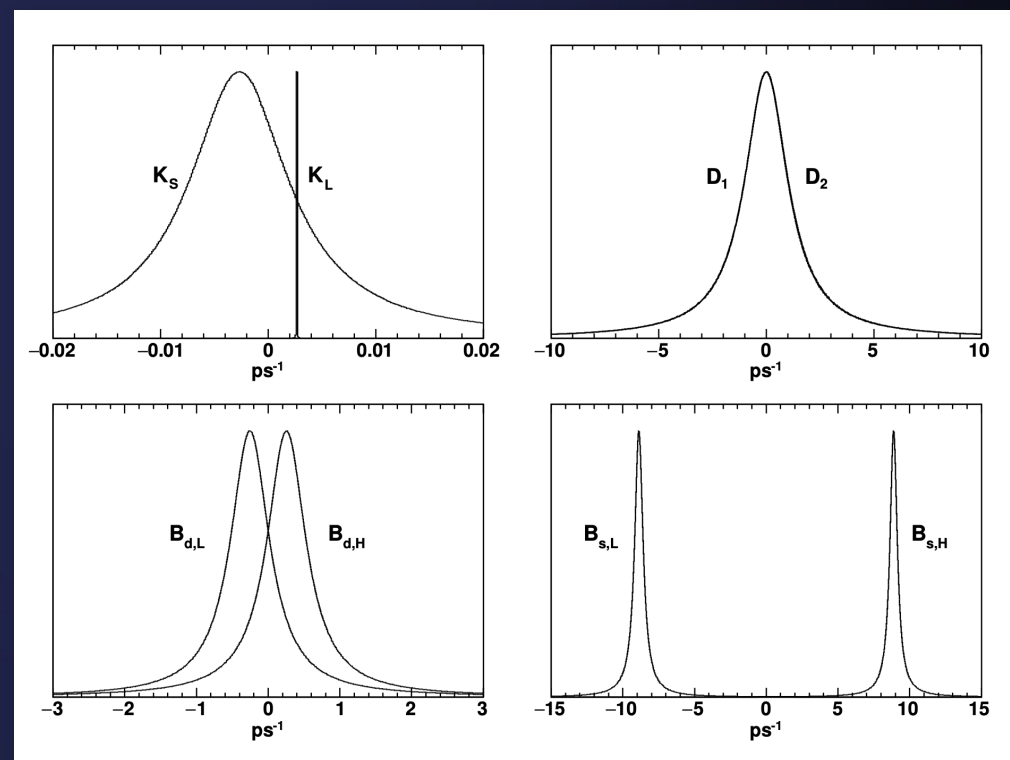
- $(K^0, \bar{K}^0) \neq (K_1, K_2) \neq (K_S, K_L)$

- 味本征态 $\neq$ CP本征态 $\neq$ 质量本征态 $\rightarrow$ CP破坏!



中性介子混合

- 四种中性介子系统中都有**mixing**，并产生相应的质量本征态
- **K**介子系统：两个本征态间有巨大的寿命差异，也有明显的质量差异
- **B、B_s**介子系统：两个本征态间有明显的质量差异
- **D**介子系统：差异几乎不可见且尚不知**质量本征态**是否与**CP本征态**有差异，即是否存在**CP破坏**
- 暂用 (D_1 、 D_2) 表示质量本征态



中性介子混合——以D粒子为例

- D介子衰变满足含时的薛定谔方程
- $$i \frac{\partial}{\partial t} \begin{pmatrix} D^0(t) \\ \bar{D}^0(t) \end{pmatrix} = (\mathbf{M} - \frac{i}{2} \mathbf{\Gamma}) \begin{pmatrix} D^0(t) \\ \bar{D}^0(t) \end{pmatrix}$$
- 两个质量本征态 $|D_{1,2}\rangle = p|D^0\rangle \pm q|\bar{D}^0\rangle$
- 代入薛定谔方程
- $$|D^0(t)\rangle = g_+(t) |D^0\rangle + \frac{q}{p} g_-(t) |\bar{D}^0\rangle$$
- $$|\bar{D}^0(t)\rangle = g_+(t) |\bar{D}^0\rangle + \frac{p}{q} g_-(t) |D^0\rangle$$
- 其中
$$g_{\pm}(t) = \frac{1}{2} (e^{-iM_1 t} e^{-\frac{\Gamma_1 t}{2}} + e^{-\Gamma_2 t} \pm e^{-iM_2 t} e^{-\frac{\Gamma_2 t}{2}})$$
- $$\langle D^0 | D^0(t) \rangle = |g_+(t)|^2 = \frac{1}{4} [e^{-\Gamma_1 t} + e^{-\Gamma_2 t} + 2e^{-\bar{\Gamma} t} \cos(\Delta M t)]$$
- $$\langle \bar{D}^0 | \bar{D}^0(t) \rangle = \left| \frac{q}{p} \right|^2 |g_-(t)|^2 = \frac{1}{4} \left| \frac{q}{p} \right|^2 [e^{-\Gamma_1 t} + e^{-\Gamma_2 t} - 2e^{-\bar{\Gamma} t} \cos(\Delta M t)]$$

混合参数 x, y

- 已知CP破坏非常小, (q/p) 几乎等于1

- $|g_{\pm}(t)|^2 = \frac{1}{4} [e^{-\Gamma_1 t} + e^{-\Gamma_2 t} \pm 2e^{-\bar{\Gamma} t} \cos(\Delta M t)]$
衰减项 振荡项

- 其中 $\Delta M = M_1 - M_2$, $\bar{\Gamma} = \frac{\Gamma_1 + \Gamma_2}{2}$

- 定义“混合参数”

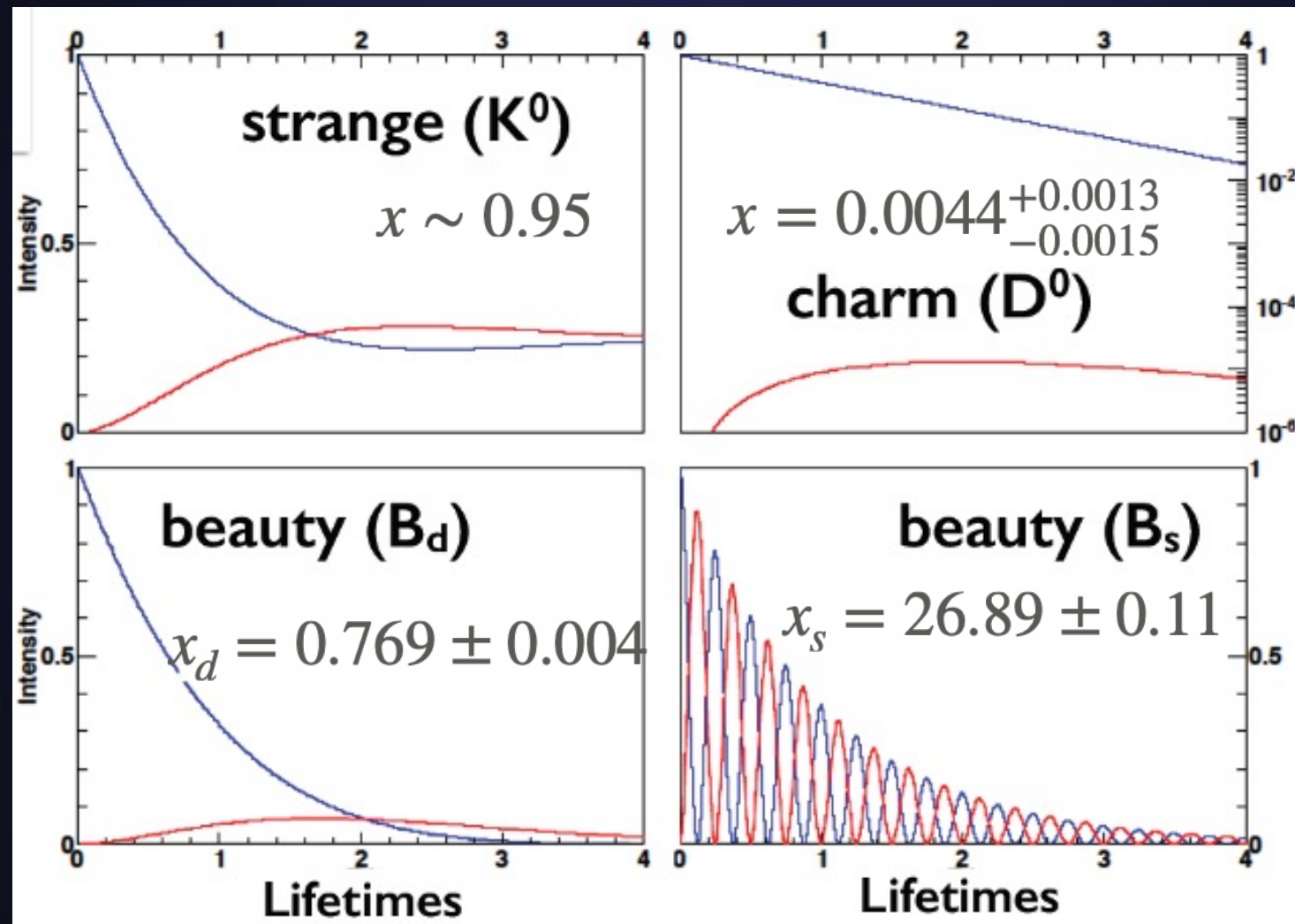
- $x = \frac{\Delta M}{\bar{\Gamma}}, y = \frac{\Delta \Gamma}{2\bar{\Gamma}}$

- x 代表（无量纲的）质量差异, y 代表（无量纲的）衰变宽度差异

- $|g_{\pm}(t)|^2 = \frac{1}{2} e^{-\bar{\Gamma} t} [\cosh(y\bar{\Gamma} t) \pm \cos(x\bar{\Gamma} t)]$

- 当且仅当 x 和 $y \neq 0$ 时, $|D^0(t)\rangle$ 和 $|\bar{D}^0(t)\rangle$ 衰变成分才能出现随时间变化的差异, 才能“振荡”

比较四种系统的 x



4

LHCb上的CP破坏研究

实验上CP破坏研究方法分类

	全局 CPV	相空间局部的 CPV
对时间积分	A_{CP} , ΔA_{CP} ,	Dalitz分析, binned χ^2 , energy test,
对时间依赖	y_{CP} , A_{Γ} , CKM测量,	$D^0 \rightarrow Kshh$: $ q/p $, ϕ ,

A_{CP}

- 以 $D^0 \rightarrow K^- K^+$ 的 A_{CP} 分析为例
- 完整衰变链: $D^{*+} \rightarrow D^0 (\rightarrow K^- K^+) \pi_s^+$

- $$A_{raw}(i \rightarrow f) = \frac{N(i \rightarrow f) - N(\bar{i} \rightarrow \bar{f})}{N(i \rightarrow f) + N(\bar{i} \rightarrow \bar{f})}$$

- $$A_{CP}(D \rightarrow K^- K^+) = A_{raw}(D \rightarrow K^- K^+) - A_{prod}(D) - A_{det}(\pi_s^+)$$

- 利用参考衰变道抵消产生与探测不对称性

- $D^{*+} \rightarrow D^0 (\rightarrow K^- K^+) \pi_s^+$
- $D^{*+} \rightarrow D^0 (\rightarrow K^- \pi^+) \pi_s^+$
- $D^+ \rightarrow K^- \pi^+ \pi^+$
- $D^+ \rightarrow \bar{K}^0 \pi^+$
- $\bar{K}^0$ 探测对称性已知

$$\begin{aligned} & A_{CP}(D^0 \rightarrow K^- K^+) \\ &= A_{raw}(D^0 \rightarrow K^- K^+) - A_{raw}(D^0 \rightarrow K^- \pi^+) \\ &+ A_{raw}(D^+ \rightarrow K^- \pi^+ \pi^+) - A_{raw}(D^+ \rightarrow \bar{K}^0 \pi^+) \\ &+ A_{det}(\bar{K}^0) \end{aligned}$$

ΔA_{CP}

- $A_{CP}(KK) = A_{raw}(KK) - A_{prod}(D) - A_{det}(\pi_s^+)$
- $A_{CP}(\pi\pi) = A_{raw}(\pi\pi) - A_{prod}(D) - A_{det}(\pi_s^+)$
- ΔA_{CP} 即测量二者 A_{CP} 之差
- 优势1:
 - 测量两个 A_{CP} 的差异可以抵消掉探测与产生不对称性
 - $A_{CP}(KK) - A_{CP}(\pi\pi) \approx A_{raw}(KK) - A_{raw}(\pi\pi)$
- 优势2:
 - $A_{CP}(KK)$ 与 $A_{CP}(\pi\pi)$ 大小相似, 方向相反
 - $A_{CP}(KK) - A_{CP}(\pi\pi) \approx 2|A_{CP}(KK)| \approx 2|A_{CP}(\pi\pi)|$
- 2019年LHCb发现粲粒子衰变CP破坏即使用 ΔA_{CP} 方法

两体与多体衰变中的CPV

■ 两体衰变：

- pros：统计量大
- cons：不对称程度仅通过一个数字表征
需要处理产生/探测不对称性

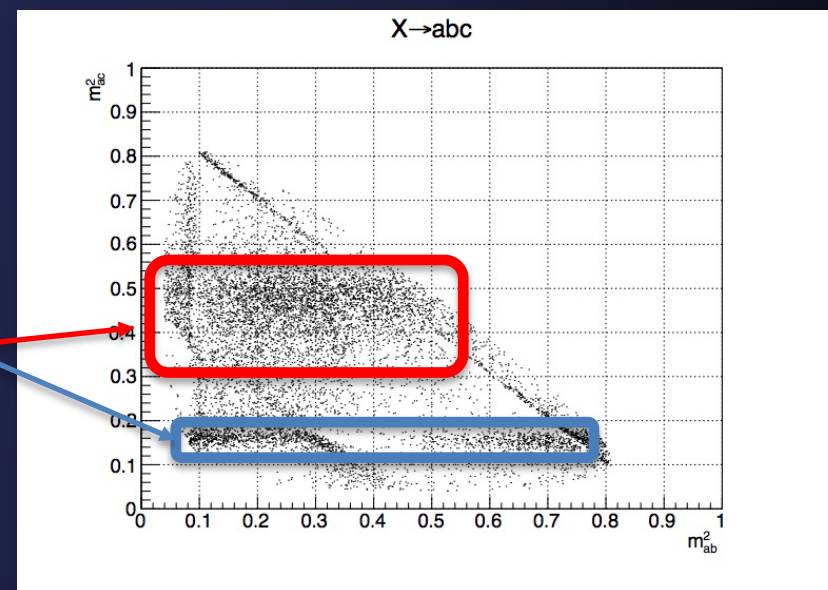
■ 多体衰变：

- pros：可在Dalitz图上研究
相空间结构丰富
可研究共振态CPV效应，对理解CPV更有意义
局部CPV效应可能大于整体CPV效应
- cons：统计量相对小
四体及以上衰变相空间维度过高

Dalitz分析

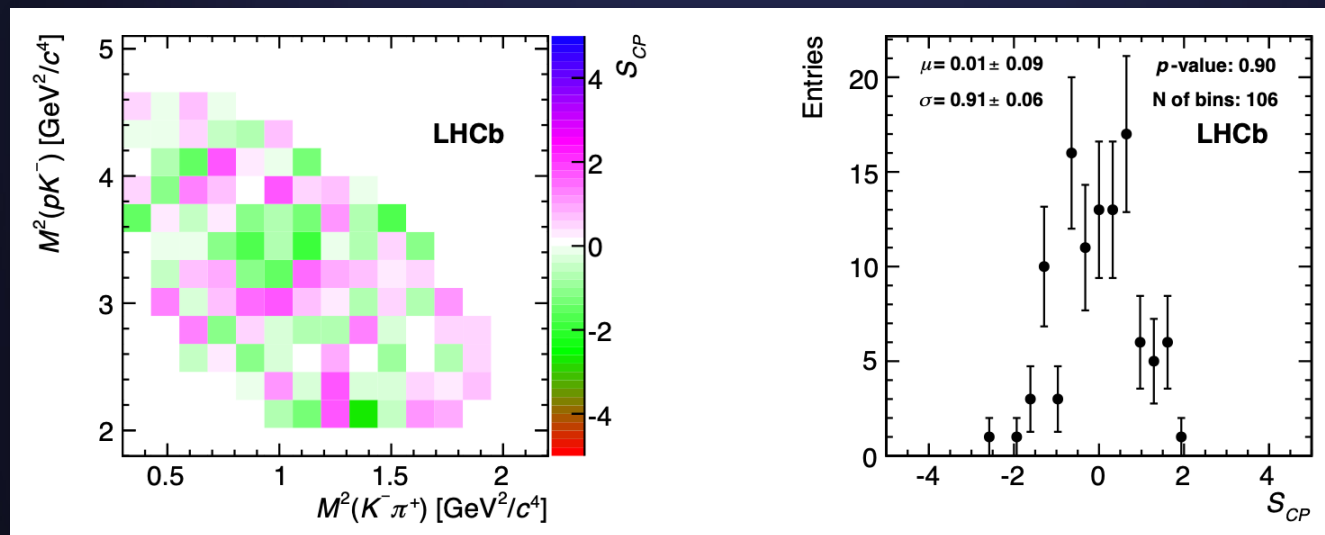
- 对于三体pseudo-scalar衰变，Dalitz图分析可以显示衰变共振态
- 若无共振态：在可以允许的相空间内完全平均分布
- 若有共振态：相空间内结构可以表征其是scaler、vector、tensor
- 在Dalitz相空间内寻找CP破坏：找正反粒子衰变的相空间分布不同
- 方法：binned χ^2 ，energy test，对正反衰变分别的分波分析

Daughters	J^P	Mass	Width	Fit Fraction
a, b	0^+	0.3	0.025	6%
a, b	2^+	0.6	0.05	2%
a, c	1^-	0.4	0.04	18%
a, c	0^+	0.7	0.1	43%
b, c	1^-	0.35	0.01	10%
b, c	0^+	0.75	0.02	17%
a, b, c	non-resonant			1%



Binned χ^2 方法

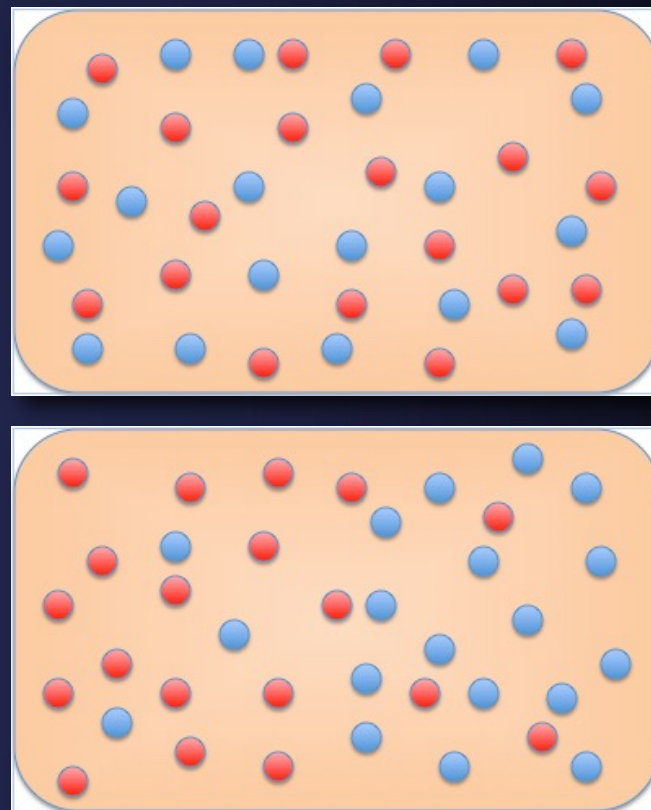
- 简单且最常用的在多体衰变中寻找CP破坏的方法
- 将相空间（常用Dalitz图）分bin，计算每个bin中 S_{CP}^i
- $$S_{CP}^i = \frac{N^i(X) - \alpha N^i(\bar{X})}{\sqrt{N^i(X) - \alpha^2 N^i(\bar{X})}}$$
- 其中 α 是全局不对称性 $\alpha = \frac{N_{tot}(X)}{N_{tot}(\bar{X})}$ ，比较 S_{CP}^i 分布与正态分布差异



Energy test方法

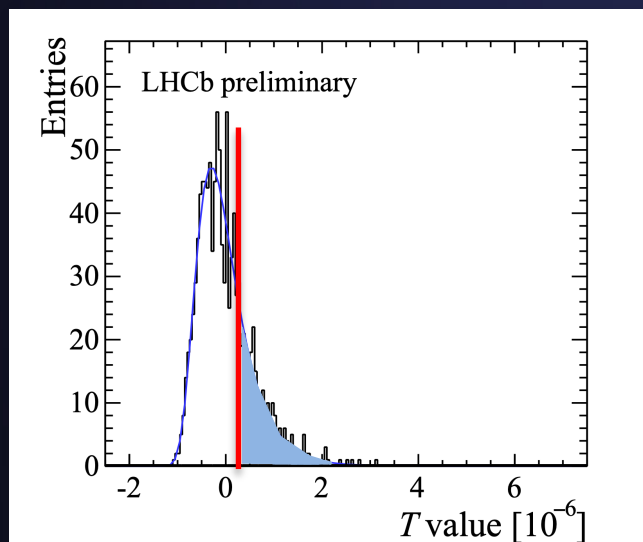
- 在相空间内比较正反粒子衰变分布
- 方法来源于静电势能计算方法
- 在电中性物体中，静电势能最低时正电荷 $+q$ 与反电荷 $-q$ 分布应完全相同
- 当正电荷 $+q$ 与反电荷 $-q$ 分布不同时静电势能上升
- 相空间 $\rightarrow$ 电中性物体
- 正反粒子衰变 $\rightarrow$ 正反电荷
- 利用静电势能计算公式，构建 T 值

$$T = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{i,j>i}^n \psi(d_{ij}) + \frac{1}{\bar{n}(\bar{n}-1)} \sum_{i,j>i}^{\bar{n}} \psi(d_{ij}) - \frac{1}{n\bar{n}} \sum_{i,j}^{n,\bar{n}} \psi(d_{ij})$$

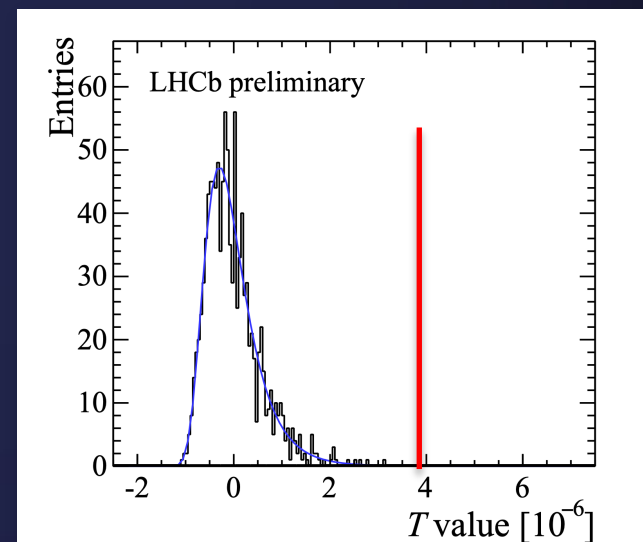


Energy test方法

- 得到T值后，如何判断是否有asymmetry？
- 与无asymmetry的分布做比较。如何得到无asymmetry的分布？
- 将原样本中电荷随机标记——permutation
- p值：permutation T值中高于原T值的比例



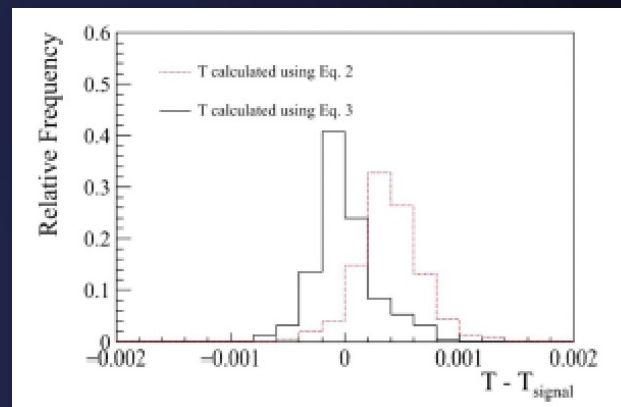
高p值——无CPV



小p值——有CPV

Energy test方法 -背景噪声控制

- 利用额外**bkg**样本，增加**bkg**项，抵消**bkg**对**signal**的相互作用
- **bkg**项可以来自于**sideband**
- 模拟结果可见**bkg**中的**bias**被抵消掉了



$$\begin{aligned} T = & \frac{1}{2w(w-1)} \left(\sum_i^n \sum_{j \neq i}^n \psi_{ij} - \frac{2b}{b_s} \sum_i^n \sum_j^{b_s} \psi_{ij} + \frac{b(b+1)}{b_s(b_s-1)} \sum_i^{b_s} \sum_{j \neq i}^{b_s} \psi_{ij} \right) \\ & + \frac{1}{2\bar{w}(\bar{w}-1)} \left(\sum_i^{\bar{n}} \sum_{j \neq i}^{\bar{n}} \psi_{ij} - \frac{2\bar{b}}{\bar{b}_s} \sum_i^{\bar{n}} \sum_j^{\bar{b}_s} \psi_{ij} + \frac{\bar{b}(\bar{b}+1)}{\bar{b}_s(\bar{b}_s-1)} \sum_i^{\bar{b}_s} \sum_{j \neq i}^{\bar{b}_s} \psi_{ij} \right) \\ & - \frac{1}{w\bar{w}} \left(\sum_i^n \sum_j^{\bar{n}} \psi_{ij} - \frac{\bar{b}}{\bar{b}_s} \sum_i^n \sum_j^{\bar{b}_s} \psi_{ij} - \frac{b}{b_s} \sum_i^{b_s} \sum_j^{\bar{n}} \psi_{ij} + \frac{b\bar{b}}{b_s\bar{b}_s} \sum_i^{b_s} \sum_j^{\bar{b}_s} \psi_{ij} \right), \end{aligned}$$

y_{CP}

- 由于混合的存在, D^0 衰变到CP本征态末态 (KK 或 $\pi\pi$) 的衰变宽度 Γ_{CP+} 与衰变到其他末态 (如CF衰变的 $K\pi$) 的衰变宽度 Γ 会有不同
- 定义 $y_{CP} = \Gamma_{CP+}/\Gamma - 1$
- y_{CP} 满足:
- $y_{CP} \approx \frac{1}{2}(|\frac{q}{p}| + |\frac{p}{q}|)y\cos\phi - \frac{1}{2}(|\frac{q}{p}| - |\frac{p}{q}|)x\sin\phi$
- 与 x 、 y 、 $|q/p|$ 、 ϕ 都有关, 且若无CP破坏, $y_{CP}=y$
- 实验测量: $y_{CP} = \frac{2\tau(D^0 \rightarrow f_{CP})}{\tau(\bar{D}^0 \rightarrow f_{CP}) + \tau(D^0 \rightarrow f_{CP})} - 1$
- $f_{CP}=K\pi$ 末态, $f_{CP}=KK$ 或 $\pi\pi$ 末态

A_Γ

- D^0 与其反粒子衰变到CP本征态末态 (KK 或 $\pi\pi$) 的寿命的不对称性
- $A_\Gamma = -A_{CP}^{indirect}$, 且满足
- $A_\Gamma \approx \frac{1}{2}(|\frac{q}{p}| - |\frac{p}{q}|)y\cos\phi - \frac{1}{2}(|\frac{q}{p}| + |\frac{p}{q}|)x\sin\phi$
- 实验测量 : $A_\Gamma = \frac{\tau(\bar{D}^0 \rightarrow f_{CP}) - \tau(D^0 \rightarrow f_{CP})}{\tau(\bar{D}^0 \rightarrow f_{CP}) + \tau(D^0 \rightarrow f_{CP})}$
- 到目前为止的 y_{CP} 与 A_Γ 测量都没有找到中性粲介子混合中CP破坏的证据

味道标记

$$\mathcal{A}_{CP}(t) = \frac{N(\bar{B}^0(t) \rightarrow f_{CP}) - N(B^0(t) \rightarrow f_{CP})}{N(\bar{B}^0(t) \rightarrow f_{CP}) + N(B^0(t) \rightarrow f_{CP})}$$

Reconstruction &
Selection

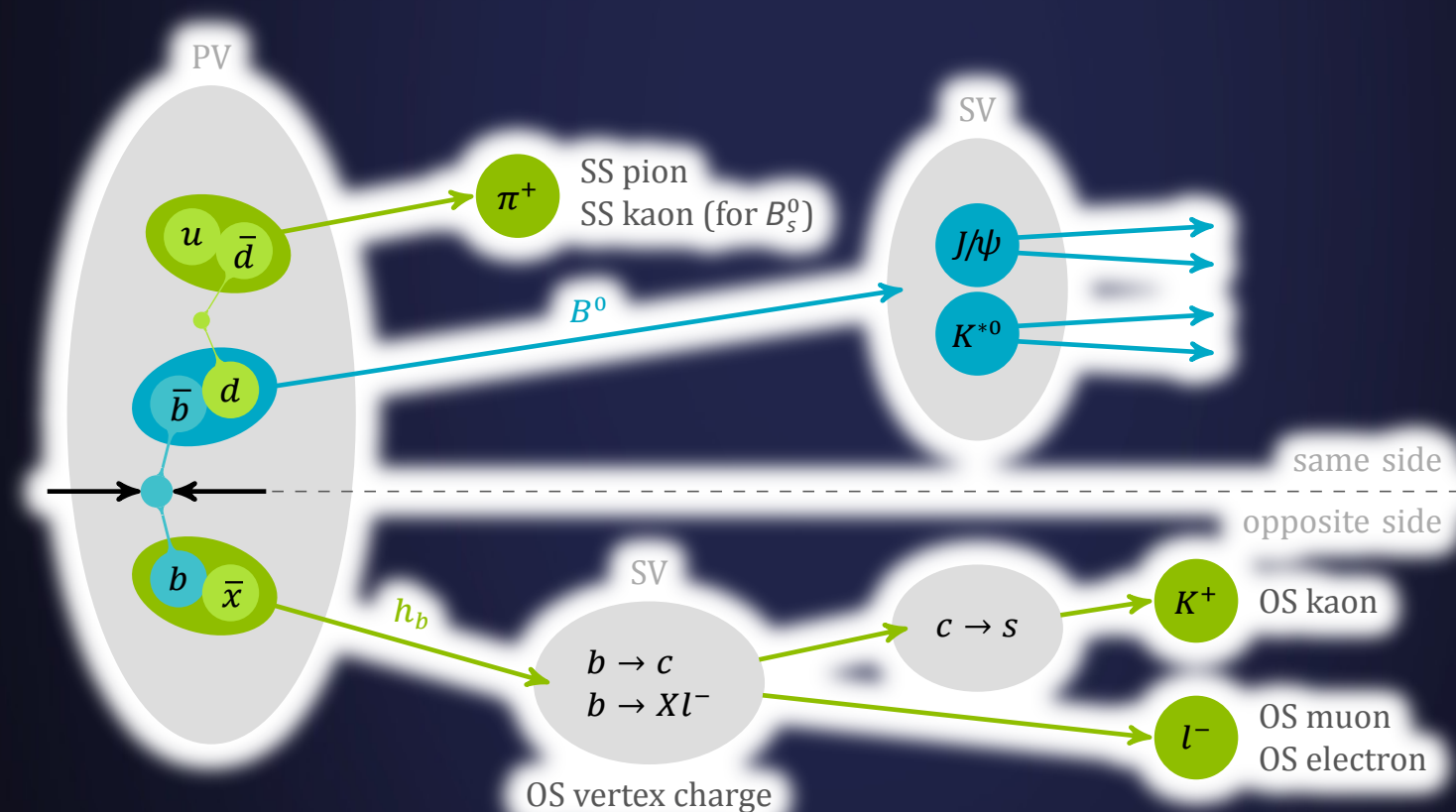
Flavour Tagging

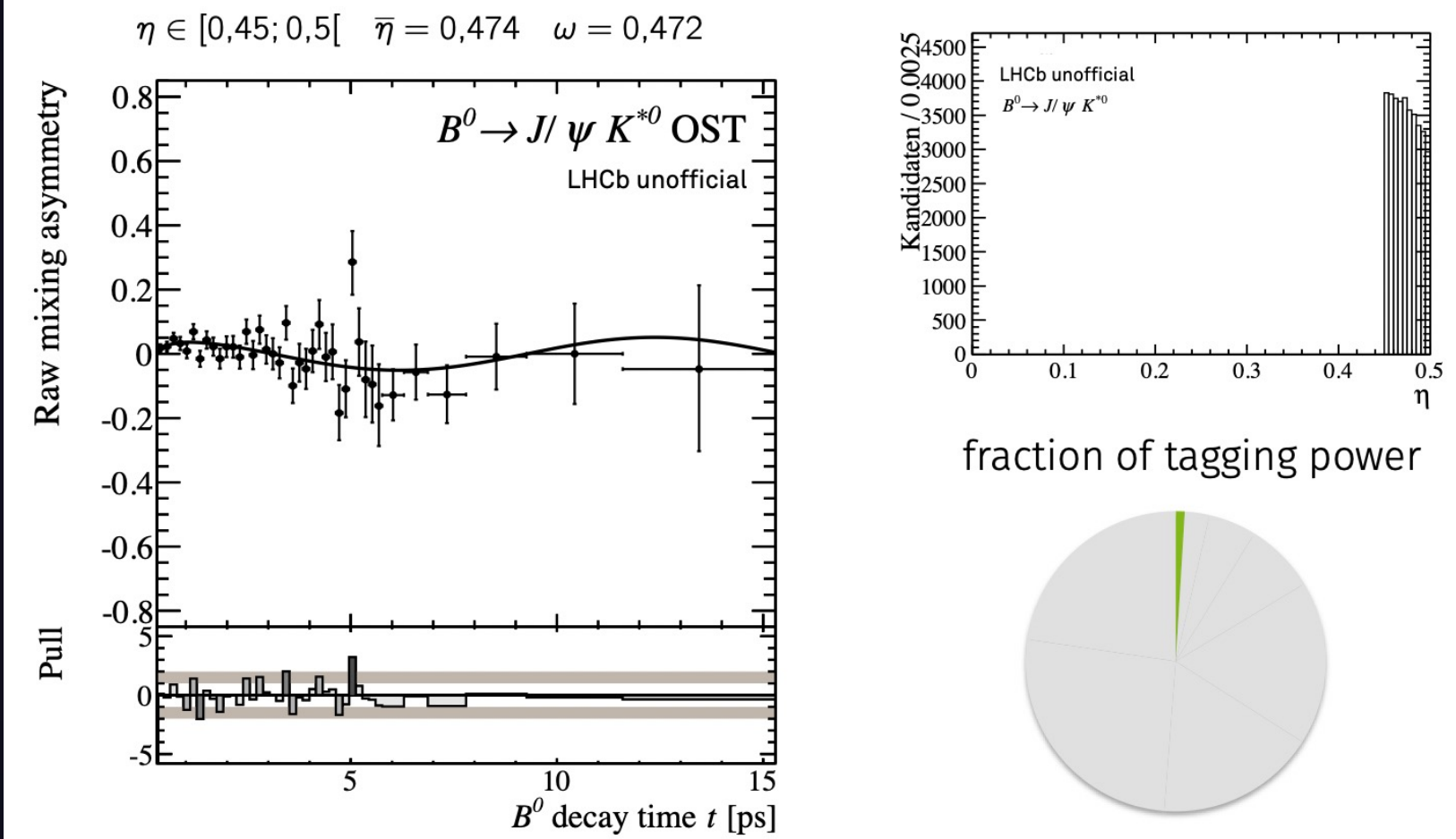
Decay Time

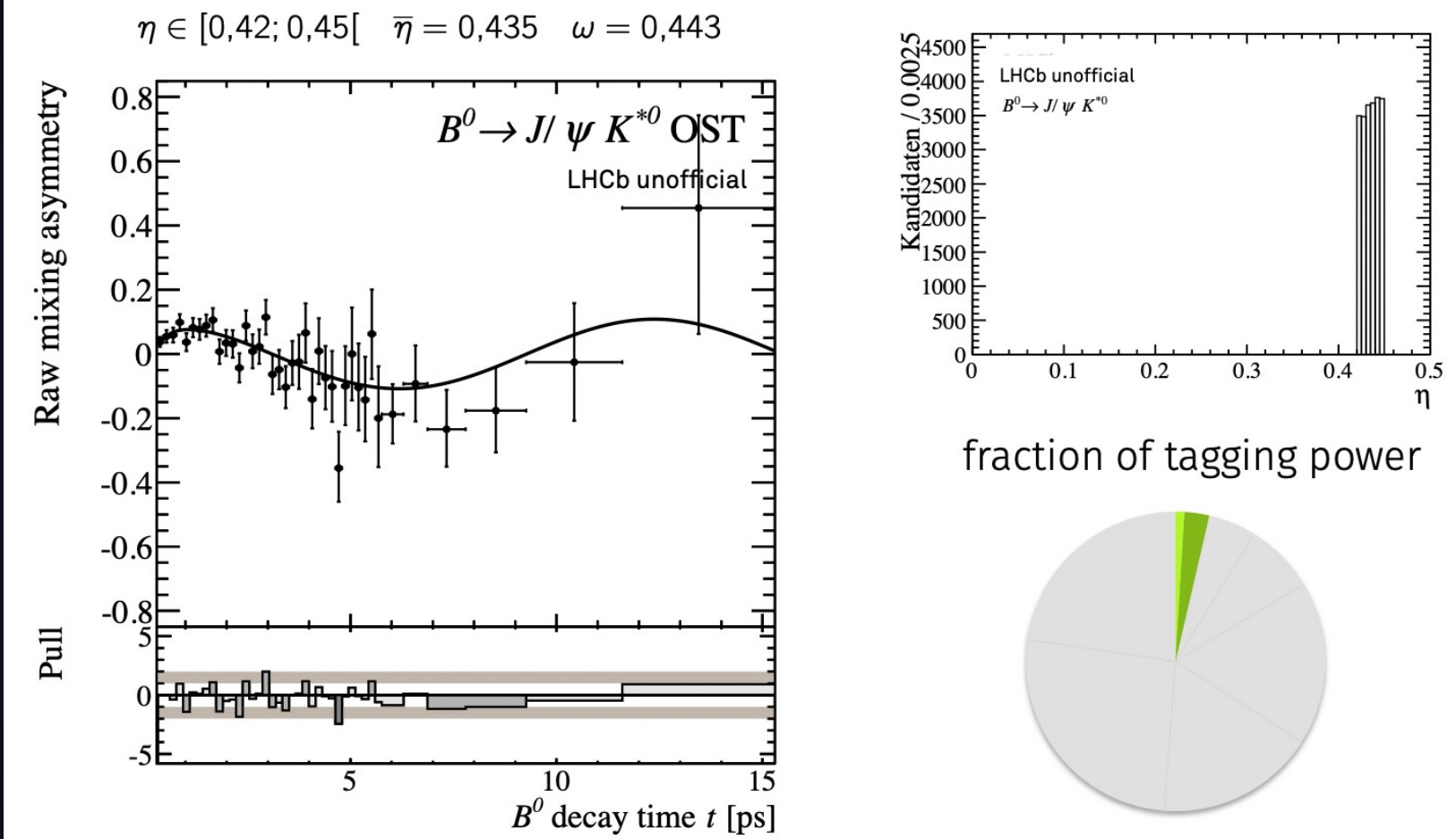
$$\begin{aligned} \mathcal{A}_{\text{mix}}(t) &= \frac{N_{\text{unmixed}}(t) - N_{\text{mixed}}(t)}{N_{\text{unmixed}}(t) + N_{\text{mixed}}(t)} \\ &= \frac{\left(N(B^0(t) \rightarrow f) + N(\bar{B}^0(t) \rightarrow \bar{f}) \right) - \left(N(B^0(t) \rightarrow \bar{f}) + N(\bar{B}^0(t) \rightarrow f) \right)}{\left(N(B^0(t) \rightarrow f) + N(\bar{B}^0(t) \rightarrow \bar{f}) \right) + \left(N(B^0(t) \rightarrow \bar{f}) + N(\bar{B}^0(t) \rightarrow f) \right)} \end{aligned}$$

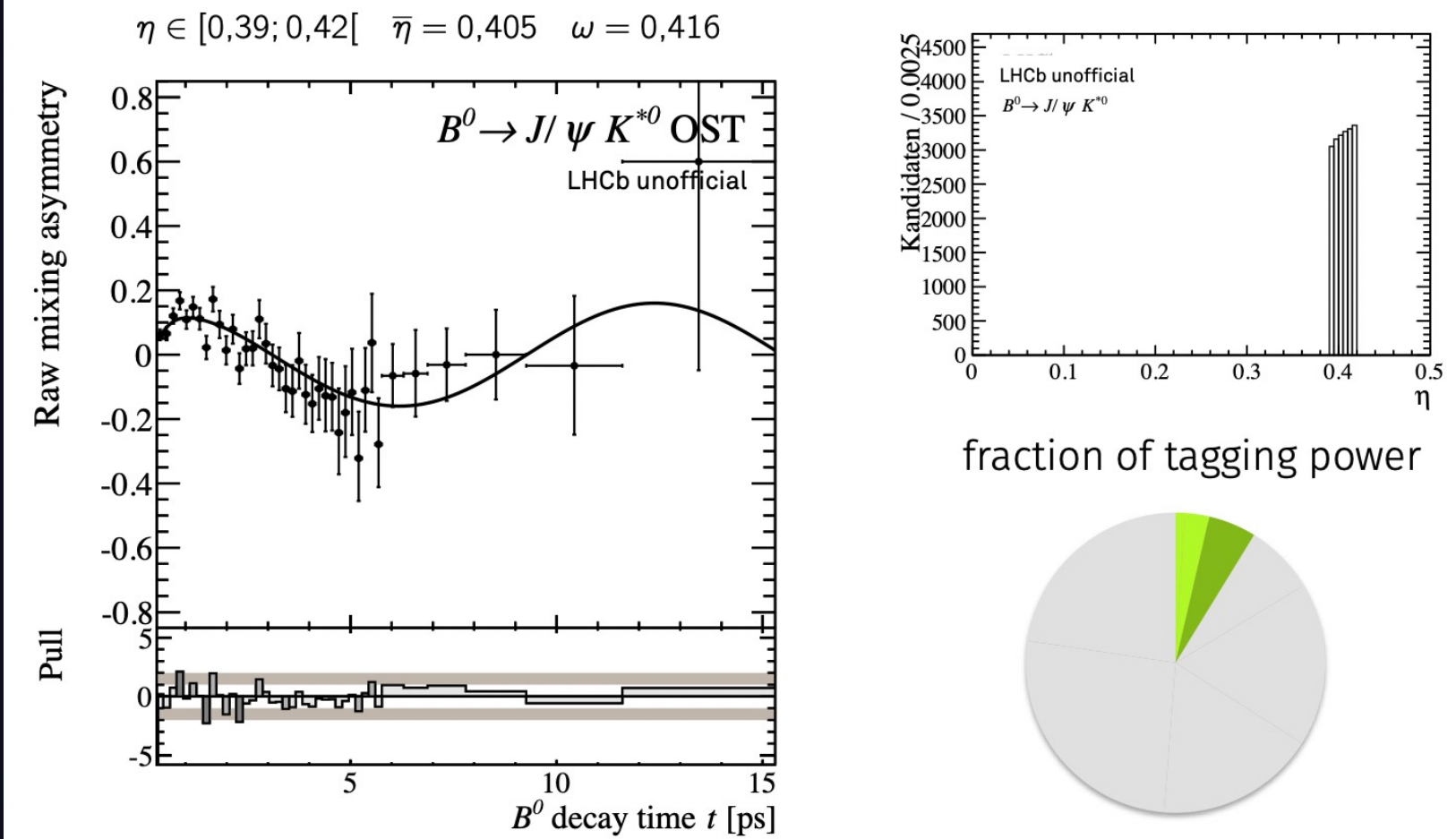
味道标记： B^0 粒子：

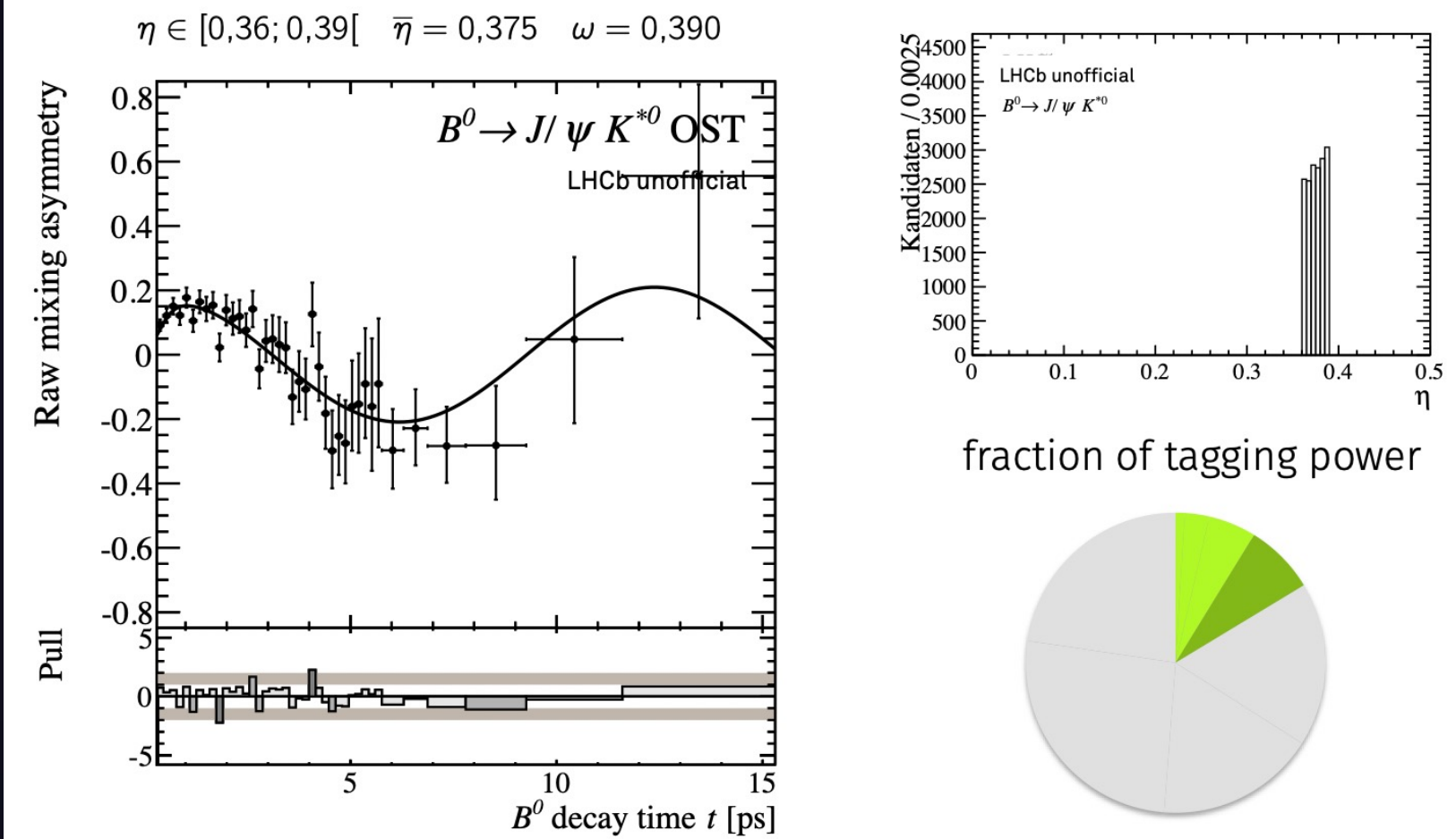
- 由于震荡的存在，我们需要知道它们的初始味道
- 方法：通过中性介子产生时的伴随产物标记
- B^0 粒子：

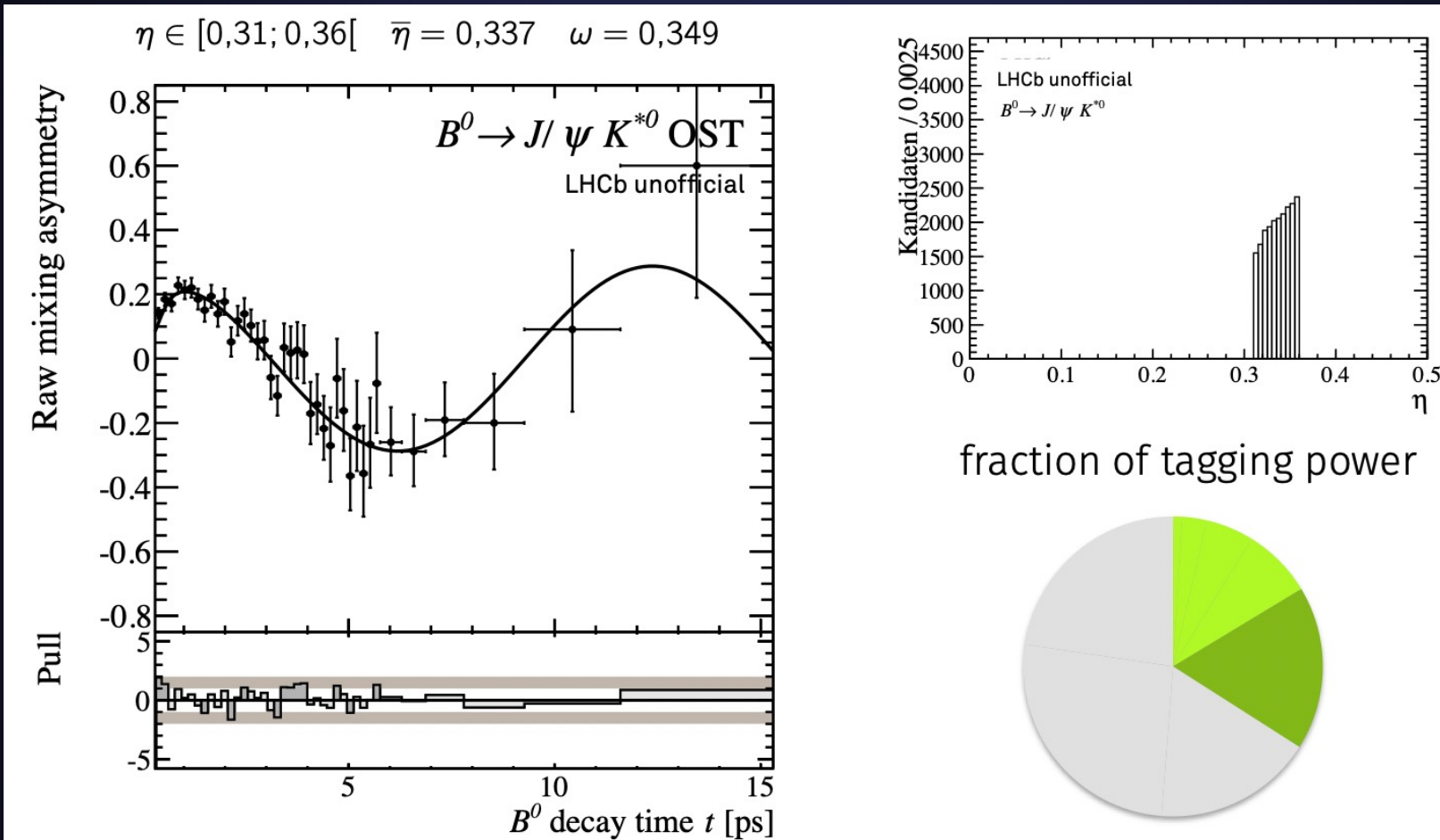


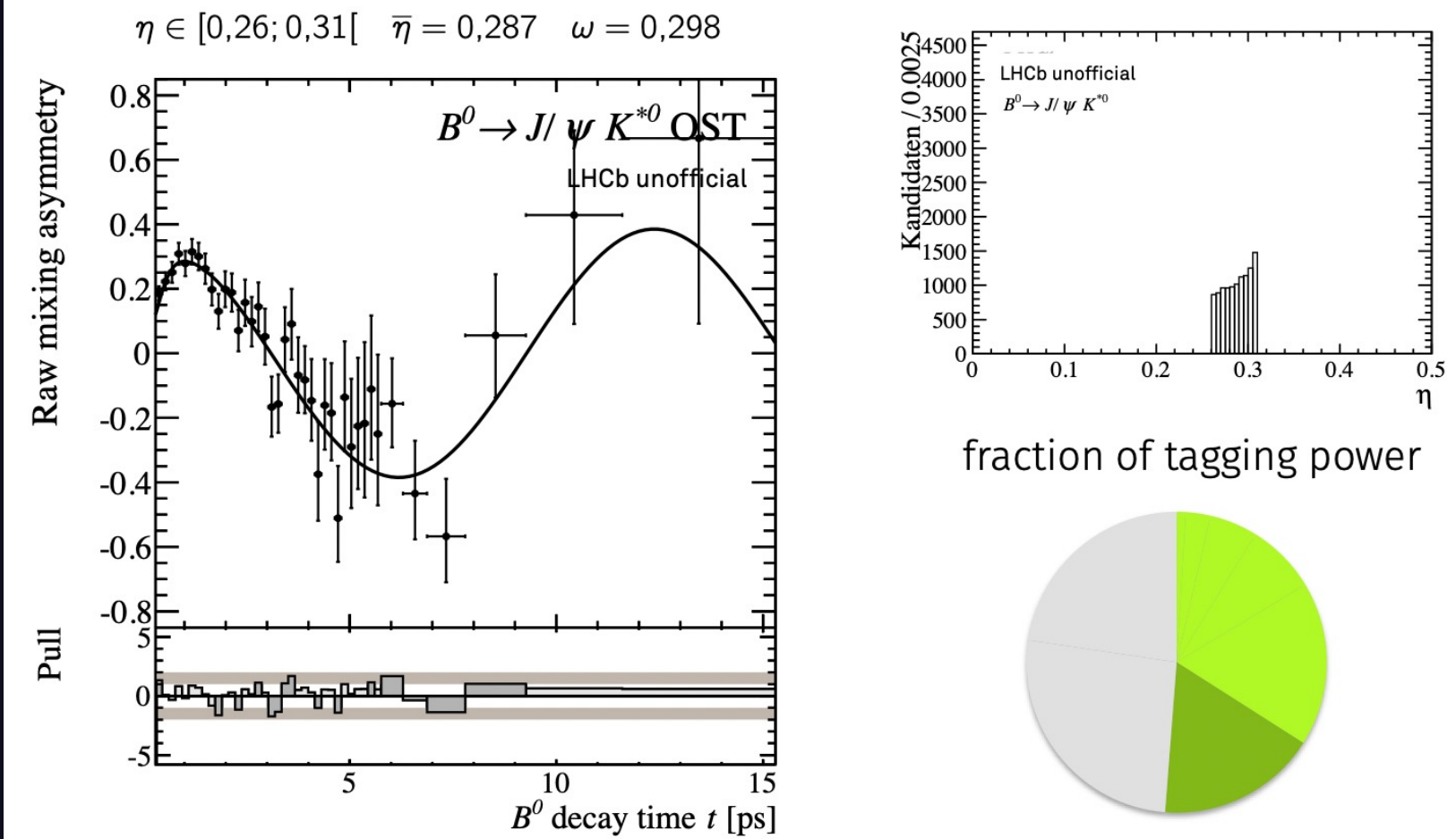


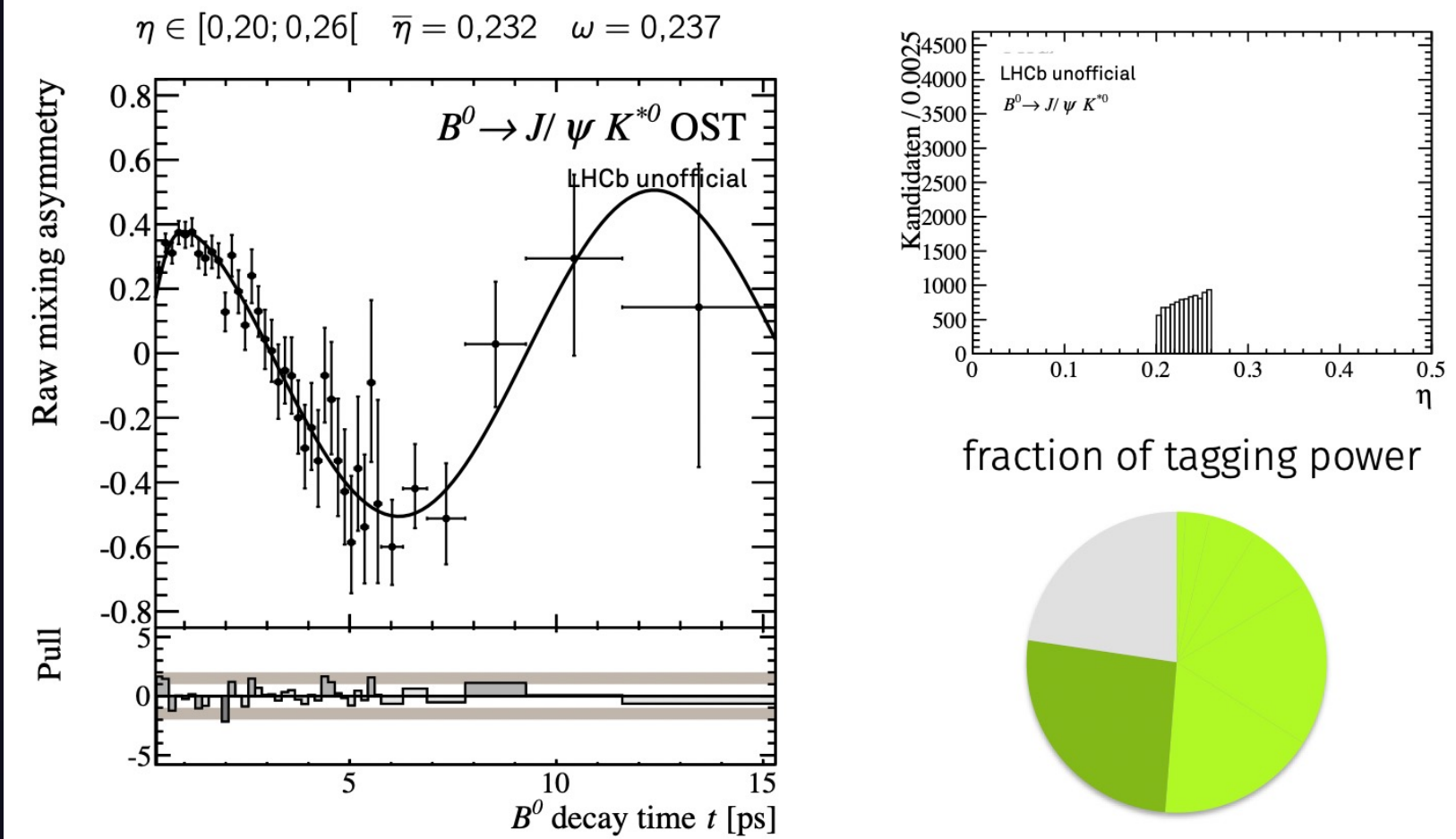


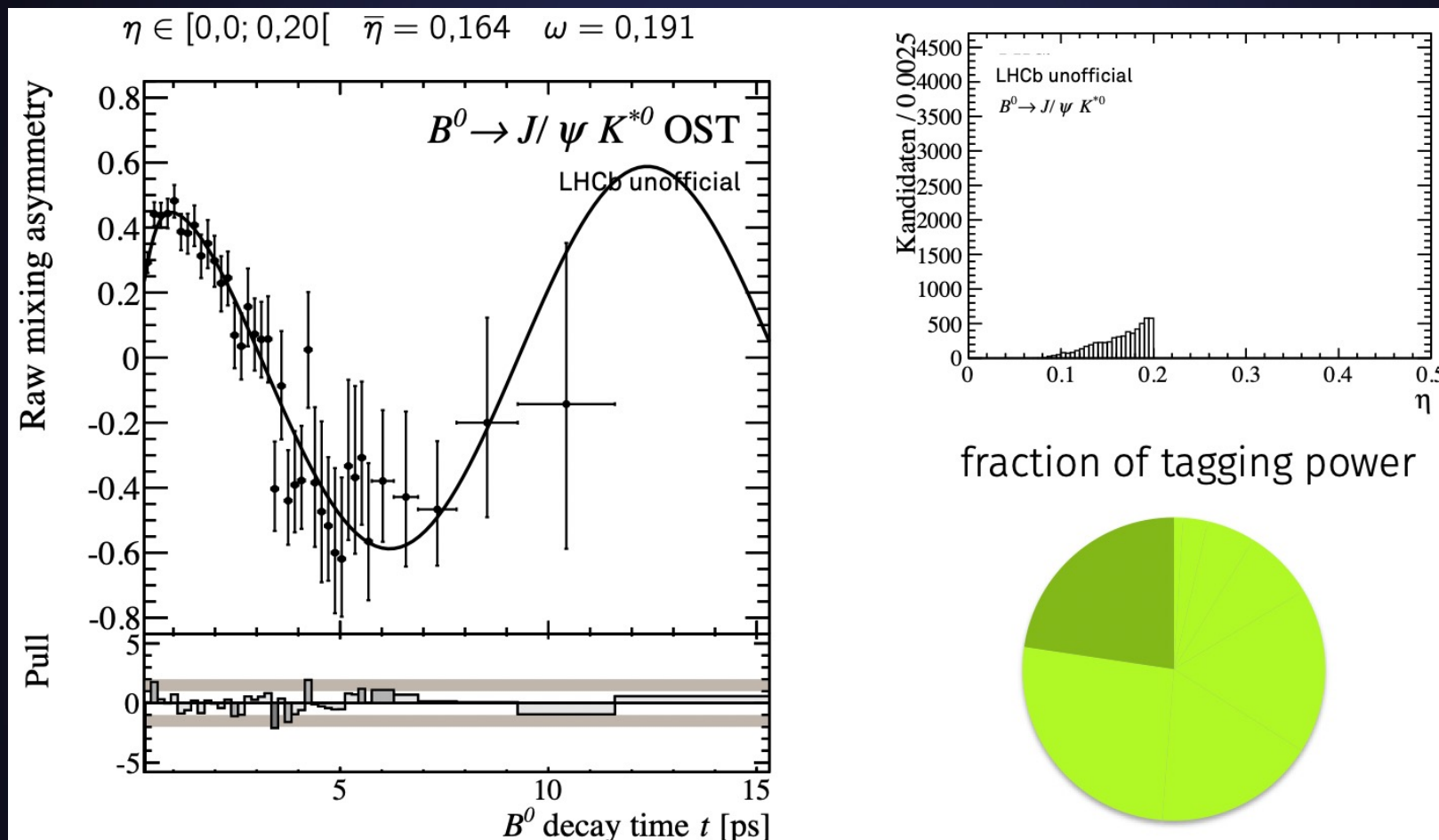






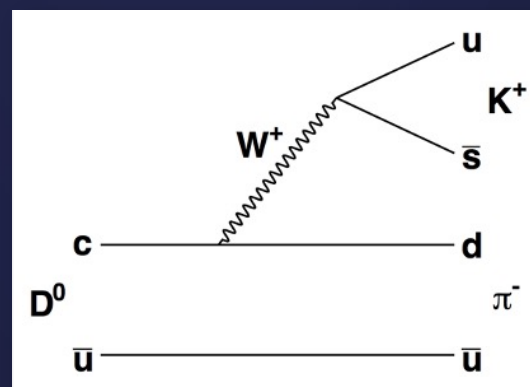
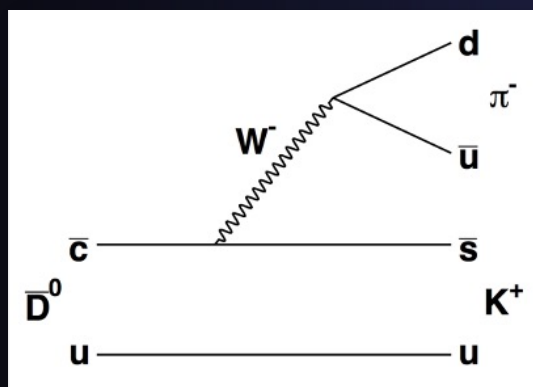
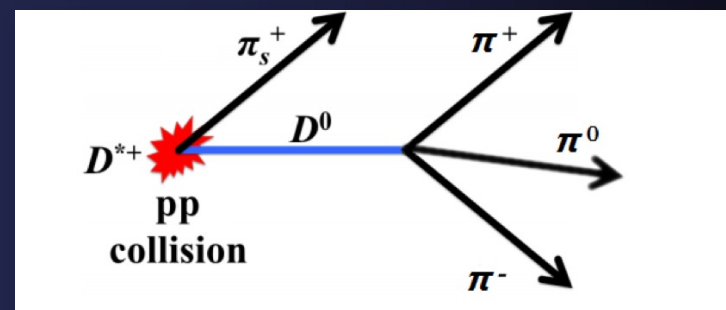






味道标记： D^0 粒子

- D^* tag:
- 利用 $D^{*+} \rightarrow D^0 \pi^+$ 衰变过程中 D^{*+} 与 D^0 间质量差异仅比一个 π^+ 介子的质量高出一一点，所以 π^+ 介子有动量很低的特征，利用该低动量介子 π^+ 的电荷做标记
- Right sign (RS) 与 Wrong sign (WS) 衰变
- Cabibbo-favoured (CF) doubly-Cabibbo-suppressed (DCS)

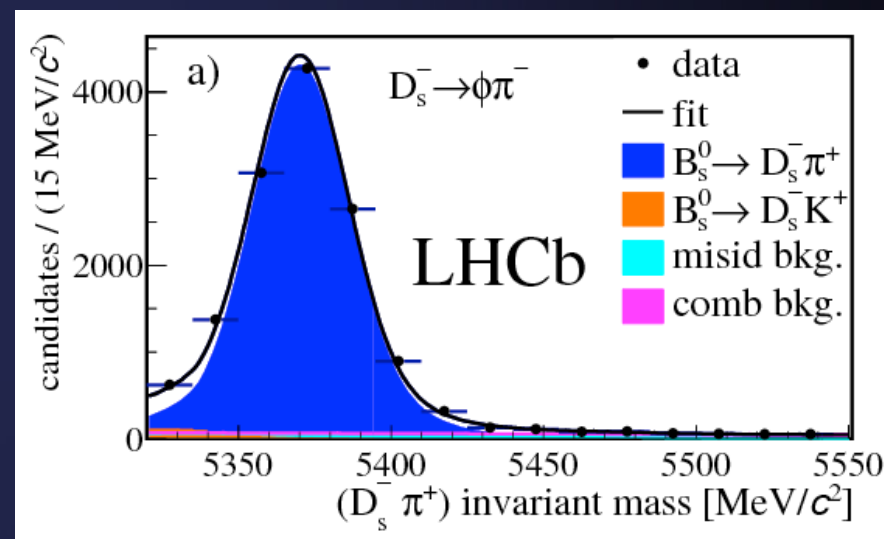
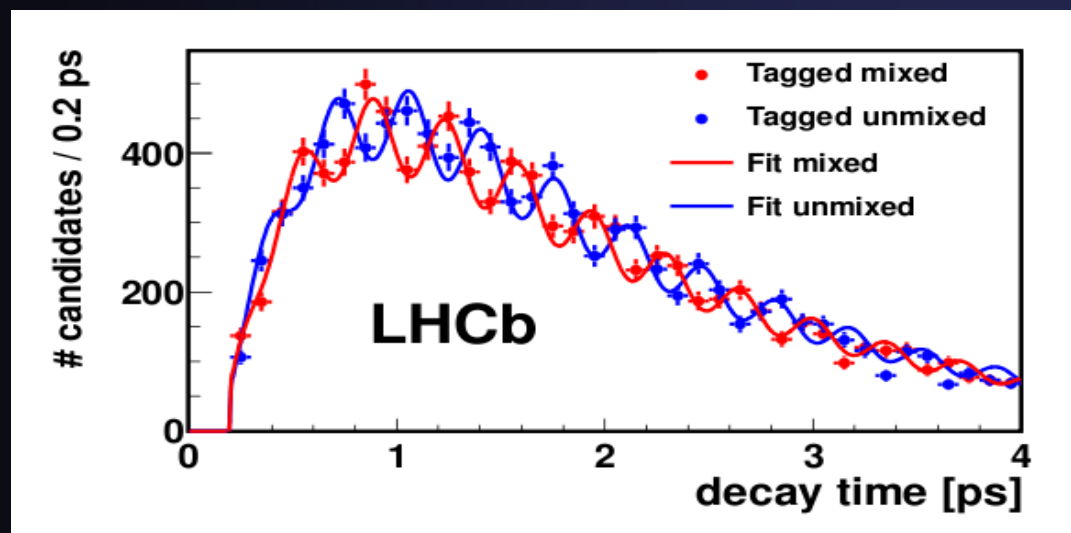


一些LHCb上的分析举例

Bs 混合测量

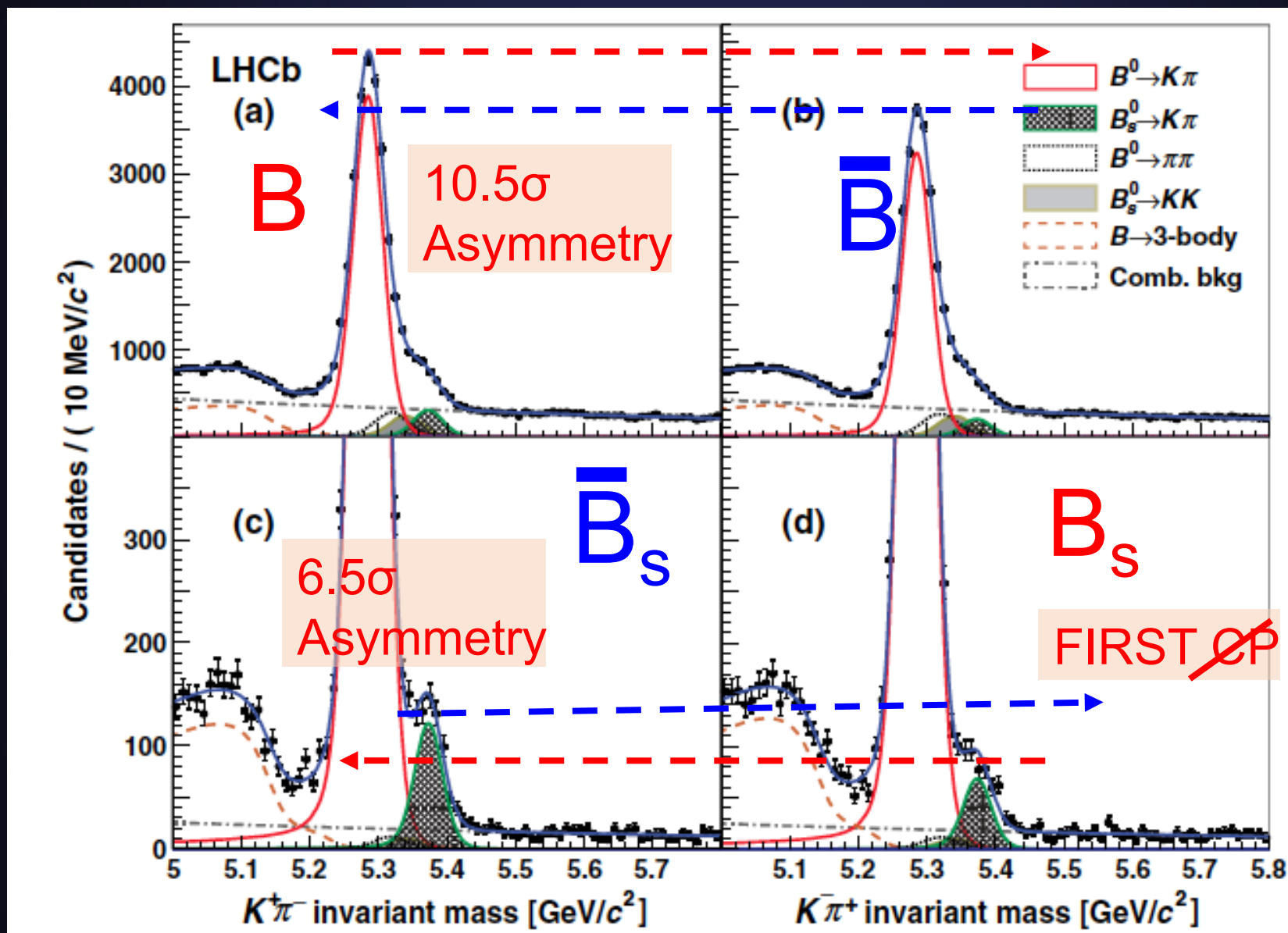
- CDF实验2006年发现Bs混合, LHCb实验2011年测量

$$A_{\text{mix}}(t) = \frac{N(B_s^0; q = +1)(t) - N(B_s^0; q = -1)(t)}{N(B_s^0; q = +1)(t) + N(B_s^0; q = -1)(t)}$$



- Bs震荡周期: 3 Trillion Hz

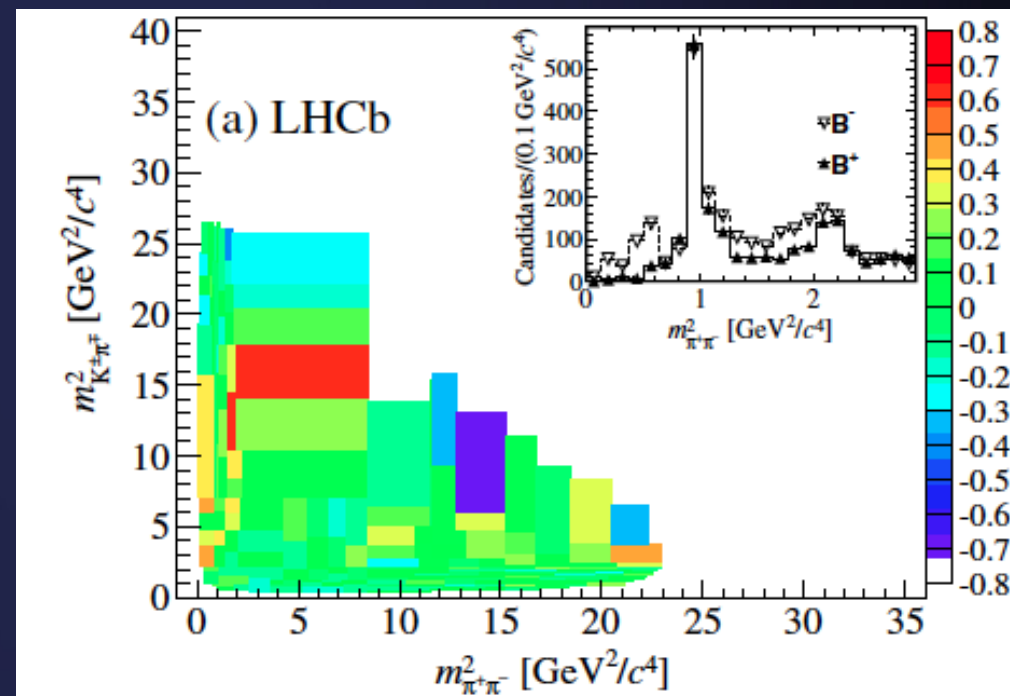
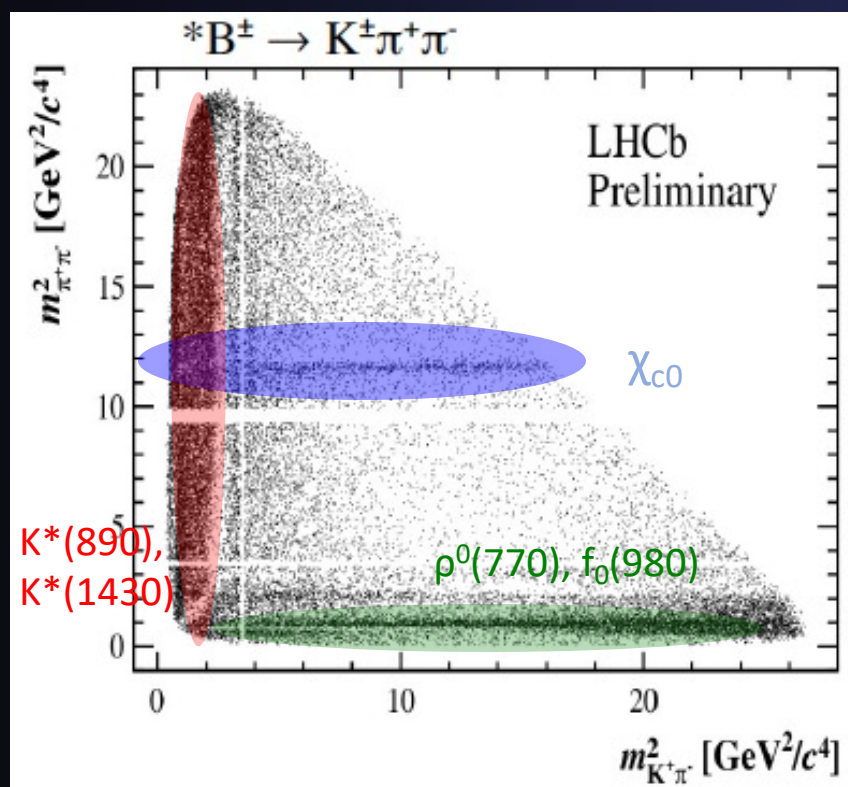
直接CP破坏测量：两体 B^0 和 B_s^0 衰变



直接CP破坏测量： 三体衰变 $B^{\pm} \rightarrow hhh$

- 比较Dalitz图， 不同即CP破坏

$$A_{cp} = \frac{\Gamma(B^- \rightarrow f) - \Gamma(B^+ \rightarrow f)}{\Gamma(B^- \rightarrow f) + \Gamma(B^+ \rightarrow f)}$$



D^0 混合现象的发现和混合参数 x , y 的测量

■ 考虑WS decay $D^0 \rightarrow K^+\pi^-$ 与RS decay $D^0 \rightarrow K^-\pi^+$ 之间的比值随时间的变化

■ 应符合公式

$$R(t) = \frac{N_{WS}(t)}{N_{RS}(t)} \approx R_D + \sqrt{R_D} y' \frac{t}{\tau} + \frac{x'^2 + y'^2}{4} \left(\frac{t}{\tau}\right)^2$$

■ 对数据拟合, 可得到 y' 与 x'^2

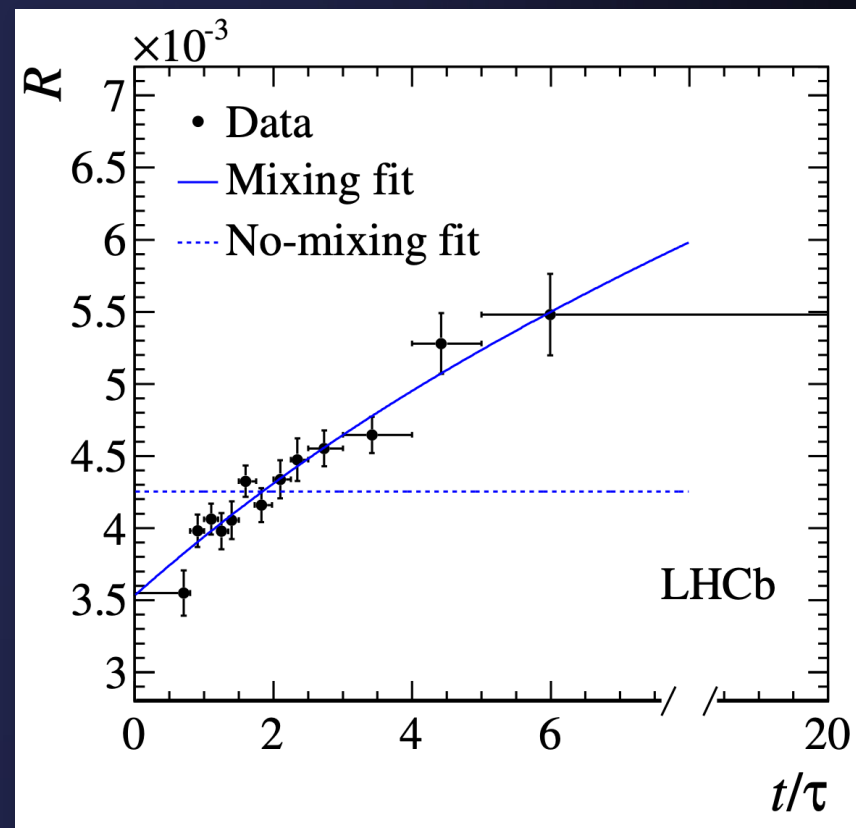
■ y' 和 x' 是通过将 y 和 x “旋转”了DCS与CF间强相角差异 δ 后得到的

- $x' = x \cos \delta + y \sin \delta$

- $y' = y \cos \delta - x \sin \delta$

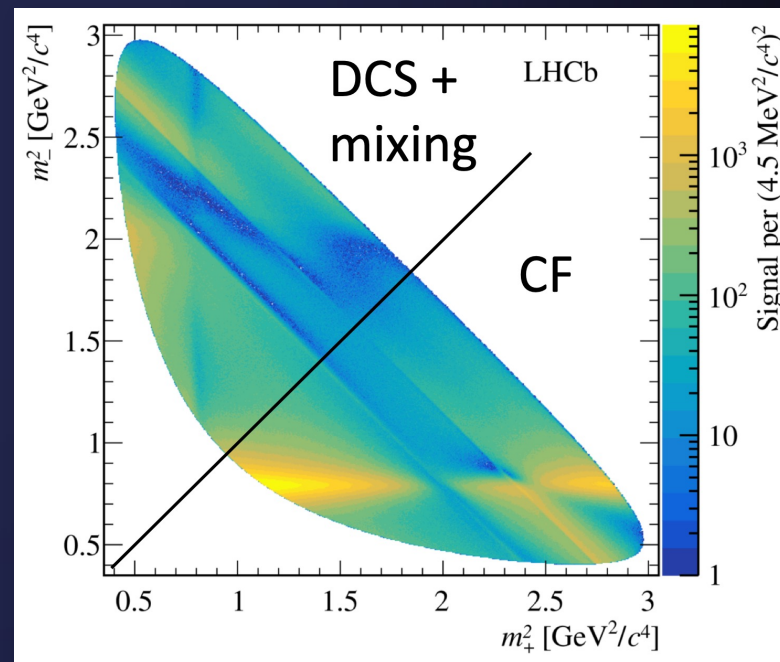
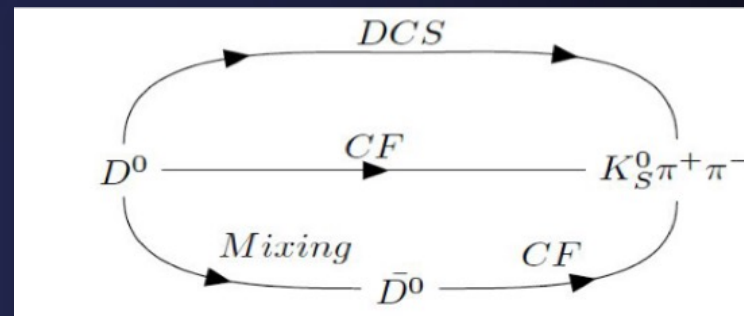
■ 2012年首次单一实验发现混合现象

■ 缺点: δ 未知, x' 符号未知



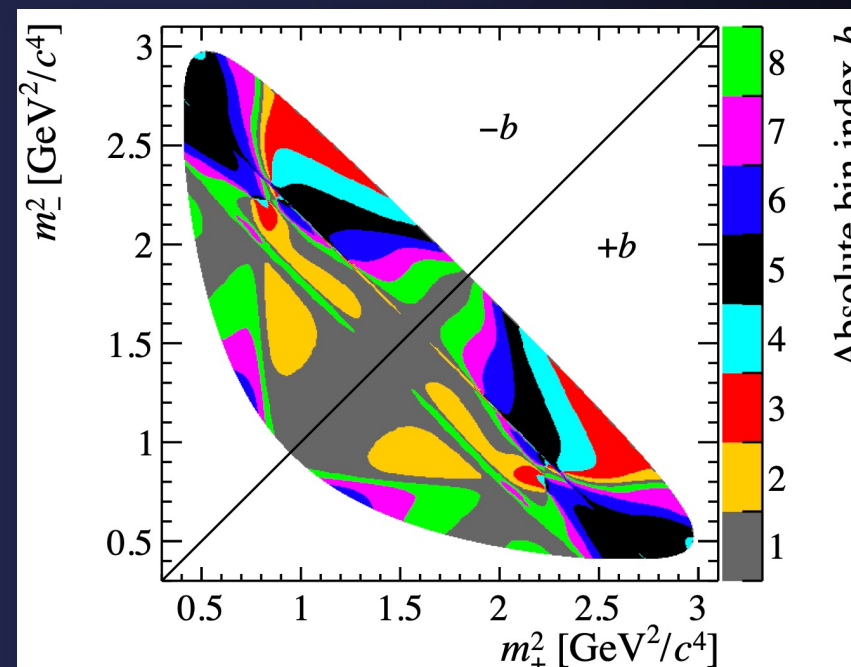
利用 $D^0 \rightarrow K_S^0 \pi^+ \pi^-$ 衰变测量混合参数

- $D^0 \rightarrow K_S^0 \pi^+ \pi^-$
 - 测量混合参数的“Golden Channel”
 - 有许多可能的interfering amplitudes
 - 衰变末态在同一个相空间内
-
- ‘bin-flip’方法
 - 振荡贡献主要在Dalitz图的上半部分
→上下部分比值对混合参数敏感



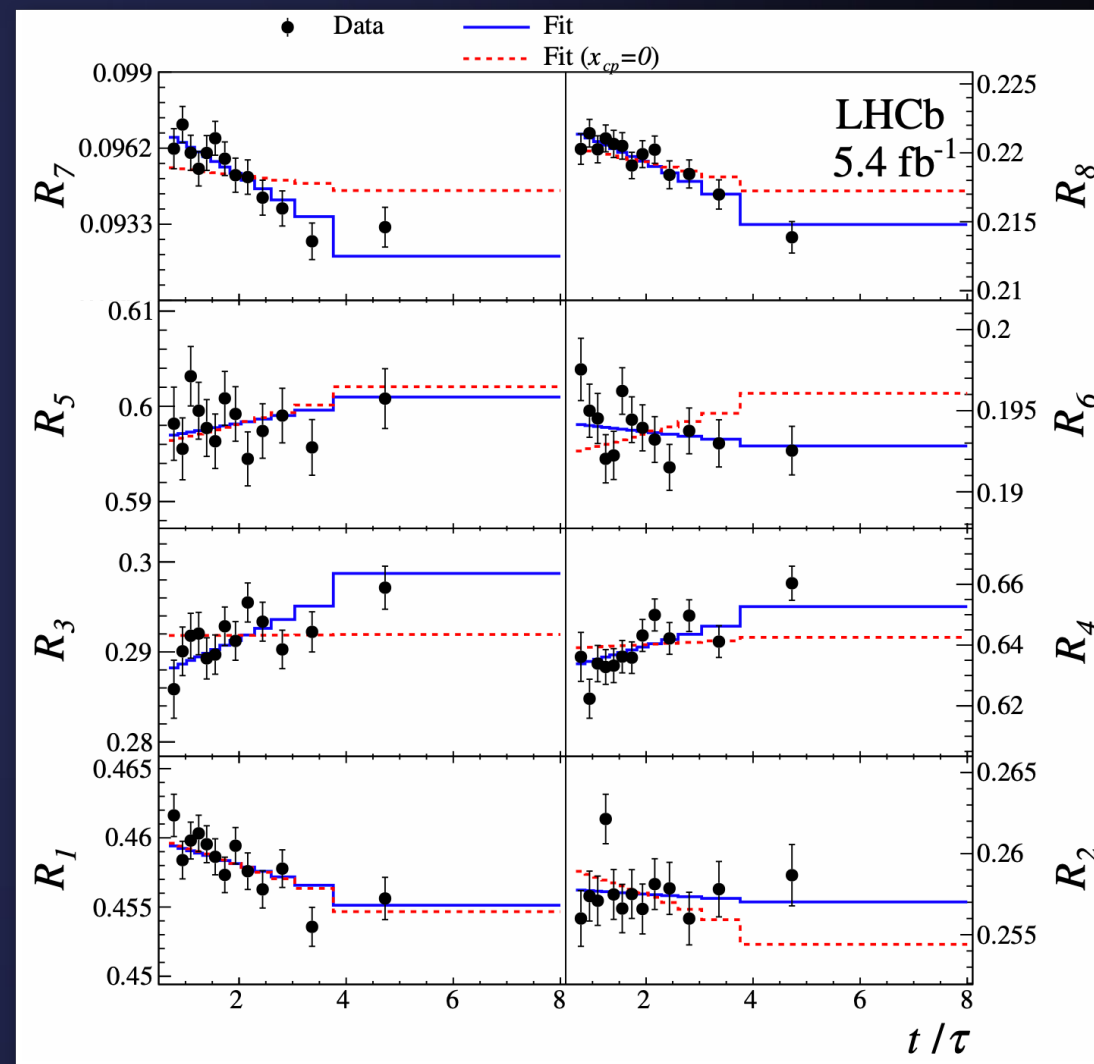
利用 $D^0 \rightarrow K_S^0 \pi^+ \pi^-$ 衰变测量混合参数

- 分bin依据：
CLEO和BESIII测得的强相角
以此减少不同强相角对结果的抵消
- 分析思路：
- 对8（强相角bin） $\times$ 2（上下区域）
个bin分别做对时间依赖的拟合，
得到对时间依赖的产额，进而得到
对时间依赖的比值
- 对 D^0 与 $\bar{D}^0$ 取平均值 或 分开分析
- 对 比值随时间的变化 进行拟合，拟合方程中含有x、y参数



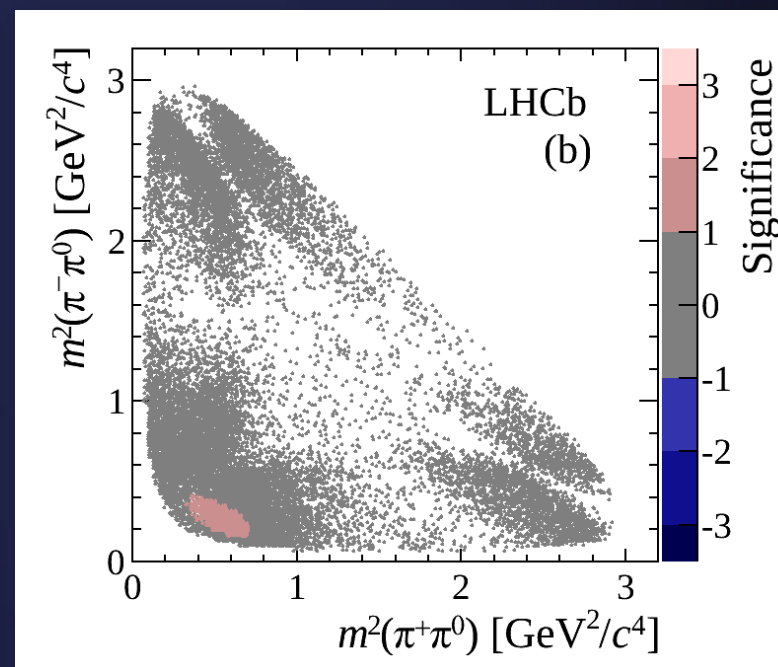
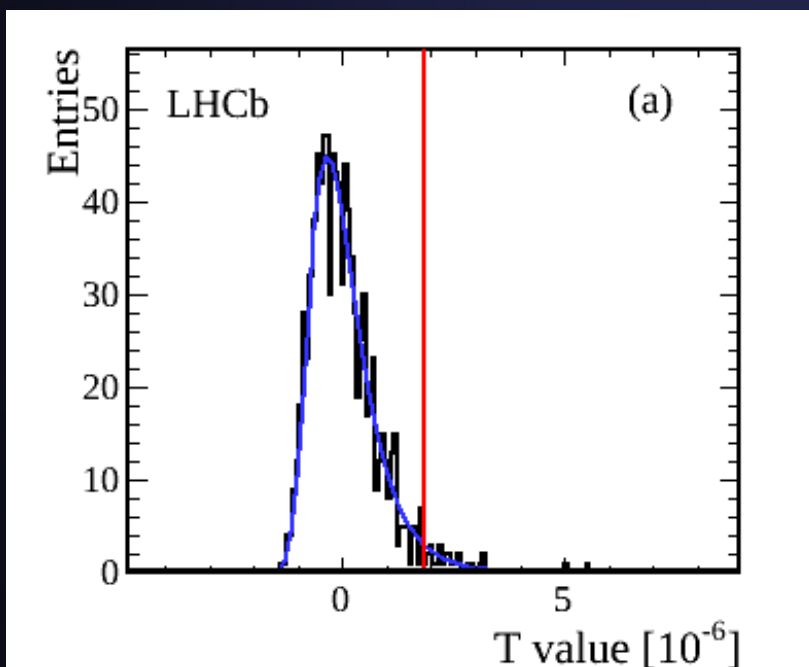
利用 $D^0 \rightarrow K_S^0 \pi^+ \pi^-$ 衰变测量混合参数

- 结果:
- $x = (3.98^{+0.56}_{-0.54}) \times 10^{-3}$
- $y = (4.6^{+1.5}_{-1.4}) \times 10^{-3}$
- 首次 x 测量距0超过 7σ
- 即首次观测到非0的质量本征态之间的差异
- 同时测量了 $|q/p|$ 和 $\phi = \arg(q\bar{A}/pA)$
- 没有混合中的CP破坏迹象



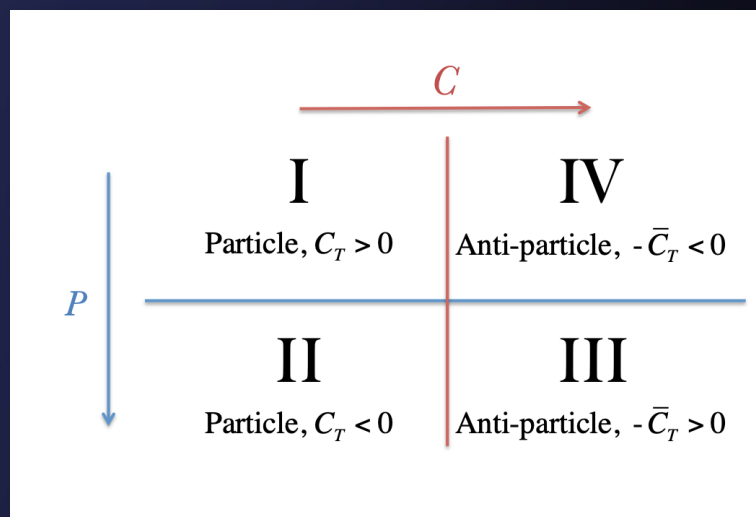
$D^0 \rightarrow \pi^- \pi^+ \pi^0$ 衰变中的CP破坏测量

- Energy test的首次应用： $D^0 \rightarrow \pi^- \pi^+ \pi^0$ 衰变
- 利用每个衰变事件对T值贡献可画出相空间内主导Asymmetry的区域
- p值： $(2.6 \pm 0.5)\%$



三体衰变与四体衰变

- 多体衰变中独立变量与末态粒子数关系： $3n-7$
- 三体衰变→自由度2，可以在Dalitz图上分析
- 四体衰变→自由度5，构建相空间方法很多，质量组合、Helicity角等
- 分bin方法：每个维度可分的bin数很有限
- 四体衰变：可利用Triple p product的符号测量P-odd情况下的CP破坏
- $C_T = \vec{p}_3 \cdot (\vec{p}_1 \times \vec{p}_2)$ ，满足 $CP(C_T) = -C(C_T) = -\bar{C}_T$
- P-even: I+II vs. III+IV
- P-odd: I+IV vs. II+III



$D^0 \rightarrow \pi^- \pi^+ \pi^- \pi^+$ 衰变中的CP破坏测量

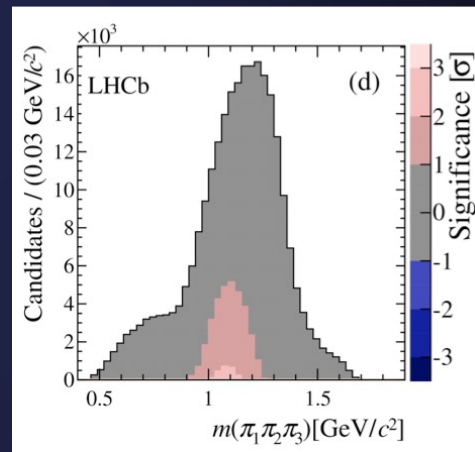
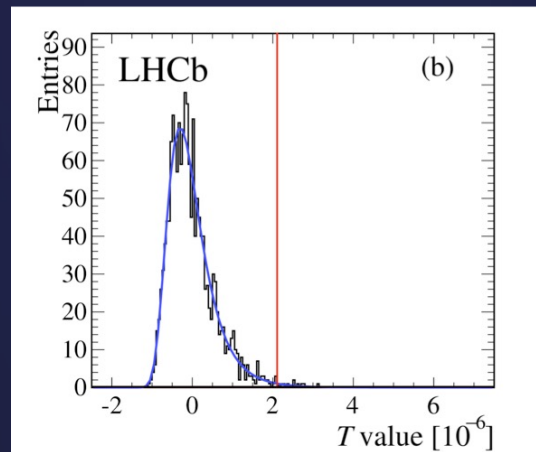
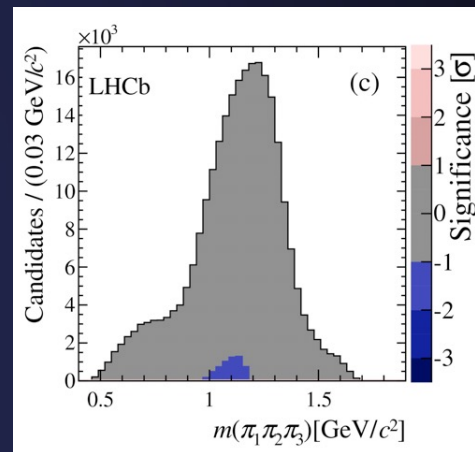
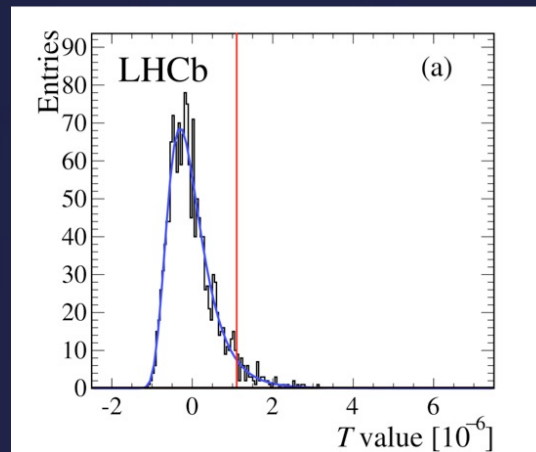
■ p值：

■ P-even： $(4.6 \pm 0.5)\%$

■ 无CP破坏迹象

■ P-odd： $(0.6 \pm 0.2)\%$

■ 2.7σ ，在无迹象边缘



总结

总结

■ LHCb对CP破坏的研究取得了很多关键突破

- 单一实验发现中性粲介子混合现象
- 发现粲介子两个质量本征态间质量差异
- 发现粲强子衰变的CP破坏
-

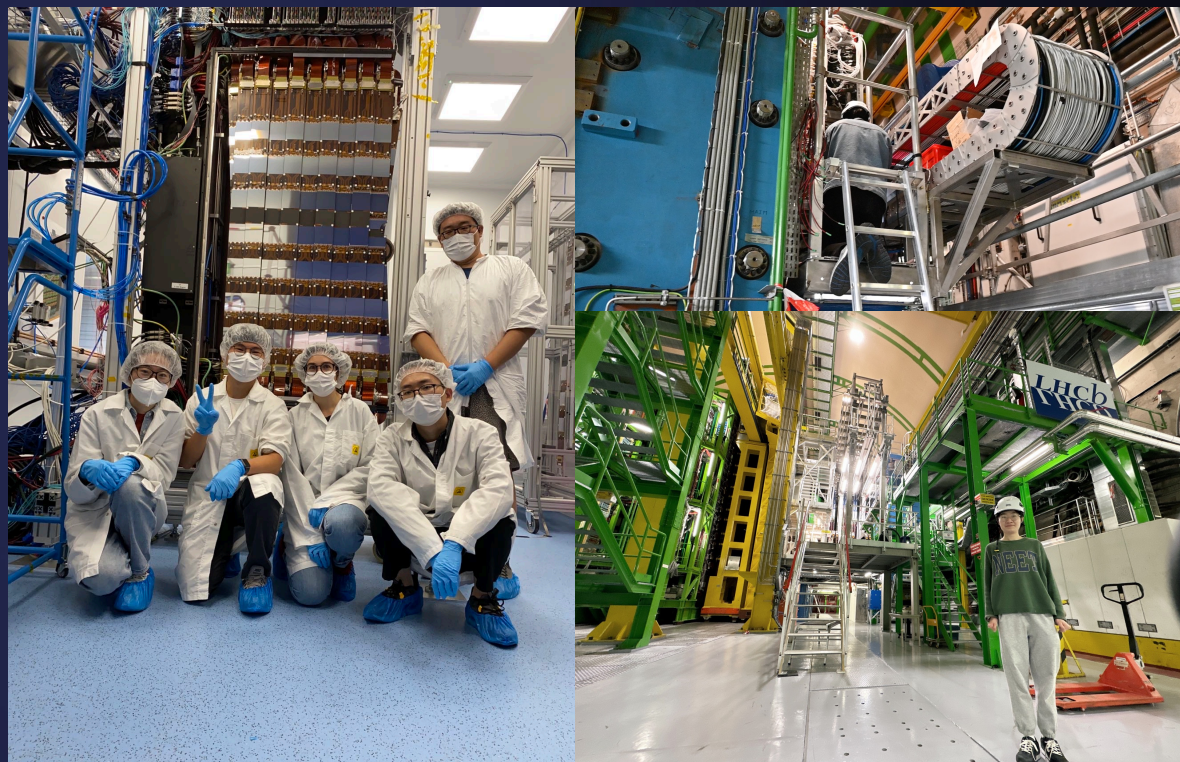
■ 仍有很多关键问题没有解决

- 混合中是否存在CP破坏？
- 多体衰变中CP破坏在相空间内如何分布？
-

■ 在LHCb升级之后，将会有更庞大的数据，将有助于解决这些关键问题

高能所与LHCb实验

- 高能所参与了大型强子对撞机（LHC）上四个主要实验中的三个
- 高能所参与了LHCb实验一个径迹探测器的制作与安装
 - 高能所的研究生和职工在安装工作中做出了重要贡献
- 高能所将要领导下一次升级过程中上游径迹探测器的设计
- 未来的LHCb实验将与其它实验一起，进一步探索正反物质不对称的谜题



谢谢大家