

Cząstki elementarne

Metoda badania cząstek elementarnych

- Cząstek elementarnych nie da się wziąć w rękę czy położyć na wadze, dlatego stosuje się metody pośrednie, pozwalające na identyfikację takich cząstek.
- Cząstek posiadające ładunek elektryczny oddziałują z materią, powodując jej jonizację. Pozwala to rejestrować ślady pozostawiane przez nie na całej długości ich toru.
- Rozpatrzmy cząstkę o ładunku q i masie m poruszającą się w jednorodnym polu magnetycznym o indukcji $\mathbf{B}$. Składowa wektora prędkości takiej cząstki równoległa do wektora indukcji $\mathbf{B}$ jest stała:

$$v_{\parallel} = \text{const.}$$

Na cząstkę tą działa siła Lorentza prostopadła do jej wektora prędkości i równa:

$$F = qv_{\perp} B$$

W związku z tym, ruch tej cząstki w płaszczyźnie prostopadłej do wektora indukcji jest ruchem po okręgu o promieniu r , takim, że

$$m \frac{v_{\perp}^2}{r} = F$$

nasza cząstka porusza się po krzywej w kształcie sprężyny. Ponadto obu powyższych równań możemy wyznaczyć składową pędu cząstki w płaszczyźnie prostopadłej do wektora indukcji $\mathbf{B}$:

$$p_{\perp} = qrB$$

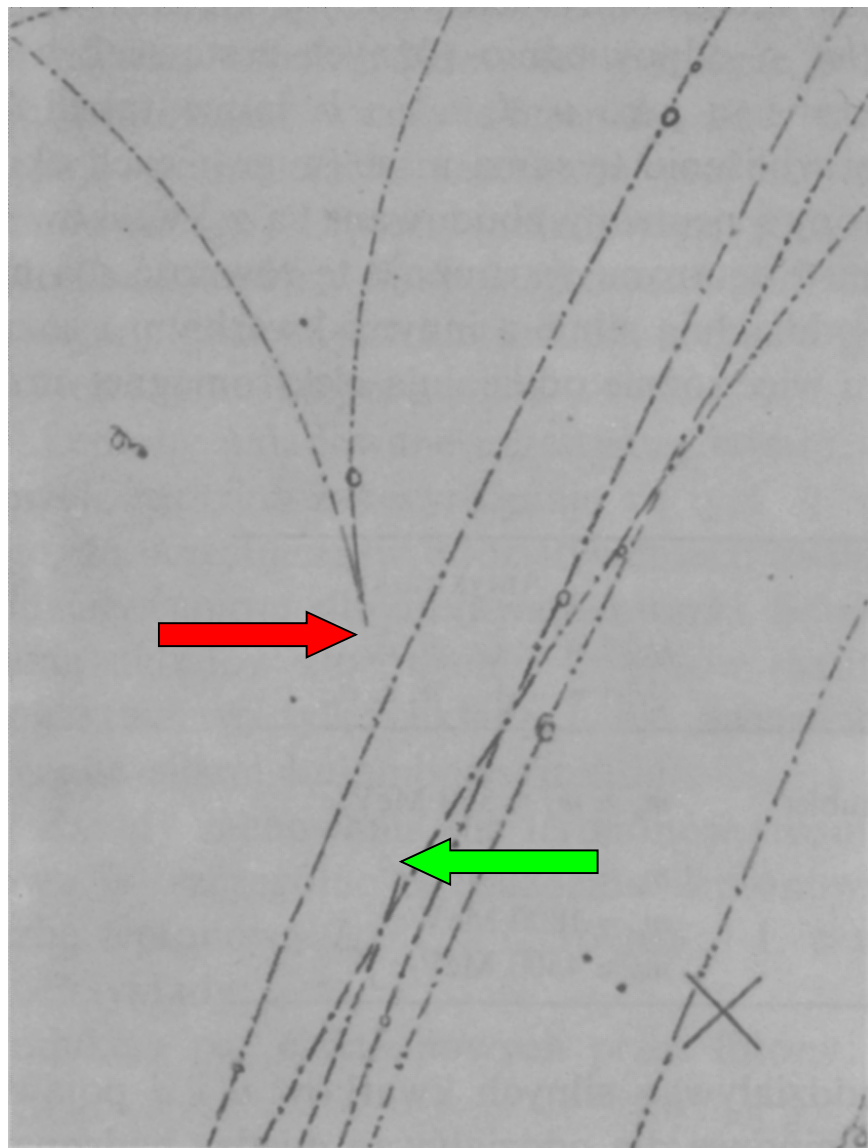
O ile posiadamy taki detektor, który umożliwi rejestrację toru naładowanej cząstki w przestrzeni, potrafimy zmierzyć składową jej pędu w płaszczyźnie prostopadłej do wektora indukcji magnetycznej $\mathbf{B}$.

Korzystając z informacji nt. kształtu toru cząstki, możemy wyznaczyć składowe wektora $\mathbf{t}$ stycznego do jej toru w danym punkcie. Ponieważ pęd cząstki jest styczny do jej toru, możemy wyliczyć składową wektora pędu skierowaną wzdłuż kierunku wektora indukcji:

$$p_{\perp} = p_{\parallel} \frac{t_{\perp}}{t_{\parallel}}$$

Potrafimy więc wyznaczyć pęd cząstki w dowolnym punkcie jej toru. Wydawać się może, że to niewiele, zwłaszcza, że nie potrafimy rejestrować torów cząstek o zerowym ładunku. Ale mamy do pomocy jeszcze prawa fizyki, pozwalające nam przeanalizować zachodzące zjawiska.

Przykład: identyfikacji nietrwalej nienaładowanej cząstki



Obok widoczne jest zdjęcie z detektora (komory pęcherzykowej).

Pytanie: jaka nienaładowana cząstka rozpadła się w punkcie wskazanym strzałką?

- Możemy pomierzyć pędy produktów rozpadu nieznanej cząstki w chwili rozpadu p_1 , p_2 . Możemy więc wyznaczyć pęd nieznanej cząstki p_0 :

$$\vec{p}_0 = \vec{p}_1 + \vec{p}_2$$

- Zasada zachowania energii podpowiada natomiast, że:

$$E_0 = E_1 + E_2$$

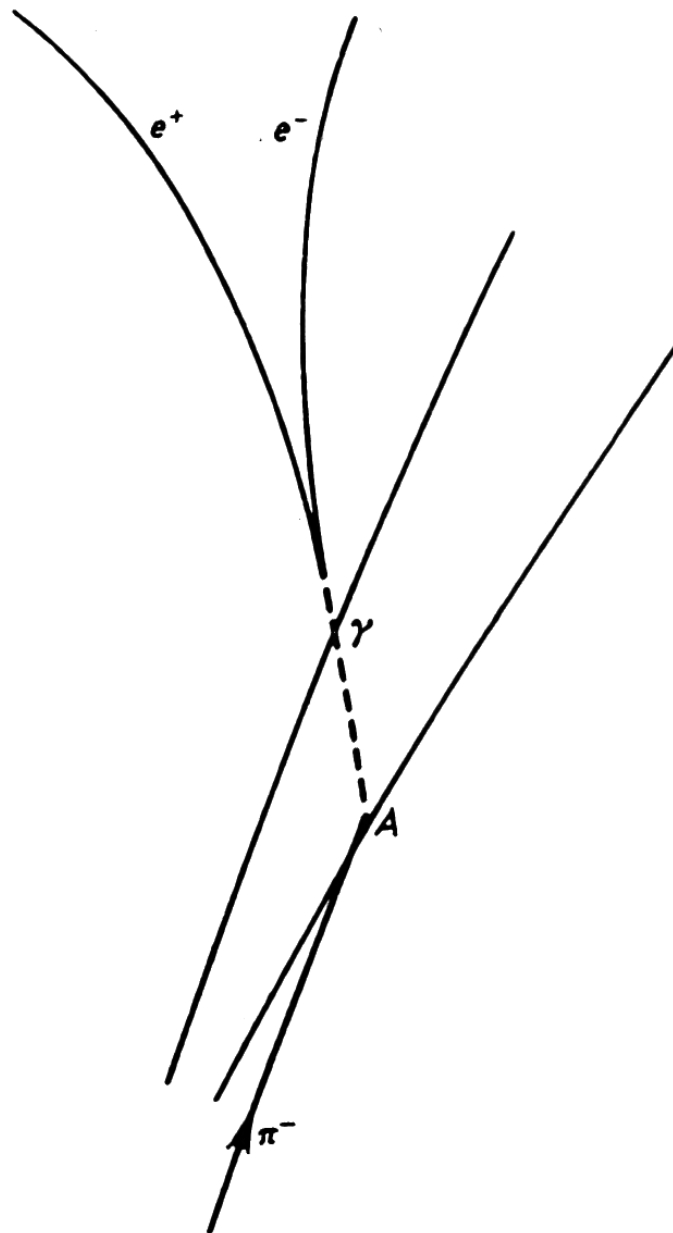
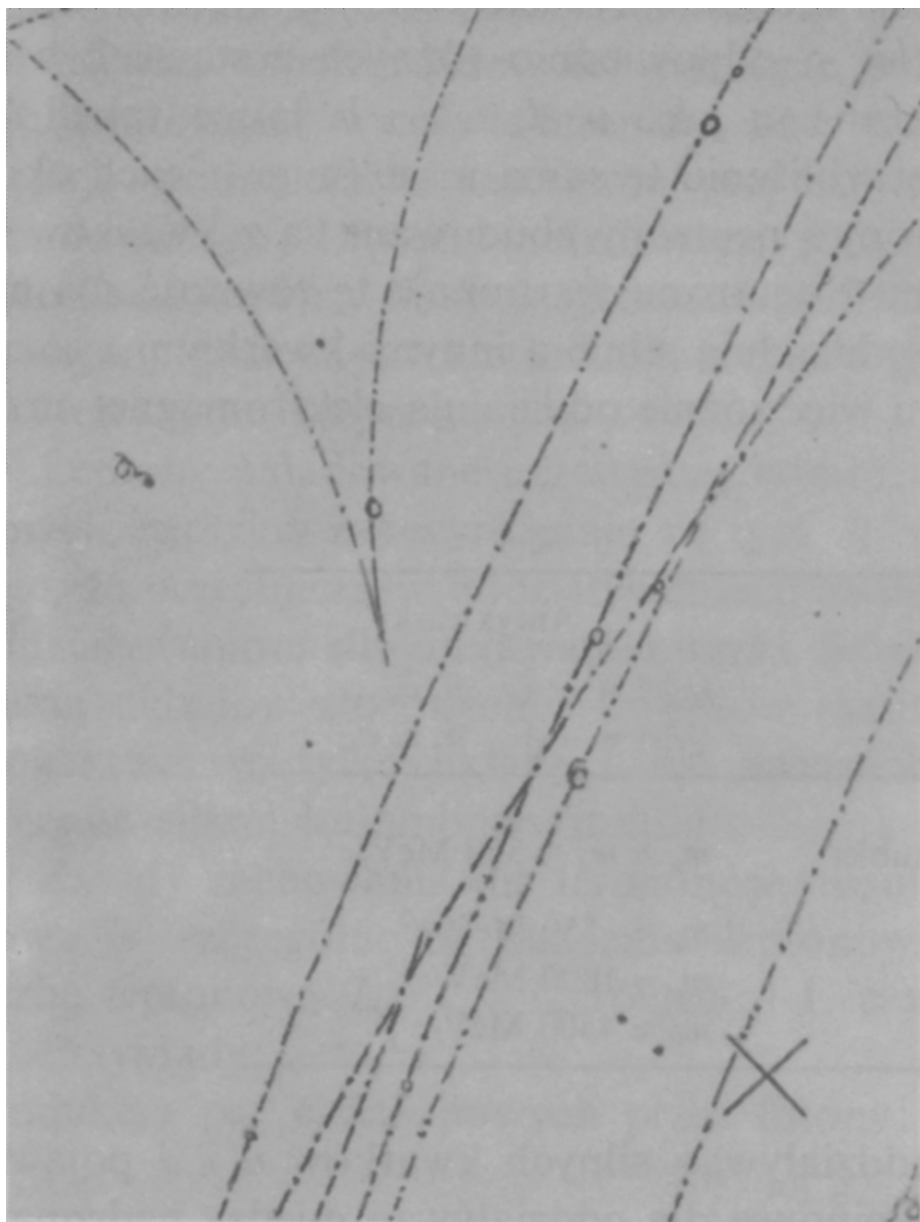
Ponieważ

$$\frac{E^2}{c^2} - p^2 = m_s^2 c^2$$

gdzie m_s oznacza masę spoczynkową cząstki, mamy

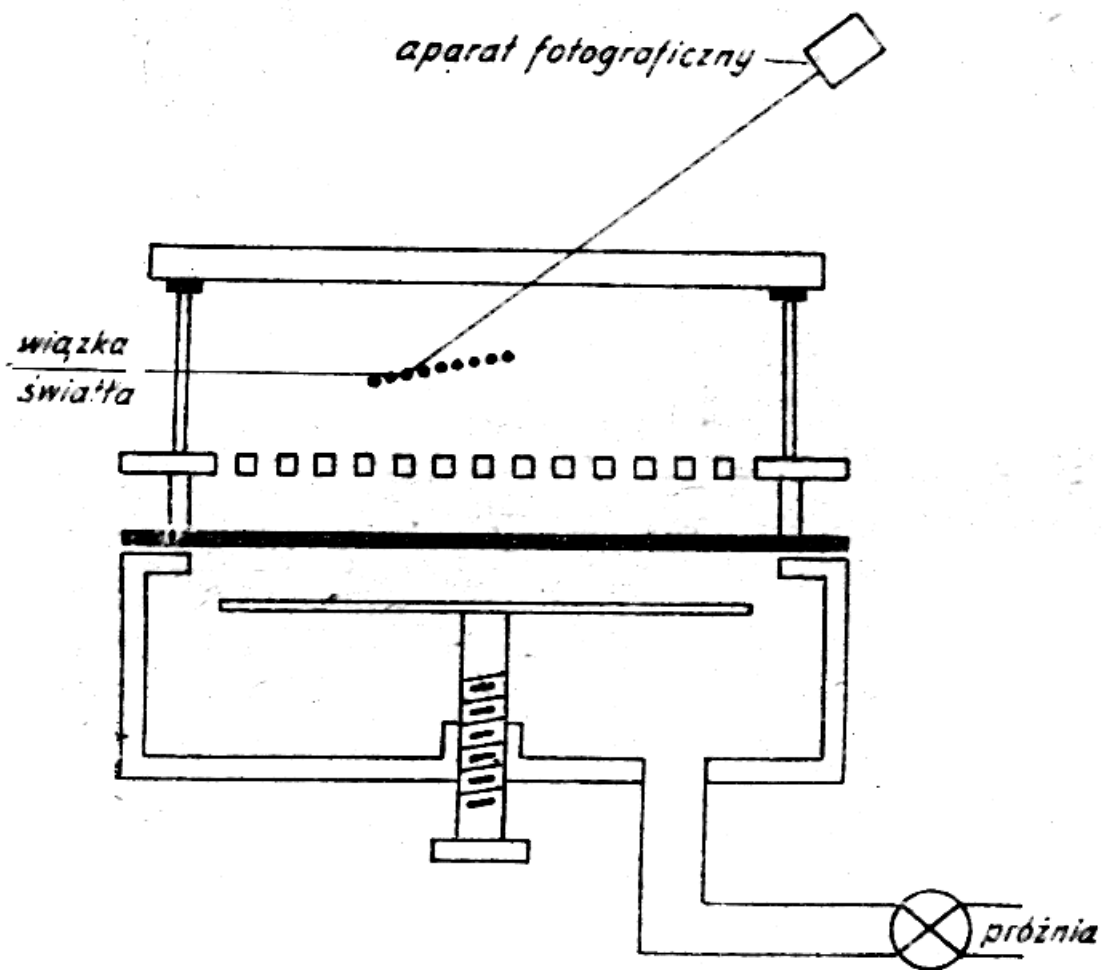
$$p_0^2 + m_0^2 c^2 = p_1^2 + m_1^2 c^2 + p_2^2 + m_2^2 c^2$$

- Ostatnie równanie nie daje się rozwiązać jednoznacznie, ale w związku z tym, że istnieje skończony zbiór dostępnych wartości mas spoczynkowych (bo istnieje skończona liczba różnych cząstek) można „dobrać” najbardziej pasujące wartości mas produktów rozpadu i rozpadającej się cząstki. Analiza wszystkich zdarzeń zarejestrowanych w detektorze zwykle pozwala jednoznacznie zidentyfikować wszystkie cząstki zarejestrowane w zdarzeniu (choć jest to zajęcie podobne do układania puzzli).



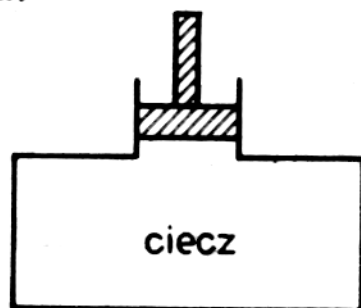
Detektory cząstek elementarnych

1. Detektory nieśladowe (np. liczniki Geigera, liczniki scyntylacyjne liczniki Czerenkowa)
2. Detektory śladowe
 - Emulsja fotograficzna (chyba najstarszy)
 - Komora Wilsona. Wykorzystuje zjawisko kondensacji pary przegrzanej na zarodkach kondensacji (jonach wytworzonych przez naładowaną cząstkę). W wyniku rozprężenia gazu tuż po przejściu cząstki jonizującej, a następnie sfotografowaniu komory uzyskuje się obraz „ścieżki jonowej” w postaci kropelek skondensowanej pary. Wykonując zdjęcia dwoma aparatami (przy naniesionych markerach na fotografowaną powierzchnię szkła) można dokonać rekonstrukcji przestrzennej toru cząstki



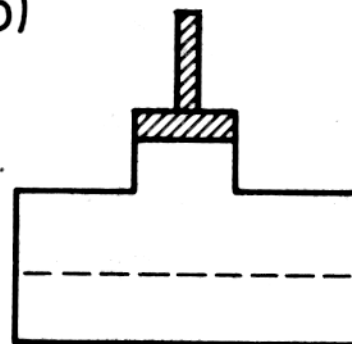
- Komora pęcherzykowa – działa w oparciu o zjawisko lokalnego parowania (tworzenia się pęcherzyków pary) w cieczy przegrzanej, w której wskutek przejścia cząstki naładowanej zostały wytworzone pary jonów. Nagłe powiększenie objętości komory w odpowiednim momencie po przejściu cząstki pozwala na otrzymanie ścieżki pęcherzyków pary wzdłuż toru cząstki

a)



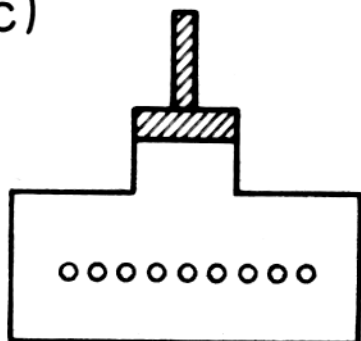
tłok zostaje
uniesiony.
Ciśnienie spada

b)



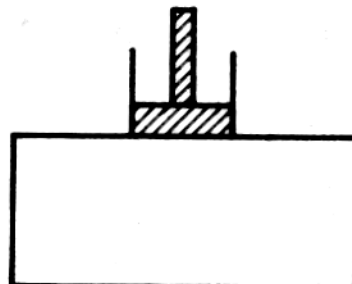
cząstka wchodząca
z akceleratora
tworzy jony

c)

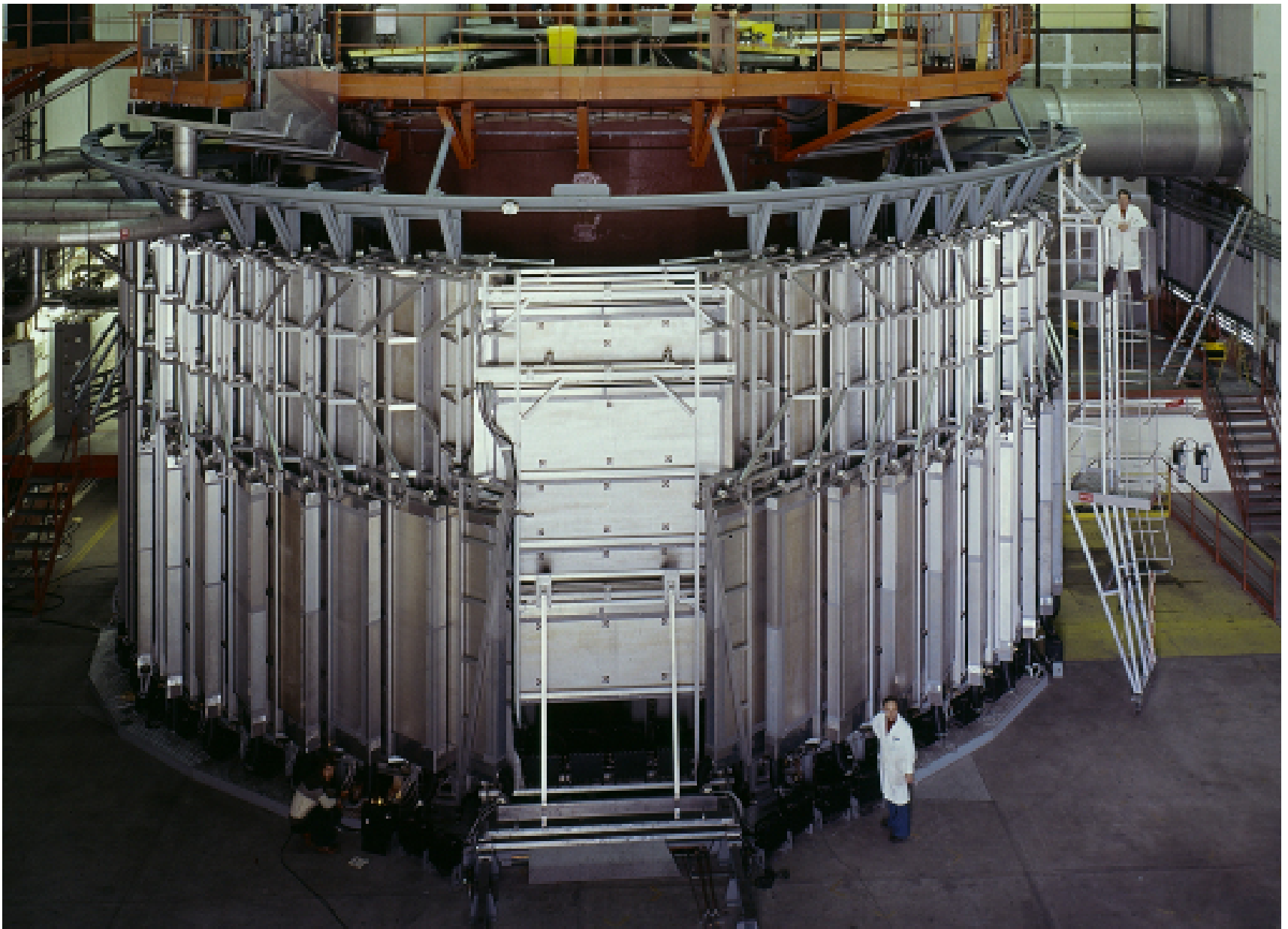


pęcherzyki rosną do
zauważalnych rozmia-
rów w czasie kilku
tysięcznych
części sekundy

d)

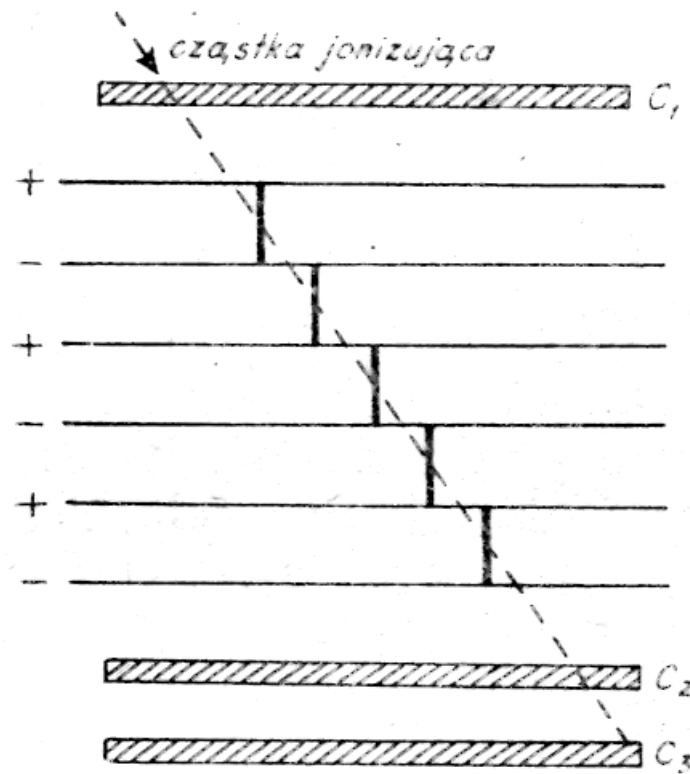


tłok zostaje opuszczony,
ciśnienie wraca do
pierwotnej wartości,
rozpoczęcie
nowego cyklu



Big European Bubble Chamber (CERN)

- Komora iskrowa stanowi układ równoległych elektrod rozdzielonych warstwami gazu. Między elektrodami przyłożone jest napięcie elektryczne. Jonizacja wywołana w gazie przejściem cząstki zapoczątkowuje wyładowanie iskrowe



- Komory strimerowe – podobne do komory iskrowej, ale nie mają jej wad (lokalizacja i kierunek iskry zgodny z torem cząstki). Możliwa jest automatyzacja pomiarów i ich analiza komputerowa.

Źródła badanych cząstek

- Promieniowanie kosmiczne
- Zderzenia cząstek z materiałem „tarczy” (np. jądrami atomowymi w jakiejś substancji chemicznej). Przy zderzeniu cząstki o energii E z nukleonem o masie M kwadrat energii w układzie środka masy wynosi

$$W^2 = 2ME + M^2 \quad (c = 1)$$

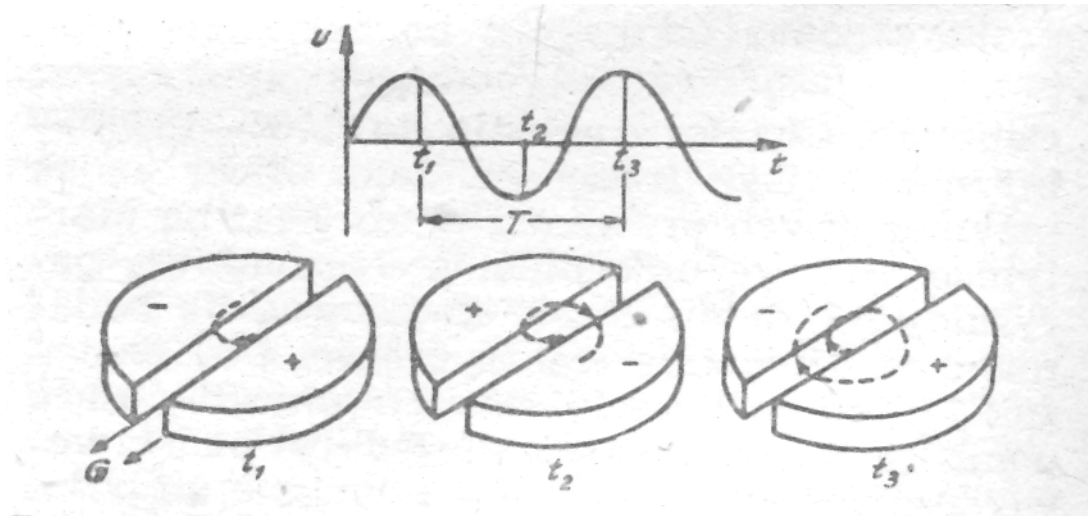
- Zderzenia między wysokoenergetycznymi cząstkami. Najczęściej zderza się ze sobą wiązki poruszające się w przeciwnych kierunkach wiązki cząstek i ich antycząstek (np. elektronów i pozytonów), co pozwala na przyspieszanie ich w tym samym akceleratorze i jednocześnie uzyskanie bardzo wysokiej energii wyzwolanej w czasie zderzenia. Dla cząstek o energiach

E_1 i E_2 :

$$W^2 = E_1 E_2 \quad (c = 1)$$

Akceleratorzy

- Cyklotron. Cząstka porusza się w jednorodnym, stałym polu magnetycznym, a jest przyspieszana polem elektryczne



Ze względu na to, że okres obiegu cząstki

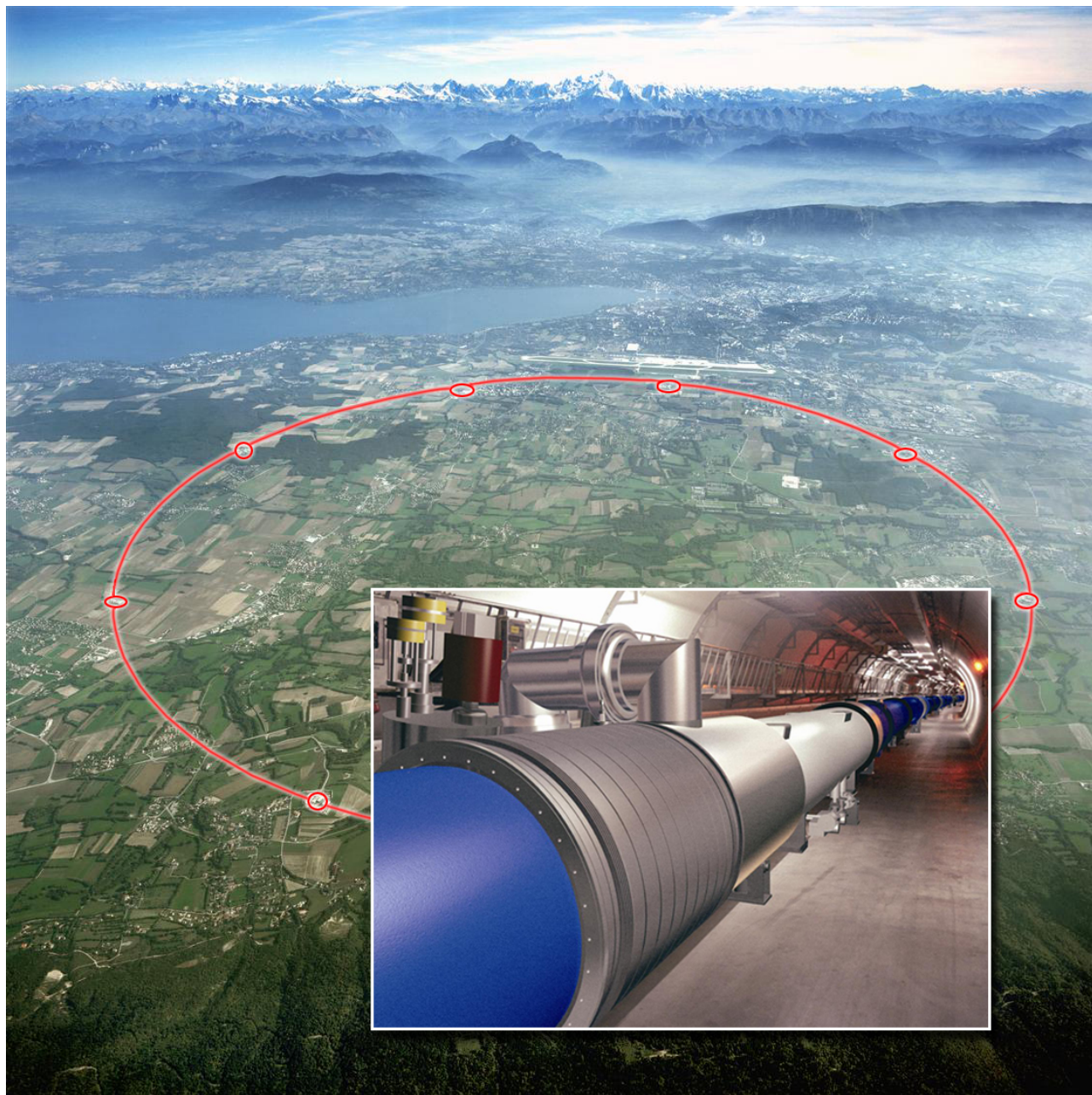
$$T = \frac{2\pi r}{v} = \frac{2m\pi}{eB}$$

częstotliwość zmian napięcia przyspieszającego jest stała

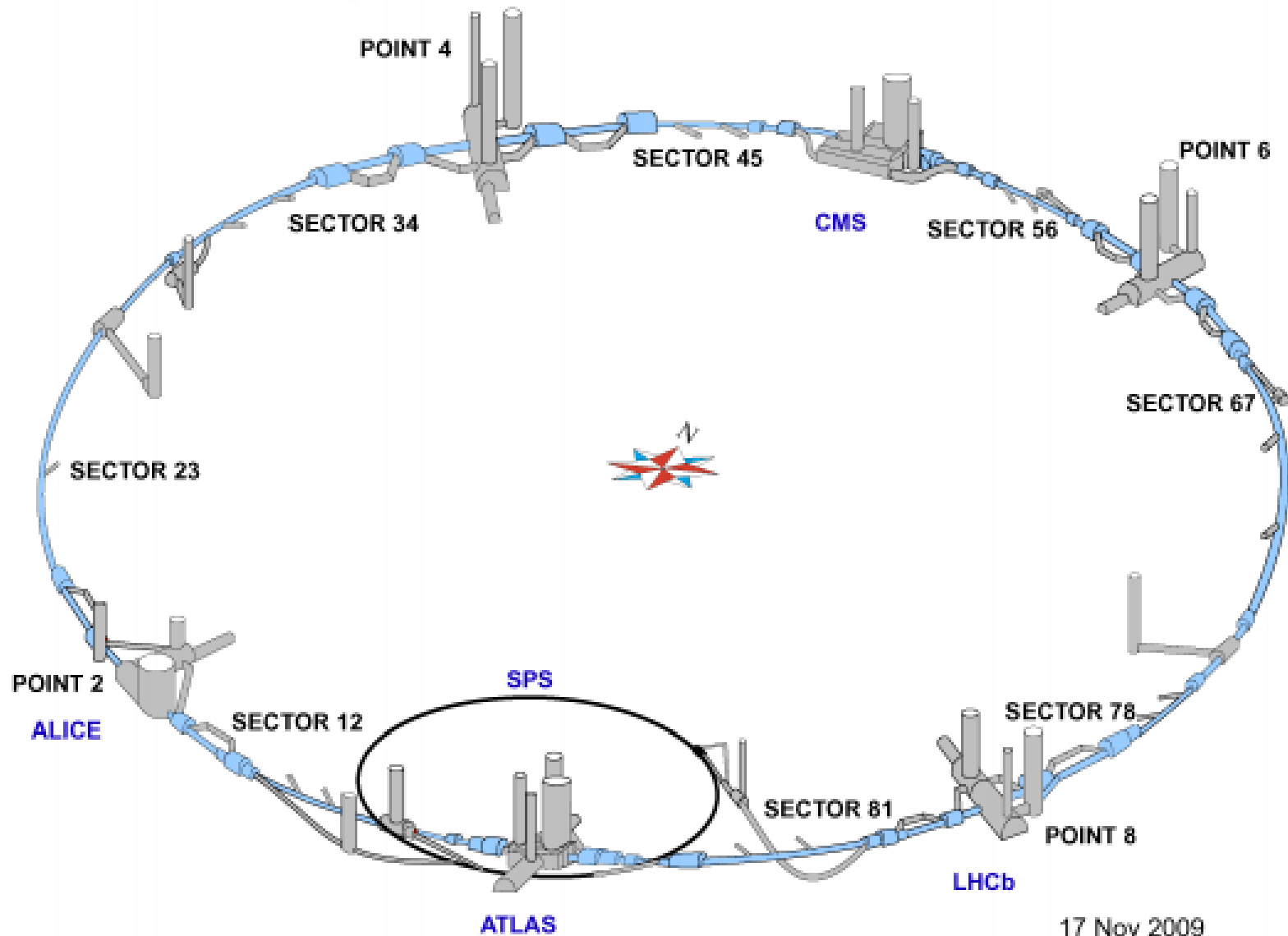
- Synchrociklotron – jak w ciklotronie, ale uwzględnione zostały efekty relatywistyczne - zmienna częstotliwości zmian pola elektrycznego
- Akcelerator liniowy – cząstki podróżują wewnątrz rury próżniowej z szeregi wnęk, w których wytwarzane jest pole elektromagnetyczne o częstotliwości radiowej. Cząstka przyspieszana jest w polu elektrycznym podróżując jakby na grzbiecie fali.
- Synchrotron – cząstka utrzymywana jest na orbicie kołowej o stałym promieniu za pomocą pierścieni elektromagnesów, a przyspieszanie odbywa się w czasie jej wielokrotnego przejścia przez wnękę z polem elektromagnetycznym o częstotliwości radiowej. Ze względu na duże straty energii związane z zakrzywieniem toru cząstek (promieniowanie elektromagnetyczne), w synchrotronie nie da się uzyskać bardzo wysokich energii dla lekkich cząstek (elektronów).



Large Hadron Collider (CERN)



LHC (CERN). Zderzane są wiązki protonów i antyprotonów



LHC (CERN). Energia pojedynczego protonu wynosi 7 TeV

Wyniki poszukiwań cząstek elementarnych

- 1936 – odkrycie w promieniowaniu kosmicznym mionów (μ^+ i μ^-). Pierwotnie uważano, że to piony, ale były dwa problemy: były za lekkie, a co gorsze nie chciały oddziaływać z nukleonami (a piony, jako nośniki silnych sił jądrowych powinny)
- 1947 – odkrycie pionów (π^+ i π^-) w promieniowaniu kosmicznym
- 1950 – odkrycie π^0 .
- 1947 - cząstki dziwne $\left(K^0, \overline{K^0}, K^+, K^-, \Lambda, \Sigma, \Xi\right)$
Obserwowano je jako wynik oddziaływań pionów z protonami. Pojawiały się nie wiadomo czemu, zawsze parami (stąd nazwa).
- W miarę odkrywania coraz to nowych cząstek, próbowano je usystematyzować i zrozumieć prawa rządzące przemianami

Próby usystematyzowania

- Stwierdzono, że istnieją cząstki, które oddziałują poprzez oddziaływania silne (nazwano je *hadronami*) oraz takie, które takich oddziaływań nie odczuwają (nazwano je *leptonami*). Hadrony o spinie połówkowym nazwano *barionami*, zaś hadrony o spinie całkowitym – *mezonami*. Wszystkie leptony mają spin połówkowy.
- Leptony – np. elektron, mion
- Bariony – np. proton, neutron
- Mezony – np. piony

Nowe liczby kwantowa

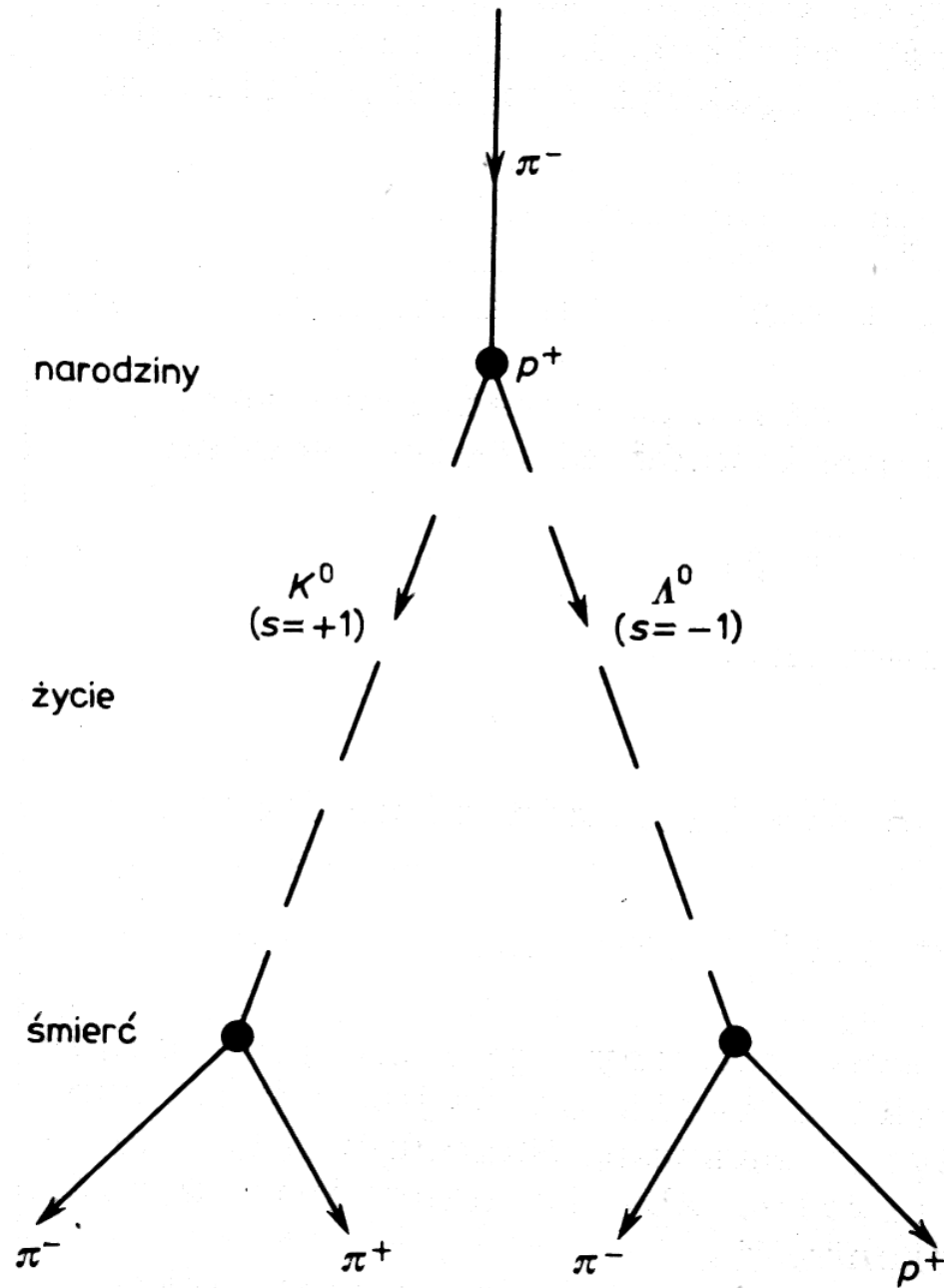
- Znana już wcześniej zasada zachowania ładunku nie zabrania, by zachodził proces:

$$p^+ \rightarrow e^+ + \pi^0$$

Takiego procesu jednak nie obserwowano. Uznano więc, że istnieje wielkość zwana liczbą barionową B , która musi być zachowywana. Przyjęto, że liczba barionowa baronu wynosi $B=1$, a leptonów i mezonów $B=0$.

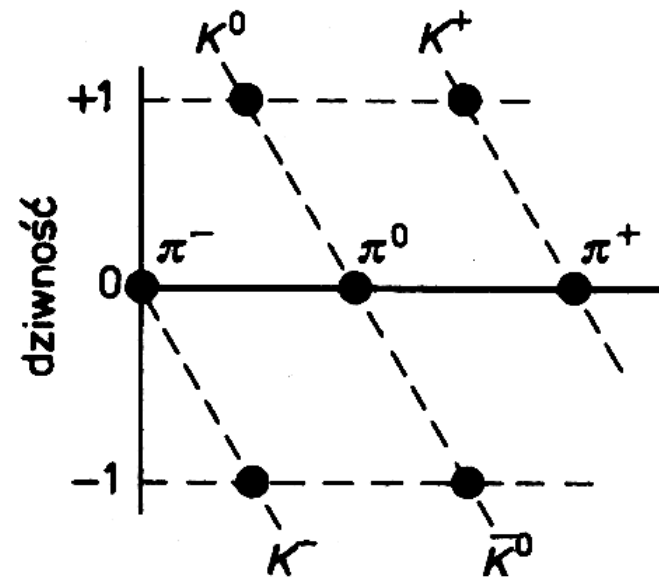
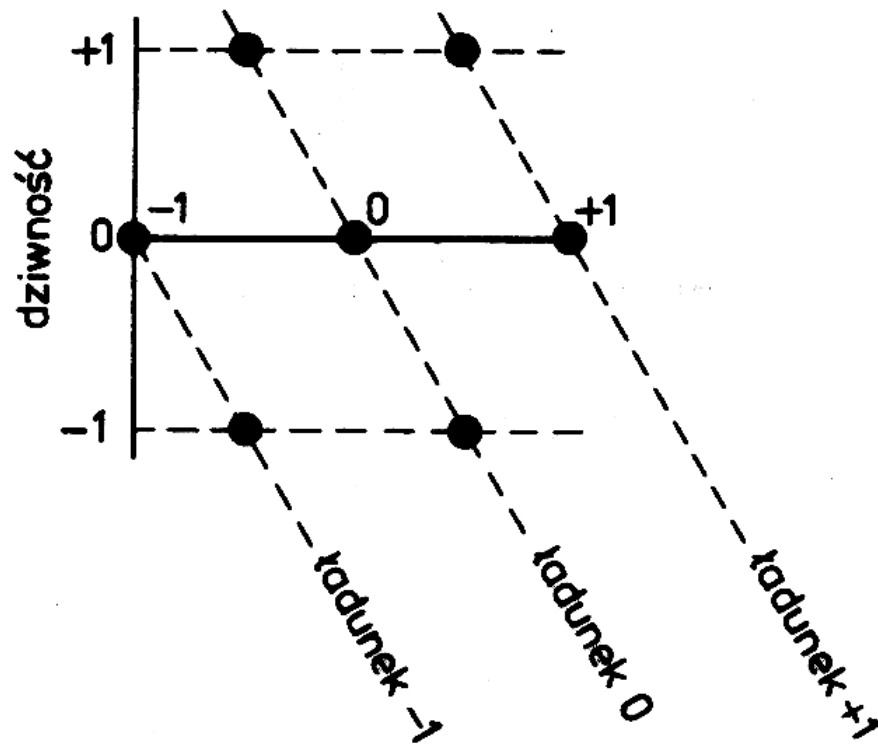
- Podobnie wprowadzono pojęcie dziwności, jako liczby kwantowej analogicznej do ładunku, którą pewne cząstki mają, a inne – nie. Dziwność miała być zachowywana w oddziaływaniach silnych, co tłumaczyło pojawianie się cząstek parami. Później pojawiły się kolejne liczby, np. powab.

Cząstki K^0 i Λ^0 żyją stosunkowo długo, bo dziwność (s) w oddziaływaniach silnych jest zachowywana (rozpadają się one w oddziaływaniach słabych)

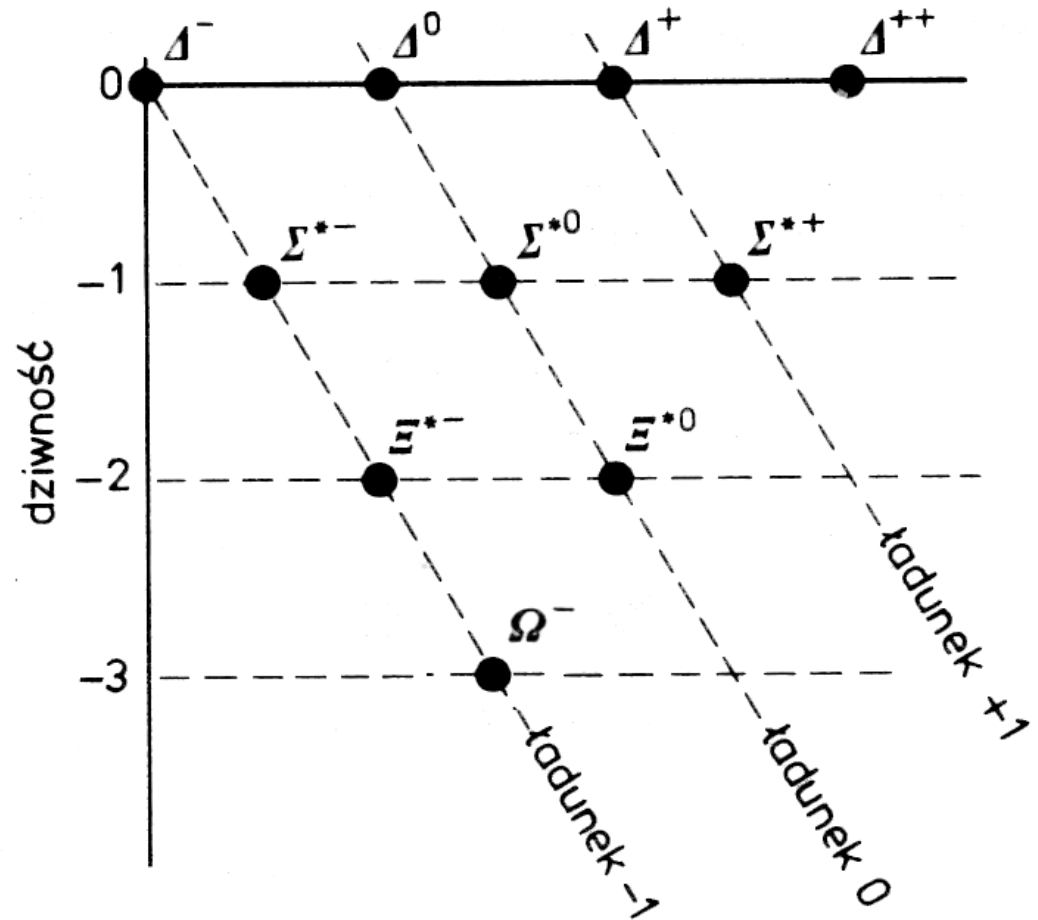
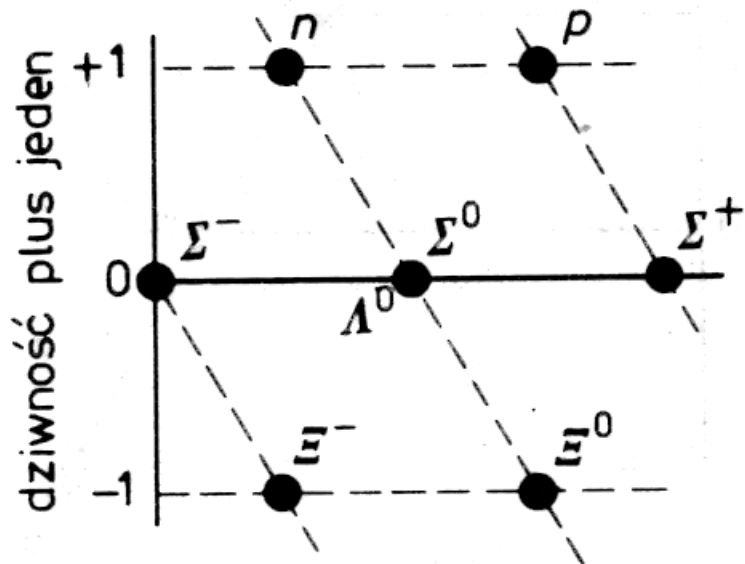


„Ścieżka ośmiokrotna”

- Zaobserwowano, że hadrony układają się w rodziny wyznaczone przez takie wielkości jak ładunek i dziwność. Prawidłowości dla mezonów:



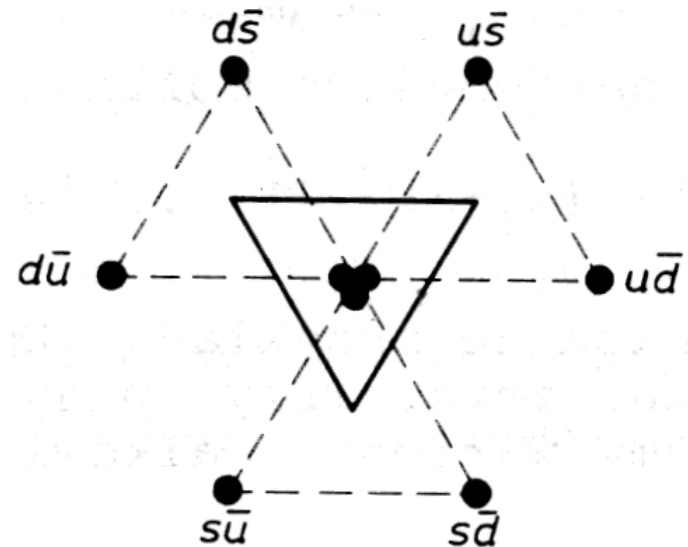
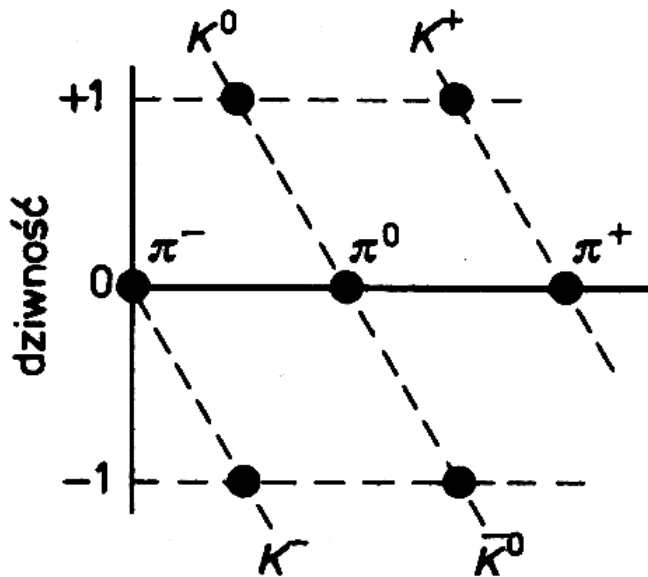
- Prawidłowości dla barionów:



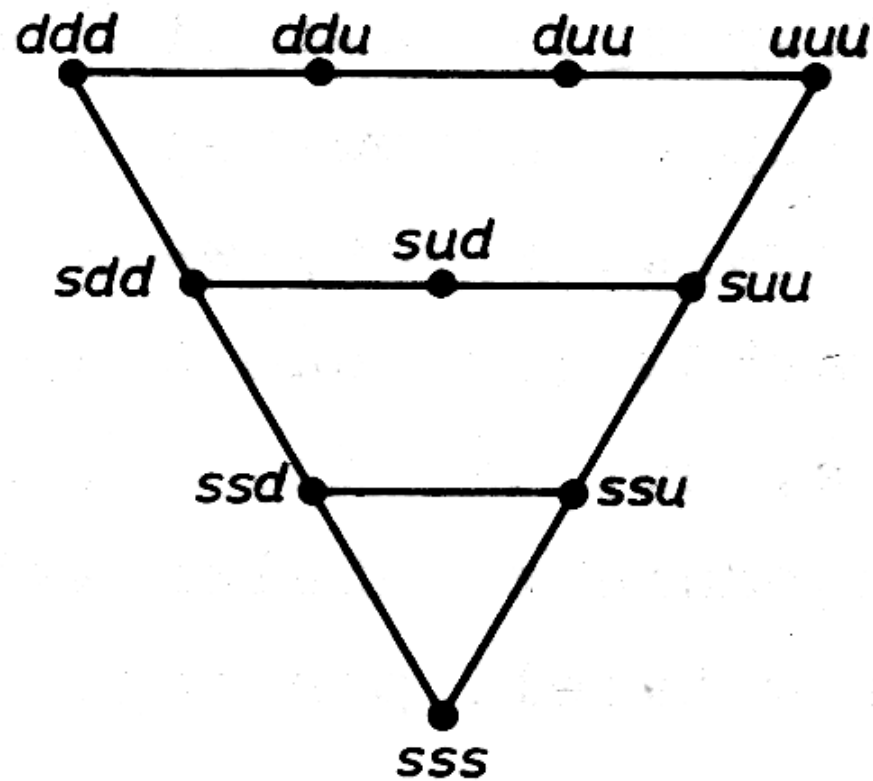
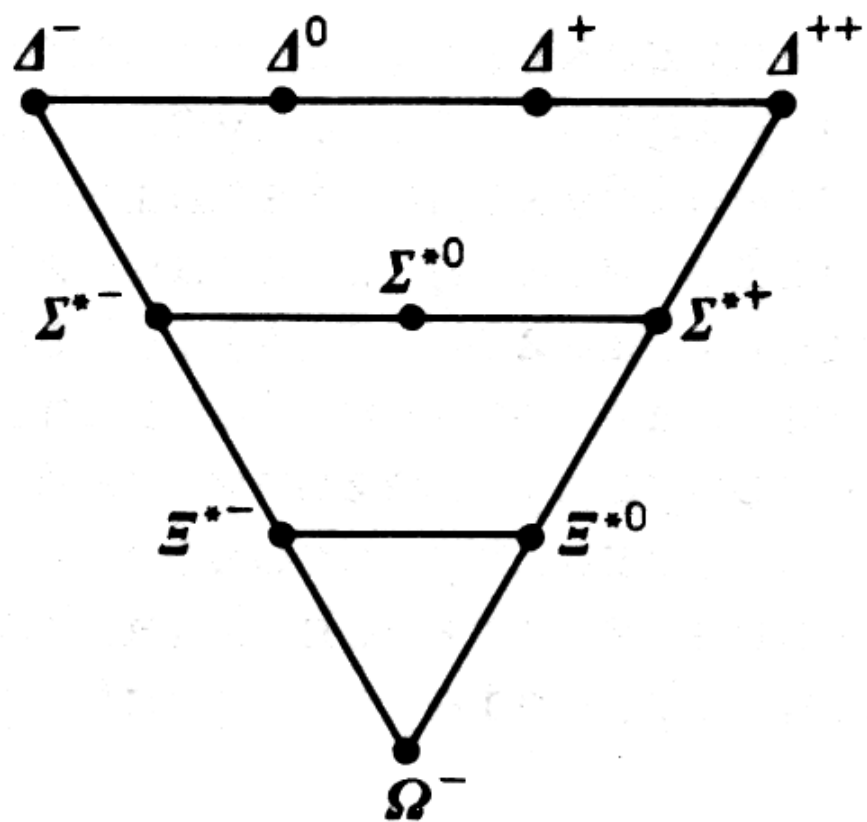
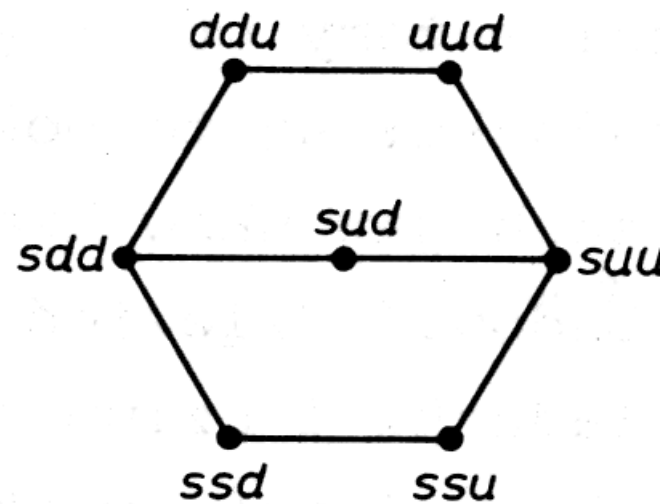
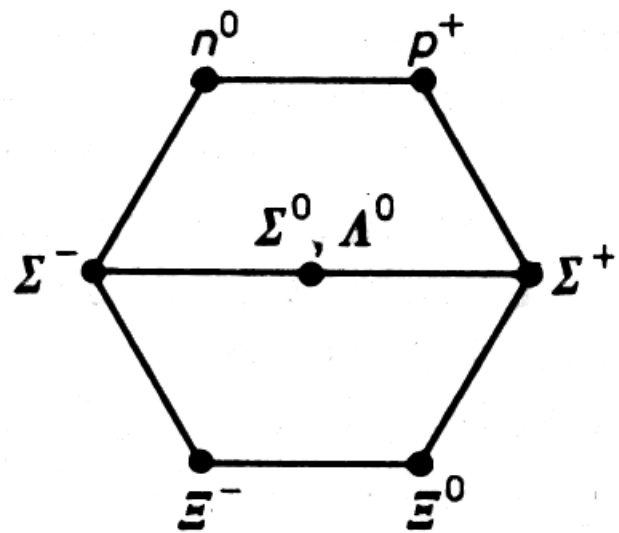
- Prawidłowości we właściwościach chemicznych pierwiastków są skutkiem budowy ich atomów. Czyżby prawidłowości były przypadkowe?

Kwarki

- Prawidłowości we właściwościach hadronów dawały się łatwo wyjaśnić, jeżeli przyjęło się, że są one zbudowane z mniejszych cząstek – kwarków



Trzy stany, które znajdują się w środku, to $d\bar{d}$, $u\bar{u}$, $s\bar{s}$



Ile jest zapachów kwarków?

- Dotychczas odkryto 6 zapachów kwarków i wydaje się, że więcej ich nie ma

Nazwa	Symbol	Ładunek elektryczny	Masa GeV/c ²
Górny	u	$+\frac{2}{3}$	0.31
Dolny	d	$-\frac{1}{3}$	0.31
Dziwny	s	$-\frac{1}{3}$	0.50
Powabny	c	$+\frac{2}{3}$	1.60
Szczytowy	t	$-\frac{1}{3}$	4.60
Denny	b	$+\frac{2}{3}$	180

- Kwarki mają spin połówkowy

Budowa Hadronów

- Mezony są zbudowane z par kwark-antykwar
- Bariony zbudowane są z trzech kwarków
- Bariony antymaterii (takie jak antyproton) zbudowane są z trzech antykwarków
- Pewne doświadczenia sugerują, że możliwe jest istnienie cząsteczek złożonych z pięciu kwarków (ściślej: trzech karków i pary kwark-antykwar)

Leptony, czyli „cząstki lekkie”

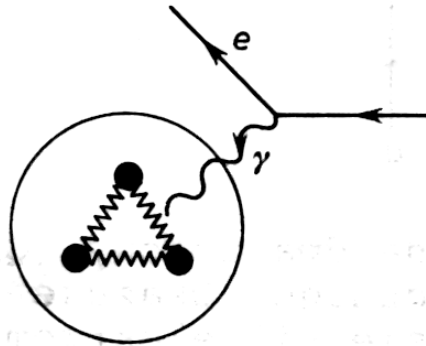
- Dotychczas zostało odkryte 6 leptonów:

Nazwa	Symbol	Ładunek elektryczny	Masa
elektron	e^-	-1	$0,511\text{MeV}/c^2$
neutrino elektronowe	ν_e	0	$<50\text{eV}/c^2$
Mion	μ^-	-1	$105,6\text{Mev}/c^2$
neutrino mionowe	ν_μ	0	$<0,5\text{Mev}/c^2$
taon	τ^-	-1	$1,784\text{GeV}/c^2$
neutrino taonowe	ν_τ	0	$<70\text{MeV}/c^2$

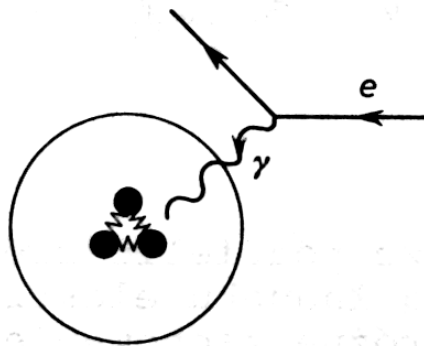
- Każdy z leptonów ma swoją antycząstkę.
- Leptony mają spin połówkowy
- Leptony mają liczbę leptonową: dodatnią dla cząstek i ujemną dla antycząstek. Liczba ta jest zawsze zachowana
- Każdy z leptonów ma liczbę zapachową: elektron i neutrino elektronowe mają liczbę zapachową elektronową równą 1, itd.
- Nie wiadomo, czy zawsze jest ona zachowana – teoretycznie powinno istnieć tzw. zjawisko **oscylacji neutrin** (przechodzenia jednego zapachu neutrina w inny), które tłumaczyłoby, dlaczego na Ziemi obserwujemy tylko 1/3 neutrin, które powinny być produkowane na Słońcu.
- Wydaje się, że leptony są niepodzielne.

Jakie siły wiążą kwarki w hadronach?

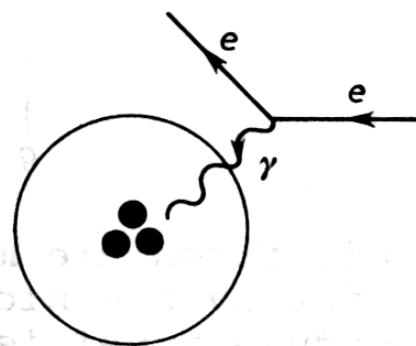
1 GeV
(1950-65)



10 GeV
(SLAC, 1968)



100 GeV
(Fermilab, CERN póź-
ne lata siedemdzie-
siate)

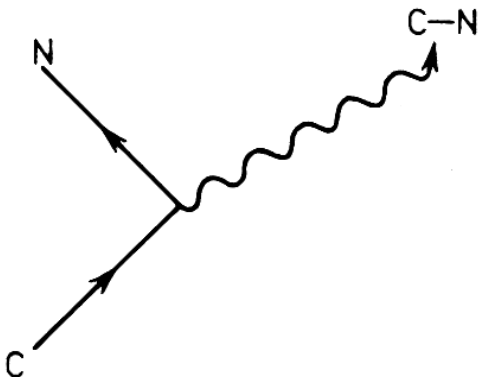


Foton widzi kwarki jako silnie związane. Oddziaływanie naprawdę silne, bardzo trudne do opisu w języku matematycznym. Lata 1950-70: ograniczenie doświadczeń do niskich energii. To silne wiązanie opóźniło postęp w opracowaniu opisu teoretycznego.

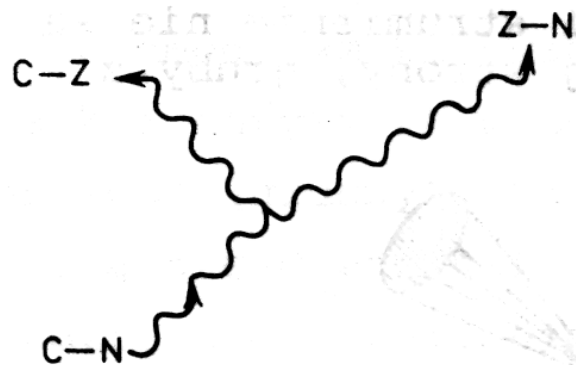
Przy wyższych energiach kwarki wydają się niemal swobodne. Oddziaływanie nie jest już tak silne. QCD wyjaśnia to i pozwala przewidzieć, że siły te będą jeszcze słabsze przy rosnących dalej energiach. Eksperymenty w CERN-ie, przeprowadzone w 1979 roku, wydają się potwierdzać takie zachowanie.

Elementy chromodynamiki kwantowej

- Kwarki posiadają rodzaj ładunku zwanego „kolorem”. Każdy kwark może mieć jeden z następujących kolorów: **czzerwony**, **niebieski**, **zielony**.
- Antykwarki mogą mieć jeden z następujących kolorów: **antyczzerwony**, **antyniebieski** lub **antyzielony**.
- Istnieją bezmasowe cząstki (gluony), których wymiana powoduje oddziaływanie między kwarkami. Gluony również mają „kolor” będący kombinacją kolorów kwarku i antykwarku, np. czerwony-antyzielony



Czerwony kwark staje się niebieski po wyemitowaniu gluonu o kolorze „czerwony minus niebieski”. Sam gluon niesie więc kolor.



Gluon „czerwony minus niebieski” staje się „czerwony minus zielony” wysyłając gluon „zielony minus niebieski”. W miarę jak przesuwamy się wzdłuż diagramu całkowity kolor „czerwony minus niebieski” jest zachowywany. W ten sposób pojedynczy gluon może rozdzielić się na dwa – coś, co nie ma odpowiednika dla fotonów. Powoduje to różnice w zachowaniu się pól koloru i elektrycznego na dużych odległościach (patrz okienko 7.7).

- To inne zachowanie gluonów (w porównaniu z fotonami) powoduje inne zachowanie sił kolorowych: Siła rośnie wraz z odległością. Próba „wyrwania” kwarku lub gluonu z cząstki powoduje, że uzyskuje on bardzo dużą energię i tworzy się para kwark-antykwar. Dlatego wszystkie obserwowane cząstki są „białe”, tzn. nie mają koloru ani nie obserwujemy swobodnych gluonów.
- Jedynym kwarkiem, jaki można obserwować poza cząstkami jest kwark t , gdyż jego czas życia jest rzędu 10^{-25}s ; żyje on za krótko, by stworzyć hadrony i rozpada się na kwark t i bozon W^- .

Oddziaływania słabe

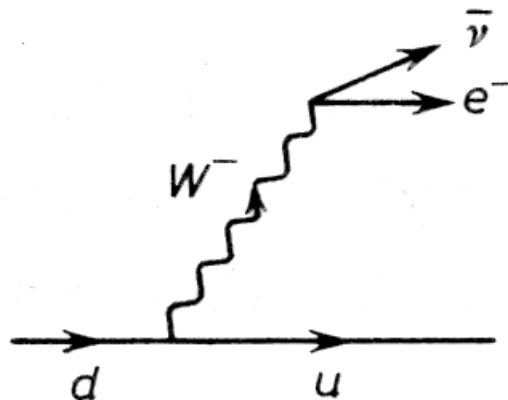
- Nośnikami oddziaływań słabych są bozony W^+ W^- i Z^0 . Są one bardzo ciężkie:

$$m_{W^+} = m_{W^-} = 82 \frac{GeV}{c^2}$$

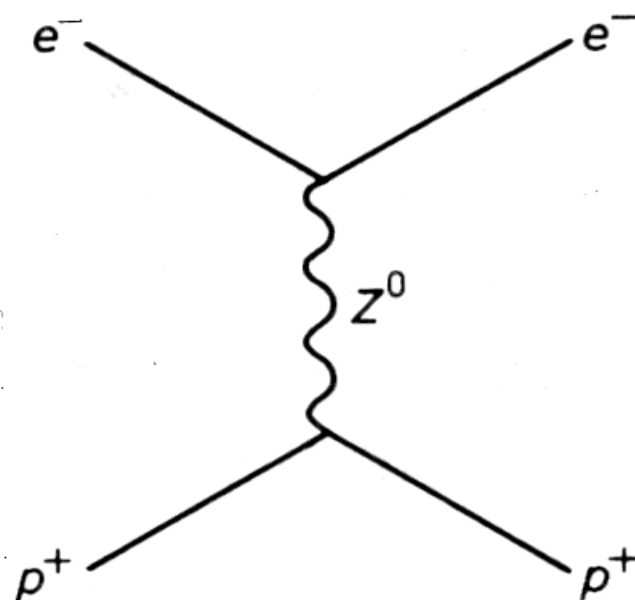
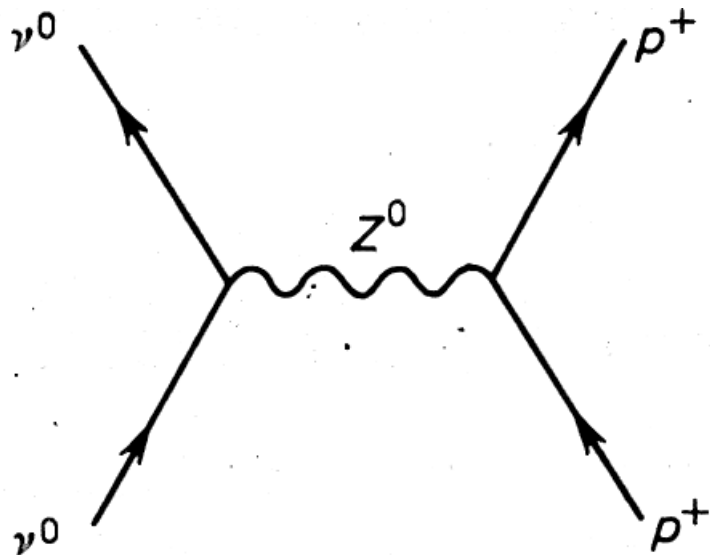
$$m_{Z^0} = 92 \frac{GeV}{c^2}$$

Z tego powodu zasięg oddziaływań słabych jest bardzo mały i przy energiach rzędu rozmiaru jądra atomowego są one bardzo słabe.

- Opis rozpadu β :



- Przewidywania nowych zjawisk: prądy neutralne (odkryte w latach 70-tych XX w.):

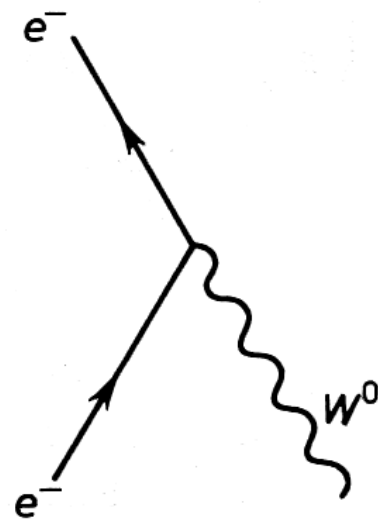
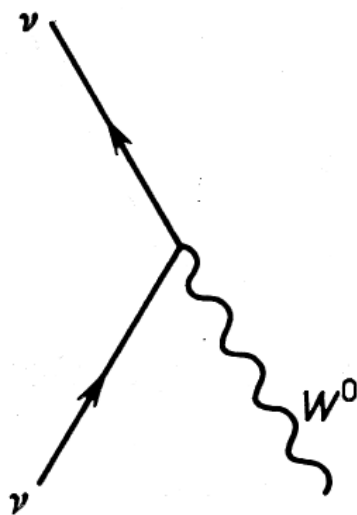


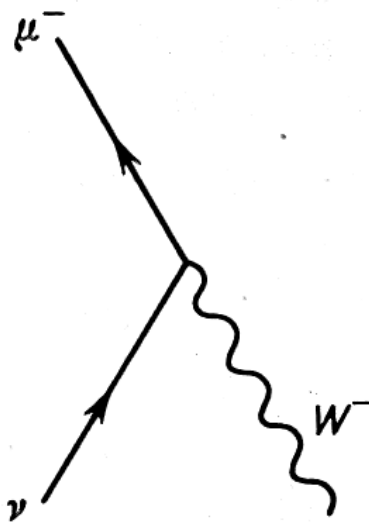
Symetrie w przyrodzie i próba unifikacji oddziaływań

- Najpierw udało się stworzyć jednolitą teorię oddziaływań elektromagnetycznych i słabych (Weinberg, Salam, Glashow). Istniały w niej 4 bozony przenoszące oddziaływania: bezmasowy foton i ciężkie W^+ , W^- i Z^0 . Jest tylko jeden problem: w teorii tej wszystkie bozony są bezmasowe i aby nadać masę bozonom W^+ , W^- i Z^0 konieczne jest istnienie tzw. **bozonu Higgsa**. Miałby to być bozon, przenoszący oddziaływania między tzw. polem Higgsa a bozonami W^+ , W^- i Z^0 . Dzięki oddziaływaniu z polem Higgsa, bezmasowa cząstka zachowuje się tak, jakby miała masę (jest przez to pole hamowana). Niektóre teorie głoszą, że wszystkie cząstki są bezmasowe, a zachowują się tak jakby miały masę dzięki mechanizmowi Higgsa, a różnice mas wynikają z różnych sposobów oddziaływania z polem Higgsa.

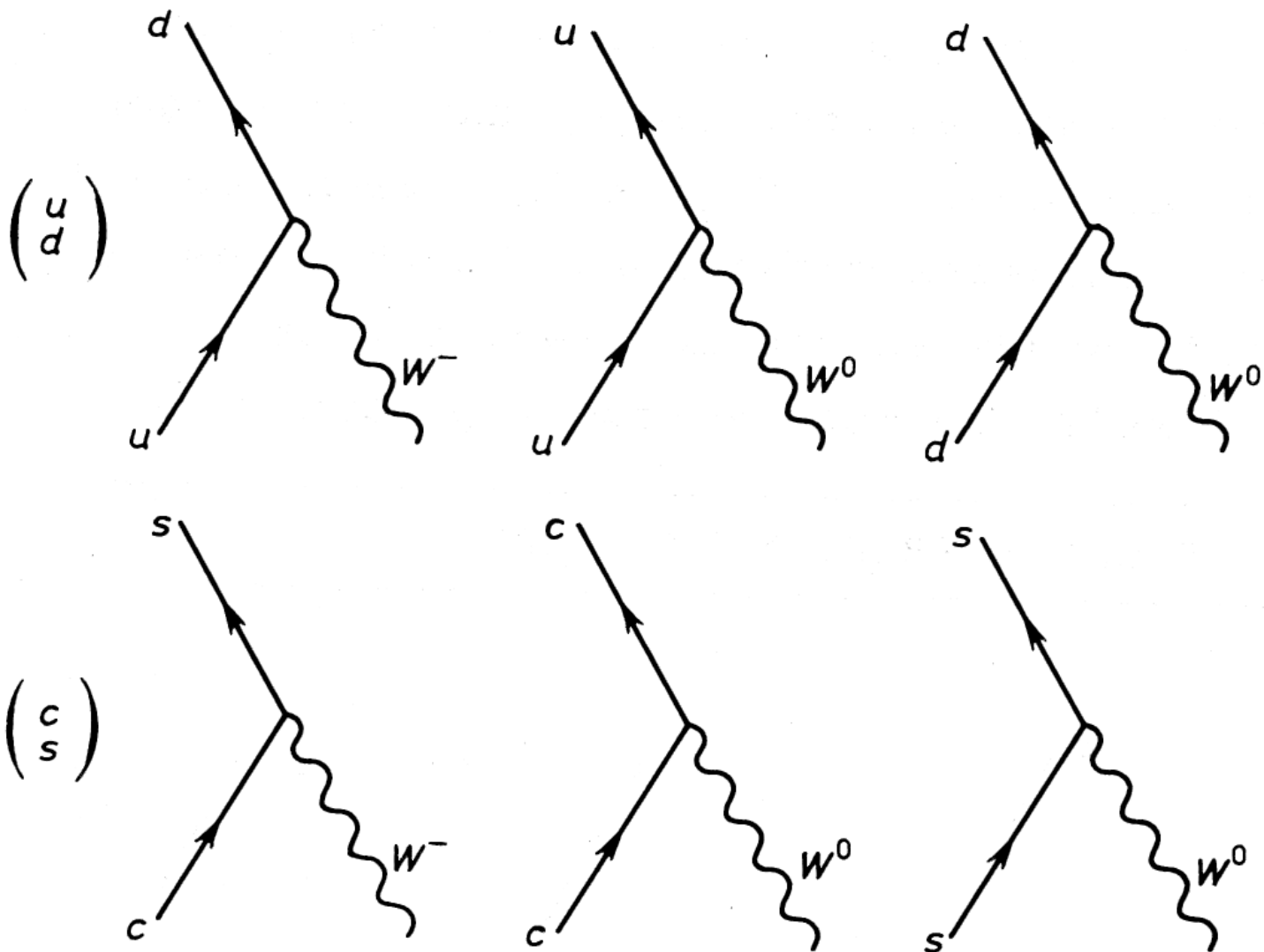
Jest tylko jeden zasadniczy problem: dotychczas nie znaleziono bozonu Higgsa (fizycy mają nadzieję znaleźć go w eksperymentach w LHC).

- Przyroda wydaje się być bardzo symetryczna: mamy 6 kwarków i 6 leptonów. W oddziaływaniach słabych są pewne prawidłowości istnieją pewne podobieństwa między leptonami i kwarkami. Zachodzą np. następujące analogiczne zjawiska:

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e^- \end{pmatrix}$$


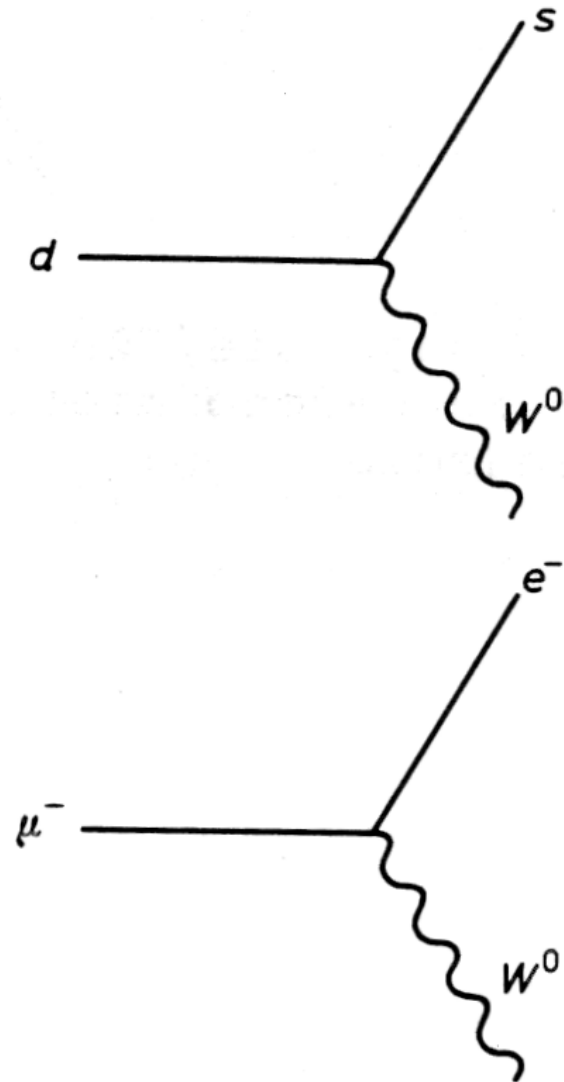
$$\begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu^- \end{pmatrix}$$


Oddziaływania słabe leptonów.



Oddziaływania słabe kwarków

- Jednocześnie nie obserwuje się takich procesów (choć nie są formalnie zakazane):
- Ale obserwuje się rozpad kwarku s w kwark u , zachodzący np. słabych rozpadach Λ^0 . Czy ma to coś wspólnego ze wspomnianą wcześniej oscylacją neutrin?
- Czy pary kwarków (u,d) , (c,s) , (b,t) mają coś wspólnego z parami (e^-, ν_e) , (μ^-, ν_μ) , (τ^-, ν_τ) ?



- Powstały teorie unifikujące oddziaływania elektromagnetyczne, słabe i kolorowe. Nie udało się do tej pory zunifikować wszystkich oddziaływań (problem z grawitacją) w weryfikowalny sposób.

Model standardowy

- Jest to teoria unifikująca oddziaływania elektroslabe i silne. Jest teorią sformułowaną w języku matematyki.
- Główne wnioski wynikające z modelu standardowego:
- Budulcem całej materii jest 12 fermionów, podzielonych na 3 generacje różniące się masą. Pierwszą generację stanowią kwarki u i d oraz leptony e i ν_e . Druga generacja, to kwarki c i s oraz leptony μ^- i ν_μ . Trzecia generacja, to kwarki b i t oraz leptony τ^- , ν_τ . Teoria nie zabrania istnienia następnych generacji, ale nie wydaje się, by one istniały (neutrino czwartej generacji musiałoby być bardzo ciężkie).
- Oddziaływania przenoszone są przez bozony. Oddziaływania elektromagnetyczne przenosi foton (γ). Oddziaływania słabe przenoszą bozony W^+ , W^- i Z^0 . Oddziaływania silne przenosi 8 gluonów, których sposób oddziaływania zależy od ich rodzaju (koloru).

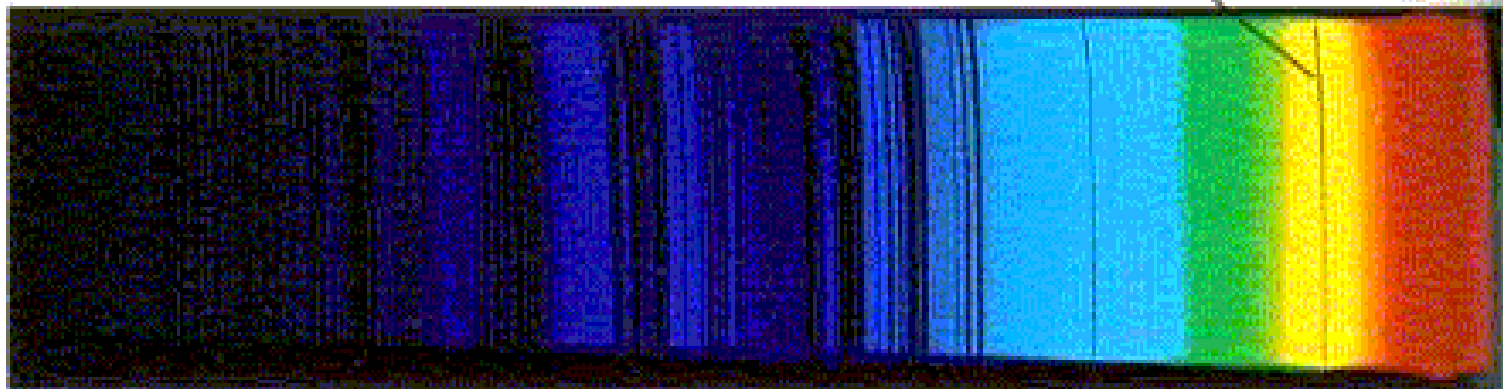
- Model standardowy tłumaczy wszystkie dotychczas zaobserwowane zjawiska. Jediną cząstką, której istnienie on przewiduje, a której nie udało się jeszcze odkryć jest bozon Higgsa (stąd takie intensywne poszukiwania), potrzebny, by nadać masę innym cząstkom.
- Z teoretycznego punktu widzenia ma on niestety swoje wady: ma 19 wolnych parametrów, które należy dobrać doświadczalnie (np. masy cząstek), nie znaleziono bozonu Higgsa, nie tłumaczy on oddziaływań grawitacyjnych (a więc i nie tłumaczy zjawisk tuż po wielkim wybuchu), nie wyjaśnia dlaczego wszechświat zbudowany jest z materii (w makroskali praktycznie brak jest antymaterii), obliczenia masy wszechświata nie zgadzają się z ilością obserwowanej materii we wszechświecie (stąd poszukiwania tzw. „ciemnej materii”).

Fizyka laserów

Emisja i absorbcja promieniowania przez atomy

Solar spectrum
showing absorption lines

Sodium



Emission spectrum of sodium

Sodium

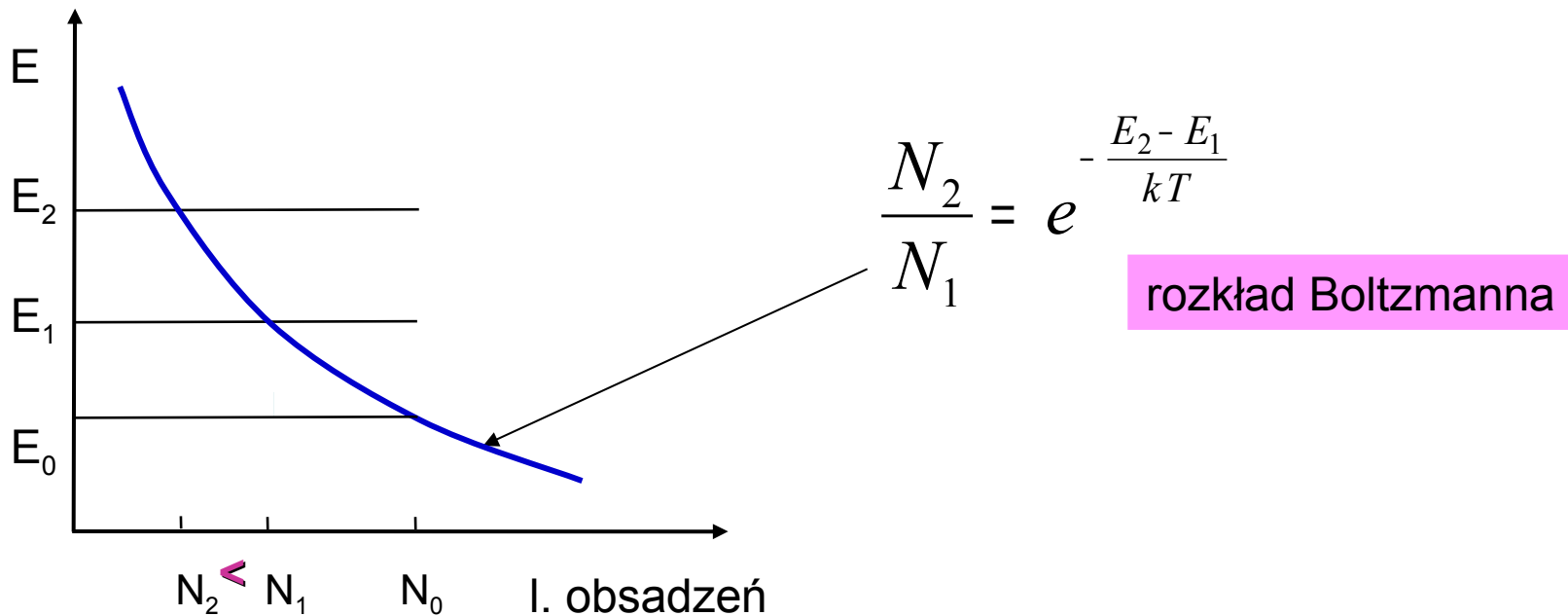
- Rozpatrzmy dwa stany energetyczne atomu o energiach $E_1 < E_2$. Liczba atomów w stanie o energii E_1 jest proporcjonalna do

$$N_1 = e^{-\frac{E_1}{kT}}$$

a liczba atomów o energii E_2 proporcjonalna do

$$N_2 = e^{-\frac{E_2}{KT}}$$

Prawdopodobieństwo pochłonięcia kwantu o energii ($E_2 - E_1$) jest proporcjonalne do N_1 , zaś emisji kwantu o tej energii jest proporcjonalne do N_2 .



Aby procesy emisji takich kwantów były częstsze od procesów pochłaniania, musi nastąpić inwersja obsadzeń ($N_2 > N_1$).

- Rozważając w 1917 r. promieniowanie ciała doskonale czarnego, Einstein doszedł do wniosku, że powinno dochodzić do zjawiska emisji wymuszonej – wymuszania emisji fotonu przez inne fotony (przypominam statystykę: fotony lubią mieć identycznych towarzyszy).

$$B_{12}N_1u(\nu)_{\nu=\nu_0} = B_{21}N_2u(\nu)_{\nu=\nu_0} + A_{21}N_2$$

gdzie :

$B_{12} = B_{21}$ - wsp. emisji i absorpcji wymuszonej

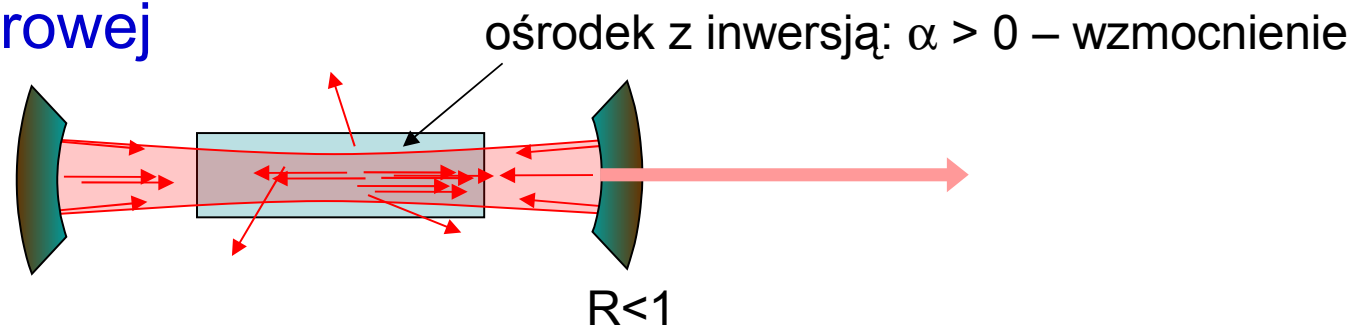
A_{21} - wsp. absorpcji spontanicznej

$u(\nu)_{\nu=\nu_0}$ - gęstość promieniowania

Fotony pochodzące z emisji wymuszonej powinny być identyczne (taka sama częstotliwość, faza, kierunek promieniowania).

- Jak można zwiększyć ich liczbę? Zastosujmy rezonator.

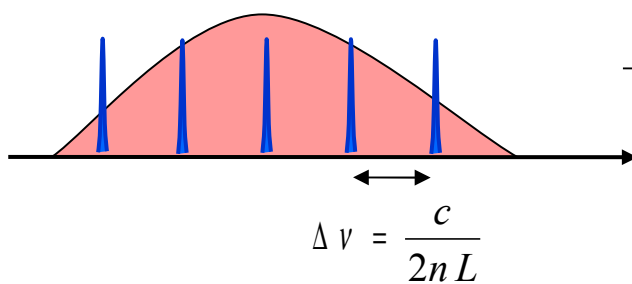
Rozwój akcji laserowej



Laser = Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation

Rezonator pozwala na:

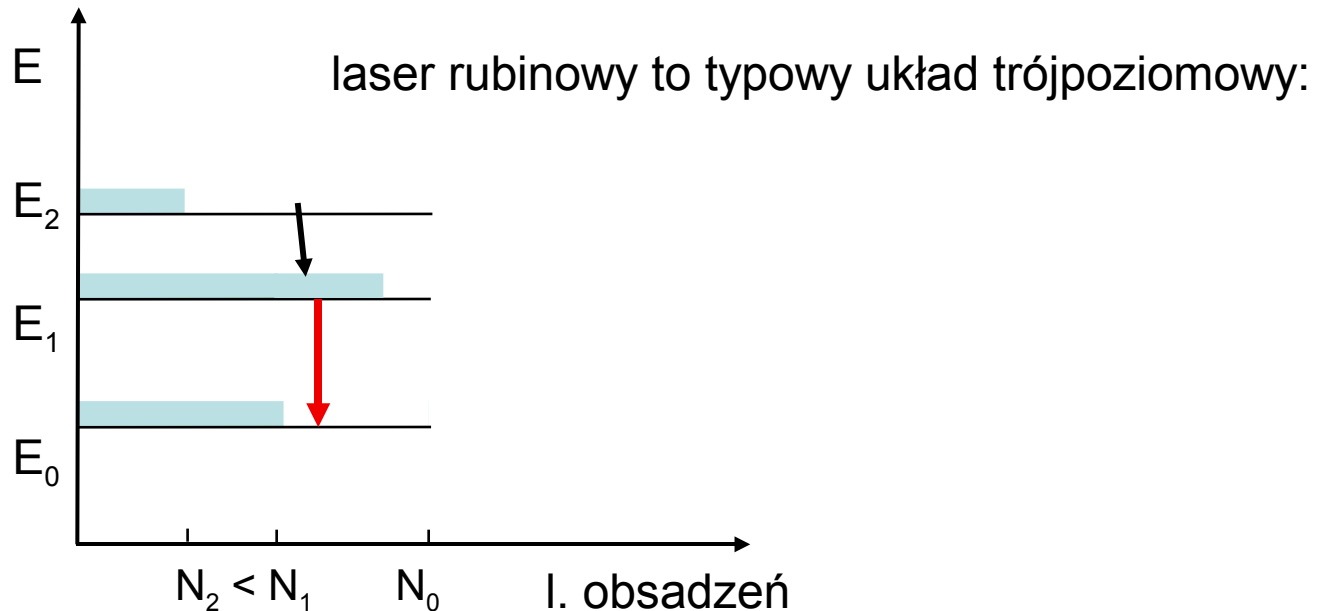
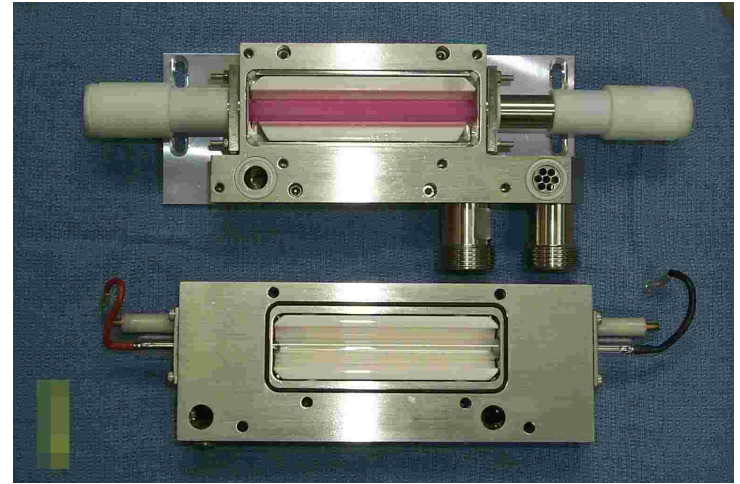
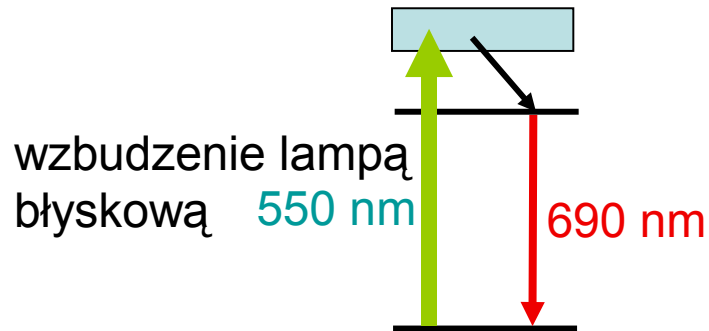
1. Sprzężenie zwrotne – przejście od wzmacniania promieniowania spontanicznego do generacji spójnej wiązki światła
2. Koncentrację energii, spełnienie warunku przewagi emisji wymuszonej $B_{21}u(\nu) > A_{21}$
3. Selekcję spektralną



struktura modowa promieniowania laserowego

Laser rubinowy

- Substancja robocza: jony Cr^{3+} w kryształ Al_2O_3



Laser helowo-neonowy

