

Wszechświat Cząstek Elementarnych dla Humanistów

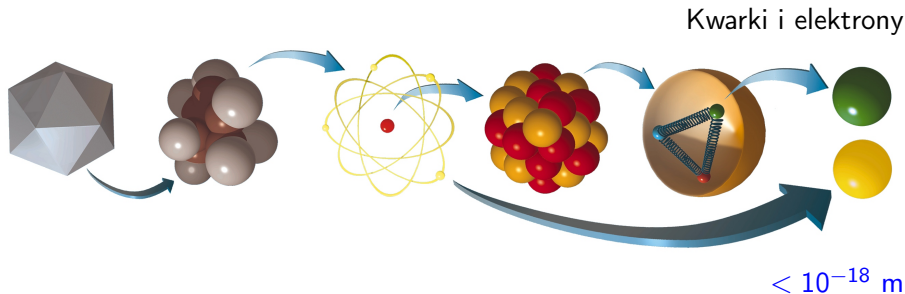
Początki fizyki cząstek

prof. dr hab. Aleksander Filip Żarnecki

Wykład ogólnouniwersytecki



16 października 2018



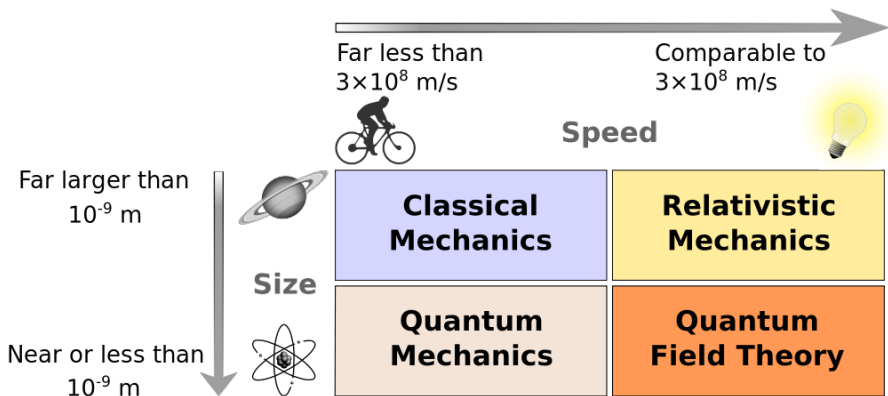
Elektron jest najlżejszą cząstką naładowaną, zalicza się do tzw. leptonów

Nukleony, czyli **protony** i **neutrony**, składają się z kwarków *u* i *d*:

$$p = (uud) \quad n = (udd)$$

Obecnie za najbardziej fundamentalne, niepodzielne składniki materii uważamy **kwarki** i **leptony**.

Granice stosowalności praw fizyki klasycznej



Współczesna fizyka cząstek opisywana jest w języku **Kwantowych Teorii Pola** łączących szczególną teorię względności z mechaniką kwantową. Jest to świat bardzo różny od tego do którego jesteśmy przyzwyczajeni...

- 1 Foton
- 2 Promieniotwórczość
- 3 Jądro atomowe
- 4 Mechanika kwantowa
- 5 Promieniowanie kosmiczne
- 6 Nowe odkrycia

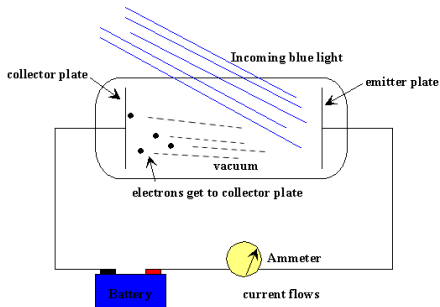
- 1 Foton
- 2 Promieniotwórczość
- 3 Jądro atomowe
- 4 Mechanika kwantowa
- 5 Promieniowanie kosmiczne
- 6 Nowe odkrycia

Efekt fotoelektryczny

Odkryty przez Hertza w 1887:

światło wybija elektrony z metalu

W 1902 Philipp Lenard pokazał, że efekt fotoelektryczny obserwujemy tylko dla wybranych długości fali światła:

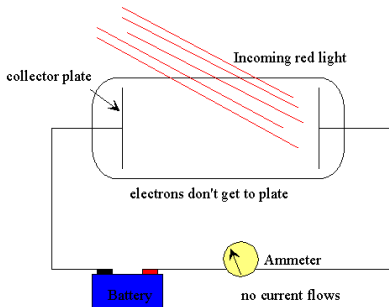


Efekt fotoelektryczny

Odkryty przez Hertza w 1887:

światło wybija elektrony z metalu

W 1902 Philipp Lenard pokazał, że efekt fotoelektryczny obserwujemy tylko dla wybranych długości fali światła:



Efektu tego nie można było wytłumaczyć w oparciu o falową teorię światła!

Efekt fotoelektryczny

W roku 1905, Albert Einstein wysunął hipotezę, że światło jest strumieniem niepodzielnych kwantów energii, które dziś nazywamy fotonami.

Energia fotonu:

$$E_{\gamma} = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$$

Aby wybić elektron z metalu energia padającego fotonu, musi być większa od tzw. pracy wyjścia
⇒ zależność od długości fali światła

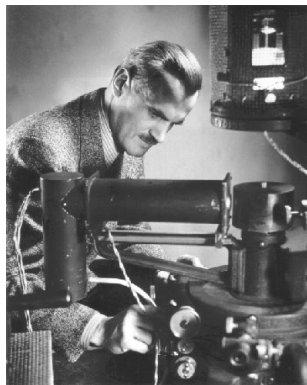
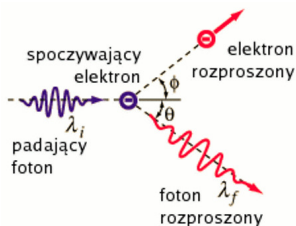
$$E_{\gamma}^{\text{blue}} > E_{\gamma}^{\text{green}} > E_{\gamma}^{\text{red}}$$



Arthur Compton 1923

Rozpraszanie promieniowania X na kryształach

⇒ fotony rozpraszają się na quasi-swobodnych elektronach



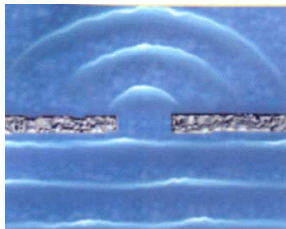
Compton wykazał, że fotony niosą nie tylko **energię**, ale i **pęd**

⇒ zachowują się jak “zwykłe” **cząstki**

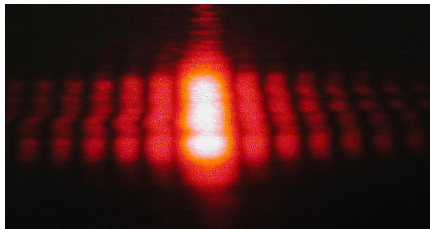
Jednocześnie jednak **fotony** zachowują się jak **fale**.
Świadczą o tym m.in. zjawisko **dyfrakcji** i **interferencji** światła.

Ugięcie fal na pojedynczej szczelinie:

Fale na wodzie



Światło



W niektórych doświadczeniach światło przejawia naturę falową, w innych z kolei zachowuje się jak strumień cząstek...

Dualizm korpuskularno-falowy

Aby opisać wyniki eksperymentalne musimy przyjąć że:

- światło (każda fala elektromagnetyczna) to **strumień fotonów**
- **rozchodzenie się światła (ruch fotonów) nie da się jednak opisać dynamiką Newtona, na podobieństwo "klasycznych" kulek**

W niektórych doświadczeniach światło przejawia naturę falową, w innych z kolei zachowuje się jak strumień cząstek...

Dualizm korpuskularno-falowy

Aby opisać wyniki eksperymentalne musimy przyjąć że:

- światło (każda fala elektromagnetyczna) to **strumień fotonów**
- **rozchodzenie się światła (ruch fotonów) nie da się jednak opisać dynamiką Newtona, na podobieństwo "klasycznych" kulek**
- rozchodzenie się światła opisują **równania Maxwella** dla fali elektromagnetycznej
- **prawdopodobieństwo detekcji** fotonu jest proporcjonalne do "klasycznego" natężenia światła

W niektórych doświadczeniach światło przejawia naturę falową, w innych z kolei zachowuje się jak strumień cząstek...

Dualizm korpuskularno-falowy

Aby opisać wyniki eksperymentalne musimy przyjąć że:

- światło (każda fala elektromagnetyczna) to **strumień fotonów**
- **rozchodzenie się światła (ruch fotonów) nie da się jednak opisać dynamiką Newtona, na podobieństwo "klasycznych" kulek**
- rozchodzenie się światła opisują **równania Maxwella** dla fali elektromagnetycznej
- **prawdopodobieństwo detekcji** fotonu jest proporcjonalne do "klasycznego" natężenia światła

⇒ foton jest cząstką, ale jego ruch nie jest deterministyczny!
Zachowanie fotonu opisane jest równaniem falowym...

- 1 Foton
- 2 Promieniotwórczość
- 3 Jądro atomowe
- 4 Mechanika kwantowa
- 5 Promieniowanie kosmiczne
- 6 Nowe odkrycia

Odkrycie H. Becquerel, 1896

Sole uranu emitowały promieniowanie, które zaciemniało płytę fotograficzną.

Becquerel starał się potwierdzić hipotezę, że jest to zjawisko fluorescencji - emisja indukowana wcześniejszym naświetleniem.

Przypuszczano, że "wzbudzony" uran może emitować promieniowanie X



Odkrycie H. Becquerel, 1896

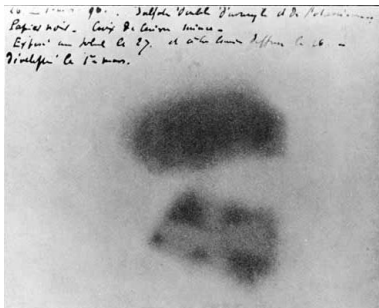
Sole uranu emitowały promieniowanie, które zaciemniało płytę fotograficzną.

Becquerel starał się potwierdzić hipotezę, że jest to zjawisko fluorescencji - emisja indukowana wcześniejszym naświetleniem.

Przypuszczano, że "wzbudzony" uran może emitować promieniowanie X

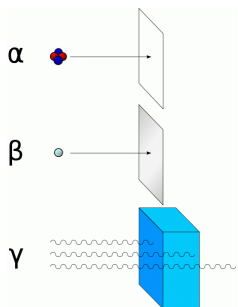
Najsilniejszym źródłem światła było wtedy Słońce.

Niestety pogoda w Paryżu była nieprzychylna i Becquerel schował nienaświetlone płyty fotograficzne razem z solami uranu do szuflady...

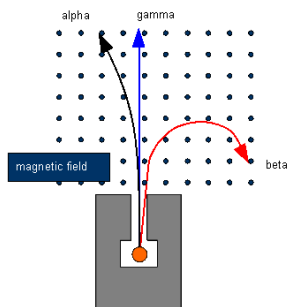


Naturalna promieniotwórczość była intensywnie badana na początku XX wieku, wyodrębniono 3 rodzaje promieniowania: α , β i γ .

Rutherford badał przenikliwość promieniowania pochodzącego z różnych źródeł



Okazało się, że różne składowe mogą też być rozdzielone w polu magnetycznym



1903

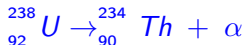
Nagroda Nobla dla H.Becquerela, M.Skłodowskiej-Curie i P.Curie

1903

Nagroda Nobla dla H.Becquerela, M.Sklodowskiej-Curie i P.Curie

E.Rutherford and F.Soddy opublikowali pracę tłumaczącą promieniotwórczość jako wynik **przemiany pierwiastków**: jeden rodzaj atomu emituje promieniowanie przemieniając się w atom innego pierwiastka.

- promieniowanie α



- promieniowanie β



- promieniowanie γ

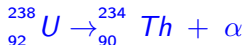


1903

Nagroda Nobla dla H.Becquerela, M.Skłodowskiej-Curie i P.Curie

E.Rutherford and F.Soddy opublikowali pracę tłumaczącą promieniotwórczość jako wynik **przemiany pierwiastków**: jeden rodzaj atomu emituje promieniowanie przemieniając się w atom innego pierwiastka.

- promieniowanie α



- promieniowanie β



- promieniowanie γ



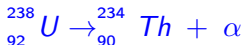
Choć na początku wciąż zakładano, że atomy są niepodzielne...

1903

Nagroda Nobla dla H.Becquerela, M.Sklodowskiej-Curie i P.Curie

E.Rutherford and F.Soddy opublikowali pracę tłumaczącą promieniotwórczość jako wynik **przemiany pierwiastków**: jeden rodzaj atomu emituje promieniowanie przemieniając się w atom innego pierwiastka.

- promieniowanie α

jądra helu: $2p2n$

- promieniowanie β

elektrony (β^+ - pozytony)

- promieniowanie γ



wysokoenergetyczne fotony

Choć na początku wciąż zakładano, że atomy są niepodzielne...

Dopiero później zrozumieliśmy prawdziwą naturę promieniowania

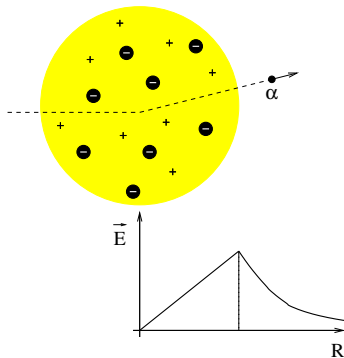
- 1 Foton
- 2 Promieniotwórczość
- 3 Jądro atomowe**
- 4 Mechanika kwantowa
- 5 Promieniowanie kosmiczne
- 6 Nowe odkrycia

Doświadczenie Rutherforda

Rozpraszanie cząstek α na cienkiej złotej folii



Obserwowano błyski wywoływane przez padające cząstki na ekranie scyntylacyjnym - ocena kąta rozproszenia



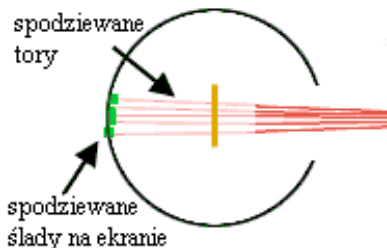
Model Thomsona:

cała **objętość** atomu jednorodnie **naładowana dodatnio** ("ciasto"), a wewnątrz "pływają" **elektrony** ("rodzynki").

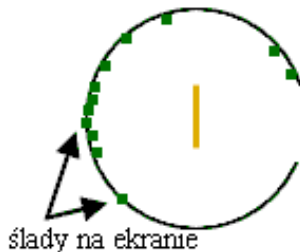
Doświadczenie Rutherforda

Wyniki pomiarów przeprowadzonych przez H.Geigera i E.Marsdena (1909):

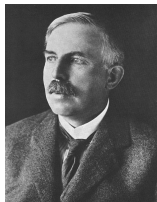
Oczekiwane



Uzyskane

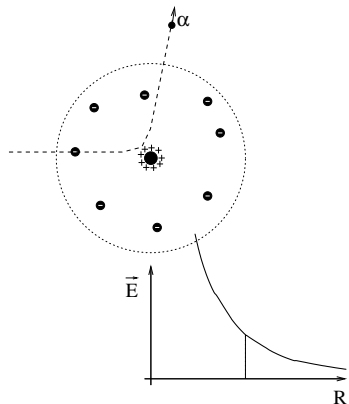


Model Rutherforda (1911)



Rutherford zaproponował
jądrowy model atomu.

Cały dodatni ładunek atomu (10^{-10} m) skupiony jest w praktycznie **punktowym** (10^{-14} m) **jądrze** otoczonym przez chmurę elektronów.

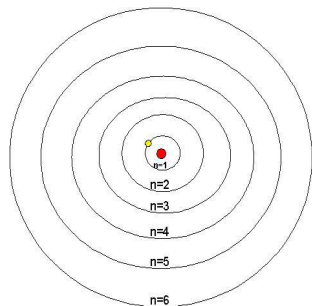


Cząstka α zawsze czuje cały ładunek dodatni \Rightarrow duże kąty rozproszenia

Atom Rutherforda

Praktycznie punktowe jądro (**dodatnie**)
otoczone chmurą elektronów (**ujemnych**).

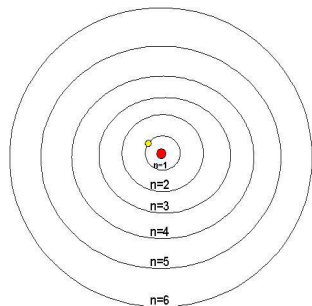
Biorąc pod uwagę tylko oddziaływanie
elektrostatyczne, taki “planetarny” układ
mógłby być stabilny.



Atom Rutherforda

Praktycznie punktowe jądro (**dodatnie**) otoczone chmurą elektronów (**ujemnych**).

Biorąc pod uwagę tylko oddziaływanie elektrostatyczne, taki “planetarny” układ mógłby być stabilny.



Ale ładunek poruszający się z przyspieszeniem **MUSI** generować falę elektromagnetyczną (**równania Maxwella**) \Rightarrow **wypromieniowywać energię**
Elektron powinien spaść na jądro...

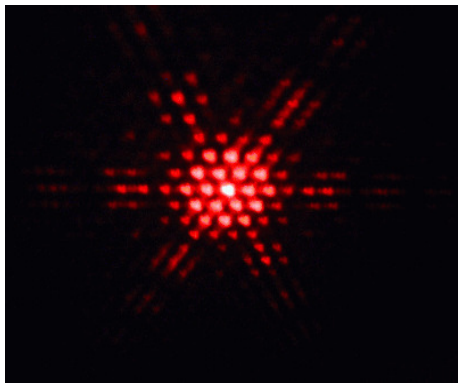
Budowy atomu nie można było wytłumaczyć w oparciu o klasyczną fizykę!
Potrzebne było nowe spojrzenie...

- 1 Foton
- 2 Promieniotwórczość
- 3 Jądro atomowe
- 4 Mechanika kwantowa**
- 5 Promieniowanie kosmiczne
- 6 Nowe odkrycia

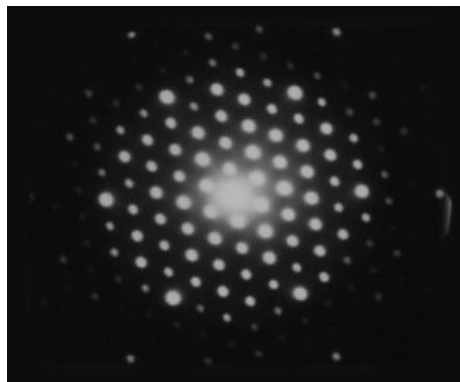
W roku 1923 Louis de Broglie wysunął hipotezę, że **wszystkie cząstki** powinny przejawiać własności **falowe** !

Dyfrakcja na strukturach heksagonalnych

Światło



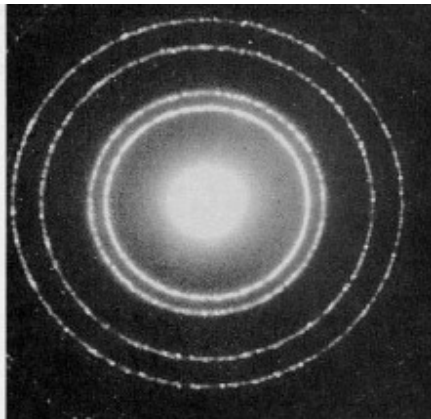
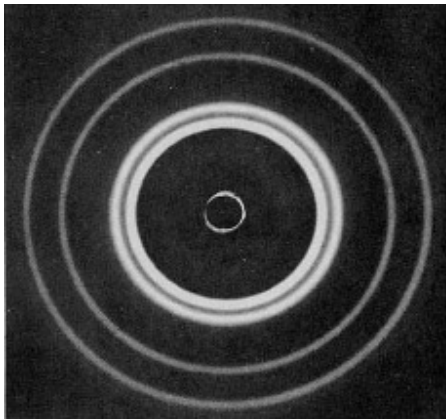
Elektrony



Obraz przy przechodzeniu przez cienką folię aluminiową

Promieniowanie X

Elektrony



Elektrony zachowują się jak fale !
Potwierdzenie hipotezy de Broglie'a.

Mechanika klasyczna

Jeśli znamy **dokładnie** początkowe **położenia** i **prędkości** wszystkich elementów układu (np. **planet w Układzie Słonecznym**) potrafimy **przewidzieć** w jakim stanie będzie się znajdował w **przyszłości**.

Mechanika klasyczna

Jeśli znamy **dokładnie** początkowe **położenia** i **prędkości** wszystkich elementów układu (np. **planet w Układzie Słonecznym**) potrafimy **przewidzieć** w jakim stanie będzie się znajdował w **przyszłości**.

Tego typu podejście zawodzi jednak w świecie subatomowym!

Falowa natura cząstek zmusza nas do rezygnacji z podejścia deterministycznego...

Mechanika klasyczna

Jeśli znamy **dokładnie** początkowe **położenia** i **prędkości** wszystkich elementów układu (np. **planet w Układzie Słonecznym**) potrafimy **przewidzieć** w jakim stanie będzie się znajdował w **przyszłości**.

Mechanika kwantowa

Ruch cząstki to rozchodzenie się “**fali prawdopodobieństwa**”

Falę opisuje tzw. funkcja falowa $\psi(\vec{r}, t)$, której ewolucję potrafimy opisać odpowiednimi równaniami (np. równanie Schrödingera, 1925)

Mechanika klasyczna

Jeśli znamy **dokładnie** początkowe **położenia** i **prędkości** wszystkich elementów układu (np. **planet w Układzie Słonecznym**) potrafimy **przewidzieć** w jakim stanie będzie się znajdował w **przyszłości**.

Mechanika kwantowa

Ruch cząstki to rozchodzenie się “**fali prawdopodobieństwa**”

Falę opisuje tzw. **funkcja falowa** $\psi(\vec{r}, t)$, której ewolucję potrafimy opisać odpowiednimi równaniami (np. **równanie Schrödingera, 1925**)

Kwadrat amplitudy funkcji falowej daje nam **prawdopodobieństwo** znalezienia cząstki w danym miejscu i danej chwili czasu $p = |\psi(\vec{r}, t)|^2$

Mechanika klasyczna

Jeśli znamy **dokładnie** początkowe **położenia** i **prędkości** wszystkich elementów układu (np. planet w Układzie Słonecznym) potrafimy **przewidzieć** w jakim stanie będzie się znajdował w **przyszłości**.

Mechanika kwantowa

Ruch cząstki to rozchodzenie się “fali prawdopodobieństwa”

Falę opisuje tzw. funkcja falowa $\psi(\vec{r}, t)$, której ewolucję potrafimy opisać odpowiednimi równaniami (np. równanie Schrödingera, 1925)

Kwadrat amplitudy funkcji falowej daje nam **prawdopodobieństwo** znalezienia cząstki w danym miejscu i danej chwili czasu $p = |\psi(\vec{r}, t)|^2$

Dopiero dedykowany **pomiar** może rozstrzygnąć gdzie znajduje się cząstka. Wcześniej możemy tylko “zgadywać”...

Mechanika klasyczna

Jeśli znamy **dokładnie** początkowe **położenia** i **prędkości** wszystkich elementów układu (np. planet w Układzie Słonecznym) potrafimy **przewidzieć** w jakim stanie będzie się znajdował w **przyszłości**.

Mechanika kwantowa

Ruch cząstki to rozchodzenie się "fali prawdopodobieństwa"

Falę opisuje tzw. funkcja falowa $\psi(\vec{r}, t)$, której ewolucję potrafimy opisać odpowiednimi równaniami (np. równanie Schrödingera, 1925)

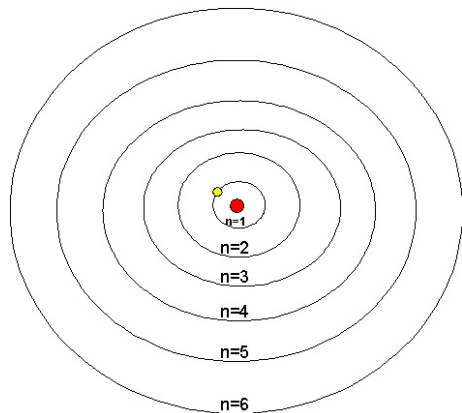
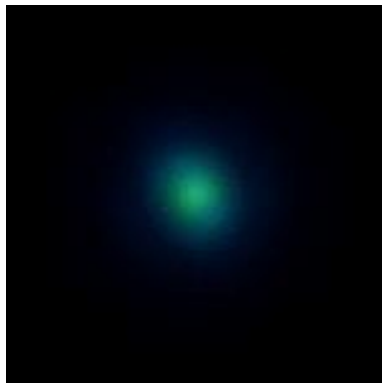
Kwadrat amplitudy funkcji falowej daje nam **prawdopodobieństwo** znalezienia cząstki w danym miejscu i danej chwili czasu $p = |\psi(\vec{r}, t)|^2$

Dopiero dedykowany **pomiar** może rozstrzygnąć gdzie znajduje się cząstka. **Wcześniej możemy tylko "zgadywać"...**

Nie możemy **dowolnie dokładnie** poznać stanu cząstki, np. jednocześnie zmierzyć położenie i pęd - **zasada nieoznaczoności**.

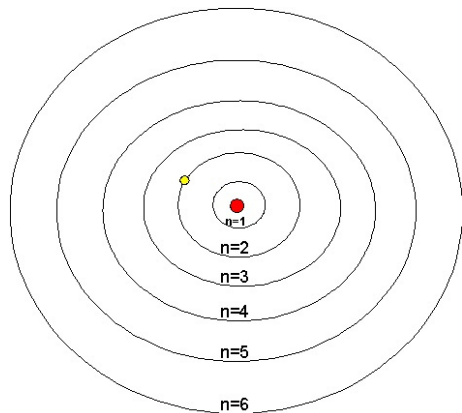
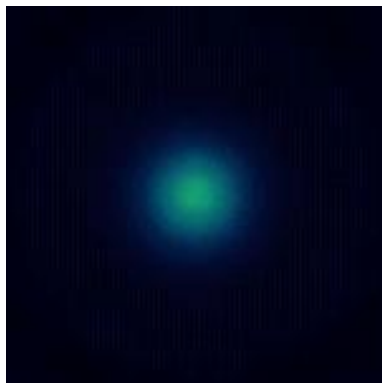
Atom wodoru

Opis klasyczny

Opis kwantowy, stan $1s$ 

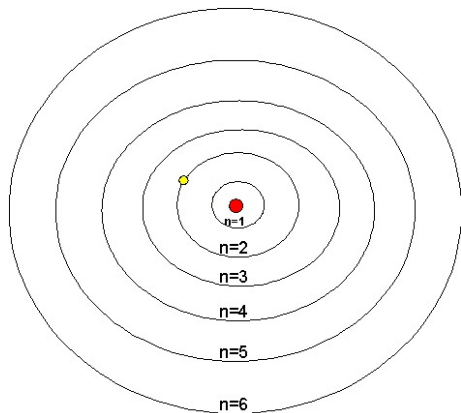
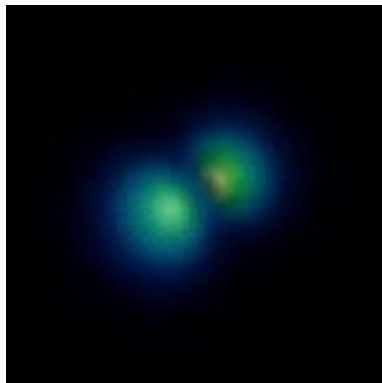
Atom wodoru

Opis klasyczny

Opis kwantowy, stan $2s$ 

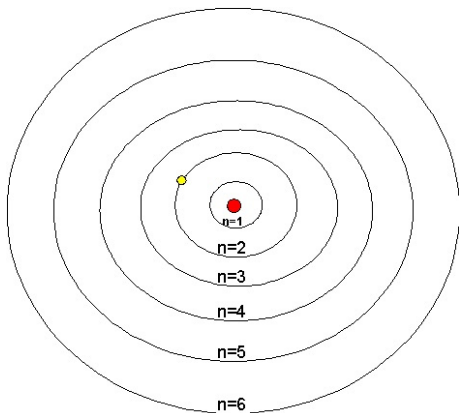
Atom wodoru

Opis klasyczny

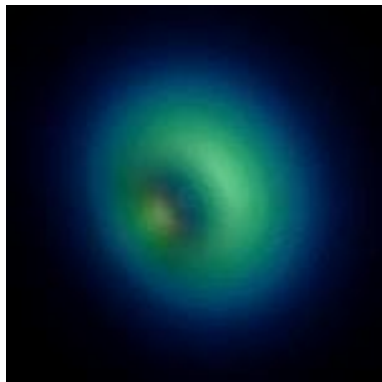
Opis kwantowy, stan $2p_0$ 

Atom wodoru

Opis klasyczny

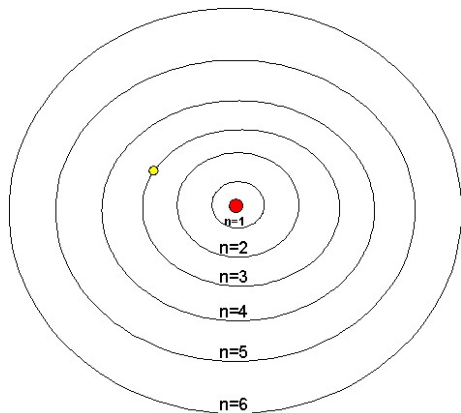


Opis kwantowy, stan 2p1

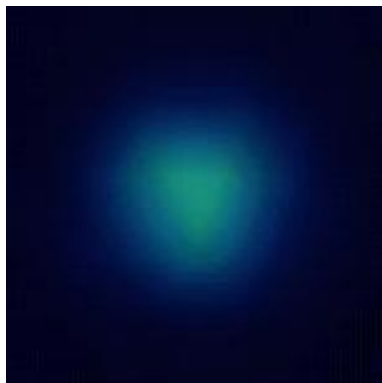


Atom wodoru

Opis klasyczny

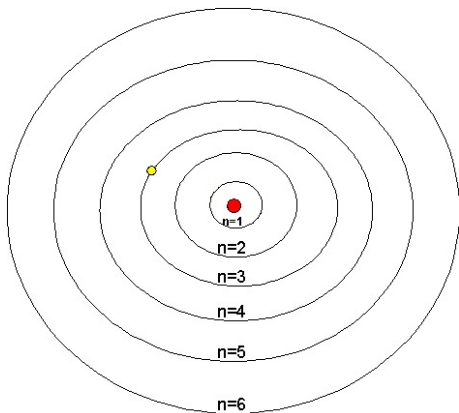
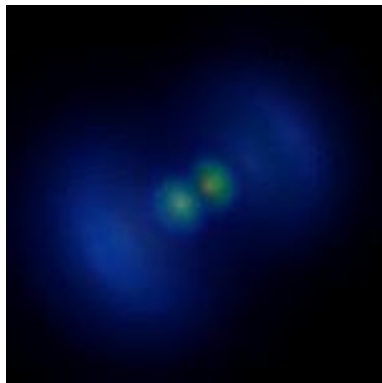


Opis kwantowy, stan 3s



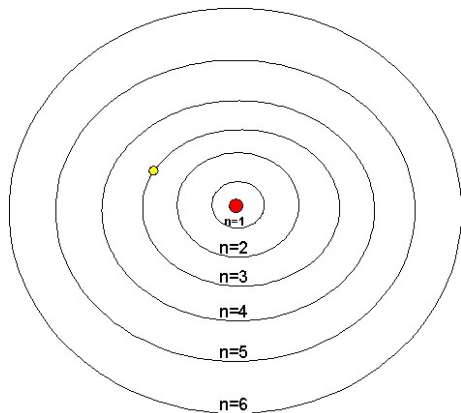
Atom wodoru

Opis klasyczny

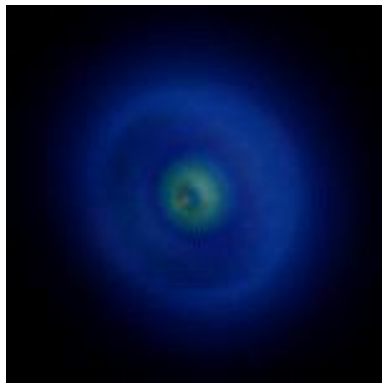
Opis kwantowy, stan $3p_0$ 

Atom wodoru

Opis klasyczny

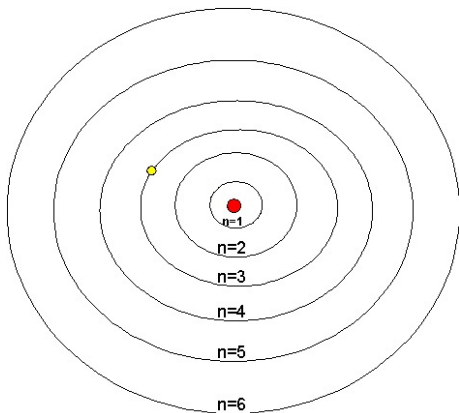
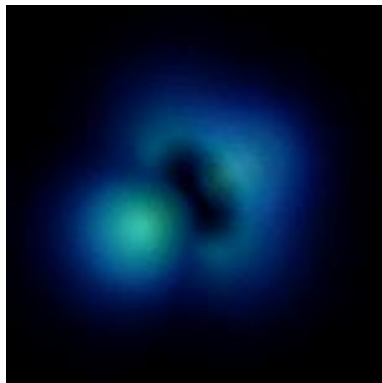


Opis kwantowy, stan 3p1



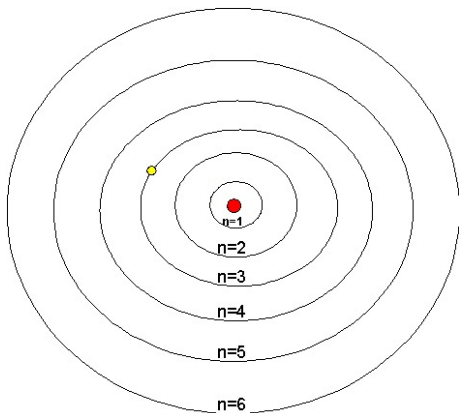
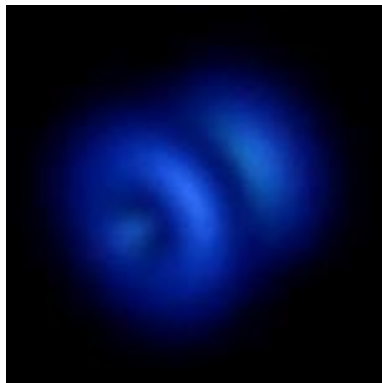
Atom wodoru

Opis klasyczny

Opis kwantowy, stan $3d_0$ 

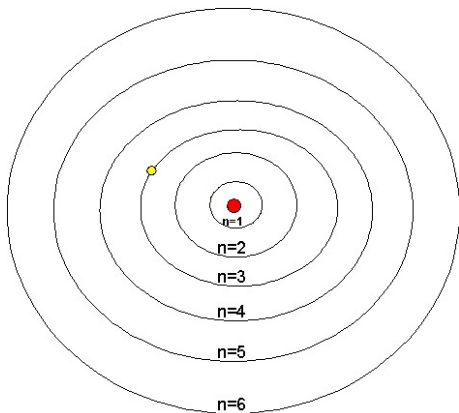
Atom wodoru

Opis klasyczny

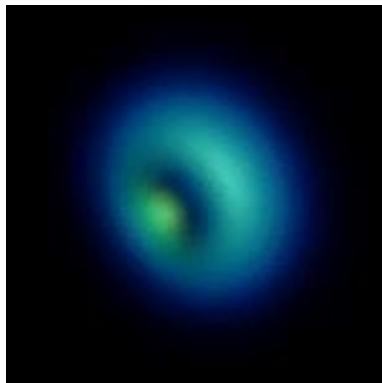
Opis kwantowy, stan $3d1$ 

Atom wodoru

Opis klasyczny



Opis kwantowy, stan 3d2



- 1 Foton
- 2 Promieniotwórczość
- 3 Jądro atomowe
- 4 Mechanika kwantowa
- 5 Promieniowanie kosmiczne**
- 6 Nowe odkrycia

Już Coulomb zauważył, że nawet najlepiej odizolowane ciała rozładowywały się po pewnym czasie. **Nie potrafił tego wytłumaczyć...**

W 1900, Charles Wilson odkrył, że cząsteczki powietrza są częściowo zjonizowane. Przypisał to **naturalnej promieniotwórczości** pierwiastków znajdujących się w skorupie ziemskiej.

Już Coulomb zauważył, że nawet najlepiej odizolowane ciała rozładowywały się po pewnym czasie. **Nie potrafił tego wytłumaczyć...**

W 1900, Charles Wilson odkrył, że cząsteczki powietrza są częściowo zjonizowane. Przypisał to **naturalnej promieniotwórczości** pierwiastków znajdujących się w skorupie ziemskiej.

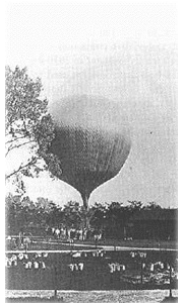
Pierwsze pomiary **Theodora Wulfa** na wieży Eiffel pokazały jednak, że jonizacja nie maleje z wysokością.

Już Coulomb zauważył, że nawet najlepiej odizolowane ciała rozładowywały się po pewnym czasie. **Nie potrafił tego wytłumaczyć...**

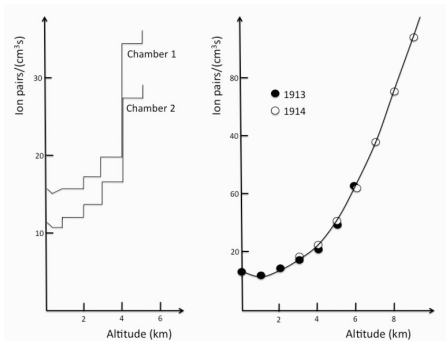
W 1900, Charles Wilson odkrył, że cząsteczki powietrza są częściowo zjonizowane. Przypisał to **naturalnej promieniotwórczości** pierwiastków znajdujących się w skorupie ziemskiej.

Pierwsze pomiary **Theodora Wulfa** na wieży Eiffel pokazały jednak, że jonizacja nie maleje z wysokością.

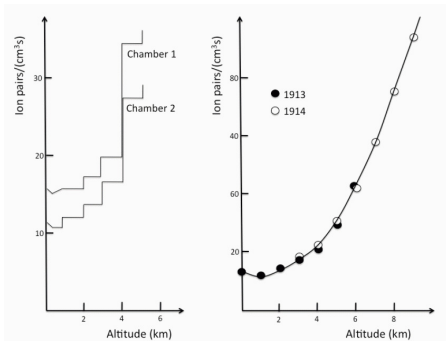
W **1912**, **Victor Hess** pokazał, że jonizacja rośnie z wysokością.



Dokładne pomiary przeprowadzone przez **Victora Hessa** w roku **1913** pokazały, że jonizacja rośnie bardzo szybko na wysokościach powyżej 2 km. Jedynym sensownym wytłumaczeniem była obecność promieniowania, które dociera z **przestrzeni kosmicznej**...



Dokładne pomiary przeprowadzone przez **Victora Hessa** w roku **1913** pokazały, że jonizacja rośnie bardzo szybko na wysokościach powyżej 2 km. Jedynym sensownym wytłumaczeniem była obecność promieniowania, które dociera z **przestrzeni kosmicznej**...



Jednak aż do 1932 roku pozostawało kwestią otwartą czy są to cząstki naładowane czy promieniowanie gamma...

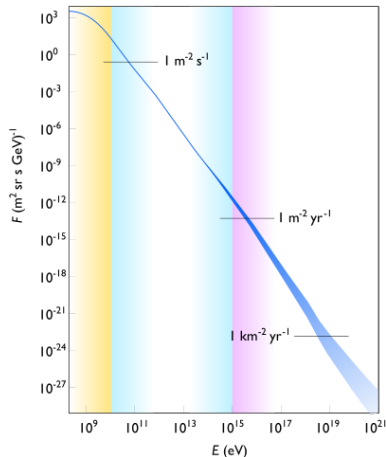
Pierwotne promieniowanie kosmiczne

Promieniowanie obserwowane poza atmosferą ziemską (np. satelity, ISS)

Skład (pomijając neutrina):

- protony (jądra H) $\sim 86\%$
- cząstki α (jądra He) $\sim 13\%$
- cięższe jądra $\sim 1\%$
- neutrony, elektrony, fotony $\ll 1\%$

Taki jak "skład Wszechświata"...



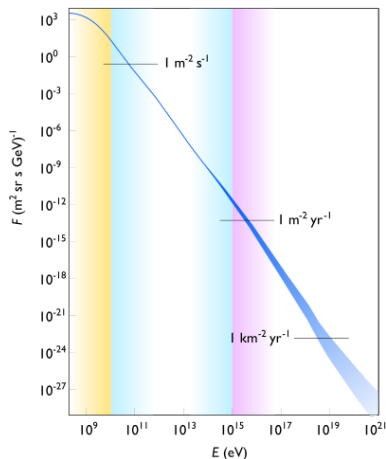
Pierwotne promieniowanie kosmiczne

Promieniowanie obserwowane poza atmosferą ziemską (np. satelity, ISS)

Skład (pomijając neutrina):

- protony (jądra H) $\sim 86\%$
- cząstki α (jądra He) $\sim 13\%$
- cięższe jądra $\sim 1\%$
- neutrony, elektrony, fotony $\ll 1\%$

Taki jak "skład Wszechświata"...



Przestrzeń kosmiczna wypełniona jest cząstkami o energiach dochodzących do 10 J (!!!). Wciąż nie rozumiemy skąd pochodzą...

Wtórne promieniowanie kosmiczne

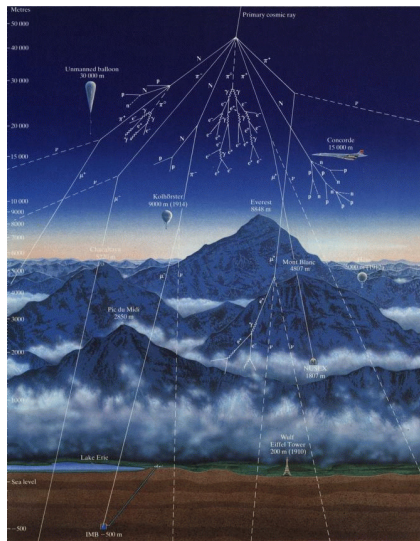
Promieniowanie pierwotne oddziałuje w atmosferze Ziemi. Produkowane są liczne cząstki wtórne, głównie **piony i kaony**, które następnie rozpadają się produkując głównie miony, a w dalszej kolejności elektrony.

Docierają do **powierzchni Ziemi**

- miony $\mu^\pm \sim 70\%$
- elektrony $e^\pm \sim 25\%$
- protony, piony $\pi^\pm \sim 3\%$

Łącznie około $180 \text{ na } m^2 \cdot s$

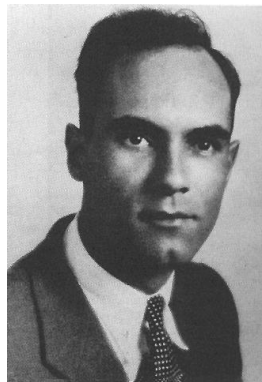
Nie licząc bardzo licznych neutronów, o których jeszcze będzie mowa...



- 1 Foton
- 2 Promieniotwórczość
- 3 Jądro atomowe
- 4 Mechanika kwantowa
- 5 Promieniowanie kosmiczne
- 6 Nowe odkrycia**

Źródła promieniotwórcze dawały energie tylko do ok. 50 MeV. Dlatego w latach trzydziestych i czterdziestych XX wieku budowano wiele **eksperymentów balonowych** wykorzystujących promieniowanie kosmiczne.

Carl Anderson prowadził pomiary balonowe przy pomocy komory Wilsona, którą umieścił w silnym **polu magnetycznym** i dodatkowo wstawił w środek cienką **płytkę ołowianą**

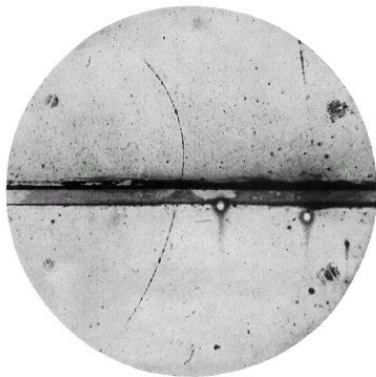


Źródła promieniotwórcze dawały energie tylko do ok. 50 MeV.
Dlatego w latach trzydziestych i czterdziestych XX wieku budowano wiele eksperymentów balonowych wykorzystujących promieniowanie kosmiczne.

Carl Anderson prowadził pomiary balonowe przy pomocy komory Wilsona, którą umieścił w silnym polu magnetycznym i dodatkowo wstawił w środek cienką płytkę ołowianą

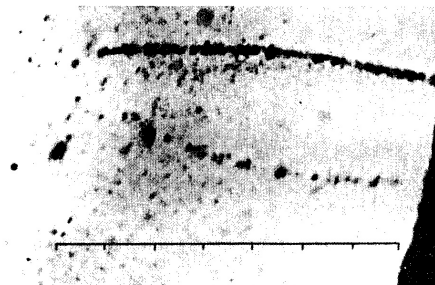
W 1932 zaobserwował cząstkę, która miała ładunek dodatni (jak proton), ale masę zbliżoną do masy elektronu.

⇒ pozyton (e^+)



W tym samym roku (1932) Paul Kunze z Rostocku zaobserwował cząstkę o dodatnim ładunku, ale masie mniejszej od masy protonu i większej od masy elektronu (pozytonu) \Rightarrow mion

Obserwacja została opublikowana, ale nie została poprawnie zinterpretowana...



\leftarrow mion (μ^+)

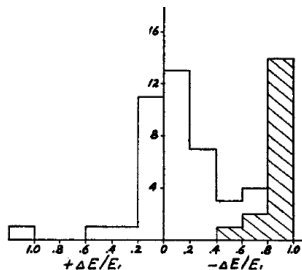
\leftarrow elektron (e^-)

W 1936 amerykańscy fizycy Carl D. Anderson i Seth Neddermeyer przedstawili wyniki pomiaru dużej liczby cząstek promieniowania.

Doszli do wniosku, że wytłumaczenie wyników pochłaniania cząstek w ołowiu wymaga istnienia dwóch różnych typów cząstek:

elektrony

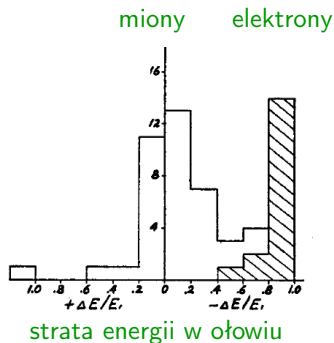
- słabo przenikliwych, zatrzymujących się w ołowianej płycie
⇒ elektrony i pozytony



strata energii w ołowiu

W 1936 amerykańscy fizycy Carl D. Anderson i Seth Neddermeyer przedstawili wyniki pomiaru dużej liczby cząstek promieniowania.

Doszli do wniosku, że wytłumaczenie wyników pochłaniania cząstek w ołowiu wymaga istnienia dwóch różnych typów cząstek:



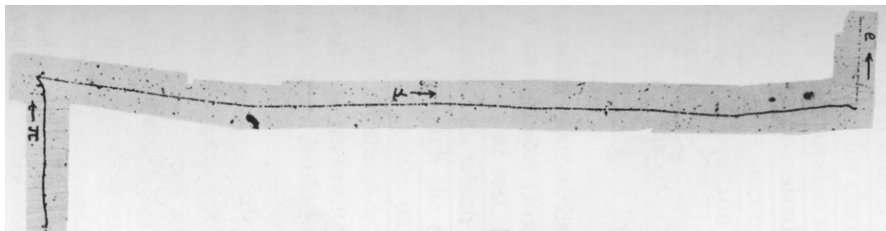
- słabo przenikliwych, zatrzymujących się w ołowianej płytce
⇒ elektrony i pozytony
- bardziej przenikliwe, wolno tracące energię w ołowiu o masie mniejszej niż masa protonu
⇒ nowe cząstki !
miony μ^\pm

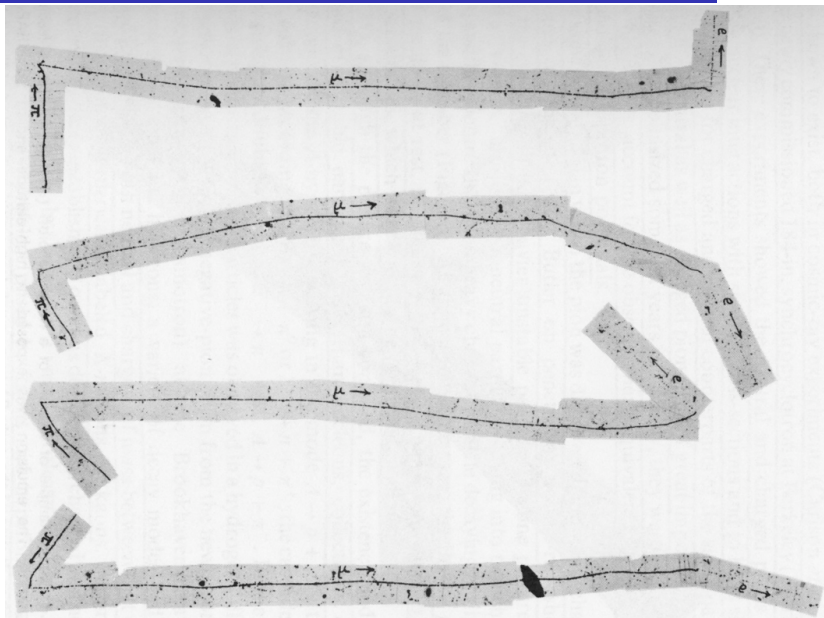
W roku 1947, grupa Cecila Powella na Uniwersytecie w Bristolu prowadziła badania oddziaływań cząstek promieniowania kosmicznego w emulsji fotograficznej.

Odkryli, że miony (μ^\pm) są produkowane w rozpadach innych cząstek, pionów (π^\pm), które żyją jedynie setne części mikrosekundy.



Jeden ze zrekonstruowanych przypadków:



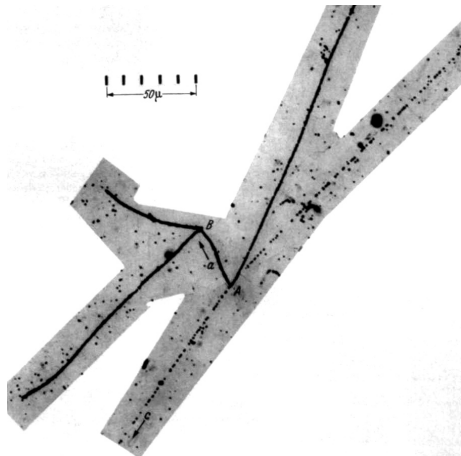


W roku 1948, grupa Powella na Bristol University dokonała kolejnego odkrycia badając oddziaływania promieniowania kosmicznego w emulsji.

Zaobserwowali rozpad nieznaney cząstki (wlatuje z prawej-górnej strony) na trzy piony.



Kaon był pierwszą odkrytą cząstką z rodziny cząsteł, które wkrótce zaczęto nazywać “dziwnymi” (strange).

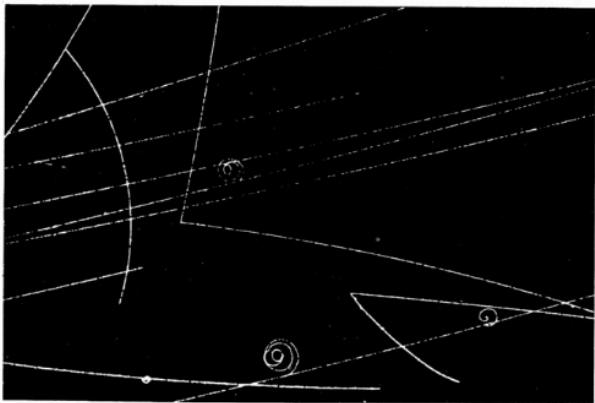


W październiku 1950, V. D. Hopper i S. Biswas odkryli kolejną dziwną, długożyciową cząstkę, rozpadającą się na proton i pion:

Jej średni czas życia był znacznie dłuższy niż oczekiwano

$$\Lambda \rightarrow p + \pi^-$$
$$\tau \approx 3 \cdot 10^{-10} \text{ s}$$

$$\Delta \rightarrow p + \pi^-$$
$$\tau \sim 10^{-23} \text{ s}$$



W październiku 1950, V. D. Hopper i S. Biswas odkryli kolejną dziwną, długożyciową cząstkę, rozpadającą się na proton i pion:

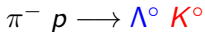
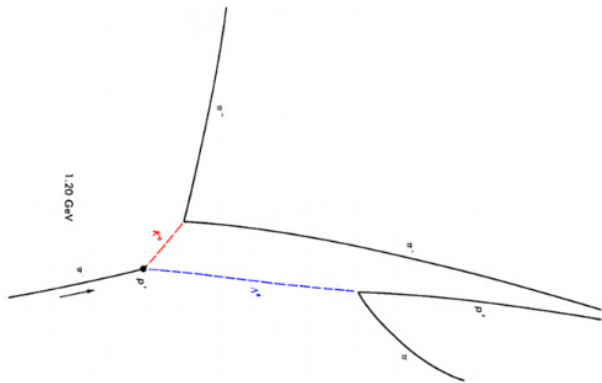
Jej średni czas życia był znacznie dłuższy niż oczekiwano

$$\Lambda \rightarrow p + \pi^-$$

$$\tau \approx 3 \cdot 10^{-10} \text{ s}$$

$$\Delta \rightarrow p + \pi^-$$

$$\tau \sim 10^{-23} \text{ s}$$



W październiku 1950, V. D. Hopper i S. Biswas odkryli kolejną dziwną, długożyciową cząstkę, rozpadającą się na proton i pion:

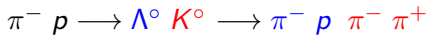
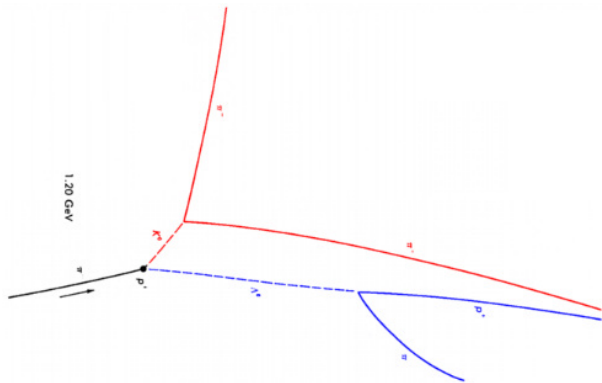
Jej średni czas życia był znacznie dłuższy niż oczekiwano

$$\Lambda \rightarrow p + \pi^-$$

$$\tau \approx 3 \cdot 10^{-10} \text{ s}$$

$$\Delta \rightarrow p + \pi^-$$

$$\tau \sim 10^{-23} \text{ s}$$

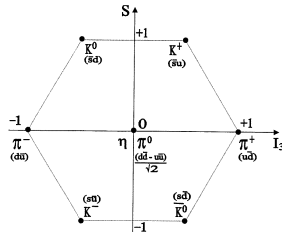
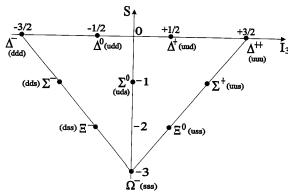
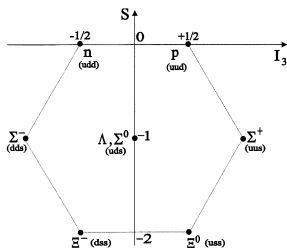


Po roku 1950 ruszyła lawina odkryć nowych cząstek
(m.in. dzięki wynalezieniu komory pęcherzykowej i synchrotronu)

Można je było pogrupować w multiplety cząstek o podobnych własnościach.

Zaczęło to przypominać układ okresowy pierwiastków.

⇒ wskazówka, że należy szukać bardziej fundamentalnego opisu



Dziwność (S) była jednym z kryteriów tej klasyfikacji

⇒ podwaliny pod późniejszy rozwój modelu kwarków

Wraz z kolejnymi odkryciami naukowymi rozwijane też były nowe techniki detekcji i nowe źródła cząstek

1897	–	elektron	
1905	–	foton	
1911	–	jądro atomowe	komora mgłowa (Wilsona)
1919	–	proton	
1929	–		generator Van der Graaff'a
1931	–	neutron	cyklotron Lawrence'a
1932	–	pozyton	generator Cockcroft'a-Walton'a
1937	–	mion μ^{\pm}	

Wraz z kolejnymi odkryciami naukowymi rozwijane też były nowe techniki detekcji i nowe źródła cząstek

1897 – elektron

1905 – foton

1911 – jądro atomowe komora mgłowa (Wilsona)

1919 – proton

1929 – generator Van der Graaff'a

1931 – neutron cyklotron Lawrence'a

1932 – pozyton generator Cockcroft'a-Walton'a

1937 – mion μ^\pm

1947 – pion π^\pm

1949 – kaon K^\pm

1952 – komora pęcherzykowa

1955 – synchrotron

⇒ początek nowoczesnej fizyki cząstek

Wraz z kolejnymi odkryciami naukowymi rozwijane też były nowe techniki detekcji i nowe źródła cząstek

1897	–	elektron	
1905	–	foton	
1911	–	jądro atomowe	komora mgłowa (Wilsona)
1919	–	proton	
1929	–		generator Van der Graaff'a
1931	–	neutron	cyklotron Lawrence'a
1932	–	pozyton	generator Cockcroft'a-Walton'a
1937	–	mion μ^\pm	
1947	–	pion π^\pm	
1949	–	kaon K^\pm	
1952	–		komora pęcherzykowa
1955	–		synchrotron

⇒ początek nowoczesnej fizyki cząstek

Przyspieszaniem i detekcją cząstek zajmiemy się na kolejnych wykładach...