

Wszechświat Cząstek Elementarnych dla Humanistów

Początki fizyki cząstek

prof. dr hab. Aleksander Filip Żarnecki

Wykład ogólnouniwersytecki



15 października 2024

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!

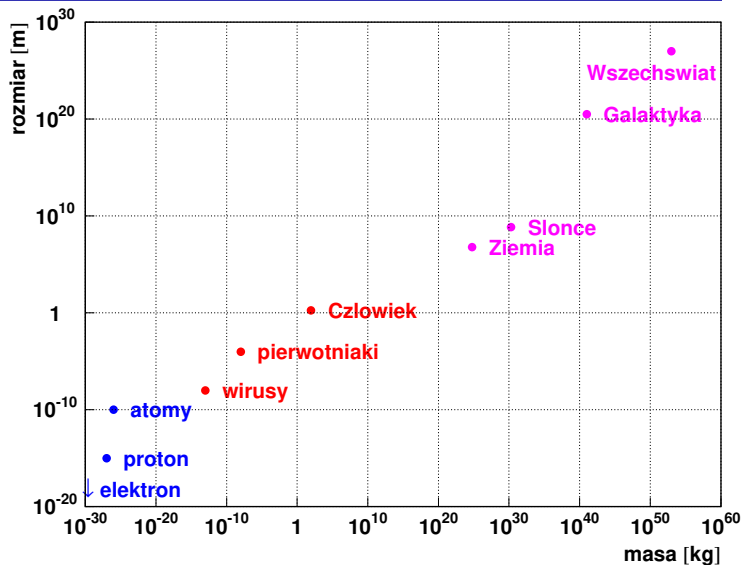
2-3 rzędy to bardzo dużo, 10 rzędów to “**przepaść**”



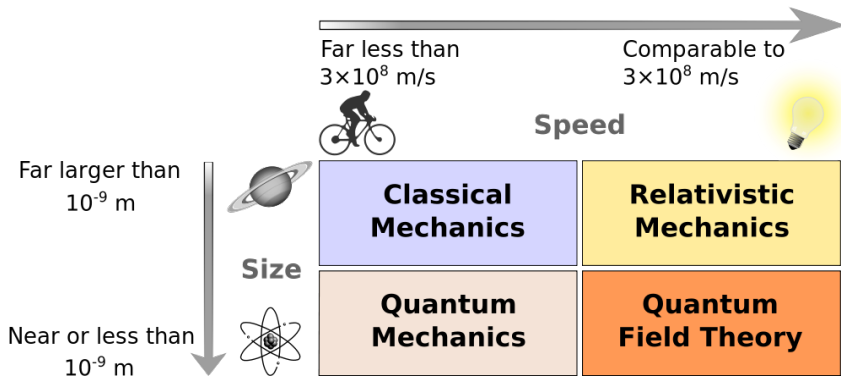
$\Leftrightarrow \times 10^{10} \Rightarrow$



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

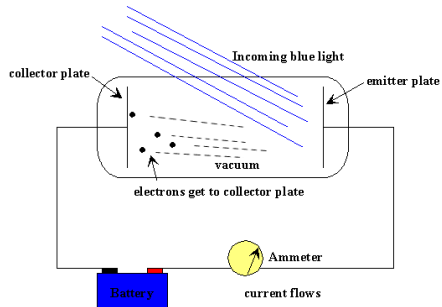
- 1 Foton
- 2 Promieniotwórczość
- 3 Jądro atomowe
- 4 Mechanika kwantowa
- 5 Promieniowanie kosmiczne
- 6 Nowe odkrycia

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:

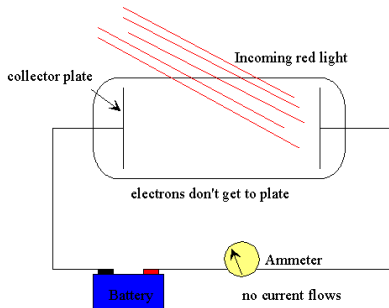


Efekt fotoelektryczny

Odkryty przez Hertza w 1887:

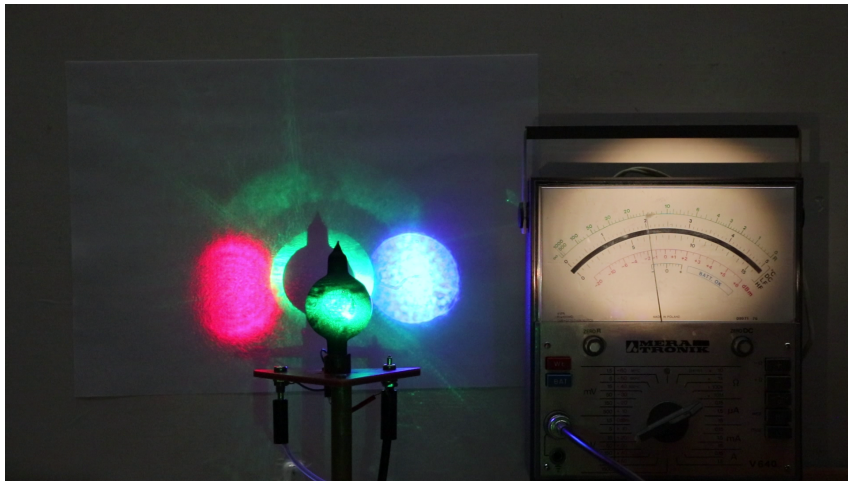
światło wybija elektrony z metalu

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 - pokaz



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

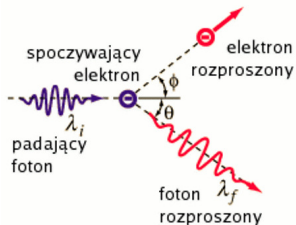
$$E_{\gamma}^{\text{blue}} > E_{\gamma}^{\text{green}} > E_{\gamma}^{\text{red}}$$



Arthur Compton 1923

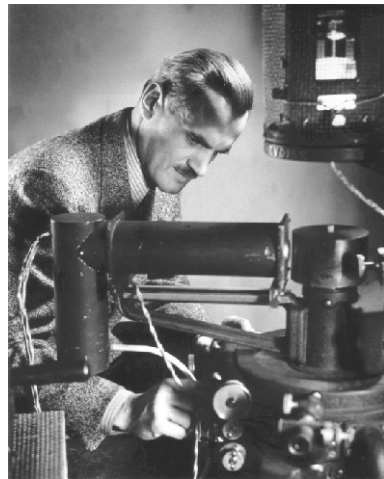
Rozpraszanie promieniowania X na kryształach

⇒ fotony rozpraszają się na quasi-swobodnych elektronach



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

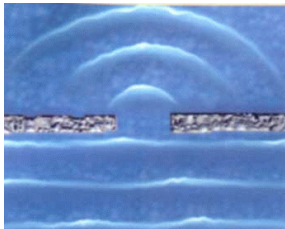
⇒ zachowują się jak “zwykłe” **cząstki**



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



pokaz na poprzednim wykładzie

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!**

za chwilę do tego wrócimy...

- 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.

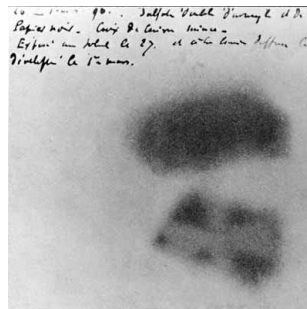
Becquerel starał się potwierdzić hipotezę, że jest to zjawisko fluorescencji - emisja indukowana wcześniejszym naświetleniem.

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.

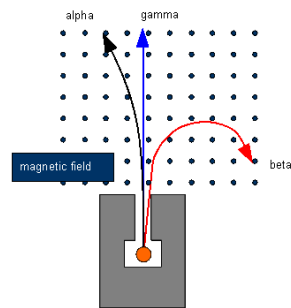
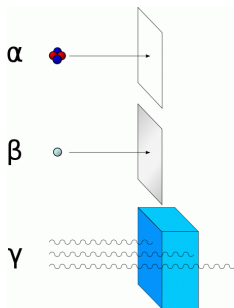
Po pewnym czasie uznał, że mimo wszystko je wywoła...



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



Przenikliwość promieniowania - pokaz



1903

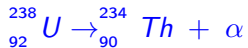
Nagroda Nobla dla H.Becquerela, M.Sklodowskiej-Curie i P.Curie

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

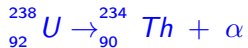


1903

Nagroda Nobla dla H.Becquerela, M.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



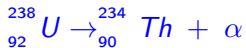
Na początku wciąż zakładano, że atomy są niepodzielne...

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

Na początku wciąż zakładano, że atomy są niepodzielne...

Dopiero później zrozumieliśmy prawdziwą naturę promieniowania

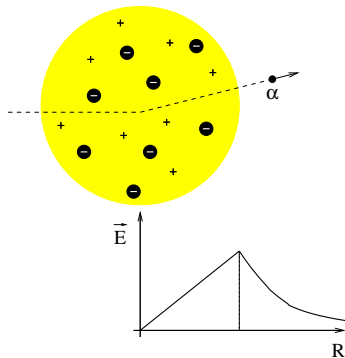
- 1 Foton
- 2 Promieniotwórczość
- 3 Jądro atomowe**
- 4 Mechanika kwantowa
- 5 Promieniowanie kosmiczne
- 6 Nowe odkrycia

Doświadczenie Rutherforda

Rozpraszanie cząstek α na cienkiej złotej folii



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

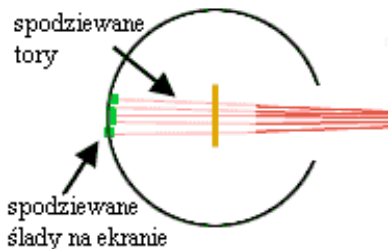


Model Thomsona:
cała **objętość** atomu jednorodnie **naładowana dodatnio** ("ciasto"), a wewnątrz "pływają" **elektrony** ("rodzynki").

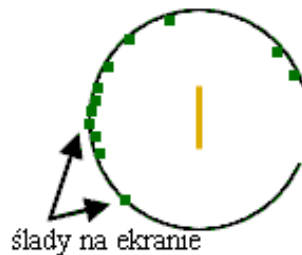
Doświadczenie Rutherforda

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

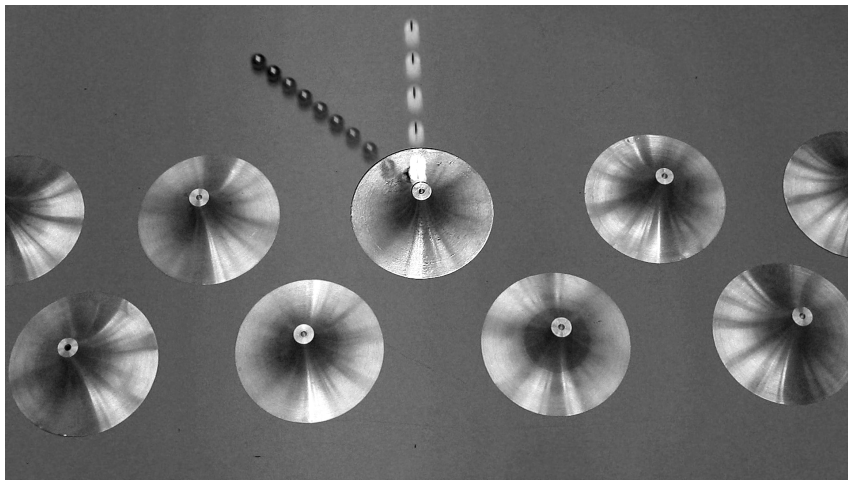
Oczekiwane



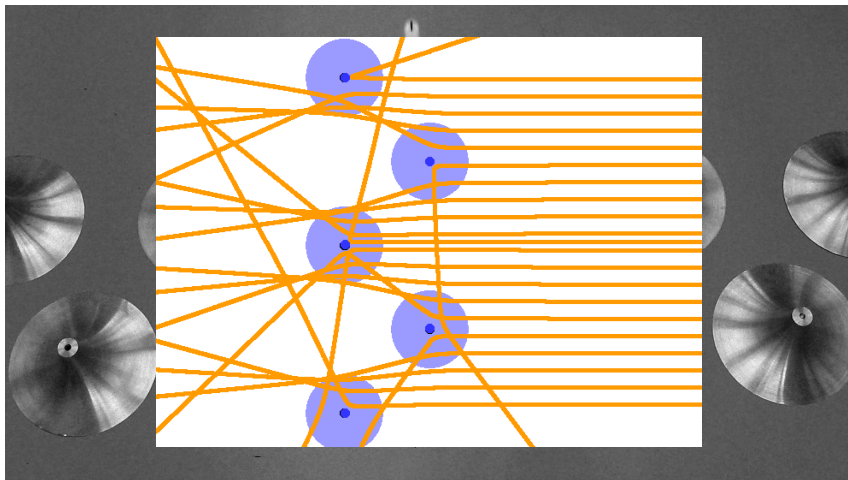
Uzyskane



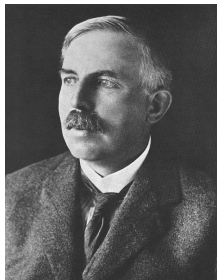
Doświadczenie Rutherforda - model



Doświadczenie Rutherforda - model

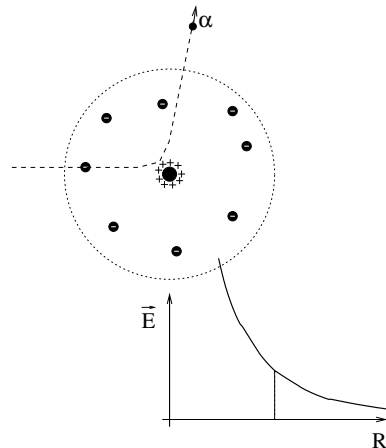


Model Rutherforda (1911)



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.

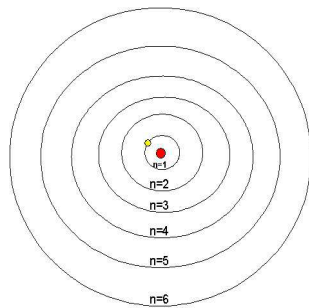


Cząstka α zawsze czuje cały ładunek dodatni \Rightarrow duże kąty rozproszenia

Atom Rutherforda

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

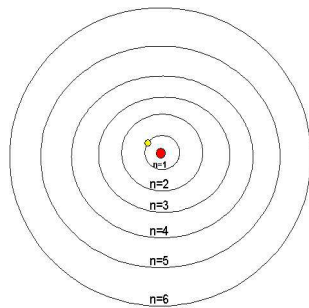
Biorąc pod uwagę tylko oddziaływanie elektrostatyczne,
taki "planetarny" układ mógłby być stabilny...



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!

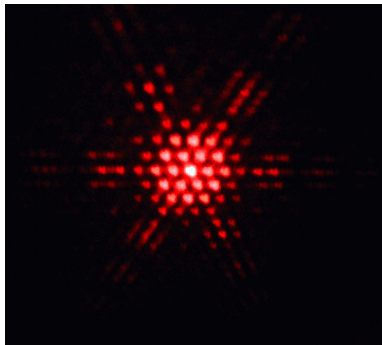
Potrzebne było nowe spojrzenie...

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

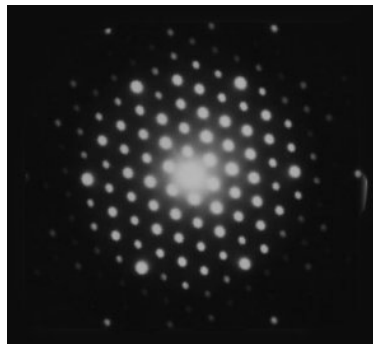
W roku 1923 Louis de Broglie wysunął hipotezę, że **wszystkie cząstki** powinny przejawiać własności **falowe** !

Dyfrakcja na strukturach heksagonalnych

Światło

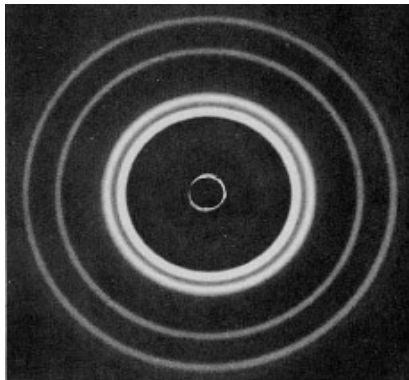


Elektrony

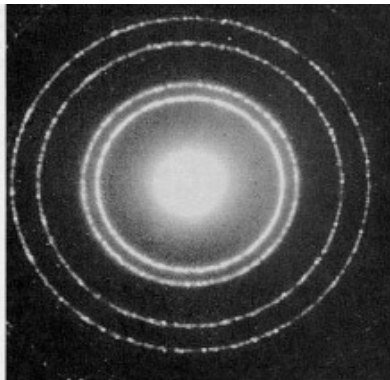


Obraz przy przechodzeniu przez cienką folię aluminiową

Promieniowanie X

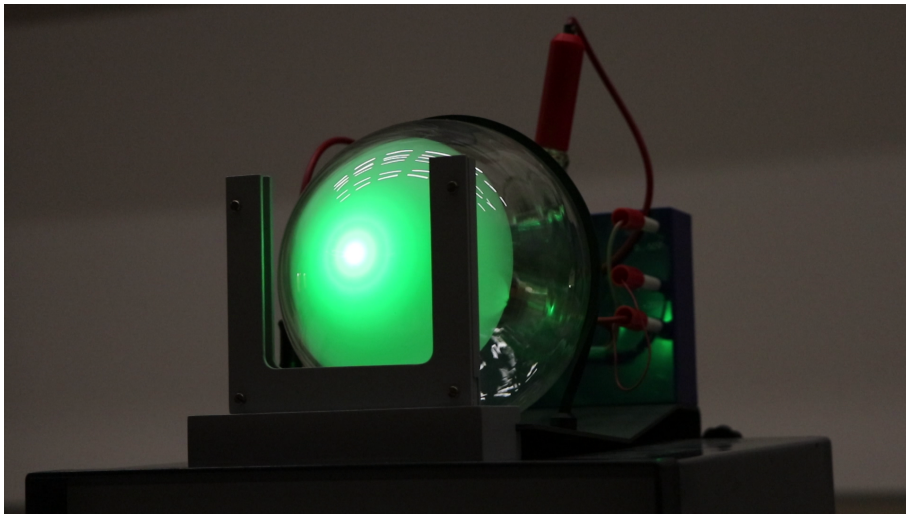


Elektrony

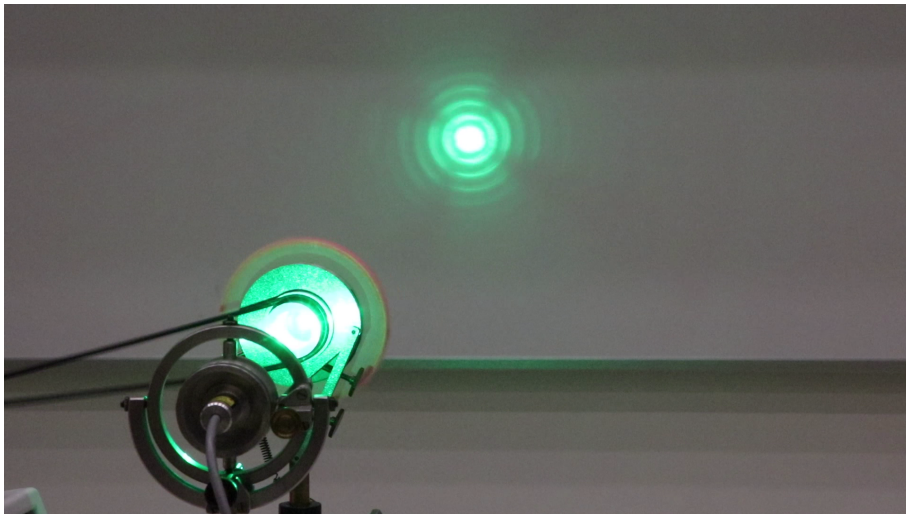


Elektrony zachowują się jak fale !
Potwierdzenie hipotezy de Broglie'a.

Dyfrakcja elektronów - pokaz



Dyfrakcja elektronów - pokaz



Mechanika klasyczna

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

Mechanika kwantowa

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

Przebieg fali opisuje tzw. funkcja falowa $\psi(\vec{r}, t)$, a jej zachowanie 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 w **przyszłości**.

Mechanika kwantowa

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

Przebieg fali opisuje tzw. funkcja falowa $\psi(\vec{r}, t)$, a jej zachowanie potrafimy opisać odpowiednimi równaniami (np. równanie Schrödingera, 1925)

Kwadrat amplitudy fali opisującej cząstkę 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 w **przyszłości**.

Mechanika kwantowa

Ruch cząstki to rozchodzenie się "fali prawdopodobieństwa"

Przebieg fali opisuje tzw. funkcja falowa $\psi(\vec{r}, t)$, a jej zachowanie potrafimy opisać odpowiednimi równaniami (np. równanie Schrödingera, 1925)

Kwadrat amplitudy fali opisującej cząstkę 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 w **przyszłości**.

Mechanika kwantowa

Ruch cząstki to rozchodzenie się "fali prawdopodobieństwa"

Przebieg fali opisuje tzw. funkcja falowa $\psi(\vec{r}, t)$, a jej zachowanie potrafimy opisać odpowiednimi równaniami (np. równanie Schrödingera, 1925)

Kwadrat amplitudy fali opisującej cząstkę 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.

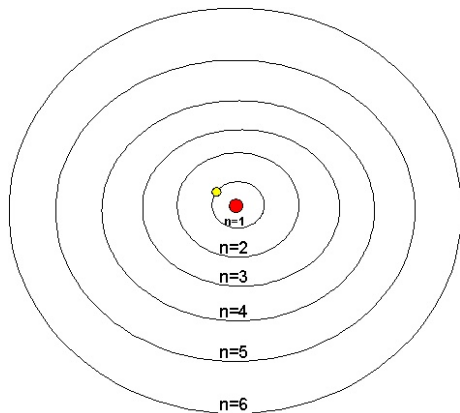
Wcześniej możemy tylko "zgadywać"...

Analogia makroskopowa: kot Schrödingera

o tym czy żyje przekonujemy się dopiero otwierając pudełko...

Atom wodoru

Opis klasyczny



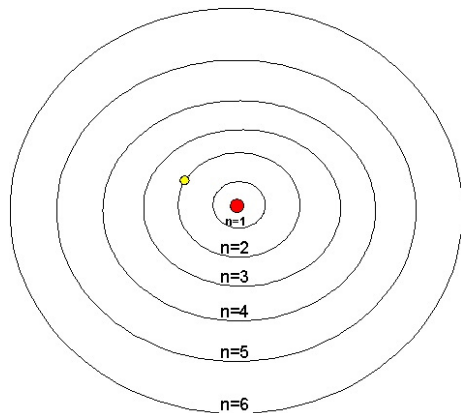
Wizualizacja 3D gęstości prawdopodobieństwa

Opis kwantowy, stan 1s



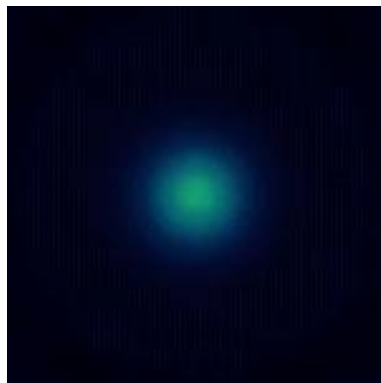
Atom wodoru

Opis klasyczny



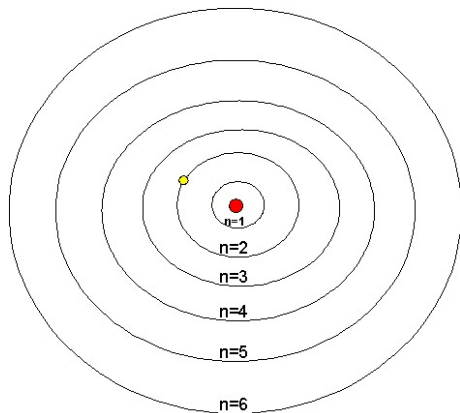
Wizualizacja 3D gęstości prawdopodobieństwa

Opis kwantowy, stan 2s



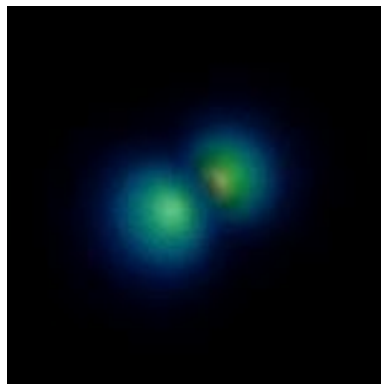
Atom wodoru

Opis klasyczny



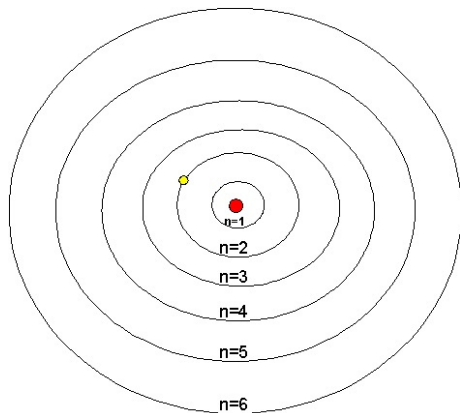
Wizualizacja 3D gęstości prawdopodobieństwa

Opis kwantowy, stan $2p_0$



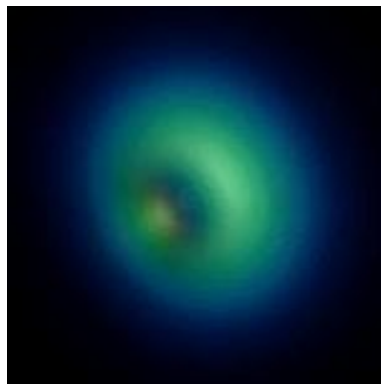
Atom wodoru

Opis klasyczny



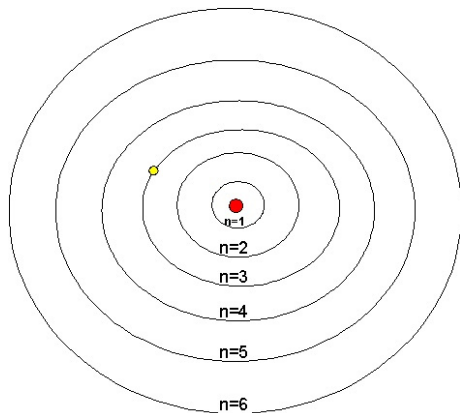
Wizualizacja 3D gęstości prawdopodobieństwa

Opis kwantowy, stan $2p_1$



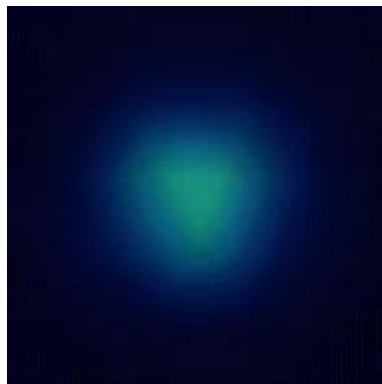
Atom wodoru

Opis klasyczny



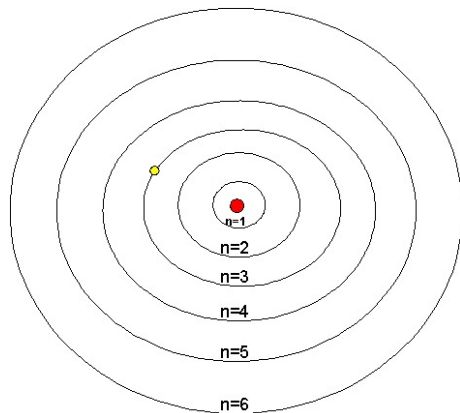
Wizualizacja 3D gęstości prawdopodobieństwa

Opis kwantowy, stan 3s



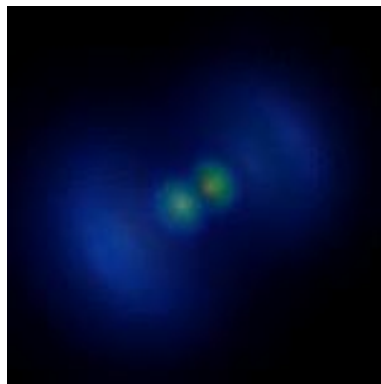
Atom wodoru

Opis klasyczny



Wizualizacja 3D gęstości prawdopodobieństwa

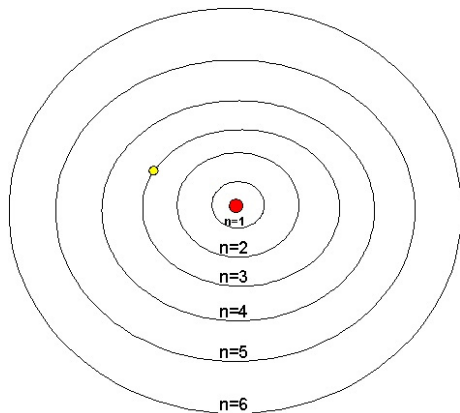
Opis kwantowy, stan $3p_0$



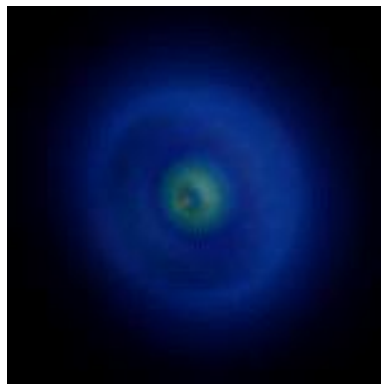
Dużo większa różnorodność niż w opisie klasycznym...

Atom wodoru

Opis klasyczny



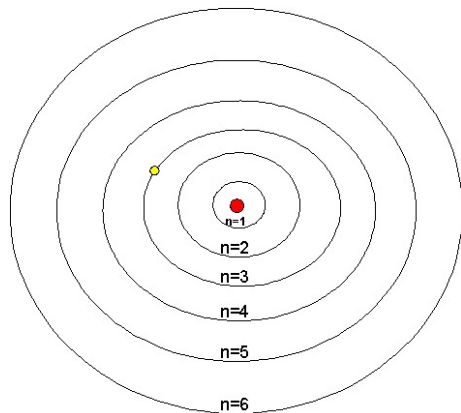
Wizualizacja 3D gęstości prawdopodobieństwa

Opis kwantowy, stan $3p_1$ 

Dużo większa różnorodność niż w opisie klasycznym...

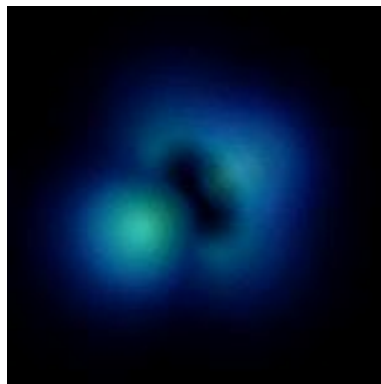
Atom wodoru

Opis klasyczny



Wizualizacja 3D gęstości prawdopodobieństwa

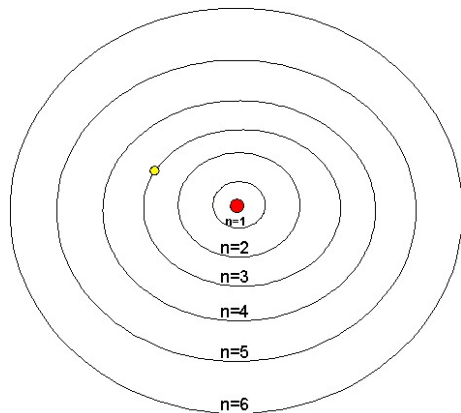
Opis kwantowy, stan 3d0



Dużo większa różnorodność niż w opisie klasycznym...

Atom wodoru

Opis klasyczny



Wizualizacja 3D gęstości prawdopodobieństwa

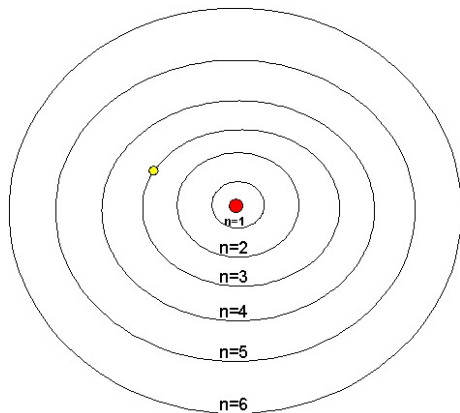
Opis kwantowy, stan 3d1



Dużo większa różnorodność niż w opisie klasycznym...

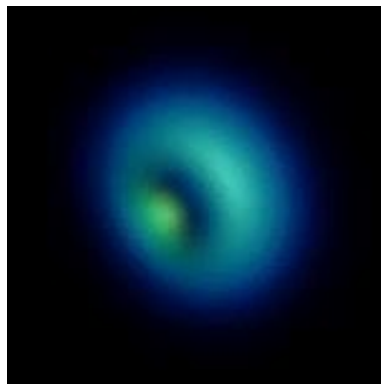
Atom wodoru

Opis klasyczny



Wizualizacja 3D gęstości prawdopodobieństwa

Opis kwantowy, stan 3d2



Dużo większa różnorodność niż w opisie klasycznym...

- 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.

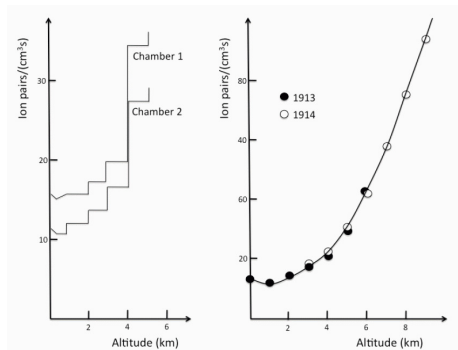
Pierwsze pomiary **Theodora Wulfa** na wieży Eiffel pokazały jednak, że jonizacja nie maleje z wysokością.

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...

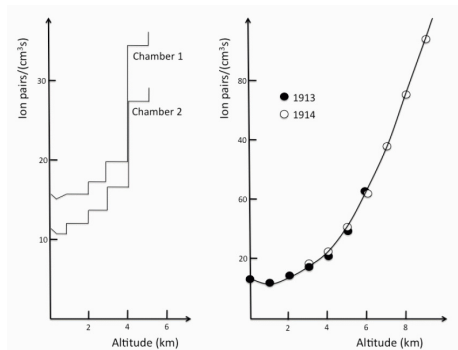
Jedynym sensownym wytłumaczeniem była obecność promieniowania, które dociera z [przestrzeni kosmicznej](#)...



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**...

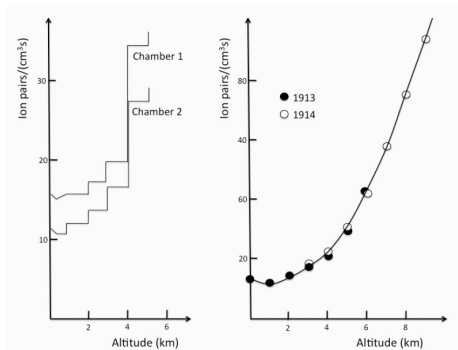
Jednak aż do 1932 roku pozostawało kwestią otwartą czy są to cząstki naładowane czy promieniowanie gamma...



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**...

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

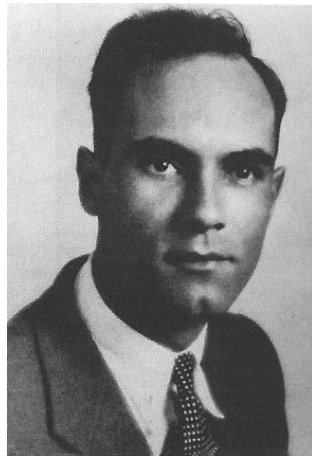


Cząstki docierające z kosmosu mają też dużo wyższe energie niż promieniowanie pochodzące ze źródeł promieniotwórczych!..

- 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**

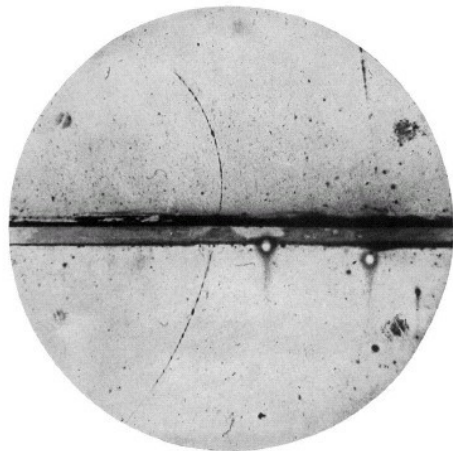


W latach trzydziestych i czterdziestych XX wieku budowano wiele **eksperymentów balonowych** wykorzystujących promieniowanie kosmiczne.

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

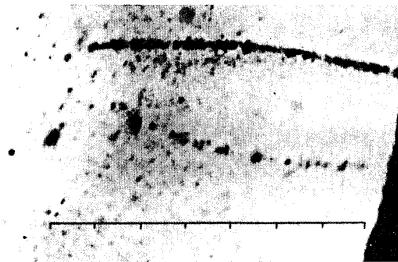
W 1932 zaobserwował cząstkę, która miała ładunek dodatni (jak proton), ale masę zbliżoną do masy elektronu.

⇒ **pozyton** (e^+)



W tym samym roku (1932) Paul Kunze z Rostocku zaobserwował cząstkę masy **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 (μ^+)

\Leftarrow elektron (e^-)

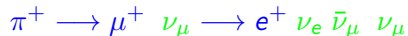
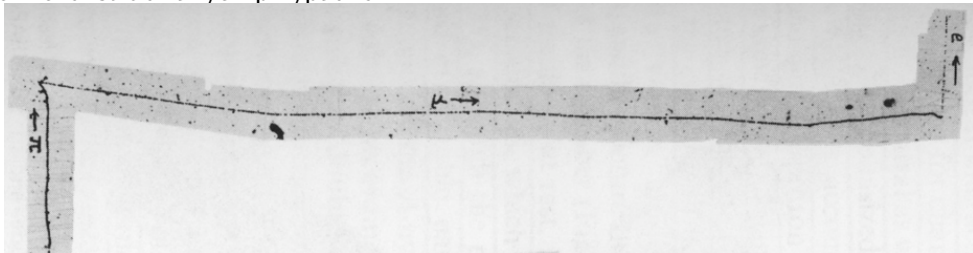
Dopiero w 1936 amerykańscy fizycy Carl D. Anderson i Seth Neddermeyer przedstawili wyniki pomiaru dużej liczby cząstek promieniowania

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

Jeden ze zrekonstruowanych przypadków:

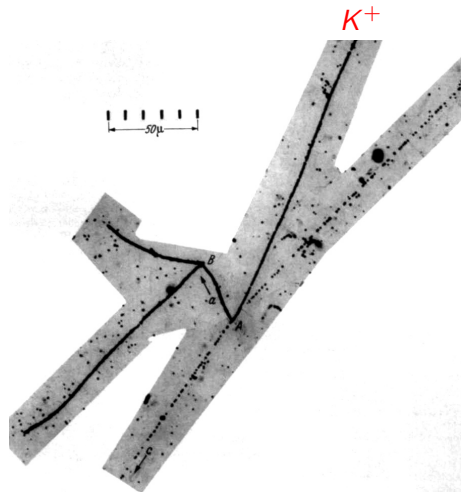


W roku 1948, grupa Powella na Bristol University dokonała kolejnego odkrycia badając oddziaływania promieniowania kosmicznego w emulsji.

Zaobserwowali rozpad nieznanej cząstki (wlatuje od góry) na trzy piony.

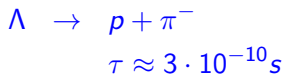


Kaon był pierwszą odkrytą cząstką z rodziny cząstek, które wkrótce zaczęto nazywać "dziwnymi" (strange).

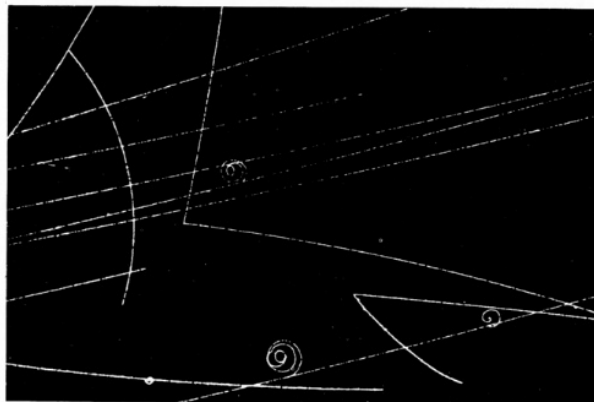
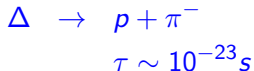


W październiku 1950, V. D. Hopper i S. Biswas odkryli kolejną dziwną, długożyciową cząstkę, rozpadającą się na proton i pion:

Jej średni czas życia był znacznie dłuższy niż oczekiwano

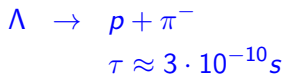


w porównaniu z wcześniej znanym

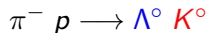
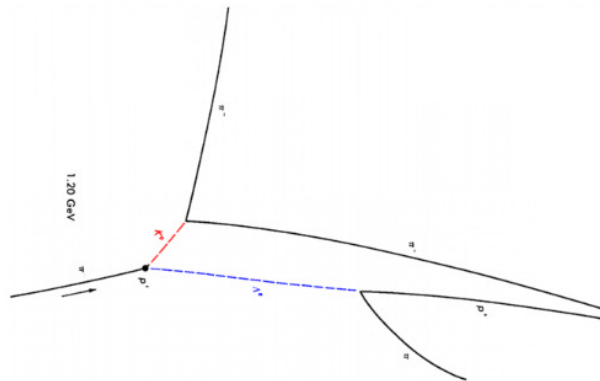
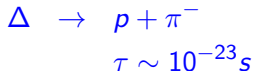


W październiku 1950, V. D. Hopper i S. Biswas odkryli kolejną dziwną, długożyciową cząstkę, rozpadającą się na proton i pion:

Jej średni czas życia był znacznie dłuższy niż oczekiwano

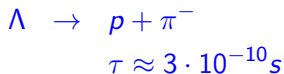


w porównaniu z wcześniej znanym

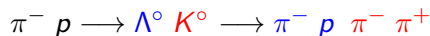
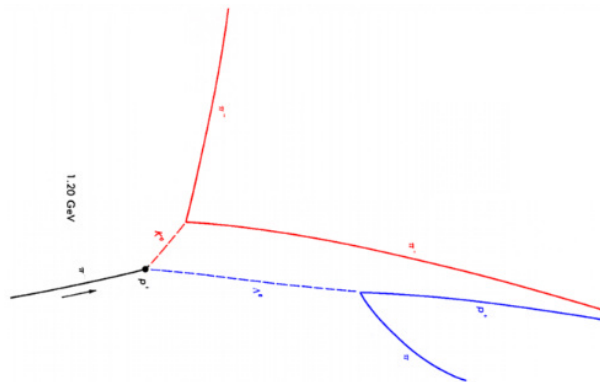
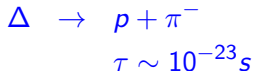


W październiku 1950, V. D. Hopper i S. Biswas odkryli kolejną dziwną, długożyciową cząstkę, rozpadającą się na proton i pion:

Jej średni czas życia był znacznie dłuższy niż oczekiwano



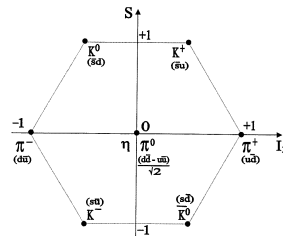
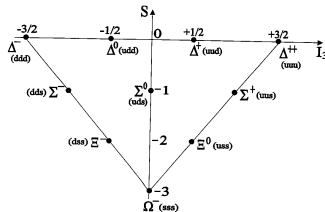
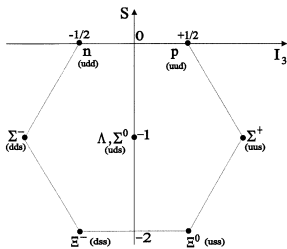
w porównaniu z wcześniej znanym



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 (układ okresowy?)

⇒ wskazówka, że należy szukać bardziej fundamentalnego opisu



Dziwność (S) była jednym z kryteriów tej klasyfikacji ⇒ późniejszy rozwój modelu kwarków

Wraz z dokonywaniem kolejnych **odkryć naukowych** następował też dynamiczny rozwój **nowych technik detekcji i nowych źródeł cząstek**, które warunkowały kolejne odkrycia

- | | | | |
|------|---|----------------------------------|--------------------------------|
| 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 dokonywaniem kolejnych **odkryć naukowych** następował też dynamiczny rozwój **nowych technik detekcji i nowych źródeł cząstek**, które warunkowały kolejne odkrycia

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 \Rightarrow początek nowoczesnej fizyki cząstek

Wraz z dokonywaniem kolejnych **odkryć naukowych** następował też dynamiczny rozwój **nowych technik detekcji i nowych źródeł cząstek**, które warunkowały kolejne odkrycia

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 \Rightarrow początek nowoczesnej fizyki cząstek

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