

时 间 反 演 不 守 恒

美国科学家萨克斯学术报告纪录稿

南 京 大 学 革 命 委 员 会

一九七三年七月

这个题目是我顶喜欢讲题目。这个题目比较复杂，要引进一些新的概念。最好举行一系列讲座不是只讲一次。这里只是很简单地做一个一般性的介绍。介绍高能物理方面近年来的进展一个特殊的方面。时间反演守恒是物理学上很老的问题。早在本世纪初在统计物理上首先讨论到这个问题。其次在1936年Wigner在量子力学上曾讨论这个问题，但只有在最近在高能物理上发现时间反演守恒这个老的概念不一定完全正确。这就是我所要讲的。我认为这个问题在物理上是一个很重要的问题，没有人能提供一个理论来说明我所讲的这个问题，

我们只能描写这个问题，我们不能解释它，还没有理论。这个问题目前还没有什么实用价值，因此在现阶段来中国讲这个题目似乎不太合适。但是说没有实用价值是说不定的。可以肯定的所讲的不会使人返老还童，因为讲到时间反演常会引起人们想到返老还童。我这里不会讲返老还童问题。

这个人们还不能理解的理论，我个人认为是理论物理的基础，是个根本性的问题，是对于非常小的时间空间中理解其中的一些关系的问题。

我要讲的分两部分。第一先讲 CPT 守恒问题，这要花比较多的时间。第二讲 CPT 不守恒和与之相关的时间反演不守恒。

现在先讲 CPT 什么意思。

首先， P 称为反演。这是左手坐标系变为右手坐标系的变换，把直角坐标系 x 变为 $-x$ ， y 变为 $-y$ ， z 变为 $-z$ ，这样的变换称为宇称变换。 P 代表宇称。这种变换在量子力学上用来规定波函数的宇称的。大家都知道关于宇称不守恒，中国人李政道、杨振宁做了不少工作。我们首先回忆一下关于宇称守恒问题。在1955或1956年前人们认为物理定律及粒子运动的微分方程，当坐标系从这个左手坐标系变换到右手坐标系时，是不变的，即认为宇称是守恒的。

在1955年，人们发现 K^+ 介子的性质很奇怪。它可以衰变成为两个 π 介子，也可以衰变成为三个 π 介子。即

$$K^+ \rightarrow 2\pi \quad \text{或} \quad K^+ \rightarrow 3\pi$$

最初人们认为也许是两种不同的粒子。但是它们的质量和它们其他的性质却是完全一样的。许多人想理解这一点。奇怪的是在于如果 K 介子有一确定的宇称，而且如果宇称又是守恒的，那么它就不可能既有 2π 衰变，又有 3π 衰变，因为 2π 态和 3π 态具有不同的宇称。李和杨提出在 K 介子衰变过程中宇称可能不守恒。令 K 介子衰变是一种弱相互作用过程，而原子核的 β 衰变也是一种弱相互作用，于是他们提出，如果在 K 介子衰变中宇称不守恒，那么在 β 衰变中宇称也应该不守恒。他们建议了各种实验来验证宇称不守恒。吴健雄等从 Co^{60} 的实验证明宇称确实不守恒的。所以我们现在知道，弱相互作用中宇称不守恒。

另外有一种对称性，称为非正当 (improper) 对称性。它所对应的变换不能象转动变换那样逐步地进行，它只可能或者这样或者那样。电荷共轭就是这样一种对称性，它用 C 来表示。 C 使一个粒子变为一个反粒子。这对称性是在1932年根据 Dirac 的电子论发现的。正电子就是负电子的反粒子。现在我们知道任何粒子都有它的反粒子。即使我们现在讨论的这种最奇异的粒子也都各有其对应的反粒子。只有光子和 π^0 介子例外，它们是粒子和反粒子合一的。以前人们相信所有的理论，所有的运动方程，所有的量子力学，所有的微分方程在变换 C 下都是不变的。但是当在弱相互作用过程中发现宇称守恒被破坏后，几乎与此同时发现电荷共轭的对称性也遭到破坏。但是经过深入的研究，发现 C, P 一起，还是守恒的。 C, P 变换合在一起时对称性又恢复了。

我们可以这样来考虑这个问题。1955年以前人们认为，一个物

理的过程和它在一面镜子反射下所见到的是同样的结果，而在1955年，李、汤认为对弱相互作用经过镜子反射后所见到的结果并不一样，1956年的吴健雄等用 α_0^{60} 的实验更证明了这点。但是如果想象另外一种镜子它不但能够反射而且还可以把粒子转变成为它的反粒子，那么你就会看到相同的结果。于是人们就松了一口气，说这样好了，经过 α - β 交换之后，世界的对称性被恢复了。不过这也留下一个未决的问题，那就是会不会在某些情况下 α - β 对称性也遭到某种程度的破坏？

现在我要讲在弱相互作用过程中 α - β 对称性并不是一个理想的对称性。1960年以前有许多实验都表明 α - β 是一个好的对称性。这里我讲讲中性的 π 介子， π^0 介子。顺便提一下子还有带电的 π^+ 介子，和 π^- 介子，和中性的 K^0 介子及 $\bar{K}^0$ 介子。 $\bar{K}^0$ 介子是 K^0 介子的反粒子。它们的质量都在 500 MeV 左右，这是 $m c^2$ 值。自旋为0。奇异数可以告诉你奇异粒子在强相互作用过程中（例如 $p-p$ 碰撞， $p-\pi$ 碰撞）是怎样产生的。如果反应后总的奇异数为零，那么你就可以产生出奇异粒子。对于 K^0 介子，奇异数 $S=+1$ ，对于反 K 介子 $\bar{K}^0$ ，奇异数 $S=-1$ 。 K 介子是不稳定的。它可以通过各种方式衰变，衰变成为 2π ， 3π 或 $\pi\mu$ ，或 πe 。就是说一个 K 介子可以衰变为两个 π 介子，三个 π 介子，或成为一个 π 介子，一个 μ 介子和一个中微子，或一个 π 介子，一个电子和一个中微子。带电的 K 介子的寿命约为 10^{-8} 秒。问题在于不带电的 K 介子的寿命是多少？这是我要讲的问题的关键所在。我们现在讨论 K^0 介子的寿命。

Gellmann和Pais指出： K^0 和 $\bar{K}^0$ 有着完全相同的质量。他们指出许多事实，表明 K^0 和 $\bar{K}^0$ 都能衰变成两个 π 介子，这意味着 K^0 和 $\bar{K}^0$ 之间有一种弱耦合，是一种双度弱耦合。



图上A点是弱耦合，B点也是弱耦合。虚线表示放出虚的 2π ， 3π 等而后被吸收下去的虚过程。通过这种虚过程， K^0 和 $\bar{K}^0$ 耦合起来。

在力学上如果有两个振动系统，它们的振动频率完全相同，那么不管它们之间的耦合是如何弱，这种耦合会立刻改变它们的振动频率，一个频率变高，另一个变低，能量可以在这两个系统之间来回流动。在我们这里所讨论的问题上也会出现类似的情形，只不过现不是真正的频率，而是衰变寿命，衰变寿命^是虚（数）的频率。所以讨论到衰变寿命时，你必须考虑它们之间的耦合。于是这里出现的情形就和经典力学中出现的情形完全一样。现在令 $|K^0\rangle$ 为 K^0 的状态， $|\bar{K}^0\rangle$ 为 $\bar{K}^0$ 的状态。由于存在着这种弱耦合，你要把这两个状态线性组合起来。

现在假定C.P.是守恒的我们在这样的假设之下讨论问题，看应该取那一种线性组合。对中性的体系可以讨论C.P的本征态。如果我们定义 $\bar{K}$ 状态为：

$$|\bar{K}^0\rangle = CP |K^0\rangle$$

。将粒子变成反粒子这个方程决定了状态的相对位相，这是个位相定义问题。现在体组合

$$|K_1\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|K^0\rangle + |\bar{K}^0\rangle)$$

$$|K_2\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|K^0\rangle - |\bar{K}^0\rangle)$$

显然

$$CP | K_1 \rangle = | K_1 \rangle$$

$$CP | K_2 \rangle = - | K_2 \rangle$$

于是 $| K_1 \rangle$ 是 CP 的本征态，其本征值为 $+1$ 。而 $| K_2 \rangle$ 是 CP 的本征态，其本征值是 -1 。

$K^0 \rightarrow 2\pi$ 是一种最强的衰变方式。因为这种衰变方式要比其他衰变方式快 500 倍左右。

如果取 $| 2\pi \rangle$ 态，任何 2π 态，则 $CP | 2\pi \rangle$ 总是偶的。这是一般的结果。即

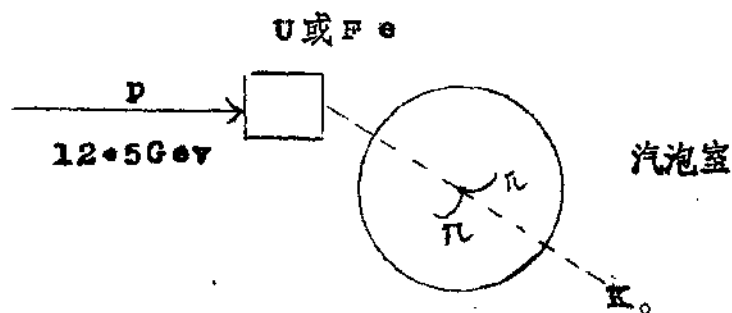
$$CP | 2\pi \rangle = | 2\pi \rangle$$

于是如果在弱相互作用下： CP 守恒，则只有

$$K_1 \rightarrow 2\pi$$

是可能的，而 K_2 则不会衰变成 2π 。

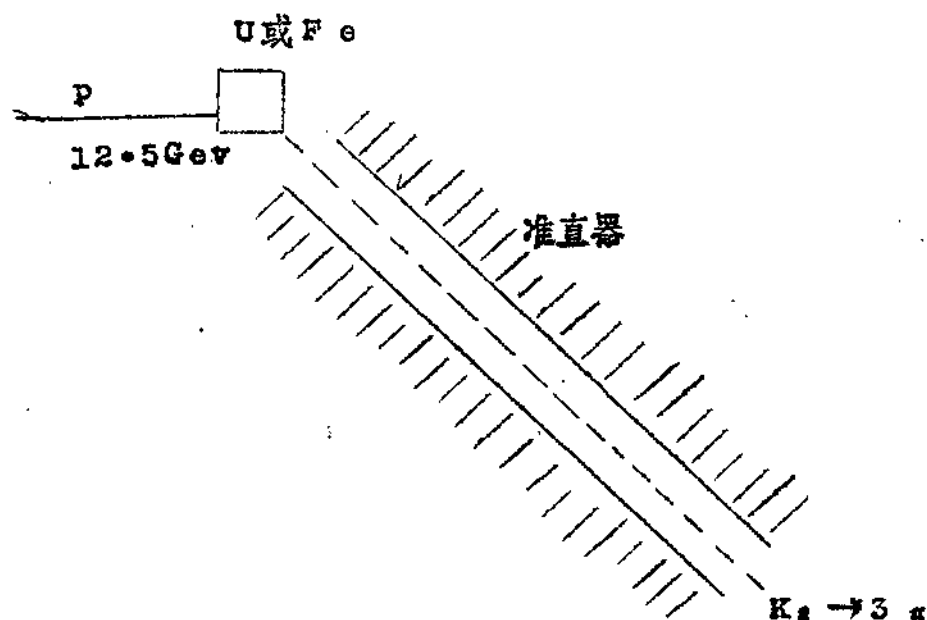
根据这种想法，因此人们希望 K 的寿命有两种，一种寿命短，一种寿命长。 K_1 不能衰变成 3π 。 K_2 则可以衰变为 3π ，二者都可以用 π^0 ，或 $\pi^+\pi^-$ 方式来衰变。 K_1 的寿命很短，只有 10^{-11} 秒。 K_2 的寿命要长 500 倍。因此为 5×10^{-8} 秒。因此有二种完全不同的系统。实验结果表明确实有这样两种寿命。现在讲一下实验。



用如阿贡实验室加速到 12.5 GeV 的质子来打在 U 或 Fe 或其他重的物质的靶上，产生 K_0 。介于，它是中性的，你看不见它它走

3厘米左右产生两个 π 介子。因为 K_S 的寿命是 3×10^{-11} 秒，两 K_S 的速度又小于光速 3×10^{10} 厘米/秒，所以在3厘米以前你就可以看到 K_S 衰变成二个 π 。

现在让 K_S 走得更远些，以便观察 K_S 衰变。



让走出来的 K_S 走过例如15米长的管道。从这管道走出来的只能是长寿命的 K_L 介子。因为短寿命的 K_S 早衰变光了。1964年在Princeton的一组人确实找到了这种长寿命的 K_L 介子。现在把它写成为 K_L ，它和 K_S 不是一样的。他们发现 K_L 可以衰变为2 π ，不过

$$\frac{K_L \rightarrow 2\pi}{K_S \rightarrow 2\pi} = (2 \times 10^{-6})^2$$

就是 K_L 衰变成2 π 的寿命要比 K_S 衰变成2 π 的寿命小得多。这种实验很困难，因为衰变3 π 的几率很大。2 π 衰变只是在强的3 π 衰变的本底之上出现的。这个发现立即被看作为表示 C 、 P 守恒可能不是严格正确的。但这还不能说这个实验就确实证明了 C 、 P 的不守恒，因为它还可以解释为，比方说吧，这是另外两个具有相同质量但性质不

同的粒子，也就是说，现在一共有四种不同的粒子，它们都刚巧具有相同的质量。这也是一种可能的解释。但是，要证明 CP 不守恒是一个很严肃的问题。所以下面我要讲如何才能论证 CP 不守恒。首先让我告诉你，为什么上面那个实验不能用来证明 CP 不守恒。

我在实验室里做 $K_L \rightarrow 2\pi$ 的实验，设想有一面适当的镜子，一面 CP 型的镜子，我们观察镜子内的象。

结果是镜子内的象和原来的完全一样，即

经镜子反射后没有任何变化。因此光从

$$K_L \rightarrow 2\pi \quad K_L \rightarrow 2\pi$$

$K_L \rightarrow 2\pi$ 这一过程不能断定 CP 不守恒。

现在我要讲如何才能毫不含糊地来证明

CP 镜

CP 不守恒。我们必须利用干涉现象来证明 K_L 和 K_S 是相干的。利用这种相干性所得的干涉仪是一种最灵敏的干涉仪。它可以测定

10^{-10} 的质量差，现念是这样的。

如果 $t=0$ 时，产生出 K^0 介子，现在要问其强度如何随时间同变化。设 K^0 衰变成 2π 的振幅为 $A_{2\pi}(t)$ ，衰变强度则为

$$I_{2\pi}(t) = |A_{2\pi}(t)|^2$$

而 K_S 和 K_L 是 K^0 和 $\bar{K}^0$ 的线性组合，即

$$|K_S\rangle = a|K^0\rangle + b|\bar{K}^0\rangle$$

$$|K_L\rangle = c|K^0\rangle + d|\bar{K}^0\rangle$$

所以

$$A_{2\pi}(t) = A_{2\pi}^S e^{-im_S t - \frac{1}{2}\Gamma_S t} + A_{2\pi}^L e^{-im_L t - \frac{1}{2}\Gamma_L t}$$

其中 $\frac{\Gamma_S}{\Gamma_L} \approx 500$ 而 $m_L - m_S \approx \frac{1}{2}\Gamma_S$

取 $A_{2\pi}(t)$ 的平方，则得 $I(t)$ 中含有以下三项：

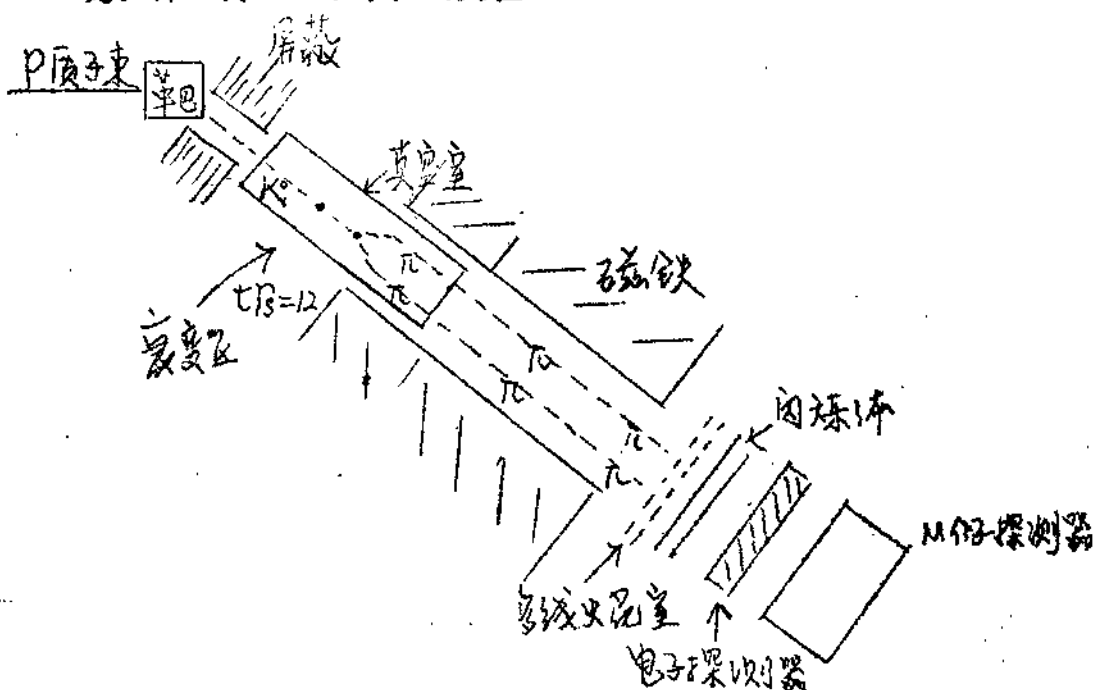
$$|A_{2\pi}^S|^2, |A_{2\pi}^L|^2 \text{ 和 } A_{2\pi}^S A_{2\pi}^L$$

其中 $\bullet$ 指复数共轭。最后一项是相干项。它是干涉仪中关键的一项。这里

$$\left| \frac{\frac{A}{2} \frac{L}{S} \pi}{\frac{A}{2} \pi} \right| \approx 2 \times 10^{-5}$$

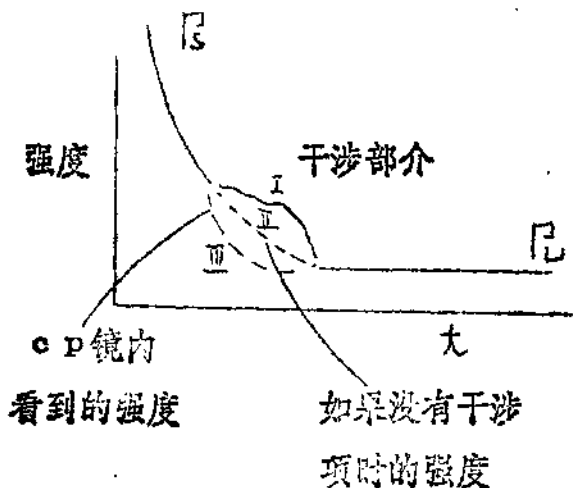
于是第一项 $\left| \frac{A}{2} \frac{L}{S} \pi \right|^2$ 衰变得非常快。比第二项快 500 倍。你可以等一下，等第一项衰变掉，（实际上做实验时，你走得离靶核远一些的地方去观察）等到 $t = 12 / \Gamma_S$ 时，这时干涉项就成为最大的一项了。

现在讲证明 c, p 不守恒的实验。



实验中必须很确切地定出每一个 π 介子的位置和动量。首先必须把 μ 介子，电子和 3 π 事件的介子剔除，使所测定的都是 2 π 事件中的 π 介子，从磁场可以定出动量和 π 介子的出发点，其次看这一“点”是不是落在衰变的区域——真空室，从而判断 π 介子确实是在衰变区域中衰变出来的，从两个 π 介子的总的动量以及那一“点”可以判断这两个 π 介子确实是来自 π 介子束方向的 π 介子的。再从总动量可以

计算出粒子的质量确是在 500 MeV 附近，即 K 介子衰变而来的。最后肯定找到了少量的 K^0 的 2π 衰变的事件，并从而定出这种事件的强度随着 K^0 位置的关系，也就是随着时间 t 的关系。结果如以下的曲线：



这个曲线前面一段下降很快，是 β_0 的一段。后面一段比较平坦，这是 β_1 的一段。中间部分（曲线 I）是干涉效应。这部分表示干涉性。

现在要问想象的 ϕ ρ 镜中应当看到什么样的曲线？不难证明

$$C P A_2^B \pi \rightarrow A_2^B \pi$$

$$CP A_{2\pi}^L \rightarrow -A_{2\pi}^L$$

就是在 $I(t)$ 中最后的相干项的符号改变了。于是 ϕ 镜中看到的应该象图上虚线 (II) 所示的相干部分。我们看到曲线 (I) 和 (II) 不相重合。这就表示实验证明了 ϕ 守恒遭到了破坏。就是说 ϕ 是不守恒的。

最后讲 T 不守恒。

令 T 是时间反演算符。它表示把时间 t 变为 $-t$ 。牛顿力学和量子力学的运动方程都是对时间反演不变的。初始条件当然与时间方向有关的。但运动方程则与时间方向无关。设想一个球抛出去，沿着它

的轨迹飞行，把它的运动拍成电影而后把胶片倒过来放映，从实验上一点一点测量，定出其运动的微分方程，则此方程应该和原来的一致。

我们以前一直相信时间反演是守恒的，直到实验上证明 $\mathcal{CP}$ 不守恒为止。有一个联系时间反演 T 和 $\mathcal{CP}$ 的定理，称为 $\mathcal{CPT}$ 定理。 $\mathcal{CPT}$ 定理说：所有的量子力学规律，量子场论的方程对于 $\mathcal{CPT}$ 变换是不变的。这个定理基于一些假设之上。现在还没有人能够设法不用这些假设而作出一个合理的理论。但这并不意味着这些假设是正确的，这些假设是我们智力发展程度的标志，而不是大自然本身能力的标志。这些问题之所以如此有趣，原因就在此，因为我们考察物理学就等于考察人类智力的限度。



这个定理是根据以下三个假设而证明出来的：

(1) 定域场论

(2) 洛伦兹变换不变，

(3) 所有可观察量都是允许的。

这三个假设在物理上是很难避免的。但是，它毕竟是一些假设，可能某些假设是错误的。例如在极小的时间、空间中，也许定域场论就根本不对。但是如果 $\mathcal{CPT}$ 定理是正确的，那么破坏了 $\mathcal{CP}$ ，就必须破坏 T ，使得 $\mathcal{CPT}$ 保持不变。但是以上只是理论上的推理，我们还必须从实验上直接证明 T 不守恒。实验上告诉我们什么呢？ K^0 介子的实验能够告诉我们， T 也和 $\mathcal{CP}$ 一样遭到破坏吗？这是一个更微妙的问题，更困难的问题，让我把结果总结如下。

和讨论 $\mathcal{CP}$ 时一样，我们仍利用长寿命和短寿命 K 介子之间的干涉。令 Δ_2^K 为短寿命 K 介子的衰变振幅，在 T 作用之下，它如何变化，这不是一个简单的变化关系，但我们可以把振幅 Δ_2^K 分为偶的和奇的部分，

$$A_{2\pi}^S = A_{2\pi}^S(\text{偶}) + A_{2\pi}^S(\text{奇})$$

时间反演使偶的符号不变，奇的符号改变，即

$$T A_{2\pi}^S(\text{偶}) = A_{2\pi}^S(\text{偶})$$

$$T A_{2\pi}^S(\text{奇}) = -A_{2\pi}^S(\text{奇})$$

同样地对于长寿命振幅也可以分为偶的和奇的部分，即

$$A_{2\pi}^L = A_{2\pi}^L(\text{偶}) + A_{2\pi}^L(\text{奇})$$

时间颠倒使

$$T A_{2\pi}^L(\text{偶}) = A_{2\pi}^L(\text{偶})$$

$$T A_{2\pi}^L(\text{奇}) = -A_{2\pi}^L(\text{奇})$$

如果人们可以设法使偶项和奇项分开，则就可以试验 T 的不守恒性。仅仅考虑 2π 衰变方式是不够的，首先有两种不同的 2π 衰变方式：

$$\pi^+ + \pi^-$$

或

$$\pi^0 + \pi^0$$

这两种方式都可以用来实验。大多数实验是用 $\pi^+ + \pi^-$ 来做的，因为比较容易。但也有用 $\pi^0 + \pi^0$ 来做的，这比较困难。把这种实验得来的消息和么正性联合起来（么正性表示总的衰变速率等于部分衰变速率的和）可以证明

$$A_{2\pi}^S(\text{奇}) < A_{2\pi}^S(\text{偶})$$

而

$$A_{2\pi}^L(\text{偶}) < A_{2\pi}^L(\text{奇})$$

于是 $A_{2\pi}^S$ 和 $A_{2\pi}^L$ 之间的干涉项是由 $A_{2\pi}^S(\text{偶})$ 和 $A_{2\pi}^L(\text{奇})$ 组成的。干涉项在时间反演下符号应当改变。就是说在时间反演下应当由观仍象图上的虚线所示的干涉部分。这表示在弱相互作用中，在

这一过程中，时间反演的对称性的确遭到破坏。

应当指出这种效应非常小它涉及到二次弱相互作用，比通常的弱相互作用要小得多，而且只有在 K^0 介子衰变中才出现有这种干涉现象，其他的弱相互作用中还不见有这样的现象，但这明确地表示时间反演对称性被破坏。很可能在能量很高时，会看到更显著的时间反演被破坏的例子。我就讲到这里，谢谢

* * * *

我写了不少关于这方面的稿子，有些还没有发表，我想送给你们一些。如果你们有什么问题，我很愿意通过写信来回答你们。我还希望你们中间的一些人将有机会去美国并在我们的实验室里工作。

ON VIOLATION OF THE TIME REVERSAL
INVARIANCE

R. G. SACHS

1973.6.4.

It is very pleasing to have this opportunity to talk to you about a subject that is close to my heart and which I hope can interest you. I must apologise for having to speak in the language other than Chinese. Although I think about trying to speak in Chinese, you'd understand me better in my English. I have learned two or three words since I came to China. I also must apologise for being here in such a short time, because the subject is a rather complicated one requiring some new concepts and it will be nice to give you a series of lectures rather than try to tell you about it in one lecture.

What I should try to do is give you a very brief, necessarily brief, general view of what the subject is about. Specifically in connection with recent developments in high energy physics. The subject of time reversal invariance in physics is rather old. It has been applied to discussions of statistical mechanics before the beginning of this century. It has been discussed in connection with quantum mechanics by Wigner in 1936. But it is only very recently that in high energy physics, we have discovered that old ideas are not necessarily exactly correct. And this is what I want to tell you about. I think this problem is very important to physics. Nobody has provided a theory that explains what it is that we are going to talk about here. We can only describe it, we can not explain it. There is no theory. It

has at the moment no practical applications. So it may be inappropriate for me to talk about it at this moment in China but I would say that one never knows. The only thing I want to show you is that it is not provided for growing young again. The subject of time reversal often is suggestive to people of "the fountain of youth", but I am afraid that I cannot offer you "the fountain of youth". The theory that we do not understand that is needed here, I believe, my personal belief, this is my belief, will go to the very roots, the very foundation of our understanding of theoretical physics. I think that it probably has something to do with the understanding of space time on the extremely microscopical scale; and if I had time I may try to show you the connection. I am not sure that I have time.

My talk will have to be in two parts. The first is a discussion of CP, CP invariance, and that will take a good portion of my time, take most of my time and then will make the connection with time reversal at the end. But with the connection so I hope you will realize that I am not forgetting time reversal.

Let me first define what I mean by CP. First of all, P. It is called inversion. This is the transformation that interchanges left (hand) and right (hand). In cartesian coordinates it is the transformation: x goes to minus x , y goes to minus y , z goes to minus z . That's the transformation. The letter P stands for parity. Because in quantum mechanics this transformation serves to define the property of the wave function which we called parity. As most of you know, since your countrymen Young and Lee had a great deal to do with it, the principle of parity is known to be violated. Let me just to

remind you what that means. The laws of physics, the equations describing the motion of particles and all of the differential equations of physics that we know up until the year 1955 or 1956 were found to be unchanged whether they were written in terms of this coordinate system or written in terms of the inverted coordinate system, they were invariant under the transformation P. In about 1955, the properties of the strange particles K^+ meson were found to be very strange. The K^+ meson decay into two π mesons or into three π mesons. At first it was thought these were two different particles. And then the masses and all the other properties turned out to be exactly the same. So it was. Many people tried to understand this. The reason of the strangeness is because if K meson have a definite parity and if parity is conserved, then it could not both goes into two mesons and into three mesons because they had different parity. Lee and Young suggested that possibly this process violated conservation of parity. Since this process is due to what we call the weak interaction which is also responsible for radioactive β decay of nuclei. They suggested that if it is violated here it might be violated in radioactive β decay, and suggested various experiments which as you know is the end of another countryman of yours, Wu C.S., the leader of an experiment which shows in Co^{60} that in deed parity is violated. So we now know that the weak interactions violate conservation of parity.

There is another symmetry that is related, that's similar. It's what we call improper symmetry because this transformations can not occur in small steps (a rotation can occur in small steps) that can only

occur this way or that way. And this is another such symmetry-charge conjugation C, that transformation changes every particle into its antiparticle. That's C, C transforms particle into antiparticle and of course, that's the symmetry that was newly discovered about 1952 on the basis of Dirac theory of the electron. In this case Dirac showed that the electron is associated with the positron, its antiparticle. We now know that every particle has associated with an antiparticle, even the strongest particle that we deal with, we have discovered the antiparticle associated with each such particle. Except in the case of photon and neutral π meson, the particle and antiparticle are identical. Now it was believed that all the theories, the equations describing the motion, all the quantum mechanics, all the differential equations should be invariant under C. However, when it is discovered that the weak interactions violated this P symmetry, it was almost simultaneously discovered that weak interactions violated charge conjugation symmetry, both are violated. However, on very close study, it was found that if you both invert, take the P operation and take the charge conjugation together, then the symmetry is restored. You can consider this in the following. We used to believe before 1955 that if you did experiments in the laboratory, and made measurements on the imaginary mirror, then you will get the same results for the equations of motion. Lee and Young showed that it was not true for weak interactions. If you look at the mirror, you do not get the same behavior. If you do on the Co^{60} experiments of Wu C. S; you will not get the same results in the mirror. But if you