

Nesačuvanje CP-simetrije



SYMMETRIES AND THE ASSOCIATED CONSERVATION LAWS

Symmetry

Translation in time
Translation in space
Rotation
Gauge transformation

Conservation law

Energy
Momentum
Angular momentum
Charge

Neterin Teorem

- It was not until 1917 that the dynamical implications of symmetry were completely understood. In that year Emmy Noether published her famous theorem relating symmetries and conservation laws:
- NOETHER'S THEOREM:
- SYMMETRIES \leftrightarrow CONSERVATION LAWS

The set of symmetry operations on any system must have the following properties:

1) Closure.

If R_i and R_j are in the set, then the product, $R_i R_j$ has meaning: first perform R_i , then perform R_j is also in the set; that is, there exists some R_k such that $R_i R_j = R_k$.

2) Identity

There is an element I such that $I R_i = R_i I = R_i$ for all elements R_i .

3) Inverse

For every element R_i there is an inverse, R_i^{-1} , such that $R_i R_i^{-1} = R_i^{-1} R_i = I$.

4) Associativity

$R_i (R_j R_k) = (R_i R_j) R_k$.

1956 Lee and Yang

C. S. Wu

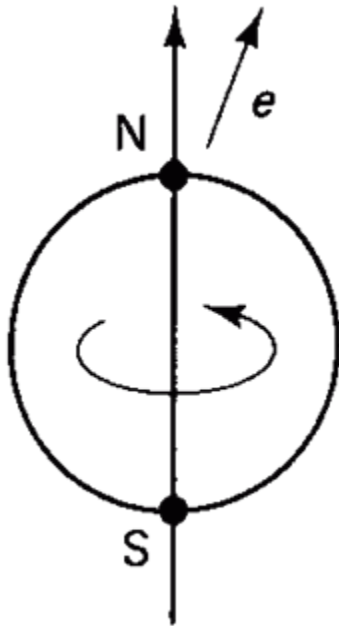


Figure 4.7 In the beta decay of cobalt 60, most electrons are emitted in the direction of the nuclear spin.

Zrcalna slika

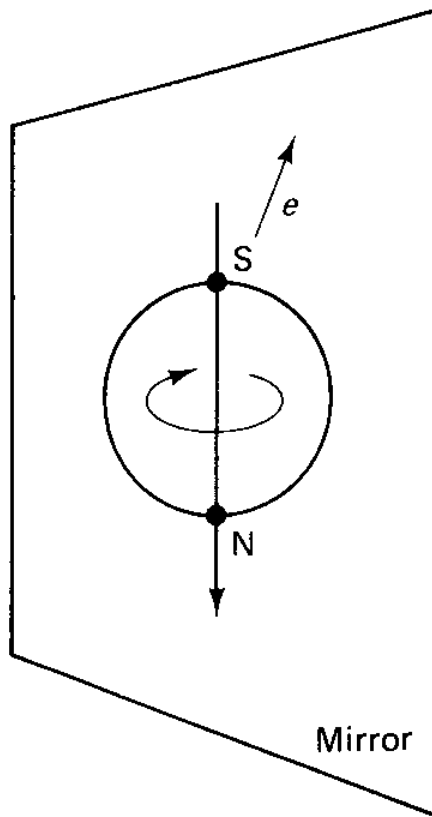
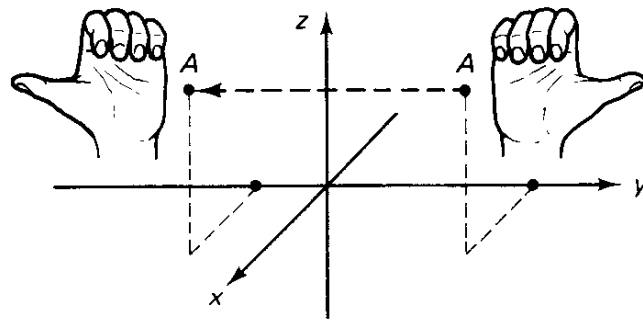
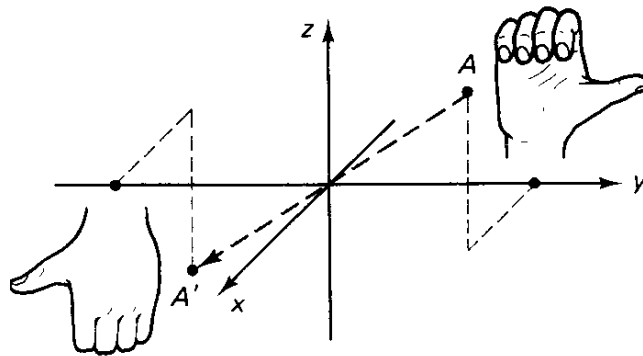


Figure 4.8 Mirror image of Figure 4.7: Most electrons are emitted *opposite* to nuclear spin.

Zrcaljenje i paritet



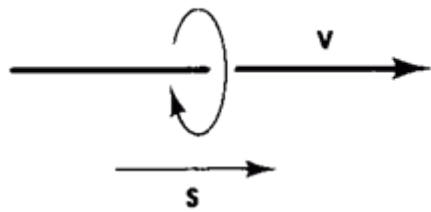
(a) Reflection (in the x - z plane)
 $(x, y, z) \rightarrow (x, -y, z)$



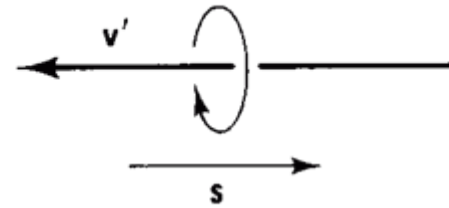
(b) Inversion $(x, y, z) \rightarrow (-x, -y, -z)$

Figure 4.11 Reflections and inversions.

Helicitet



(a) Right-handed



(b) Left-handed

Figure 4.9 Helicity. In (a) the spin and velocity are parallel (helicity $+1$); in (b) they are antiparallel (helicity -1).

Pionski raspad

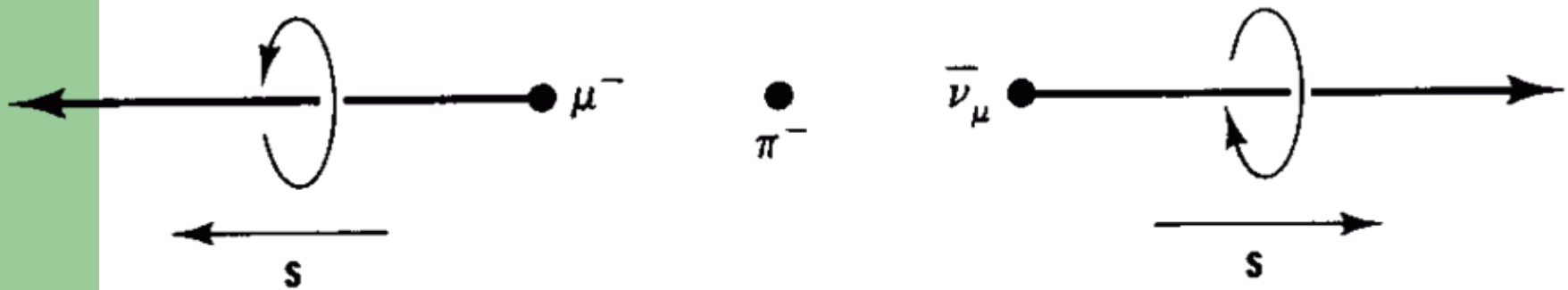


Figure 4.10 Decay of π^- at rest.

CP sačuvanje

ALL NEUTRINOS ARE
LEFT-HANDED,
AND
ALL ANTINEUTRINOS ARE
RIGHT-HANDED.

$$P^2=I$$

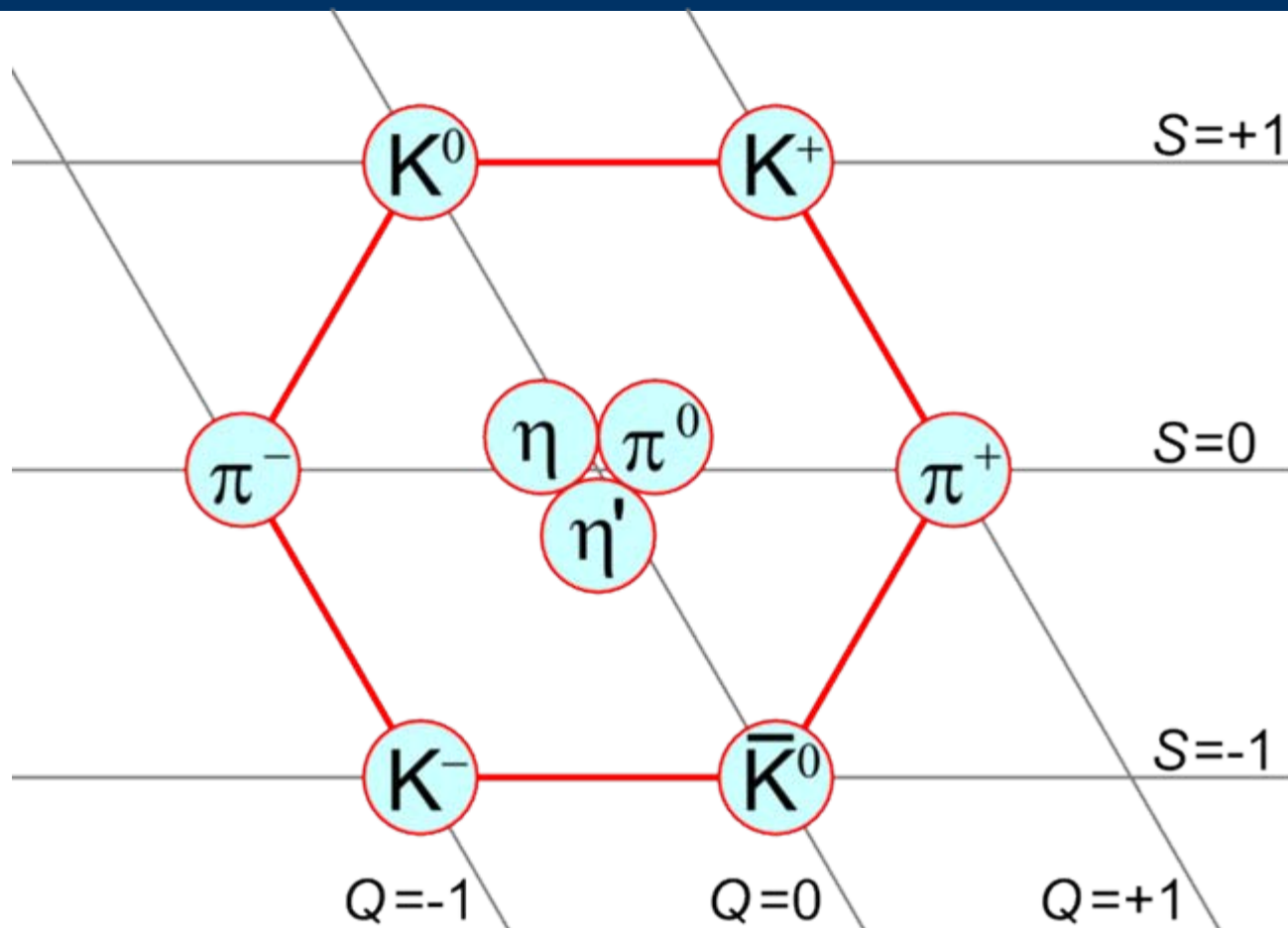
TABLE 4.5 BEHAVIOR OF SCALARS AND VECTORS UNDER THE PARITY TRANSFORMATION, P

Scalar	:	$P(s) = s$
Pseudoscalar	:	$P(p) = -p$
Vector (or polar vector)	:	$P(\mathbf{v}) = -\mathbf{v}$
Pseudovector (or axial vector)	:	$P(\mathbf{a}) = \mathbf{a}$

Paritet

- For example, scalars and pseudo-vectors have eigenvalue $+1$, whereas vectors and pseudoscalars have eigenvalue -1 .
- The hadrons are eigenstates of P and can be classified according to their eigenvalue, just as they are classified by spin, charge, isospin, strangeness, and so on.
- According to Quantum Field Theory the parity of a fermion (half-integer spin) must be opposite to that of the corresponding antiparticle, while the parity of a boson (integer spin) is the same as its antiparticle.
- We take the quarks to have positive intrinsic parity, so the antiquarks are negative.*
- The parity of a composite system in its ground state is the product of the parities of its constituents.

Kaoni (Mezoni spina 0)



CP invariance

CP invariance has bizarre implications for the neutral K mesons, as was first pointed out in a classic paper by Gell-Mann and Pais.

They noted that the K^0 , with strangeness + 1, can turn into its antiparticle \bar{K}^0 , strangeness - 1

$$K^0 \leftrightarrow \bar{K}^0$$

through a second-order weak interaction we now represent by the diagrams in Figure 4.12.

The possibility of such an interconversion between two particles is almost unique to the neutral kaon system; among the "stable" particles only. As a result, the particles we normally observe in the laboratory are not K^0 and \bar{K}^0 , but rather some linear combination of the two. In particular, we can form eigenstates of CP, as follows.

Assuming CP is conserved in the weak interactions, K_1 can only decay into a state with $CP = +1$, whereas K_2 must go to a state with $CP = -1$. Typically,

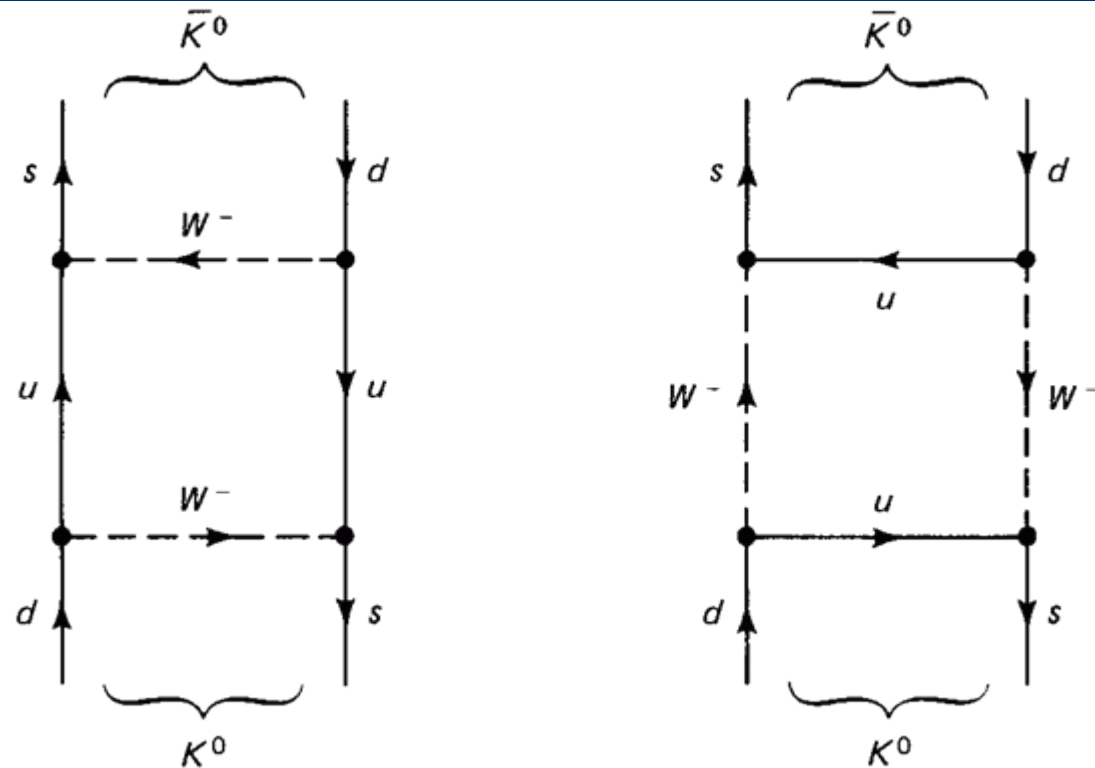


Figure 4.12 Feynman diagrams contributing to $K^0 \rightleftharpoons \bar{K}^0$. (There are others, including those with one or both u quarks replaced by c or t .)

Nesačuvanje CP-simetrije

- U ovom poglavlju osvijetljena je uloga simetrija u fizici, točnije - otkriće njezina narušenja.
- Simetrije su u fizici vrlo važno pomoćno sredstvo. Naime, dok nismo potpuno shvatili zakonitost nekog fenomena, vrlo je bitno otkriti da se sistem fizikalno ne mijenja ako na njemu primijenimo neku transformaciju. Takvo otkriće pomaže da predvidimo neka svojstva sistema a da nam pri tom nisu poznati svi detalji. Čitalac vjerojatno zna za ekvivalentnost zakona očuvanja impulsa i invarijantnosti na translacije. Naime, ako za neki sistem vrijedi zakon da mu je impuls očuvan, to je jednako vrijedno činjenici da se svojstva tog sistema ne mijenjaju ako taj sistem u prostoru translatiramo."

Povijest

- U ranom dijelu 20. stoljeća vjerovalo se da vrijedi zrcalna simetrija ili paritetna P simetrija. Vjerovalo se, dakle, sljedeće: Promatramo li fizikalni proces u zrcalu, motritelj, znajući fizikalne zakone a ne znajući da gleda zrcalnu sliku, neće vidjeti ništa čudno, ništa izvan njegova iskustva. Drugim riječima, npr. gibanje bilijarskih kugli u sudaru viđeno u zrcalu jedna je od postojećih mogućnosti za realne događaje. Takvo zaključivanje ima temeljne posljedice. Između mnogih klasa mogućih zakona za sudare mnogi su, teorijski mogući zakoni, tom simetrijom isključeni. Transformacija koja od procesa čini njegovu sliku u zrcalu naziva se paritetnom P -transformacijom. Pedesetih godina 20. st. svijet je bio iznenađen otkrićem da nuklearna slaba interakcija ne poštuje paritetnu simetriju. To je značilo da je otkriven proces čija je zrcalna slika bila fizikalno nemoguća! Dovitljivi fizičari su, međutim, utvrdili sljedeće: Ako u toj fizikalno nemogućoj zrcalnoj slici sve čestice zamijenimo antičesticama, dobivamo ponovno fizikalno moguću sliku. Za transformaciju čestica-antičestica odgovorna je nabojna C -transformacija. To je značilo da je produkt C -transformacije i P -transformacije ponovno dobra simetrija, CP -simetrija.

Kaoni i stranost

- Za lakše razumijevanje obaranja CP-simetrije dobro je najprije upoznati K mezone i njihovo neobično svojstvo - stranost. Kaoni su mezoni sa spinom 0 i mase oko tisuću puta većom od mase elektrona. Eksperimentima na akceleratorima utvrđena su neka neobična svojstva. Kaoni nastaju tijekom hadronskih sudara, ali uvijek ili u kaonskim parovima ili kao par kaon-hiperon. Tu pojavu nazivamo pridruženom produkcijom. Udarni presjek za produkciju kaona ili hiperona je oko desetinke normalnog nuklearnog udarnog presjeka što znači da je interakcija koja ih stvara jaka nuklearna interakcija. S druge strane, vrijeme poluraspada tih objekata jest oko 10^{10} do 10^{12} puta duže od vremena karakterističnog za raspade preko jakog međudjelovanja.

- Objašnjenje za tu prividnu kontradikciju produkcijskog udarnog presjeka i dugog vremena života načinjeno je uvođenjem novog aditivnoga kvantnog broja stranosti. Hadroni poznati do tog, vremena nisu imali stranost. K-mezoni i Λ -čestice proizvedene u parovima imaju suprotne stranosti. Jednom obilježeni novim kvantnim brojem žive dugo, jer jaka interakcija ne narušava stranost. Tek slaba interakcija dopušta da se raspadnu. Postoji izotopski dublet čestica K^+ i K^0 te njihove antičestice K^- i \bar{K}^0 i Neke tipične reakcije za proizvodnju kaona jesu:

- Da mezon K^0 i njegov antimezon \bar{K}^0 nisu identični, vidi se jer se tim dvijema česticama ne mogu inducirati identične reakcije. Stranost čestica K^0 i \bar{K}^0 su suprotne

stranost:	$\frac{\pi^- + p \rightarrow \Lambda + K^0}{0 \quad 0 \quad -1 \quad 1}$
stranost:	$\frac{\pi^+ + p \rightarrow K^+ + \bar{K}^0 + p}{0 \quad 0 \quad 1 \quad -1}$

$$S | K^0 \rangle = + | K^0 \rangle$$

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

- Danas se zna da slaba interakcija narušava P-simetriju. Ali ranih šezdesetih godina vjerovalo se da proces gledan u zrcalu s istovremenom konjugacijom nana je fizikalno moguć (CP-simetrija). Analizom u ovom poglavlju proizaći će da u raspadima neutralnih kaona CP-simetrija nije očuvana.
- Kako su mezoni K^0 i \bar{K}^0 jedna drugoj antičestice, vrijedi:

$$\begin{aligned}
 C|K^0\rangle &= e^{i\theta}|\bar{K}^0\rangle \\
 P|K^0\rangle &= e^{i\theta}|\bar{K}^0\rangle \\
 CP|K^0\rangle &= |\bar{K}^0\rangle \\
 CP|\bar{K}^0\rangle &= |K^0\rangle \\
 |K_1\rangle &= \frac{1}{\sqrt{2}}(|K^0\rangle + |\bar{K}^0\rangle) \\
 |K_2\rangle &= \frac{1}{\sqrt{2}}(|K^0\rangle - |\bar{K}^0\rangle) \\
 CP|K_1\rangle &= |K_1\rangle \\
 CP|K_2\rangle &= -|K_2\rangle
 \end{aligned}$$

Vlastita stanja

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

On the other hand, from equation (4.54)

$$C|K^0\rangle = |\bar{K}^0\rangle, \quad C|\bar{K}^0\rangle = |K^0\rangle$$

Accordingly $CP|K^0\rangle = -|\bar{K}^0\rangle, \quad CP|\bar{K}^0\rangle = -|K^0\rangle$

and hence the (normalized) eigenstates of CP are

$$|K_1\rangle = (1/\sqrt{2})(|K^0\rangle - |\bar{K}^0\rangle) \quad \text{and} \quad |K_2\rangle = (1/\sqrt{2})(|K^0\rangle + |\bar{K}^0\rangle)$$

with

$$CP|K_1\rangle = |K_1\rangle \quad \text{and} \quad CP|K_2\rangle = -|K_2\rangle$$

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

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

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

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

Raspad kaona

- Zanimljiva je dakle situacija: stanja neutralnih kaona K^0 i \bar{K}^0 vlastita su stanja stranosti. K_1 i K_2 su druga stanja neutralnih kaona koja su dijagonalna u CP-simetriji. Pri tvorbi (jaka interakcija) pogodna je prva baza K^0 i \bar{K}^0 jer jaka interakcija čuva stranost. Pri raspadu je važna druga baza K_1 i K_2 jer je za slabu interakciju CP-simetrija gotovo očuvana simetrija.
- Stanja neutralnih kaona mogu se raspadati energijski i u dvopionske i u tropionske konfiguracije. Pogledajmo CP-svojstva tih mogućih konačnih stanja. Unutrašnji paritet piona je negativan, a π^0 je operacijom konjugacije po naboju sam po sebi konjugiran.

$$CP | \pi^0 \pi^0 \rangle = (-)^l | \pi^0 \pi^0 \rangle$$

$$CP | \pi^0 \pi^0 \pi^0 \rangle = (-)^{l+1} | \pi^0 \pi^0 \pi^0 \rangle$$

Regeneracija

- Tu je l orbitalna kutna količina dvopionskog odnosno tropionskog sistema, a njegove moguće vrijednosti su $l=0, 1, \dots$; zapravo u najnižoj konfiguraciji je $l=0$. Stoga će se K_1 raspadati u dva piona jer su K_1 i dva piona simetrična stanja CP-simetrije. Također će K_2 ići u tri piona jer su CP-antisimetrični. Zbog više pozitivne Q -vrijednosti K_1 će se brže raspadati od K_2 . Ako se, znači, neutralni kaoni puste putovati dovoljno dugo, preostaje samo K_2 komponenta (dugoživuća komponenta). K_1 (kratkoživuća komponenta) raspala se na početku.

- Ovaj fenomen je posebno korisno uočiti zbog mogućnosti da eksperiment posvećen narušenju CP-simetrije načinimo pogrešno dopustimo li snopu K_2 interakciju s debljim slojem materijala. Počinjemo sa snopom kaona K_2 :

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

Pojavljivanje K_1 komponente

- Ako K_2 pustimo kroz materijal, K° i \underline{K}° se različito) atenuiraju. Bit te razlike u atenuaciji potječe od činjenice da stranost nije u prirodi simetrično raspoređena, prevladavaju negativne vrijednosti. Stoga se K° i \underline{K}° komponente različite stranosti različito atenuiraju. Nakon prolaska snop ima valnu funkciju:

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

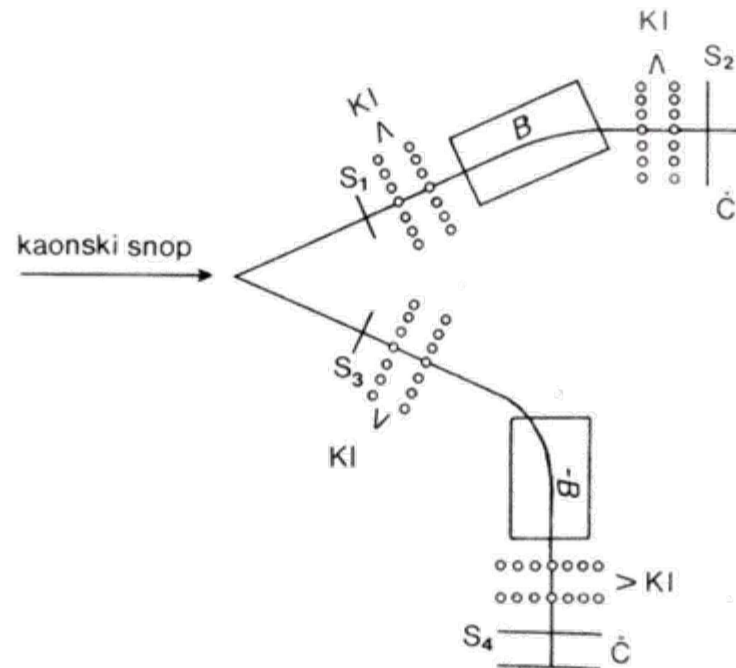
- Stoga je moguće pisati:

$$\frac{1}{2}(f + \bar{f}) | K_2 \rangle + \frac{1}{2}(f - \bar{f}) | K_1 \rangle$$

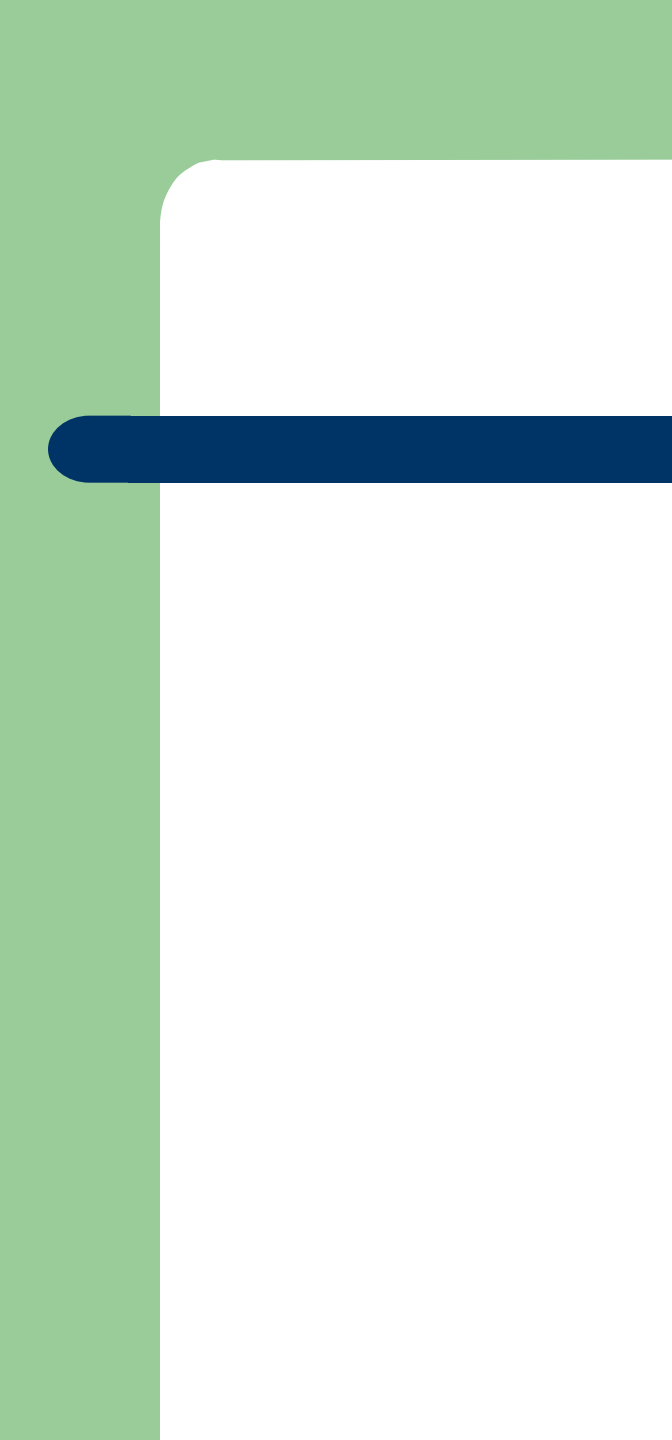
Nesačuvanje CP-simetrije

- Bit obaranja CP-simetrije u eksperimentu Cronina i Fitcha jest pokazivanje pionskih raspada u dugoživućoj komponenti neutralnoga kaonskog snopa. Kao što je spomenuto prije, ako neutralni kaonski snop pustimo da putuje vrijeme od mnogo vremena života kratkoživuće komponente K_1 , taj snop treba sadržavati sam K_2 komponentu. U raspadu je moguća samo tropionska komponenta. Dvopionski raspad postiže se samo narušenjem u aktu raspada. Pokazat ćemo, znači, kako dugoživućoj komponenti neutralnih K-mezona opaženi dvopionski raspadi.
- Od tog se otkrića stanja K_1 i K_2 , budući da nisu egzakvna vlastita CP stanja nazivaju K_S i K_L kao kratko i dugoživuće komponente. U komponenti K_L očito prisustvuje i mala primjesa koja daje raspad u dva piona.
- Na slici 17.1 jest shema aparature. Za pojedine dijelove su posebno izdvojene njihove funkcije:

Eksperiment



Slika 17.1. Shema eksperimenta neočuvanja CP. S_i su scintilacijski detektori. KI su pozicijono osjetljive komore na iskre. B je magnetsko polje, \check{C} oznaka Čerenkovljeva detektora. Određivanje koordinata trajektorija prije ulaska u magnet omogućuje rekonstrukciju mjesta raspada. Iz poznatih koordinata dviju točaka trajektorije nabijene čestice prije magnetskog dipola i poznatih koordinata dviju točaka trajektorije čestice nakon magneta lako se izračunava radijus zakrivljenosti trajektorija. Iz radijusa zakrivljenosti slijedi impuls čestice.



Dugoživuća i kratkoživuća komponenta

$$C |K^0\rangle = e^{i\phi} |\bar{K}^0\rangle$$

$$P |K^0\rangle = e^{i\phi} |\bar{K}^0\rangle$$

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

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

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

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

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

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

$$K_1 \rightarrow 2\pi,$$

$$K_2 \rightarrow 3\pi$$

Lederman

But it wasn't baloney, and in 1956 Lederman and his collaborators discovered the K_2 meson at Brookhaven.¹⁹ Experimentally, the two lifetimes are

$$\begin{aligned}\tau_1 &= 0.89 \times 10^{-10} \text{ sec} \\ \tau_2 &= 5.2 \times 10^{-8} \text{ sec}\end{aligned}\tag{4.72}$$

so the K_1 's are mostly gone after a few centimeters, whereas the K_2 's can travel many meters. Notice that K_1 and K_2 are not antiparticles of one another, like K^0 and \bar{K}^0 ; rather, each is its own antiparticle ($C = -1$ for K_1 and $C = +1$ for K_2). They differ ever-so-slightly in mass; experiments give²⁰

$$m_2 - m_1 = 3.5 \times 10^{-6} \text{ eV}\tag{4.73}$$

Implikacije i zagonetke narušenja CP simetriji

- Narušenje CP-simetrije jedna je od hitnijih zagonetki prirode. Uzrok tog narušenja još ni danas nije poznat. S druge strane otvoreno je pitanje vremenske inverzije (T-simetrije) ili CPT-simetrije. Naime, svi do sada poznati zakoni mikrosvijeta ne dopuštaju razlikovanje smjera vremena. Ako snimimo sudar biljarskih kugli na filmsku vrpču i odvrtno film natraške, nećemo uočiti fizikalno nemoguće detalje. Sudar kuglica zadovoljava T-simetriju. Vremenska simetrija ne vrijedi u nekim fizikalnim fenomenima. Toplina prelazi s toplijeg na hladnije tijelo i smjer vremena je strogo definiran. Ovdje se, međutim ne radi o elementarnom procesu nego o mnoštvu. U elementarnim procesima nemamo direktne eksperimentalne evidencije za naruši T-simetrije. S druge strane, teorije polja, koje danas čine bazu našeg razumijeva počivaju na CPT-simetriji. Ona je dobivena množenjem već diskutirane CP simetrije i upravo objašnjene T transformacije. CPT-simetrija tvrdi da se ne razlikuju: osnovni proces i onaj u kome su čestice zamijenjene antičesticama (C transformacija), gledan u zrcalu (P transformacija) s obratnim tijekom vremena (T transformacija).

Zagonetka pred današnjom fizikom

- CP-simetrija ne vrijedi. Očekuje se da CPT-simetrija vrijedi. Imamo dvije mogućnosti:
 - Ne vrijedi CPT simetrija. Ovo povlači rušenje važnih teorija.
 - CP simetrija je narušena, CPT simetrija vrijedi, što znači da je T-simetrija narušena. To bi bilo prvo otkriće elementarnog procesa u kojem postoji razlikovanje smjerova vremena

Cronin i Fitch (nobelova nagrada)

- Postojanje dvopionskih raspada u dugoživućoj komponenti neutralnih K mezona