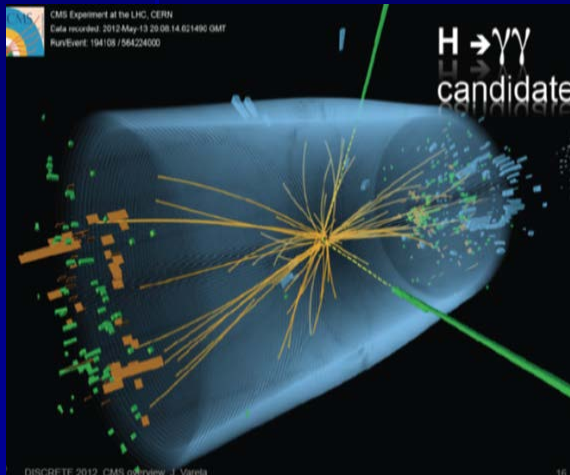


Wszechświat cząstek elementarnych dla humanistów

Wykład 1

Maria Krawczyk (IFT), Filip A. Żarnecki (IFD),
Wydział Fizyki UW



Odkrycie cząstki Higgsa w LHC (CERN)
- 4 lipca 2012

Nagroda Nobla 2013: F. Englert, P.Higgs

Nowe odkrycia w 2015 ? Być może.

Rok 2015 to rok specjalny



2015: Międzynarodowy Rok Światła



INTERNATIONAL
YEAR OF LIGHT
2015

- Opisanie zasad optyki - Ibn Al Haythema 1015 r.
- Falowa natura światła - Fresnel 1815 r.
- Opis fal elektromagnetycznych – Maxwell 1865 r.
- Zjawisko fotoelektryczne (foton) - Einstein 1905r.
- Szczególna teoria względności (czasoprzestrzeń, prędkość światła) - Einstein 1905 r.
- Odkrycie mikrofalowego tła kosmicznego –
Penzias i Wilson -1965 r.
- Wykorzystanie światłowodów do celów telekomunikacyjnych – Kao 1965

Rok 2015 – Sto lat Ogólnej Teorii Względności

W listopadzie 1915 r. Albert Einstein przedstawił w Berlinie na posiedzeniach Pruskiej Akademii Nauk wyniki swych prac, które składają się na Ogólną Teorię Względności.

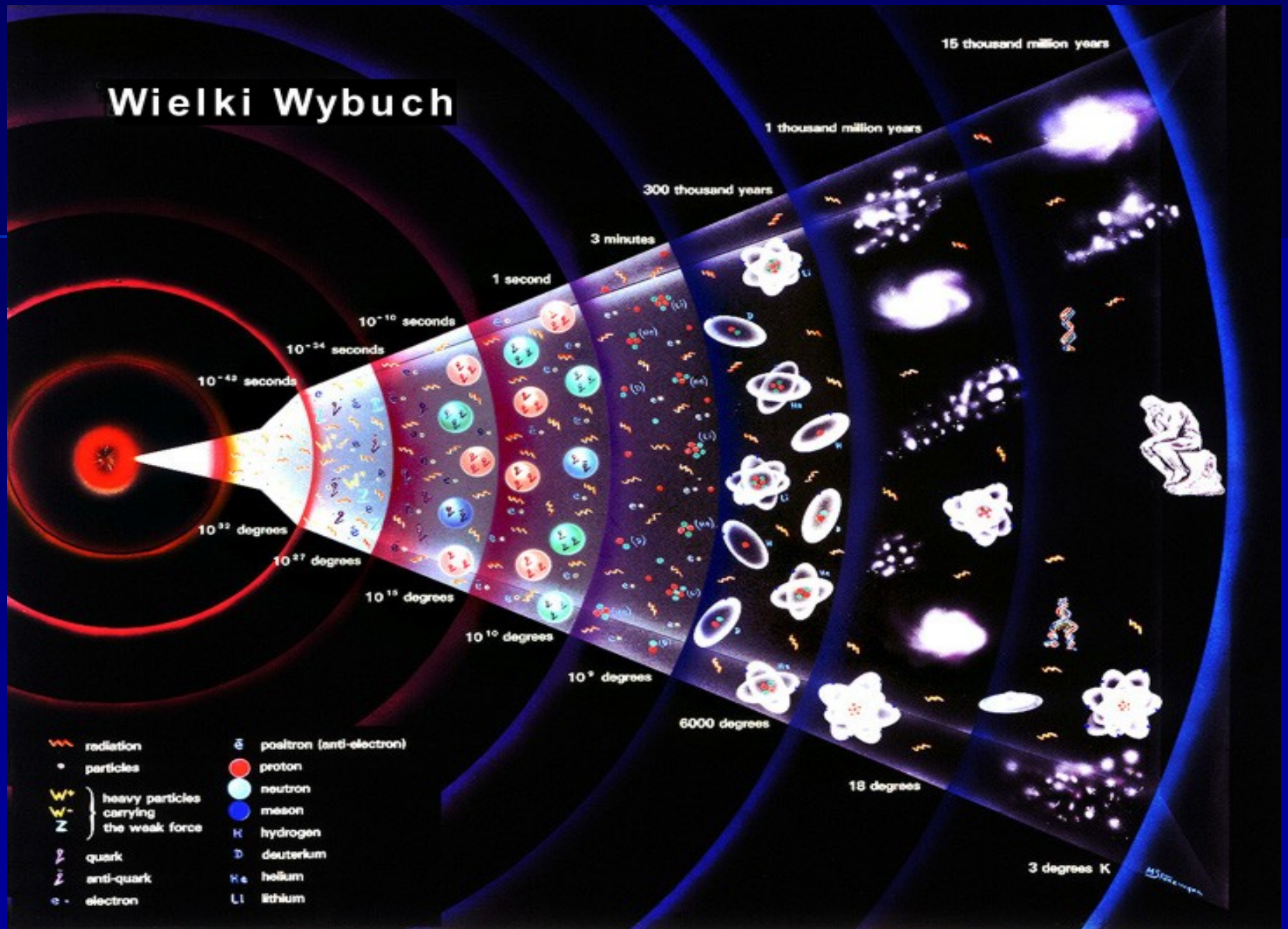
W Polsce obchodzimy tę rocznicę –
o tym później...

Tytuł wykładu:

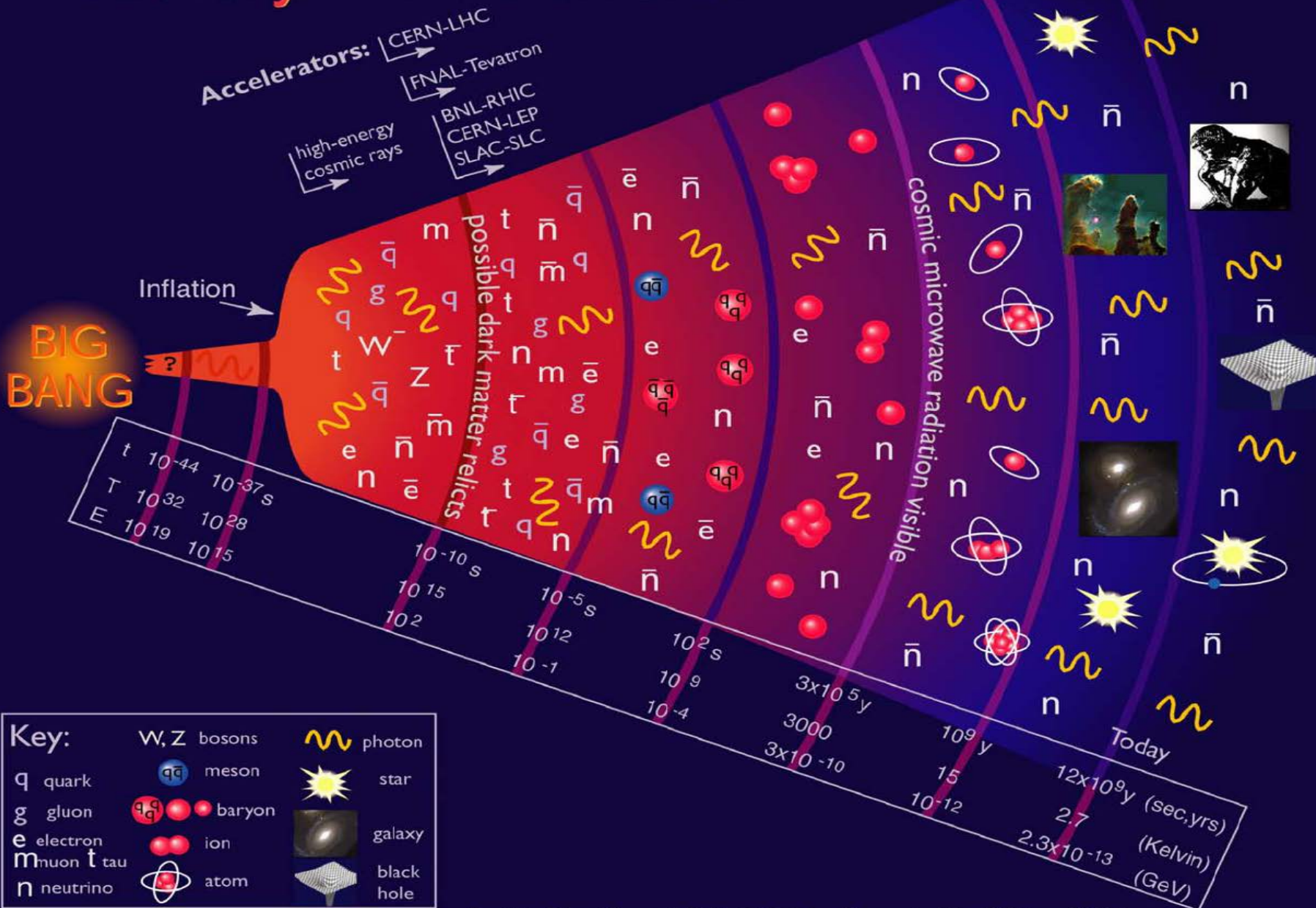
Wszechświat Cząstek Elementarnych:

- świat cząstek bardzo różnorodny
- opis Wszechświata nie jest możliwy bez zrozumienia oddziaływań cząstek elementarnych, szczególnie w pierwszych 3 minutach...

Wielki Wybuch



History of the Universe



Notacja naukowa

- W fizyce mamy często do czynienia z bardzo dużymi lub bardzo małymi wielkościami. Chcemy łatwiej się nimi posługiwać.

Przykład: odległość Ziemia-Słońce $1 \text{ AU} = 150\,000\,000\,000 \text{ m}$

notacja naukowa: $1 \text{ AU} = 1.5 \cdot 10^{11} \text{ m}$ 11 cyfr po 1

Przykład: atom wodoru – rozmiar $1 \text{ \AA} = 0.000\,000\,000\,1 \text{ m}$

notacja naukowa: $1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m} = 1/10^{10} \text{ m}$ 1 na 10 miejscu

Notacja naukowa

Wykładnik potęgi 10 określa nam „rząd wielkości”

1 rząd wielkości:
różnica o czynnik 10



~1 m



~10 m

Notacja naukowa

10 rzędów wielkości:
różnica o czynnik $10^{10} = 10\ 000\ 000\ 000$

Bardzo dużo !!!



$\sim 1\text{ mm} = 10^{-3}\text{ m}$



$\sim 10\ 000\text{ km} = 10^7\text{ m}$

Notacja naukowa dla małych i dużych skal

Duże liczby

Deka, hekto, kilo, mega, giga, tera, peta, exa, zetta, yotta

da	h	k	M	G	T	P	E	Z	Y
10	10^2	10^3	10^6	10^9	10^{12}			10^{24}

Małe liczby

Decy, centy, mili, mikro, nano, pico, femto, atto, zepto, yocto

d	c	m	μ	n	p	f	a	z	y
10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-6}	10^{-9}	10^{-12}	10^{-15}	10^{-24}

Przykład: $1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m}$; $1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV}$, $1 \text{ TeV} = 10^3 \text{ GeV}$

Pomiary do $\text{am} = 10^{-18} \text{ m}$

fizyka cząstek fm i poniżej; am = nanonano – to kwarki, elektron..

Physique des Particules

**Badanie materii:
różne dziedziny nauki**

Cosmologie

Physique Nucleaire

Astrophysique

Physique du Solide

Astronomie

Chimie-Biologie

Geophysique

Mecanique



p



10^{-15} 10^{-12} 10^{-9} 10^{-6} 10^{-3} 1 10^3 10^6 10^9 10^{12} 10^{15} 10^{18} 10^{21} 10^{24}



fm pm nm μ m mm m km Mm Gm Tm Pm Em



← atto, zepto, yocto

peta, exa, zetta, yotta

W świecie cząstek elementarnych obowiązują:

1. teoria względności i prawa mechaniki kwantowej
2. niektóre znane z makroświata prawa zachowania
np. energii i pędu oraz ładunku elektrycznego

■ Teoria względności:

graniczna prędkość cząstek fiz. (prędkość światła c),
czaso-przestrzeń (wspólne traktowanie przestrzeni i czasu)
związek masy i energii $E = mc^2$

■ Mechanika kwantowa wprowadza nowe pojęcia:

- porcje (kwanty) energii,
- nieoznaczoność Heisenberga (nie można z dowolną dokładnością znać położenia i pędu (energii) cząstki)
→ im większy pęd cząstki tym mniejszy rozmiar ...

Fizyka Cząstek Elementarnych

inaczej Fizyka Wysokich Energii

W badaniu struktury materii stosowane są **coraz większe energie**:

- zasada nieoznaczoności Heisenberga → większa energia umożliwia dotarcie do coraz mniejszych struktur
- związek $E = mc^2$ → większa energia umożliwia produkcję nowych bardziej masywnych cząstek

Uwaga: stosujemy elektrowolt eV jako jednostkę energii E i masy m , gdyż E i m różnią się jedynie stałą prędkością światła c (formalnie oznacza to przyjęcie $c = 1$)

Jednostki energii

- Joule (J) jest jednostką „astronomiczną” w świecie cząstek, potrzebujemy bardziej praktycznej jednostki
- 1 eV (elektronowolt) = energia jaką elektron zyskuje w wyniku działania pola elektrycznego przy napięciu 1V
$$1 \text{ eV} = 1.6 * 10^{-19} \text{ J}$$

- Jednostki pochodne: 1 keV, 1 MeV, 1 GeV, 1 TeV

Dla mas stosujemy te same jednostki, np. masa protonu $\sim 1 \text{ GeV}$

Masa i energia: efekty relatywistyczne

W fizyce cząstek praktycznie zawsze musimy uwzględniać efekty relatywistyczne. Cząstki na ogół poruszają się z prędkościami bliskimi c (prędkość światła).

Prędkość przestaje być wygodnym parametrem do opisu procesów.

*Przykład: elektrony w LEP $v=0.999\,999\,999\,995\,c$ ($E=100\text{ GeV}$),
protony w LHC $v=0.999\,999\,995\,c$ ($E=7\text{ TeV}$)*

Znacznie wygodniejsza do opisu ruchu cząstki jest energia i pęd

Energia w teorii względności :

- Energia spoczynkowa $E_0 = mc^2$ wprowadzona przez Einsteina
- Energia całkowita $E^2 = E_0^2 + (pc)^2$ p – pęd ciała
- Energia kinetyczna $E_k = E - E_0$

Zachowana jest tylko energia całkowita, -
energia kinetyczna może się zamieniać w masę, masa w energię kinetyczną

⇒ Dzięki temu możemy produkować nowe cząstki i badać ich własności!

Plan wykładu



1. Ogólne informacje o cząstkach elementarnych
2. Detekcja cząstek. Przyspieszacz i zderzacz cząstek. Wielkie eksperymenty
3. Hadrony, kwarki i leptony
4. Oddziaływania
5. Teoria cząstek elementarnych - Model Standardowy
6. Cząstka Higgsa i dalsze poszukiwania
7. Neutrino
8. Rozszerzenia Modelu Standardowego
9. Powstanie i budowa Wszechświata
10. Ciemna materia, ciemna energia

Materiały pomocnicze

Literatura

1. Martinus J.G. Veltman, Facts and Mysteries in Elementary Particle Physics, World Scientific 2003
2. Frank Close, Kosmiczna Cebula - Kwarki i Wszechświat, PWN 1989
3. L. Lederman, D. Teresi, Boska cząstka, jeśli Wszechświat jest odpowiedzią, jak brzmi pytanie?, Prószyński i S-ka, Warszawa 2005
4. M. J. G. Veltman, The Higgs Boson, Scientific American 255:88-94, 1986 (Issue no 5).
5. Y. Nambu, A Matter of Symmetry, Scientific American, May 1992, str. 37
6. DELTA 5/2000

Pytania do poszczególnych wykładów

- każdemu wykładowi towarzyszyć będą pytania, które stanowią podstawę egzaminu końcowego

Warunki zaliczenia / zaliczenie na ocenę:

1. obecność na wykładach obowiązkowa
dopuszczona jest nieusprawiedliwiona nieobecność na dwóch wykładach, kolejne nieobecności obniżają ocenę
2. 50% punktów z egzaminu testowego
30 pytań (max 1 zdanie odpowiedzi)
Każdemu wykładowi towarzysza pytania, które są podstawą egzaminu testowego
3. egzamin – 30 sobota 2016 r ?

Fizyka cząstek elementarnych

Fizyka XX wieku

Wiek XX – niezwykły rozwój fizyki,
pojawiły się fundamentalne idee:

- pierwsza połowa XXw :

teoria kwantów

teoria względności (szczególna teoria względności)

teoria grawitacji (ogólna teoria względności)

- druga połowa XXw :

fizyka cząstek elementarnych

(teoria cząstek elementarnych lata 70-e XX w.)

Cząsteczki, atomy, jądra atom. i cząstki elem.

- Materia składa się z cząsteczek (molekuły, drobiny)
np. woda H_2O , H=wodór, O=tlen
- Cząsteczki to stany związane atomów (ponad 100 różnych atomów w naturze)
- Atomy = stany związane jąder atomowych i elektronów

Atomy są prawie puste- rozmiar atomu

1/100 000 000 cm, jądro 100 000 mniejsze

Rutherford ustalił to w 1911 bombardując

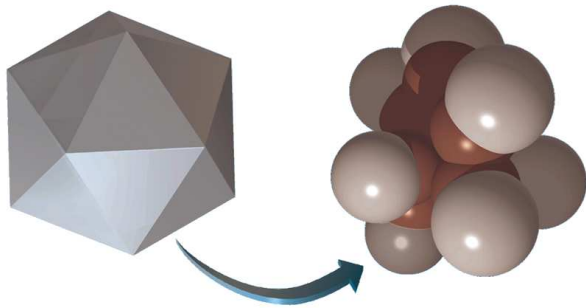
złoto ciężkimi cząstkami alfa (α)

nukleony

- Jądro = stany związane protonów i neutronów

Budowa materii

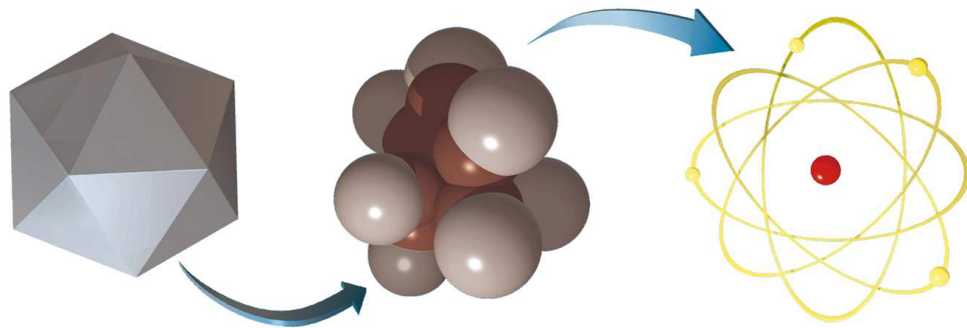
Cząsteczka



10^{-9} m

Budowa materii

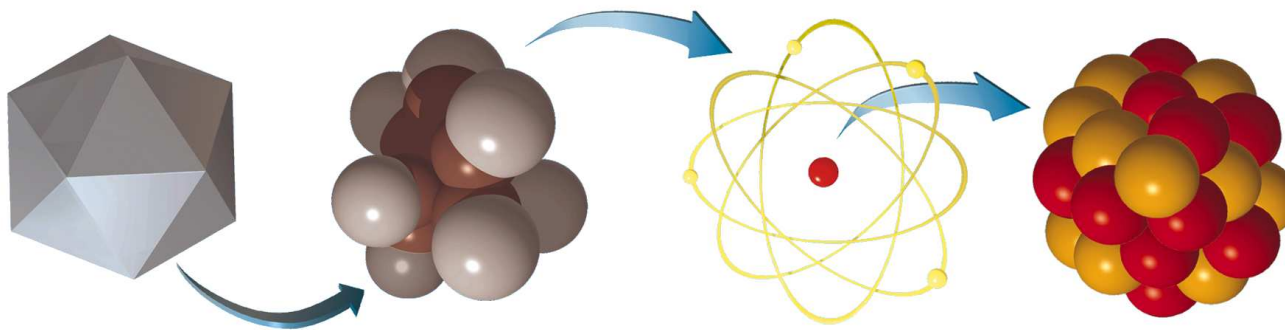
Atom



10^{-10} m

Budowa materii

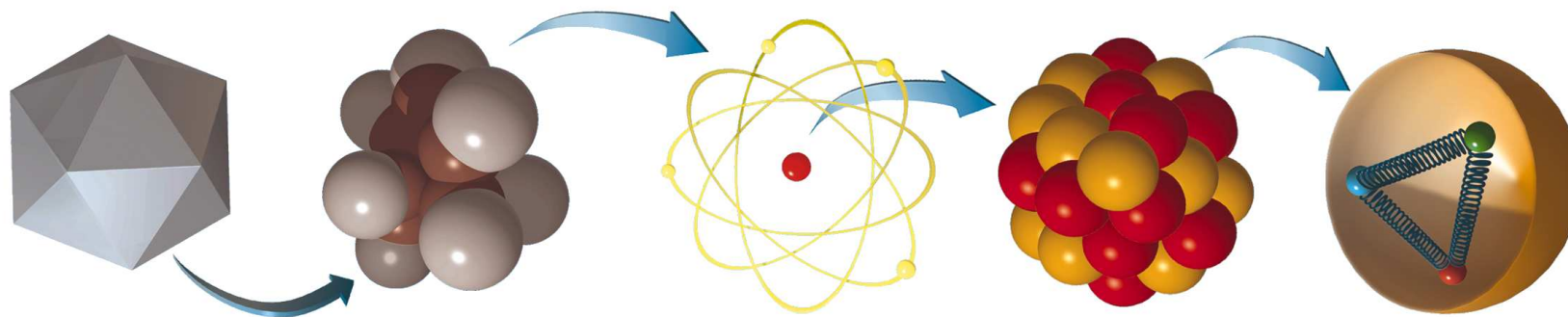
Jądro atomowe



10^{-14} m

Budowa materii

Nukleony



10^{-15} m

Atomy i jądra atomowe

Nukleony

- proton p (ładunek elektryczny = +1)
(elektron e ma ładunek el. = -1)
- neutron n (ładunek elektryczny = 0)

Atomy i jony

- są neutralne elektrycznie: dodatnie jądro i ujemne elektrony
- jeśli oderwiemy jeden lub więcej elektronów powstają jony (ładunek el. dodatni). Jonizacja.

Przykłady atomów:

Wodór H = p e⁻ - najlżejszy atom

Deuter D = pn e⁻ - ciężki wodór (→ ciężka woda)

Tryt T = pnn e⁻

Hel He = ppnn e⁻e⁻ (→ ppnn = cząstka alfa α)

Fizyka jądrowa → badanie jąder atomowych

Zoo cząstek elementarnych

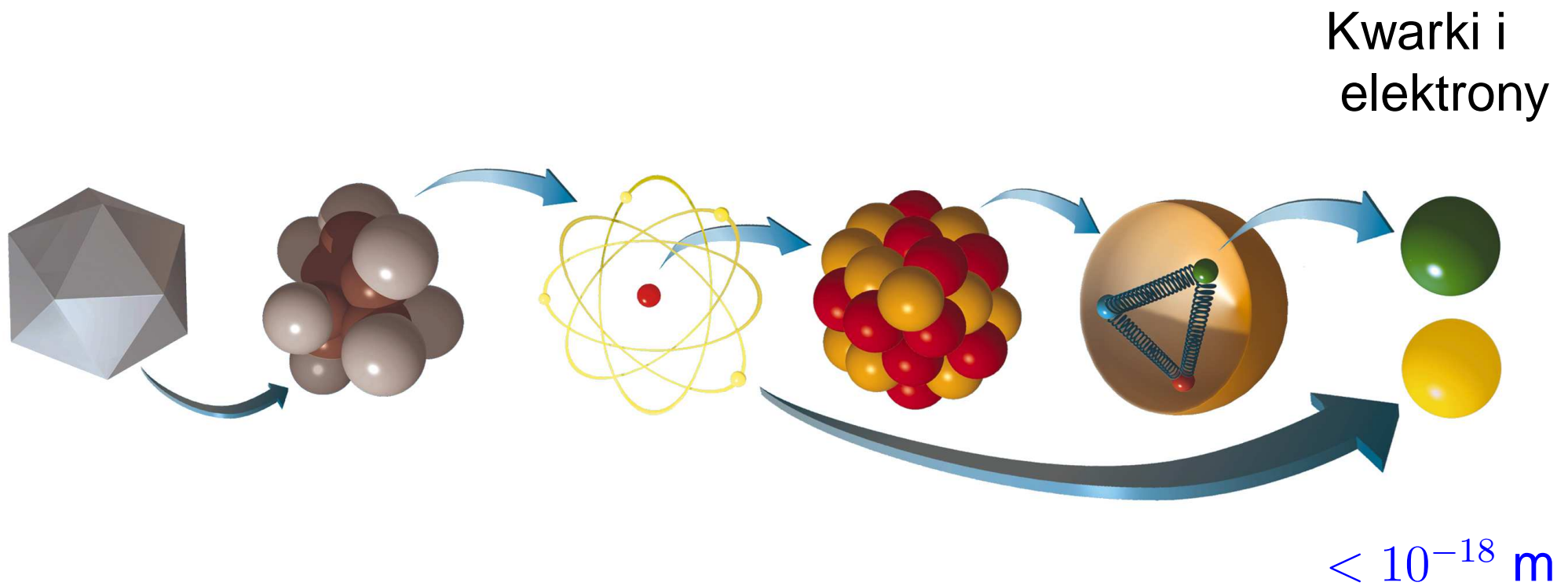
Definicja: cząstka elementarna to obiekt prostszy niż jądro atomowe (wyjątek stanowi najprostsze jądro H (wodór), czyli proton, który jest cząstką elementarną.)

Cząstki elementarne - dużo (1000) i różnorodne (Zoo):
aktualne dane <http://pdg.lbl.gov/>

różne masy,
różne czasy życia (mogą się rozpadać !),
różne ładunki elektryczne,
różne sposoby oddziaływań,
grupowanie się w różne układy (multiplety)

Cząstki elementarne mogą być złożone (proton) !
najmniejsze składniki → cząstki fundamentalne

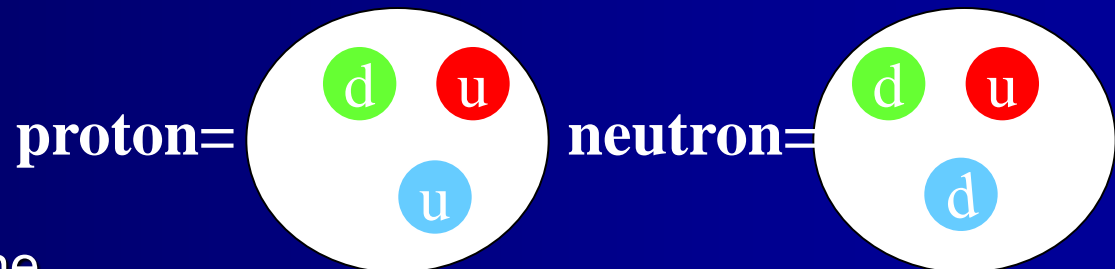
Budowa materii



Nukleony i zwykłe kwarki (oraz klej czyli gluony)

Proton p i neutron n zbudowane są z 3 kwarków .
Są to kwarki: u (*up*) i d (*down*) → *zwykłe (lekkie) kwarki*

*Wszystkie kwarki występują w 3 stanach (barwach, kolorach)
- „ładunek kolorowy”
czerwone, zielone i niebieskie (to tylko nazwy)*



Kwarki są fundamentalne..

Ale nie występują jako cząstki swobodne ! – a proton i neutron tak.

W nukleonach są *gluony sklejające całość*

(w atomie tę rolę pełnią fotony, nośniki sił elektromagnetycznych (e-m))

Antycząstki (antymateria)

- Antycząstki to też cząstki, choć mogą się różnić od swoich „partnerów” pewnymi własnościami.
Cząstki i antycząstki mają tę samą masę i czas życia.
- Elektron i pozyton – to para cząstka-antycząstka (ale która jest którą to sprawa umowy); różnią się znakiem ładunku elektrycznego (pozyton ma ładunek dodatni).
Elektron odkryto w 1897 a pozyton dopiero w 1932
- Istnienie antycząstek wynika z prawa przyrody. Przewidywanie teoretyczne istnienia antycząstki w oparciu o symetrię równań
→ P. Dirac 1928
(mylnie uważał proton za antycząstkę do elektronu, mimo znacznej różnicy mas, ale pozyton nie był znany jeszcze...)
- Cząstka i antycząstka mogą oddziaływać b. gwałtownie – zniknąć (anihilacja) i pojawiać się w parach (kreacja)
- Cząstka może być swoją antycząstką (*ale musi być neutralna*)
- We Wszechświecie nadwyżka materii nad antymateria!!!

Oznaczenie: kreska nad symbolem cząstki np. kwark u i antykwark \bar{u}

Budowa materii (stan obecny)

Świat “codzienny”: 3 “cegielełki” (elektron oraz kwarki u i d) + *neutrino*
 \Rightarrow 12 fundamentalnych “cegielełek” materii, masy od 0 do 173 GeV

	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)

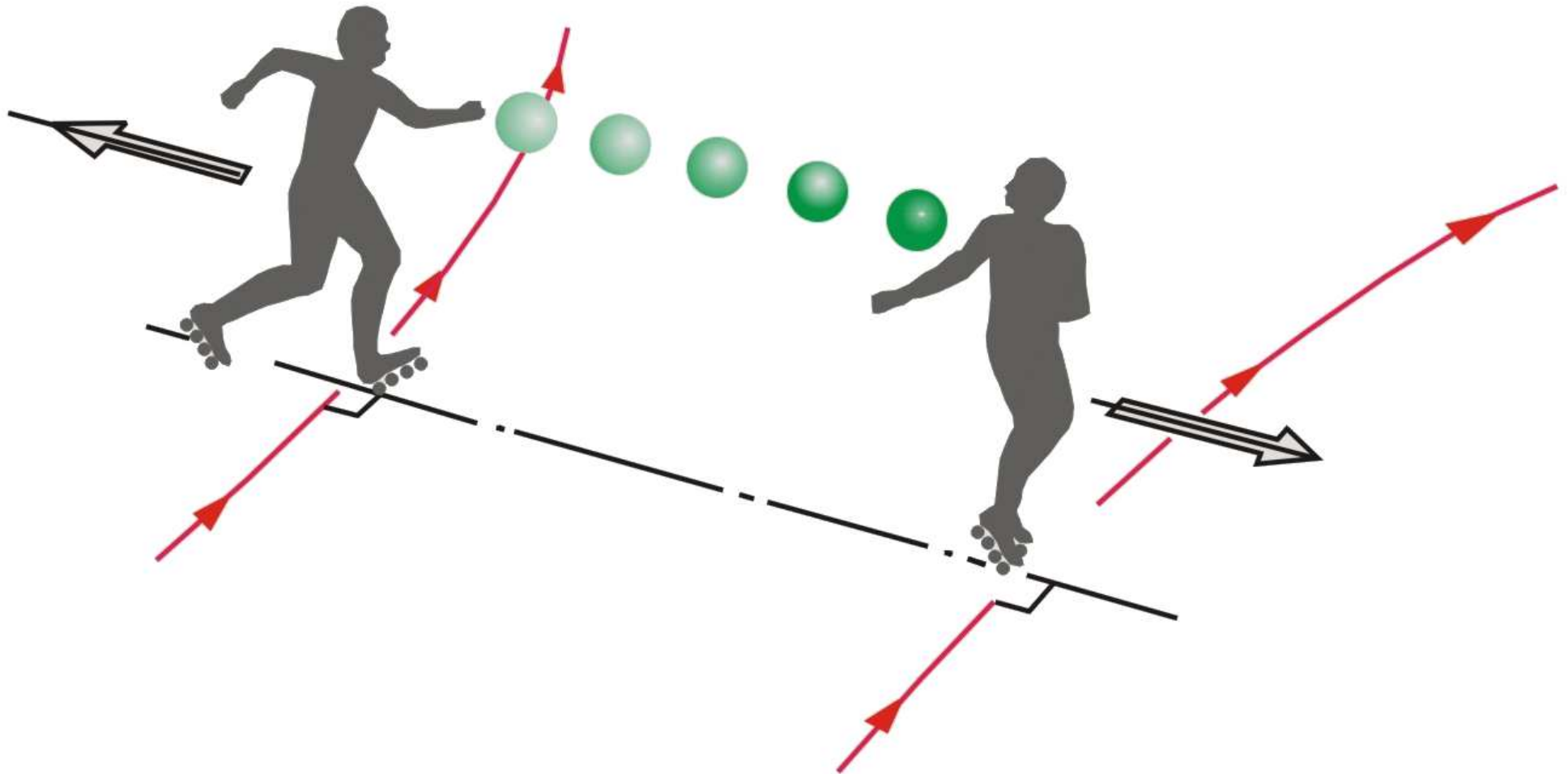
Cząstki elementarne i cząstki fundamentalne

- Cząstki takie jak proton p i neutron n to stany związane kwarków.

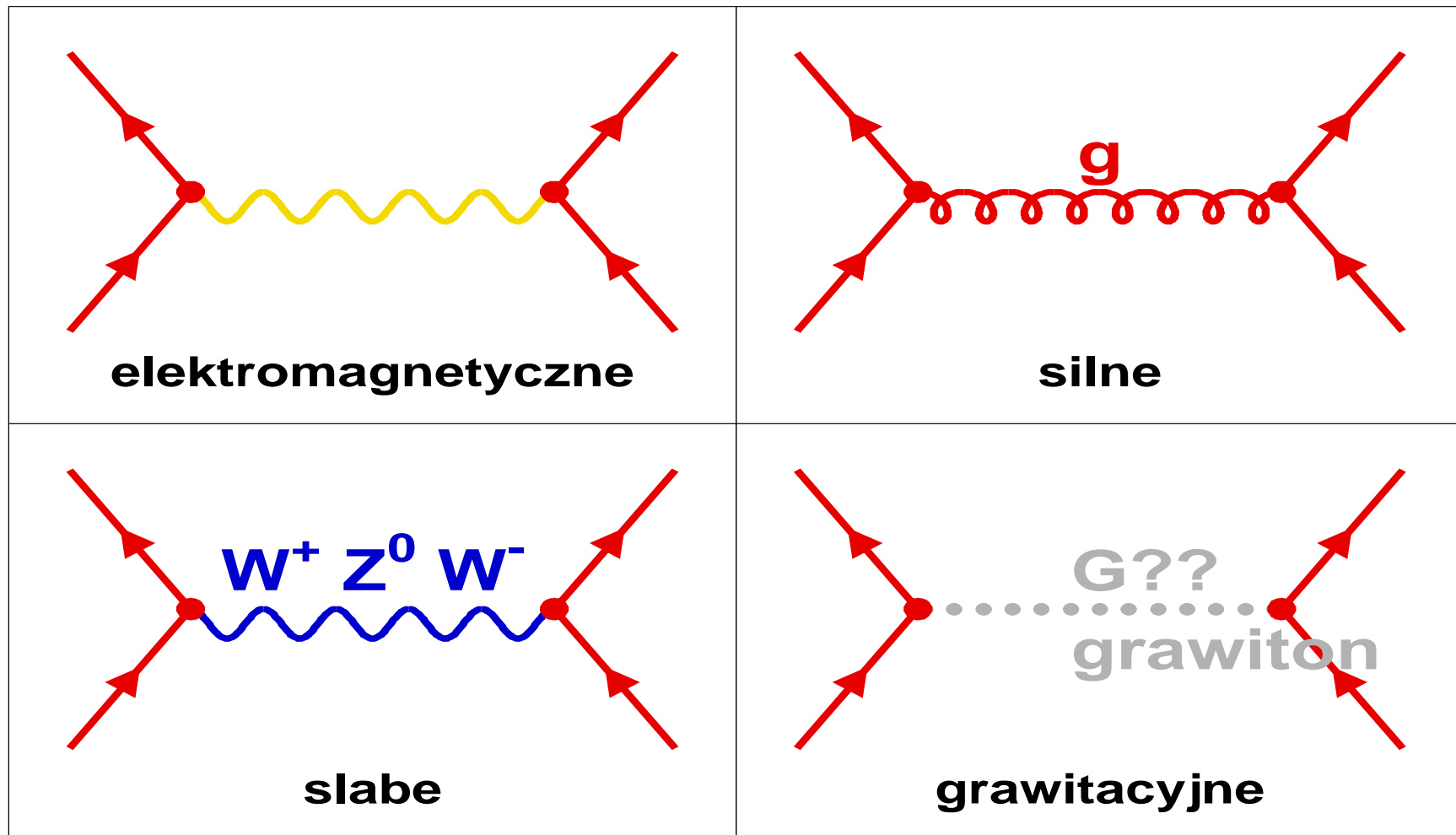
Cząstki fundamentalne (np. kwarki) – cząstki bez wewnętrznej struktury

- Cząstki przenoszące oddziaływania fundamentalne to też cząstki fundamentalne
- Fizyka cząstek elementarnych zajmuje się obecnie poziomem fundamentalnym – cząstkami fundamentalnymi i ich oddziaływaniami. Opis teoretyczny nosi nazwę
→ **Model Standardowy**

Oddziaływania na poziomie elementarnym i fundamentalnym opisujemy jako wymianę cząstek - “nośników”



Fundamentalne oddziaływania i fundamentalne **nośniki**-
 grawitacja nieistotna w mikroswiecie (grawiton - to jedynie hipoteza)



Oddziaływania fundamentalne (stan obecny)

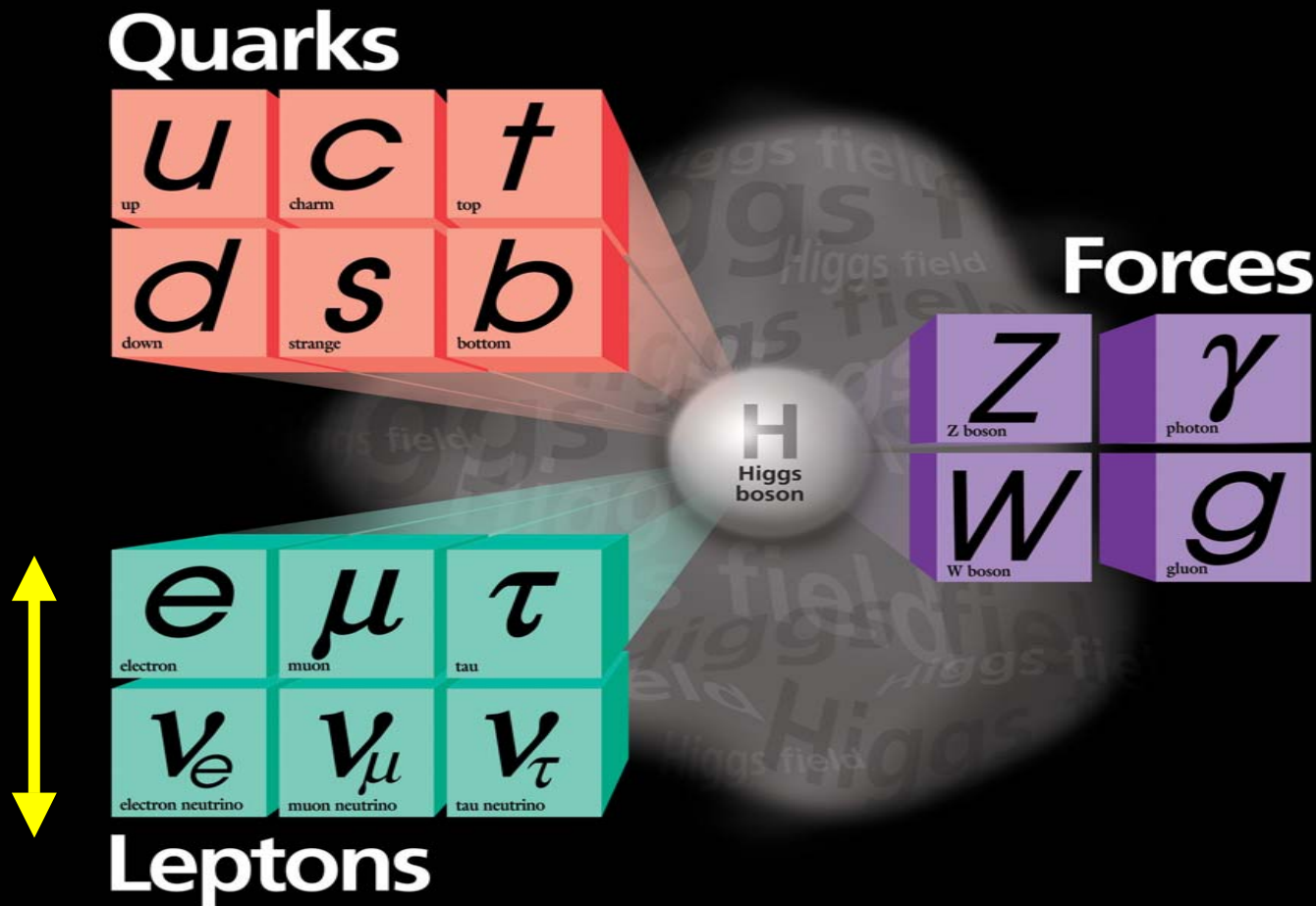
Nośnik oddziaływania przenosi **energię** i/lub **pęd** między cząstkami fundamentalnymi będącymi źródłami tego oddziaływania

<i>oddziaływanie</i>	<i>źródło</i>	<i>nośnik</i>	<i>masa</i>
elektromag.	ładunek	foton γ	0
silne	"kolor"	gluony g	0
słabe	"ładunek słaby"	"bozony pośredniczące" W^\pm	80 GeV
		Z^0	91 GeV

1 GeV = 1 000 000 000 eV \approx masa protonu (c=1)

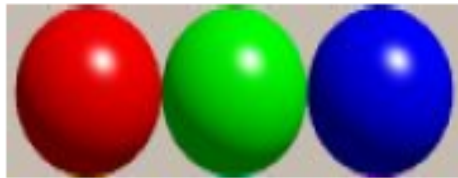
Kwarki-wszystkie oddziaływania, leptony (np.elektron)-bez oddz. silnych

Cząstki fundamentalne w Modelu Standardowym



Kolor

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



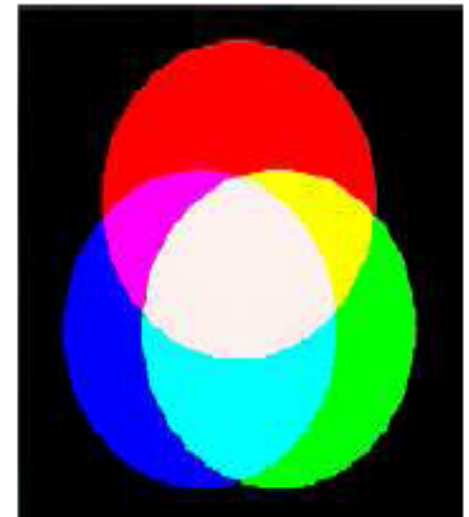
Antykwarki mają odpowiednio anty-kolory (kolory “ujemne”): \bar{R} , \bar{G} , \bar{B} .



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

$$R + G + B = 0$$

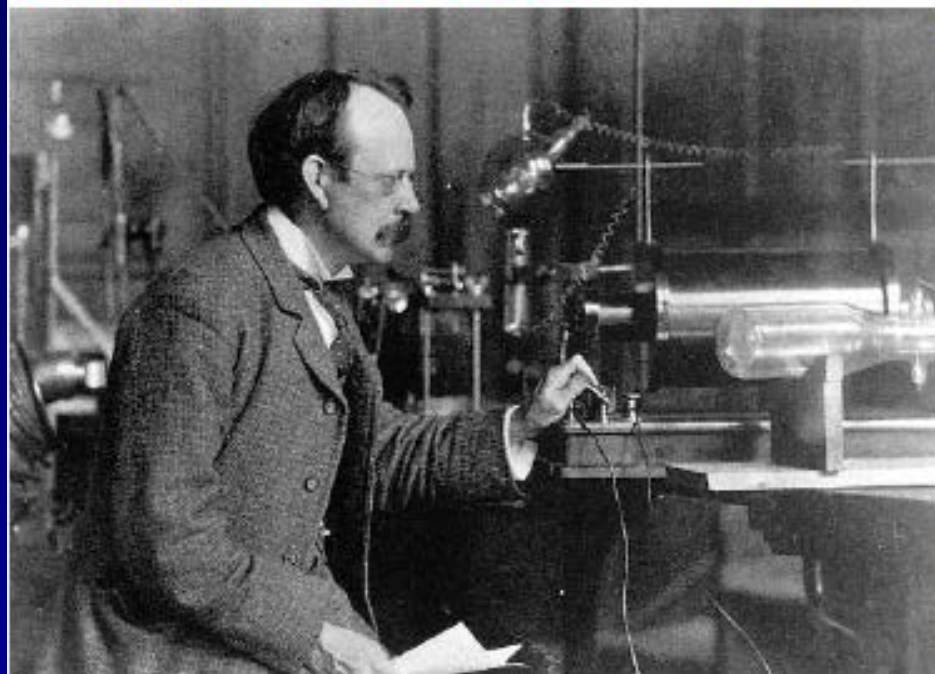
$$R + \bar{R} = G + \bar{G} = B + \bar{B} = 0$$



Odkrycia

Odkrycie elektronu

Joseph Thomson 1897



Thomson badał tzw. **promienie katodowe**



pokazał, że promienie te odchylają się w polu elektrycznym

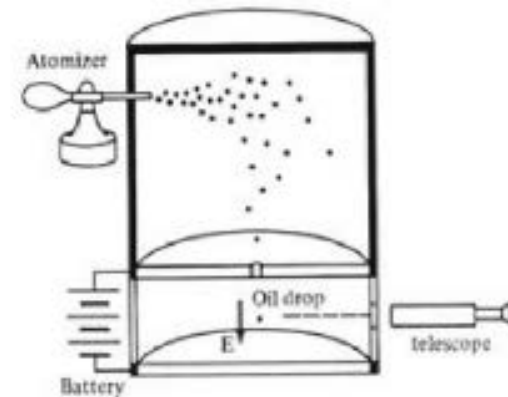
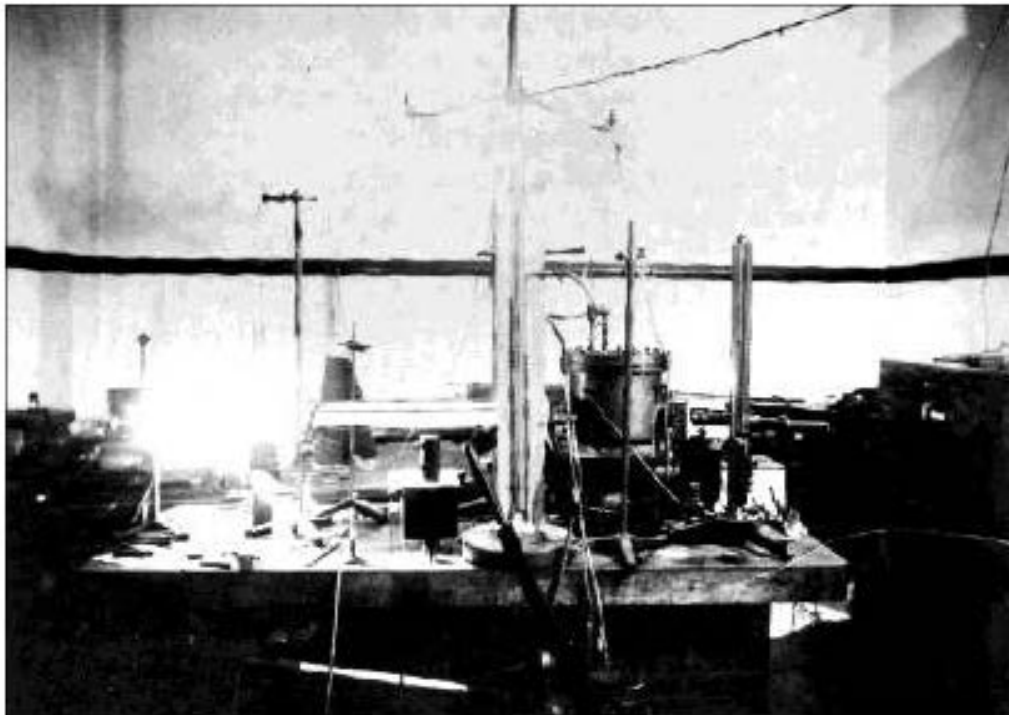
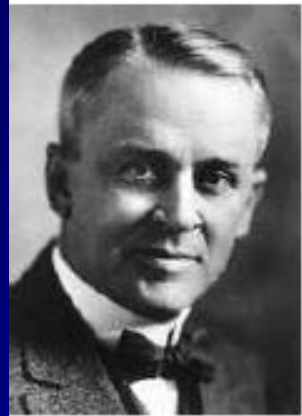
Wyznaczył stosunek ładunku do masy elektronu:

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

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 fotonu - doświadczenie

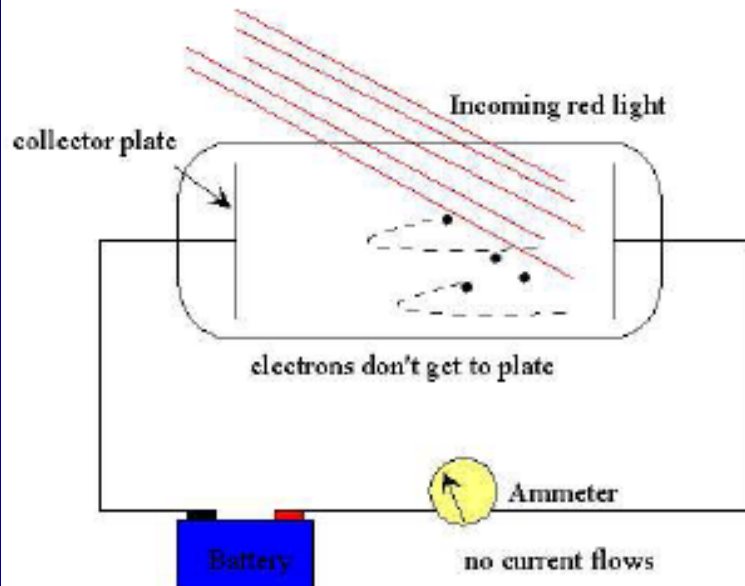
Efekt fotoelektryczny

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



Kwant - ur. w 1900, 14 grudnia

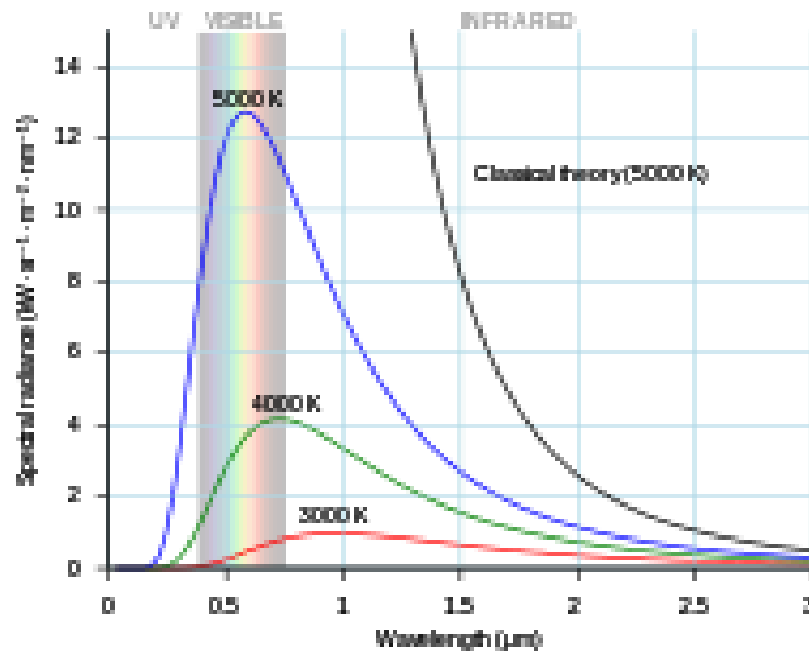
Max Planck zaproponował radykalne wyjaśnienie promieniowania cieplnego rozgrzanych ciał.

Z doświadczenia → całkowita energia promieniowania zależy tylko od temperatury.

„Klasyczny” opis dla idealnego źródła promieniowania ('ciało doskonale czarne') nonsensowny, bo prowadzi do wniosku, że źródło emituje nieskończoną energię („katastrofa w ultrafiolecie”) *rysunek →*

Planck: dobry opis można uzyskać zakładając, że promieniowanie energii odbywa się w porcjach (kwantach) $E = h \nu$ (h – stała, ν – częstotliwość) (ale według samego Plancka „to tragedia”..).

Czarna krzywa - teoretyczny rozkład Rayleigha–Jeansa: natężenie rośnie do nieskończoności gdy długość fali dąży do zera (tzw. katastrofa w ultrafiolecie).



Odkrycie fotonu

- teoria

Efekt fotoelektryczny

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

Ma pęd i energię jak cząstka!!

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



Light quanta - cząstki światła

- 1900 - Planck → kwant energii promieniowania elektromagnetycznego $E = h\nu$ (nagroda Nobla - 1918)
- 1905 - Einstein → kwant światła (γ) - foton Einsteina : $E = h\nu = pc$ (nagroda Nobla - 1922)
- 1915 - Millikan badał zjawisko fotoemisji z metalu (nagroda Nobla - 1923)
- 1922 - Compton (doświadczenie rozpraszania fotonów na elektronach $\gamma e \rightarrow \gamma e$) (nagroda Nobla - 1927)
- 1925-7 - Born, Heisenberg, Jordan, Dirac → (teoria oddziaływań elektromagnetycznych - elektrodynamika kwantowa QED; foton - bozon przenoszący oddziaływanie)
- (• 1926 - Lewis (chemik) → nazwał kwant światła - fotonem)
- 1931 - Wigner → opis własności związanych z momentem pędu - spinem; foton - spin $1 \hbar/2\pi$

Zuchwała hipoteza Einsteina o cząstkach światła (*wg Einsteina jedyna jego rewolucyjna idea*)

- Max Planck nie popierał tej idei przeczącej teorii Maxwella - nawet w roku 1914 tłumaczył Einsteina z tego "wybryku" przed Pruską Akademią Nauk:

"Że on nieraz gubił się w swych spekulacjach, jak na przykład w swej hipotezie cząstek światła, nie może być używane przeciwko niemu, gdyż nie można wprowadzać naprawdę nowych idei, nawet w naukach ścisłych, bez podjęcia ryzyka. "

- Millikan był zakłopotany, że ona pasuje do wyjaśnienia pomiarów efektu fotoelektrycznego...

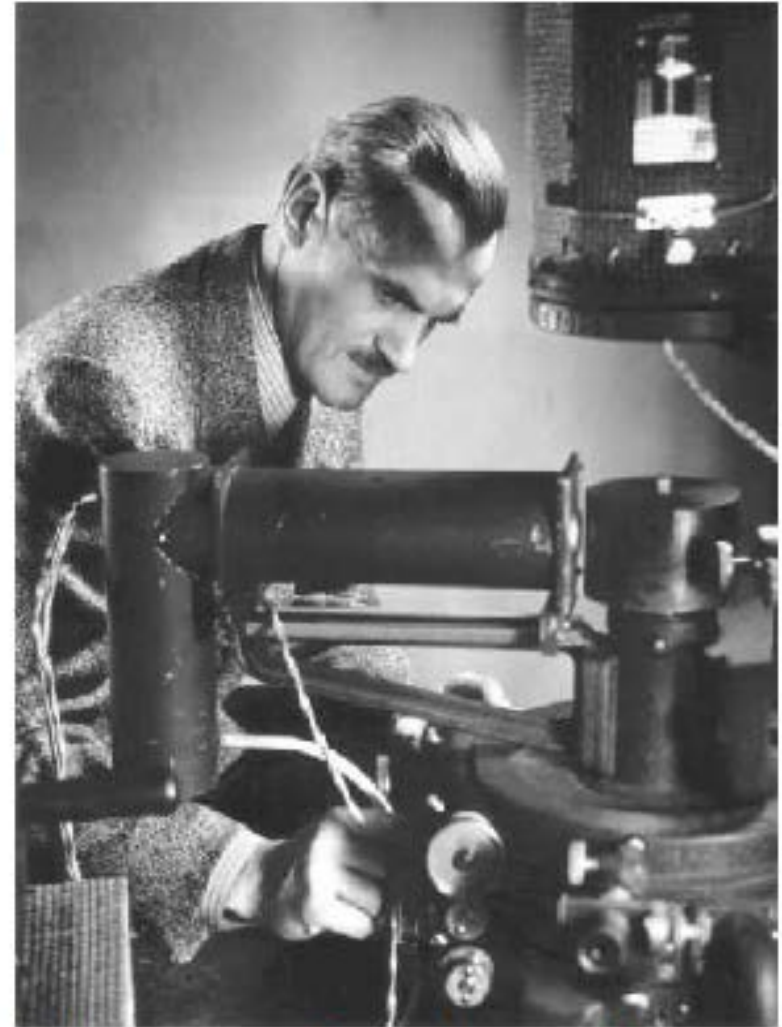
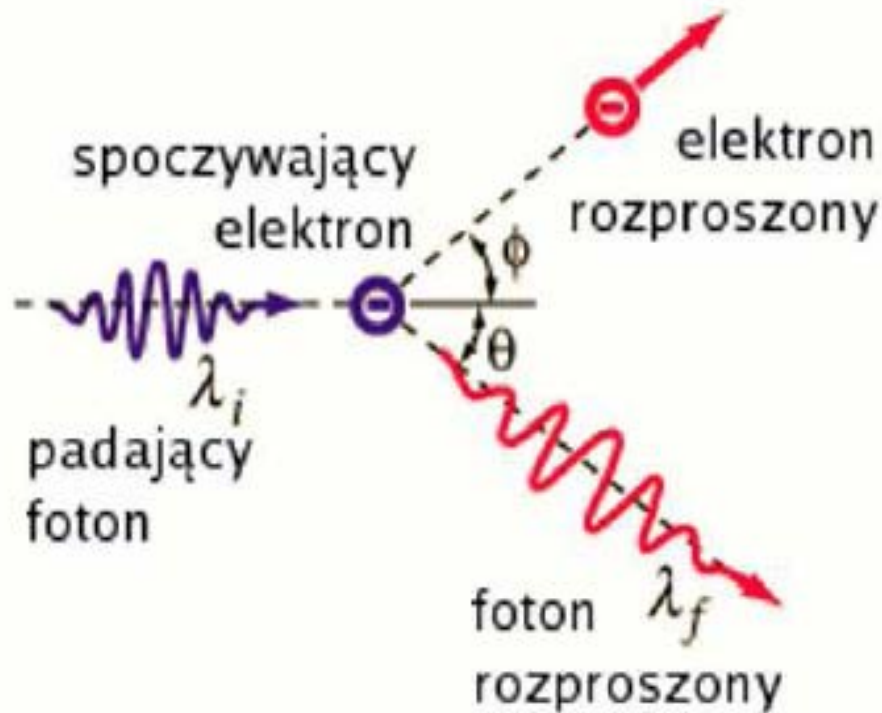
- Bohr - uważał "kwantowość " za własność atomów nie promieniowania (wolał zrezygnować z zachowania energii i pędu..)

- Środowisko w końcu zaakceptowało foton, szczególnie po doświadczeniu Comptona, w którym foton i elektron grają w bilard...

Odkrycie fotonu

I znowu doświadczenie

Arthur Compton 1923
Rozpraszanie fotonów na elektronach



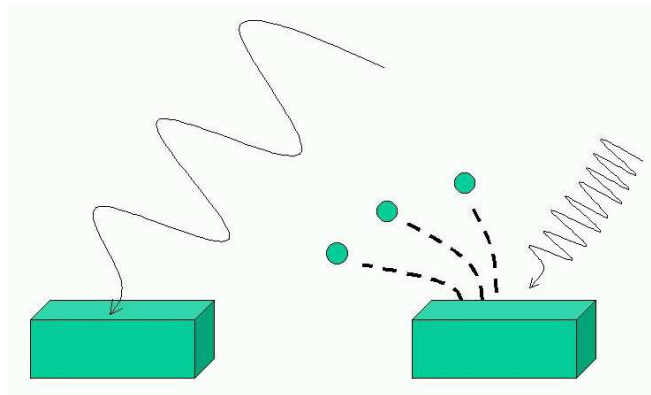
Compton pokazał, że fotony niosą nie tylko **energię**, ale i **pęd**
⇒ zachowują się jak **cząstki**

Cząstki i fale

100 lat temu, w roku 1905, Albert Einstein wysunął hipotezę, że światło jest strumieniem niepodzielnych **kwantów światła**, które dziś nazywamy **fotonami**.

Efekt fotoelektryczny

Hipoteza ta wyjaśniła zależność efektu fotoelektrycznego od długości fali światła (energii fotonów)

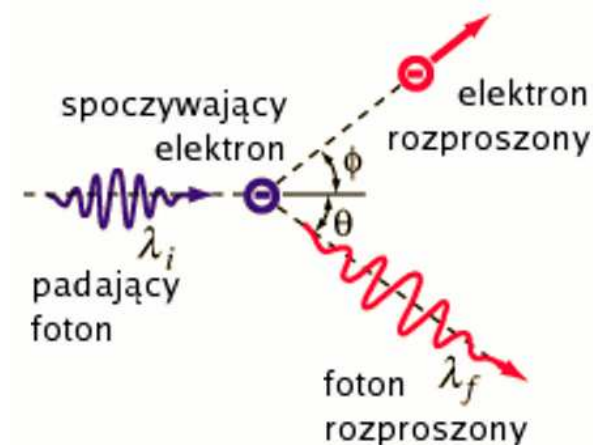


$$h\nu < E_0$$

$$h\nu > E_0$$

Rozpraszanie Comptona

W roku 1923 Compton potwierdził, że fotony niosą nie tylko **energię**, ale i **pęd** \Rightarrow zachowują się jak cząstki

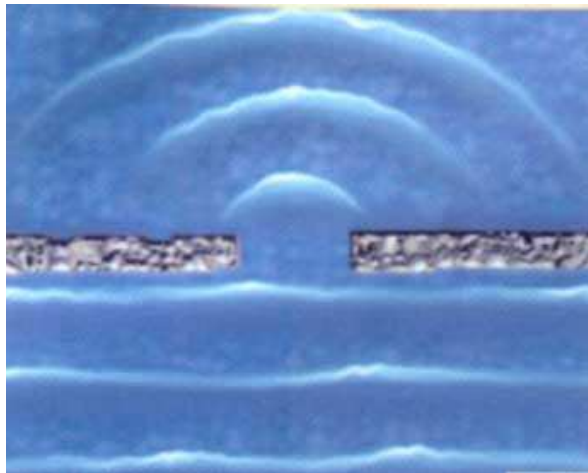


Cząstki i fale

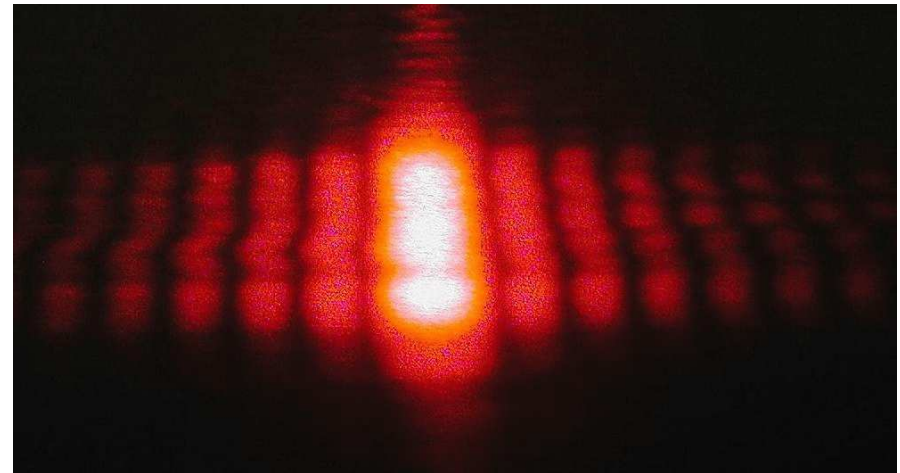
Jednocześnie jednak **fotony** zachowują się jak **fale**.
Świadczą o tym m.in. zjawiskodyfrakcji i **interferencji** światła.

Ugięcie fal na pojedynczej szczelinie:

Fale na wodzie



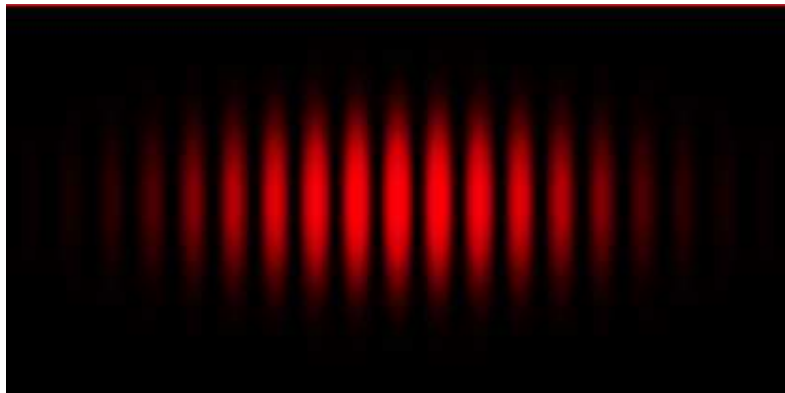
Światło



Cząstki i fale

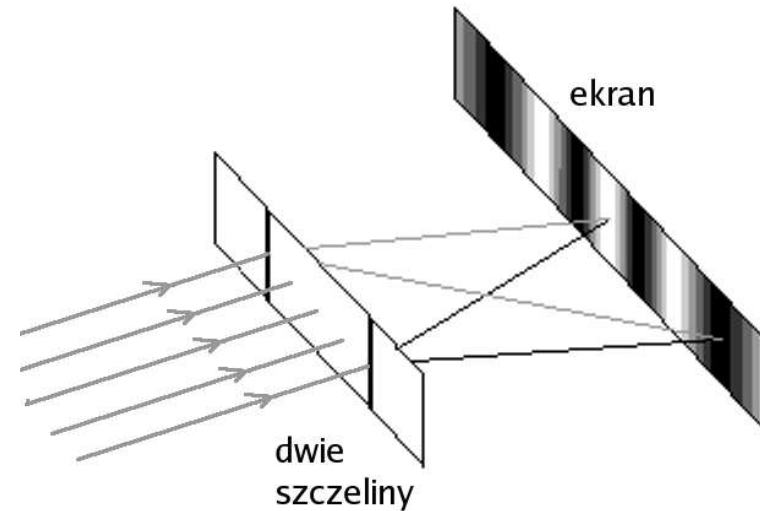
Obraz przy przechodzeniu przez dwie szczeliny:

Światło



Złożenie fal

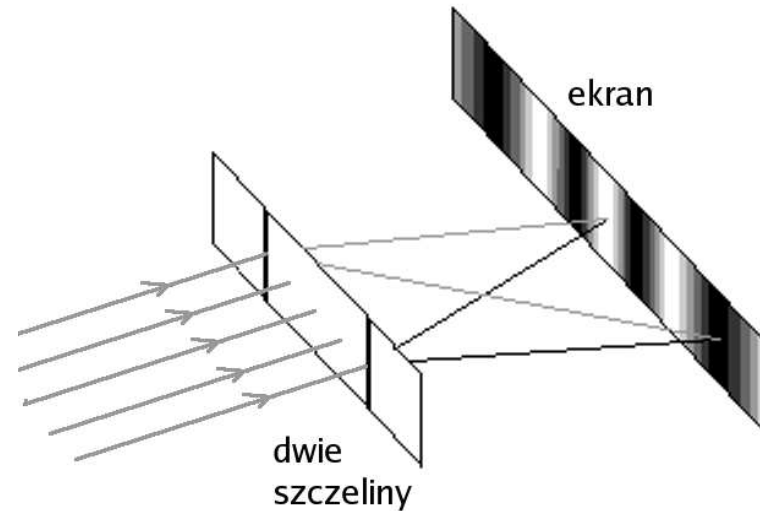
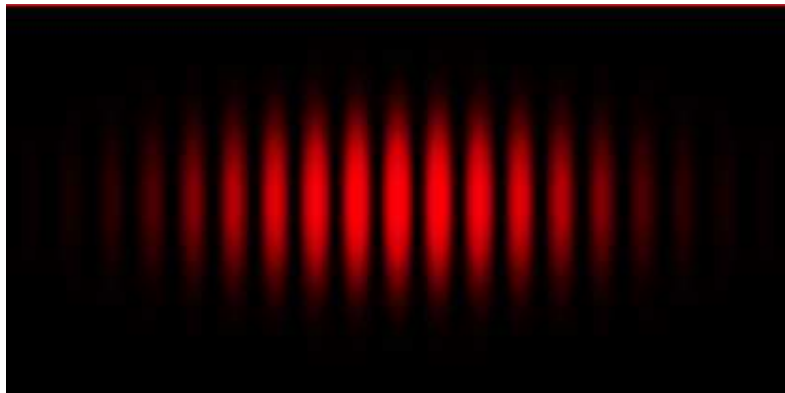
⇒ prążki interferencyjne



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** !

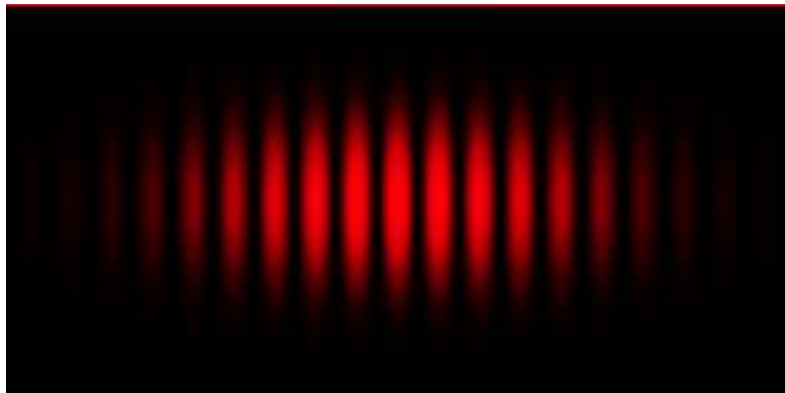
Podstawa mechaniki kwantowej (falowej) - r. falowe Schroedingera 1926



Cząstki i fale

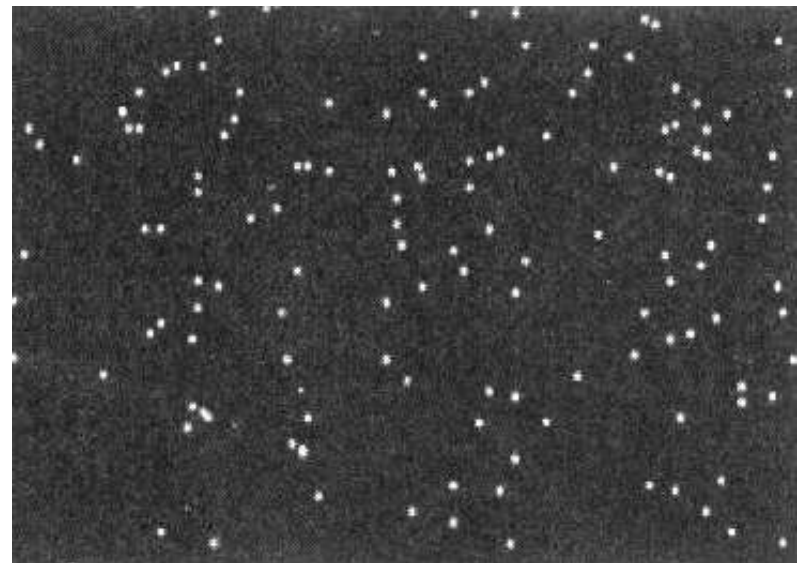
Obraz przy przechodzeniu przez dwie szczeliny:

Światło



Złożenie **fal**
⇒ prążki interferencyjne

Elektrony

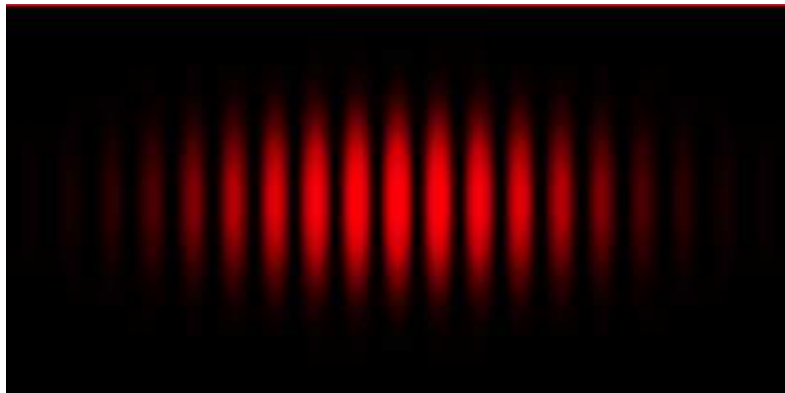


100 elektronów
rozkład przypadkowy ?

Cząstki i fale

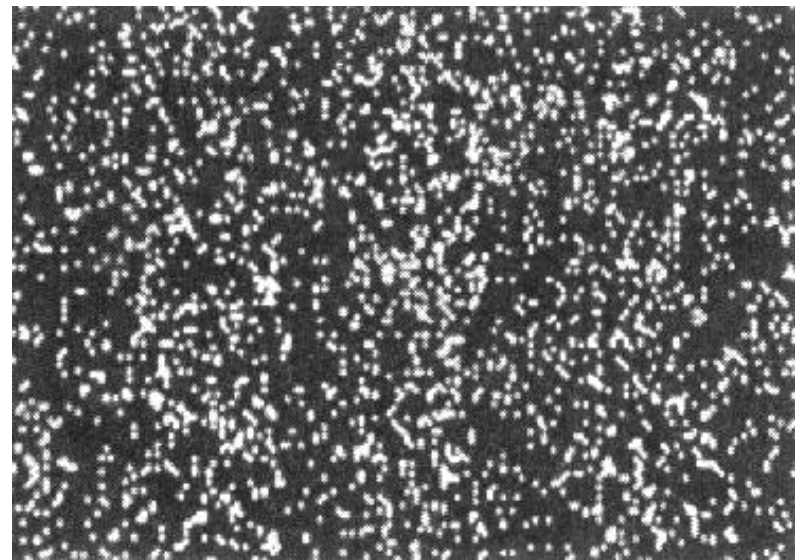
Obraz przy przechodzeniu przez dwie szczeliny:

Światło



Złożenie **fal**
⇒ prążki interferencyjne

Elektrony

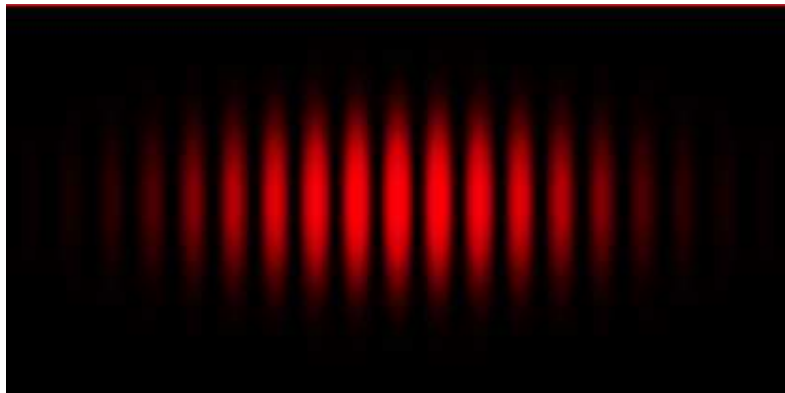


3000 elektronów

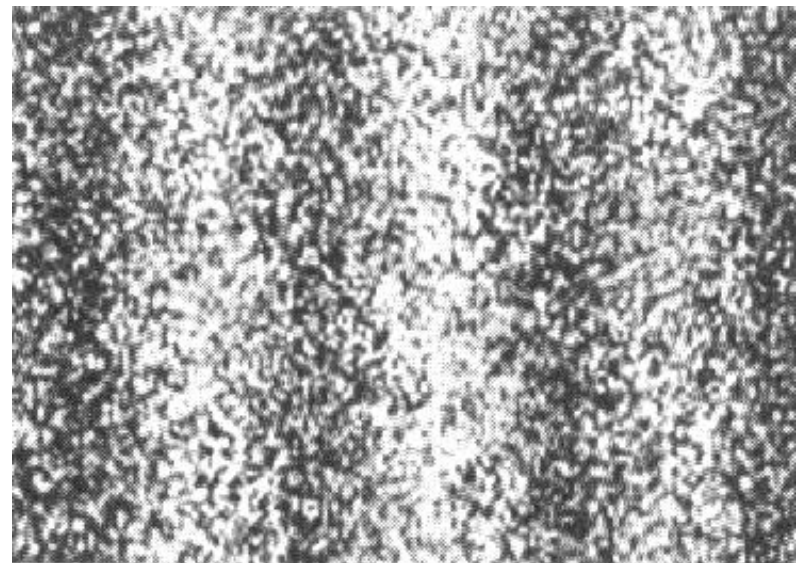
Cząstki i fale - mechanika kwantowa

Obraz przy przechodzeniu przez dwie szczeliny:

Światło



Elektrony



Złożenie **fal**

⇒ **prążki interferencyjne**

70000 elektronów

Elektrony też zachowują się jak fale !

Sprawdz to sam :

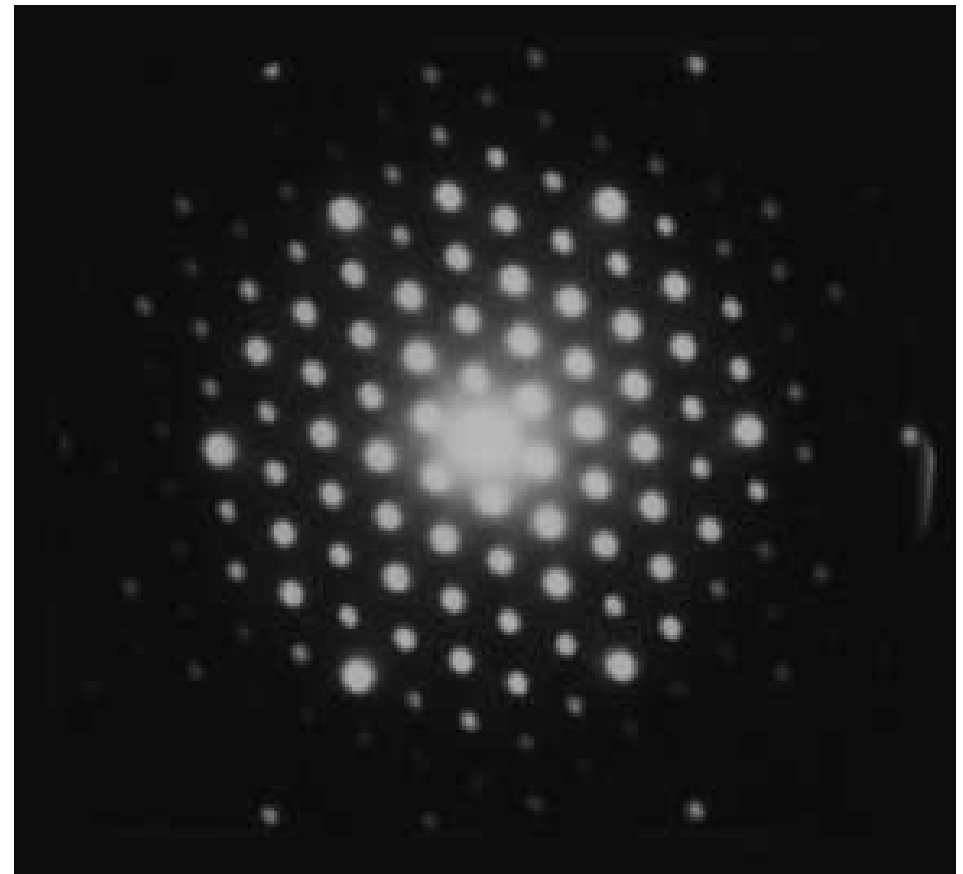
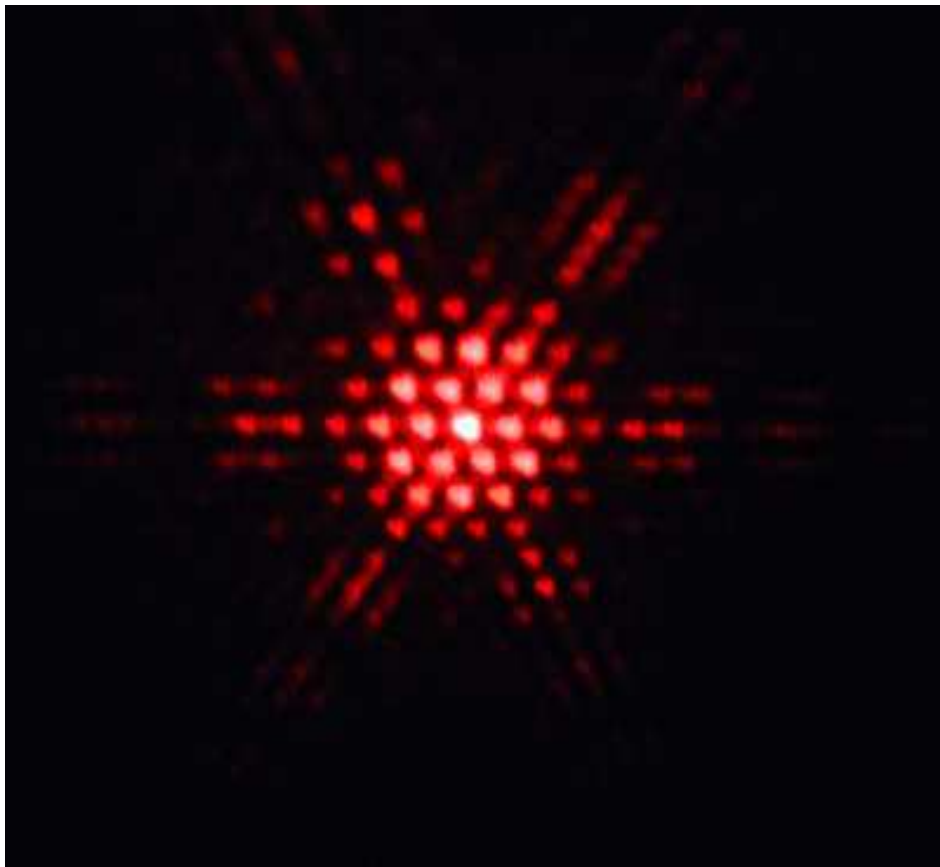
<http://www.colorado.edu/physics/2000/schroedinger/two-slit3.html>

Cząstki i fale

Dyfrakcja na strukturach heksagonalnych

Światło

Elektrony

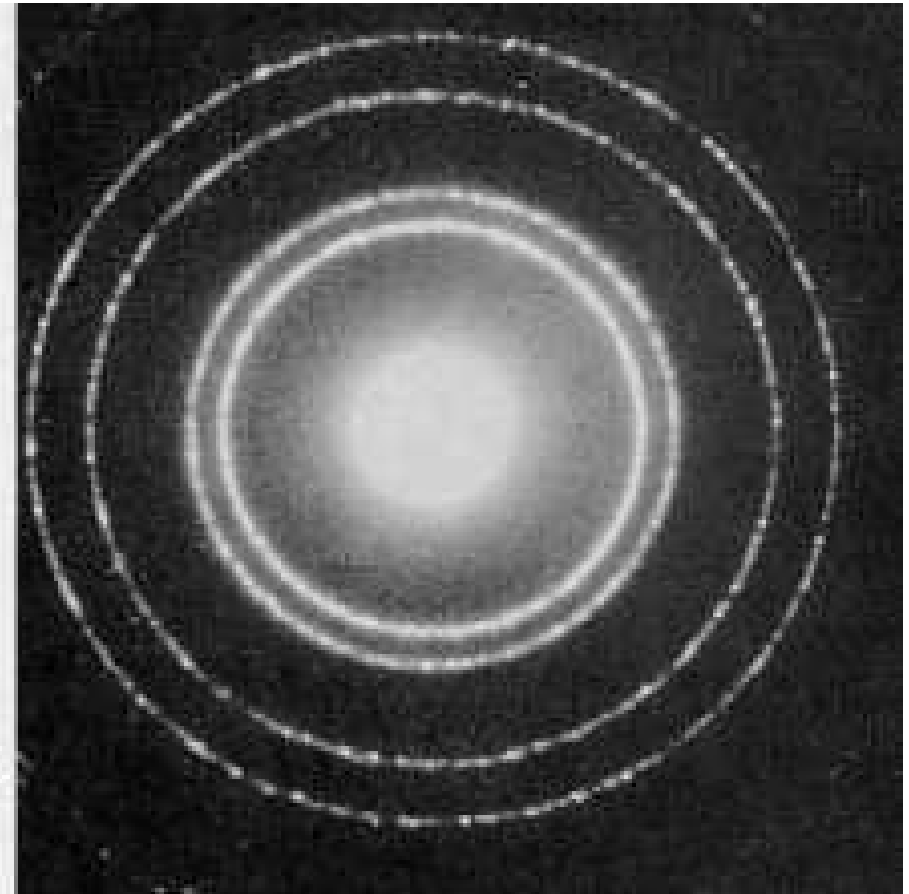
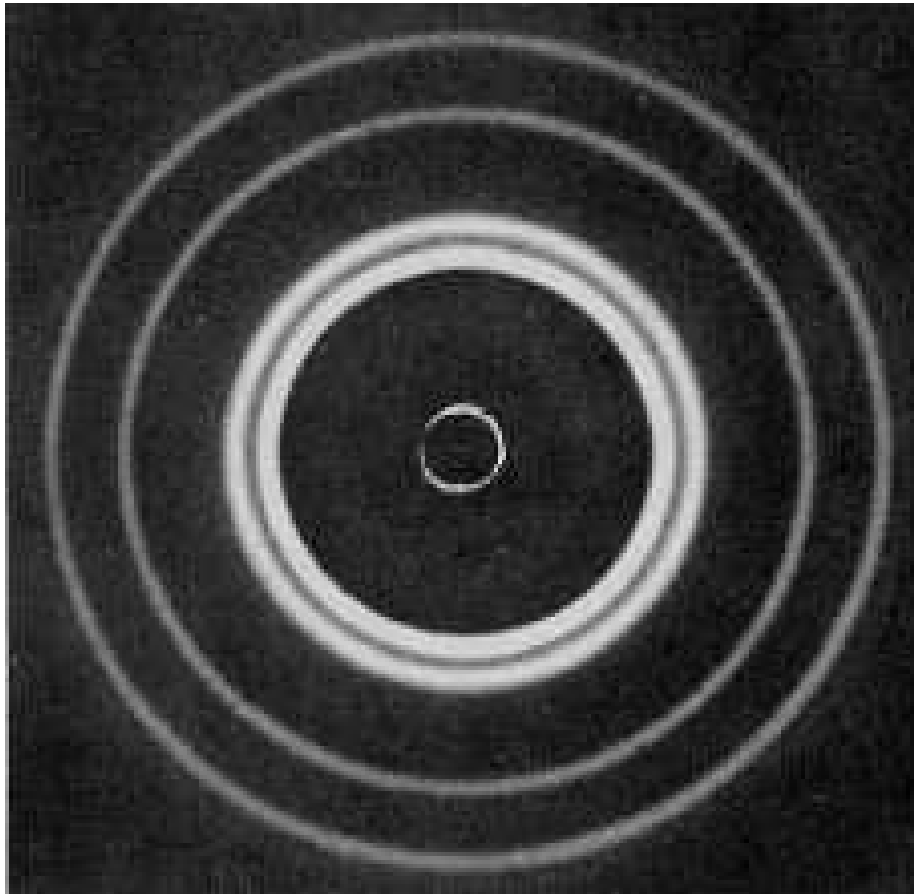


Cząstki i fale

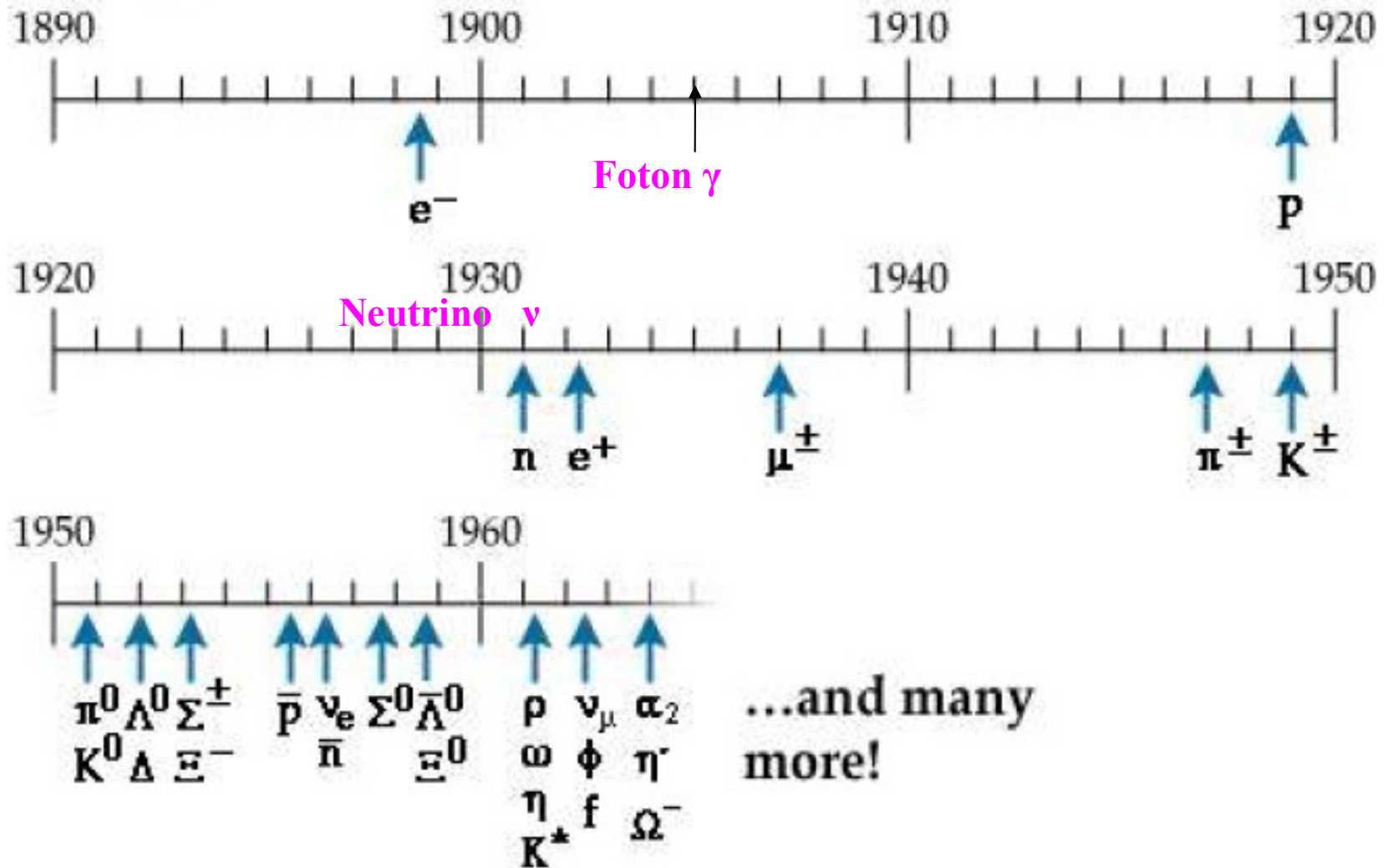
Obraz przy przechodzeniu przez cienką folię aluminiową

Promieniowanie X

Elektrony



Odkrycia cząstek elementarnych 'potop' w latach 50-60 XX w



Pytania do wykładu 1

- Femtometr to ile milimetrów?
- MeV ile to elektronowoltów?
- Co oznacza zapis 10^6 ?
- Czy cząstka elementarna to to samo co cząsteczka?
- Czym różni się cząstka elementarna od fundamentalnej?
- Co to jest nukleon?
- Kiedy odkryto pierwszą cząstkę elementarną? Jaka to była cząstka?
- Kiedy odkryto proton, kiedy pozyton?
- Czym różnią się hipoteza Plancka i hipoteza Einsteina?
- Na czym polegało doświadczenie Comptona?
- Za co Einstein dostał nagrodę Nobla?
- Co to jest zjawisko fotoelektryczne?
- Porównaj rozmiary cząsteczki, atomu i kwarku
- Z czego zbudowane jest jądro atomowe?
- Z czego składa się proton?
- Podaj przykłady cząstek antymaterii
- Dlaczego do badania struktury materii potrzeba coraz większych energii?