

Dziwny jest ten świat: cząstki elementarne

Wykłady z fizyki doświadczalnej
Wydział Fizyki U.W.
17 grudnia 2005

prof. A.F.Żarnecki

Zakład Cząstek i Oddziaływań Fundamentalnych
Instytut Fizyki Doświadczalnej

Plan wykładu

- Początki fizyki cząstek:
 - odkrycia elektronu, jądra atomowego i fotonu
 - cząstki i fale - materia i antymateria

Plan wykładu

- Początki fizyki cząstek:
 - odkrycia elektronu, jądra atomowego i fotonu
 - cząstki i fale - materia i antymateria
- Rozwój metod doświadczalnych:
 - metody detekcji cząstek elementarnych
 - źródła cząstek

Plan wykładu

- Początki fizyki cząstek:
 - odkrycia **elektronu**, **jądra atomowego** i **fotonu**
 - **cząstki i fale** - **materia i antymateria**
- Rozwój metod doświadczalnych:
 - **metody detekcji** cząstek elementarnych
 - **źródła** cząstek
- Model Standardowy:
 - **cząstki dziwne** i hipoteza kwarków
 - **kolor** i oddziaływania silne
 - **cząstki i oddziaływania** fundamentalne

Plan wykładu

- Początki fizyki cząstek:
 - odkrycia **elektronu**, **jądra atomowego** i **fotonu**
 - **cząstki i fale** - materia i **antymateria**
- Rozwój metod doświadczalnych:
 - **metody detekcji** cząstek elementarnych
 - **źródła** cząstek
- Model Standardowy:
 - **cząstki dziwne** i hipoteza kwarków
 - **kolor** i oddziaływania silne
 - **cząstki i oddziaływania** fundamentalne
- Najważniejsze pytania:
 - skąd się wzięła **materia** ?
 - dlaczego **przestrzeń** jest płaska ?
 - skąd się bierze **masa** ?

Koniec XIX w.

Elektryczność i magnetyzm

Wpływ pola elektromagnetycznego na ruchu ciała naładowanego:

$$\frac{d}{dt}m\vec{v} = q\vec{E} + q\vec{v} \times \vec{B}$$

Źródłem pola są ładunki i ich ruch. **Równania Maxwella** (1865):

$$\begin{aligned}\epsilon_0 \operatorname{div} \vec{E} &= \rho \\ \operatorname{rot} \vec{E} &= 0 \\ \operatorname{div} \vec{B} &= 0 \\ \operatorname{rot} \vec{B} &= \vec{j}\end{aligned}$$



Koniec XIX w.

Elektryczność i magnetyzm

Wpływ pola elektromagnetycznego na ruchu ciała naładowanego:

$$\frac{d}{dt}m\vec{v} = q\vec{E} + q\vec{v} \times \vec{B}$$

Źródłem pola są ładunki i ich ruch. **Równania Maxwella** (1865):

$$\begin{aligned} \epsilon_0 \operatorname{div} \vec{E} &= \rho \\ \operatorname{rot} \vec{E} &= -\mu_0 \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \\ \operatorname{div} \vec{B} &= 0 \\ \operatorname{rot} \vec{B} &= \vec{j} + \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \end{aligned}$$

⇒ fale elektromagnetyczne: $c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$



Koniec XIX w.

Elektryczność i magnetyzm

Odkrycie fal elektromagnetycznych przez Heinricha Hertza w 1886 roku potwierdziło słuszność teorii Maxwella.

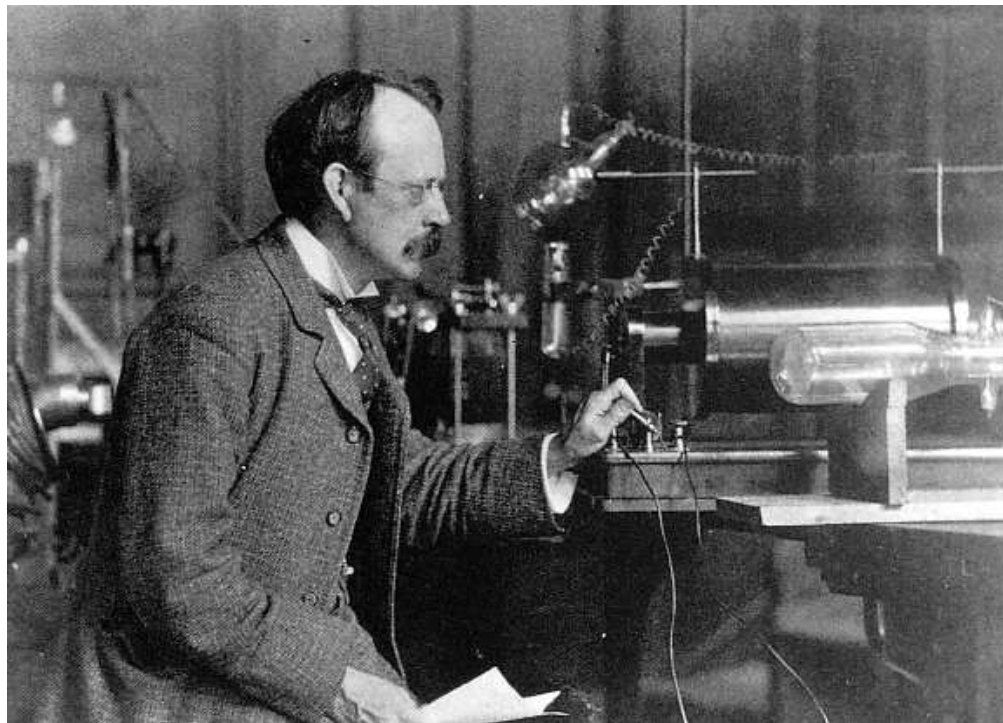
Jednak **natura elektryczności** wciąż była nieznana.

“Wszystkie te zjawiska przypisano pewnego rodzaju sile (energii), nazwanej elektrycznością (...) każde ciało posiada obydwa rodzaje elektryczności (ujemną i dodatnią) w stanie utajonym...”

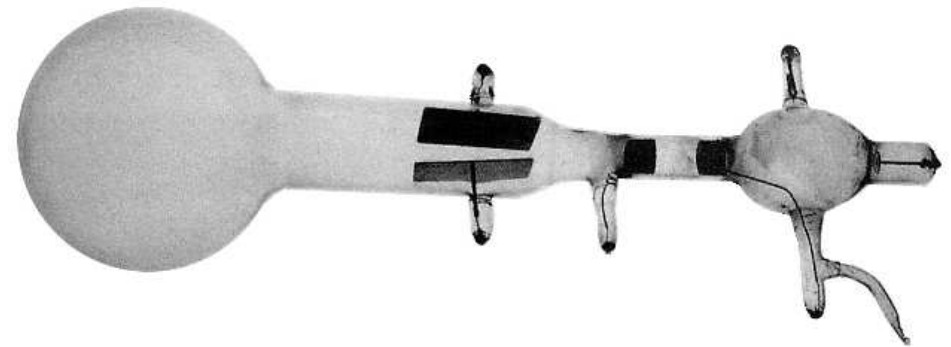
A.L.Szymański, Prawa Przyrody - Fizyka, Warszawa 1902

Odkrycie elektronu

Joseph Thomson 1897



Thomson badał tzw. **promienie katodowe**



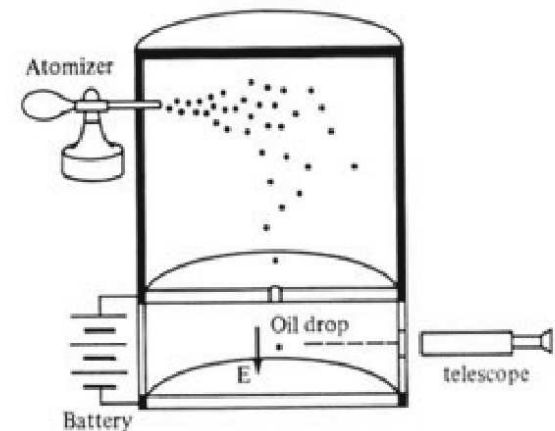
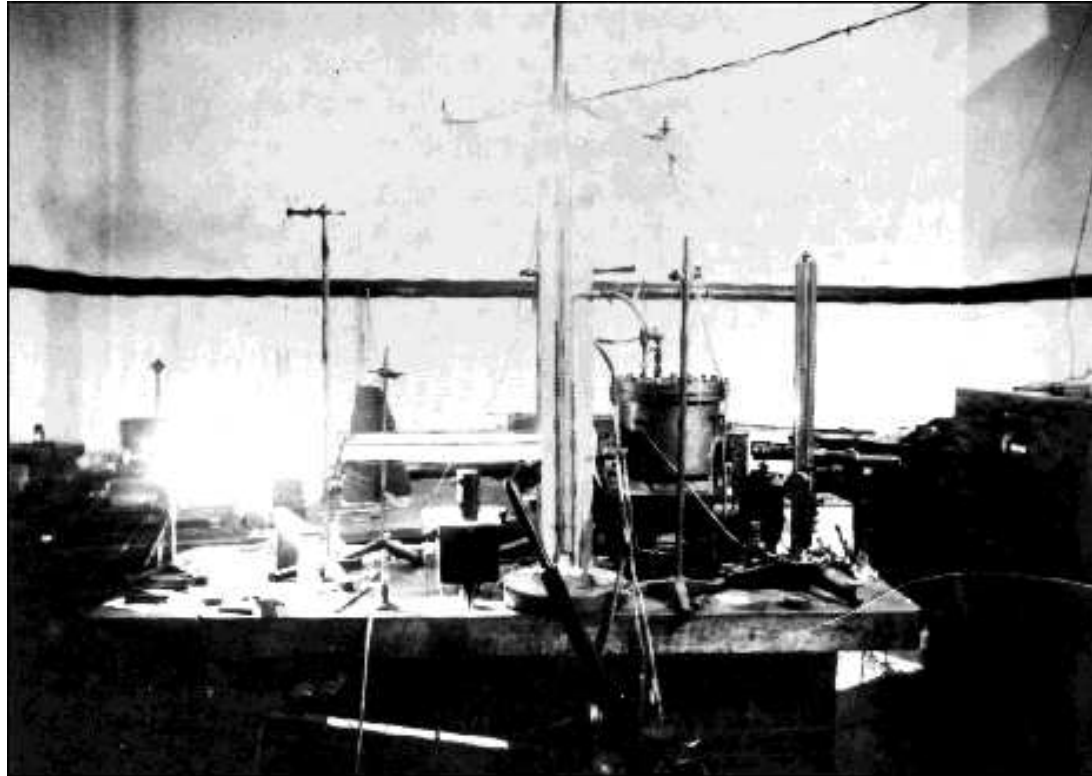
pokazał, że promienie te odchylają się w polu elektrycznym

Wyznaczył stosunek ładunku do masy elektronu:

$$\frac{e}{m} \approx 2 \cdot 10^{11} \frac{C}{kg}$$

Odkrycie elektronu

Robert Millikan 1909



Mierząc opadanie maleńkich kropeł oliwy w powietrzu wyznaczył ładunek elektronu, a następnie obliczył jego **masę**: $m_e = \frac{1}{1837} m_H$

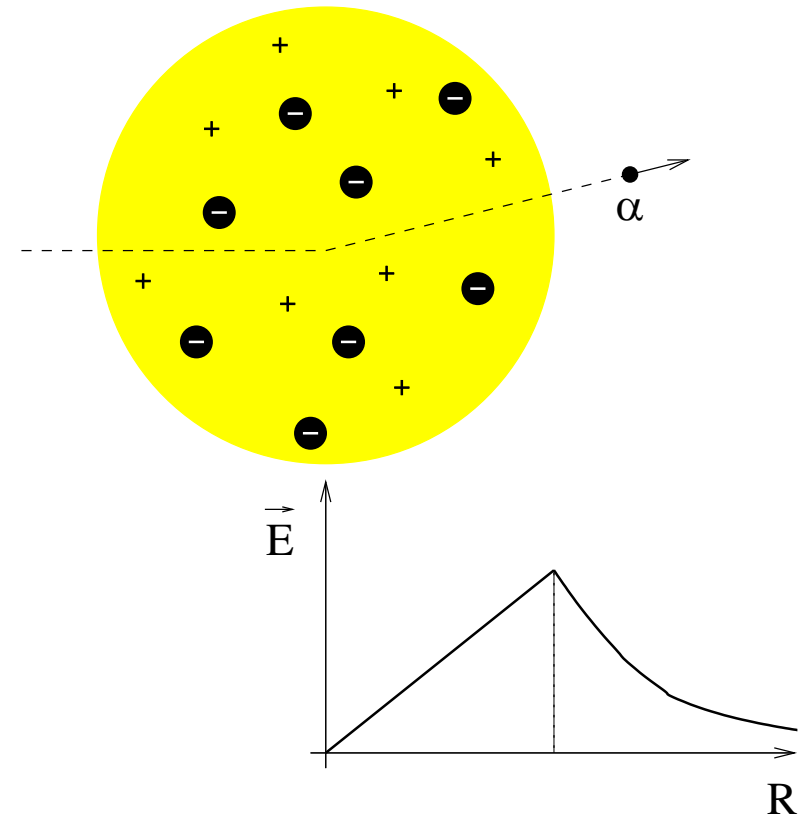
Odkrycie jądra atomowego

Doświadczenie Rutherforda

Rozpraszanie cząstek α na cienkiej złotej folii



Obserwowano błyski wywoływane przez padające cząstki na ekranie scyntylacyjnym



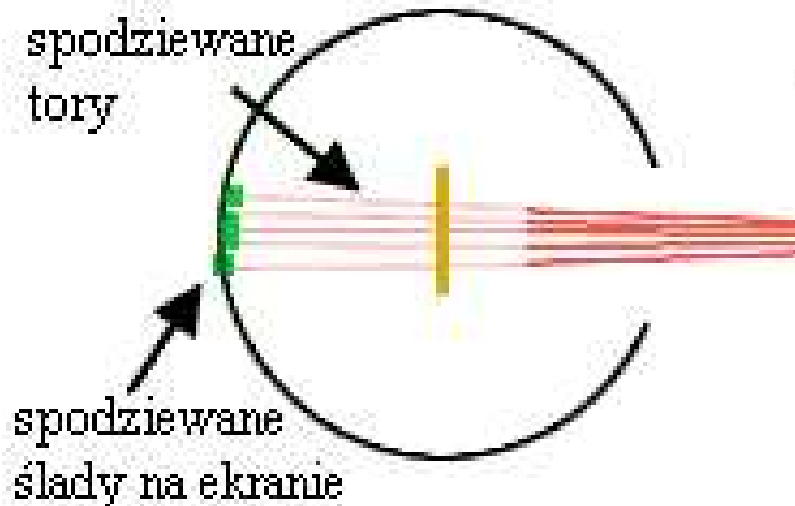
Model Thomsona: cała objętość atomu jednorodnie naładowana dodatnio ("ciasto"), a wewnątrz "pływają" elektrony ("rodzynki").

Odkrycie jądra atomowego

Doświadczenie Rutherforda

Wyniki pomiarów przeprowadzonych przez H.Geigera i E.Marsdena (1911):

Oczekiwane

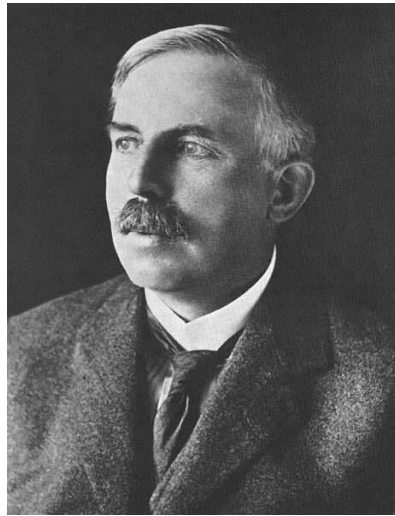


Uzyskane



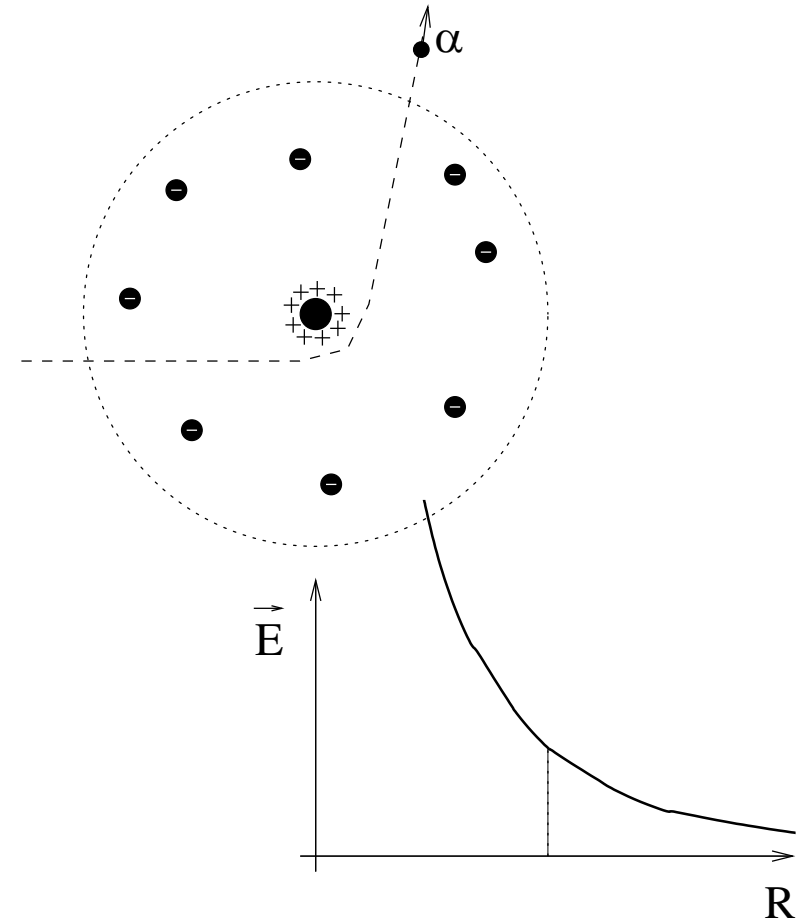
Odkrycie jądra atomowego

Model Rutherforda



Rutherford zaproponował
jądrowy model atomu.

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



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

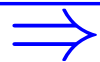
Odkrycie fotonu

W końcu XIX w. powszechnie uważano światło za **falę poprzeczną** rozchodzącą się w eterze. Eter miałby być

“...materią sprężystą, nadzwyczaj subtelną i nieważką, nie przedstawiającą żadnego znacniejszego oporu poruszającym się w niej ciałom...”

Zgodność zmierzonych prędkości rozchodzenia się wskazywała na to, że światło jest **falą elektromagnetyczną**.

Falowa teoria światła tłumaczyła wszystkie znane ówczesnie zjawiska...

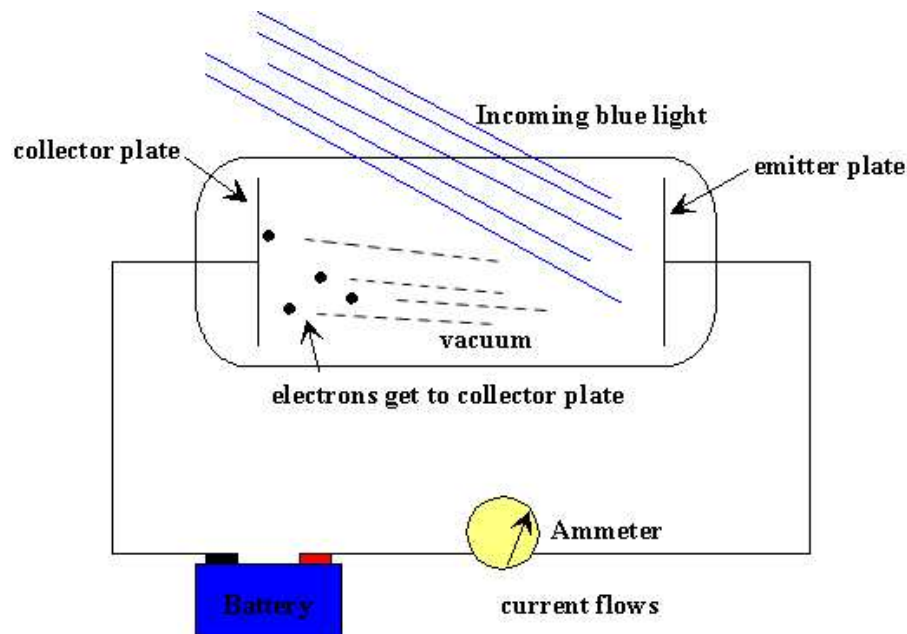


Odkrycie fotonu

Efekt fotoelektryczny

Odkryty przez Hertza w 1887

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

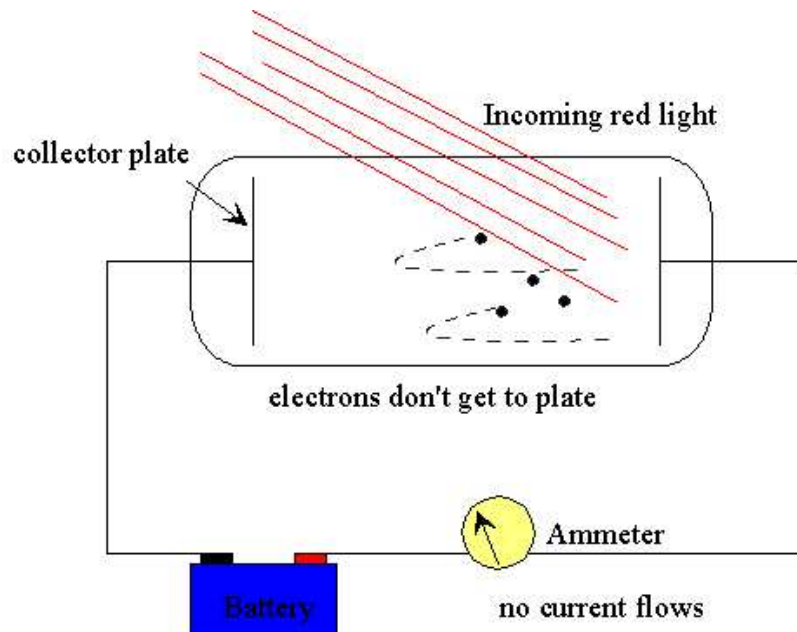


Odkrycie fotonu

Efekt fotoelektryczny

Odkryty przez Hertza w 1887

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



Efektu tego nie można było wytłumaczyć w parciu o falową teorię światła

Odkrycie fotonu

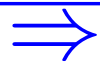
Efekt fotoelektryczny

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

Energia fotonu:

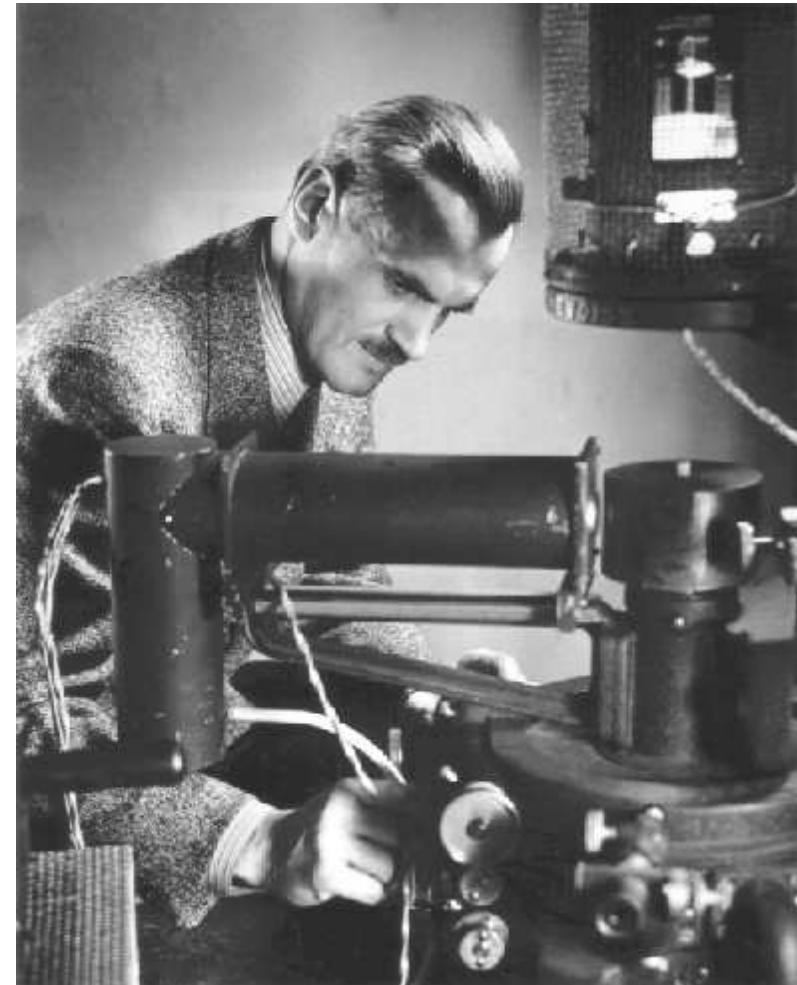
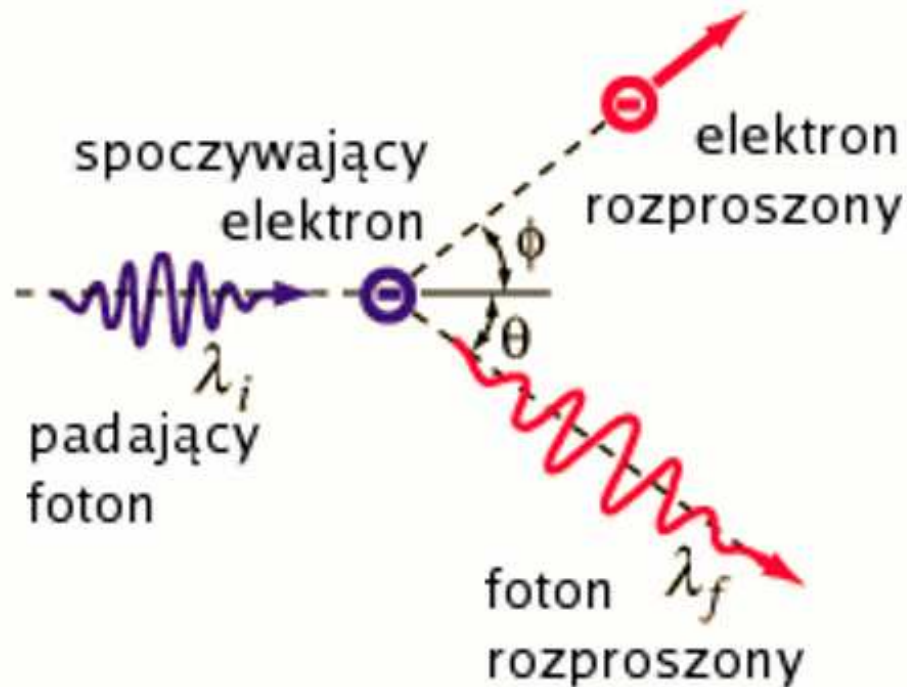
$$E_{\gamma} = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$$

Aby wybić elektron z metalu E_{γ} musi być większa od tzw. **pracy wyjścia** \Rightarrow zależność od długości fali światła



Odkrycie fotonu

Arthur Compton 1923
Rozpraszanie fotonów na elektronach



Compton pokazał, że fotony niosą nie tylko **energię**, ale i **pęd**
 \Rightarrow zachowują się jak **cząstki**

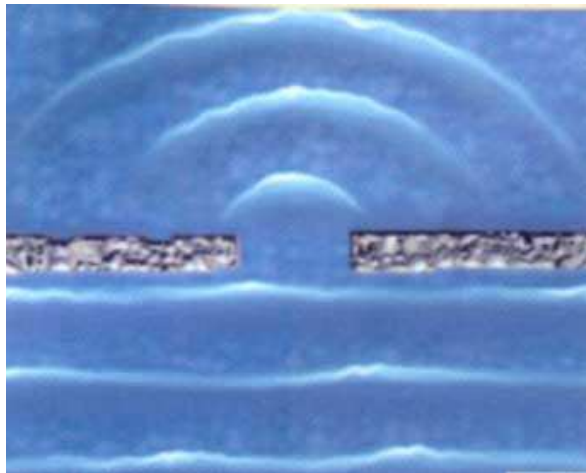


Cząstki i fale

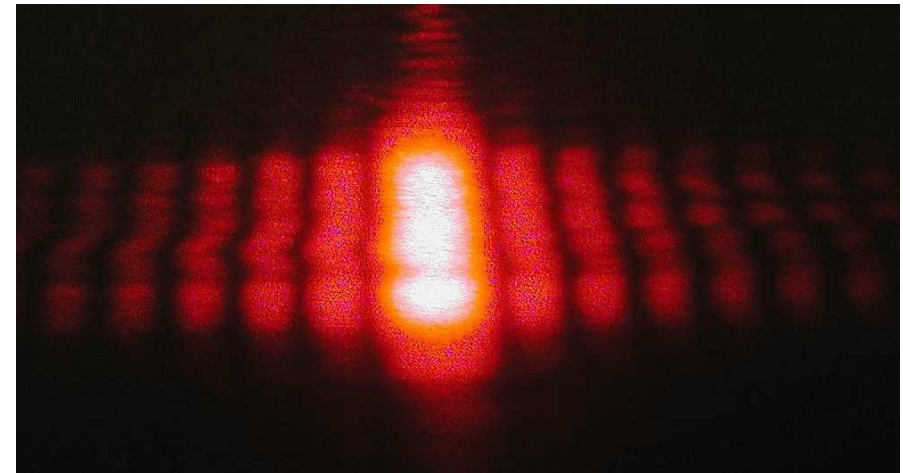
Jednocześnie jednak **fotony** zachowują się jak **fale**.
 Świadczą o tym m.in. zjawisko **dyfrakcji** i **interferencji** światła.

Ugięcie fal na pojedynczej szczelinie:

Fale na wodzie



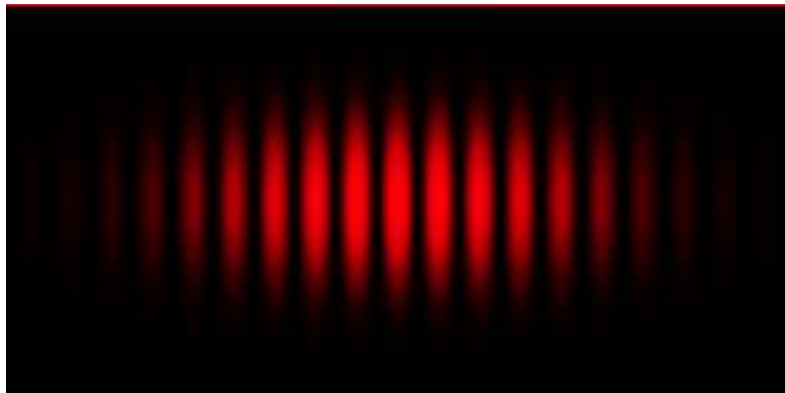
Światło



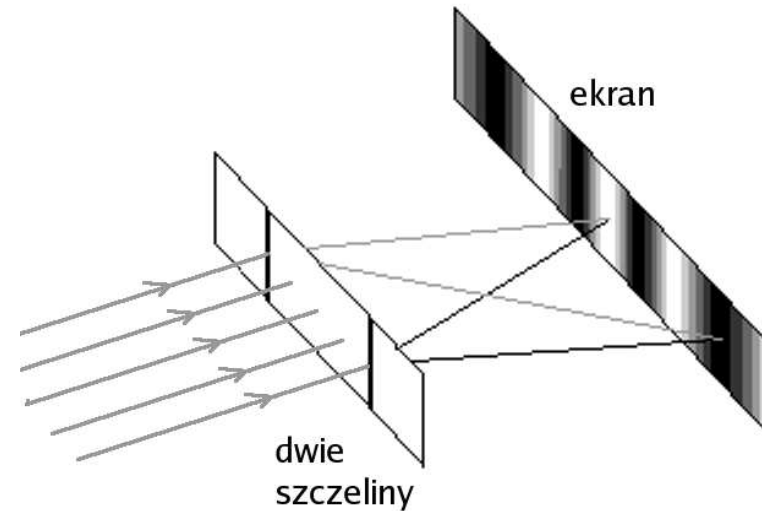
Cząstki i fale

Obraz przy przechodzeniu przez dwie szczeliny:

Światło



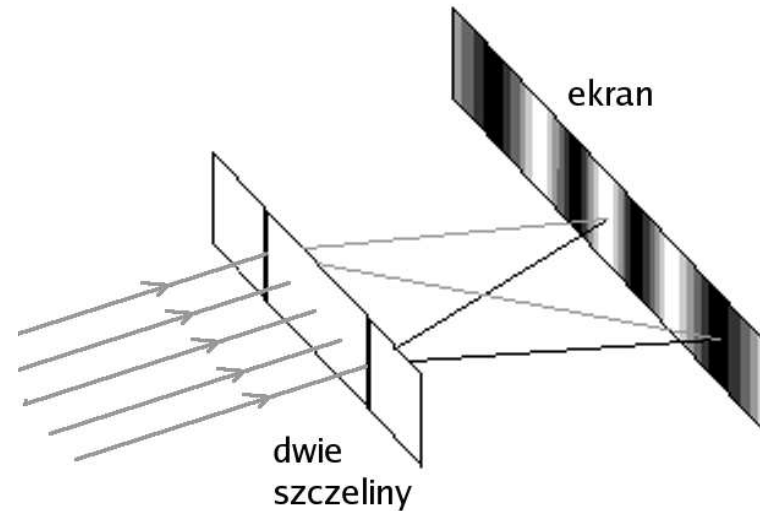
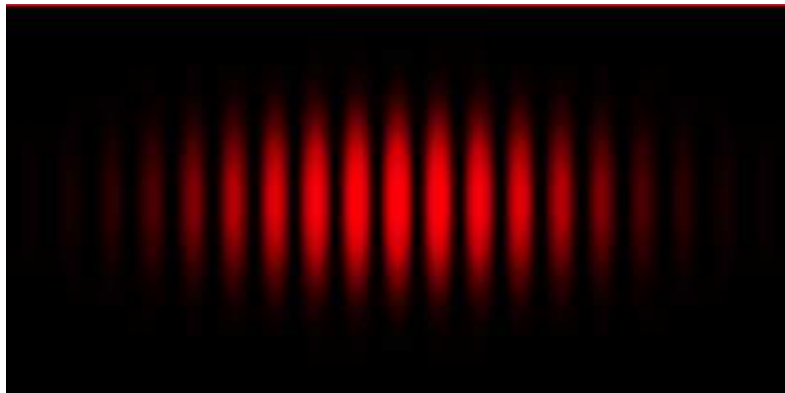
Złożenie fal
⇒ prążki interferencyjne



Cząstki i fale

Obraz przy przechodzeniu przez dwie szczeliny:

Światło



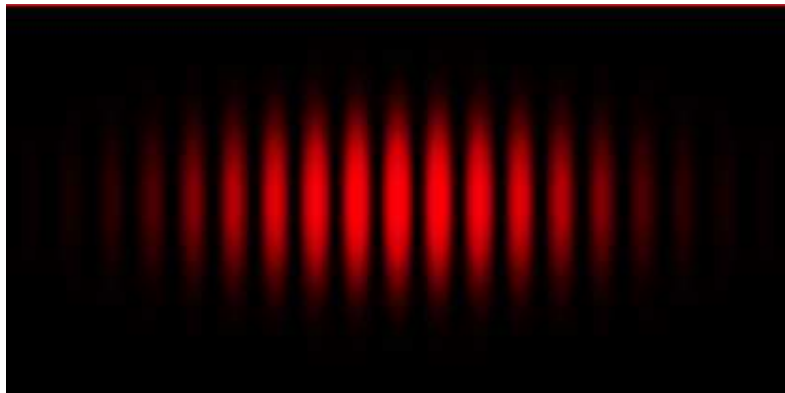
Złożenie **fal**
⇒ **prążki interferencyjne**

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

Cząstki i fale

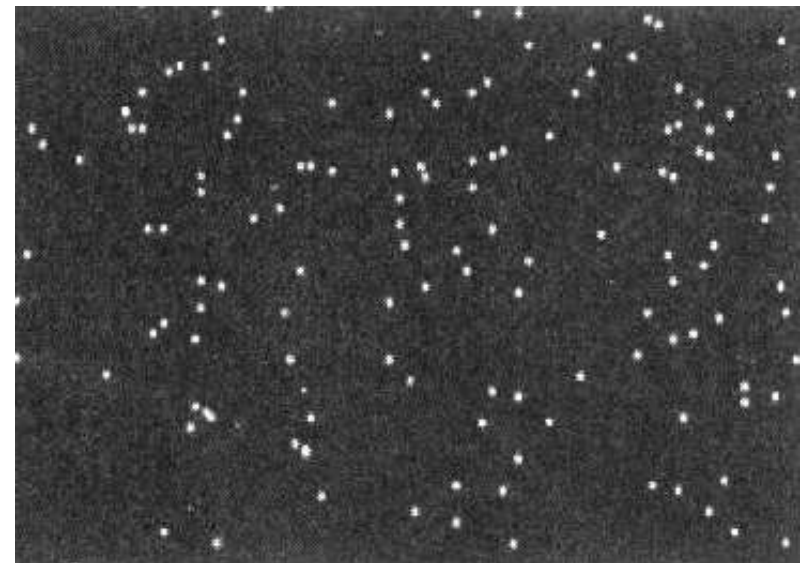
Obraz przy przechodzeniu przez dwie szczeliny:

Światło



Złożenie **fal**
⇒ **prążki interferencyjne**

Elektrony

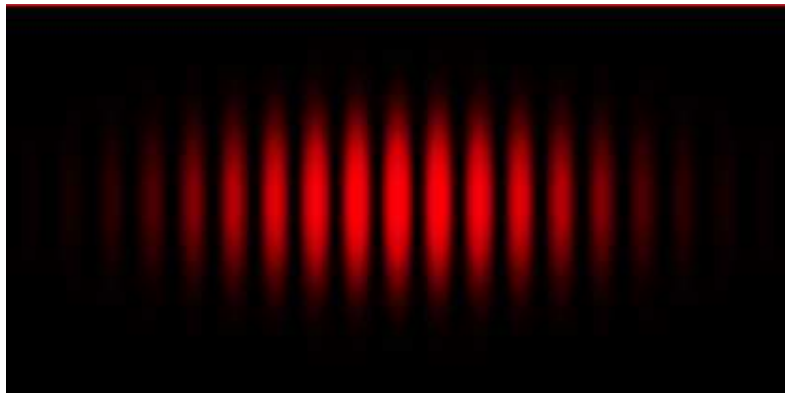


100 elektronów
rozkład przypadkowy ?

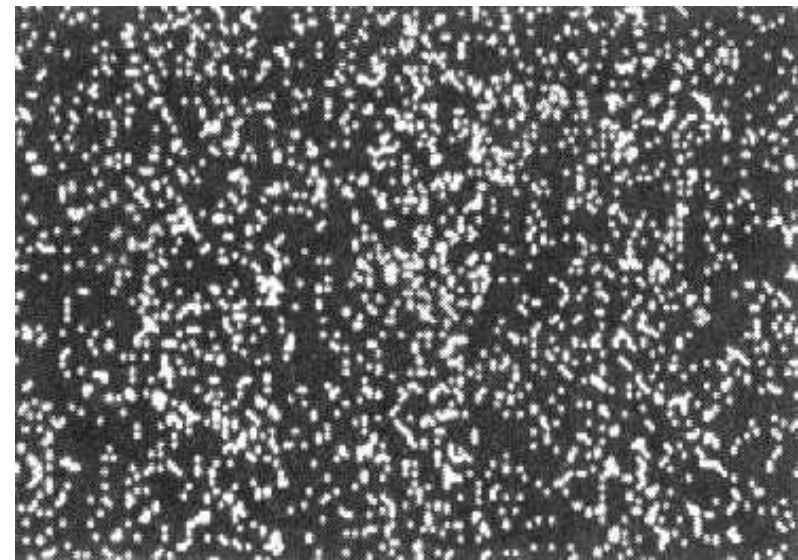
Cząstki i fale

Obraz przy przechodzeniu przez dwie szczeliny:

Światło



Elektrony



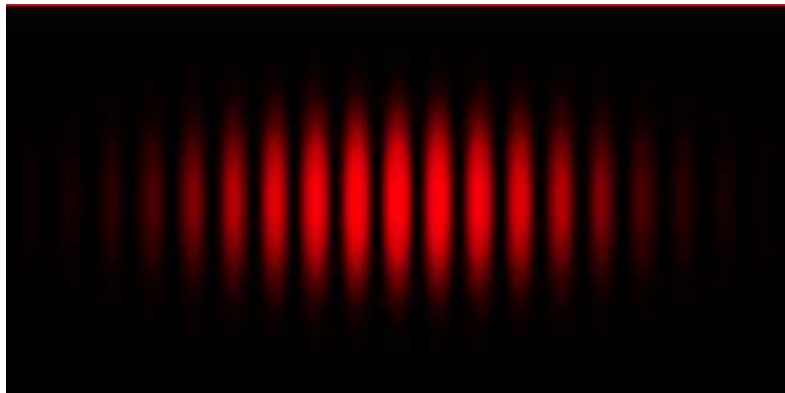
Złożenie **fal**
⇒ **prążki interferencyjne**

3000 elektronów

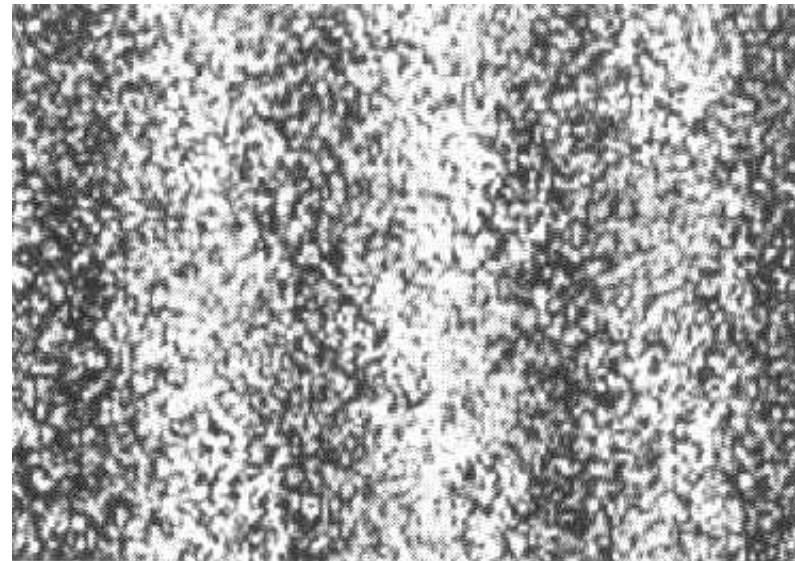
Cząstki i fale

Obraz przy przechodzeniu przez dwie szczeliny:

Światło



Elektrony



Złożenie **fal**

⇒ **prążki interferencyjne**

70000 elektronów

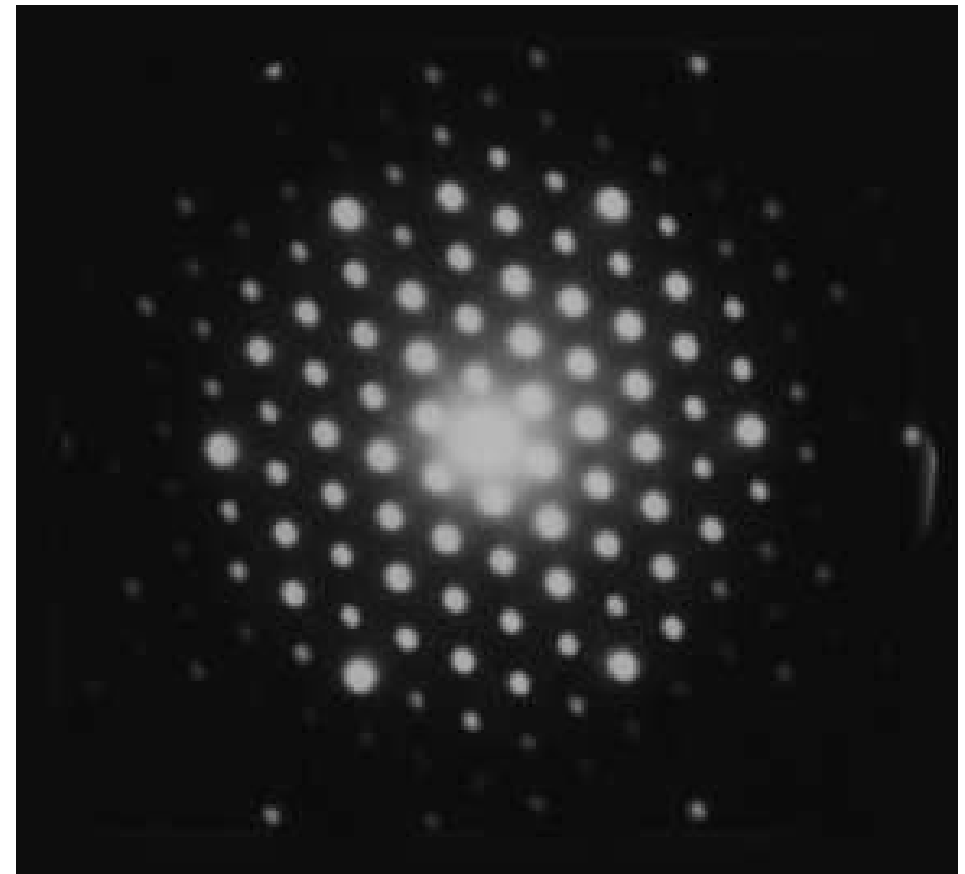
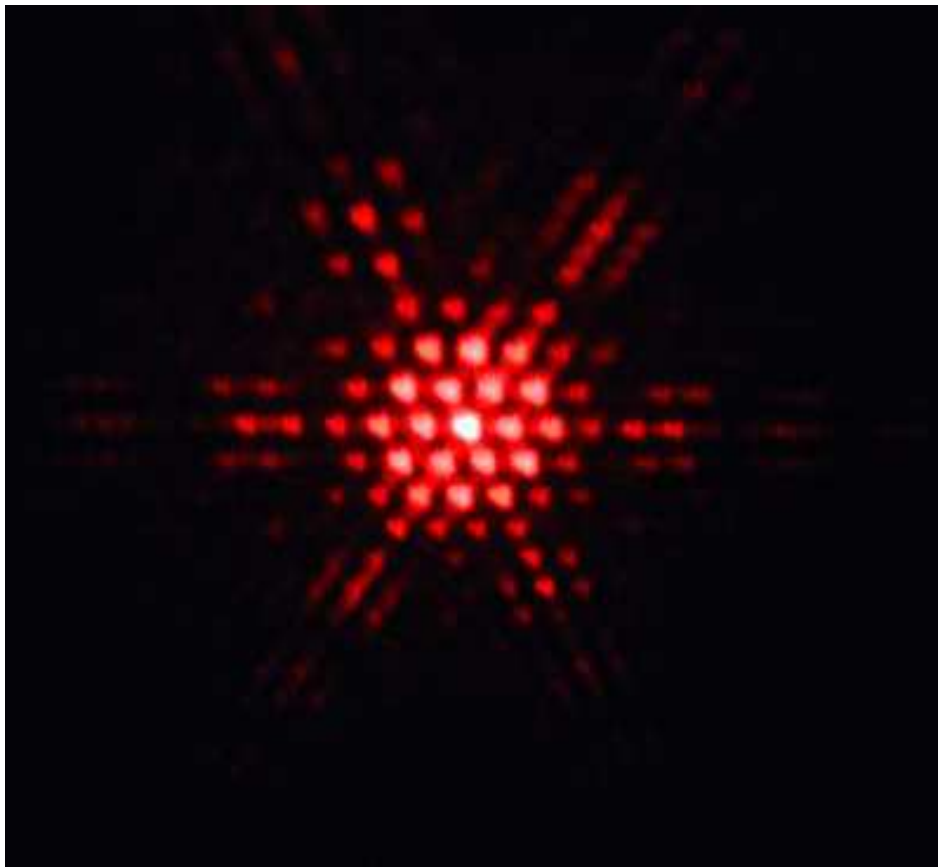
Elektrony też zachowują się jak fale !
Potwierdzenie hipotezy de Broglie'a.

Cząstki i fale

Dyfrakcja na strukturach heksagonalnych

Światło

Elektrony

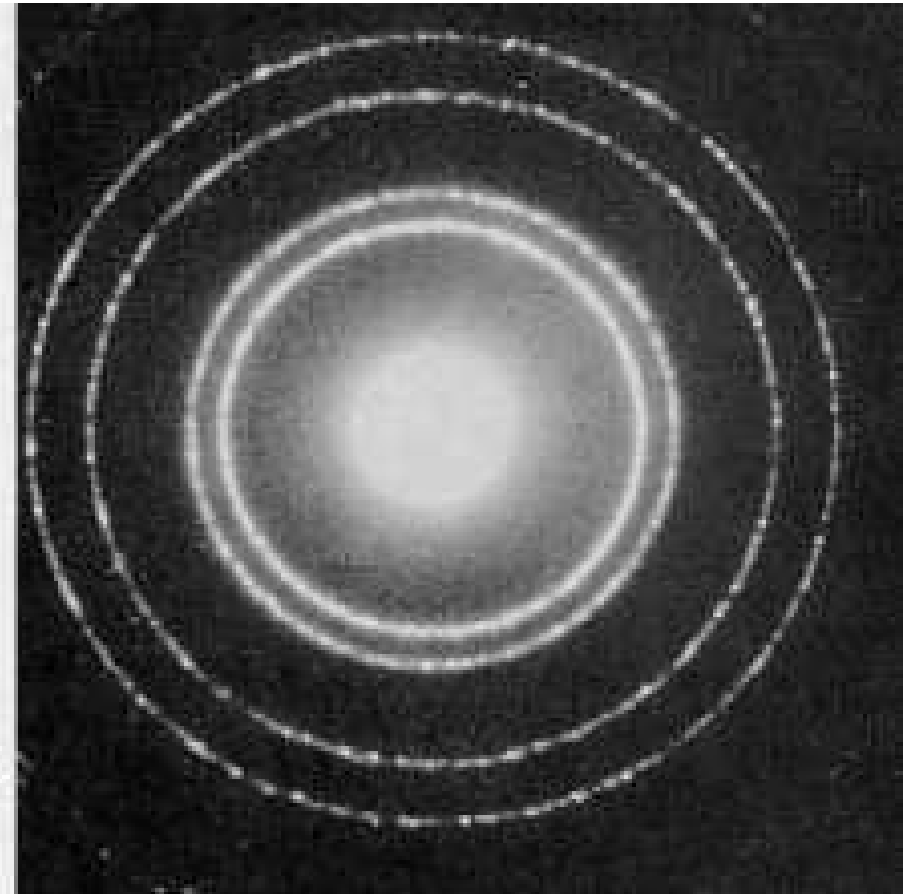
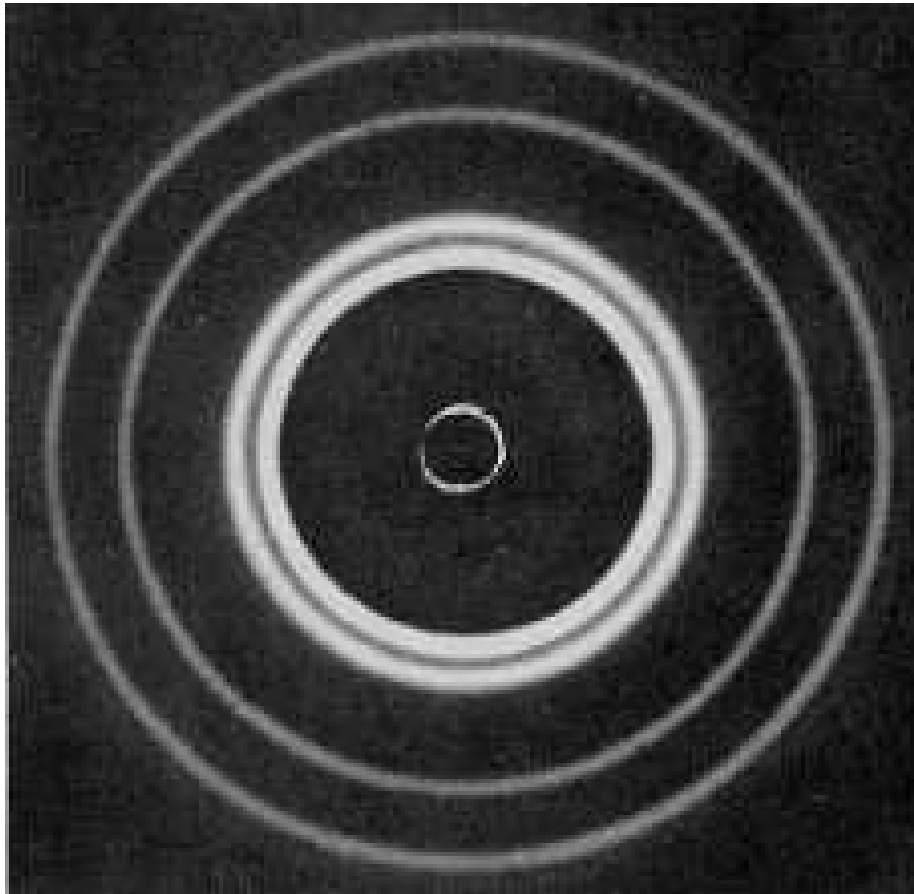


Cząstki i fale

Obraz przy przechodzeniu przez cienką folię aluminiową

Promieniowanie X

Elektrony



Cząstki i fale

Mechanika kwantowa

Klasyczne równania ruchu pozwalają na znalezienie zależności położenia ciała od czasu: $\vec{r}(t)$.

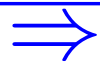
Mechanika kwantowa opisuje cząstki przez tzw. **funkcje falowe** $\psi(\vec{r}, t)$

Ruch cząstki to rozchodzenie się **“fal prawdopodobieństwa”**.

Amplituda tej fali opisuje **prawdopodobieństwo** znalezienia cząstki w danym miejscu i danej chwili czasu.

Ewolucję **“fal prawdopodobieństwa”** w polu sił $V(\vec{r})$ opisuje równanie Schrödingera (Erwin Schrödinger, 1925):

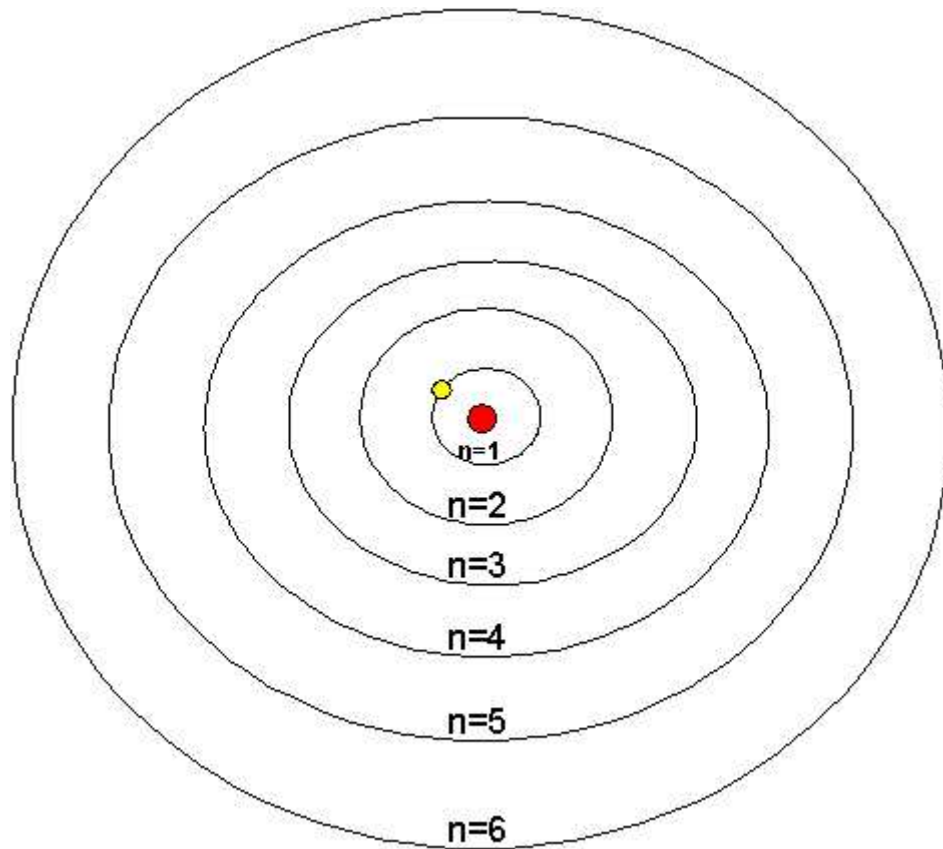
$$\left[-\frac{\hbar^2}{2m} \Delta + V(\vec{r}) \right] \psi(\vec{r}, t) = i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \psi(\vec{r}, t)$$



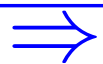
Cząstki i fale

Atom wodoru

Opis klasyczny



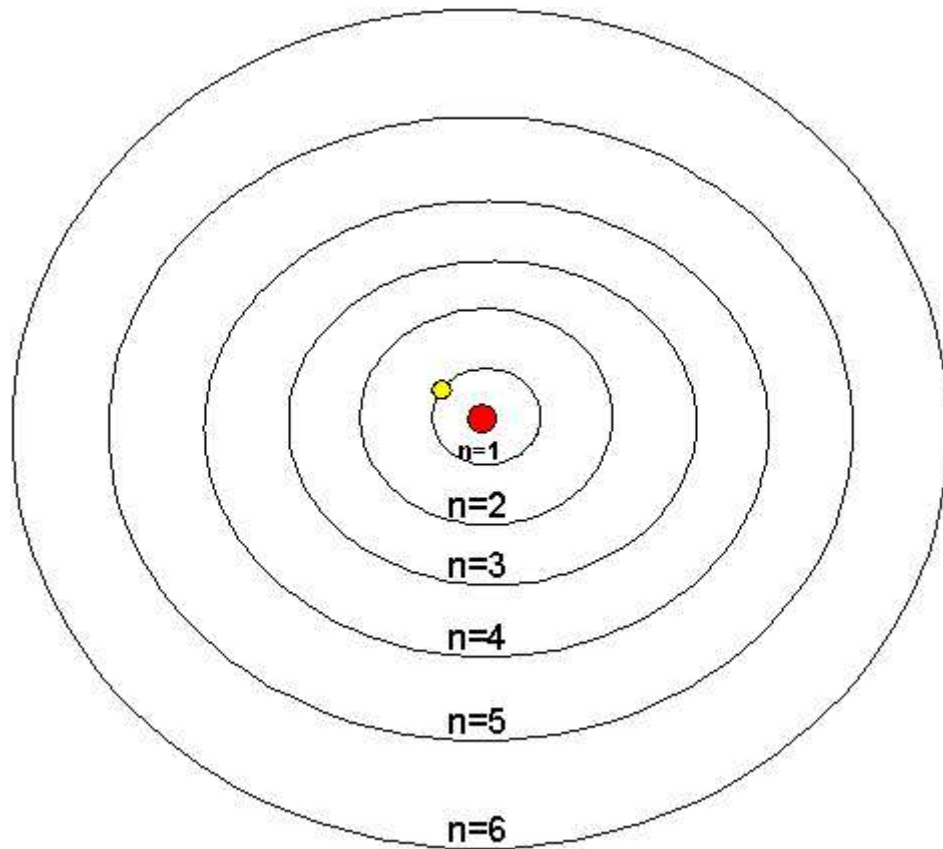
Opis kwantowy, stan 1s



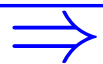
Cząstki i fale

Atom wodoru

Opis klasyczny



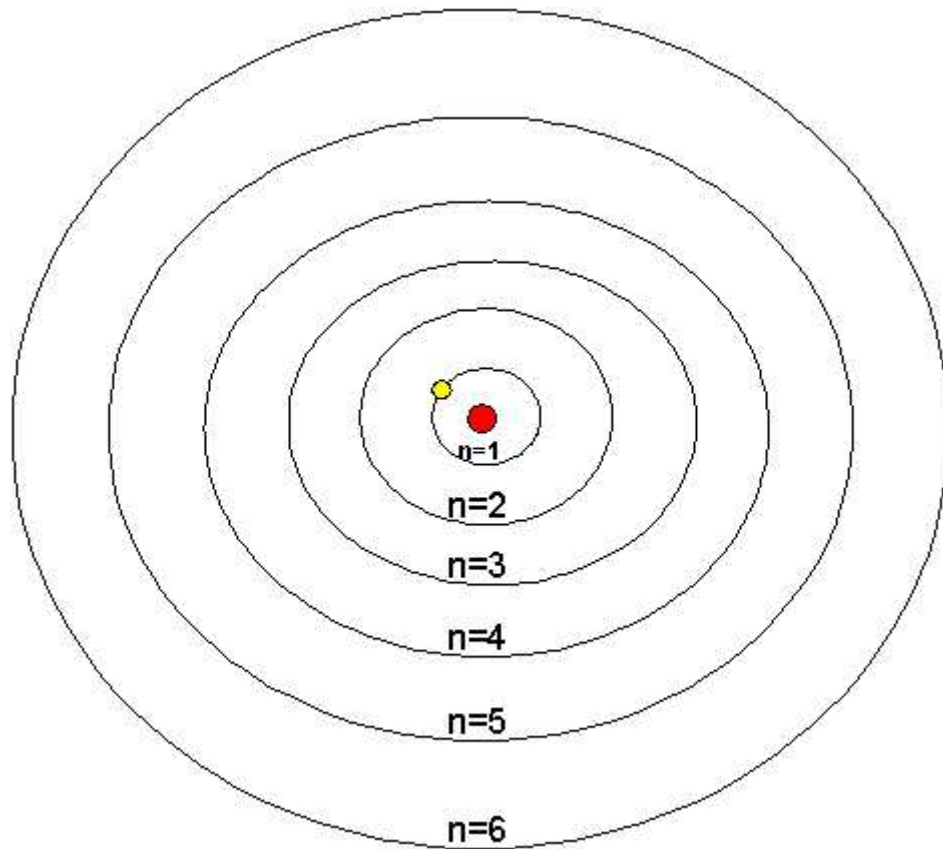
Opis kwantowy, stan 2s



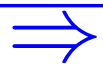
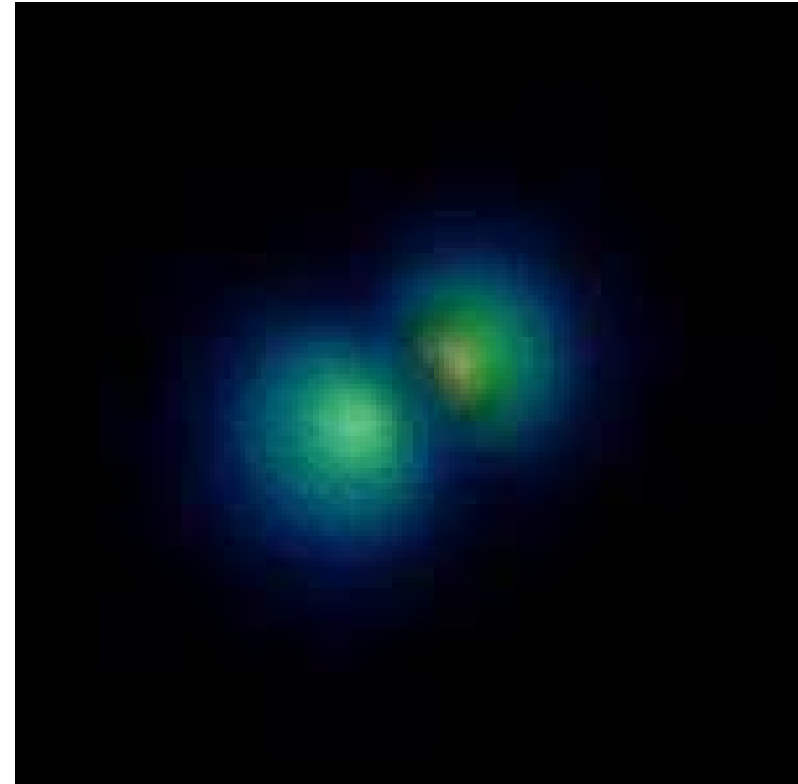
Cząstki i fale

Atom wodoru

Opis klasyczny



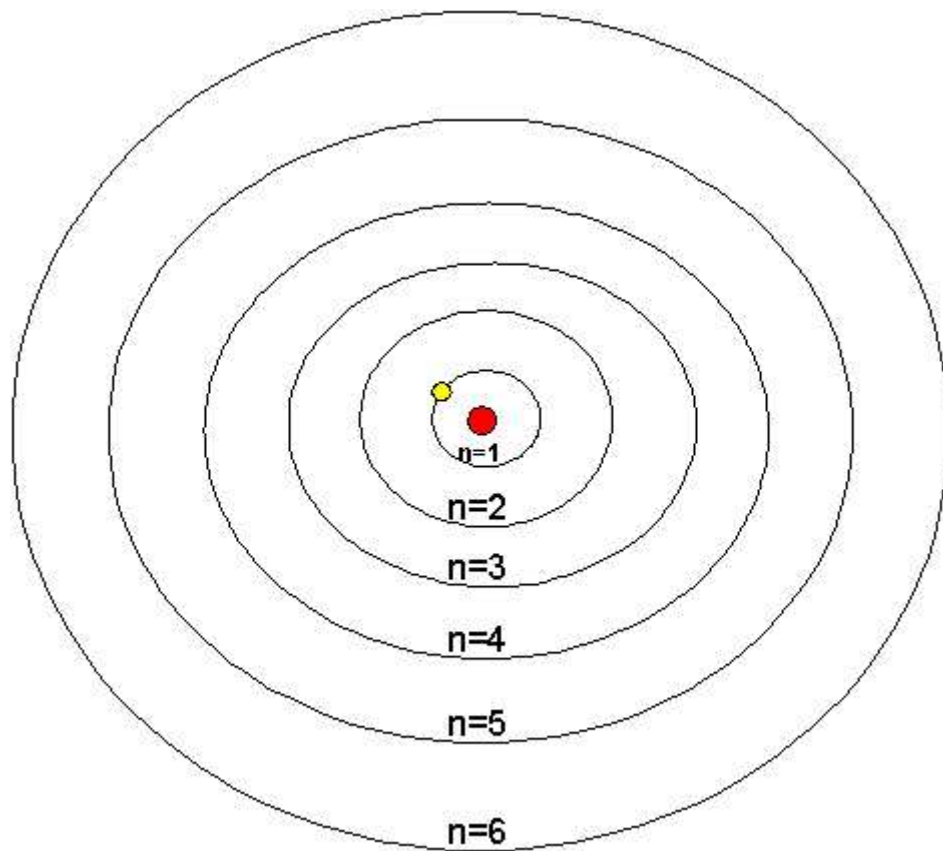
Opis kwantowy, stan 2p0



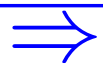
Cząstki i fale

Atom wodoru

Opis klasyczny



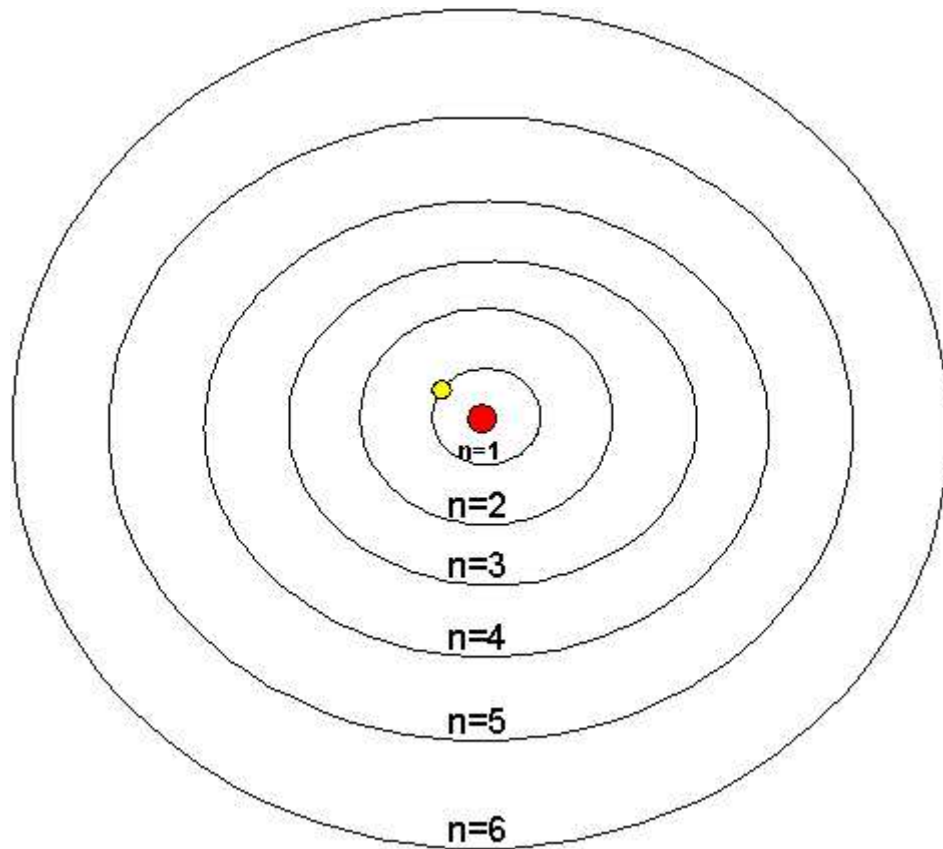
Opis kwantowy, stan $2p_1$



Cząstki i fale

Atom wodoru

Opis klasyczny



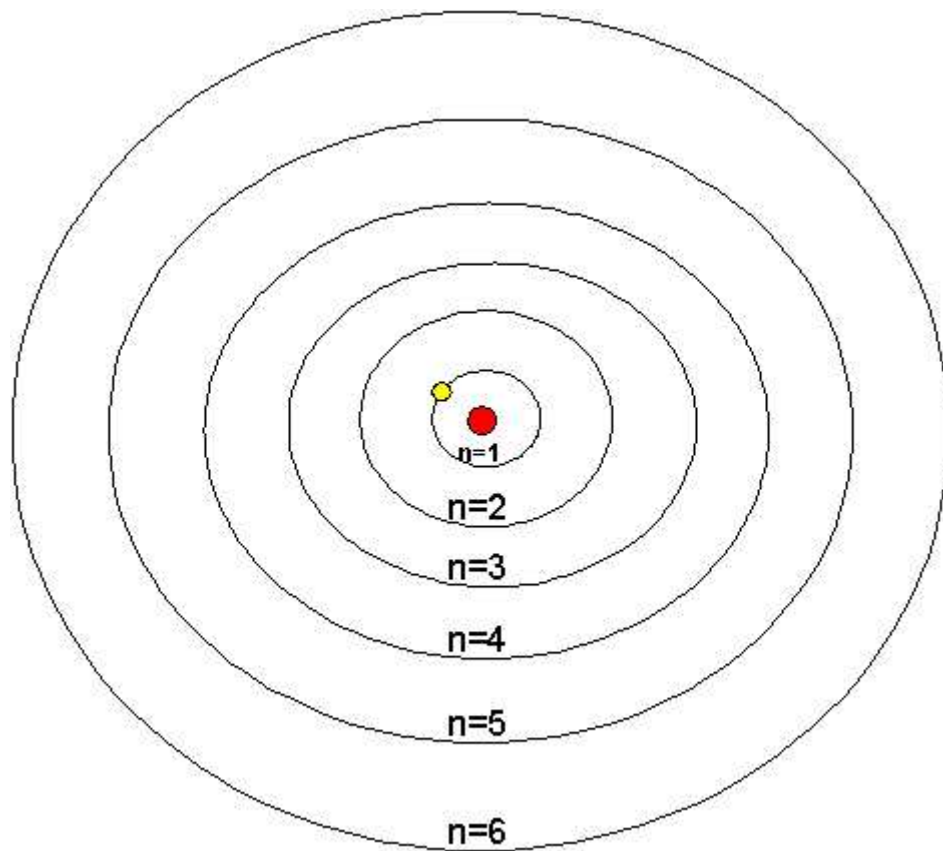
Opis kwantowy, stan 3s



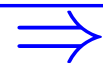
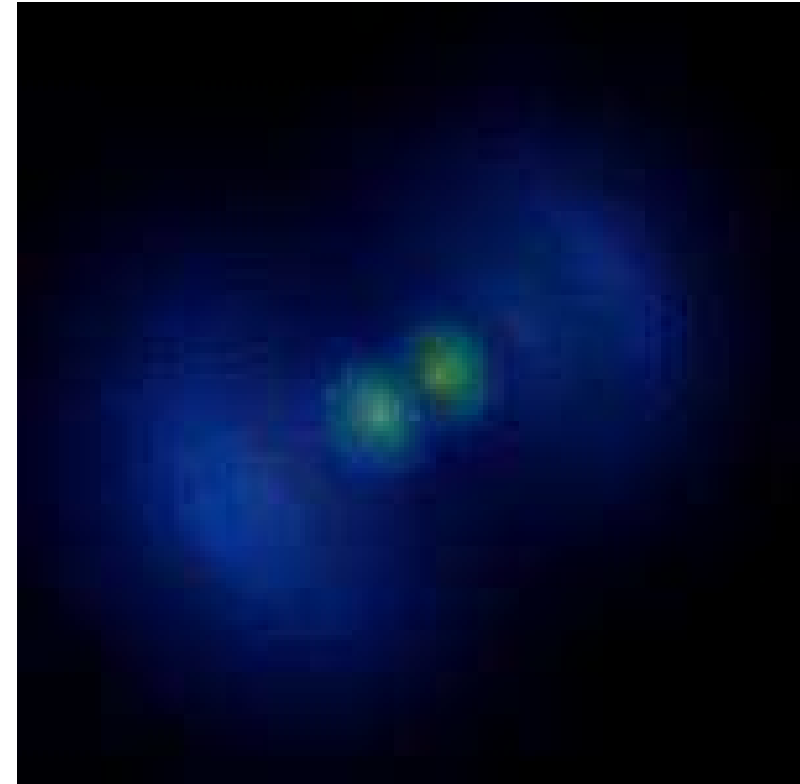
Cząstki i fale

Atom wodoru

Opis klasyczny



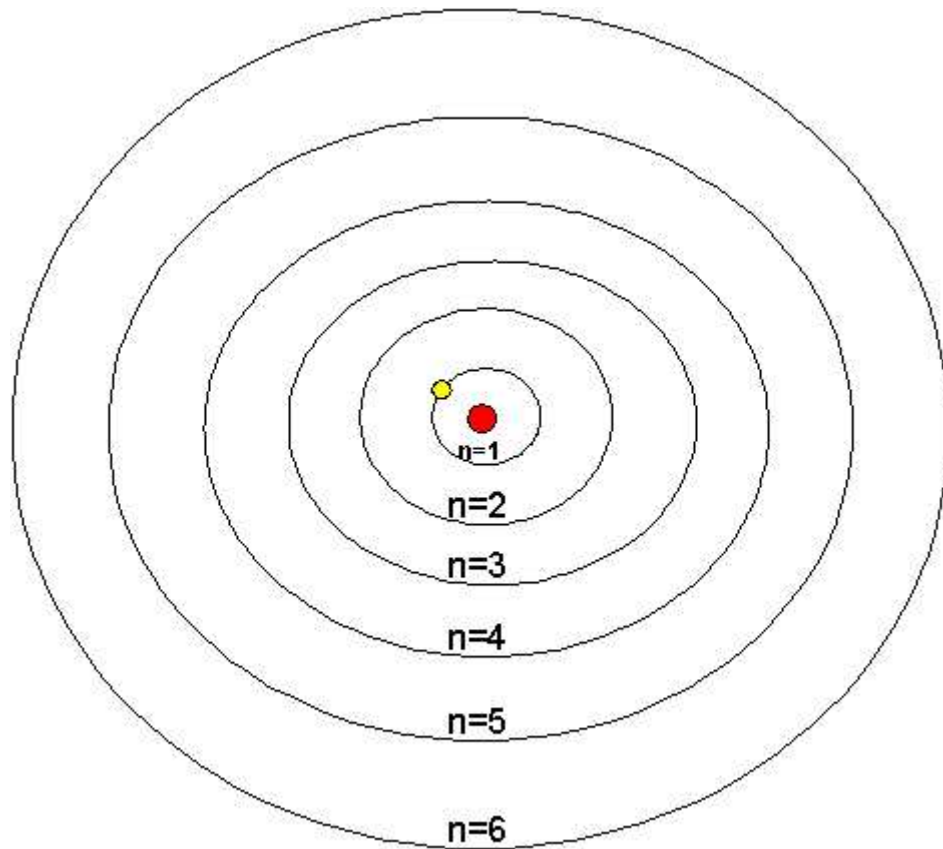
Opis kwantowy, stan 3p0



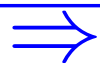
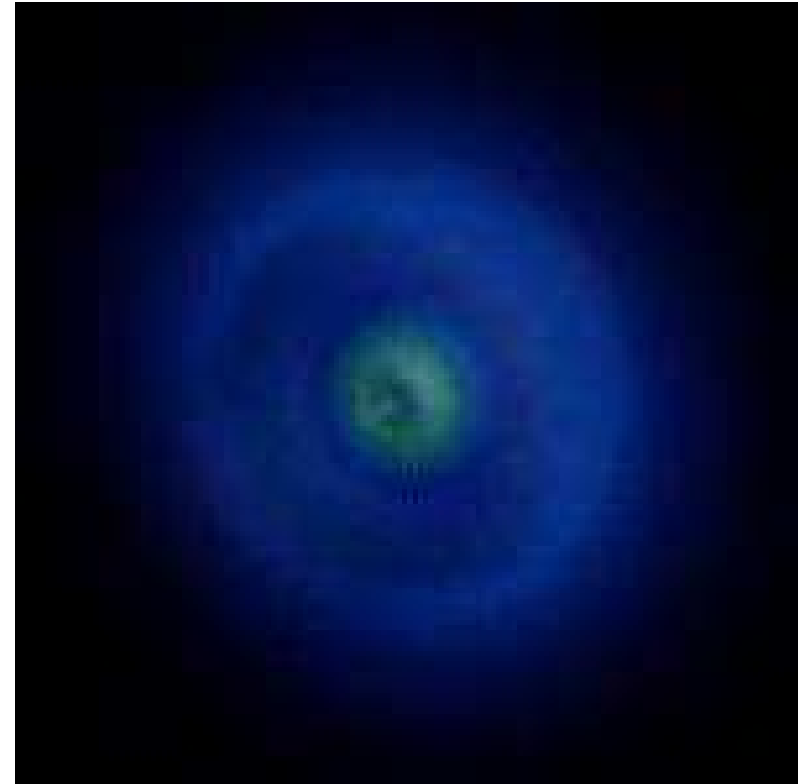
Cząstki i fale

Atom wodoru

Opis klasyczny



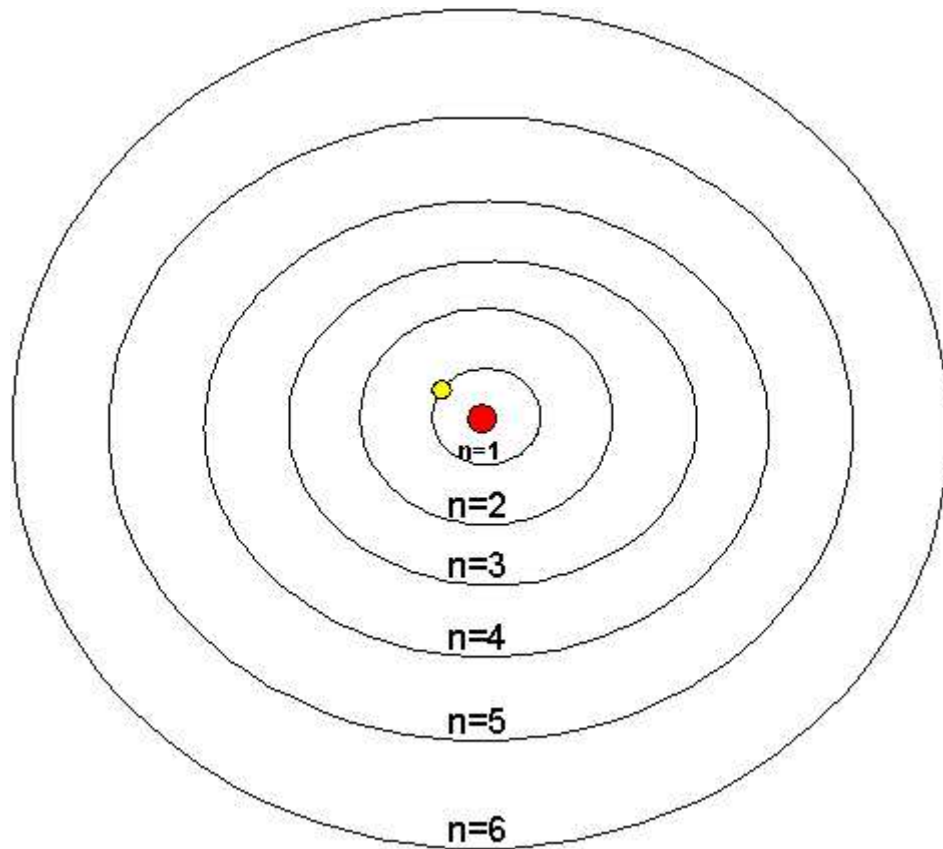
Opis kwantowy, stan 3p1



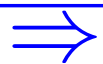
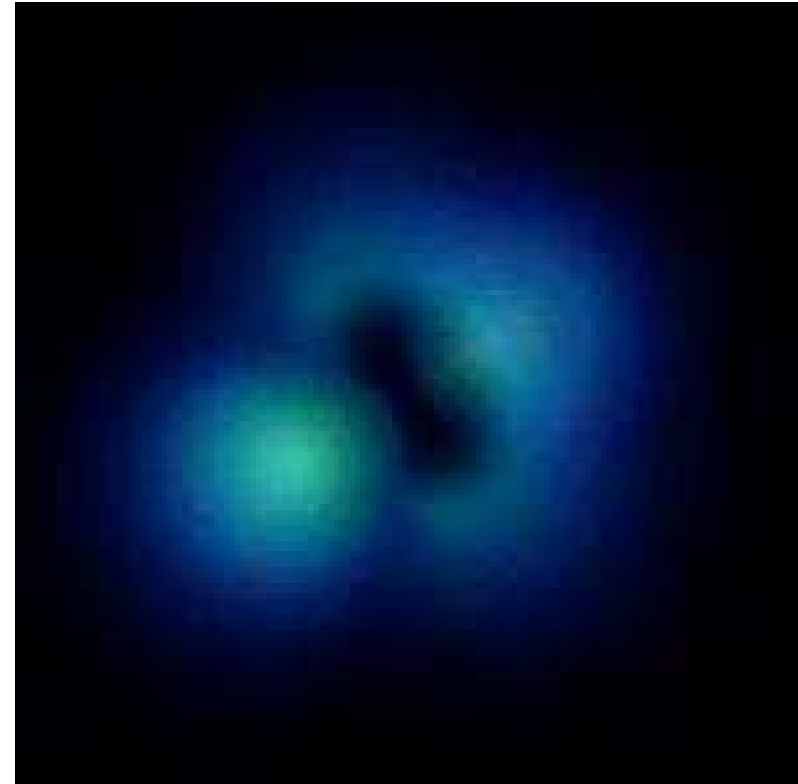
Cząstki i fale

Atom wodoru

Opis klasyczny



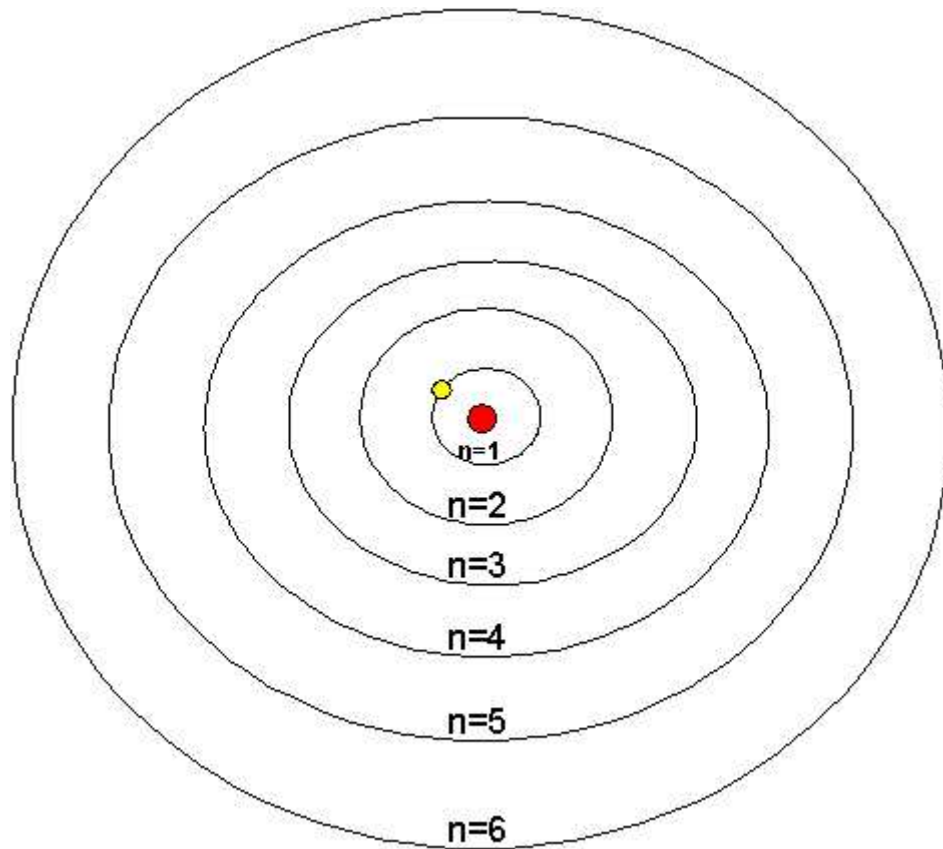
Opis kwantowy, stan 3d0



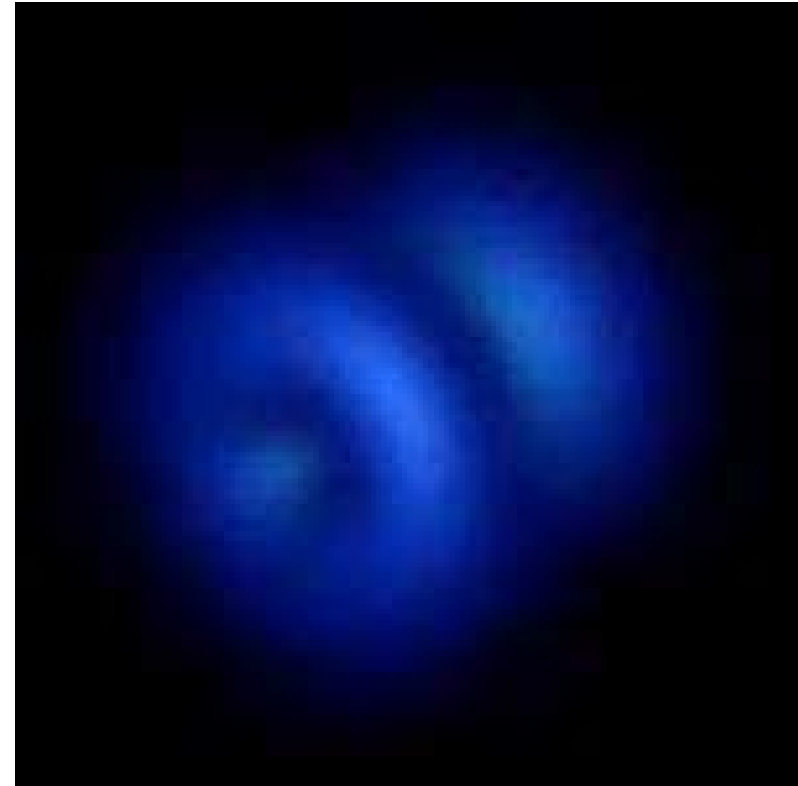
Cząstki i fale

Atom wodoru

Opis klasyczny



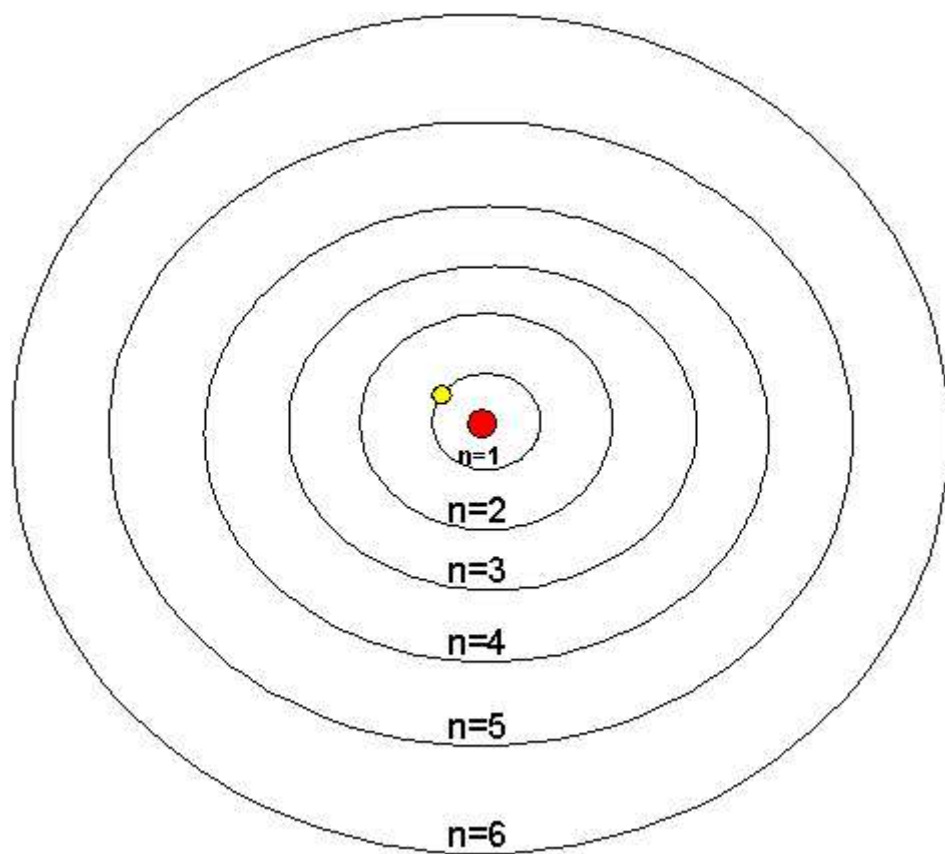
Opis kwantowy, stan 3d1



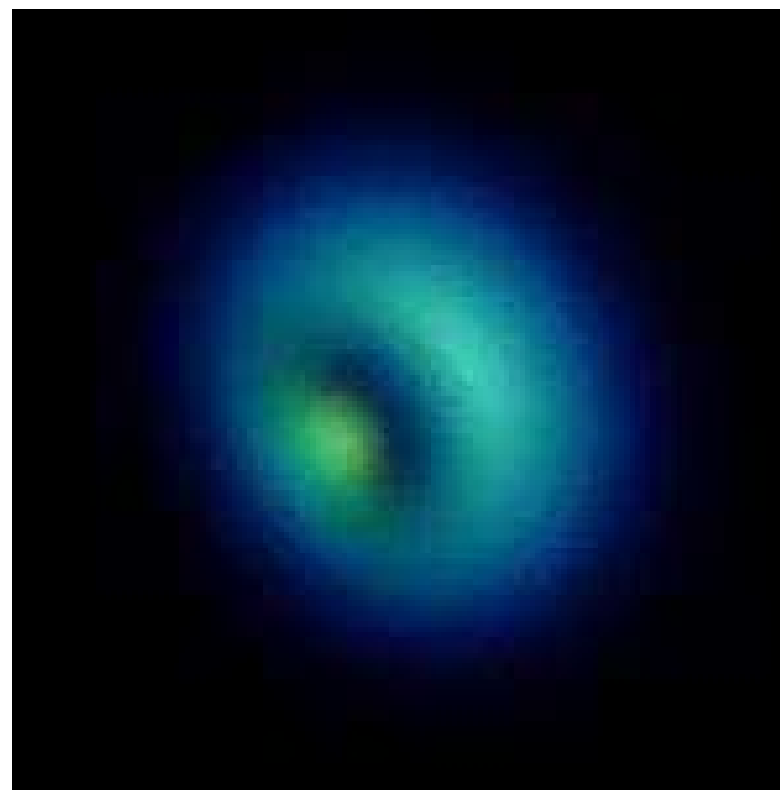
Cząstki i fale

Atom wodoru

Opis klasyczny



Opis kwantowy, stan 3d2



Materia i antymateria

Równanie Diraca

Równanie Schrödingera było sprzeczne z teorią względności.

W roku 1928 **Paul Dirac** wprowadził relatywistyczne równanie falowe, które godziło **mechanikę kwantową** z **teorią względności**, a także opisywało poprawnie **spin** elektronu.

Równanie Diraca miało jednak zaskakującą cechę: przewidywało istnienie **stanów o ujemnej energii!**...

W roku 1931 Dirac zapostulował, że stany te powinny odpowiadać fizycznym cząstkom, ale o przeciwnym ładunku - **antycząstkom**.

Pozytron został odkryty rok później...



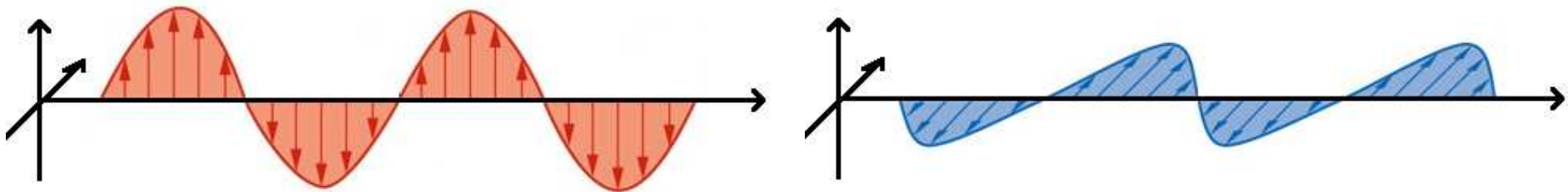
Materia i antymateria

Amplituda funkcji falowej opisuje **prawdopodobieństwo** znalezienia cząstki w danym miejscu i danej chwili czasu.

$$p(\vec{r}, t) = |\psi(\vec{r}, t)|^2$$

Fizycznie mierzalna jest tylko **kwadrat amplitudy** funkcji falowej.

Jej **faza** (“**polaryzacja fali**”) jest **nieistotna**.



Symetria cechowania

Z założenia **lokalnej** symetrii cechowania możemy wyprowadzić pełną **teorię oddziaływań** elektronów, pozytonów i fotonów (**QED**)

Symetria cechowania wymaga też, żeby foton był bezmasowy.



Materia i antymateria

W oddziaływaniach elementarnych może następować zarówno **kreacja** jak i **anihilacja** par cząstka-antycząstka.

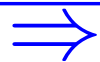
Zachowana jest całkowita **energia** i **pęd** układu, natomiast liczba i masy cząstek mogą się zmieniać.

Ograniczenie na masy produkowanych cząstek:

$$\sum m_f \leq \sqrt{s} = \sqrt{(\sum E_i)^2 - (\sum \vec{p}_i)^2}$$

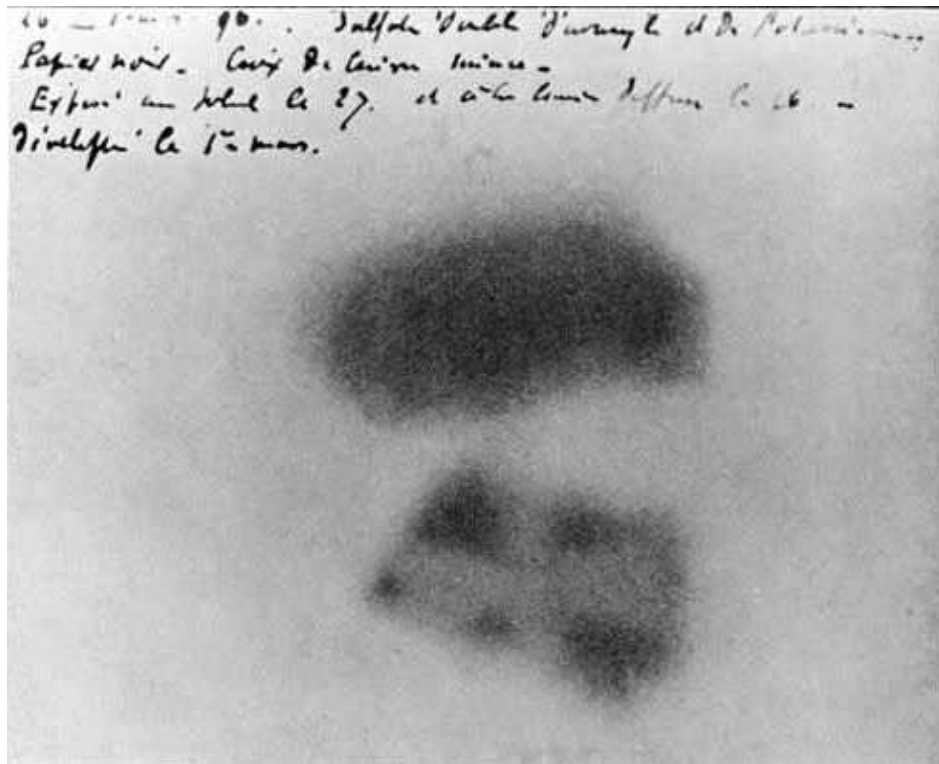
Im **wieksze są energie** zderzających się cząstek, tym więcej nowych cząstek i tym **cięższe cząstki** możemy wyprodukować!

Postęp w fizyce cząstek jaki dokonał się w ciągu ostatnich 100 lat był nierozdzielnie związany z rozwojem technik ich detekcji i akceleracji

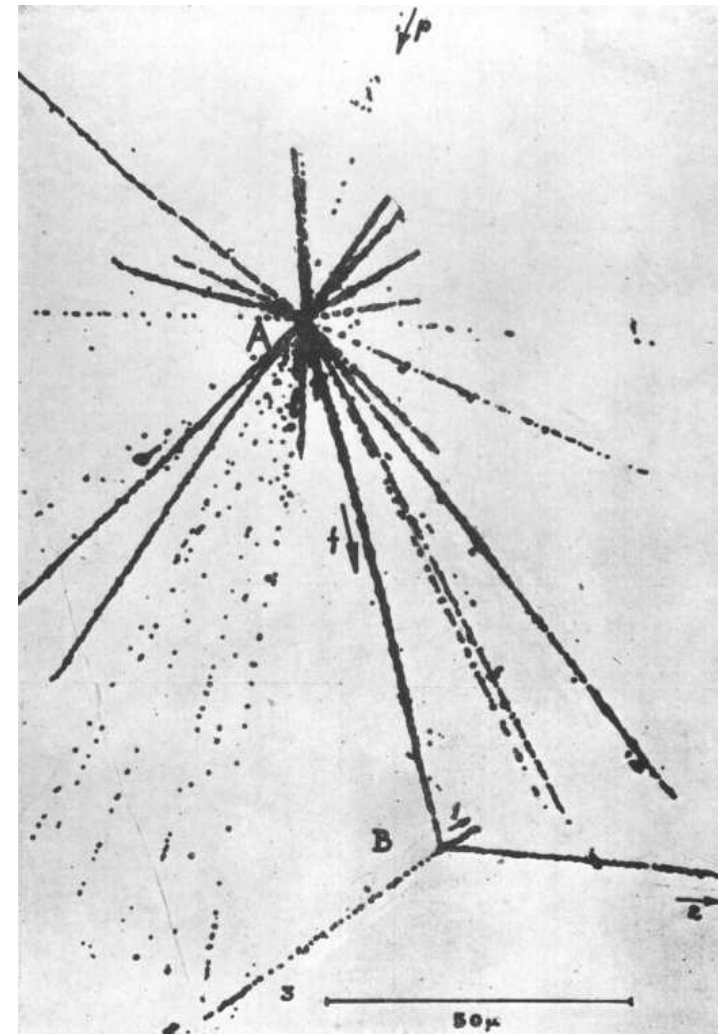


Detekcja cząstek

Emulsja fotograficzna



H. Becquerel, 1896

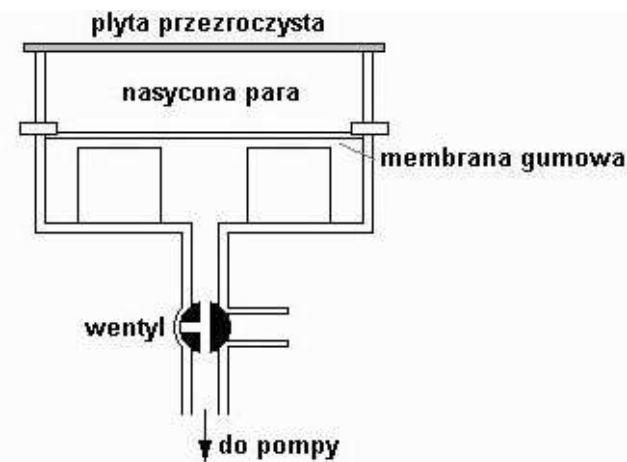
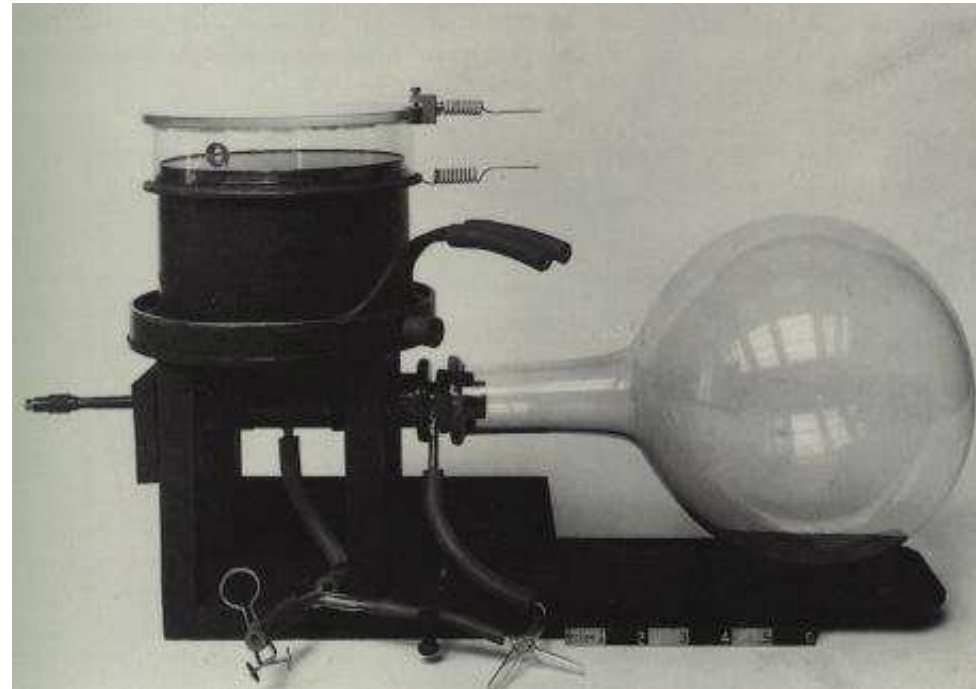


M. Danysz i J. Pniewski, 1953

Detekcja cząstek

Komora Wilsona

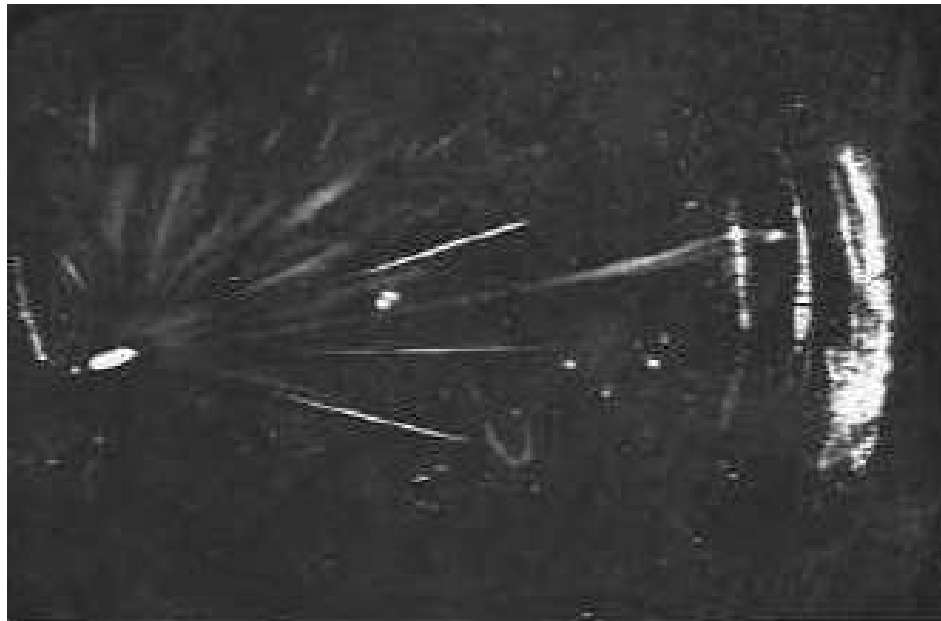
Charles Wilson, 1911



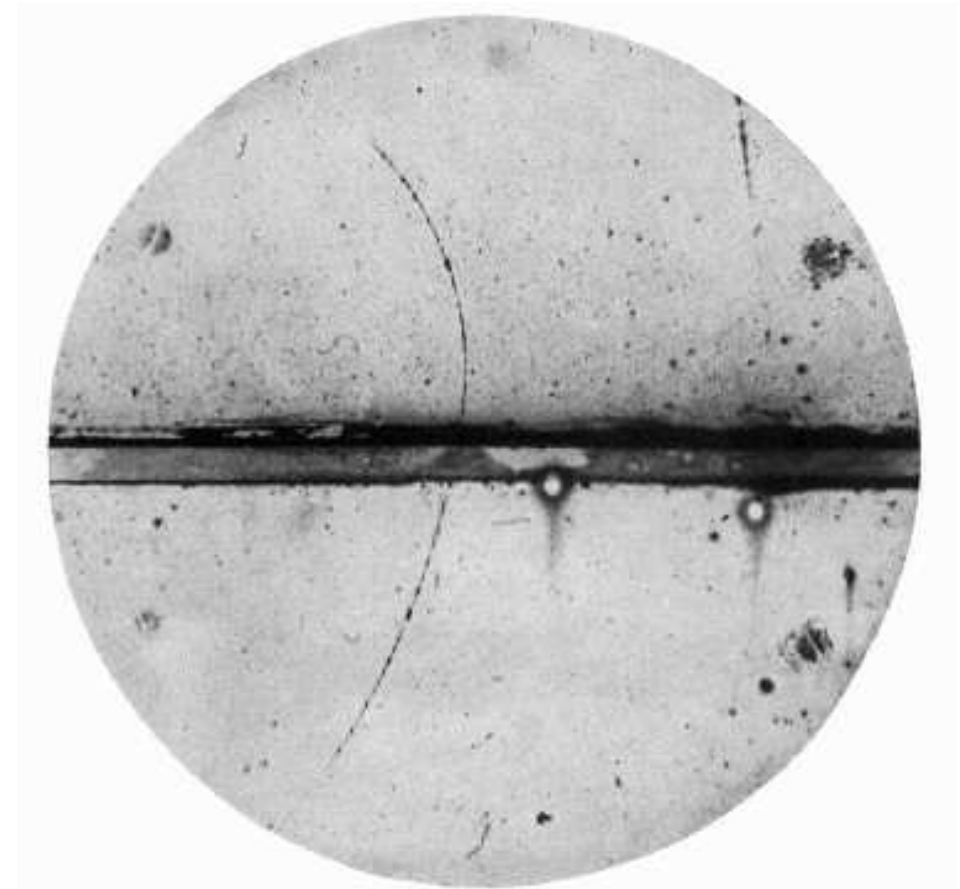
Detekcja cząstek

Komora Wilsona

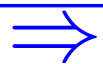
Charles Wilson, 1911



Carl Anderson, 1932

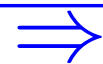
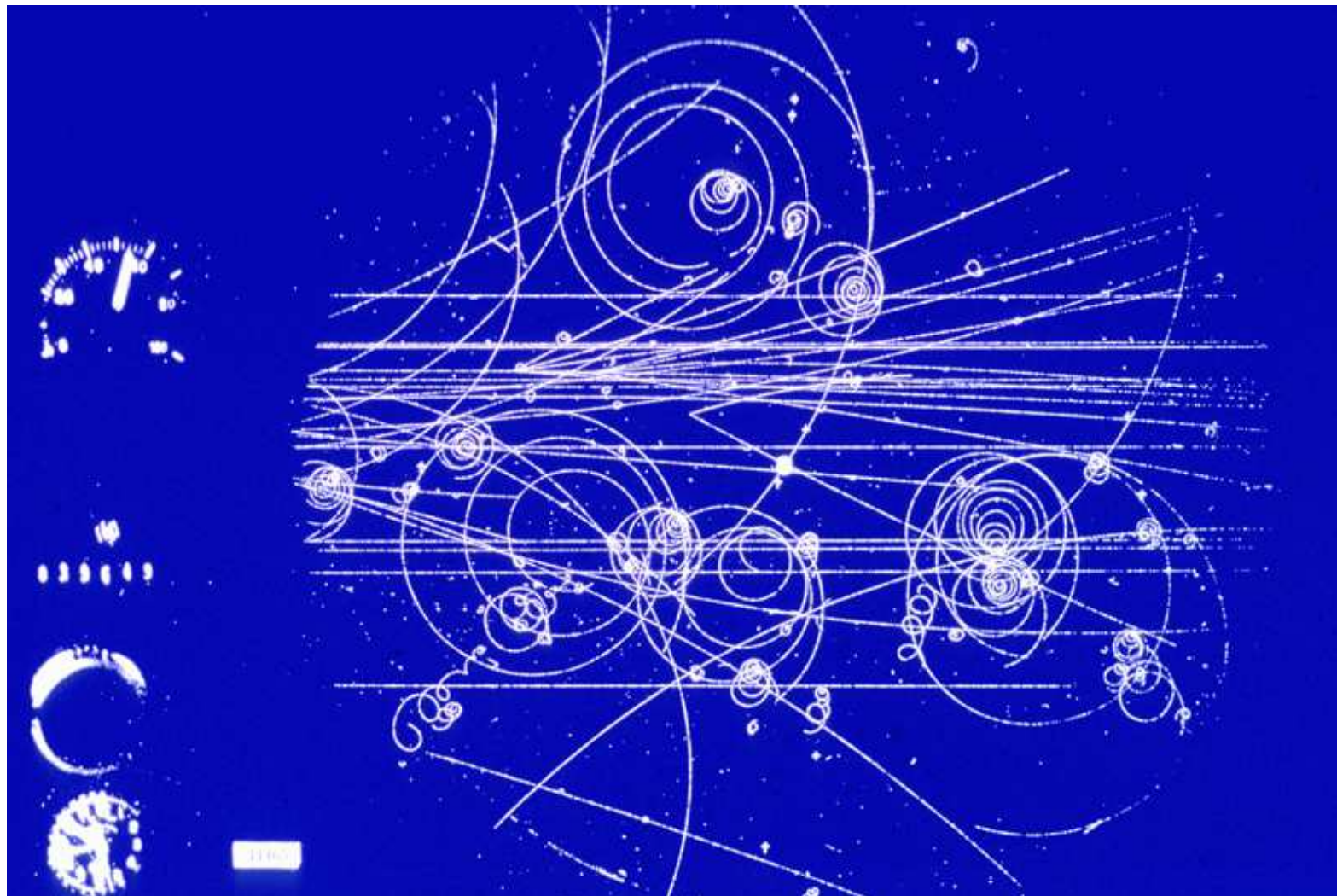


odkrycie pozytonu



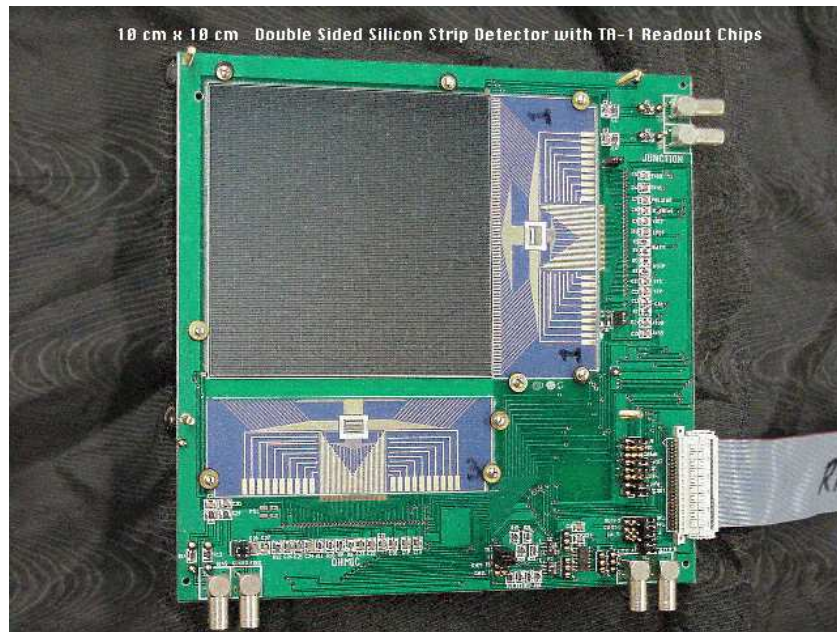
Detekcja cząstek

Komora pęcherzykowa, 1952

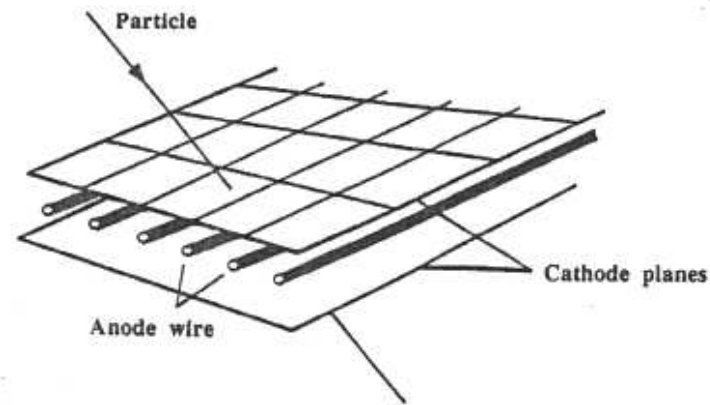


Detekcja cząstek

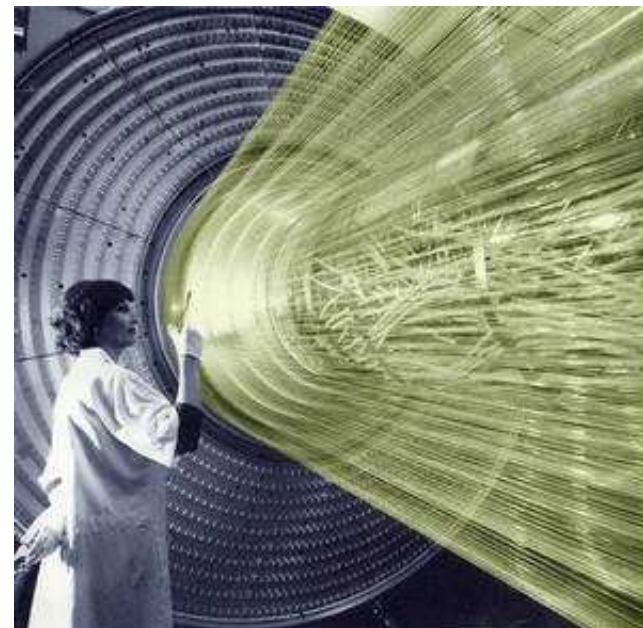
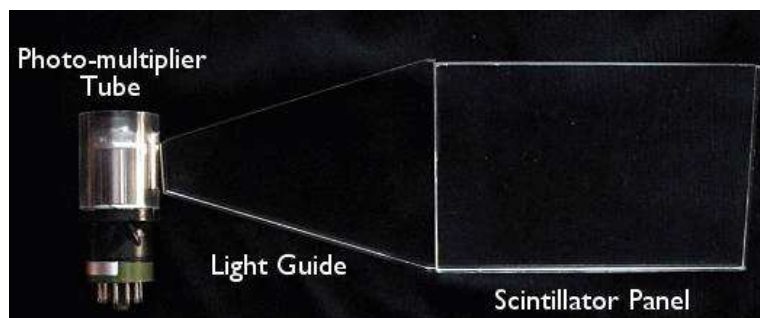
Detektor półprzewodnikowy



Komora wielodrutowa, 1970



Scyntylator

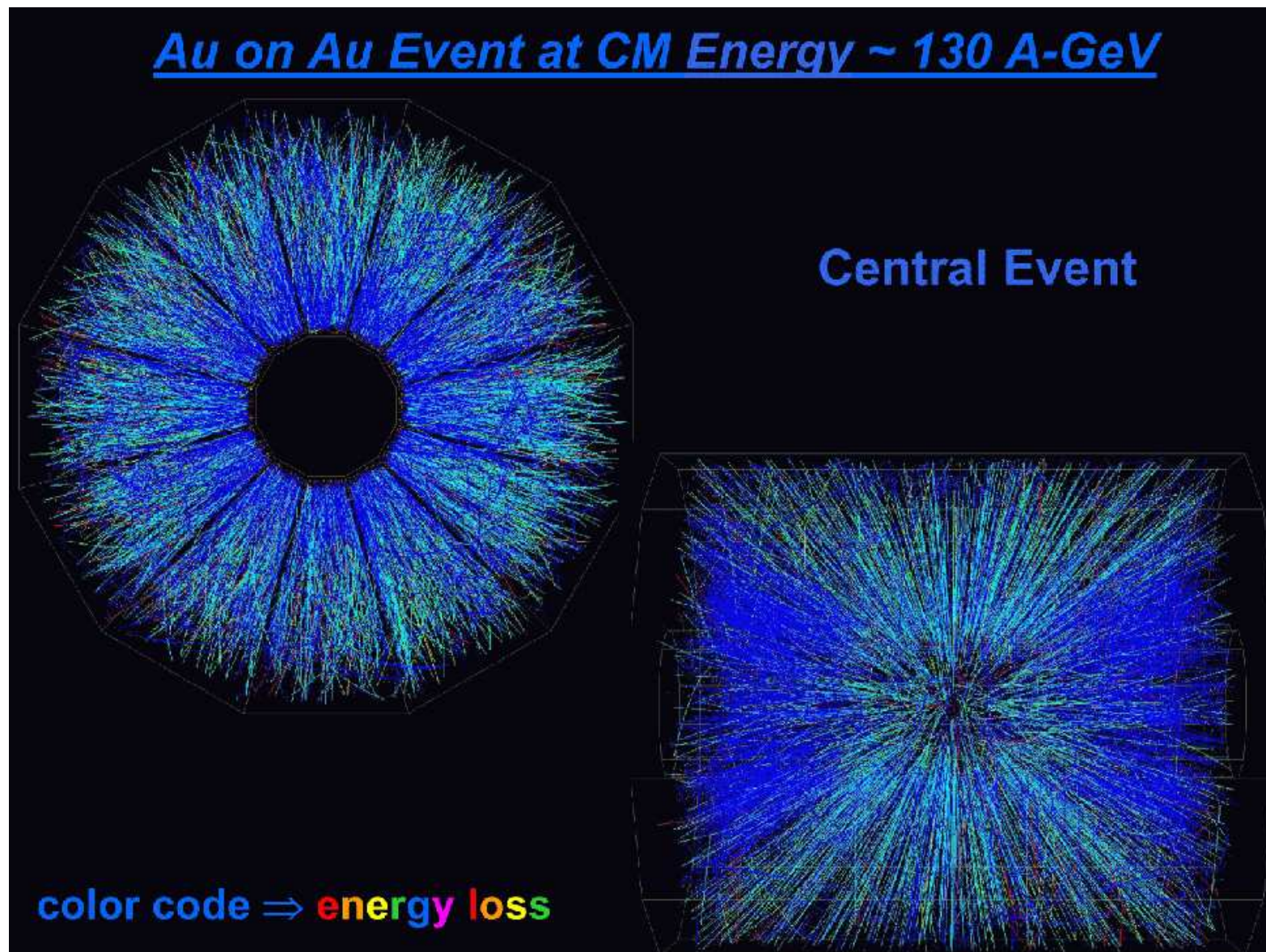


Detekcja cząstek

TPC

Komora
projekcji
czasowej

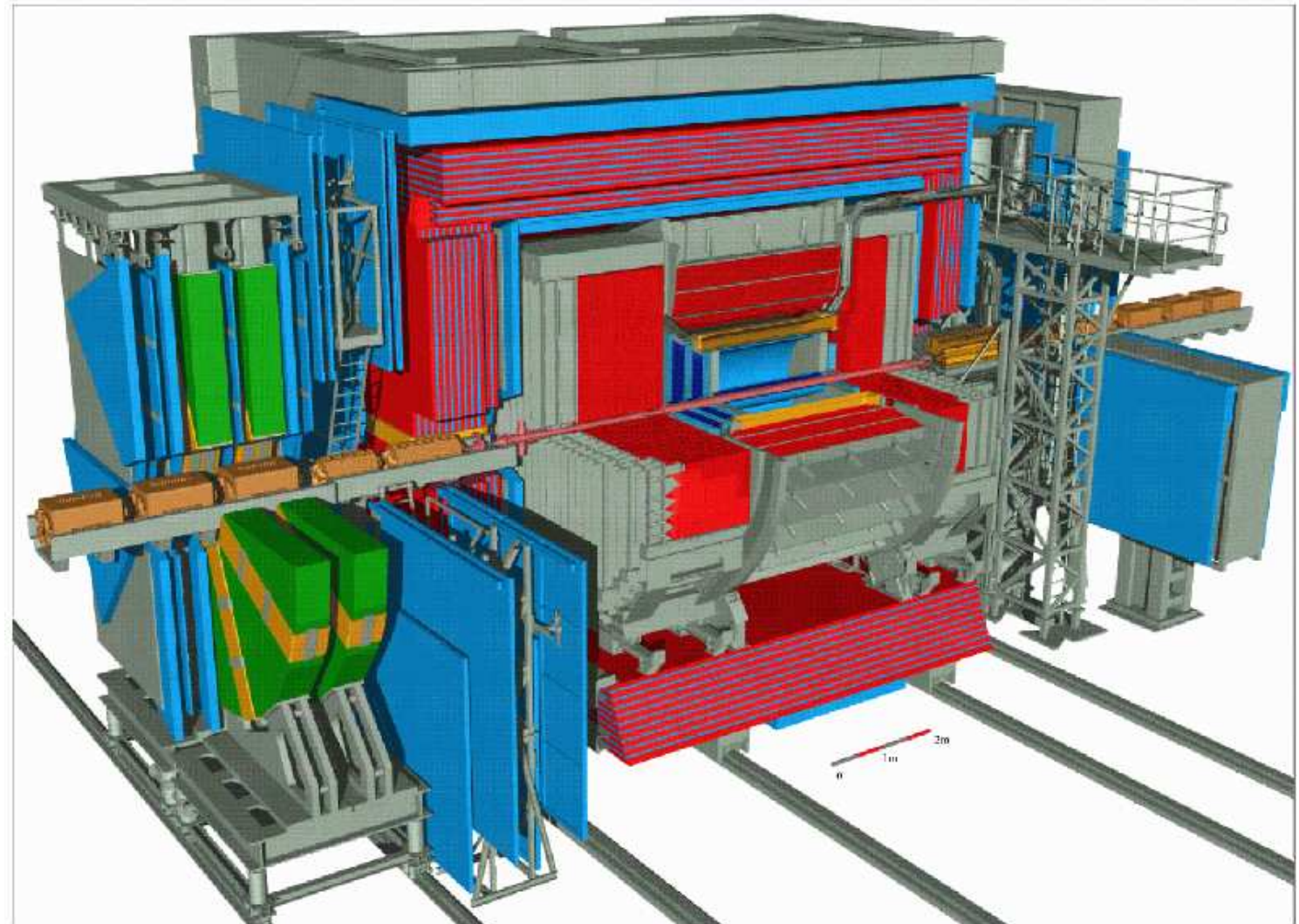
Przypadek
rejestrowany
w detektorze
STAR



Detekcja cząstek

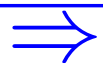
Współczesne eksperymenty

Detektor **ZEUS**,
akcelerator
HERA,
zderzenia wiązek
przeciwbieżnych
 $e^{\pm}p$



ZEUS (HERA) 

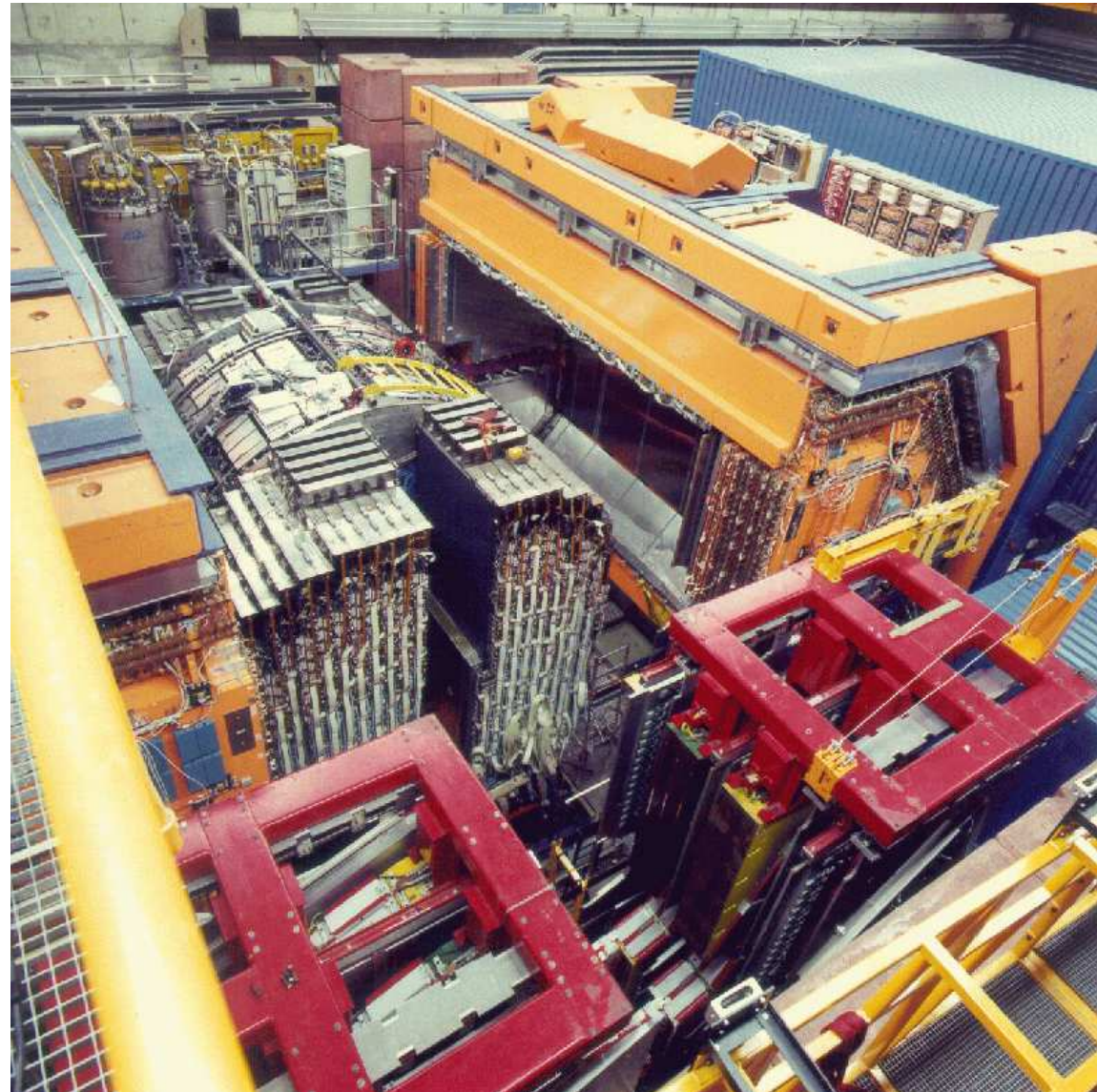
Software: SURC-IDEAS level V11
Performed by: Carsten Hartmann
Status: October 1995



Detekcja cząstek

Współczesne eksperymenty

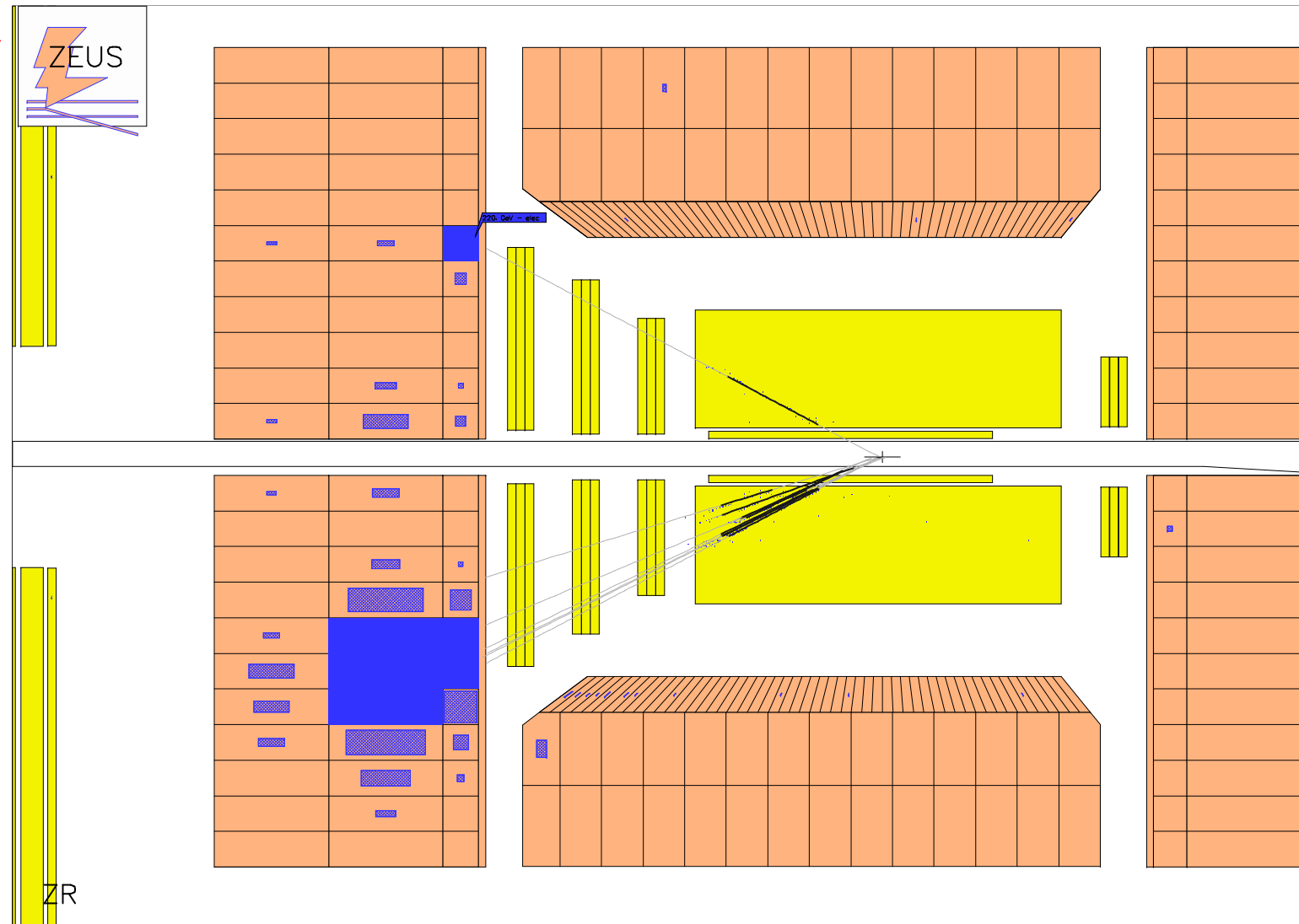
Detektor **ZEUS**,
akcelerator
HERA,
zderzenia wiązek
przeciwbieżnych
 $e^{\pm}p$



Detekcja cząstek

Współczesne eksperymenty

Detektor **ZEUS**,
akcelerator
HERA,
zderzenia wiązek
przeciwbieżnych
 $e^\pm p$



Źródła cząstek

Promieniowanie kosmiczne

Poza atmosferą ziemską - “pierwotne”
promieniowanie kosmiczne:

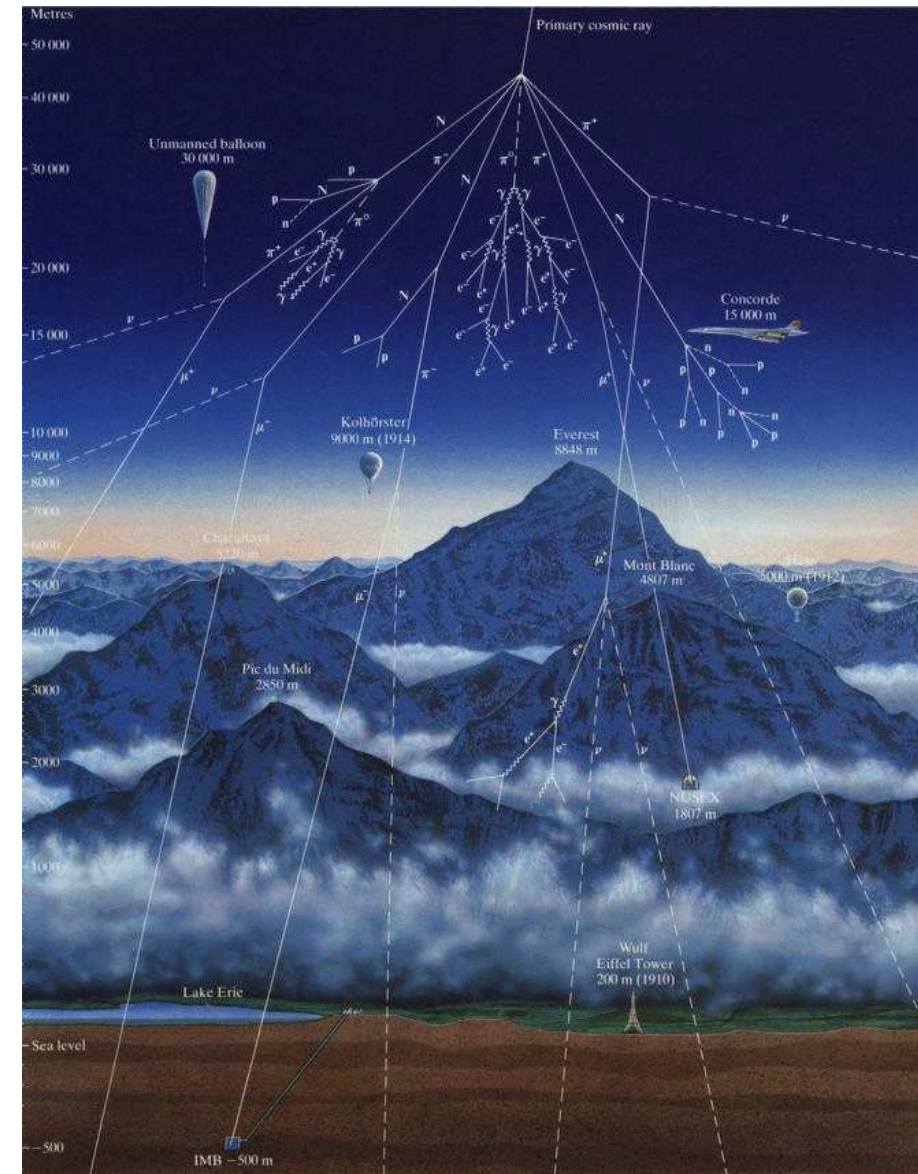
- protony (jądra H) $\sim 86\%$
- cząstki α (jądra He) $\sim 13\%$
- ciężkie jądra $\sim 1\%$

energie dochodzą do 10^{12} GeV !

Na powierzchni Ziemi - “wtórne”:

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

Łącznie około 180 na $m^2 \cdot s$



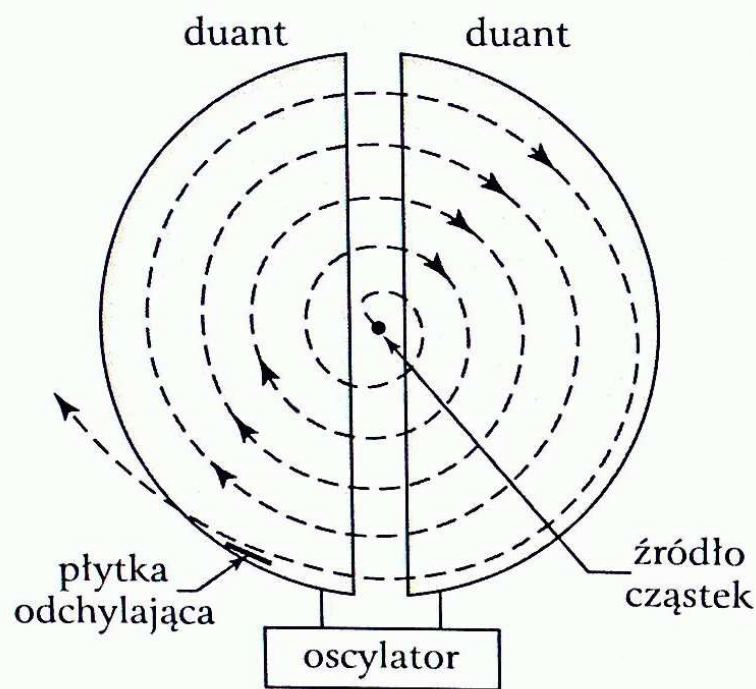
Źródła cząstek

Cyklotron

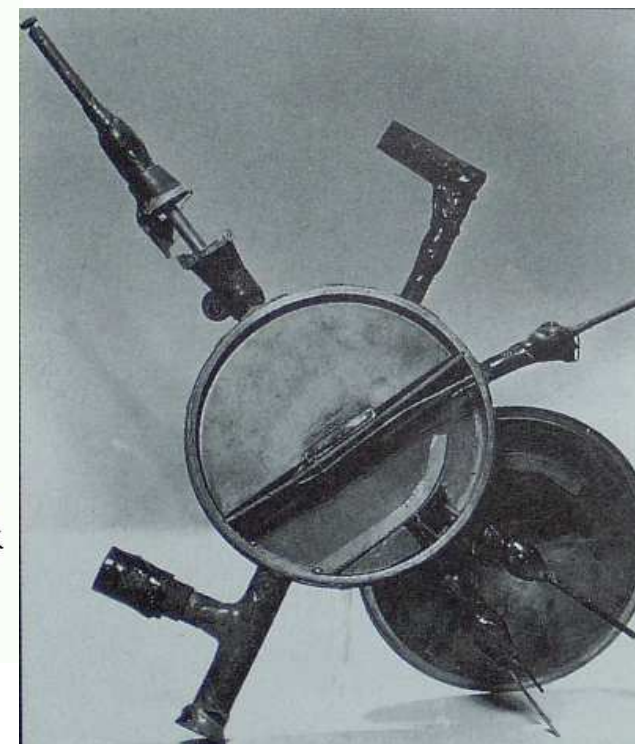
Ernest Lawrence



Schemat



Pierwszy cyklotron
1931



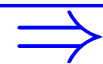
Źródła cząstek

Synchrotron 1955



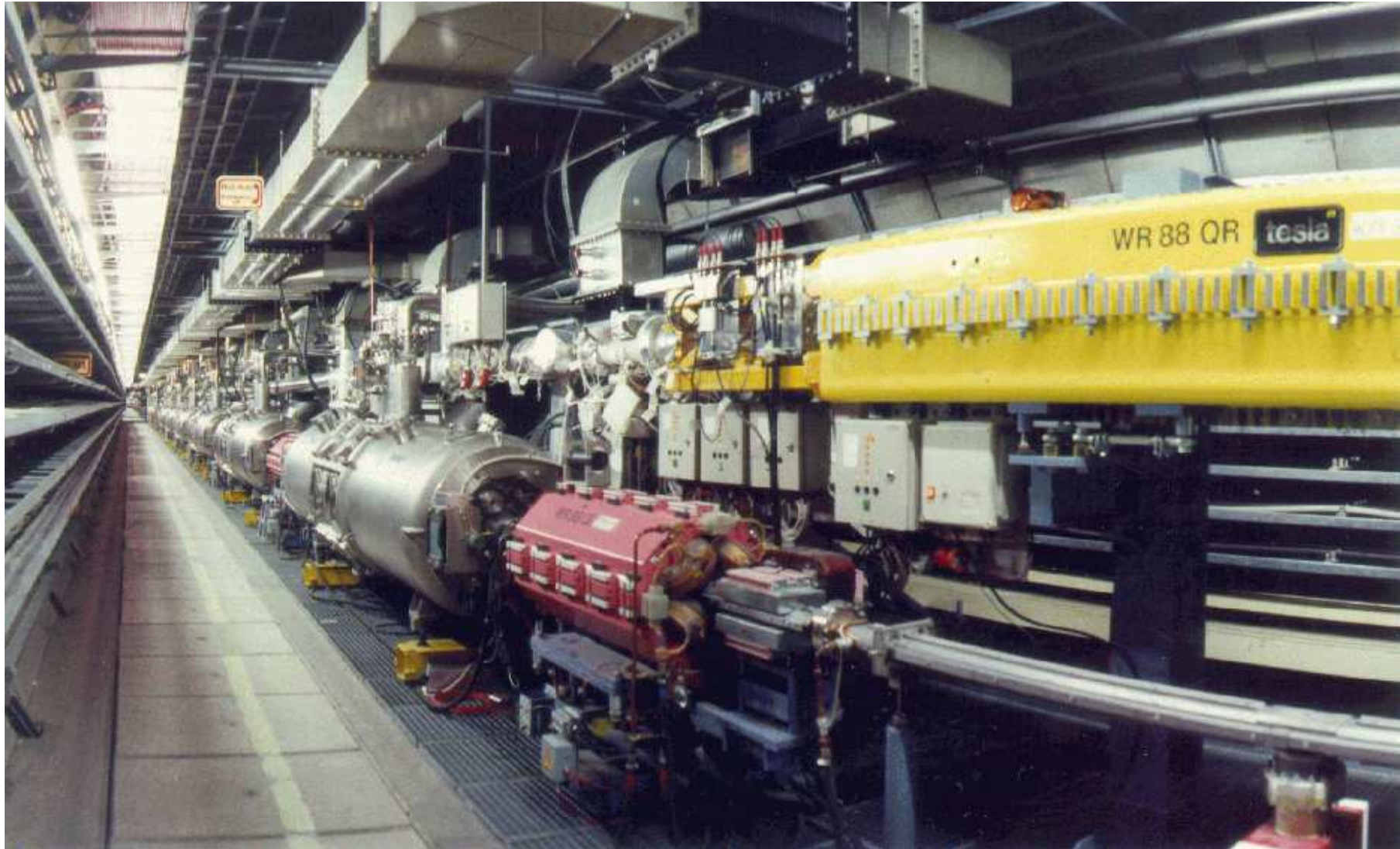
Źródła cząstek

Tevatron: akcelerator $p\bar{p}$



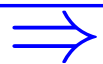
Źródła cząstek

Akcelerator HERA: $e^{\pm}p$



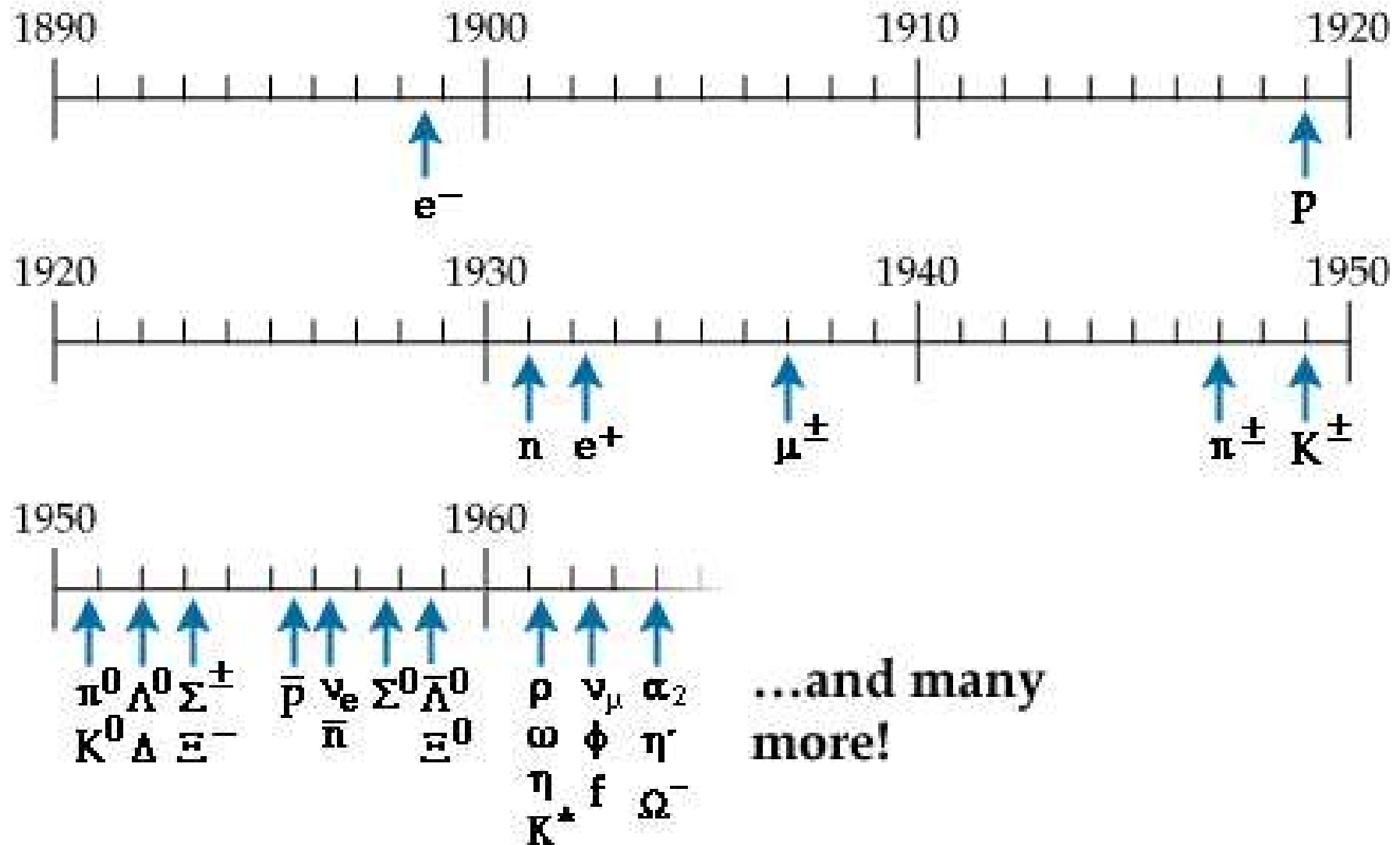
Źródła cząstek

Akcelerator LHC



Model Standardowy

Nowe cząstki



Model Standardowy

Cząstki dziwne

Czas życia
znacznie dłuższy
od spodziewanego

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

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

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

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

Produkcja i rozpad cząstki Λ :

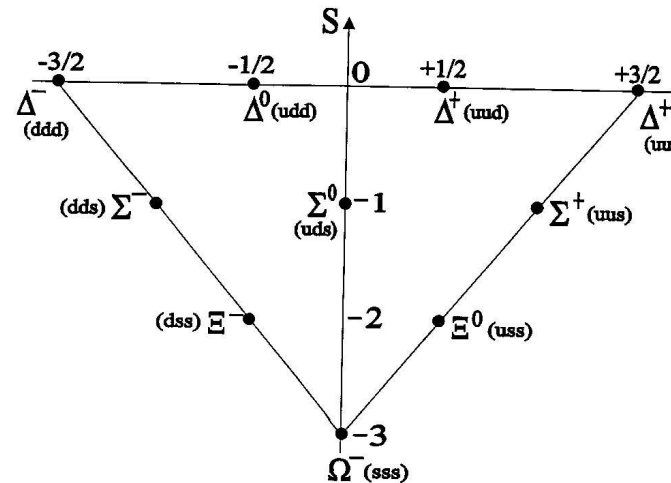
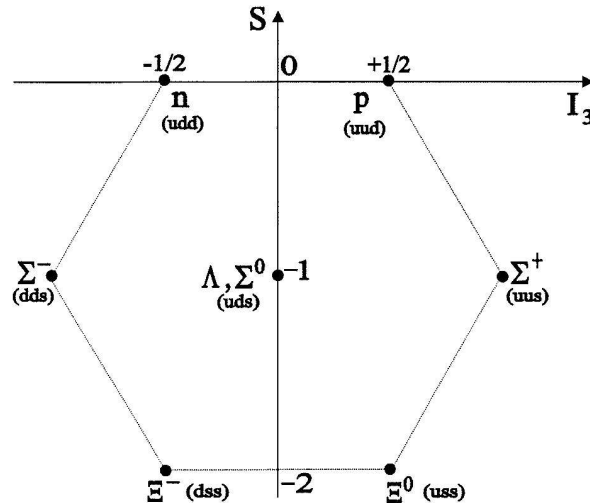


Model Standardowy

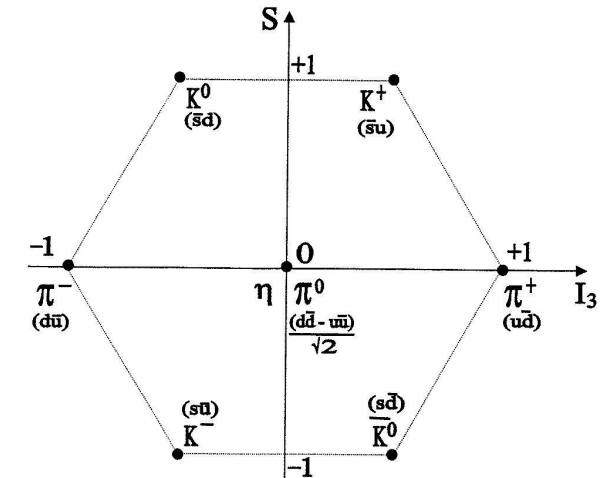
Model kwarkowy

W połowie lat 60 obserwowana **symetria** w świecie znanych **cząstek** doprowadziła **Gell-Mann'a** i **Zweig'a** do hipotezy istnienia **kwarków**

Trzy kwarki tworzyłyby bariony:



Para kwark-
antykwarik mezony:



Model Standardowy

Model kwarkowy

Gell-Mann i Zweig zakładali, że **kwarki** są:

- bardzo masywne
- silnie związane

⇒ nie obserwujemy swobodnych kwarków

Dziwne własności kwarków/partonów są związane ze szczególnymi własnościami **oddziaływań silnych** i związanego z nimi **ładunku**:

koloru

Z drugiej strony doświadczenia z rozpraszaniem elektronów pokazały, że wewnątrz protonu istnieją **partony**, które są:

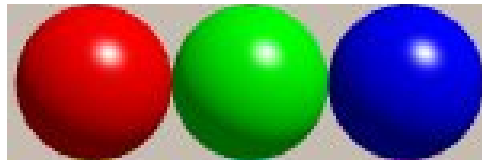
- lekkie
- quasi-swobodne



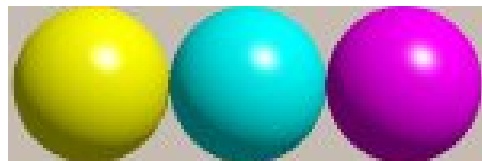
Model Standardowy

Kolor

Każdy z kwarków obdarzony jest ładunkiem kolorowym: **R**, **G** lub **B**.



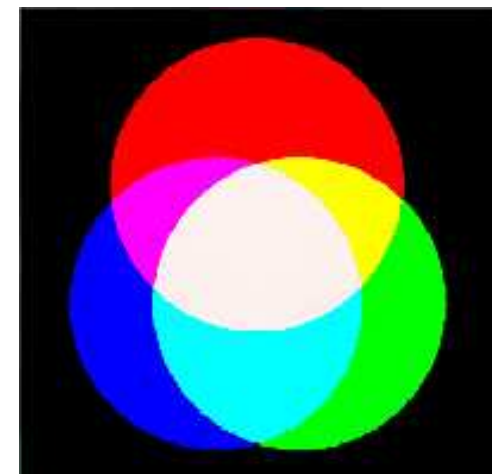
Antykwarki mają odpowiednio anty-kolory (kolory “ujemne”): \bar{R} , \bar{G} , \bar{B} .



Jako swobodne mogą istnieć tylko cząstki nie niosące netto ładunku kolorowego (cząstki “białe”):

$$R + G + B = 0$$

$$R + \bar{R} = G + \bar{G} = B + \bar{B} = 0$$



Model Standardowy

Kolor

Szczególną cechą oddziaływań silnych jest to, że bezmasowe nośniki oddziaływań, **gluony**, też niosą **ładunek kolorowy** (odpowiadający kombinacji kolor-antykolor).

Oddziaływania między gluonami prowadzą do “odwrotnej” zależności sprzężenia od odległości między ładunkami:

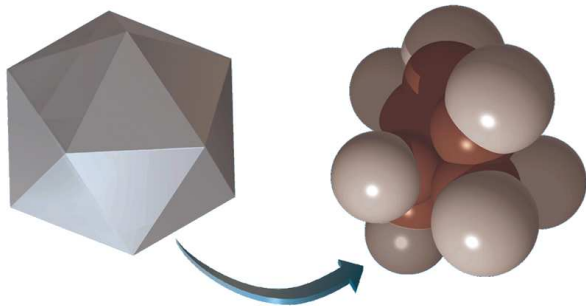
- na małych odległościach oddziaływanie jest słabe
⇒ asymptotyczna swoboda
- na dużych odległościach oddziaływanie szybko rośnie
⇒ uwięzienie kwarków



Model Standardowy

Budowa materii

Cząsteczka

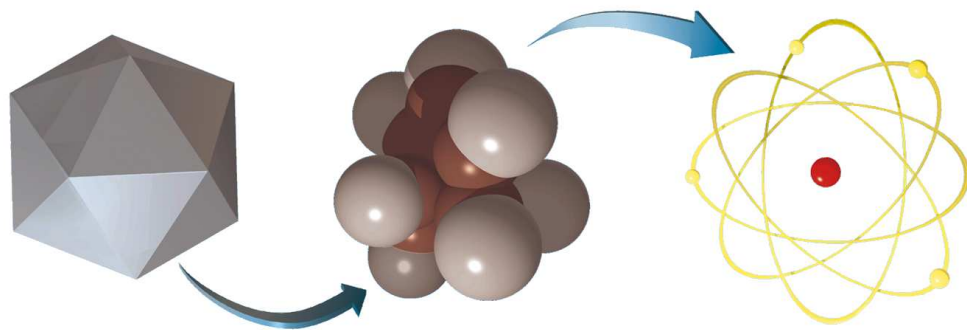


10^{-9} m

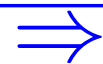
Model Standardowy

Budowa materii

Atom



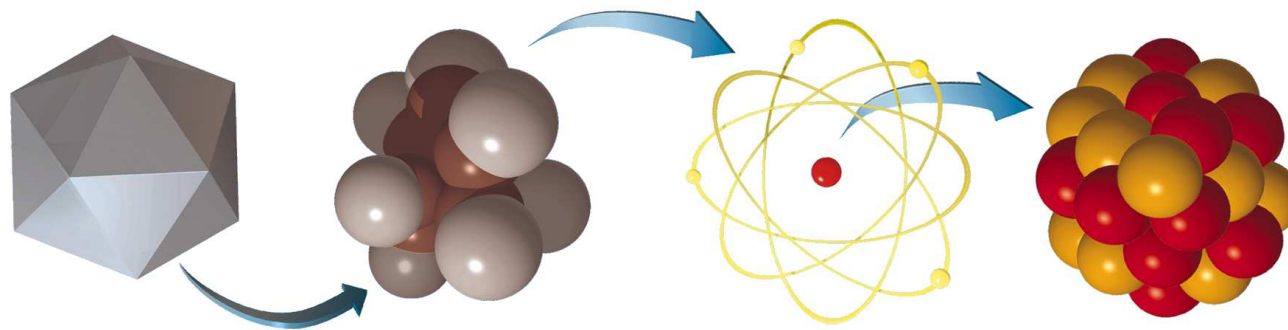
10^{-10} m



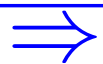
Model Standardowy

Budowa materii

Jądro atomowe



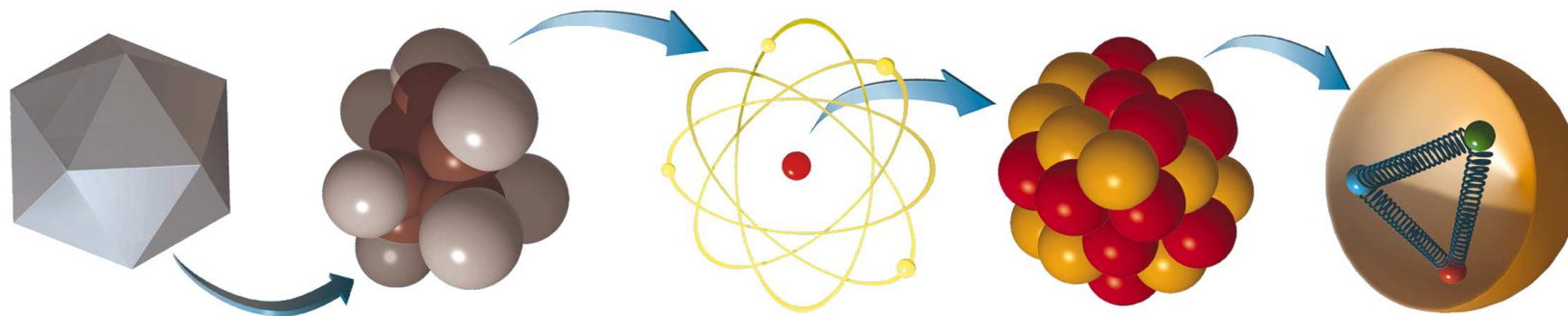
10^{-14} m



Model Standardowy

Budowa materii

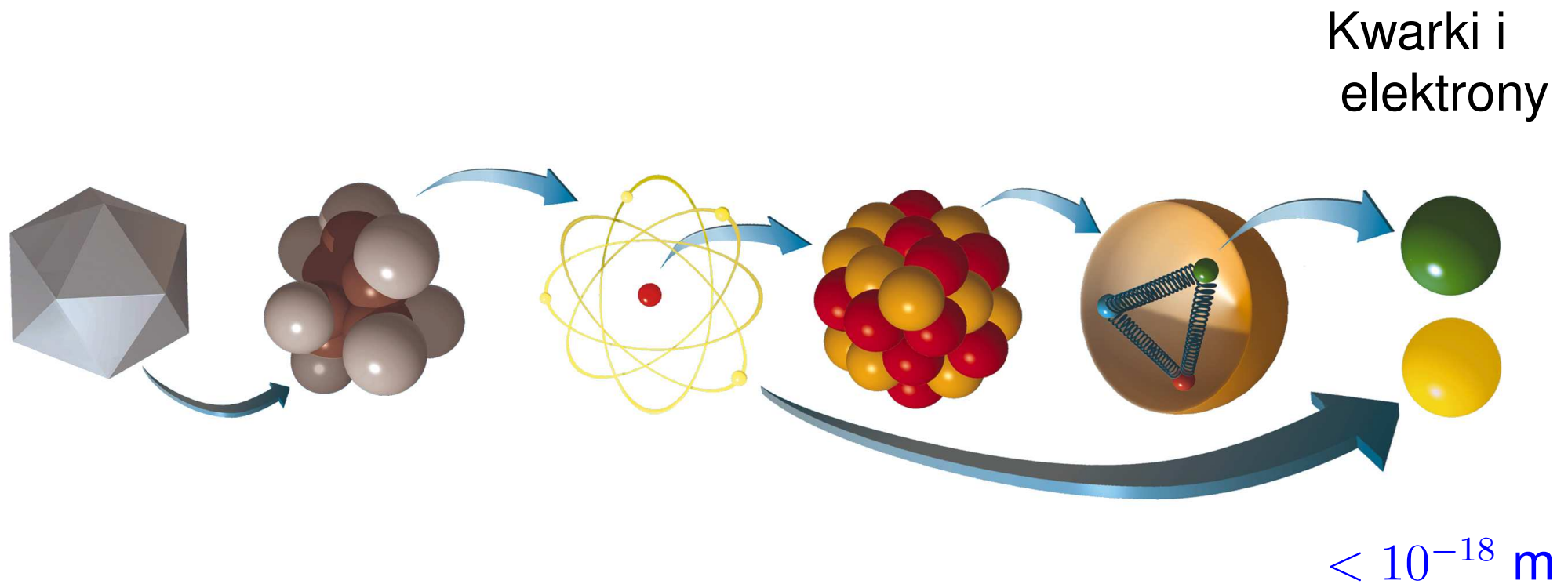
Nukleony



10^{-15} m

Model Standardowy

Budowa materii



Model Standardowy

Budowa materii

Świat “codzienny”: 3 “cegiełki” (elektron oraz kwarki u i d) + *neutrino*

Fizyka cząstek \Rightarrow 12 fundamentalnych “cegiełek” materii, fermionów

| | leptony | | kwarki | |
|-------------|------------------------|---------------------------------------|---|-------------------------------------|
| pokolenie 1 | e <i>elektron</i> | ν_e <i>neutrino el.</i> | d <i>down</i> | u <i>up</i> |
| pokolenie 2 | μ <i>mion</i> | ν_μ <i>neutrino mionowe</i> | s <i>strange</i> | c <i>charm</i> |
| pokolenie 3 | τ <i>taon</i> | ν_τ <i>neutrino taonowe</i> | b <i>beauty</i> <i>(bottom)</i> | t <i>top</i> <i>(truth)</i> |
| ładunek [e] | -1 | 0 | -1/3 | +2/3 |

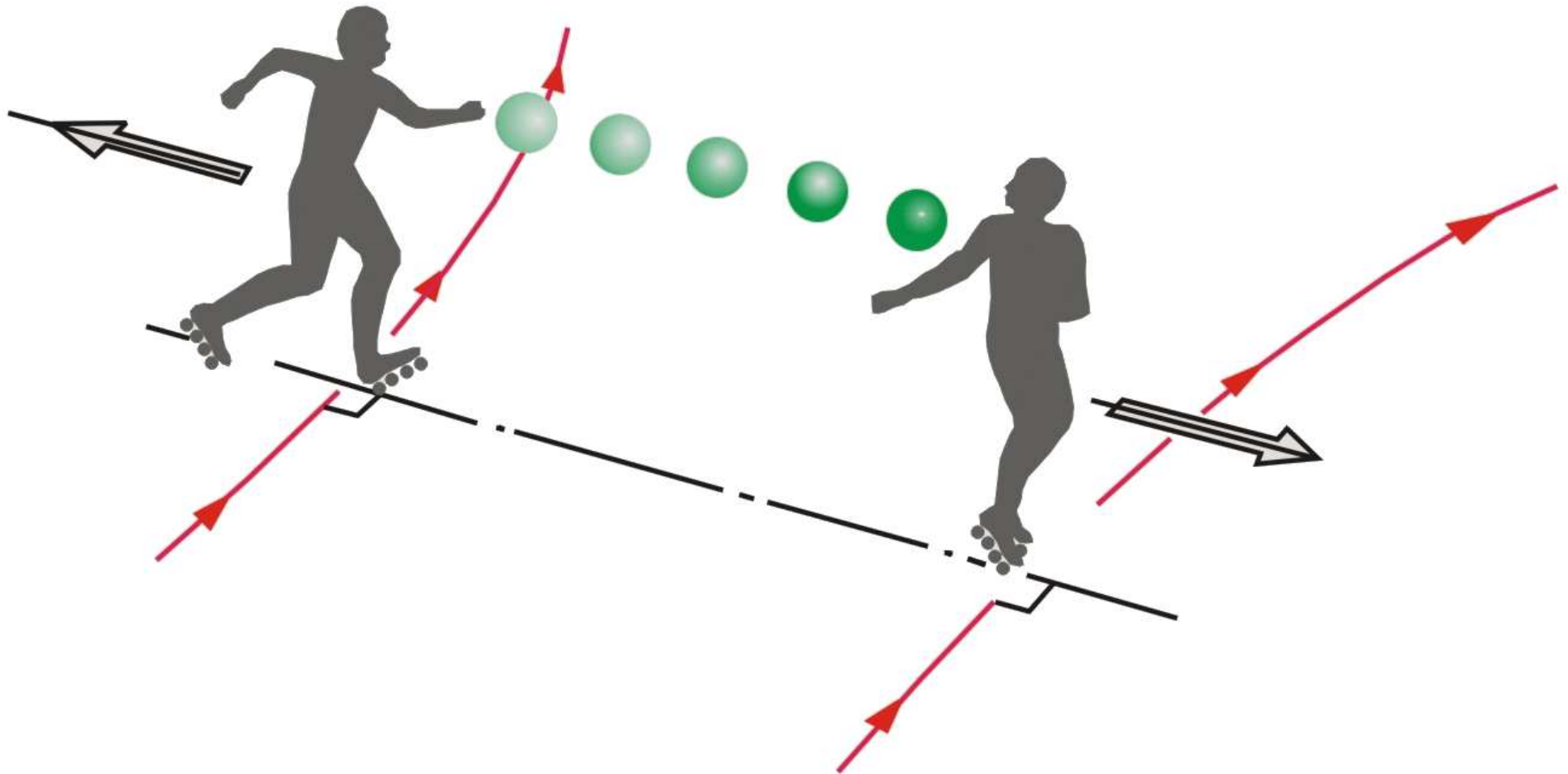
+ anty-fermiony (kolejnych 12)



Model Standardowy

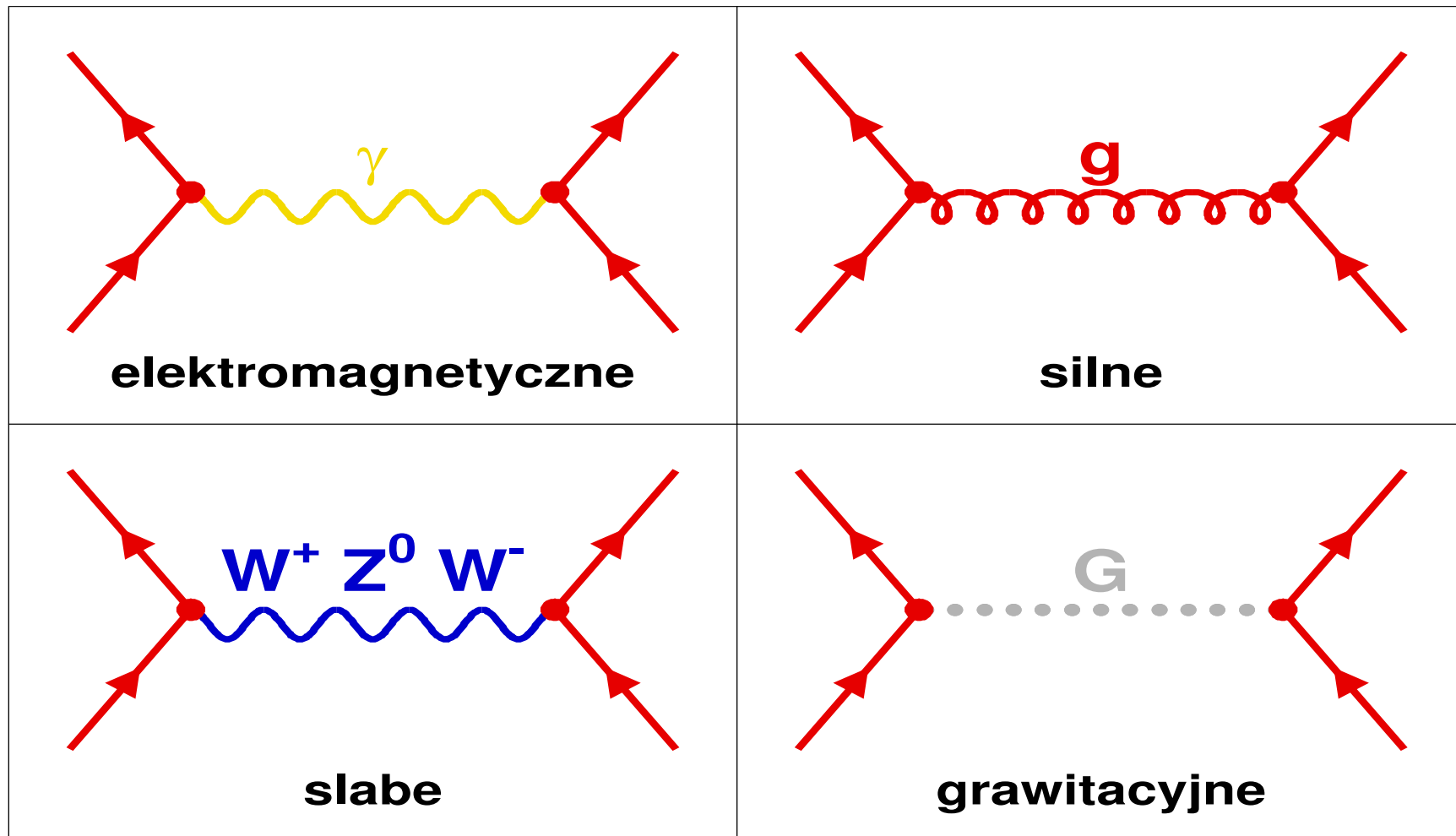
Oddziaływania

Opisujemy je jako wymianę cząstek - “nośników”



Model Standardowy

Wyróżniamy **cztery** podstawowe oddziaływania
przenoszone przez odpowiednie nośniki



Model Standardowy

Oddziaływania

Nośnik oddziaływania przenosi **energię** i/lub **pęd** między cząstkami będącymi źródłami tego oddziaływania

| <i>oddziaływanie</i> | <i>źródło</i> | <i>nośnik</i> | | <i>masa</i> |
|----------------------|-----------------|----------------|----------|-------------|
| grawitacyjne | masa | grawiton | G | 0 |
| elektromag. | ładunek | foton | γ | 0 |
| silne | “kolor” | gluony | g | 0 |
| słabe | “ładunek słaby” | “bozony | W^\pm | 80 GeV |
| | | pośredniczące” | Z^0 | 91 GeV |

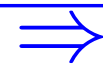
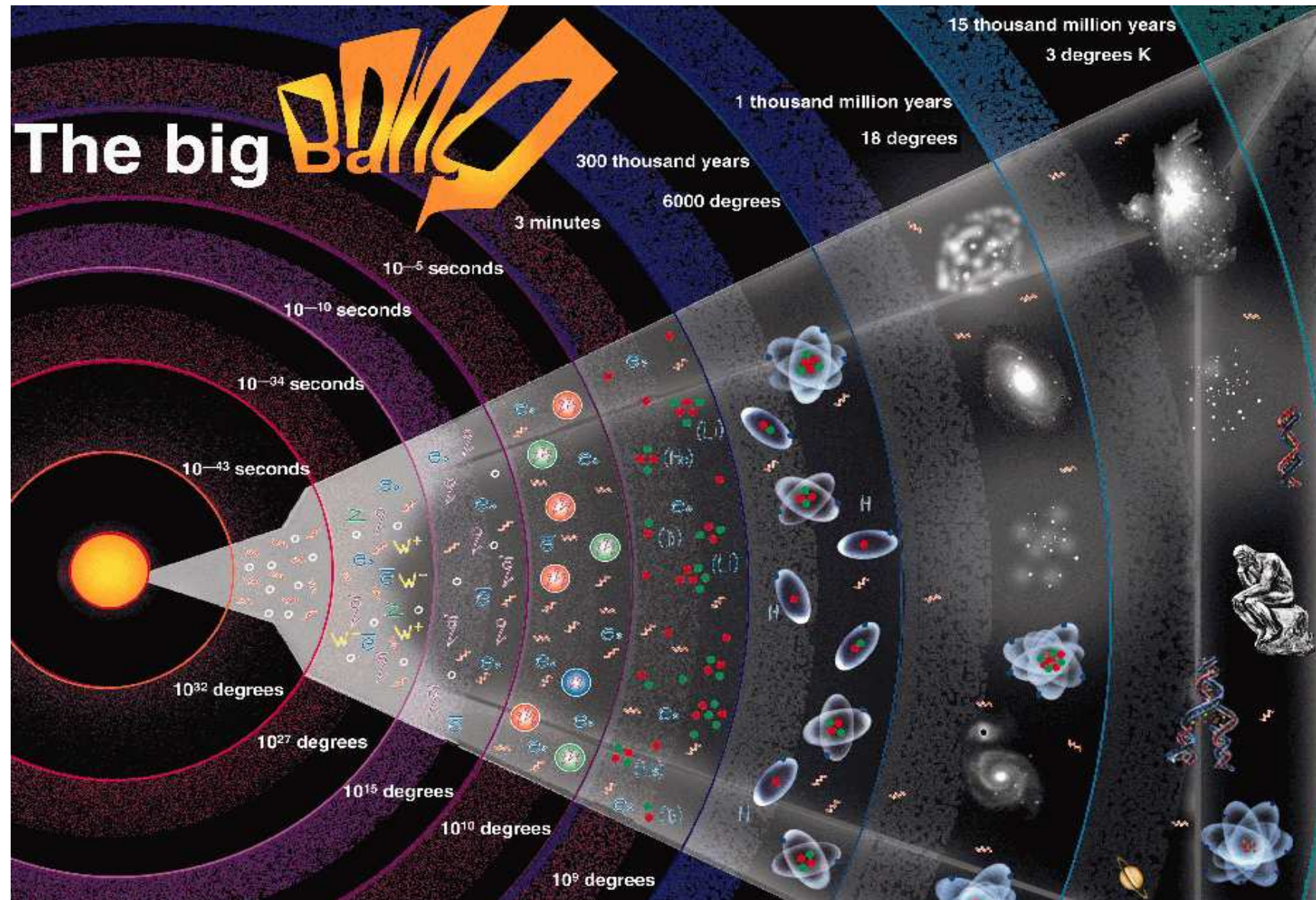
1 GeV = 1 000 000 000 eV \approx masa protonu

Nośniki oddziaływań uważamy za **punktowe** i **niepodzielne**, tak jak kwarki i leptoni...



Skąd się wzięła materia

*Wielki
wybuch*

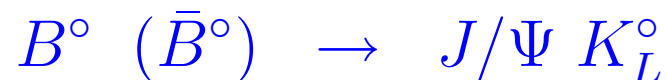


Skąd się wzięła materia

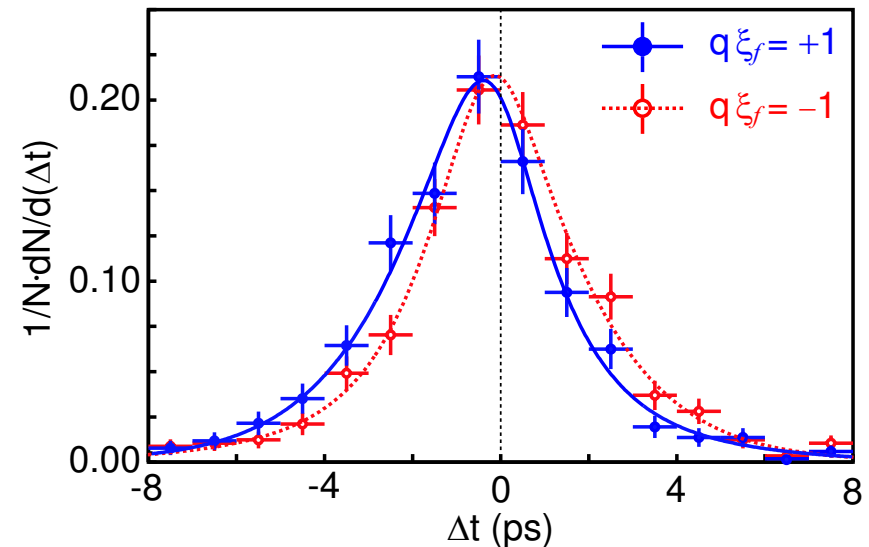
Łamanie symetrii CP

Aby w wyniku ewolucji Wszechświata naruszona została równowaga między **materią** i **antymaterią** konieczne jest m.in. **naruszenie zachowania CP** - symetrii między oddziaływaniami cząstek i antycząstek.

Dotychczas udało się zaobserwować łamanie CP jedynie w rozpadach mezonów K^0 i B^0 . Np. w kanale



B^0 rozpada się szybciej niż \bar{B}^0



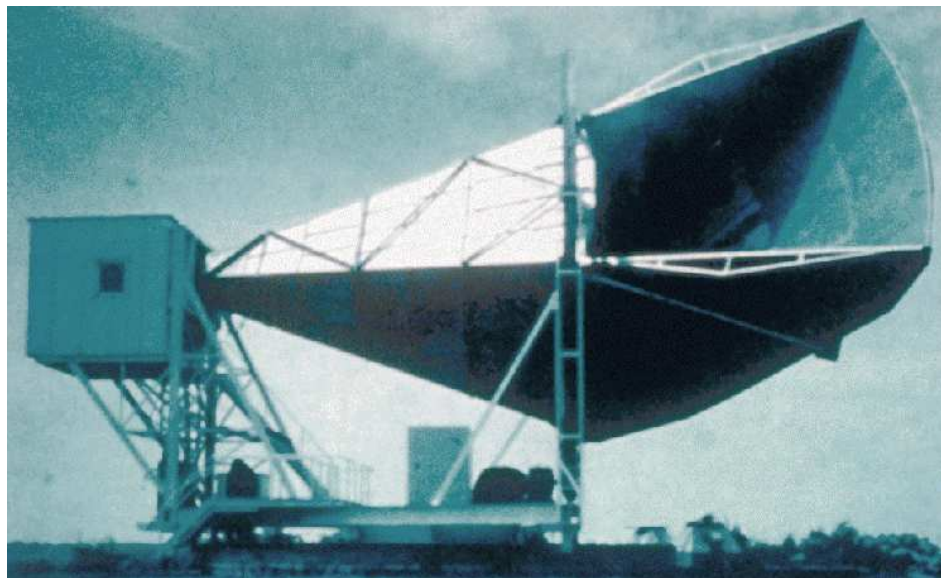
Jednak skala naruszenia CP w Modelu Standardowym jest za mała, żeby wyjaśnić obserwowaną asymetrię barionową we Wszechświecie.



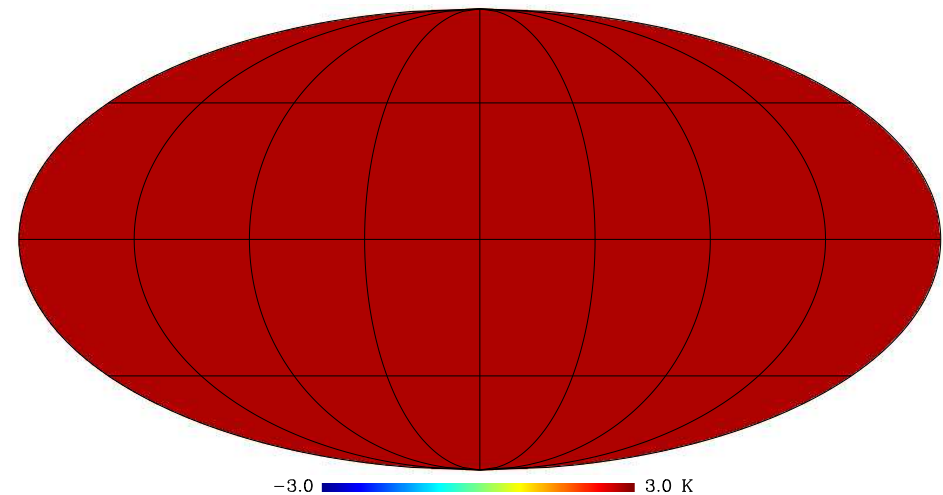
Dlaczego przestrzeń jest płaska

Promieniowanie tła

A.A.Penazis, R.W.Wilson, 1965



$$\Delta T \sim 1K$$

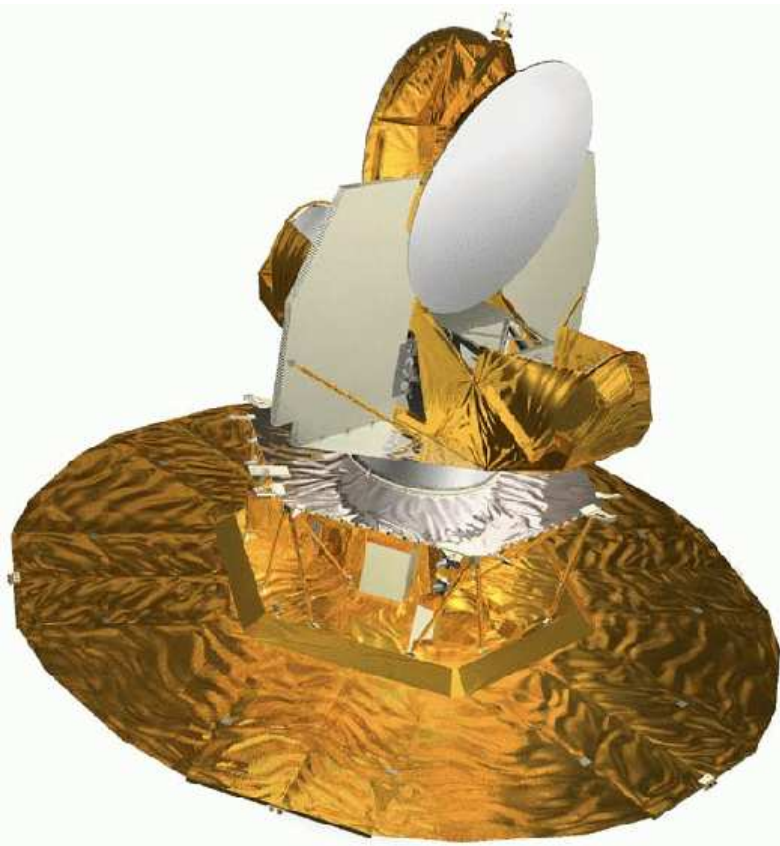


promieniowanie izotropowe
 $T \sim 2.7 \text{ K}$

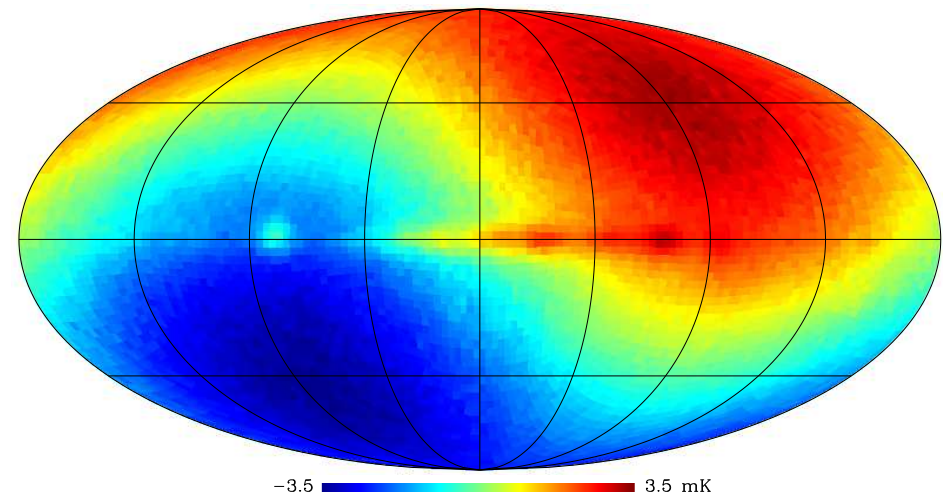
Dlaczego przestrzeń jest płaska

Promieniowanie tła

Sonda kosmiczna WMAP, 2001



$$\Delta T \sim 1 \text{ mK}$$



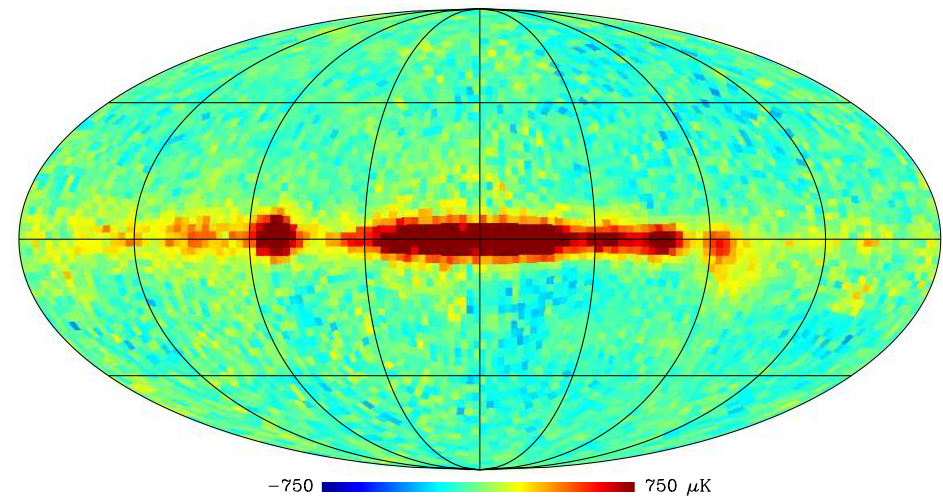
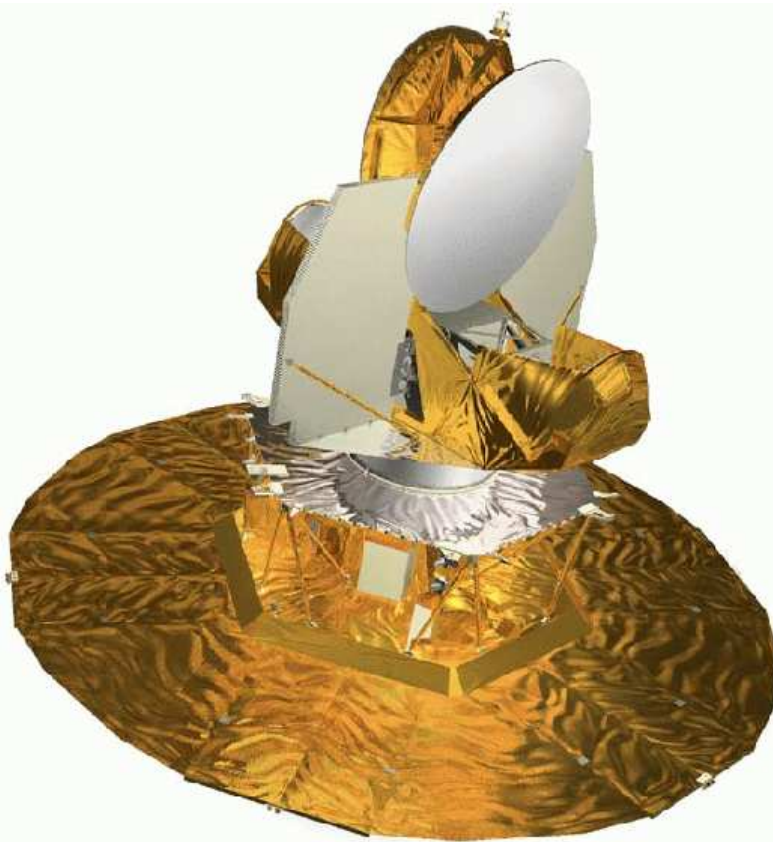
ruchu względem 'globalnego'
układu

Dlaczego przestrzeń jest płaska

Promieniowanie tła

Sonda kosmiczna WMAP, 2001

$$\Delta T \sim 200 \mu K$$



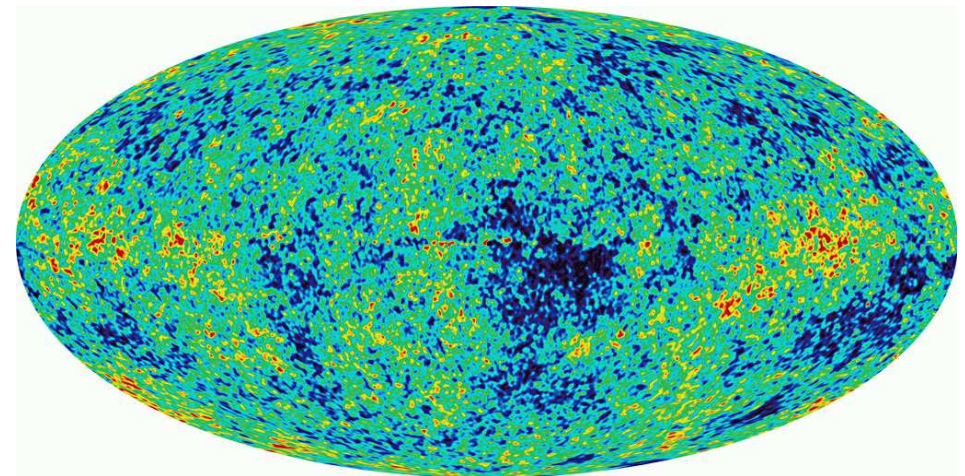
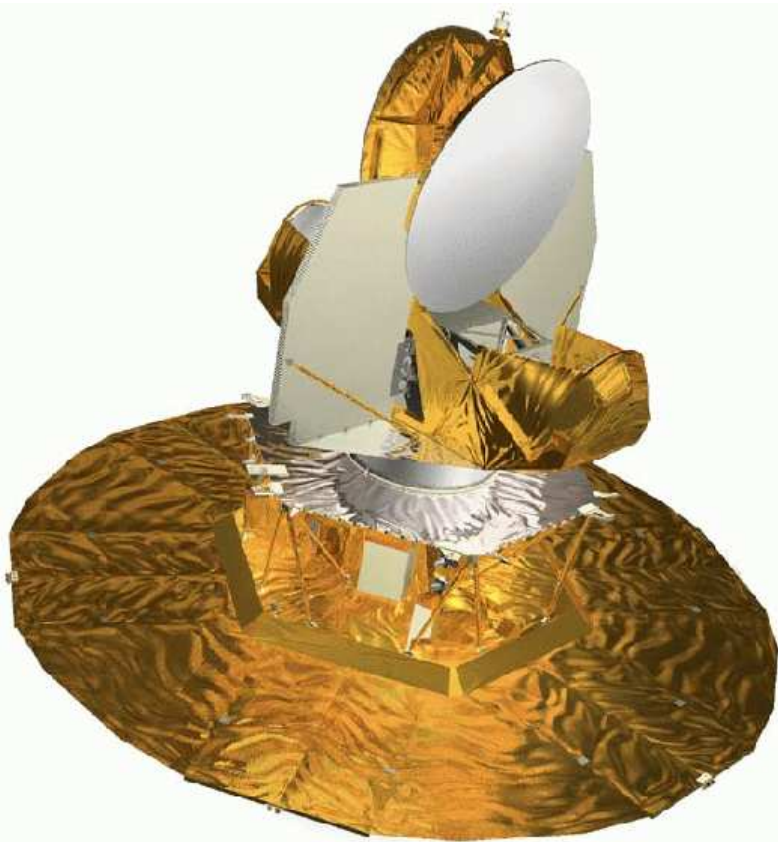
promieniowanie naszej galaktyki

Dlaczego przestrzeń jest płaska

Promieniowanie tła

Sonda kosmiczna WMAP, 2001

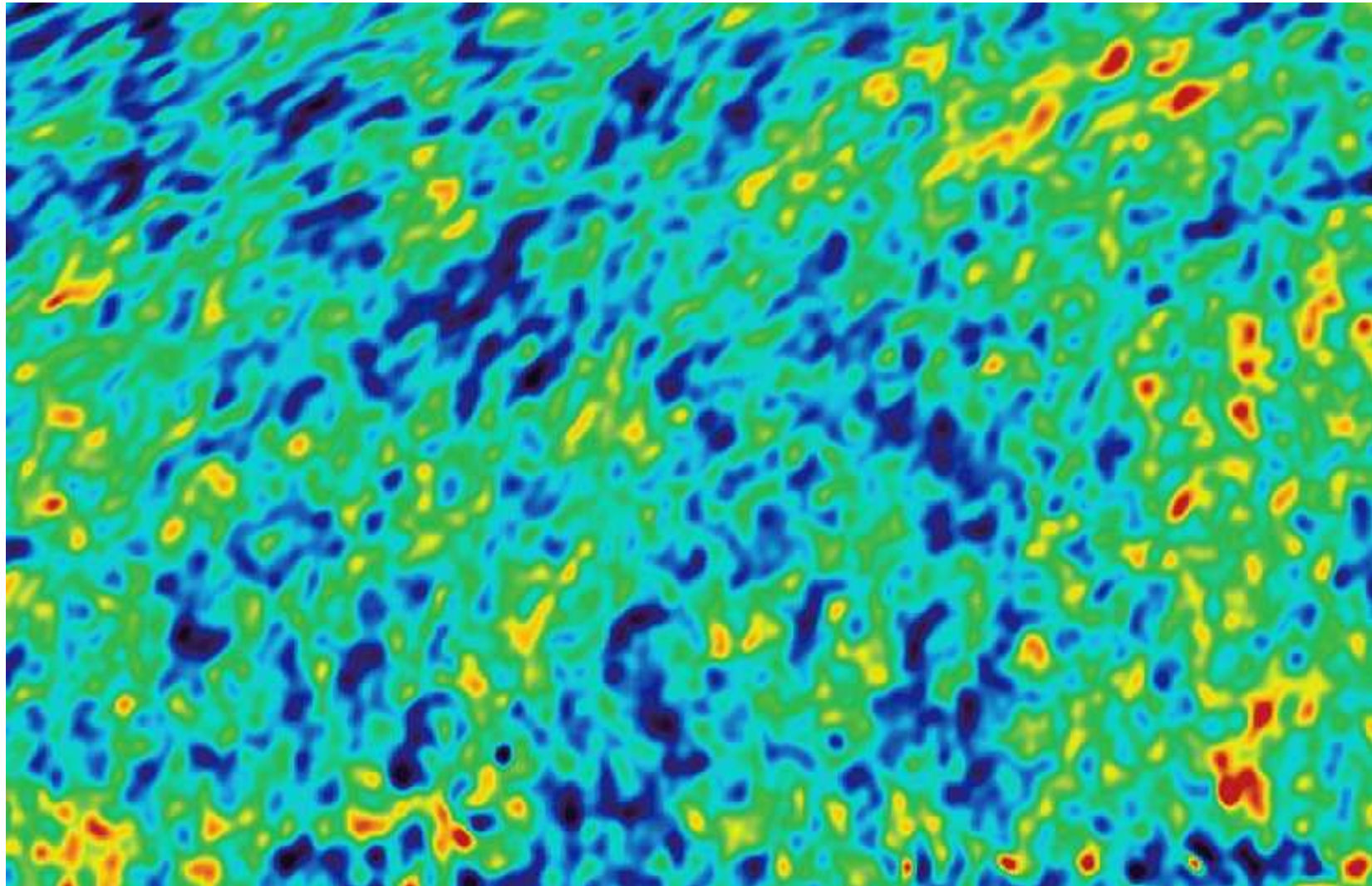
$$\Delta T \sim 100 \mu K$$



fluktuacje gęstości Wszechświata
w chwili **t=300 000 lat**

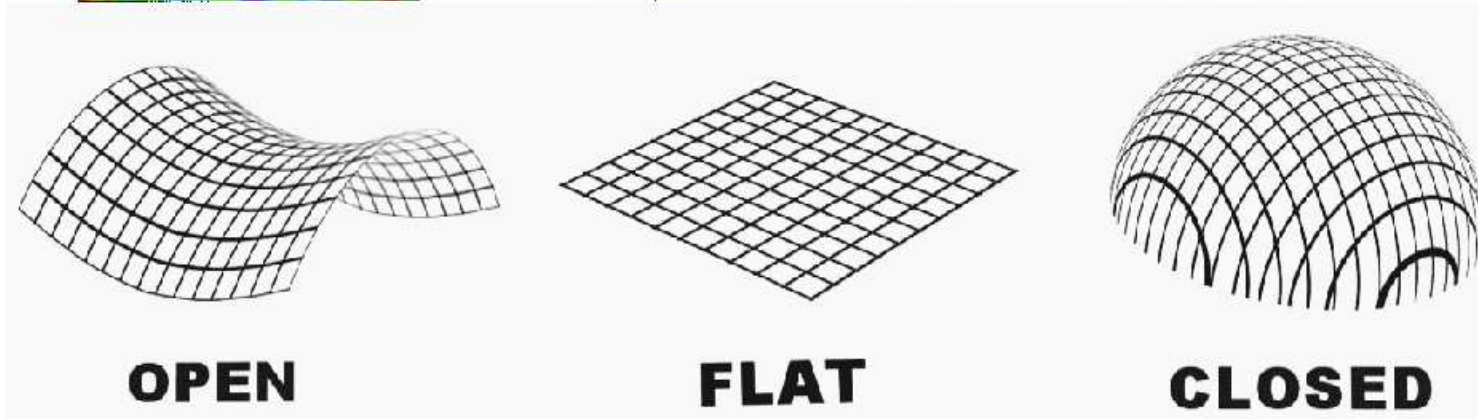
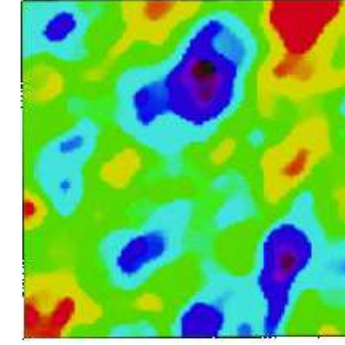
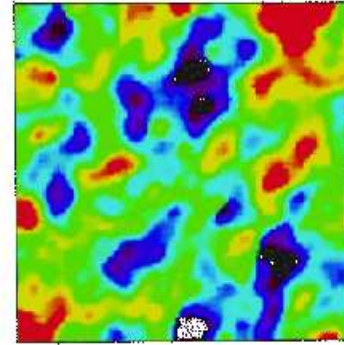
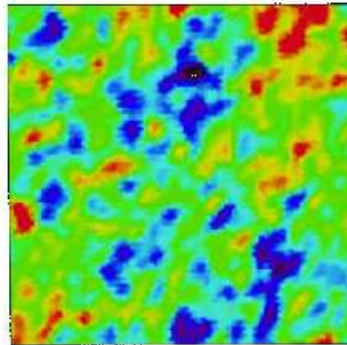
Dlaczego przestrzeń jest płaska

Fluktuacje promieniowania tła



Dlaczego przestrzeń jest płaska

Fluktuacje promieniowania tła



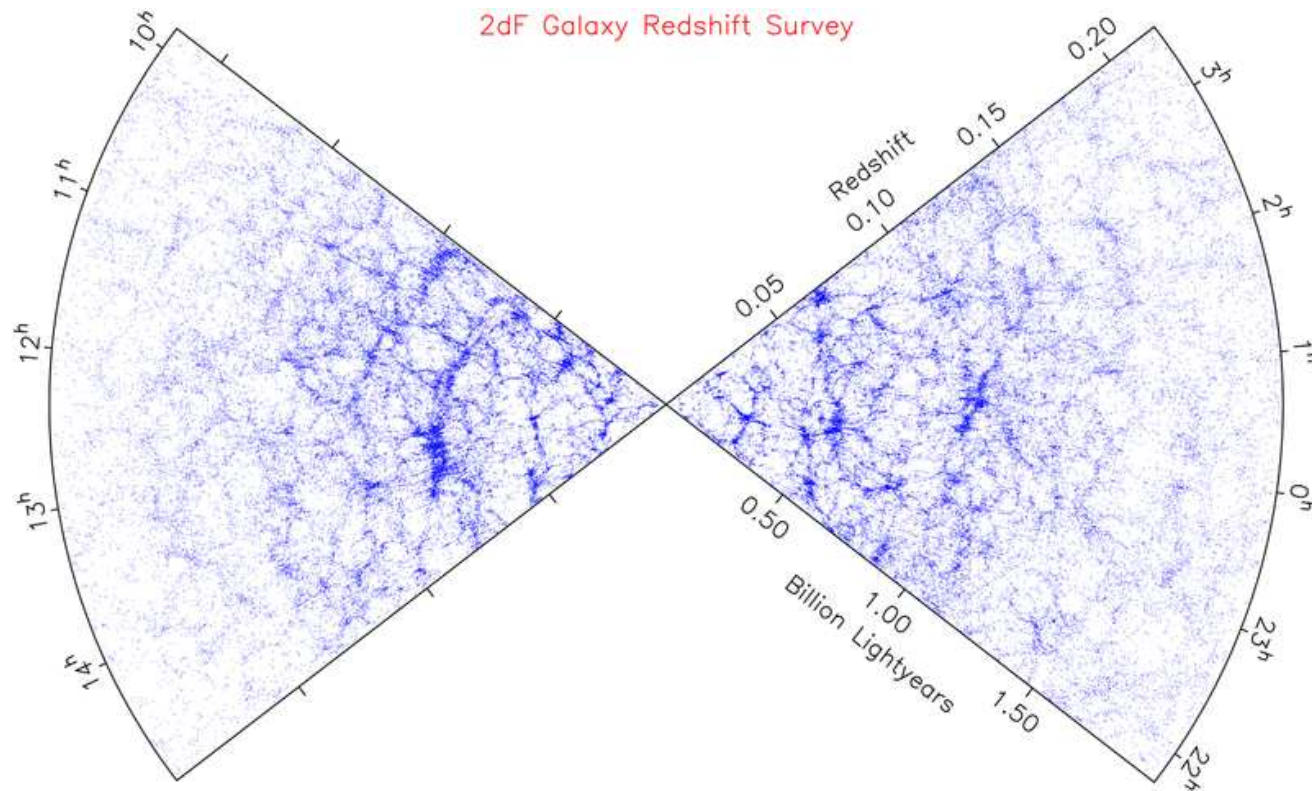
Pomiary sondy WMAP wskazują, że **Wszechświat jest płaski** !

⇒ średnia gęstość materii i energii we Wszechświecie

równa jest tzw. gęstości krytycznej: $\rho_{tot} \approx \rho_c = \frac{3H^2}{8\pi G}$

DLaczego przestrzeń jest płaska

Projekt **2dF Galaxy Redshift Survey**:
pomiar przesunięcia ku czerwieni dla około 250 000 galaktyk



Pomiar oddziaływań grawitacyjnych na skalach kosmologicznych
 \Rightarrow gęstość materii $\rho_m \sim 0.3 \rho_c$!



Dlaczego przestrzeń jest płaska

Z obserwacji optycznych wiemy, że **atomy** (materia barionowa) wypełniają tylko około **4%** Wszechświata.

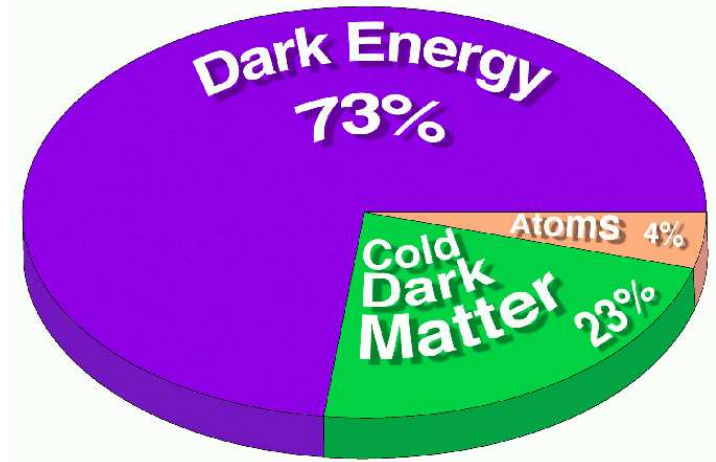
23% stanowi tzw. **ciemna materia**, której natury na razie nie znamy (?)...

73% to “**ciemna energia**”, którą opisujemy poprzez **stałą kosmologiczną** (?)

Wszechświat zdominowany przez stałą kosmologiczną **rozszerza się coraz szybciej !!!**

Nie wiemy co stanowi “**ciemną materię**”, choć mamy szereg propozycji (np. tzw. cząstki supersymetryczne)

Całkowitą zagadkę stanowi “**ciemna energia**” (opisana wprowadzoną przez Einsteina stałą kosmologiczną)



Skąd się wzięła masa

Założenie **symetrii cechowania** pozwala na bardzo prosty i elegancki **opis oddziaływań** cząstek w Modelu Standardowym, w języku kwantowej teorii pola.

Z **symetrii** cechowania wynika jednak, że wszystkie nośniki oddziaływań powinny być **bezmasowe**.

Z drugiej strony **doświadczenie** pokazuje, że bozony W^\pm i Z^0 mają **niezerową masę**...

⇒ czy potrafimy pogodzić wymóg symetrii z doświadczeniem ?!

Czy w symetrycznym świecie mogą istnieć stany łamiące symetrię?



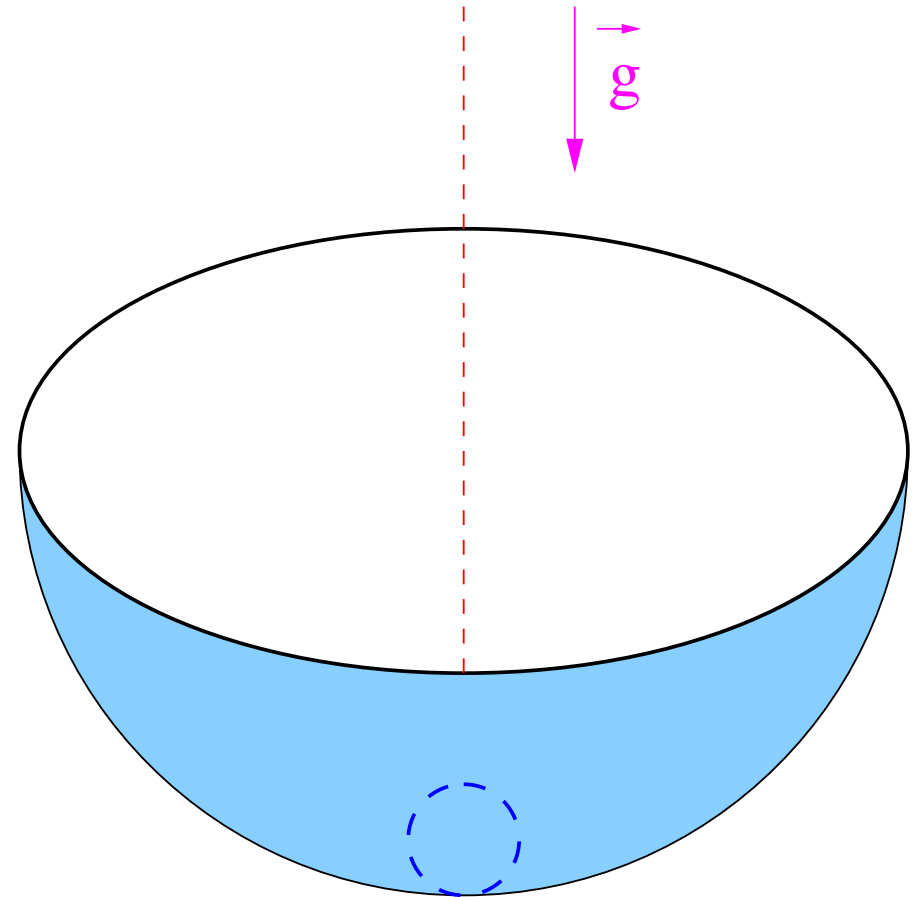
Skąd się wzięła masa

Analogia klasyczna

Podobny problem spotykamy rozważając kulkę w osiowo-symetrycznej czaszy (w jednorodnym polu grawitacyjnym).

Nawet jeśli nie znamy kształtu czaszy możemy oczekiwać, że położenie równowagi kulki znajduje się na osi symetrii czaszy.

Niezależnie od warunków początkowych kulka powinna się tam w końcu znaleźć...



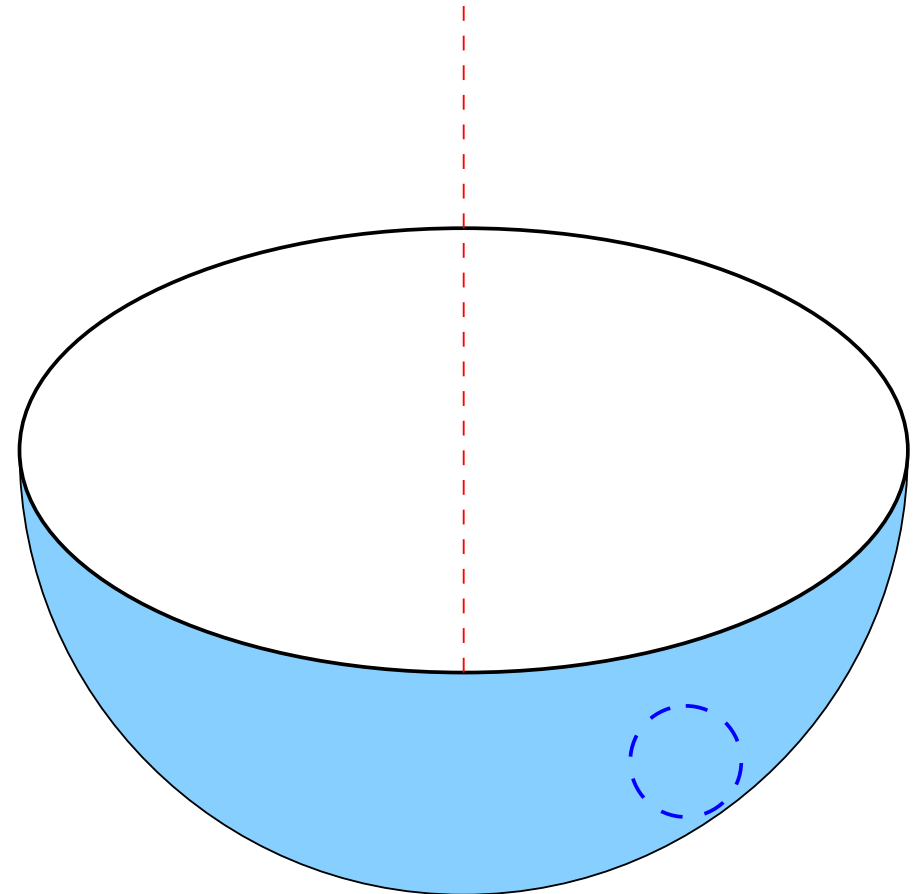
Skąd się wzięła masa

Analogia klasyczna

Podobny problem spotykamy rozważając kulkę w osiowo-symetrycznej czaszy (w jednorodnym polu grawitacyjnym).

Nawet jeśli nie znamy kształtu czaszy możemy oczekiwać, że położenie równowagi kulki znajduje się na osi symetrii czaszy.

Jednak doświadczenie może wykazać, że kulka nie znajduje się na osi symetrii !...



Skąd się wzięła masa

Spontaniczne łamanie symetrii

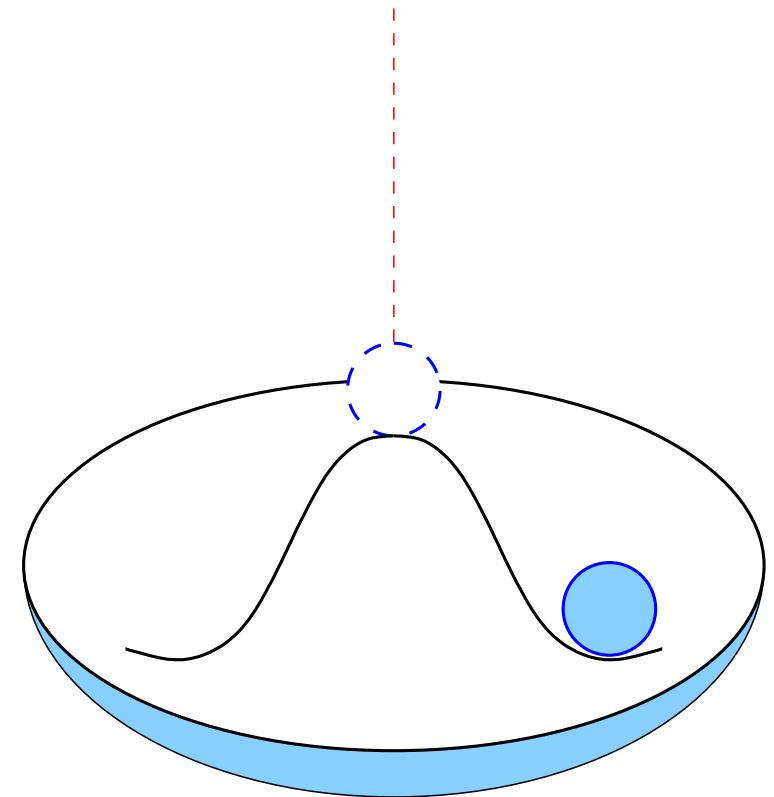
Możliwe wytłumaczenie:

czasza zachowuje symetrię osiową

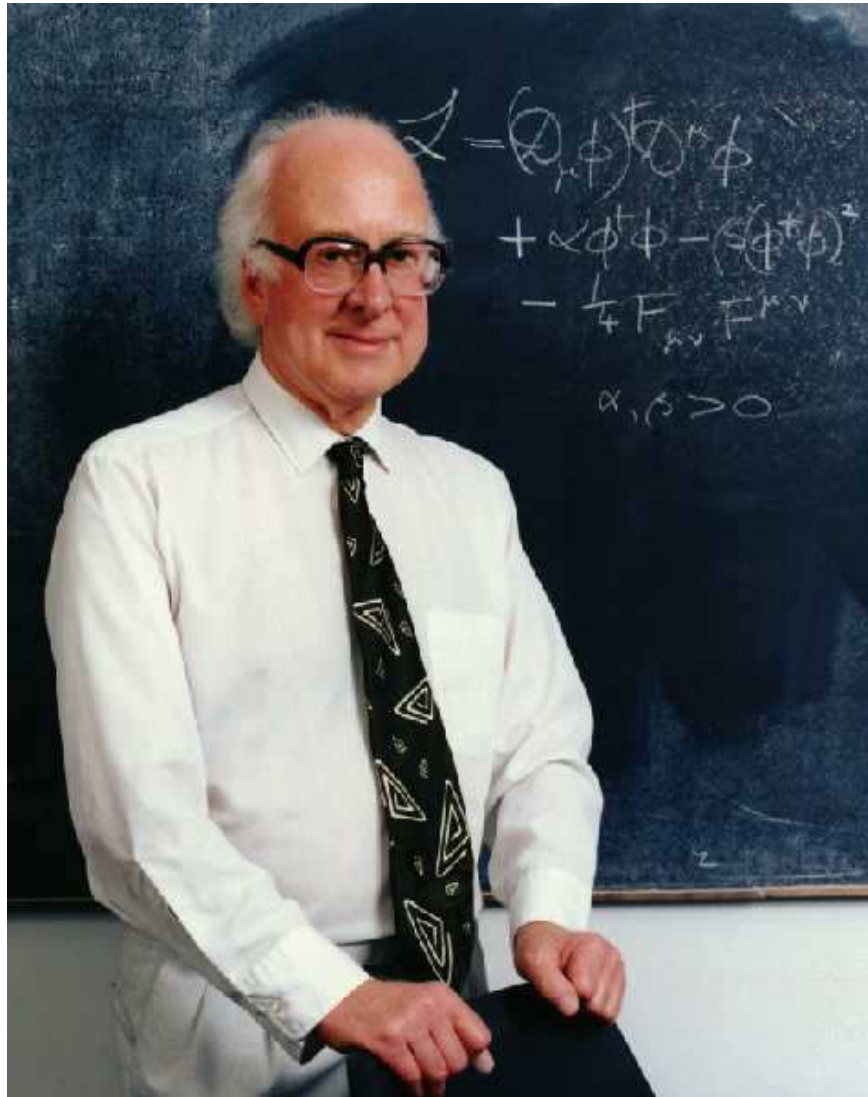
ale położenie na osi nie jest stanem równowagi trwałej

⇒ kulka stacza się wybierając jedno z wielu możliwych położzeń równowagi

Stoczenie się kulki powoduje spontaniczne złamanie symetrii !



Skąd się wzięła masa



Na możliwość nadania mas nośnikom oddziaływań poprzez spontaniczne łamanie symetrii wskazał czterdzieści lat temu (1964) Peter W. Higgs.

Mechanizm spontanicznego łamania symetrii, zwany także **mechanizmem Higgsa**, jest podstawą współczesnej teorii oddziaływań elektroslabych.

Wszystkie cząstki uzyskują **masę** poprzez **oddziaływanie z polem Higgsa!**

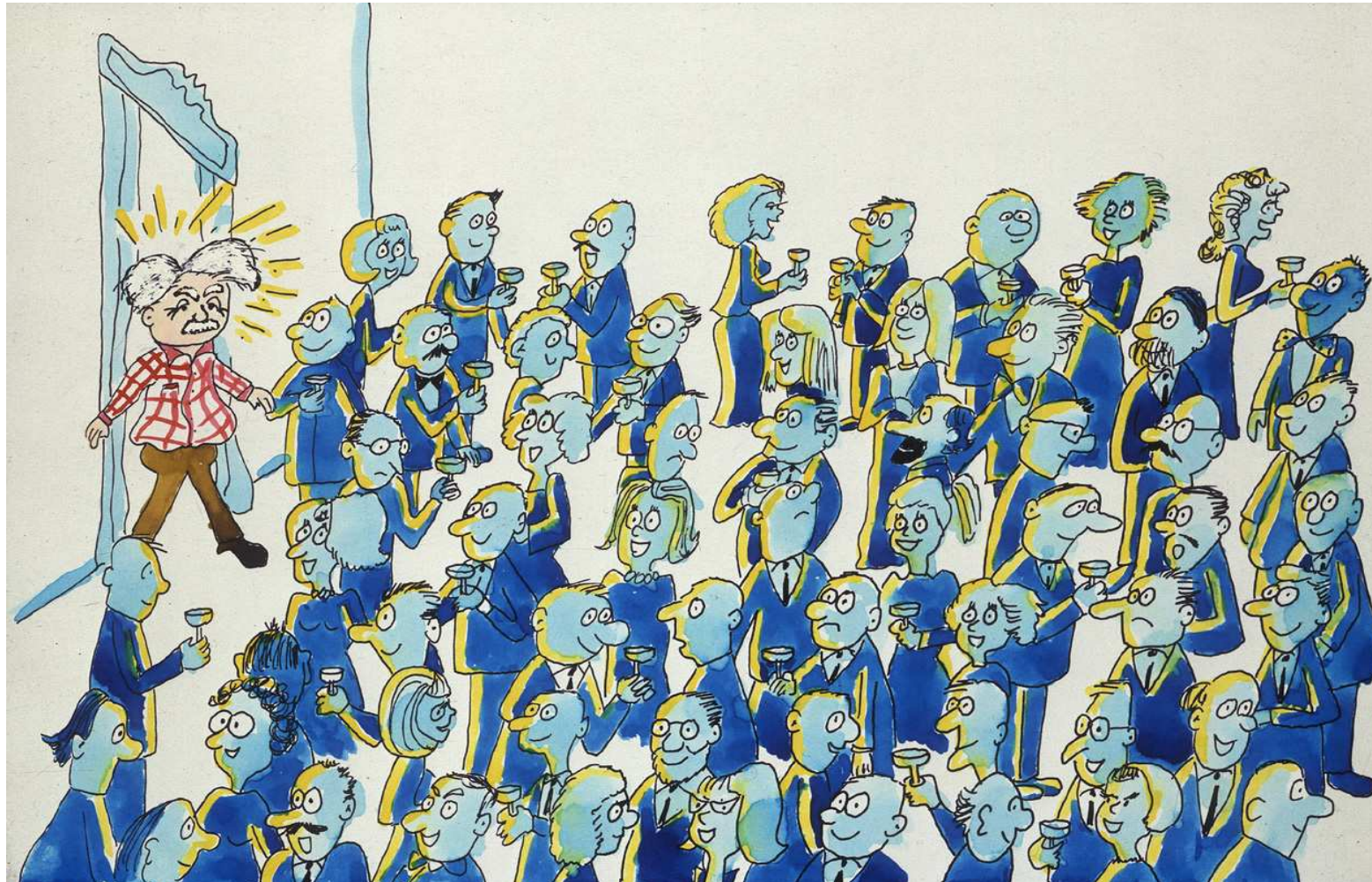
Skąd się wzięła masa

Wyobraźmy sobie salę bankietową
równomiernie wypełnioną ludźmi (pole Higgsa)



Skąd się wzięła masa

Pojawia się sławny naukowiec (bozon cechowania)
przyciągając uwagę zebranych...



Skąd się wzięła masa

Ludzie cisnący się wokół naukowca utrudniają mu poruszanie się (nadają mu masę)



Skąd się wzięła masa

Ludzie na bankiecie mogą też **spontanicznie** tworzyć “zgęszczenia” \Rightarrow oczekujemy istnienia dodatkowej **cząstki Higgsa**



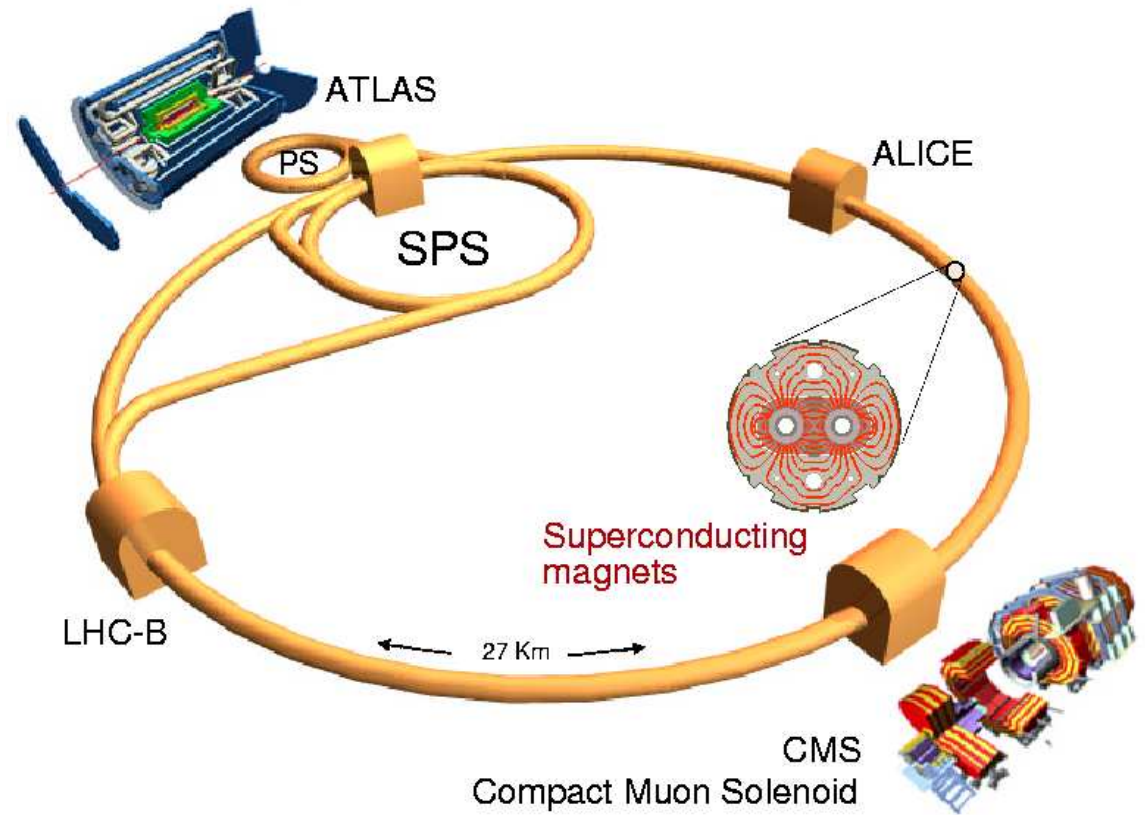
Skąd się wzięła masa

Przeciwbieżne wiązki protonów w LHC mają mieć energię $2 \times 7 \text{ TeV}$ ($1 \text{ TeV} = 1000 \text{ GeV}$)

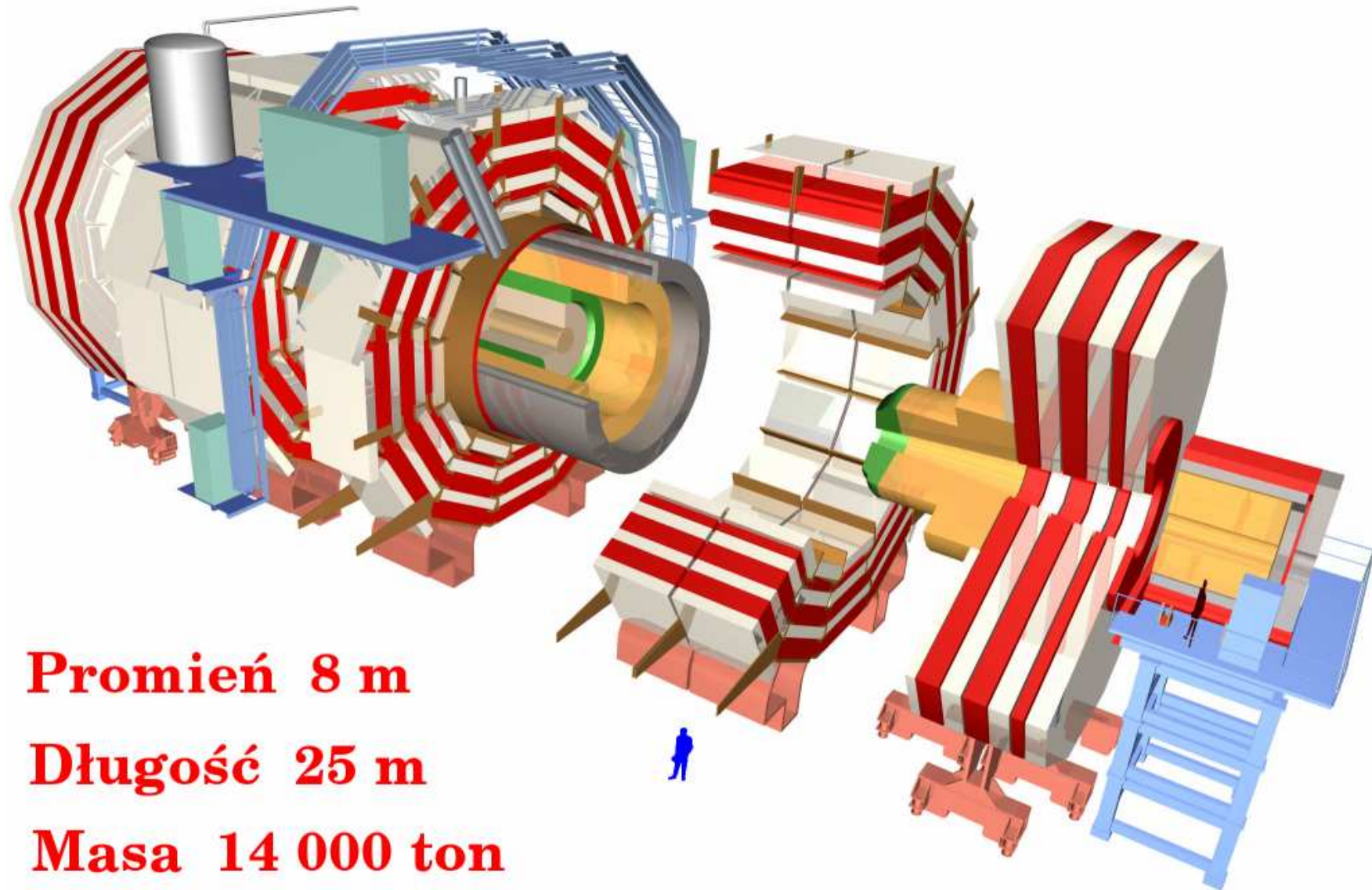
Intensywność wiązek będzie tak duża, że oczekujemy produkcji do 1000 cząstek Higgsa na godzinę!

Przypadków produkcji cząstki Higgsa będą poszukiwać dwa eksperymenty: ATLAS i CMS

The Large Hadron Collider (LHC)



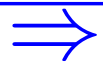
Detektor CMS



Promień 8 m

Długość 25 m

Masa 14 000 ton



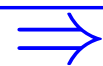
Stan przygotowań - ATLAS

16 grudnia 2003



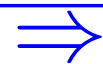
Stan przygotowań - ATLAS

16 grudnia 2004



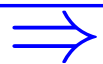
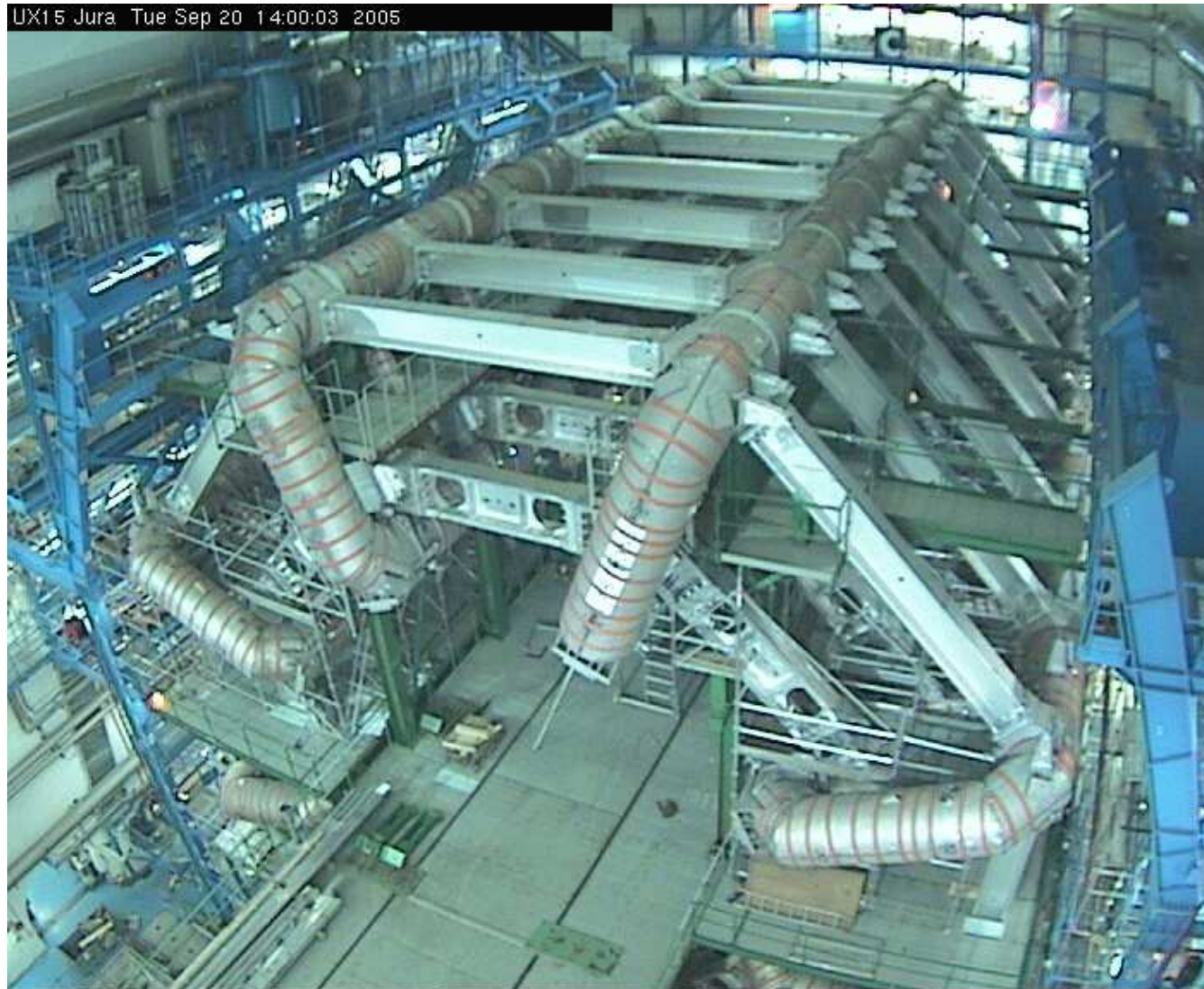
Stan przygotowań - ATLAS

16 czerwca 2005



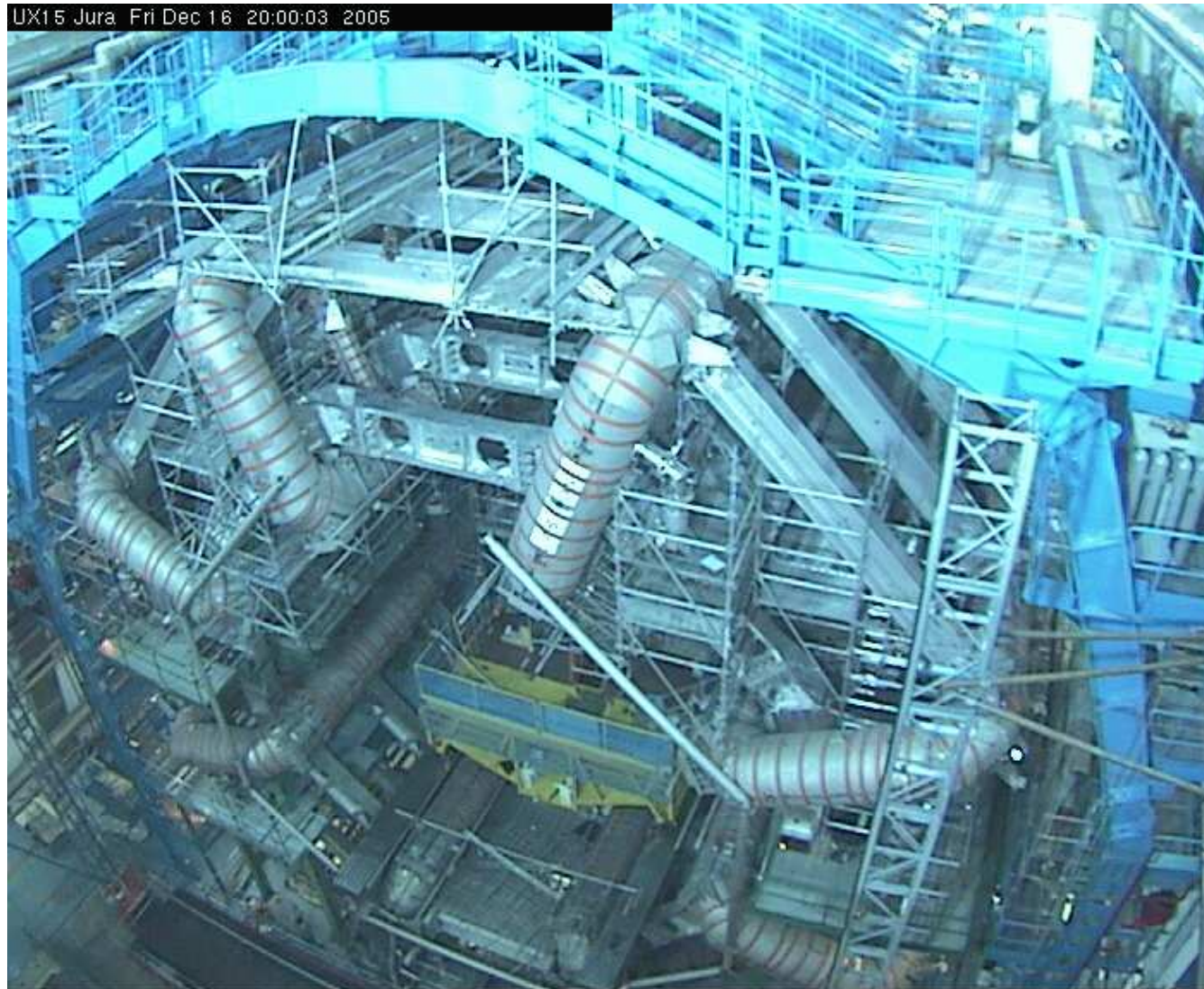
Stan przygotowań - ATLAS

20 września 2005



Stan przygotowań - ATLAS

16 grudnia 2005



Skąd się wzięła masa

Poszukiwania **bozonu Higgsa** a następnie **pomiar** jego **parametrów** będzie jednym z głównych tematów badań w LHC.

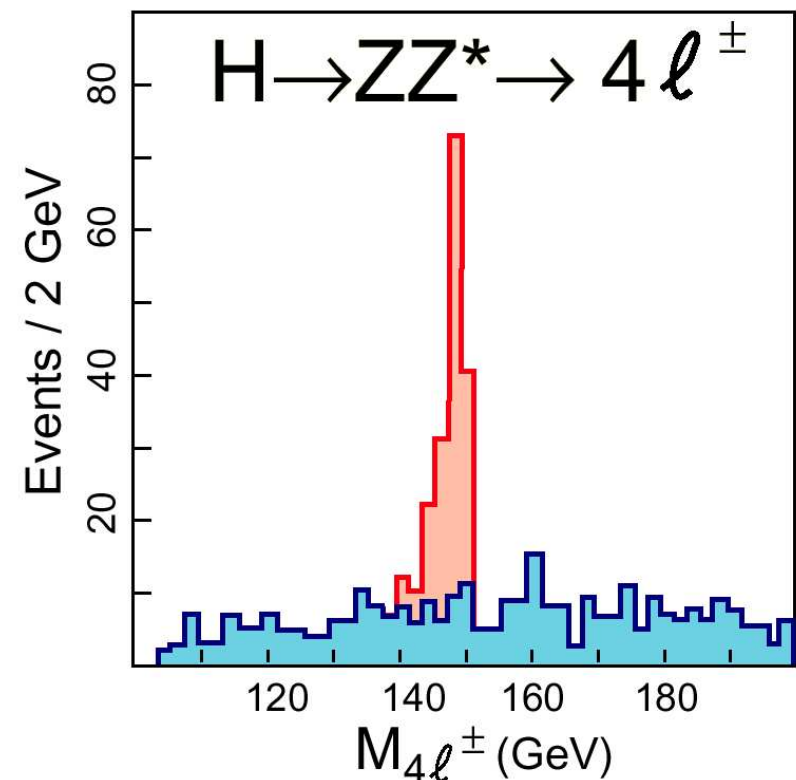
Najbardziej obiecujący jest **kanal**:

$$pp \rightarrow H \rightarrow Z^0 Z^0 \rightarrow l^+ l^- l^+ l^-$$

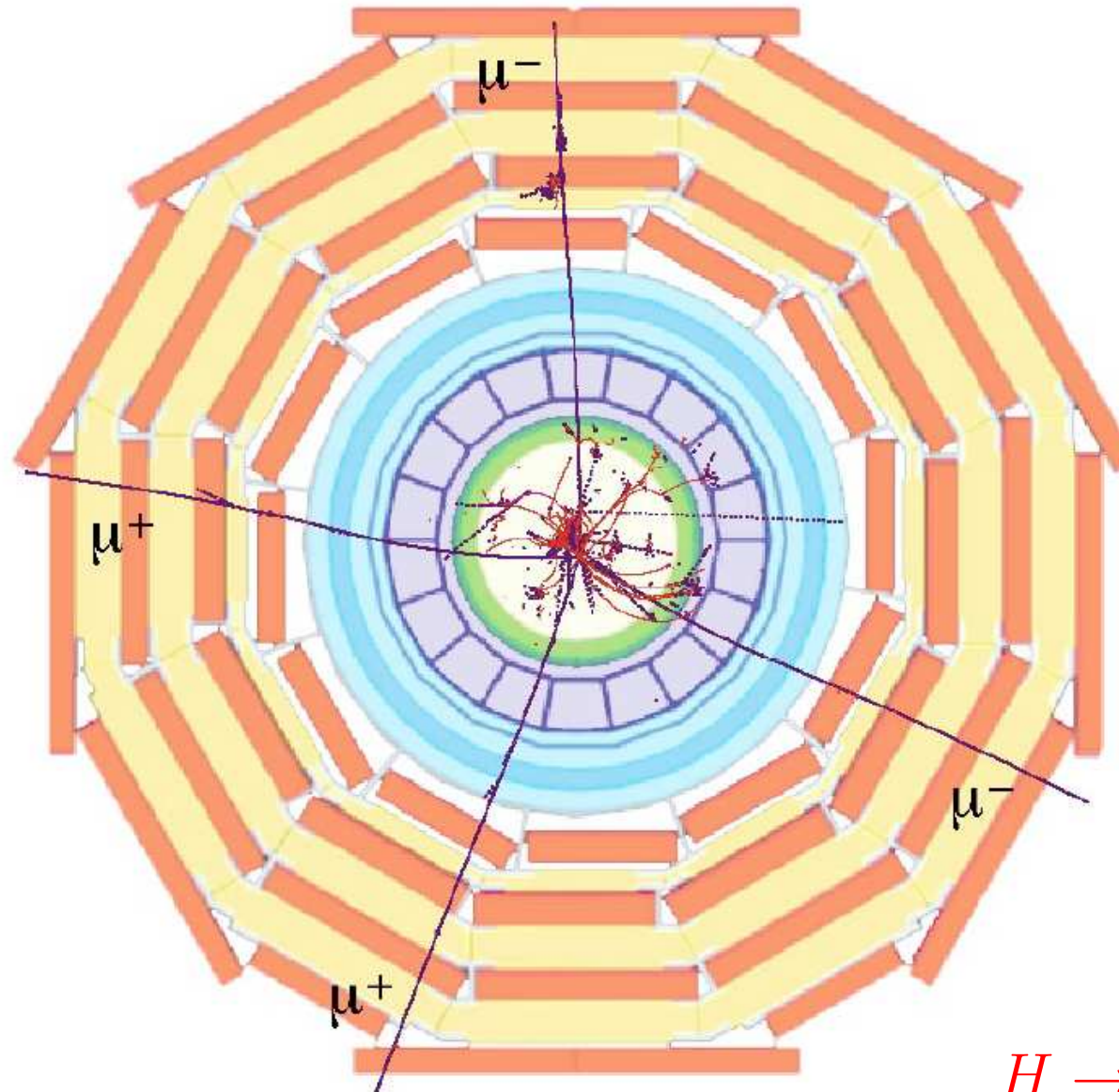
gdyż naładowane leptony (e^\pm i μ^\pm) można **łatwo zidentyfikować**

Eksperymenty przy **LHC** będą mogły zidentyfikować bozon Higgsa w **Modelu Standardowym w pełnym zakresie** mas.

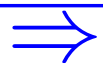
Uruchomienie **LHC** otworzy **nowy rozdział** w fizyce cząstek elementarnych...



Symulacja eksperymentu CMS

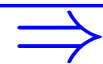


$$H \rightarrow ZZ \rightarrow \mu^+ \mu^- \mu^+ \mu^-$$



Nie tylko Higgs...

Cząstki supersymetryczne ?...



Nie tylko Higgs...

Ukryte wymiary ?...



Nie tylko Higgs...

A może będzie to “wyprawa w nieznane”...

