

დამსხვრეული სარკე:
დისკრეტული სიმეტრიები და მათი დარღვევა ბუნებაში

აკაკი რუსეცკი

ბონის უნივერსიტეტი, გერმანია

ვირტუალური ლექცია, 2012

- შესავალი – დისკრეტული სიმეტრიები ფიზიკაში:
 - სივრცის არეკვლა – P
 - დროის არეკვლა – T
 - მუხტის ინვერსია – C
- P -სიმეტრიის დარღვევის ექსპერიმენტული აღმოჩენა ატომბირთვების სუსტ ურთიერთქმედებებში
- CP -სიმეტრიის დარღვევა: ნეიტრალური K -მეზონების დაშლები
- CPT -სიმეტრიის დარღვევა?
- დასკვნა

სიმეტრიები ბუნებაში

სიმეტრიები ცენტრალურ როლს თამაშობს ფიზიკაში.
თეორიები, რომლებიც სამყაროს წარმოშობას და განვითარებას აღწერს,
სიმეტრიის პრინციპებზეა დაფუძნებული

უწყვეტი სიმეტრიები: ლორენც-სიმეტრია, გალიბრული სიმეტრია, სუპერსიმეტრია
ბოზონებსა და ფერმიონებს შორის, ...

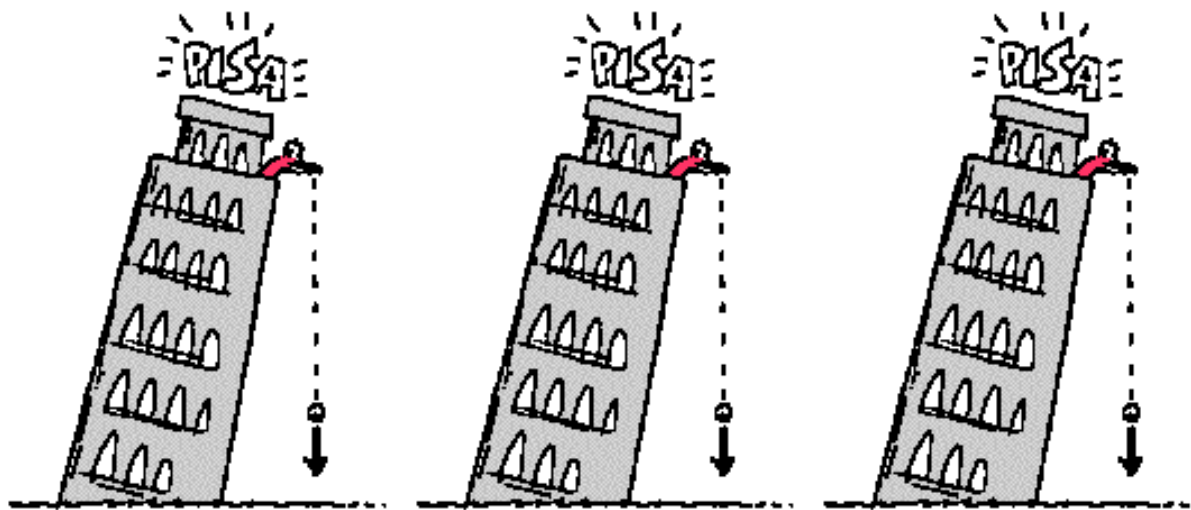
დისკრეტული სიმეტრიები:

P: სივრცის არეკვლა

T: დროის არეკვლა (მოძრაობის შექცევა)

C: მუხტის ინვერსია (ნაწილაკ-ანტინაწილაკის სიმეტრია)

სივრცის წანაცვლება → იმპულსის შენახვა

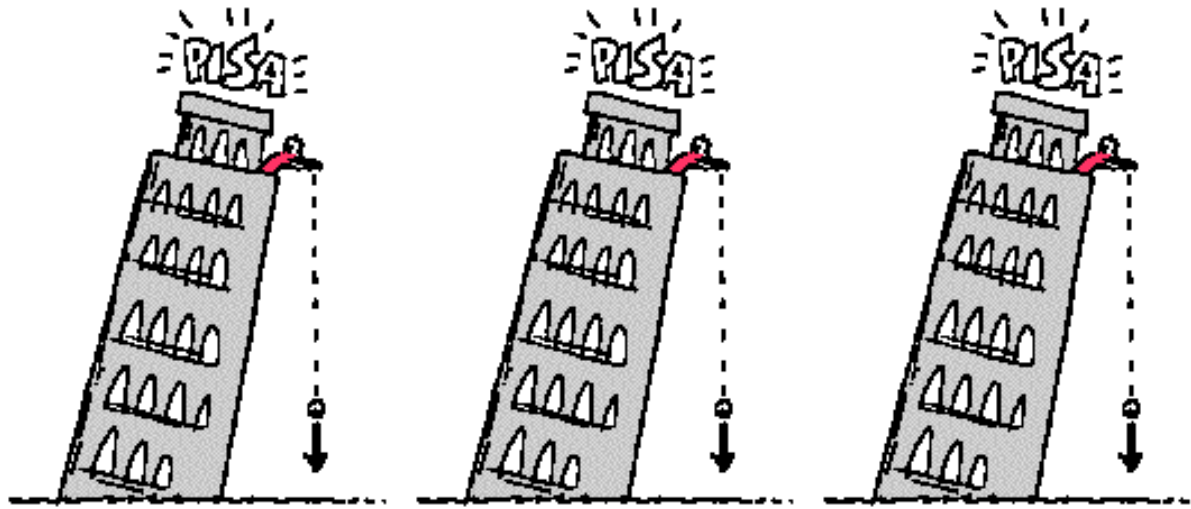


ნიუ-იორკი

თბილისი

სიდნეი

დროის წანაცვლება → ენერჯიის შენახვა

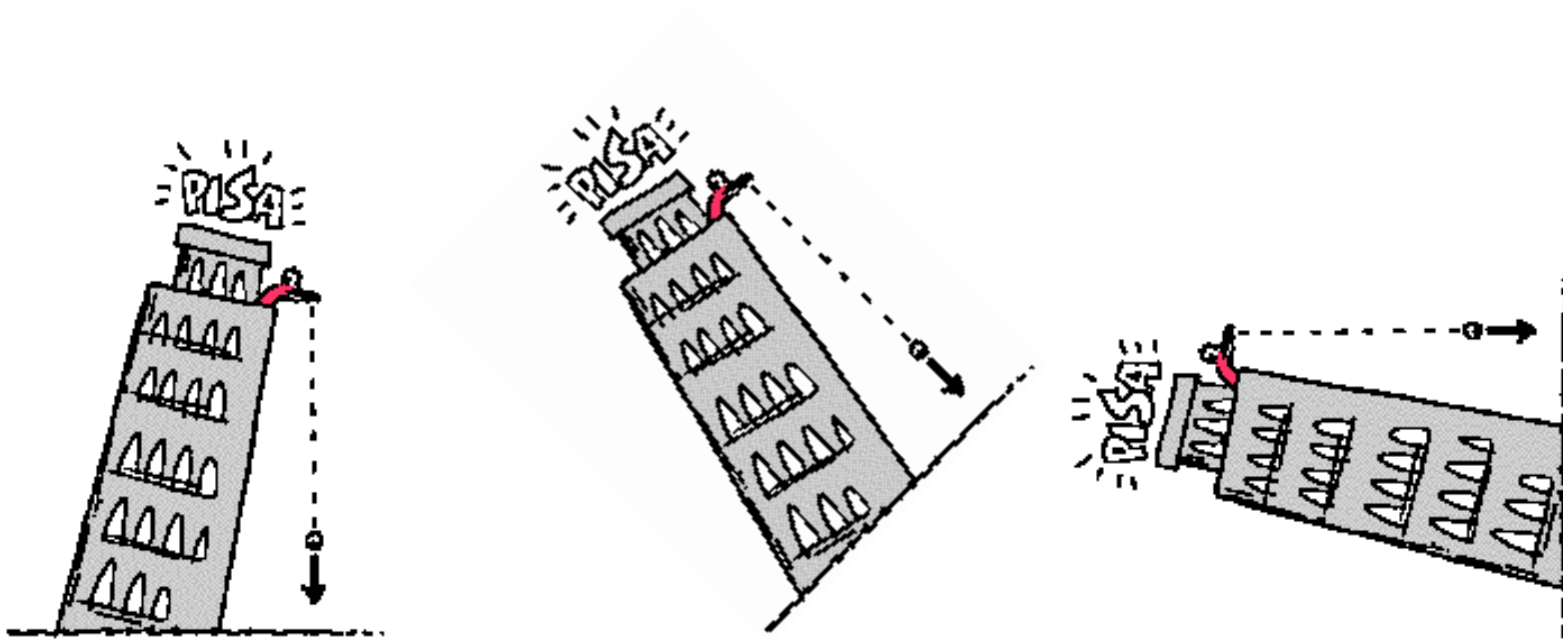


გუშინ

დღეს

ხვალ

მობრუნება \rightarrow ბრუნვითი მომენტის შენახვა $\mathbf{L} = [\mathbf{x} \times \mathbf{p}]$



გარდა ამისა:

შინაგანი სიმეტრიები \rightarrow მუხტის შენახვა ...

ცალიბრული სიმეტრიები \rightarrow ურთიერთქმედებები

კედელი სარკით, (ლიხტენშტაინი, 1991 წ.)



როგორ გამოიყურება ფიზიკის კანონები სარკის მიღმა?

ინვარიანტულია თუ არა ბუნება P, T, C -ს მიმართ?

- კლასიკური მექანიკა: ნიუტონის მეორე კანონი

$$m \frac{d^2 \mathbf{x}}{dt^2} = -\nabla V(\mathbf{x})$$

კოორდინატი: $\mathbf{x}(t)$

დრო: t

იმპულსი: $\mathbf{p} = m\dot{\mathbf{x}}(t)$

ბრუნვითი მომენტი: $\mathbf{L} = \mathbf{x} \times \mathbf{p}$

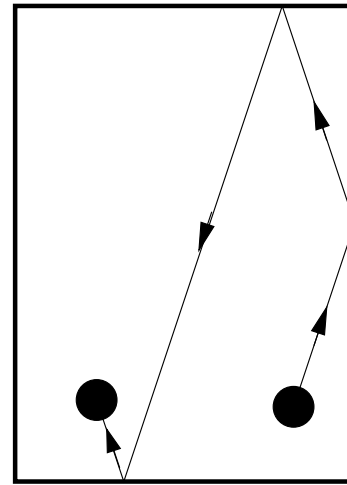
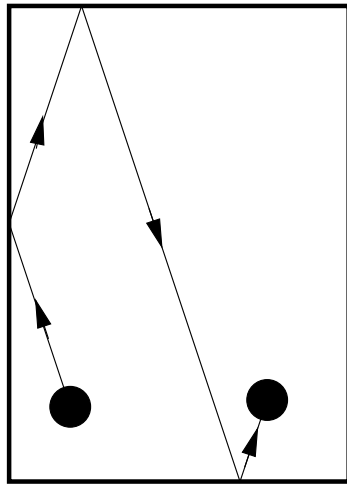
ურთიერთქმედება: $V_{12}(|\mathbf{x}_1 - \mathbf{x}_2|)$

პოტენციალი: $V(\mathbf{x})$

ძალა: $\mathbf{F}(\mathbf{x}) = -\nabla V(\mathbf{x})$

P: სივრცის არეკვლა

$$\mathbf{x} \rightarrow -\mathbf{x}, \quad t \rightarrow t, \quad \mathbf{p} \rightarrow -\mathbf{p}, \quad \mathbf{L} = \mathbf{x} \times \mathbf{p} \rightarrow \mathbf{L}$$

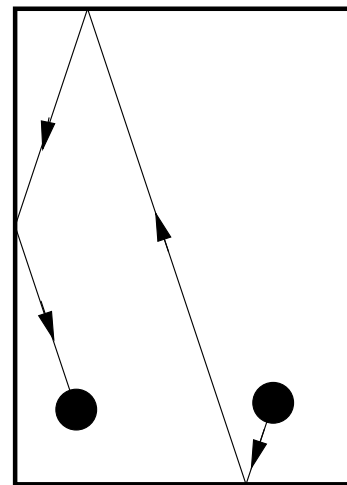
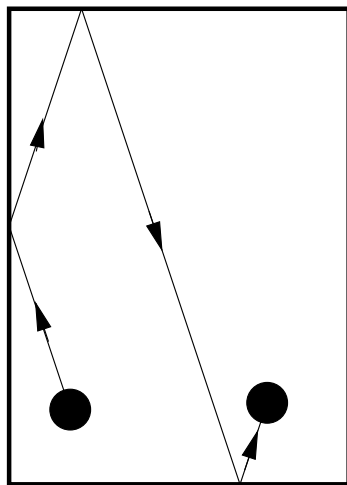


მექანიკის კანონები ინვარიანტულია სივრცის არეკვლის მიმართ, თუ ურთიერთქმედება მხოლოდ სხეულებს შორის მანძილზე არის დამოკიდებული:

$$V_{12}(|\mathbf{x}_1 - \mathbf{x}_2|) = V_{12}(|(-\mathbf{x}_1) - (-\mathbf{x}_2)|)$$

T: დროის არეკვლა (მოდრაობის შექცევა)

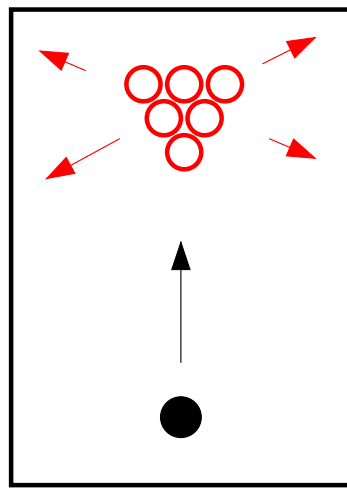
$$\mathbf{x} \rightarrow \mathbf{x}, \quad t \rightarrow -t, \quad \mathbf{p} \rightarrow -\mathbf{p}, \quad \mathbf{L} = \mathbf{x} \times \mathbf{p} \rightarrow -\mathbf{L}$$



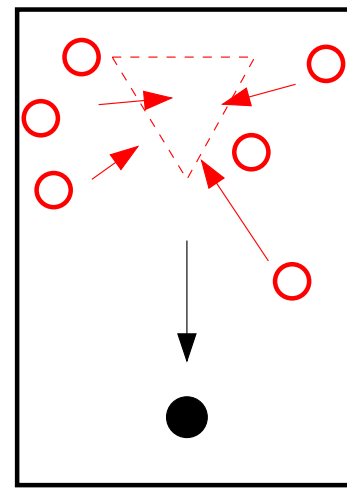
მექანიკის კანონები ინვარიანტულია დროის არეკვლის მიმართ, თუ ურთიერთქმედება დროზე ცხადად არ არის დამოკიდებული

T: საწყისი პირობები

- მართალია, მექანიკის კანონები ინვარიანტულია T -გარდაქმნის მიმართ, მაგრამ ძალიან ადვილია გავარჩიოთ, რომელი სურათი შეესაბამება “ნამდვილ” მოძრაობას და რომელი “დროში არეკვლილს”. რაშია საქმე?



A



B

- B -ს ალბათობა ძალიან მცირეა: ბურთულების საწყისი მდებარეობები და იმპულსები ძალიან ზუსტად უნდა დავათვისებინოთ
- ⇒ ნაკლებიდან მეტი ალბათობის მქონე მდგომარეობაში გადასვლა განსაზღვრავს დროის მიმართულებას: ენტროპია იზრდება

C: ნაწილაკ-ანტინაწილაკის სიმეტრია

1/2 სპინის მქონე ნაწილაკი აღიწერება დირაკის განტოლებით

$$\text{ტალღური ფუნქცია: } \Psi(\mathbf{x}, t) = \begin{pmatrix} \Psi_1(\mathbf{x}, t) \\ \Psi_2(\mathbf{x}, t) \\ \Psi_3(\mathbf{x}, t) \\ \Psi_4(\mathbf{x}, t) \end{pmatrix} = \Psi_e(\mathbf{x}, t) + \Psi_p(\mathbf{x}, t)$$

$\Psi_e(\mathbf{x}, t) \sim$ ელექტრონი, $\Psi_p(\mathbf{x}, t) \sim$ პოზიტრონი, ანუ ანტიელექტრონი

- დირაკის განტოლება ინვარიანტულია მუხტის ინვერსიის მიმართ

$$\Psi_e(\mathbf{x}, t) \xrightarrow{C} \Psi_p(\mathbf{x}, t), \quad \Psi_p(\mathbf{x}, t) \xrightarrow{C} \Psi_e(\mathbf{x}, t)$$

- პოზიტრონი იწინასწარმეტყველეს 1928 წ., აღმოაჩინეს 1933 წ.
- ბუნებაში არსებულ ყველა ნაწილაკს გააჩნია ანტინაწილაკი საწინააღმდეგო მუხტით

ბუნების კანონების ინვარიანტობა P, T, C -ს მიმართ

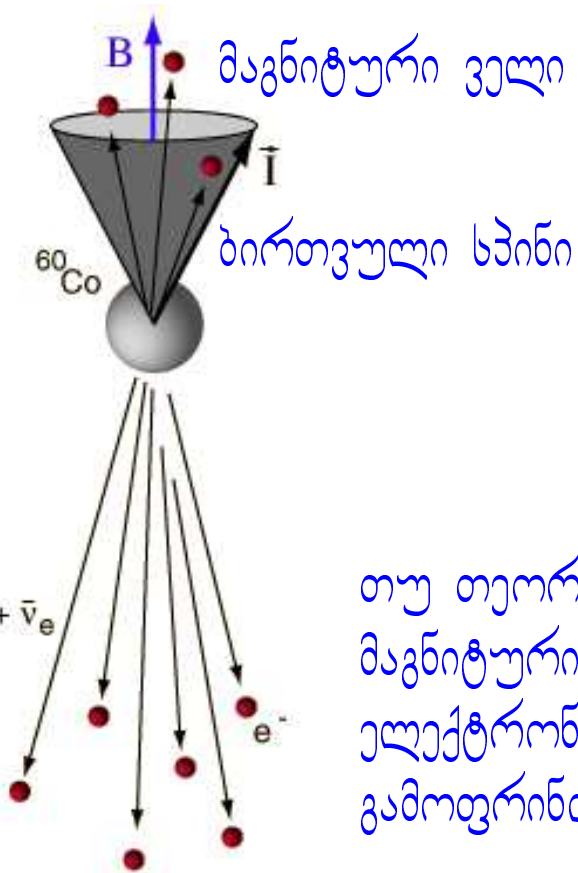
- კლასიკური მექანიკა, ნიუტონის გრავიტაცია: P, T
- კლასიკური და ქვანტური ელექტროდინამიკა: P, T, C
- ბირთვული (ძლიერი) ურთიერთქმედება –
ქვანტური ქრომოდინამიკა: P, T, C

ფრთხილად: ანომალიები ...

- ელექტროსუსტი ურთიერთქმედებები: $\cancel{P}, \cancel{C}, \cancel{T}$
- ⇒ დიდი გაერთიანების მოდელები: $\cancel{P}, \cancel{C}, \cancel{T}$

P -ინვარიანტობა სუსტ ურთიერთქმედებებში

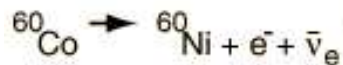
კობალტ-60 ბირთვის β -დაშლა (ვუ, 1957 წ.)



სივრცის არეკვლა:

$$\mathbf{x} \rightarrow -\mathbf{x}, \quad \mathbf{p} \rightarrow -\mathbf{p}$$

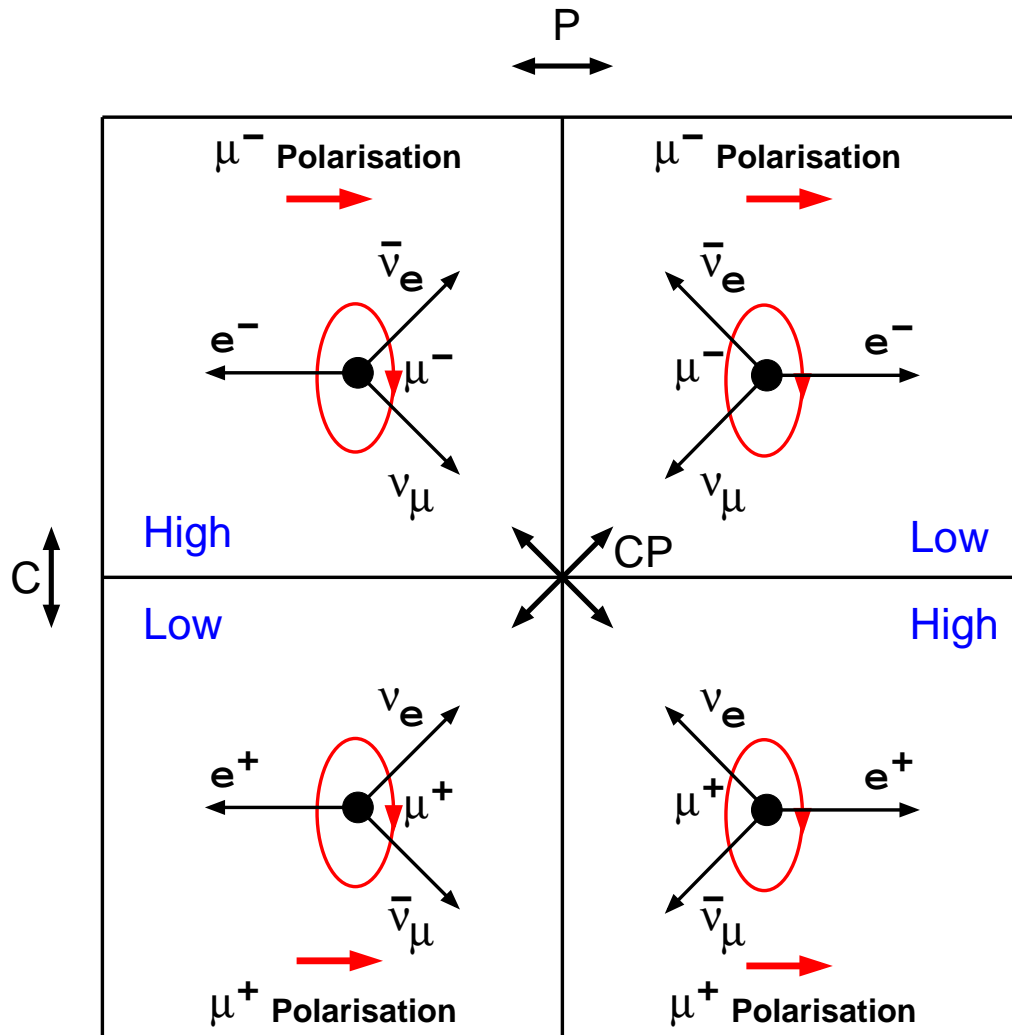
$$\mathbf{I} \rightarrow \mathbf{I}, \quad \mathbf{B} \rightarrow \mathbf{B}$$



თუ თეორია P -ინვარიანტულია, მაგნიტური ველის გასწვრივ და საწინააღმდეგოდ ელექტრონების ერთი და იგივე რაოდენობა გამოფრინდება

CP -სიმეტრია

ბუნების CP -სარკე (ლანდაუ)



სივრცის არეკვლა:

$$\mathbf{s} \rightarrow \mathbf{s}, \mathbf{p} \rightarrow -\mathbf{p}$$

თუ CP-სიმეტრია არ არის დარღვეული, ნაწილაკს და ანტინაწილაკს ერთმანეთისგან ვერ გავარჩევთ

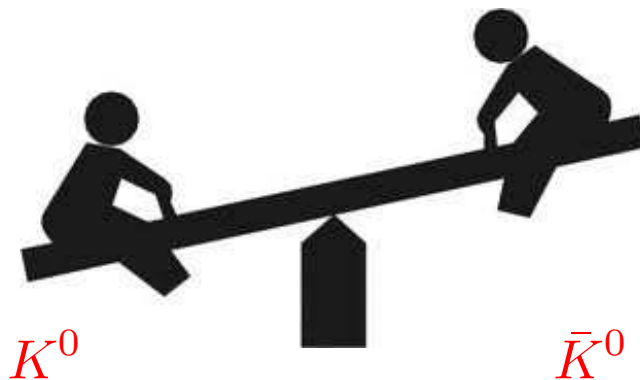
CP -სიმეტრია ირლვევა?

- ბუნებაში არსებული ყველა ადრონი (მეზონები და ბარიონები) u, d, s, c, b, t კვარკებისგან და შესაბამისი ანტიკვარკებისგან შედგება:
- პროტონი $\sim uud$, ნეიტრონი $\sim udd$, π^+ -მეზონი $\sim \bar{u}d$, და ა. შ.

ბუნებაში არსებობს 2 სახის ნეიტრალური K -მეზონი, რომლებიც ერთმანეთთან CP გარდაქმნით არის დაკავშირებული:

$$K^0 \sim d\bar{s}, \quad \bar{K}^0 \sim \bar{d}s, \quad (K^0)^{CP} = \bar{K}^0$$

ნეიტრალური კაონების ოსცილაცია



შემდეგი წრფივი კომბინაციები CP -გარდაქმნისას თავის თავში გადადის:

$$K_1 = (K^0 + \bar{K}^0)/\sqrt{2}$$

$$K_2 = (K^0 - \bar{K}^0)/\sqrt{2}$$

$$K_1 \xrightarrow{CP} K_1$$

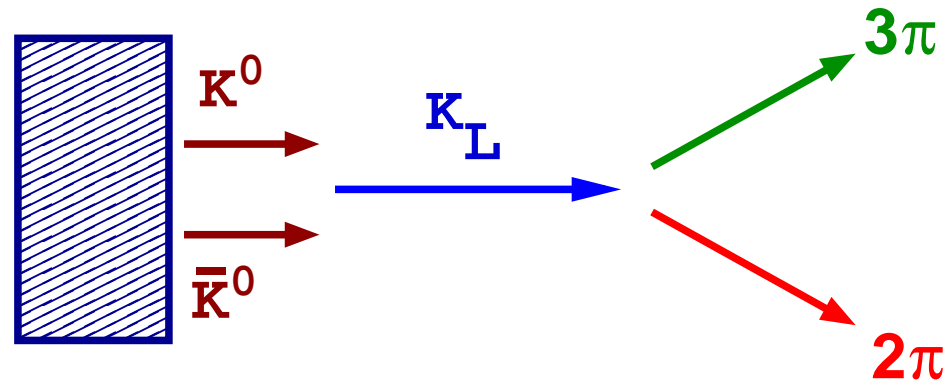
$$K_2 \xrightarrow{CP} -K_2$$

მალე იშლება: $K_1 \rightarrow 2\pi$

დიდხანს ცოცხლობს: $K_2 \rightarrow 3\pi$

$$M_1 \simeq M_2, \quad \Gamma_1 \gg \Gamma_2$$

CP -სიმეტრიის დარღვევა ნეიტრალური კაონების დაშლებში



- თუ CP სიმეტრია არ არის დარღვეული, $K_L = K_2$
- K_L მხოლოდ სამ π -მეზონად შეიძლება დაიშალოს

$$(2\pi) \xrightarrow{CP} (2\pi), \quad (3\pi) \xrightarrow{CP} -(3\pi)$$

⇒ აღმოჩნდა, რომ K_L მცირე ალბათობით ორ π -მეზონადაც იშლება (კრონინი, ფიტჩი, კრისტენსონი და თურლეი, 1964 წ.)

CP -სიმეტრიაც დარღვეულია!

ბარიონების სამყაროში

რატომ არის მნიშვნელოვანი CP -სიმეტრიის დარღვევა?

სამყაროში ბარიონული ასიმეტრიის წარმოშობის 3 პირობა (სახაროვი, 1965 წ.):

- ბარიონების რიცხვი არ ინახება
- C - და CP -სიმეტრიები დარღვეულია

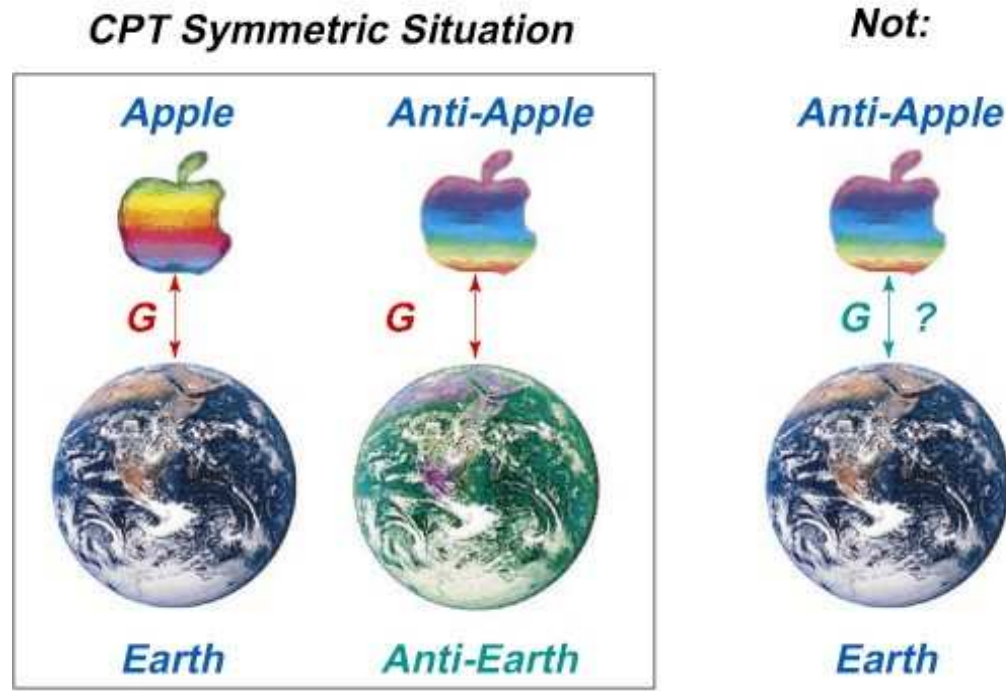
$$W(\text{ბარიონი} \rightarrow f) \neq W(\text{ანტიბარიონი} \rightarrow \bar{f})$$

- სითბური წონასწორობა არ არის დამყარებული

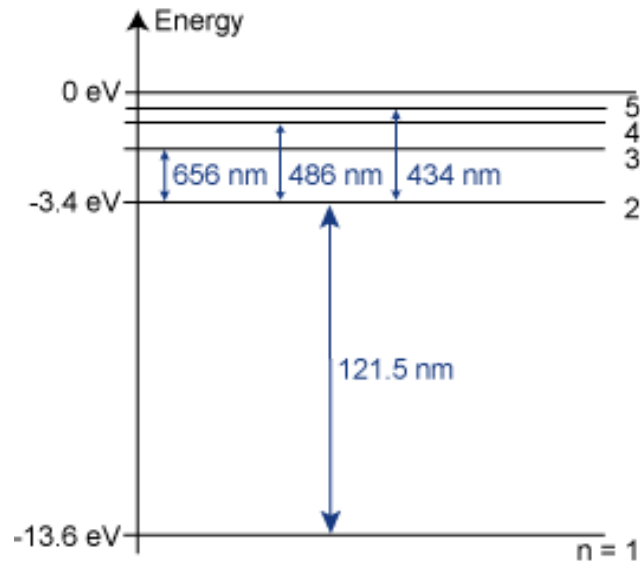
სიმეტრიები რომ არ ყოფილიყო დარღვეული, სამყაროში ჭარბი მატერია არ წარმოიშობოდა!

CPT -სიმეტრია

- მასა (ნაწილაკი) = მასა (ანტინაწილაკი)
- სივრცის ხანგრძლივობა (ნაწილაკი) = სივრცის ხანგრძლივობა (ანტინაწილაკი)
- ურთიერთქმედება (ნაწილაკი) = ურთიერთქმედება (ანტინაწილაკი)



ანტიწყალბადის ატომის სპექტრი



ბალმერის სპექტრი
(წყალბადი)

ATHENA და *ATRAP*
ექსპერიმენტები (CERN)

?

ბალმერის სპექტრი
(ანტიწყალბადი)

CPT-სიმეტრიის დარღვევის აღმოჩენა სრულიად მეცვლის ჩვენს დღევანდელ წარმოდგენას სამყაროს შესახებ!

- C, P, T დისკრეტული სიმეტრიები “ბუნების სარკეს” წარმოადგენს
- C, P, T სიმეტრიები დარღვეულია. ამ სიმეტრიების დარღვევის კონკრეტული მექანიზმების შესწავლა ბევრ საინტერესო ინფორმაციას გვაწვდის ბუნების ფუნდამენტალური კანონების შესახებ
- CPT -სიმეტრიის დარღვევა დღემდე არ არის ექსპერიმენტულად აღმოჩენილი, რაც ველის ქვანტურ თეორიაში კარგად ცნობილ CPT -თეორემას ადასტურებს. თუკი მომავალში ეს დარღვევა ექსპერიმენტულად დადასტურდება, ჩვენი თეორიის ძირფესვიანი გადახედვა გახდება საჭირო

დიდი მადლობა მობრძანებისათვის!



მართლა ასე გამოიყურება ბუნების სარკე?