



## Łamanie symetrii względem odwrócenia czasu – cz. I

*Paweł Moskał  
Instytut Fizyki UJ*

### Oscylacje mezonów dziwnych

#### Symetria względem odwrócenia w czasie

Czasu raczej cofnąć się nie da. Potrafimy zmieniać kierunek poruszania się w przestrzeni, ale nie umiemy wpływać na kierunek upływu czasu. Dlatego żeby zbadać doświadczalnie symetrię względem odwrócenia czasu używamy innych sposobów niż cofanie czasu. Na przykład porównujemy przebiegi procesów różniących się jedynie kolejnością zachodzących zmian<sup>1</sup>.

Dla zilustrowania zasady bezpośredniego testowania symetrii względem odwrócenia czasu rozważmy cząstkę, która w interwale czasu  $\tau$  poruszając się z prędkością  $v$  przelatuje w pustej przestrzeni z punktu A do punktu B. Zachowanie symetrii względem odwrócenia czasu oznacza, że po odwróceniu kierunku upływu czasu cząstka ta poruszając się z prędkością  $v$  przeleciałaby w czasie  $\tau$  z punktu B do punktu A. Natomiast gdyby po odwróceniu upływu czasu cząstka lecąc z prędkością  $v$  z punktu B nie doleciała po czasie  $\tau$  do punktu A to byłoby to oznaką łamania symetrii względem odwrócenia czasu.

Nie umiemy cofać czasu, ale moglibyśmy przeprowadzić doświadczenie mierząc czas przelotu cząstki z punktu A do punktu B w próżni w przestrzeni wolnej od działania sił, a następnie porównać go z wynikiem pomiaru czasu przelotu cząstki z punktu B do punktu A. Ten eksperyment myślowy pokazuje, co tak naprawdę rozumie się pod pojęciem testowania symetrii względem odwracania czasu. W gruncie rzeczy mówiąc, że badamy symetrię względem odwrócenia czasu mamy na myśli symetrię odwrócenia ruchu! A zatem testując symetrię odwrócenia w czasie nie cofamy czasu, lecz porównujemy jedynie dane procesy z procesami, które zachodziłyby gdyby czas się cofał.

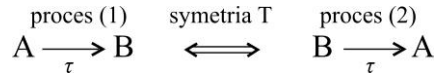
Raczej trudno sobie wyobrazić, żeby dało się zaobserwować łamanie symetrii odwrócenia w czasie realizując opisany powyżej eksperyment myślowy

---

<sup>1</sup> Stopień zachowania symetrii odwrócenia w czasie testuje się także badając właściwości, których cząstki nie mogą posiadać gdyby symetria względem odwrócenia czasu była zachowana. Na przykład gdyby neutron posiadał elektryczny moment dipolowy różny od zera to oznaczałoby to, że symetria względem odwrócenia czasu jest łamana. Kilka grup na świecie poszukuje sygnału od elektrycznego momentu dipolowego neutronu. Można też na przykład badać stopień zachowania symetrii względem odwrócenia czasu wyznaczając korelacje pomiędzy wektorami pędu kwantów gamma pochodzących z rozpadu atomów pozytonium. Opis tych niezwykle ciekawych badań wybiega jednak znacznie poza ramy tego artykułu. W tym artykule omawiamy bezpośrednio łamanie symetrii względem odwrócenia czasu.

z cząstką przelatującą między dwoma ustalonymi punktami. Dlatego próby wykazania, że symetria w czasie jest łamana polegają na poszukiwaniu takich obiektów fizycznych, których ewolucja w czasie między kolejnymi stanami, które obiekt taki przyjmuje, zmienia się w zależności od kolejności występowania tych stanów w trakcie ewolucji. Badamy na przykład prawdopodobieństwo przechodzenia wybranego układu ze stanu A do stanu B w zadanym interwale czasu  $\tau$  i porównujemy to z prawdopodobieństwem przechodzenia ze stanu B do stanu A po takim samym czasie  $\tau$ . Rysunek 1 ilustruje procesy symetryczne względem odwrócenia czasu.

Jeśli symetria względem odwrócenia czasu byłaby łamana to prawdopodobieństwo zajścia procesu (1): przejście ze stanu A po czasie  $\tau$  w stan B byłoby różne od prawdopodobieństwem zajścia procesu (2): przejście ze stanu B po czasie  $\tau$  w stan A.



Rys. 1. Ilustracja procesów symetrycznych względem odwrócenia czasu. Operacja odwrócenia czasu zastosowana do procesu (1) prowadzi do procesu (2)

Im mniej skomplikowany jest układ używany do testowania tym mniejsze są trudności z interpretacją wyników. Jednak układ taki musi mieć strukturę, żeby mogły zachodzić w nim jakieś procesy i żeby mógł znajdować się w różnych stanach. Najmniejszymi znanymi obecnie układami złożonymi są mezony, czyli cząstki zbudowane z kwarku i antykwarku. W kolejnym rozdziale opisany jest przepiękny eksperyment wykonany w Europejskim Laboratorium Fizyki Jądrowej (CERN), w którym testowano symetrię względem odwrócenia czasu badając prawdopodobieństwa przejść pomiędzy różnymi stanami neutralnych mezonów K.

### Oscylacje neutralnych mezonów K

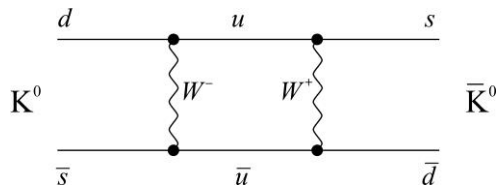
Neutralny mezon K w stanie  $K^0$  składa się z antykwarku  $\bar{s}$  i kwarku  $d$  natomiast w stanie  $\bar{K}^0$  składa się z kwarku  $s$  i antykwarku  $\bar{d}$  (rys. 2)<sup>2</sup>.



Rys. 2. Skład kwarkowy mezonów  $K^0$  i  $\bar{K}^0$

<sup>2</sup> Ze względu na nieoczekiwane właściwości mezonów K nazwano je mezonami dziwnymi. Nazwa kwarku  $s$ , jednego ze składników mezonów K pochodzi od angielskiego słowa *strange*.

Wewnątrz mezonu K może zachodzić wiele procesów, na przykład taki jak pokazano na rys. 3, gdzie w wyniku wymiany bozonów  $W$  pomiędzy kwarkami mezon  $K^0$  może zmienić się w mezon  $\bar{K}^0$  i odwrotnie. Zatem procesy takie jak przedstawiono na rys. 3, zachodzące wewnątrz neutralnego mezonu K powodują, że oscyluje on między stanami, kiedy jest cząstką  $K^0$  i kiedy jest antycząstką  $\bar{K}^0$ .



Rys. 3. Przykład procesu zachodzącego wewnątrz mezonu K powodującego oscylacje  $K^0 \leftrightarrow \bar{K}^0$ . W wyniku następujących po sobie wymian bozonów  $W^-$  i  $W^+$  pomiędzy kwarkami, kwark  $d$  zmienił się w kwark  $s$ , a kwark  $\bar{s}$  zmienił się w kwark  $\bar{d}$ , czyli mezon  $K^0$  zmienił się w mezon  $\bar{K}^0$ .

W eksperymencie CP-LEAR wykonanym w 1998 roku w CERNie w celu zbadania symetrii odwrócenia czasu porównano prawdopodobieństwo przejścia mezonu K ze stanu  $K^0$  do stanu  $\bar{K}^0$  po zadanym czasie  $\tau$  z prawdopodobieństwem przejścia po takim samym czasie  $\tau$  ze stanu  $\bar{K}^0$  w stan  $K^0$  (rys. 4). Zmierzone wartości tych prawdopodobieństw nie są takie same, co grupa CP-LEAR zinterpretowała jako łamanie symetrii względem odwrócenia czasu. Jednak interpretacja ta nie jest jednoznaczna, co zostanie wyjaśnione w ostatniej części tego artykułu po omówieniu idei eksperymentu.

$$K^0 \xrightarrow{\tau} \bar{K}^0 \xleftrightarrow{\text{symetria T}} \bar{K}^0 \xrightarrow{\tau} K^0$$

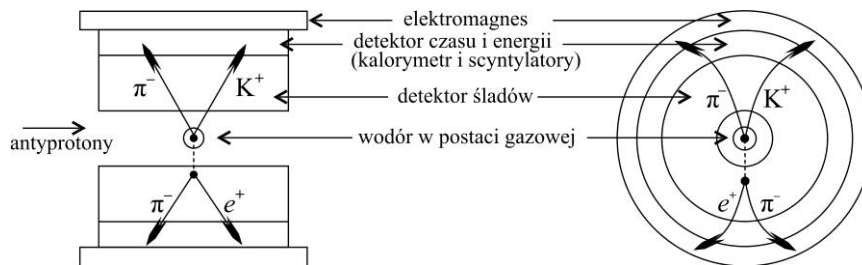
Rys. 4. Symetria odwrócenia w czasie implikuje, że proces  $K^0 \rightarrow \bar{K}^0$  powinien zachodzić z takim samym prawdopodobieństwem jak proces  $\bar{K}^0 \rightarrow K^0$ .

### Idea pomiaru prawdopodobieństwa przejść między mezonami $K^0$ i $\bar{K}^0$ za pomocą detektora CP-LEAR

Żeby móc badać przejścia  $K^0 \rightarrow \bar{K}^0$  oraz  $\bar{K}^0 \rightarrow K^0$  musimy umieć wytwarzać mezon K w określonym stanie oraz umieć identyfikować, w jakim stanie znajduje się on po upływie zadanego czasu  $\tau$ .

W eksperymencie CP-LEAR mezony wytwarzano w akcie anihilacji protonu z antyprotonem. Antyprotony o małej energii kierowane były do środka detektora, gdzie zatrzymywały się w gazie wodoru i anihilowały z protonami (jądrami atomów wodoru). Uproszczonego schematu układu doświadczalnego jest poka-

zany na rys. 5. W wyniku takiej anihilacji może jednak zajść wiele różnych reakcji, a niestety nie potrafimy wpływać na wynik pojedynczego procesu. Dlatego mierzy się wszystkie procesy, w których powstają cząstki takie, jakich oczekujemy w interesującym nas procesie, a dopiero analizując dane zebrane w trakcie pomiarów wybieramy te interesujące zdarzenia. Zdarzeniem nazywamy zarejestrowanie sygnałów przez detektory w krótkim przedziale czasu (około kilkudziesięciu nanosekund). Sygnały te wywoływane są przez cząstki naładowane przelatujące przez detektory. Pomiar tych cząstek pozwala na zidentyfikowanie procesów, które zaszły w wyniku anihilacji.

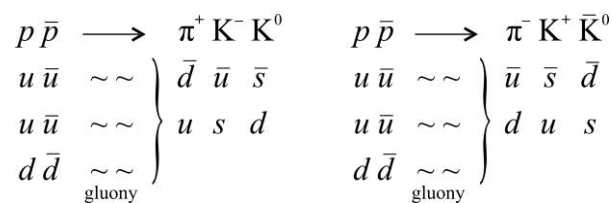


Rys. 5. Uproszczony schemat detektora CP-LEAR wraz z trajektoriami cząstek dla przykładowego ciągu reakcji:  $\bar{p}p \rightarrow K^+\pi^-\bar{K}^0 \rightarrow K^+\pi^-K^0 \rightarrow K^+\pi^-\pi^+e^+\nu$ , w której nastąpiło przejście  $\bar{K}^0 \rightarrow K^0$ . Na rysunku pokazane są trajektorie mezonów  $K^+$  i  $\pi^-$  powstałych w anihilacji protonu z antyprotonem oraz trajektorie mezonów  $\pi^-$  i pozytonu ( $e^+$ ) powstałych z rozpadu mezonu  $K^0$ . Detektor CP-LEAR otaczający miejsce anihilacji pozwalał na pomiar i identyfikację cząstek naładowanych takich np. jak mezony  $K^+$  i  $K^-$ , mezony  $\pi^+$  i  $\pi^-$  oraz elektrony i pozytony. System detekcyjny CP-LEAR składał się między innymi z komór do pomiarów śladów cząstek naładowanych, z detektorów scyntylacyjnych do pomiaru czasu, z kalorymetru pozwalającego na pomiar energii cząstek oraz z solenoidu wytwarzającego pole magnetyczne wewnątrz całego systemu detekcyjnego. Ładunki zarejestrowanych cząstek można określić badając zakrzywienie trajektorii cząstek w polu magnetycznym, natomiast ich masy, które jednoznacznie określają cząstkę można obliczyć z pomiaru energii kalorymetrem oraz mierząc promień zakrzywienia trajektorii w polu magnetycznym, który zależy od pędu. Znając energię i pęd można wyznaczyć masę zarejestrowanej cząstki (patrz *Foton* 124, wiosna 2014)

Załóżmy, że zaobserwowaliśmy  $N_{K^0}$  takich zdarzeń gdzie został wyprodukowany mezon  $K^0$ . Następnie sprawdzamy ile spośród tych mezonów zmieniło się po zadanym czasie  $\tau$  w mezon  $\bar{K}^0$ . Jeśli oznaczymy liczbę przejść  $K^0 \rightarrow \bar{K}^0$  przez  $N_{\text{przejść}}$ , to stosunek liczb ( $N_{\text{przejść}}/N_{K^0}$ ) daje nam prawdopodobieństwo przejścia  $K^0 \rightarrow \bar{K}^0$  po czasie  $\tau$ . Aby sprawdzić symetrię względem odwrócenia czasu porównujemy to prawdopodobieństwo z analogicznie wyznaczonym prawdopodobieństwem przejścia  $\bar{K}^0 \rightarrow K^0$  po czasie  $\tau$ .

### Skąd wiemy, że w wyniku anihilacji protonu z antyprotonem powstał mezon $K^0$ czy $\bar{K}^0$ ?

Przykładowe reakcje protonu z antyprotonem, w których powstają mezony  $K^0$  i  $\bar{K}^0$  pokazane są na rys. 6. Proton składa się z kwarków  $uud$ , a antyproton z antykwarków  $\bar{u}, \bar{u}, \bar{d}$ . W wyniku anihilacji kwarki i antykwarki znikają, zmieniając się na chwilę w gluony, a następnie z gluonów mogą powstać nowe pary kwarków i antykwarków, ale niekoniecznie muszą się one połączyć w proton i antyproton. Może na przykład nastąpić taka reakcja, jak pokazana na rys. 6, gdzie powstało trzy pary kwark-antykwark w postaci trzech mezonów. Z gluonów może powstać para kwark-antykwark innego rodzaju niż te występujące w protonie: na przykład para  $s$  i  $\bar{s}$ , jednak ostatecznie kwarków i antykwarków tego samego rodzaju musi być tyle samo. Może na przykład powstać grupa  $(u s d \bar{u} \bar{s} \bar{d})$  będąca wynikiem krecji par  $u$  i  $\bar{u}$ ,  $s$  i  $\bar{s}$ ,  $d$  i  $\bar{d}$ , ale nie może powstać grupa  $(u u d \bar{u} \bar{s} \bar{d})$ , bo oznaczałoby to, że jedną z par wykreowanych jest  $u$  i  $\bar{s}$ .



Rys. 6. Przykłady procesów anihilacji protonu z antyprotonem, w których powstają mezony  $K^0$  i  $\bar{K}^0$

Zdarzenia, w których wyprodukowany został mezon  $\bar{K}^0$ , można rozpoznać, jeśli ze środka detektora z miejsca reakcji protonu z antyprotonem wychodzą dwie trajektorie, z których jedna odpowiada mezonowi  $\pi^-$ , a druga mezonowi  $K^+$ . Jeśli jedną z powstałych cząstek jest mezon  $K^+$ , a drugą mezon  $\pi^-$  to znając ich skład kwarkowy wiemy, że w anihilacji powstały kwarki  $u$  i  $d$  oraz antykwarki  $\bar{u}$  i  $\bar{s}$  (patrz rys. 6). Musiały zatem powstać także kwarki  $s$  oraz  $\bar{d}$ . Z kwarków  $s$  i  $\bar{d}$  zbudowany jest mezon  $\bar{K}^0$ . Ponadto, żeby mieć pewność, że naprawdę powstał mezon  $\bar{K}^0$  sprawdza się jeszcze, czy masa nieobserwowanej cząstki jest równa masie mezonu  $K$ . Masę cząstki nieobserwowanej można obliczyć korzystając z zasad zachowania pędu i energii (patrz *Foton* 124). Dodatkowo, mierząc czas dotarcia mezonów  $\pi^-$  i  $K^+$  do detektora czasu oraz znając ich pęd i trajektorie można obliczyć czas, w którym powstał mezon  $\bar{K}^0$ . Analogicznie w oparciu o pomiar mezonów  $\pi^+$  i  $K^-$  możemy zidentyfikować zdarzenia, w których został wytworzony mezon  $K^0$  oraz wyznaczyć czas i miejsce jego wytworzenia.

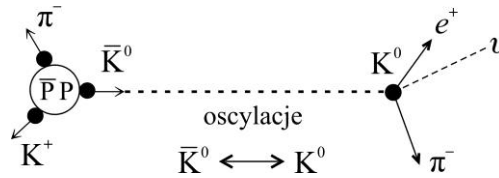


Jeśli wśród produktów rozpadu mezonu K zarejestrujemy elektron to wiemy, że musiał on powstać z rozpadu bozonu  $W^-$ . A to oznacza, że musiał nastąpić proces  $s \rightarrow uW^- \rightarrow ue\bar{\nu}$ . Bozon  $W^-$  posiada ładunek  $-1$ , kwark  $s$  posiada ładunek  $-1/3$ , a ładunek kwarku  $u$  wynosi  $+2/3$ , więc powyższy proces może przebiegać nie łamiąc zasady zachowania ładunku. Natomiast nie ma możliwości, żeby kwark  $\bar{s}$  posiadający ładunek  $+1/3$  rozpadł się z emisją bozonu  $W^-$ , bo wtedy musiałby nastąpić proces  $\bar{s} \rightarrow \text{nowy-antykwar} W^- \rightarrow \text{nowy-antykwar} e^- \bar{\nu}$ , co oznaczałoby, że powstały w wyniku rozpadu nowy-antykwar miałby ładunek  $+4/3$ , a takie kwarki nie istnieją. Dlatego zaobserwowanie elektronu wśród produktów rozpadu mezonu K implikuje, że w chwili rozpadu był on mezonem  $\bar{K}^0$ . Analogiczne rozumowanie prowadzi do wniosku, że zaobserwowanie pozytonu wśród produktów rozpadu mezonu K oznacza, że w chwili rozpadu był on mezonem  $K^0$ .

### Selekcja zdarzeń odpowiadających przejściu mezonu K między stanami $K^0$ i $\bar{K}^0$

Przykładowy łańcuch reakcji, w którym nastąpiła produkcja mezonu neutralnego K w stanie  $\bar{K}^0$  i jego przejście do stanu  $K^0$  pokazane jest na rys. 8. Aby zidentyfikować tę reakcję spośród wszystkich zarejestrowanych zdarzeń wybiera się takie, w których w oparciu o sygnały zarejestrowane w detektorze śladów zostały zrekonstruowane cztery trajektorie odpowiadające dwóm cząstkom naładowanym dodatnio i dwóm naładowanym ujemnie. Dwie spośród tych trajektorii odpowiadających parze przeciwnie naładowanych cząstek musi przecinać się (tworzyć wierzchołek) w obszarze anihilacji protonów z antyprotonami. Pozostałe dwie także muszą przecinać się w obrębie detektora – zdarzenie takie jak przedstawiono na rys. 5. Z pomiaru pędu i energii zarejestrowanych cząstek oblicza się ich masy. Pęd wyznacza się w oparciu o zakrzywienie trajektorii lotu cząstki w polu magnetycznym, a energię w oparciu o amplitudę sygnałów wygenerowanych przez cząstki w kalorymetrze. Po zidentyfikowaniu cząstek naładowanych, w kolejnym etapie selekcji wybiera się tylko takie zdarzenia, w których zidentyfikowano pary mezonów  $\pi^-$  i  $K^+$  oraz  $e^+$  i  $\pi^-$ . Dodatkowo, opierając się na zasadzie zachowania energii i pędu sprawdza się, czy masa nierejestrowanej cząstki wytworzonej w anihilacji protonu z antyprotonem jest równa masie mezonu K oraz czy masa cząstki nierejestrowanej z rozpadu jest równa zero (masa neutrina). Ostatecznie po zidentyfikowaniu zdarzeń odpowiadających procesowi pokazanemu na rys. 8 dzieli się je na podgrupy w zależności od interwału  $\tau$ , czyli czasu pomiędzy wytworzeniem mezonu  $\bar{K}^0$  a rozpadem mezonu  $K^0$ . Czasy wytworzenia i rozpadu wyznacza się znając czas przejścia cząstki przez detektor mierzący czas oraz znając długość trajektorii cząstek pomiędzy tym detektorem a miejscem anihilacji (przecięciem trajektorii mezonów  $\pi^-$  i  $K^+$ ), czy odpo-

wiednio miejscem rozpadu (przecięciem trajektorii mezonu  $\pi^-$  i pozytonu) oraz w oparciu o wyznaczone prędkości zarejestrowanych cząstek.



Rys. 8. Ciąg reakcji, w której nastąpiło przejście  $\bar{K}^0 \rightarrow K^0$

### Interpretacja wyniku eksperymentu CP-LEAR

Opisany powyżej eksperyment wykonany był w ośrodku CERN w roku 1998 przez grupę doświadczalną CP-LEAR. Wynikiem przeprowadzonych pomiarów było wykazanie, że prawdopodobieństwa przejścia po zadanym czasie  $\tau$  mezonu  $K^0$  w mezon  $\bar{K}^0$  różni się o około 1/100 od prawdopodobieństwa przejścia po takim samym czasie  $\tau$  mezonu  $\bar{K}^0$  w mezon  $K^0$ . Pomiary wykonano dla interwałów  $\tau$  z przedziału od około 0,1 ns do około 2 ns. Grupa CP-LEAR zinterpretowała ten wynik jako empiryczny dowód na łamanie symetrii względem odwrócenia czasu.

Jednak już rok później interpretację tę skrytykowano zauważając, że od procesu  $K^0 \rightarrow \bar{K}^0$  do procesu  $\bar{K}^0 \rightarrow K^0$  można dojść nie tylko poprzez zastosowanie operacji odwrócenia czasu (T), ale także poprzez zastosowanie symetrii parzystości C i P:

$$T(K^0 \rightarrow \bar{K}^0) = \bar{K}^0 \rightarrow K^0$$

$$CP(K^0 \rightarrow \bar{K}^0) = \bar{K}^0 \rightarrow K^0$$

Symetria C odpowiada zamianie cząstki na antycząstkę (czyli np. zmianie mezonu  $K^0$  w mezon  $\bar{K}^0$ ), a symetria parzystości P oznacza odbicie lustrzane w przestrzeni, czyli powoduje zmianę zwrotu wektora pędu.

Nie można zatem jednoznacznie stwierdzić czy zaobserwowana przez zespół CP-LEAR różnica prawdopodobieństw jest wynikiem łamania symetrii odwrócenia w czasie czy łamaniem symetrii CP<sup>4</sup>.

Przez wiele następných lat sądzono, że nie da się wykonać doświadczenia, w którym można by jednoznacznie wnioskować o bezpośrednim łamaniu symetrii względem odwrócenia w czasie. Przełom przyniosła idea wykorzystania w badaniach par mezonów kwantowo splątanych. Eksperyment, w którym jednoznacznie wykazano, że symetria względem odwrócenia w czasie jest łamana, wykonano w 2012 roku na Uniwersytecie Stanforda w USA. Polegał on na ba-

<sup>4</sup> Powyższe rozumowanie jest sformalizowane w artykule Wolfensteina [2].



daniu rozkładu różnicy czasów pomiędzy rozpadami dwóch kwantowo splątanych mezonów. Idea doświadczenia będzie omówiona w kolejnym artykule.

Następny zeszyt *Fotonu* – **Rozpady mezonów kwantowo splątanych:**

- Na czym polega kwantowe splątanie mezonów?
- Jak wyprodukować kwantowo splątane mezony?
- Eksperyment wykonany na Uniwersytecie Stanforda w USA.
- Jak w oparciu o pomiary rozpadów kwantowo splątanych mezonów jednoznacznie wykazano, że symetria względem odwrócenia czasu jest łamana?

### Literatura

- [1] CPLEAR: A. Angelopoulos *et al.*, Phys. Lett. B 444 (1998) 43
- [2] L. Wolfenstein, Phys. Rev. Lett. 83 (1999) 911
- [3] J. Barnabeu *et al.*, JHEP08 (2012) 064
- [4] BABAR: J.P. Lees *et al.*, Phys. Rev. Lett. 109 (2012) 211801

Redakcja poleca wykład prof. K. Fiałkowskiego i prof. L. Görlich:

[http://www2.if.uj.edu.pl/pl/edukacja/Podstawy\\_FCE/Podstawy\\_fizyki\\_czastek\\_2011.pdf](http://www2.if.uj.edu.pl/pl/edukacja/Podstawy_FCE/Podstawy_fizyki_czastek_2011.pdf)



Hala eksperymentu CP-LEAR