

# Wszechświat Cząstek Elementarnych dla Humanistów

## Początki fizyki cząstek

prof. dr hab. Aleksander Filip Żarnecki

Wykład ogólnouniwersytecki



15 października 2019

## Notacja naukowa

Ułatwia zapisywanie bardzo dużych i bardzo małych liczb:

- prędkość światła:  $c \approx 300000000 \text{ m/s} = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$
- rozmiar protonu:  $r \sim 0.000000000000001 \text{ m} = 1 \cdot 10^{-15} \text{ m}$
- masa Ziemi:  $m_Z \approx 5972000000000000000000000 \text{ kg} = 5.972 \cdot 10^{24} \text{ kg}$

Wykładnik potęgi 10 określa nam “**rzęd wielkości**”

Różnica o rząd wielkości to dużo!

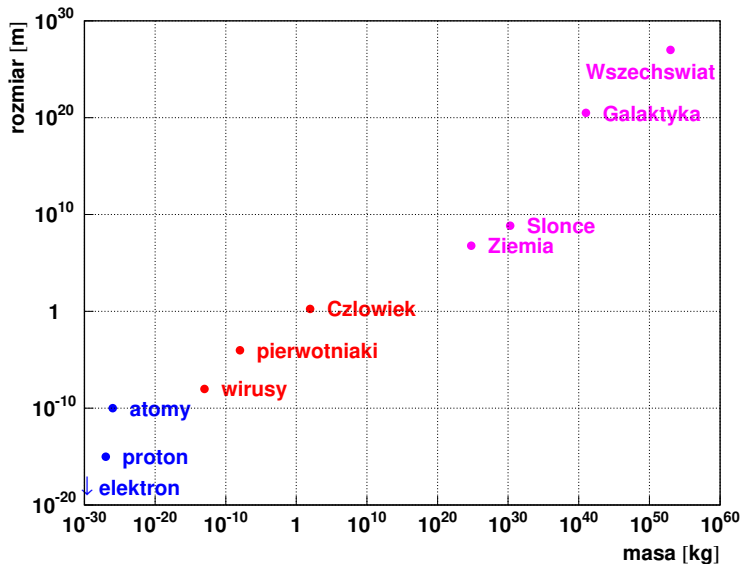
2-3 rzędy to bardzo dużo, **10 rzędów** to “**przepaść**”



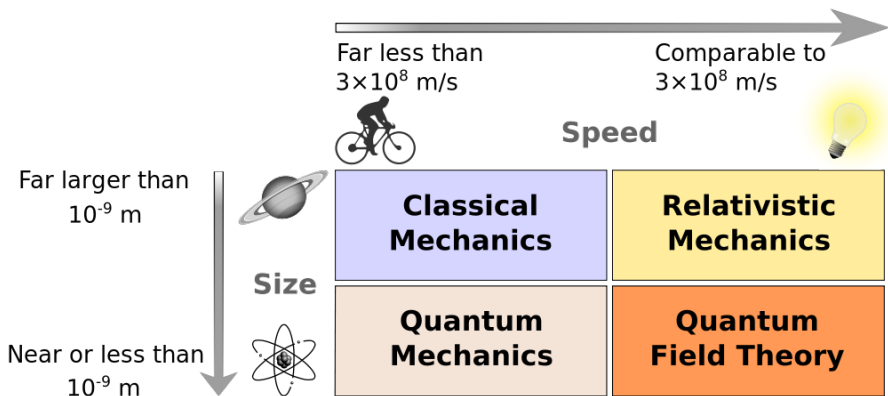
$\Leftarrow \times 10^{10} \Rightarrow$



## Skale w fizyce



## 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

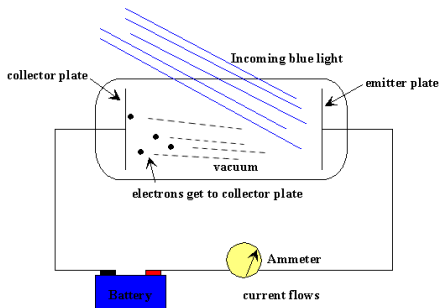
- 1 Foton
- 2 Promieniotwórczość
- 3 Jądro atomowe
- 4 Mechanika kwantowa
- 5 Promieniowanie kosmiczne
- 6 Nowe odkrycia

## 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:

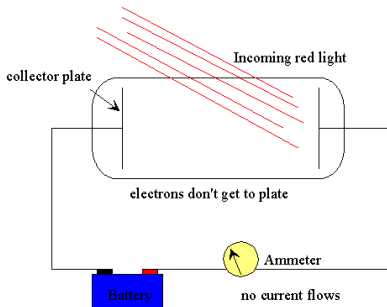


## Efekt fotoelektryczny

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

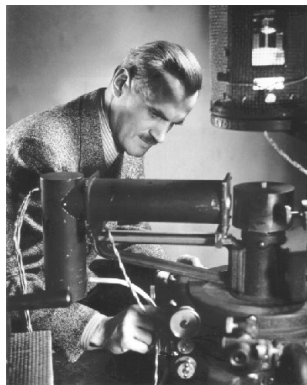
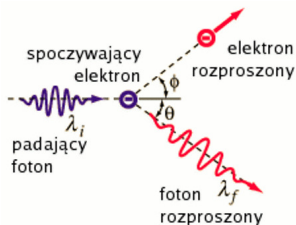
$$E_{\gamma}^{\text{blue}} > E_{\gamma}^{\text{green}} > E_{\gamma}^{\text{red}}$$



## Arthur Compton 1923

Rozpraszanie promieniowania X na kryształach

⇒ fotony rozpraszają się na quasi-swobodnych elektronach



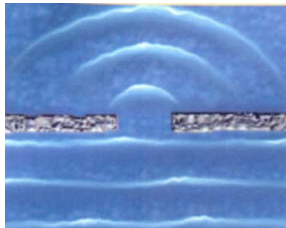
Compton wykazał, że fotony niosą nie tylko **energię**, ale i **pęd**

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

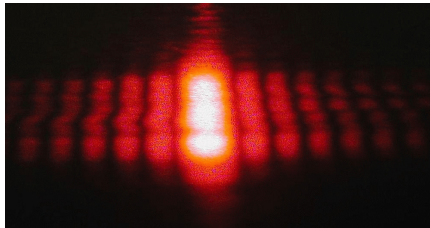
Jednocześnie jednak **fotony** zachowują się jak **fale**.  
Świadczą o tym m.in. zjawisko **dyfrakcji** i **interferencji** światła.

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.

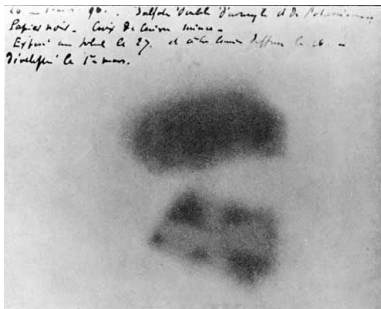
Becquerel starał się potwierdzić hipotezę, że jest to zjawisko fluorescencji - emisja indukowana wcześniejszym naświetleniem.

Przypuszczano, że "wzbudzony" uran może emitować promieniowanie X



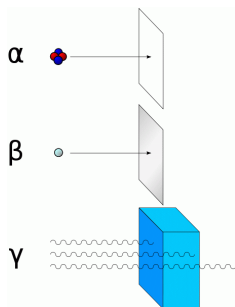
Najsilniejszym źródłem światła było wtedy Słońce.

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

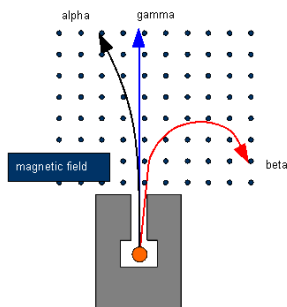


Naturalna promieniotwórczość była intensywnie badana na początku XX wieku, wyodrębniono **3 rodzaje** promieniowania:  $\alpha$ ,  $\beta$  i  $\gamma$ .

Rutherford badał przenikliwość promieniowania pochodzącego z różnych źródeł



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



**1903**

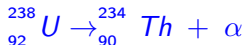
Nagroda Nobla dla H.Becquerela, M.Skłodowskiej-Curie i P.Curie

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  $\alpha$



- promieniowanie  $\beta$



- promieniowanie  $\gamma$

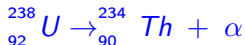


1903

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  $\alpha$



- promieniowanie  $\beta$



- promieniowanie  $\gamma$



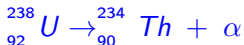
Choć na początku wciąż zakładano, że atomy są niepodzielne...

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  $\alpha$



jądra helu:  $2p2n$

- promieniowanie  $\beta$



elektrony ( $\beta^+$  - pozytony)

- promieniowanie  $\gamma$



wysokoenergetyczne fotony

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

Dopiero później zrozumieliśmy prawdziwą naturę promieniowania

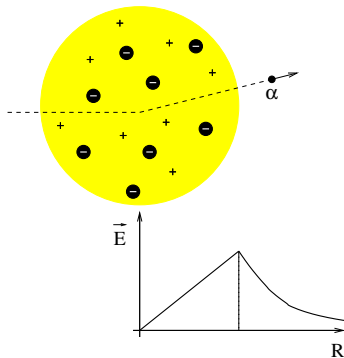
- 1 Foton
- 2 Promieniotwórczość
- 3 Jądro atomowe**
- 4 Mechanika kwantowa
- 5 Promieniowanie kosmiczne
- 6 Nowe odkrycia

## Doświadczenie Rutherforda

Rozpraszanie cząstek  $\alpha$  na cienkiej złotej folii



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



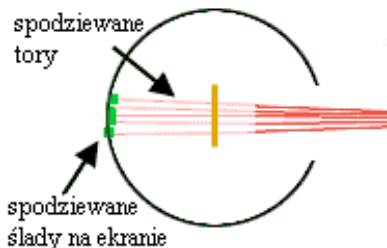
Model Thomsona:  
cała **objętość** atomu jednorodnie **naładowana dodatnio** ("ciasto"), a wewnątrz "pływają" **elektrony** ("rodzynki").



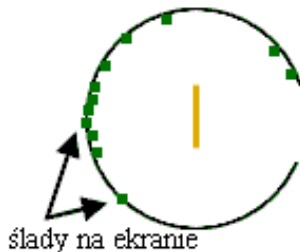
## Doświadczenie Rutherforda

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

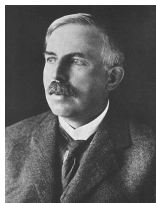
### Oczekiwane



### Uzyskane

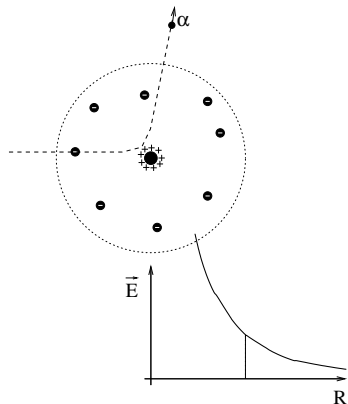


## Model Rutherforda (1911)



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.

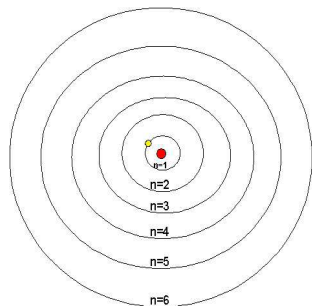


Cząstka  $\alpha$  zawsze czuje cały ładunek dodatni  $\Rightarrow$  duże kąty rozproszenia

## Atom Rutherforda

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

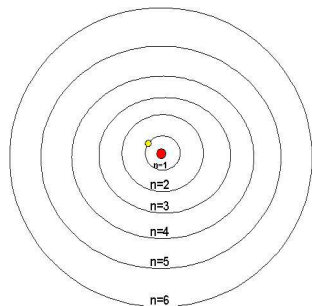
Biorąc pod uwagę tylko oddziaływanie  
elektrostatyczne, taki “planetarny” układ  
mógłby być stabilny.



## 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...**

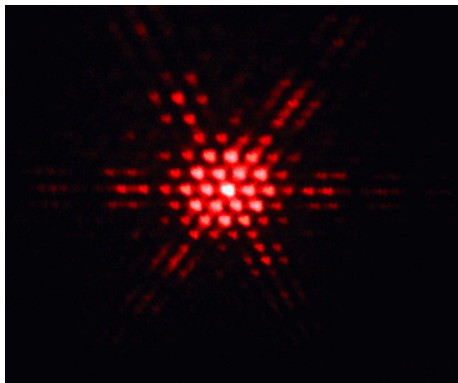
**Budowy atomu nie można było wytłumaczyć w oparciu o klasyczną fizykę!**  
Potrzebne było nowe spojrzenie...

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

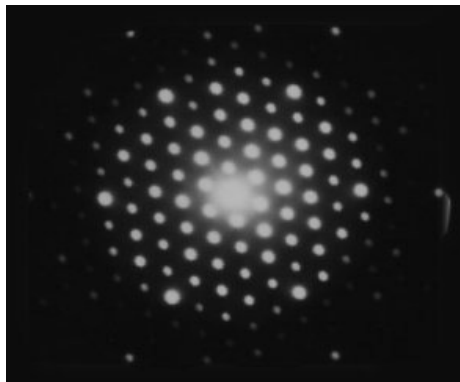
W roku 1923 Louis de Broglie wysunął hipotezę, że **wszystkie cząstki** powinny przejawiać własności **falowe** !

Dyfrakcja na strukturach heksagonalnych

**Światło**



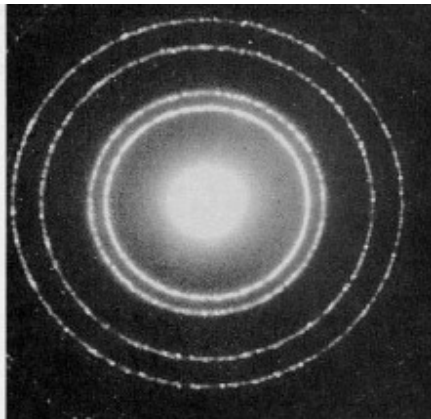
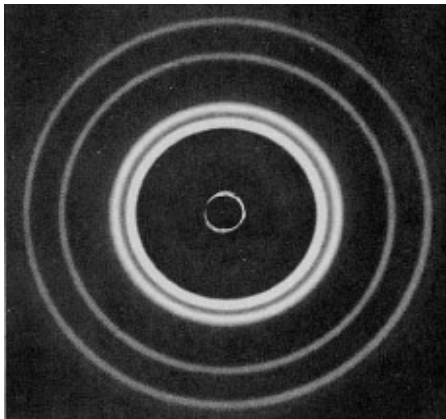
**Elektrony**



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)

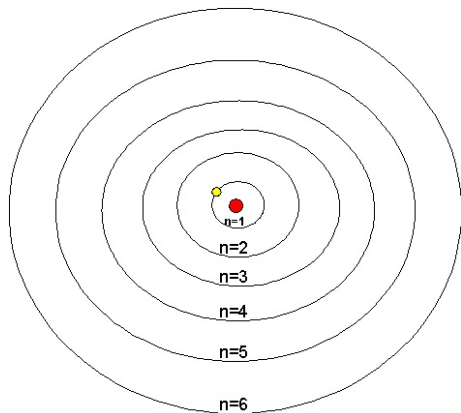
**Kwadrat amplitudy** funkcji falowej daje nam **prawdopodobieństwo** znalezienia cząstki w danym miejscu i danej chwili czasu  $p = |\psi(\vec{r}, t)|^2$

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

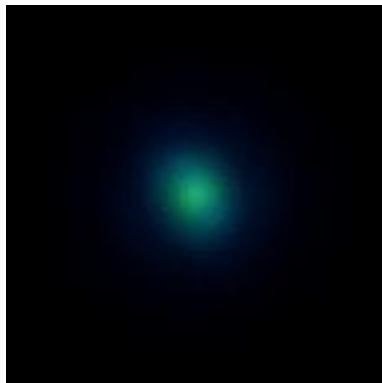
Nie możemy **dowolnie dokładnie** poznać stanu cząstki, np. jednocześnie zmierzyć położenie i pęd - **zasada nieoznaczoności**.

## Atom wodoru

Opis klasyczny

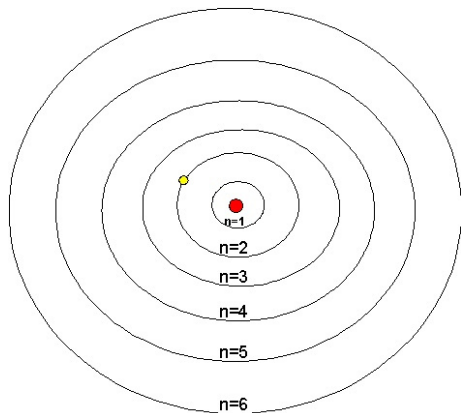


Opis kwantowy, stan 1s

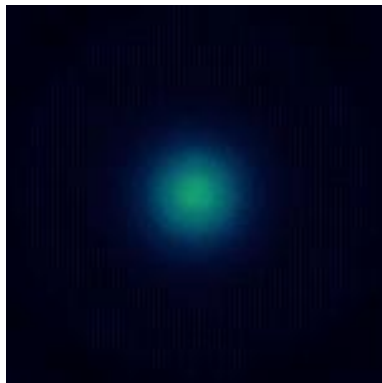


## Atom wodoru

Opis klasyczny

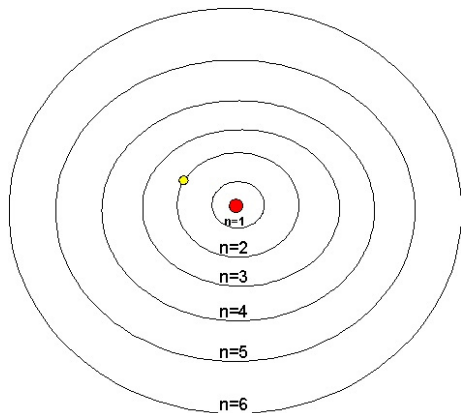


Opis kwantowy, stan 2s

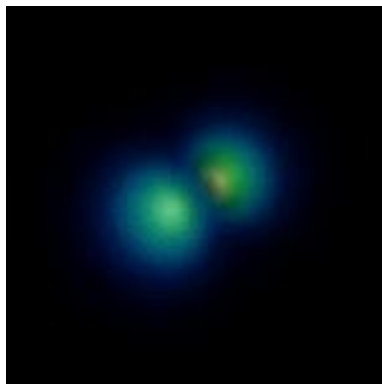


## Atom wodoru

Opis klasyczny



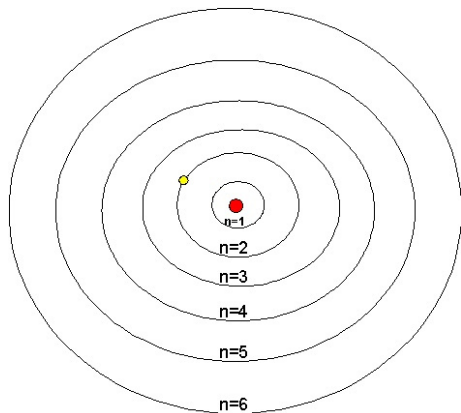
Opis kwantowy, stan  $2p_0$



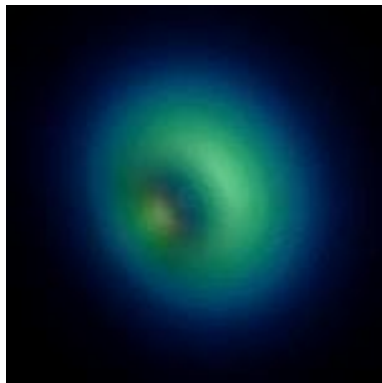


## Atom wodoru

Opis klasyczny

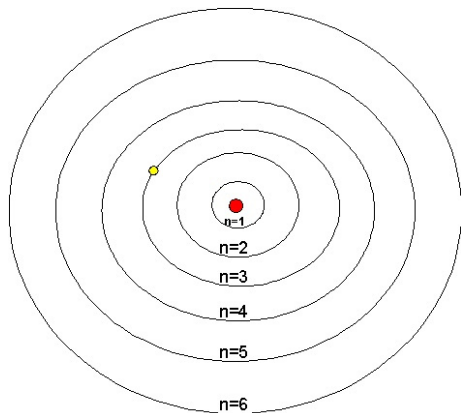


Opis kwantowy, stan 2p1

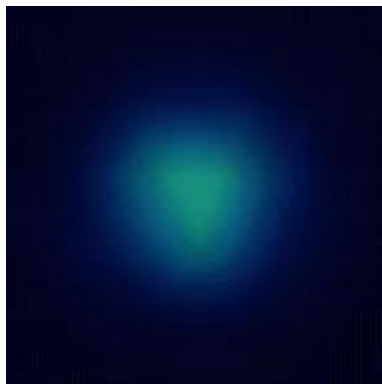


## Atom wodoru

Opis klasyczny

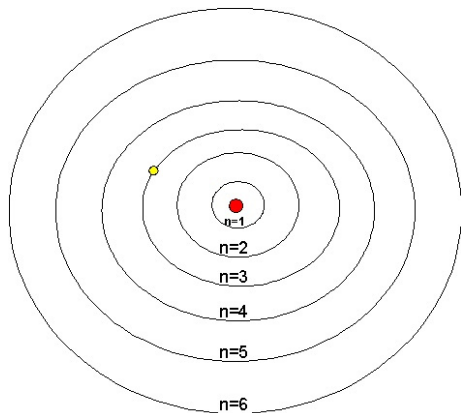


Opis kwantowy, stan  $3s$

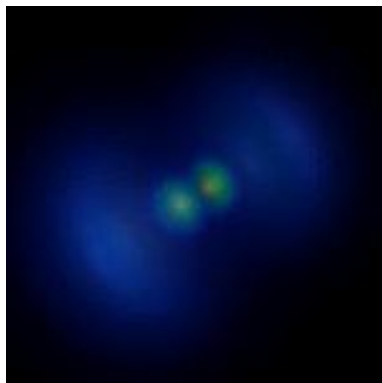


## Atom wodoru

Opis klasyczny

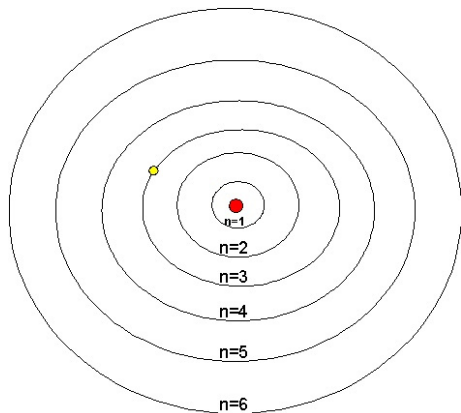


Opis kwantowy, stan  $3p_0$

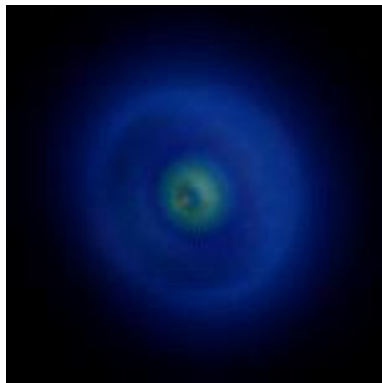


## Atom wodoru

Opis klasyczny

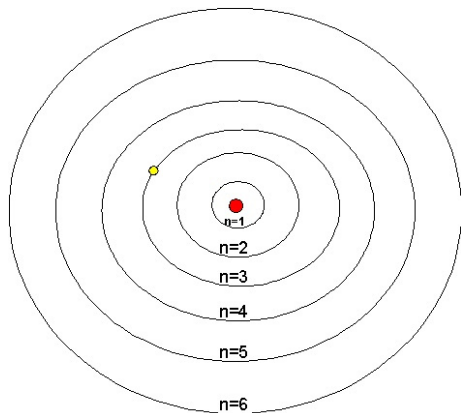


Opis kwantowy, stan 3p1

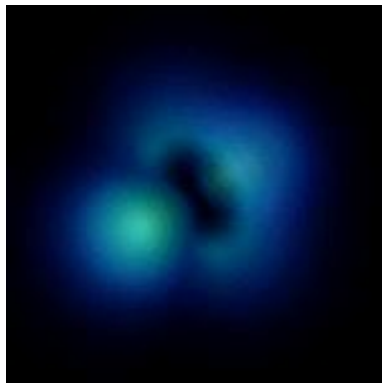


## Atom wodoru

Opis klasyczny

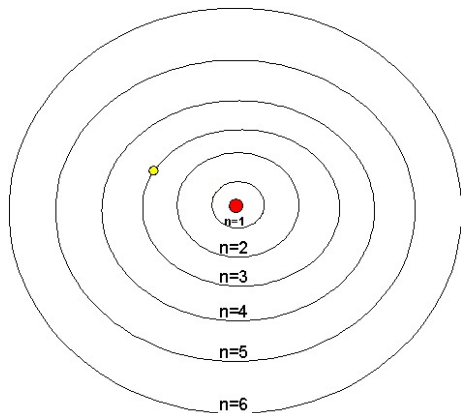


Opis kwantowy, stan  $3d_0$

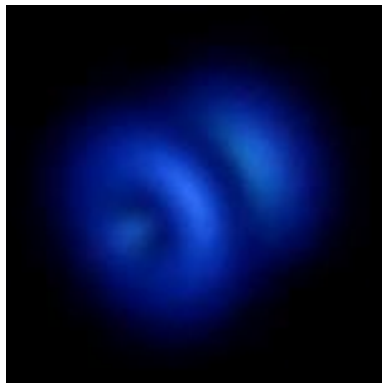


## Atom wodoru

Opis klasyczny

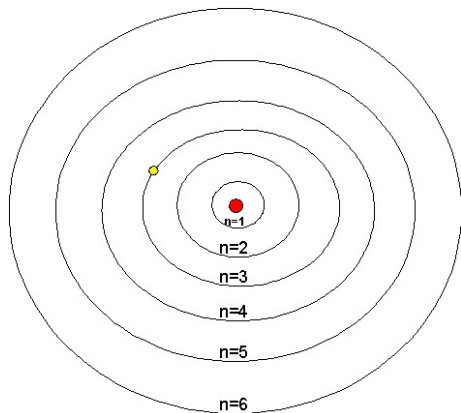


Opis kwantowy, stan 3d1

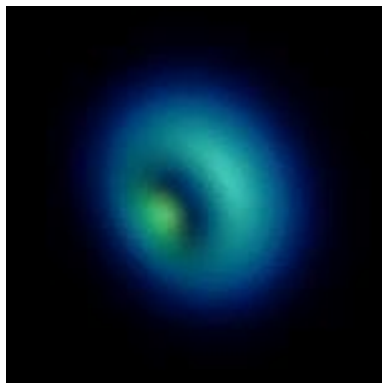


## Atom wodoru

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...**

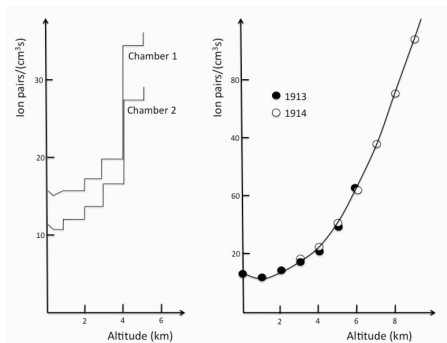
W 1900, Charles Wilson odkrył, że cząsteczki powietrza są częściowo zjonizowane. Przypisał to **naturalnej promieniotwórczości** pierwiastków znajdujących się w skorupie ziemskiej.

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

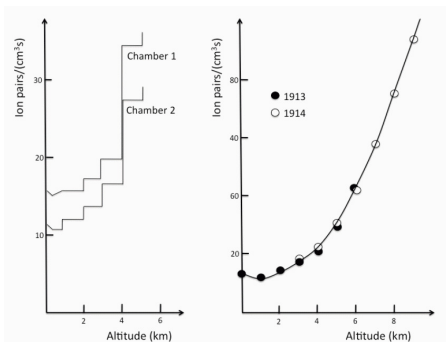
W **1912**, **Victor Hess** pokazał, że jonizacja rośnie z wysokością.



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**...

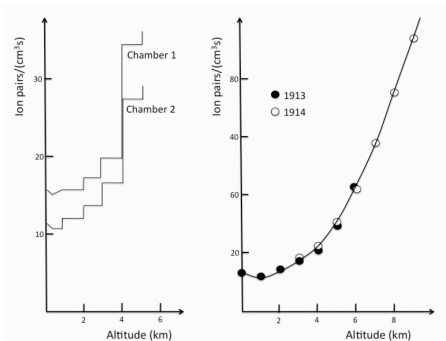


Dokładne pomiary przeprowadzone przez **Victora Hessa** w roku **1913** pokazały, że jonizacja rośnie bardzo szybko na wysokościach powyżej 2 km. Jedynym sensownym wytłumaczeniem była obecność promieniowania, które dociera z **przestrzeni kosmicznej**...



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

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**...

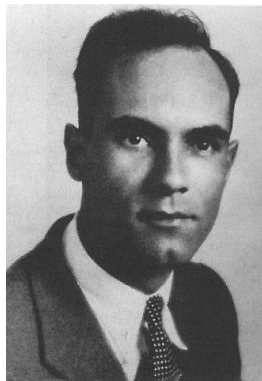


Cząstki docierające z kosmosu mają też dużo wyższe energie niż promieniowanie pochodzące ze źródeł promieniotwórczych!..

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

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**



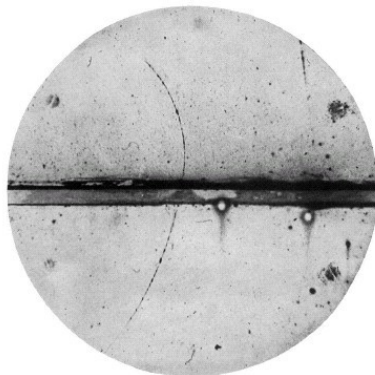


W latach trzydziestych i czterdziestych XX wieku budowano wiele **eksperymentów balonowych** wykorzystujących promieniowanie kosmiczne.

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

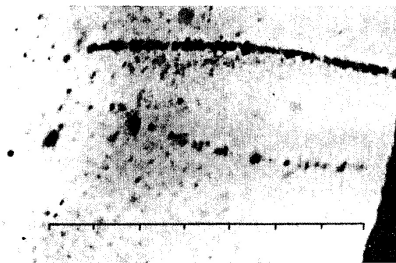
W 1932 zaobserwował cząstkę, która miała ładunek dodatni (jak proton), ale masę zbliżoną do masy elektronu.

⇒ **pozyton** ( $e^+$ )



W tym samym roku (1932) Paul Kunze z Rostocku zaobserwował cząstkę  
masie **mniejszej od masy protonu** i **większej od masy elektronu** (pozytonu)  
i dodatnim ładunku  $\Rightarrow$  **nowa cząstka?**

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



$\leftarrow$  mion ( $\mu^+$ )

$\leftarrow$  elektron ( $e^-$ )

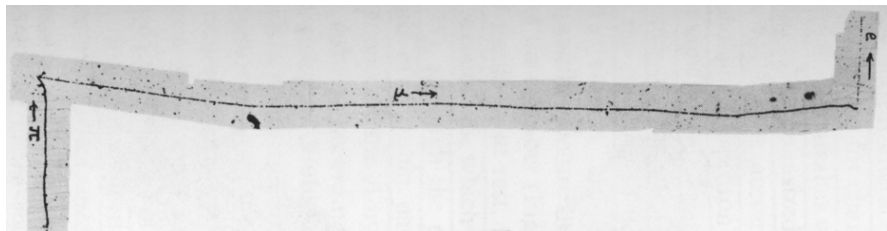
Dopiero w 1936 amerykańscy fizycy Carl D. Anderson i Seth Neddermeyer  
przedstawili wyniki pomiaru dużej liczby cząstek promieniowania  
 $\Rightarrow$  potwierdzenie istnienia **mionów** (**uznane za odkrycie**)

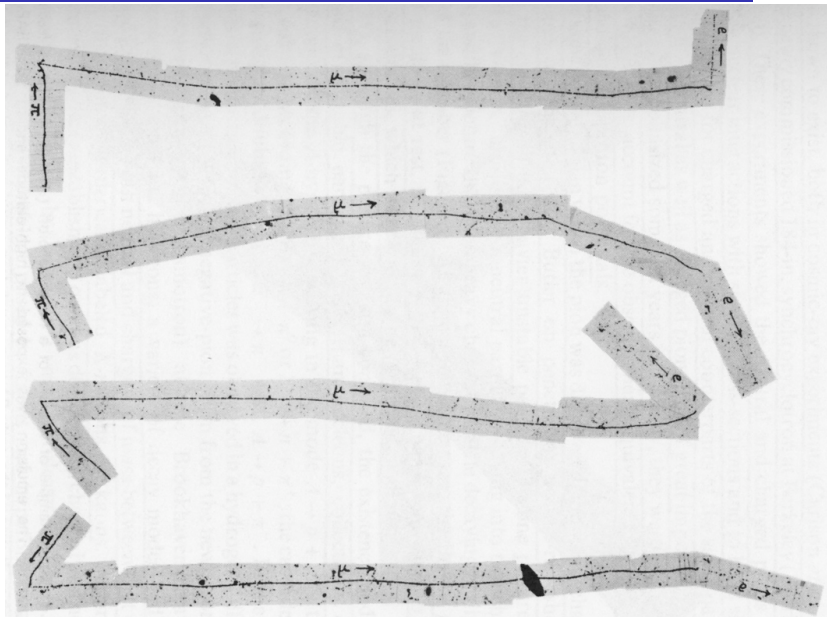
W roku 1947, grupa Cecila Powella na Uniwersytecie w Bristolu prowadziła badania oddziaływań cząstek promieniowania kosmicznego w **emulsji fotograficznej**.

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



Jeden ze zrekonstruowanych przypadków:



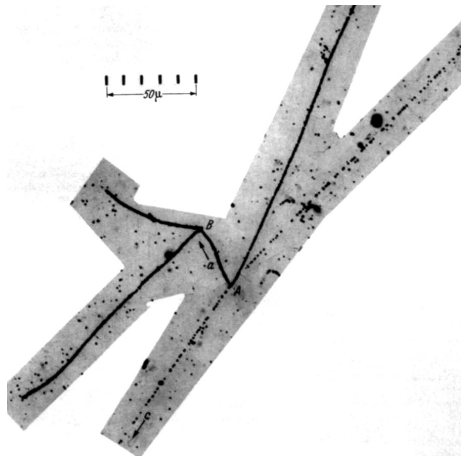


W roku 1948, grupa Powella na Bristol University dokonała kolejnego odkrycia badając oddziaływania promieniowania kosmicznego w emulsji.

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



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

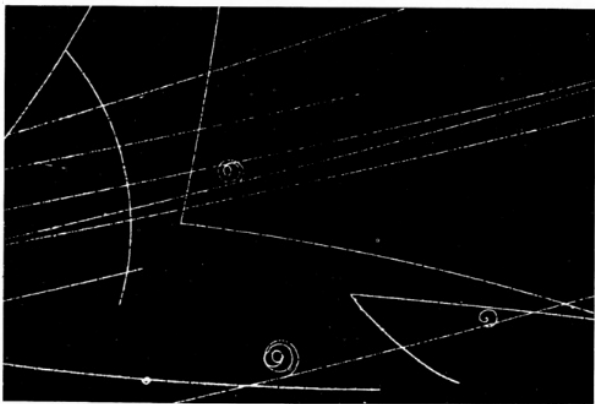


W październiku 1950, V. D. Hopper i S. Biswas odkryli kolejną dziwną, długożyciową cząstkę, rozpadającą się na proton i pion:

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:

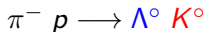
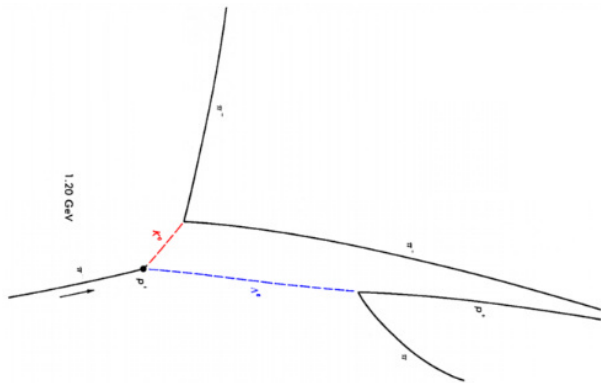
Jej średni czas życia był znacznie dłuższy niż oczekiwano

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

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

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

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



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

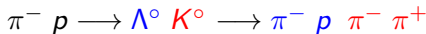
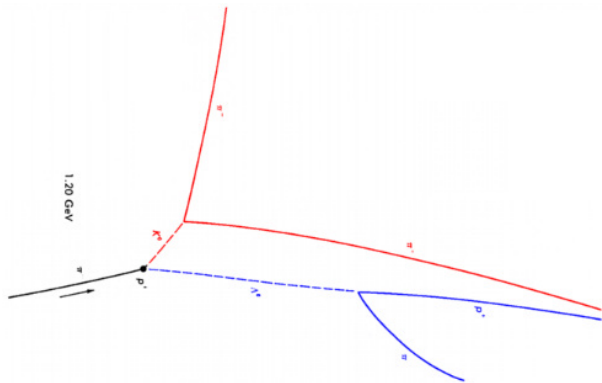
Jej średni czas życia był znacznie dłuższy niż oczekiwano

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

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

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

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



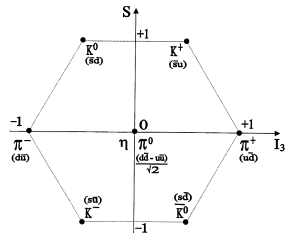
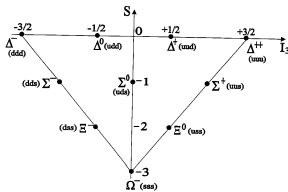
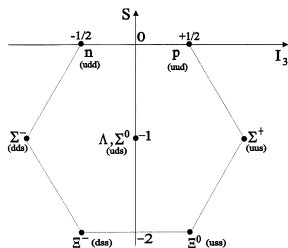


Po roku 1950 ruszyła lawina odkryć nowych cząstek  
(m.in. dzięki wynalezieniu komory pęcherzykowej i synchrotronu)

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 $\mu^\pm$	

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  $\mu^\pm$

1947 – pion  $\pi^\pm$

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 $\mu^\pm$	
1947	–	pion $\pi^\pm$	
1949	–	kaon $K^\pm$	
1952	–		komora pęcherzykowa
1955	–		synchrotron

⇒ początek nowoczesnej fizyki cząstek

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