شکست تقارن CP در نیروی ضعیف:

همانطور که قبلاً اشاره کردیم - نیروی ضعیف تقارن پاریته را حفظ نمی کند

مثال: $\pi^+ \to \mu^+ + \nu_\mu$ از آزمایش می دانند که μ^+ در این آزمایش بصورت چپ دست ظاهر می شود

μ^+_{LH} پس μ^+ پاریته منفی دارد.

اگر روی این واکنش یک C اثر دهیم داریم

$$C\left(\pi^+ \to \mu^+ + \nu_\mu\right) = \pi^- \to \mu^-_{LH} + \bar{\nu}_\mu$$

انتظار این است که اگر C حفظ می شد، μ^- همانطور بصورت چپ دست ظاهر شود. در صورتیکه

شواهد نشان می دهد که μ^- راست دست است. ← نتیجه می گیریم که در این برهمکنش ضعیف C ناوردا نیست.

← حال اگر ترکیبی از P و C را روی این فرآیند تاثیر دهیم.

$$CP\left(\pi^+ \to \mu^+_{LH} + \nu_\mu\right) = C\left(\pi^+ \to \mu^+_{RH} + \nu_\mu\right) = \pi^- \to \mu^-_{RH} + \bar{\nu}_\mu$$

این فرآیندی است که در طبیعت رخ می دهد.

نتیجه: به نظر می رسد در این فرآیند خاص نیروی ضعیف تقارن CP شکسته است.

مثال نقض برای تقارن CP در فرآیند نیروی ضعیف:

نقض CP در فرآیندهائی که در آن K^0 و $\bar{K}^0$ دخیل باشند برای اولین بار در سال ۱۹۵۷ کشف شد:

	I	I_3		S	J^P
K^0	$\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{2}$	$d\bar{s}$	+1	0^-
$\bar{K}^0$	$\frac{1}{2}$	$+\frac{1}{2}$	$\bar{d}s$	-1	0^-

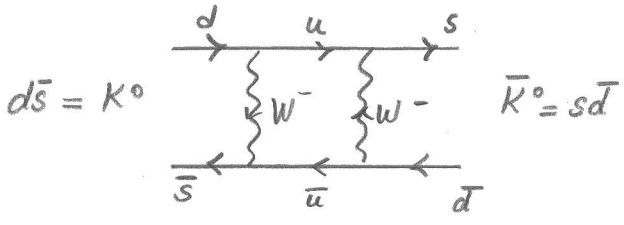
با تصادم انرژی بالا پروتون، پایون می توان K^0 و $\bar{K}^0$ را تولید کرد

a) $\pi^- + p \longrightarrow \Lambda^0 + K^0$ تولید K^0

b) $\pi^+ + p \longrightarrow K^+ + \bar{K}^0 + p$ تولید $\bar{K}^0$

or c) $\pi^- + p \to \bar{\Lambda}^0 + \bar{K}^0 + n + n$

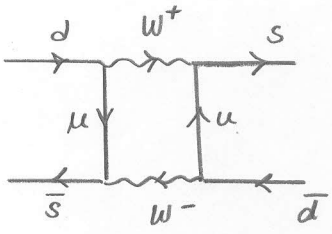
واکنش‌های ضعیف تحت تاثیر نیروی ضعیف K^0 به $\bar{K}^0$ تبدیل می‌شود و برعکس $K^0 \rightarrow \bar{K}^0$



$d \rightarrow W^- + u$

$W^- + u \rightarrow s$

(a)



(b)

• در فرآیند (a) و (b) می‌توان بجای u میانی، دو کوارک از نوع c و یا t را جایگزین نمود (بارالکتریکی u، c و t یکسان است)

• لطف خاصی می‌توان نشان داد که هیچکدام از K^0 و $\bar{K}^0$ ویژه حالت عملگر CP نیست:

$$C|K^0\rangle = +|\bar{K}^0\rangle \qquad C|\bar{K}^0\rangle = +|K^0\rangle$$

$$P|K^0\rangle = -|K^0\rangle \qquad P|\bar{K}^0\rangle = -|\bar{K}^0\rangle$$

$$C = (-1)^{\ell+s} = (-1)^{0+0} = 1$$

$$P = P(q)P(\bar{q}) = (+1)(-1) = -1$$

$$\star \begin{cases} CP|K^0\rangle = -C|K^0\rangle = -|\bar{K}^0\rangle \\ CP|\bar{K}^0\rangle = -C|\bar{K}^0\rangle = -|K^0\rangle \end{cases}$$

پس K^0، $\bar{K}^0$ ویژه حالتی CP نیستند.

• برای اینکه حالتی بسازیم که ویژه حالت CP باشند، ترکیب خطی مناسبی از این دو حالت را در نظر می‌گیریم:

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

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

$$\begin{cases} CP|K_1\rangle \underset{\star}{=} -\frac{1}{\sqrt{2}}\left(|\bar{K}^0\rangle - |K^0\rangle\right) = +|K_1\rangle \\ CP|K_2\rangle = -\frac{1}{\sqrt{2}}\left(|\bar{K}^0\rangle + |K^0\rangle\right) = -|K_2\rangle \end{cases}$$

این دو حالت ویژه مقداری هستند برای CP. $|K_1\rangle$، $|K_2\rangle$ ویژه حالتی CP به ازای ویژه مقدار $+1$، -1 است.

حالا فرض کنید CP در برهم‌کنش ضعیف نادرست باقی می‌ماند:

در این صورت K_1 باید به حالتی فرد بپاشد که CP کل آن مساوی $+1$ باشد.

و K_2 باید به حالتی فرد بپاشد که CP کل آن مساوی -1 باشد.

$$K_1 \to 2\pi \quad , \quad K_2 \to 3\pi$$

$$CP(\pi) = ? \qquad \left.\begin{aligned} C_\pi &= (-1)^{l+S} = (-1)^{0+0} = +1 \\ P_\pi &= P(q)P(\bar{q}) = -1 \end{aligned}\right\} \; CP(\pi) = -1$$

$$CP(2\pi) = (-1)^2 = +1 \quad , \quad CP(3\pi) = (-1)^3 = -1$$

$$K_1 \to 2\pi \qquad\qquad K_2 \to 3\pi \qquad \checkmark$$

$$CP: \; + \to + \qquad\qquad CP: \; - \to -$$

در شرایط آزمایشگاهی، از آنجائیکه انرژی آزاد شده از فرآیند $K_1 \to 2\pi$ بزرگتر از انرژی آزاد شده از فرآیند $K_2 \to 3\pi$ است، K_1 خیلی سریعتر از K_2 به 2π تبدیل می‌شود.

✓ این به این معنی است که اگر با یک باریکه از K^0 آزمایش را شروع کنیم، از آنجائیکه K^0 ترکیبی از K_1 و K_2 است و از آنجائیکه K_1 سریعتر فرو می‌پاشد (واپاش می‌شود!) انتظار داریم ابتدا K_2 بماند و در نهایت K_2 به 3π فرو بپاشد.

(Gell-Mann + Pais)

✓ در سال ۱۹۵۶ آزمایشی در Brookhaven طراحی شد و طول عمر K_1 و K_2 بدست آمد:

$$\tau_{K_1} = 0.895 \times 10^{-10}\,s \; < \; \tau_{K_2} = 5.11 \times 10^{-8}\,s$$

✓ در ابتدا تصور می‌شد که سناریوی بالا درست است و بنابراین همانطور که فرض کرده بودیم نیروی ضعیف CP را نمی‌شکند!!

(Weak) CP-Violation

(ا) در سال ۱۹۶۴ آزمایش بالا اجرا شد، ولی آنچه مشاهده شد این بود که در زمانی که انتظار می‌رفت K_1 به علت طول عمر بسیار کوچکش تمام شده باشد و دیگر هیچ 2π ناشی از فروپاشی K_1 در آزمایش دیده نشود، از میان 22700 فروپاشی $K_2 \to 3\pi$ (که با CP مشکلی ندارد) تعداد ۴۵ فروپاشی $(K_2 \to 2\pi)$ که CP را نقض می‌کند مشاهده شد.

این مثال نقض بر فرض اولیه‌ای است که CP تحت نیروی هسته‌ای ضعیف نادرست.

با این ارضاف نتیجه می‌رسد که $|K^0\rangle$ ترکیب خطی از $|K_1\rangle$ و $|K_2\rangle$ نیست (همچونکه در بالا بیان شد) بلکه

$$\exists\ |K_L\rangle \equiv \frac{1}{\sqrt{1+|\epsilon|^2}}\left(|K_1\rangle + \epsilon |K_2\rangle\right)$$

که در آن ϵ کمیاری است برای شکست تقارن CP.

$$\epsilon_{exp} \simeq 2.24 \times 10^{-3}$$

نکته: هرچند ϵ کوچک هم باشد نشان می‌دهد که تقارن CP در برهمکنش‌های ضعیف ناوردا نمی‌ماند.

(iii) می‌توان نشان داد که ۳۲٪ از K_L به CP فرد می‌باشد و ۶۸٪ آن به دو رابطه زیر:

$$K_L \to 3\pi \quad \Big\} \ \%32$$

$$a)\ K_L \to \pi^+ + e^- + \bar{\nu}_e \quad \Big\} \ \%41$$

$$b)\ K_L \to \pi^- + e^+ + \nu_e \quad \Big|$$

همانطور که مشاهده می‌شود، اثر CP به طرف راست رابطهٔ (a) باعث بوجود آمدن طرف راست رابطهٔ (b) می‌شود

$$CP(\pi^+ + e^- + \bar{\nu}_e) = \pi^- + e^+ + \nu_e$$

• اگر فرض کنیم $|K_L\rangle$ ویژه‌حالت مجلگر CP به ازای ویژه‌مقدار a باشد $CP|K_L\rangle = a|K_L\rangle$

(به عبارت دیگر اگر فرض کنیم CP ناوردا باشد) احتمال وقوع هر دو رابطهٔ (a) و (b) یکسان باشد.

← در صورتیکه نشان داده می‌شود که $K_L \to \pi^- + e^+ + \nu_e$ در آزمایش بیشتر خ می‌دهد و در واقع نسبت تولید الکترون به پوزیترون $\frac{1}{300}$ یعنی 3.3×10^{-3} است، یعنی الکترون ۳۰۰ برابر بیشتر از پوزیترون تولید می‌شود

این به نفع شکست تقارن CP است.

• به این ترتیب این پروسه، فرایندی است که در آن تفاوت اساسی بین رفتار ذره (e^-) و پاذره (e^+) وجود دارد

← این یکی از سؤالات باز فیزیک ذرات است

Matter – Antimatter Asymmetry

← به نظر می‌رسد که این خاصیت رابطهٔ مستقیمی با شکست تقارن CP دارد