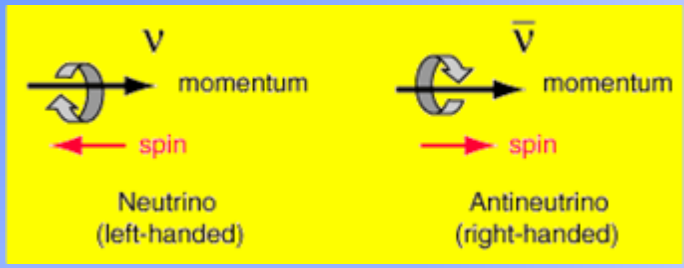
Nesačuvanje CP-simetrije

Mirko Planinić
PMF

Sadržaj



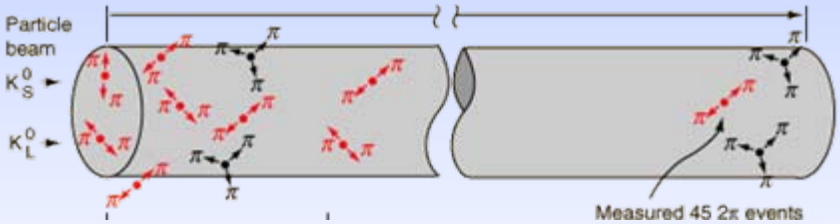
- CP simetrija i neutrini

- CP-simetrija

  čestica ⟺ antičestica

- Nabojna konjugacija

- Kaoni i stranost



- Eksperiment Cronin-a & Fitch-a

- Parnost



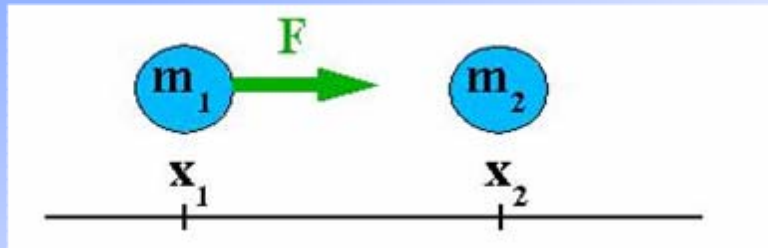
- Implikacije CP-narušenja

- Simetrije i zakoni sačuvanja

- Uvod

Simetrije i zakoni sačuvanja

- Simetrije su važno pomoćno sredstvo u fizici.
- Sistem se ne mijenja ako primijenimo neku transformaciju ⟺ SIMETRIJA



Ako se sila ne mijenja kao funkcija položaja ➔

Sila koja djeluje u x_2 : $F = m_2 \ddot{x}_2$

Sila koja djeluje u x_1 : $F = -m_1 \ddot{x}_1$

$$m_1 \ddot{x}_1 + m_2 \ddot{x}_2 = 0$$

$$d/dt\left[\, m_1 \dot{x}_1 + m_2 \dot{x}_2 \,\right] = 0$$

$$m_1 v_1 + m_2 v_2 = const$$

Invarijantnost na translacije ⟺ Zakon očuvanja impulsa

Simetrije i zakoni sačuvanja

Neke interakcije su dozvoljene a neke zabranjene

➔zakoni sačuvanja

- Zakon sačuvanja barionskog broja

$$p + n \rightarrow p + \mu^+ + \mu^-$$

$$B = 1 + 1 \neq 1 + 0 + 0$$

$$p + n \rightarrow p + n + p + \bar{p}$$

$$B = 1 + 1 = 1 + 1 + 1 - 1$$

Diskretne transformacije

Do 1957. Svijet je bio invarijantan na sljedeće diskretne transformacije:

Simetrija	Transformacija	Neopažanje apsolutnog
Prostornog pariteta	$P : r \to -r$	lijevog (desnog)
Vremenskog obrata	$T : t \to -t$	Smjera vremena
Nabojne konjugacije	$C : e \to -e$	Predznaka naboja



Parnost

Transformacija koja od procesa čini njegovu zrcalnu sliku



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

$$P\Psi(r) \rightarrow \Psi(-r)$$

Valna funkcija može imati (ali ne mora) dobro definiranu parnost:

$$\Psi = \cos x \qquad P\Psi \rightarrow \cos(-x) = \cos x = +\Psi \qquad (P = +1)$$

$$\Psi = \sin x \qquad P\Psi \rightarrow \sin(-x) = -\sin x = -\Psi \qquad (P = -1)$$

$$\Psi = \cos x + \sin x \qquad P\Psi \rightarrow \cos x - \sin(x) \neq \pm\Psi$$

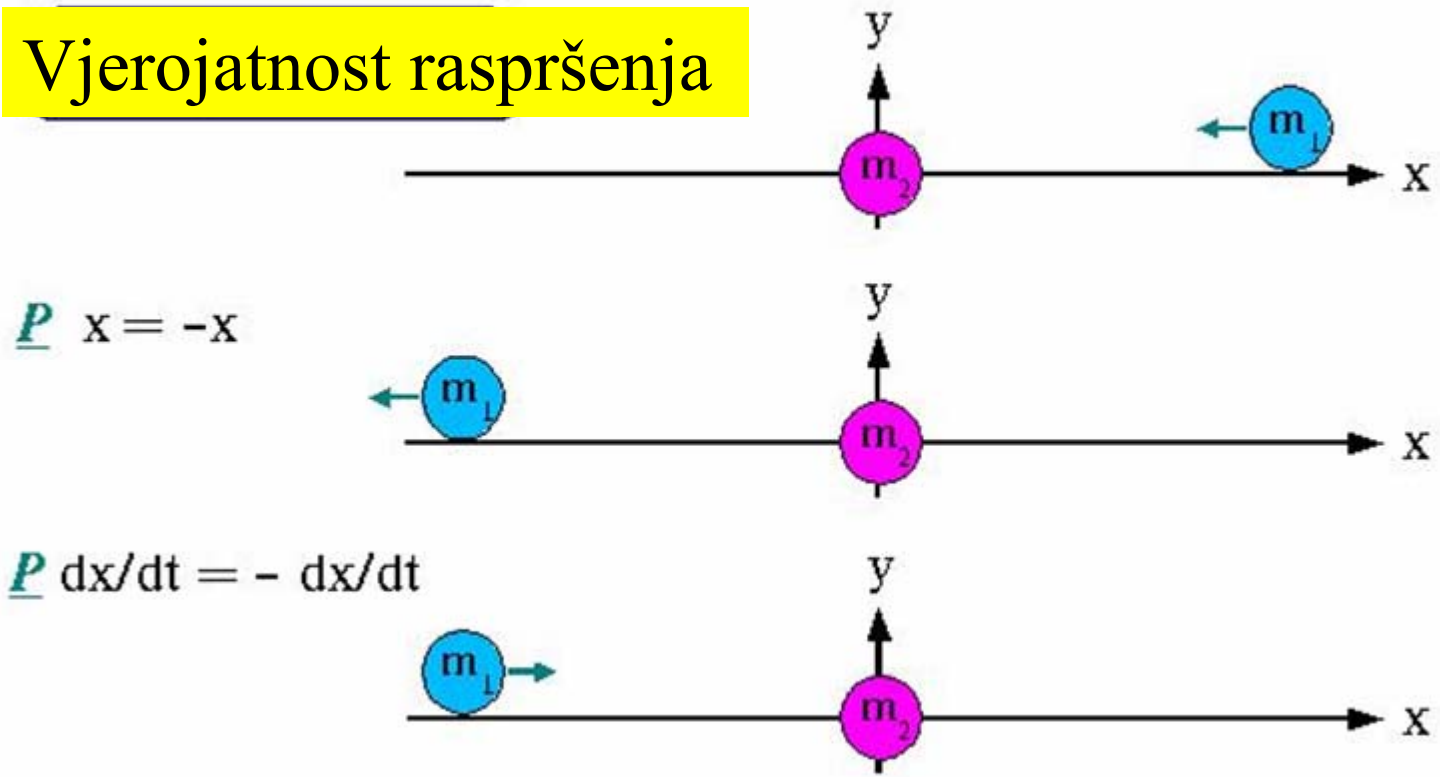
Parnost

Parity

$\underline{P}\ F(x) = F(-x)$

Diskretna simetrija

Vjerojatnost raspršenja



x i *dx/dt* su neparni na parnost, a vjerojatnost raspršenja je parna

➔parnost je multiplikativna, a ne aditivna

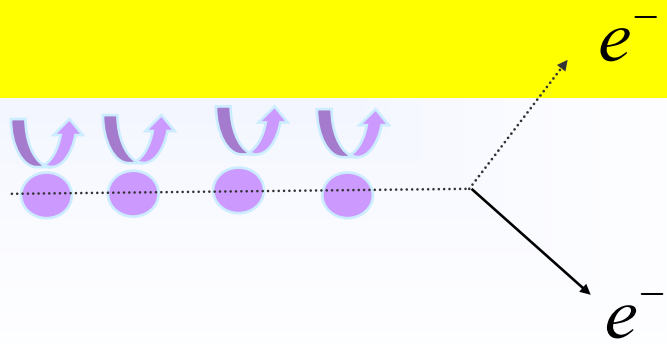
Testovi sačuvanja parnosti

- Klasična mehanika je invarijantna na sim. pariteta

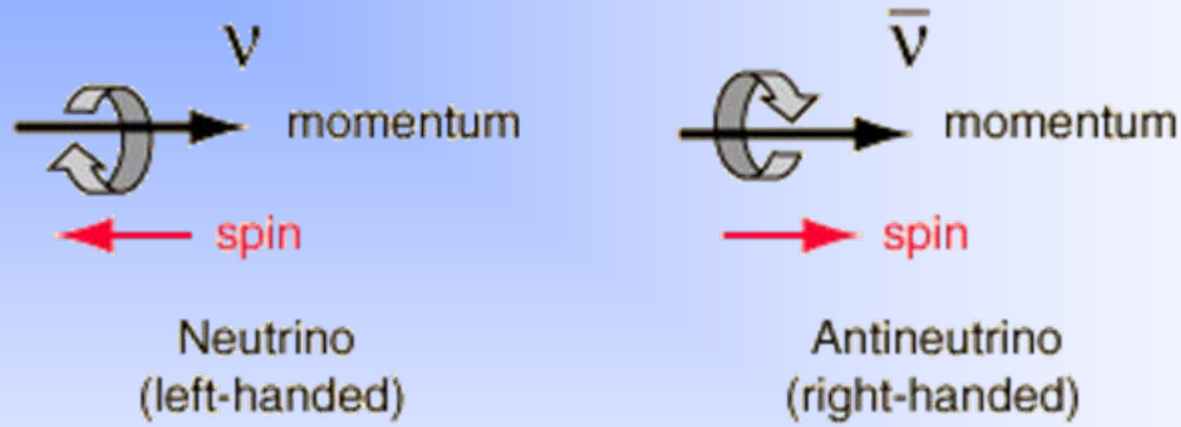
auto za njemačko tržište ⟷ auto za englesko tržište

- Zrcalni čovjek
- Molekule bjelančevina → lijevi vijci → povreda zrcalne sim.
- Elektromag. medjudjelovanje je invarijantno na sim. pariteta (foton se bavi "demokratski" s lijevim i desnim elektronima)
- Jako medjudjelovanje čuva parnost.
- Slabo medjudjelovanje narušava simetriju pariteta → 1956 → eksperiment gdje. Wu

$$^{60}Co \rightarrow {}^{60}Ni + e^- + \bar{\nu}_e$$



Lijevi neutrini i desni antineutrini



Nabojna konjugacija

Nabojna konjugacija : čestica $\Leftrightarrow$ antičestica

➢Mijenja predznak nabojima, te kv. brojevima (barionskom B, leptonskom L i hipernaboja Y

Ako definiramo nabojnu parnost fotona

➢dozvoljeni su procesi $\pi^0 \to 2\gamma$

➢zabranjen je proces $\pi^0 \to 3\gamma$

$$\eta_C(\gamma) = -1$$

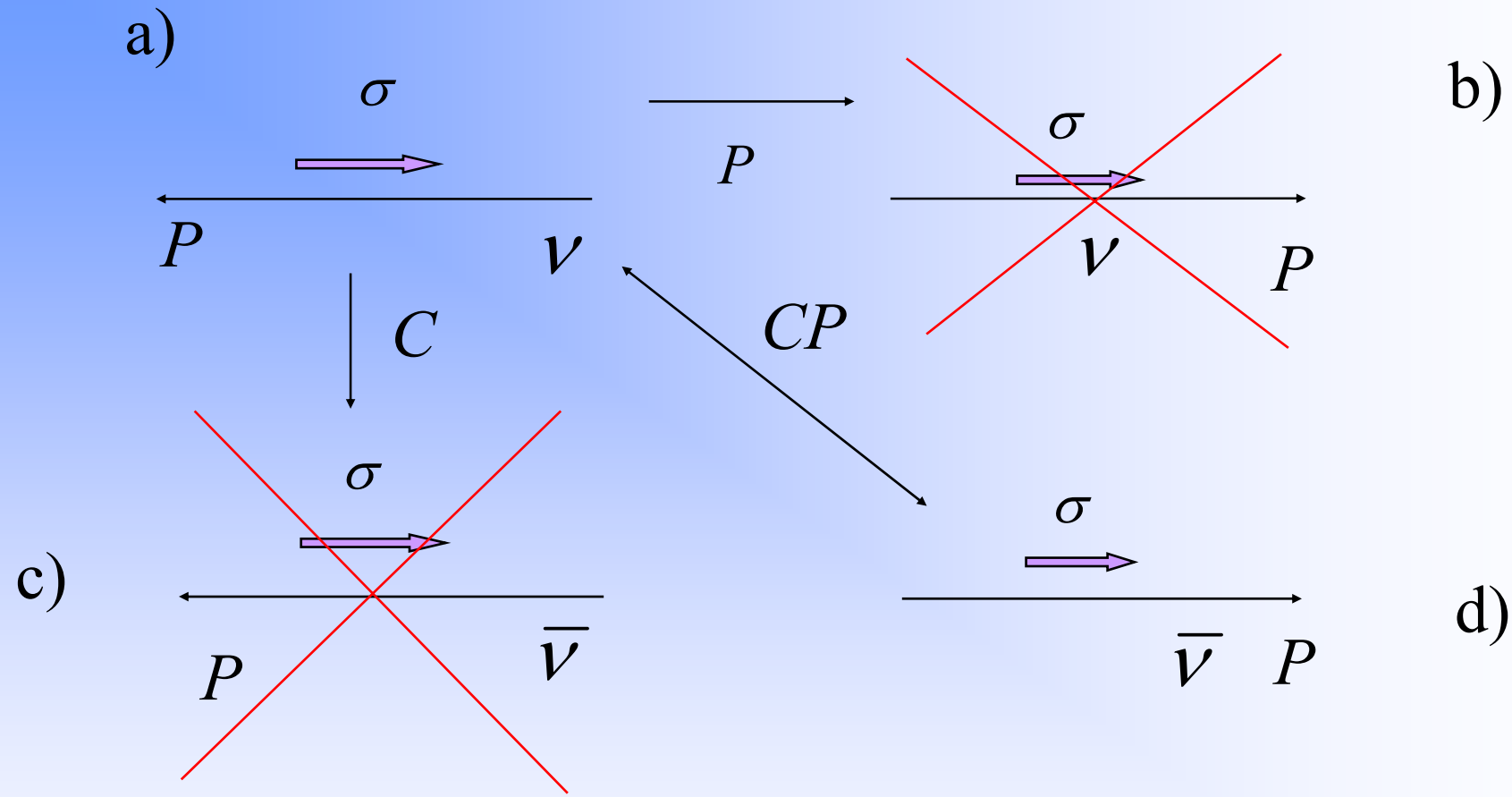
$$\frac{\pi^0 \to 3\gamma}{\pi^0 \to 2\gamma} < 4\times 10^{-7}$$

- U jakim interakcijama vrijedi C invarijantnost➔ provjereno u procesima: $p + \bar{p} \to \pi^+ + \pi^- + \ldots$

EM polja se Proizvode Nabojima u Gibanju koji Mijenjaju Predznak kad Djelujemo s C Nabojnom konj.



C i P operacije na neutrine



Samo stanja a) i d) opažaju se u prirodi

➢Slabe interakcije nisu inv. na C i P ali jesu na CP

Kaoni i stranost

"Strano ponašanje"➔nesrazmjer vjer. za produkciju Λ čestica:

$$\pi^- + p \xrightarrow{P} \Lambda^0 + x$$

U odnosu na vjer. raspada:

$$\Lambda^0 \xrightarrow{R} p + \pi^-$$

$$R / P \cong 10^{-13}$$

➔nova simetrija "Stranost"

- očuvana u jakim procesima $\Delta S = 0$
- narušena slabim silama $\Delta S = 1$

Tipične reakcije za proizvodnju kaona:

$$\pi^- + p \longrightarrow \Lambda^0 + K^0$$

Stranost	0	0	-1	1

$$\pi^+ + p \longrightarrow K^+ + \overline{K}^0 + p$$

Stranost	0	0	1	-1

CP-simetrija

Mezoni K^0 i $\overline{K}^0$ su jedna drugoj antičestice:

$$C\left|K^0\right\rangle = e^{i\phi}\left|\overline{K}^0\right\rangle$$

$$P\left|K^0\right\rangle = e^{i\phi}\left|\overline{K}^0\right\rangle$$

Relativne faze ϕ mogu se tako odabrati da vrijedi:

$$CP\left|K^0\right\rangle = \left|\overline{K}^0\right\rangle \qquad CP\left|\overline{K}^0\right\rangle = \left|K^0\right\rangle$$

Fizikalnog smisla imaju stanja:

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

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

CP-simetrija

Slijedi za djelovanje CP operatora:

$$CP\left|K_1\right\rangle = \left|K_1\right\rangle$$

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

K^0 i $\overline{K}^0$ vlastita stanja stranosti, ⟹ važno pri tvorbi

K_1 i K_2 dijagonalna u CP simetriji ⟹ važno pri raspadu

Energijski stanja neutr. kaona se rapadaju na : $\pi\pi$ ili $\pi\pi\pi$

$$CP\left|\pi^0\pi^0\right\rangle = (-)^l\left|\pi^0\pi^0\right\rangle \longrightarrow K_1$$ raspad na dva piona zbog CP simetrije

$$CP\left|\pi^+\pi^-\pi^0\right\rangle = (-)^{l+1}\left|\pi^+\pi^-\pi^0\right\rangle \longrightarrow K_2$$ raspad na tri piona zbog CP antisimetrije



Regeneracija

Zbog više pozitivne Q vrijednosti K_1 se brže raspada od K_2

$K_1 \Longrightarrow$ Kratkoživuća komponenta $\tau = 0.89 \times 10^{-10} s$

$K_2 \Longrightarrow$ Dugoživuća komponenta $\tau = 5.2 \times 10^{-8} s$

Ako $|K_2\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}\left(|K^0\rangle - |\bar{K}^0\rangle\right)$ pustimo kroz materijal $\bar{K}^0$ i K^0 se različito atenuiraju jer prevladavaju neg. vrijednosti stranosti

Nakon prolaska snop ima valnu funkciju: $\frac{1}{\sqrt{2}}\left(f|K^0\rangle - \bar{f}|\bar{K}^0\rangle\right)$

$\frac{1}{2}\left(f+\bar{f}\right)|K_2\rangle + \frac{1}{2}\left(f-\bar{f}\right)|K_1\rangle \Longrightarrow$ Regenerirao se K_1 jer f i $\bar{f}$ nisu isti

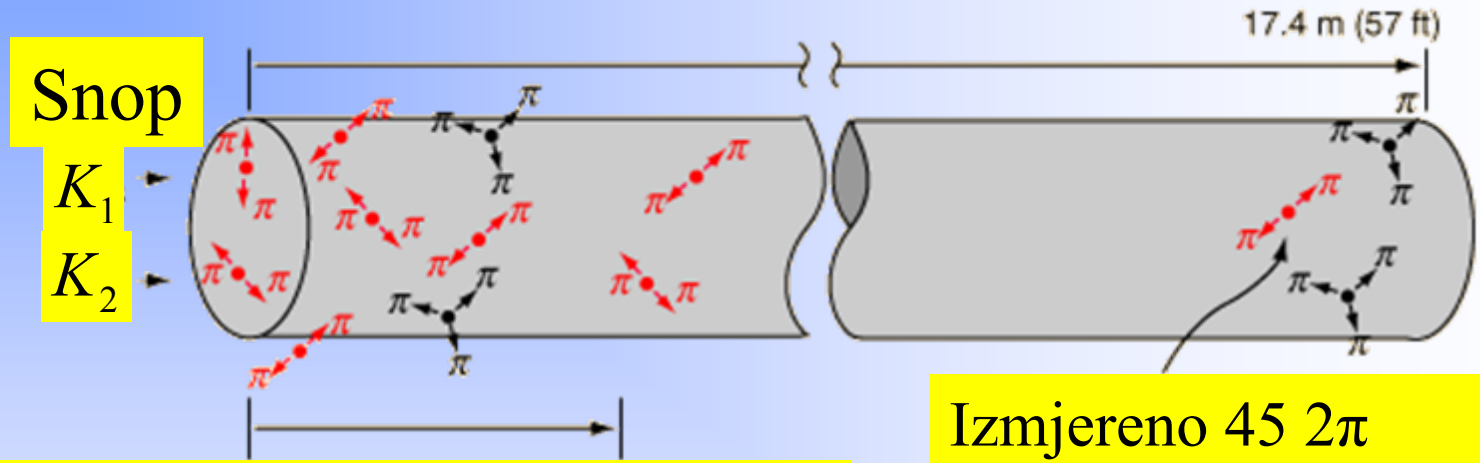
K_2 ne smije prolaziti kroz deblji sloj materijala !



Nesačuvanje CP-simetrije

Cronin i Fitch➔pokazivanje dvopionskog raspada u K_2

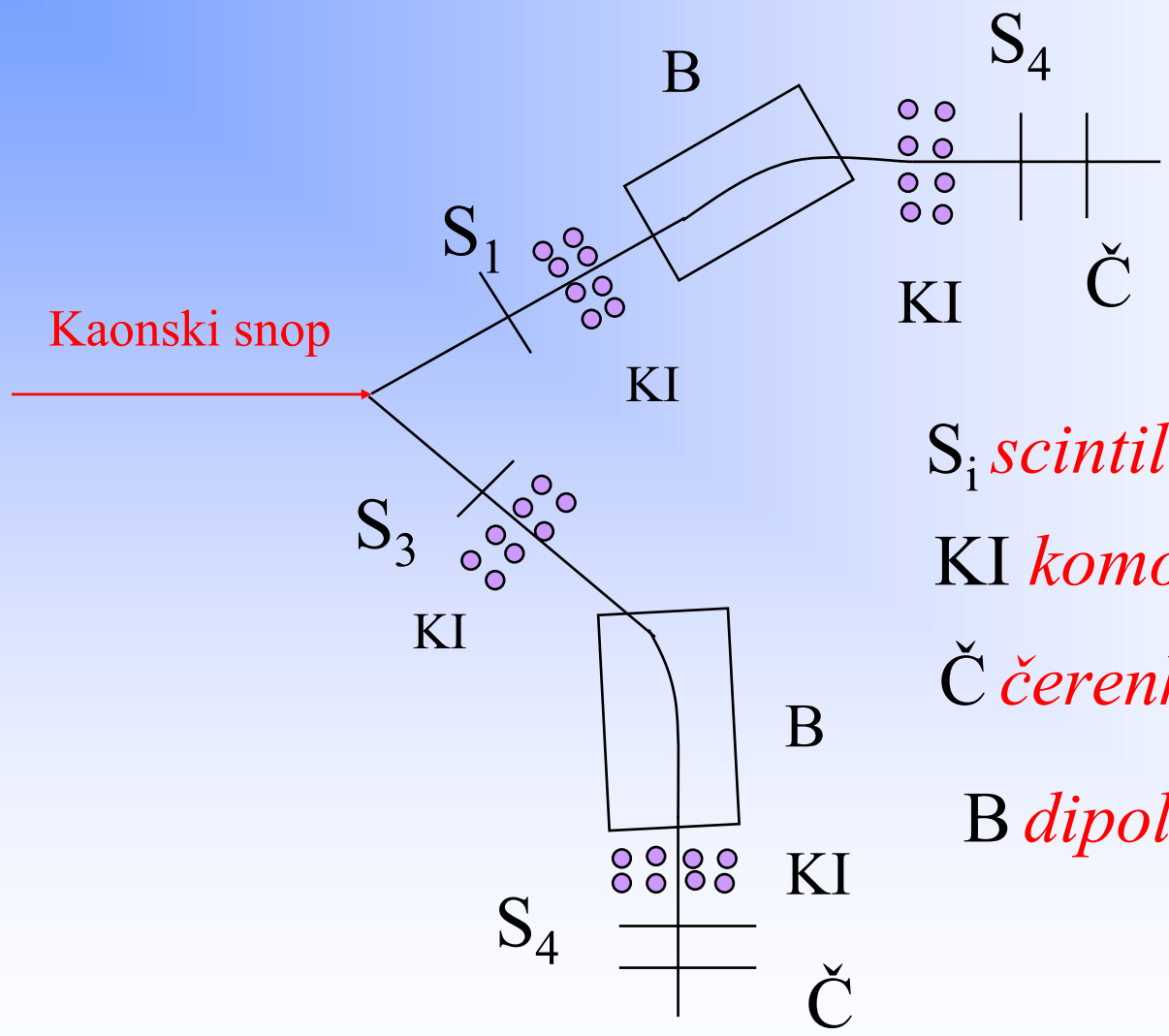
Snop
K_1
K_2



Vjeroj. 2π raspada je 1/500 nakon 0.17γ metara za brzine blizu *c*

Izmjereno 45 2π događaja od 22700 ili oko 1 u 500.
Očekivali bismo $\left\lceil \frac{1}{500} \right\rceil^{\frac{100}{\gamma}}$
tj. 0 događaja

Shema eksperimenta nesačuvanja CP simetrije



S_i *scintilatori*

KI *komore na iskre*

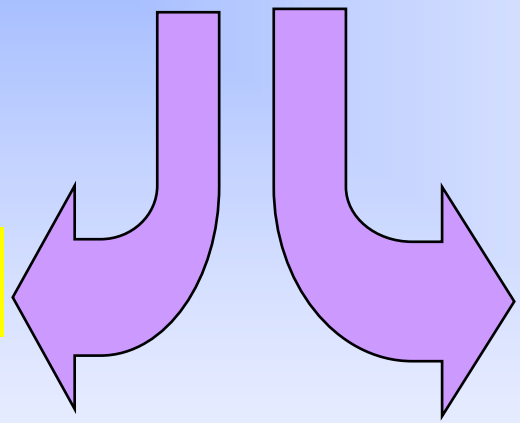
Č *čerenkovljevi detektori*

B *dipolni magneti*

Implikacije i zagonetke narušenja CP-simetrije

- U elementarnim procesima sačuvana je *T*-simetrija
- Teorije polja počivaju na *CPT* simetriji

CP simetrija ne vrijedi



T-simetrija ne vrijedi

Ne vrijedi *CPT* simetrija

Rušenje važnih teorija