

Wszechświat cząstek elementarnych

Maria Krawczyk

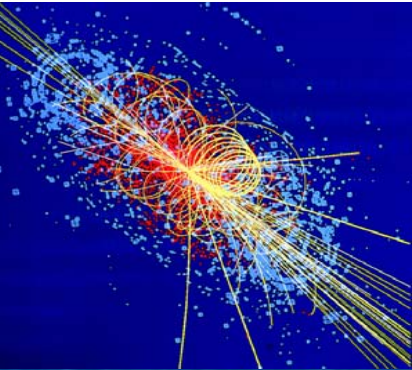
i

A. Filip Żarnecki

Instytut Fizyki Teoretycznej

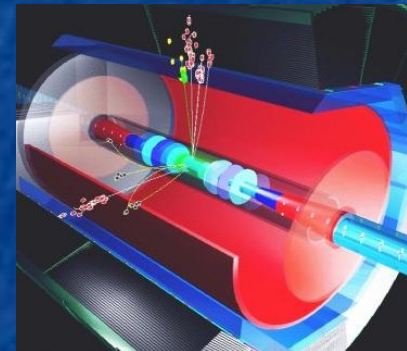
i

Instytut Fizyki Doświadczalnej



Wydział Fizyki UW
semestr letni, rok akad. 2012/13

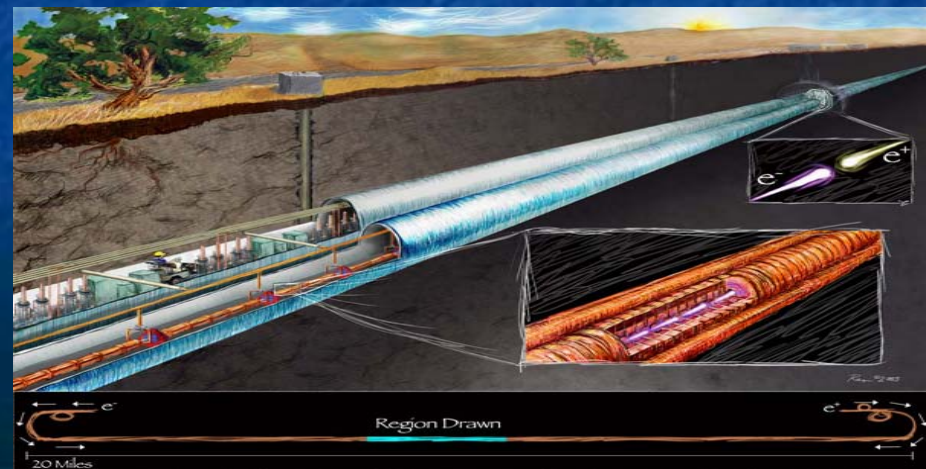
<http://www.fuw.edu.pl/~zarnecki/WCE/wce.html>



Large Hadron Collider



International Linear Collider



LHC - 4 July 2012

Higgs-like particle with mass ~ 125 - 126 GeV
observed at ATLAS+CMS (+Tevatron)

BROKEN SYMMETRY AND THE MASS OF GAUGE VECTOR MESONS*

F. Englert and R. Brout

Faculté des Sciences, Université Libre de Bruxelles, Bruxelles, Belgium

(Received 26 June 1964)

BROKEN SYMMETRIES, MASSLESS PARTICLES AND GAUGE FIELDS

P. W. HIGGS

Tait Institute of Mathematical Physics, University of Edinburgh, Scotland

Received 27 July 1964

VOLUME 13, NUMBER 16

PHYSICAL REVIEW LETTERS

19 OCTOBER 1964

BROKEN SYMMETRIES AND THE MASSES OF GAUGE BOSONS

Peter W. Higgs

Tait Institute of Mathematical Physics, University of Edinburgh, Edinburgh, Scotland

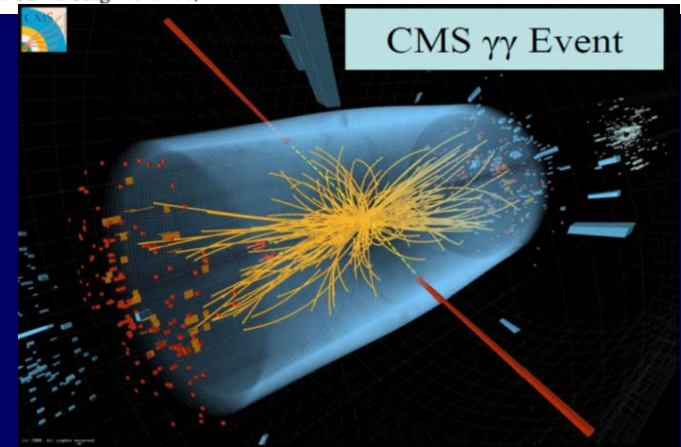
(Received 31 August 1964)

GLOBAL CONSERVATION LAWS AND MASSLESS PARTICLES*

G. S. Guralnik,[†] C. R. Hagen,[‡] and T. W. B. Kibble

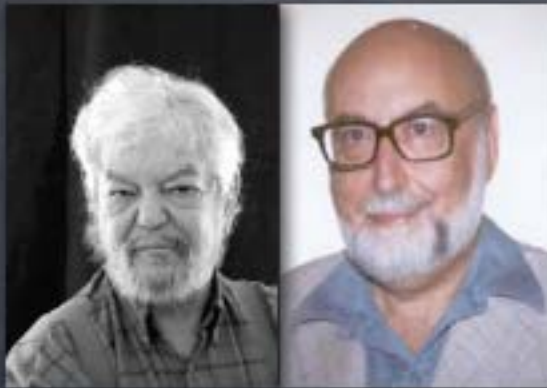
Department of Physics, Imperial College, London, England

(Received 12 October 1964)



2010 Sakurai Prize

... for “elucidation of the properties of spontaneous symmetry breaking in four-dimensional relativistic gauge theory and of the mechanism for the consistent generation of vector boson masses.”



Brout Englert

PRL 13, 321-323 (1964)



Higgs

PRL 13, 508-509 (1964)



Hagen Guralnik Kibble

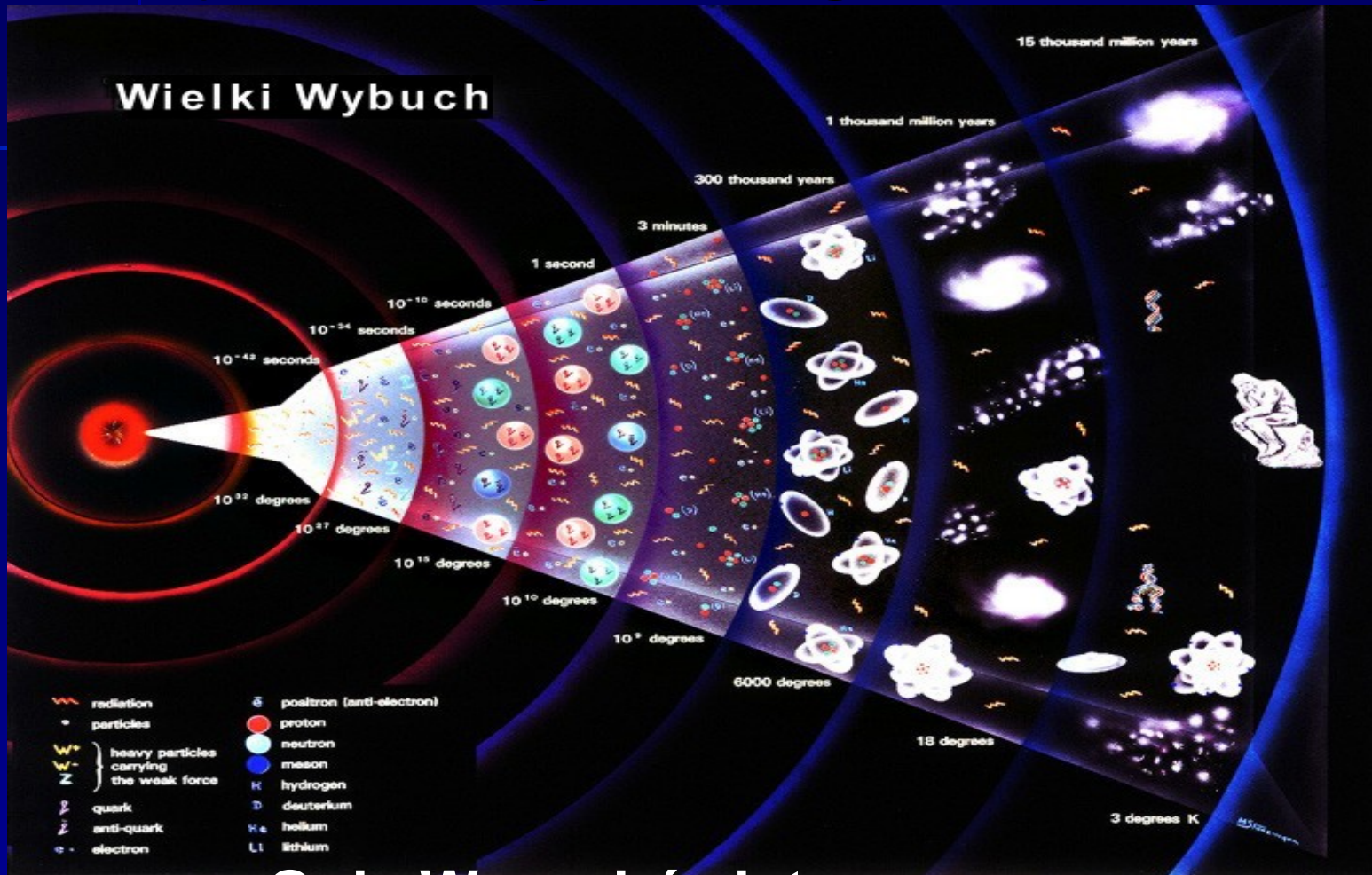
PRL 13, 585-587 (1964)



Nambu, Nobel 2008
SSB to particle physics



Skąd ten tytuł wykładu?



Opis Wszechświata
nie jest możliwy bez zrozumienia
oddziaływań cząstek elementarnych.

Program



1. Wprowadzenie
Ogólne informacje o Modelu Standardowym
2. Detekcje cząstek. Przyspieszacze i zderzacze.
Wielkie eksperymenty
3. Hadrony, kwarki i leptony
4. Teoria cząstek elementarnych
5. Poszukiwanie cząstki Higgsa
6. Rozszerzenie Modelu Standardowego
7. Powstanie i budowa Wszechświata
8. Ciemna materia, ciemna energia

Materiały pomocnicze

- Wykłady będą zamieszczane na stronie

<http://www.fuw.edu.pl/~zarnecki/WCE/wce.html>

- **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. M. Krawczyk , DELTA 5(2000)

Warunki zaliczenia :

1. obecność na wykładach obowiązkowa
*dopuszczona jest nieobecność na dwóch wykładach,
kolejne nieobecności obniżają ocenę*
2. 50% punktów z pisemnego egzaminu testowego
30 pytań (max 1 zdanie odpowiedzi)

Termin egzaminu 8 czerwca 2013r

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 „rzęd 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

Aby ułatwić zapis wprowadzamy dedykowane nazwy

Duże liczby

deka, hekto, **kilo**, **mega**, **giga**, **tera**, peta, exa, zetta, yotta

| | | | | | | | |
|--------|--------|----------|----------|----------|-----------|-------|-----------|
| da | h | k | M | G | T | | 10^{24} |
| 10^1 | 10^2 | 10^3 | 10^6 | 10^9 | 10^{12} | | |

Małe liczby

decy, centy, mili, mikro, nano, pico, **femto**, atto, zepto, yocto

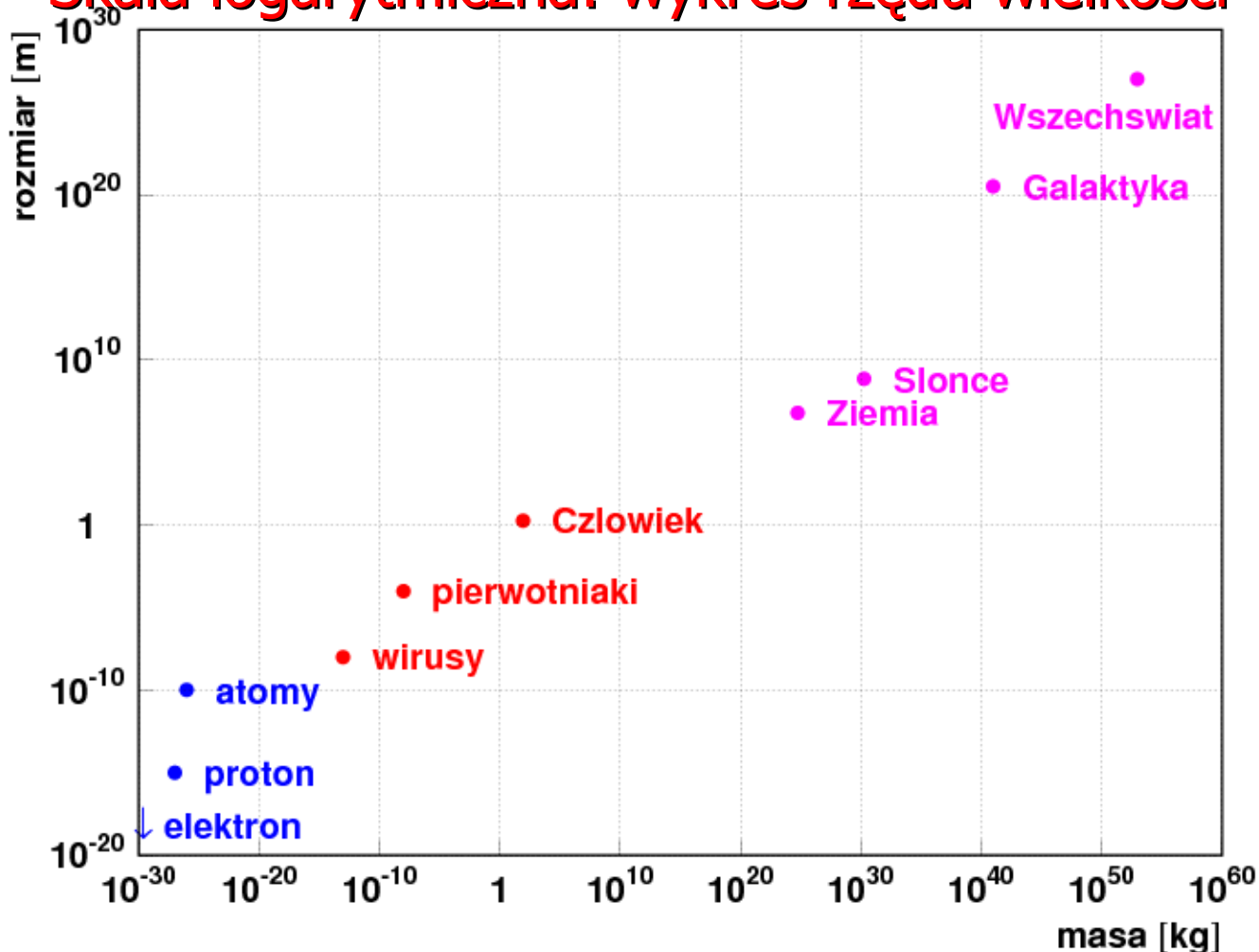
| | | | | | | | | |
|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|------------|-------|------------|
| d | c | m | μ | n | p | f | | 10^{-24} |
| 10^{-1} | 10^{-2} | 10^{-3} | 10^{-6} | 10^{-9} | 10^{-12} | 10^{-15} | | |

Przykład: 1 **fm** = 10^{-15} m 1 **TeV** = 10^{12} eV

Czym zajmuje się fizyka?

- Staramy się zrozumieć zjawiska zachodzące na najmniejszych i największych odległościach
- Szukamy praw opisujących zarówno zachowanie najmniejszych cząstek i ewolucję wszechświata

Skala logarytmiczna: wykres rzędu wielkości



Czym zajmuje się fizyka?



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 atomowe

- Materia składa się z cząsteczek
 - np. woda H_2O , H=wodór, O=tlen
- Cząsteczki = stany związane atomów (ponad 90 różnych atomów w naturze)
- Atomy = stany związane jąder atomowych i elektronów

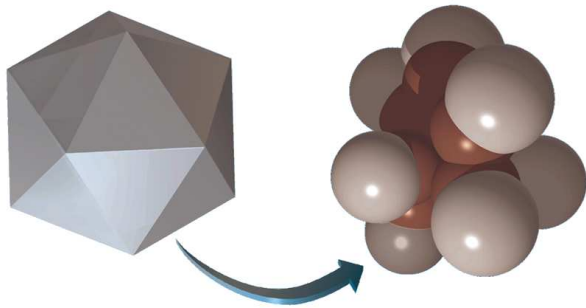
Atomy są prawie puste - rozmiar atomu
1/100 000 000 cm, jądro 100 000 mniejsze

(doświadczenie Rutherforda w 1911 r) nukleony

- Jądra = stany związane protonów i neutronów

Budowa materii

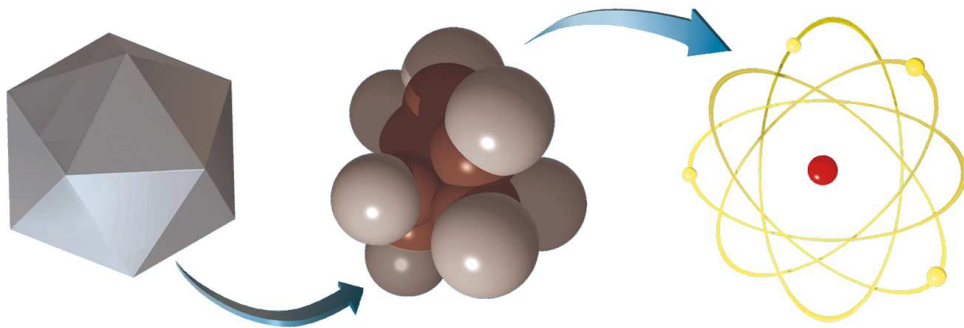
Cząsteczka



10^{-9} m

Budowa materii

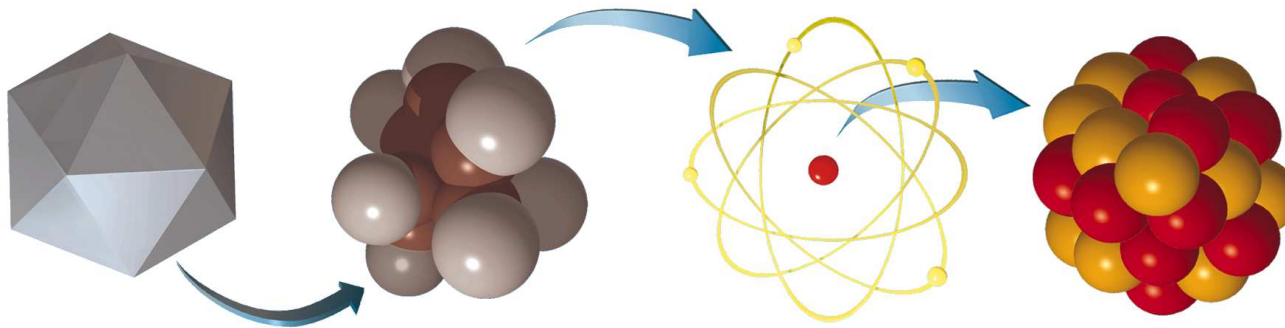
Atom



10^{-10} m

Budowa materii

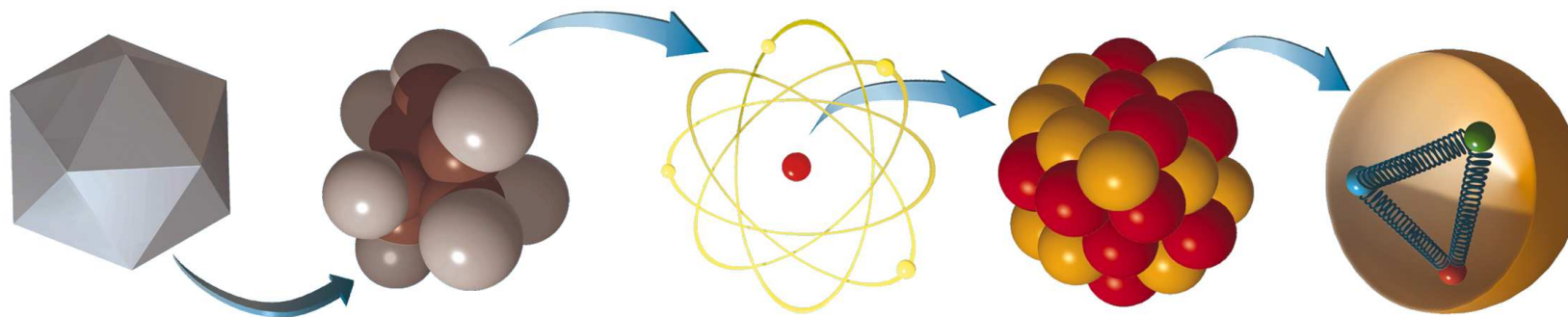
Jądro atomowe



10^{-14} m

Budowa materii

Nukleony



10^{-15} m

Jądro atomowe

Nukleony

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

Atomy

- są neutralne elektrycznie
- 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 + ee (→ 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 wodoru H, czyli proton, który jest cząstką elementarną.)

Cząstki elementarne – AD 2013 (<http://pdg.lbl.gov/>)
dużo (1000) i różnorodne (Zoo):

różne masy,

różne czasy życia (mogą się rozpadać !),

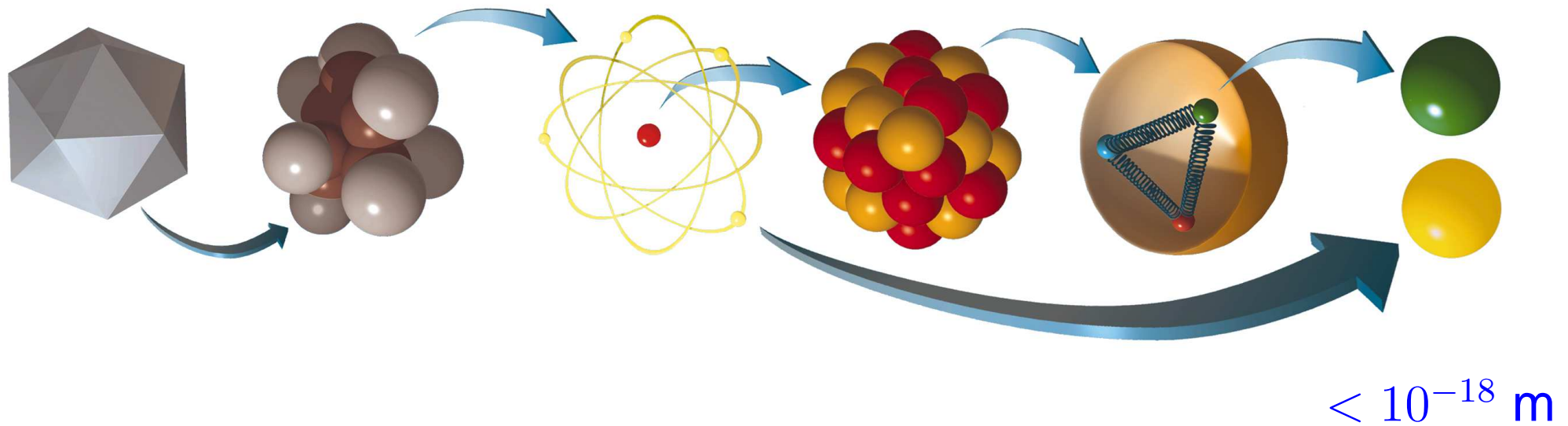
różne ładunki elektryczne,

różne sposoby oddziaływań,

grupowanie się w różne układy (multiplety)

Cząstki elementarne mogą być złożone (np. proton) !
Najmniejsze składniki materii → **cząstki fundamentalne**

Budowa materii



Kwarki i
elektrony

$< 10^{-18} \text{ m}$

Cząstki elementarne i fundamentalne

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

Cząstki fundamentalne – cząstki bez wewnętrznej struktury (kwarki, elektron..)

- Fizyka cząstek elementarnych zajmuje się obecnie poziomem fundamentalnym – cząstkami fundamentalnymi i ich oddziaływaniami

Model Standardowy

Cząstki przenoszące oddziaływania fundamentalne – to też cząstki fundamentalne

Antycząstki (antymateria)

- Antycząstki to też cząstki, choć mogą się różnić od swoich „partnerów” pewnymi własnościami.
Cząstki i antycząstki mają te same masy i czasy 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 –
P. Dirac’ 1928 (*mylnie uważał proton za antycząstkę do elektronu, choć nie zgadzały się masy..*)
- Cząstka i antycząstka mogą oddziaływać b. gwałtownie – zniknąć (anihilacja) lub pojawiać się w parach (kreacja)
- Cząstka może być swoją antycząstką

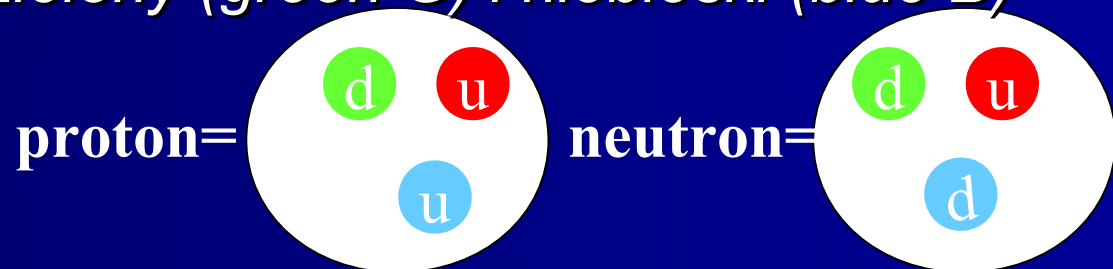
Oznaczenie: kreska nad symbolem cząstki np. kwark u i antykwark \bar{u}

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 kwarki*

Wszystkie kwarki występują w 3 stanach (*barwach, kolorach*)
- nowa liczba kwantowa
czzerwony (red R), zielony (green G) i niebieski (blue B)
(to tylko nazwy!)



Kwarki są fundamentalne..

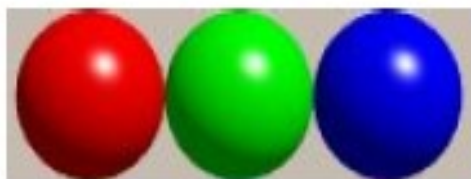
ale są na stałe uwięzione w cząstkach takich jak nukleony.

W nukleonach są *gluony* *sklejające całość*

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

Kolor

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

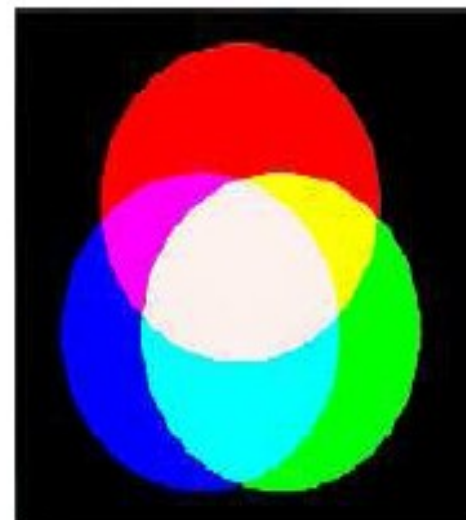


Antykwarki mają odpowiednio anty-kolory (kolory “ujemne”): \bar{R} , \bar{G} , \bar{B} .



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

$$\begin{aligned} R + G + B &= 0 \\ R + \bar{R} = G + \bar{G} = B + \bar{B} &= 0 \end{aligned}$$



W świecie cząstek elementarnych obowiązują:

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

W badaniu struktury materii stosowane są **coraz większe energie** (fizyka cząstek elem. = fizyka wysokich energii, ang. High Energy Physics), gdyż:

- Zasada nieoznaczoności Heisenberga → większa energia umożliwia dotarcie do coraz mniejszych struktur
- Relacja $E = mc^2$ → 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 stałym czynnikiem = kwadrat prędkości 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

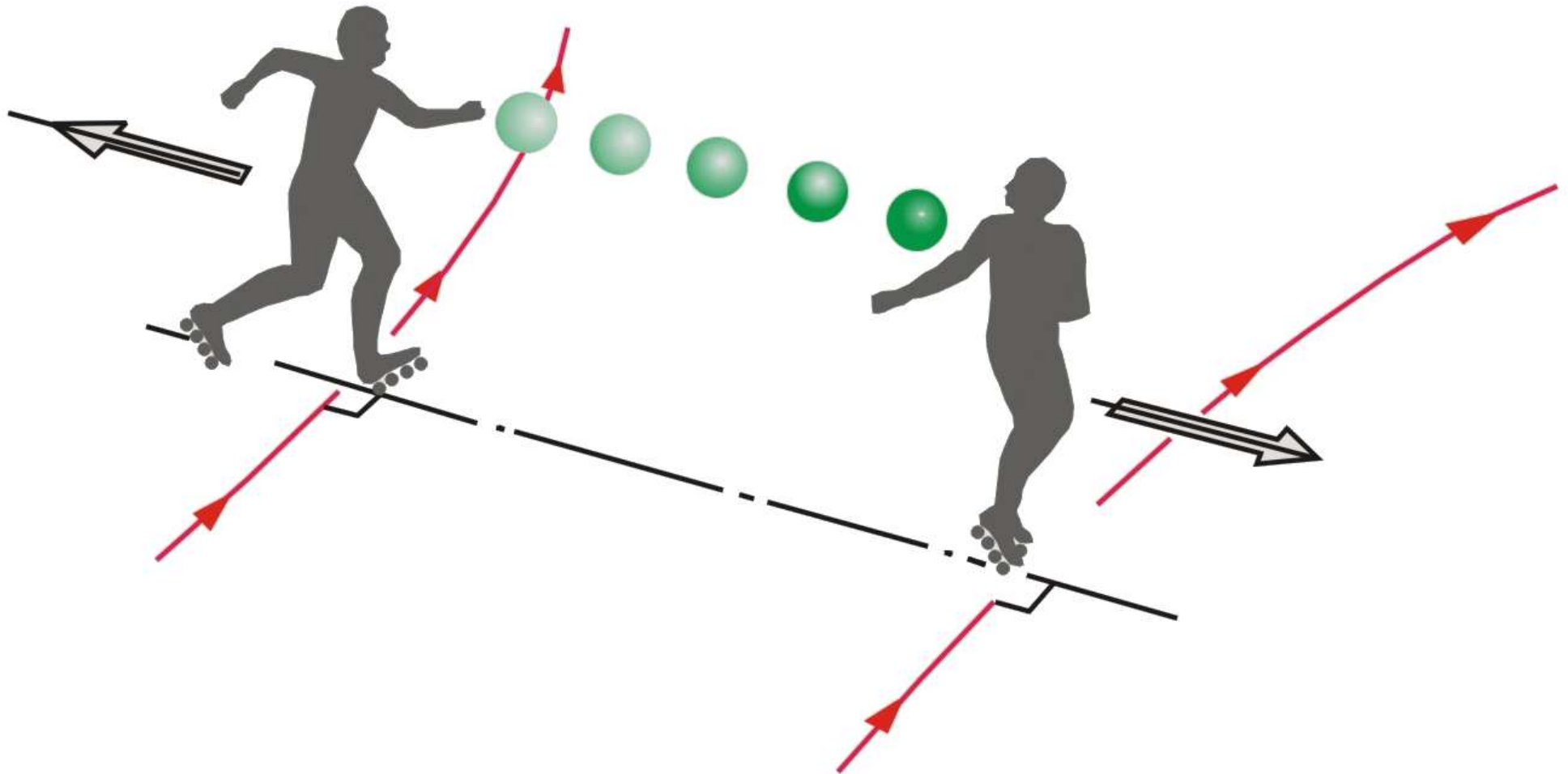
Energia w teorii względności :

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

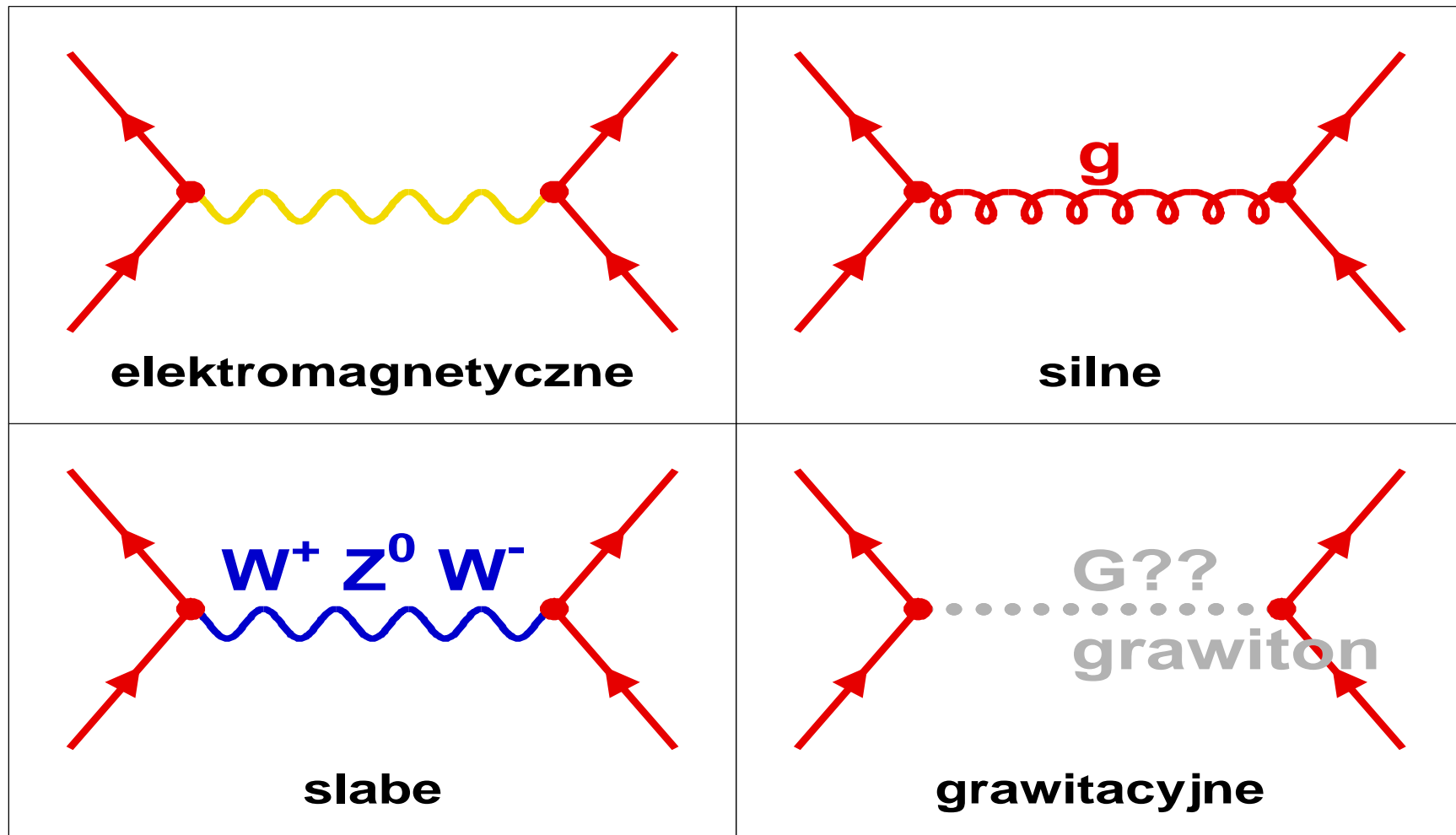
Zachowana jest tylko energia całkowita, -
energia kinetyczna może się zamieniać w masę, masa w energię kinetyczną

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

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 | W^\pm 80 GeV |
| | | pośredniczące" | 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

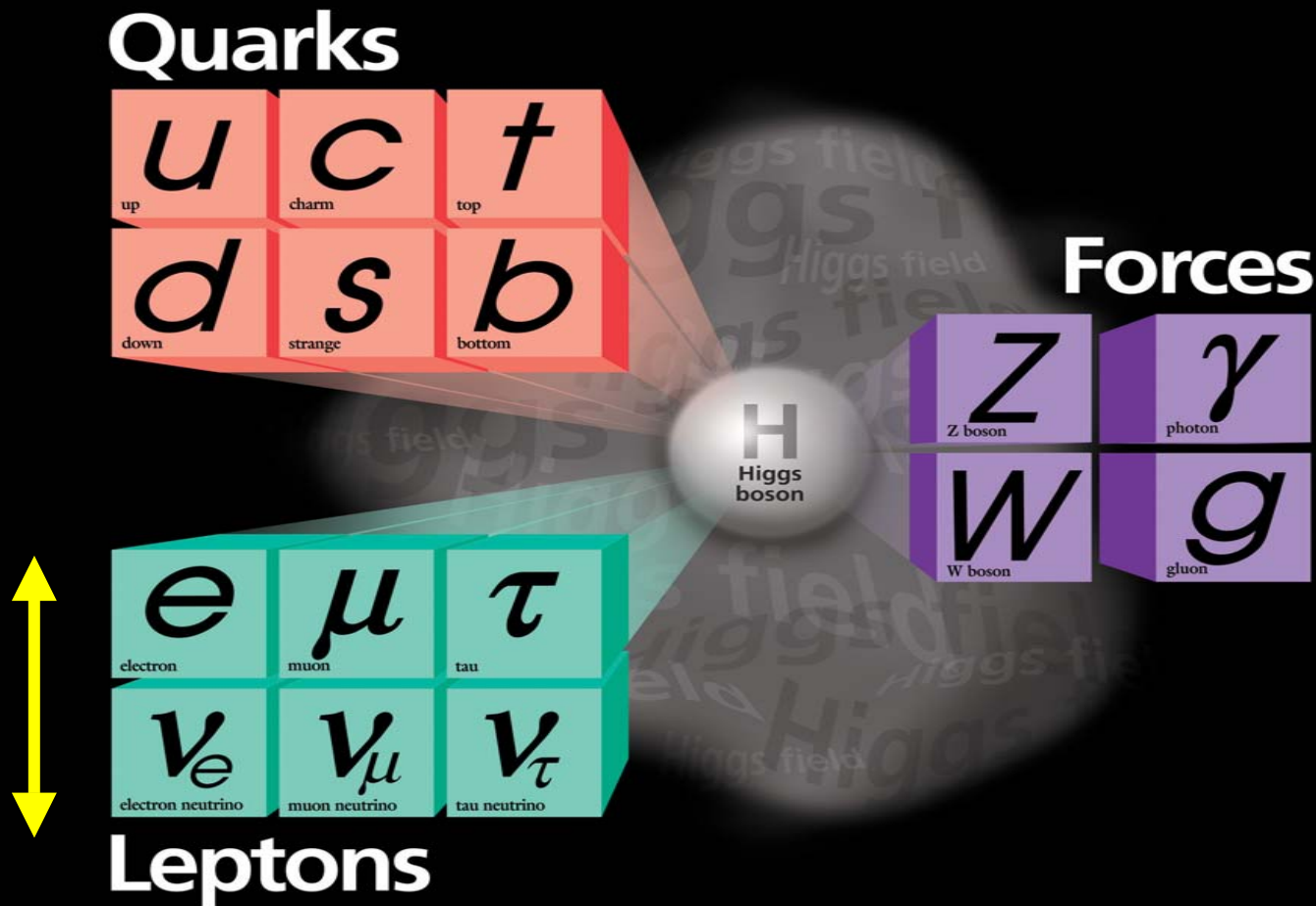
Budowa materii (stan obecny)

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)

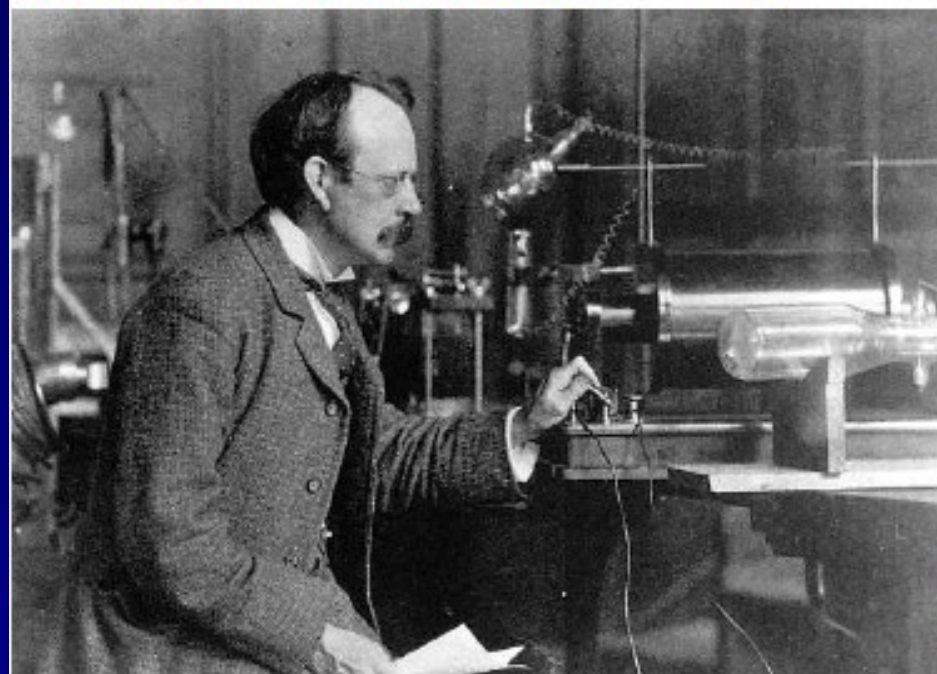
Cząstki fundamentalne w Modelu Standardowym



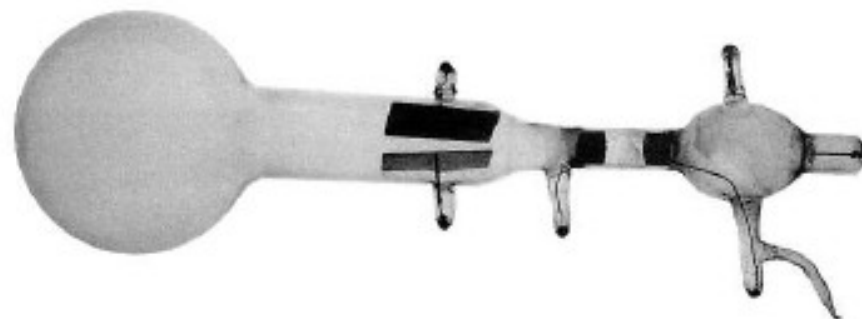
Odkrycia

Odkrycie elektronu

Joseph Thomson 1897



Thomson badał tzw. **promienie katodowe**



pokazał, że promienie te odchylają się w polu elektrycznym

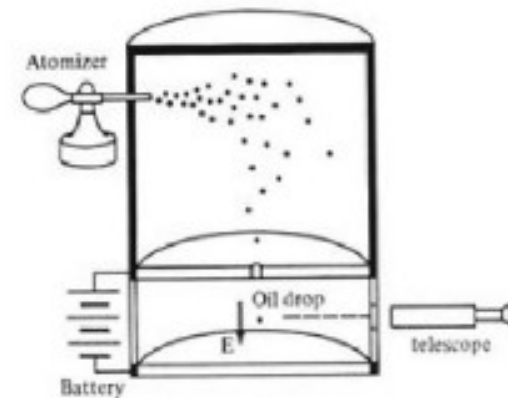
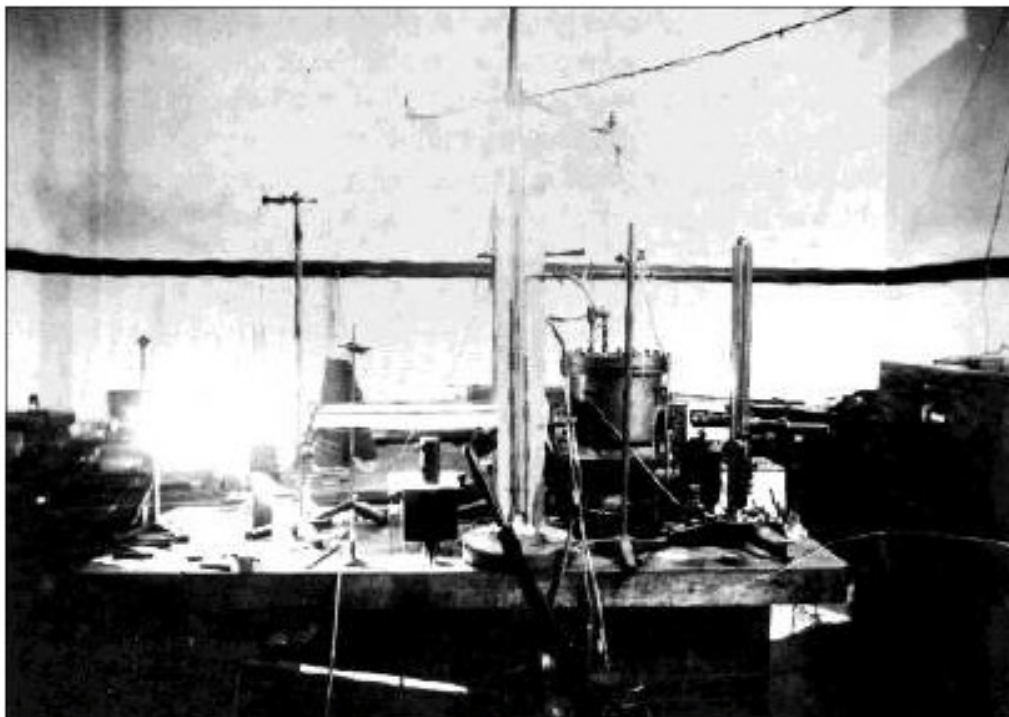
Wyznaczył stosunek ładunku do masy elektronu:

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

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

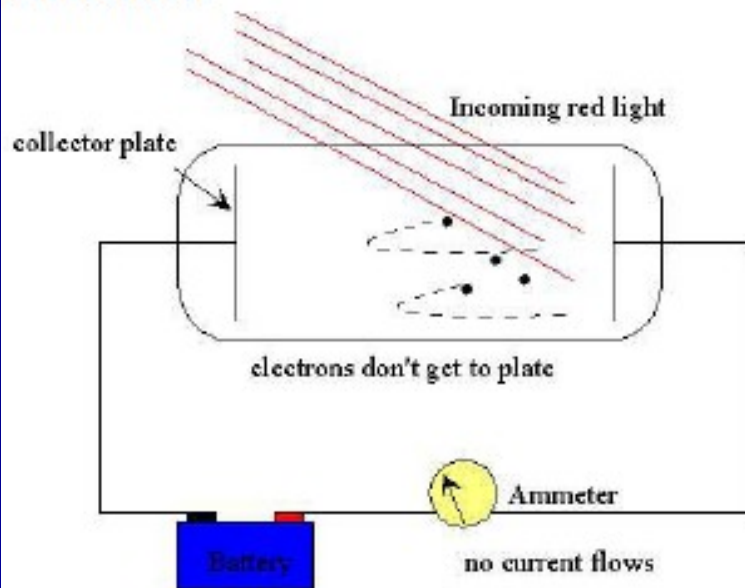
Efekt fotoelektryczny

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”).

Planck: dobry opis można uzyskać zakładając, że promieniowanie energii w paczkach (kwantach)

$$E = h \nu \quad (h - \text{stała}, \quad \nu - \text{częstotliwość})$$

(ale według samego Plancka „to tragedia”..).

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



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...

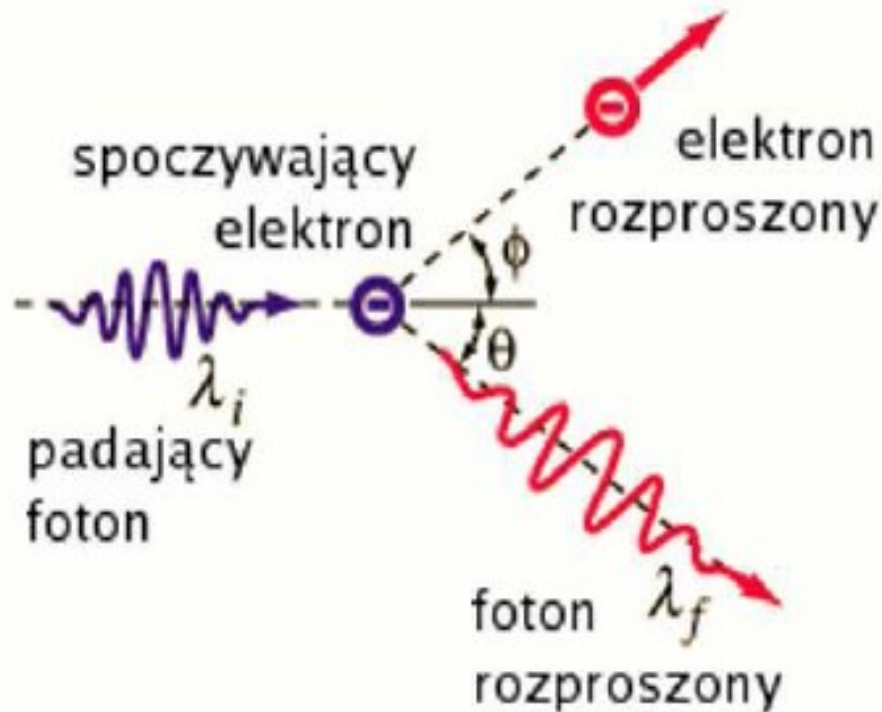
Light quanta - cząstki światła

- 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 $1 \hbar/2\pi$

Odkrycie fotonu

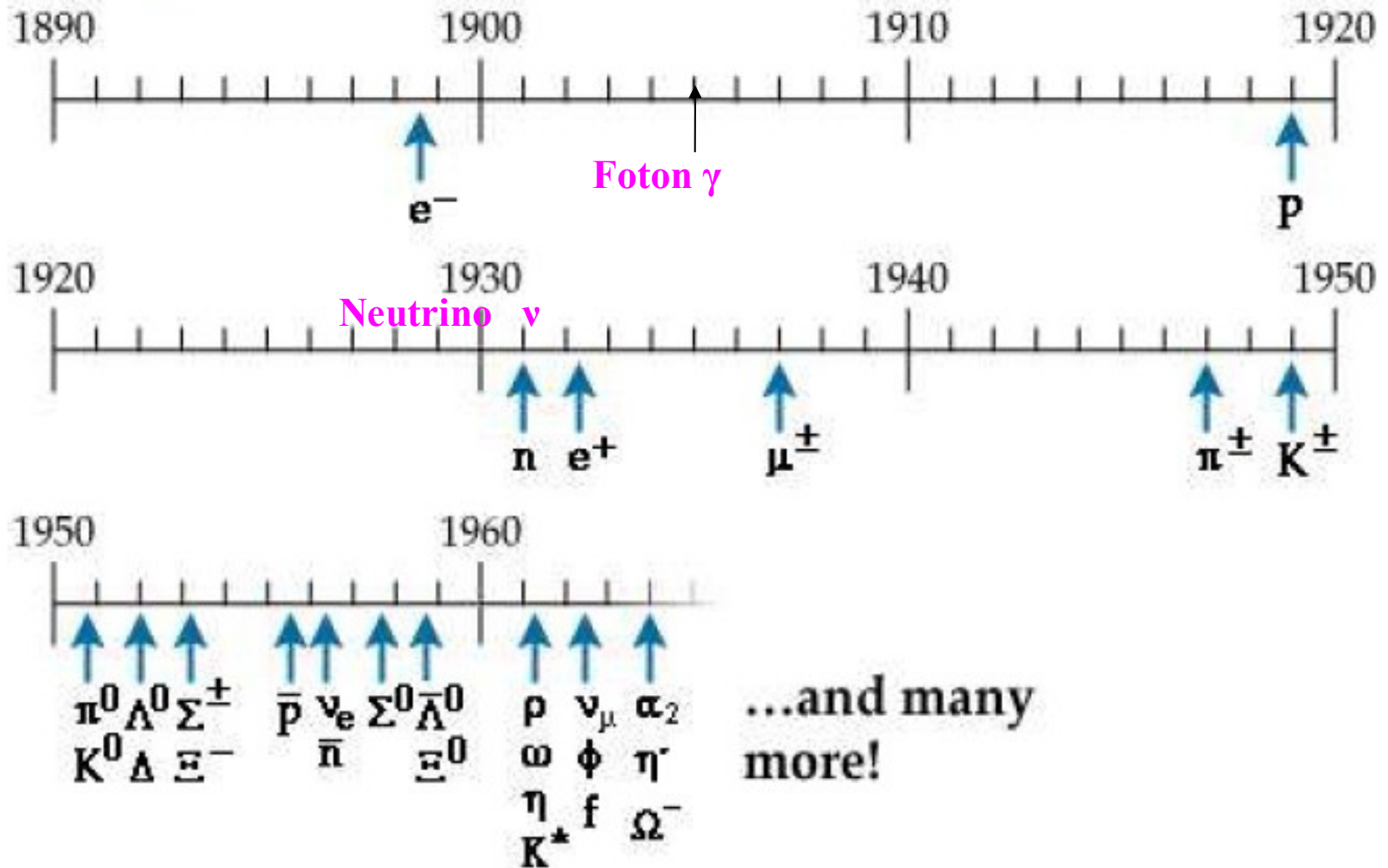
I znowu
doświadczenie

Arthur Compton 1923
Rozpraszanie fotonów na elektronach



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

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?