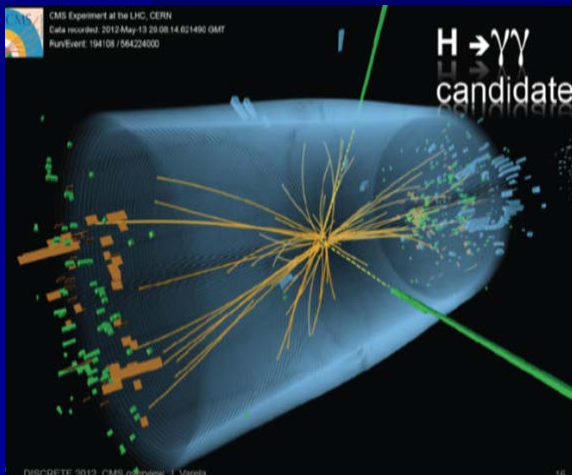


# Wszechświat cząstek elementarnych (dla humanistów)

Maria Krawczyk i A. Filip Żarnecki

Instytut Fizyki Teoretycznej Instytut Fizyki Doświadczalnej

Wydział Fizyki UW



Odkrycie cząstki Higgsa w CERN  
ogłoszone w dn. 4 lipca 2012

Nagroda Nobla 2013 dla  
F. Englerta i P. Higgsa

# LHC 4.07.2012

## Higgs-like particle with mass 125-126 GeV observed by 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)

26.06.1964

BROKEN SYMMETRIES, MASSLESS PARTICLES AND GAUGE FIELDS

P. W. HIGGS

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

Received 27 July 1964

27.07.1964

VOLUME 13, NUMBER 16

PHYSICAL REVIEW LETTERS

19 OCTOBER 1964

BROKEN SYMMETRIES AND THE MASSES OF GAUGE BOSONS

Peter W. Higgs

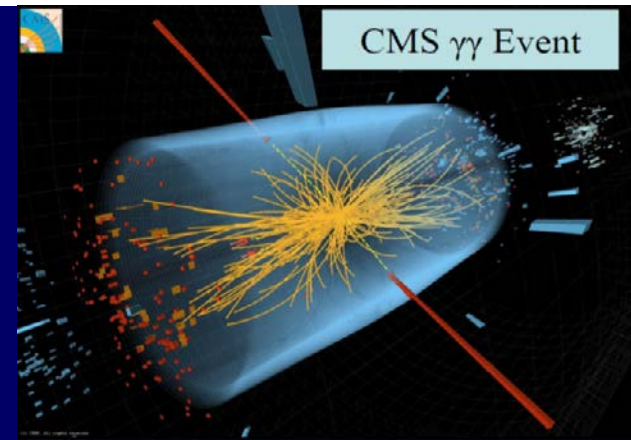
Tait Institute of Mathematical Physics, University of Edinburgh, Edinburgh, Scotland

(Received 31 August 1964)

GLOBAL CONSERVATION LAWS AND MASSLESS PARTICLES\*

G. S. Guralnik,<sup>†</sup> C. R. Hagen,<sup>‡</sup> and T. W. B. Kibble  
Department of Physics, Imperial College, London, England  
(Received 12 October 1964)

12.10.1964







BROWN

# 4th of July Fireworks

Slide 8 Greg Landsberg - Higgs Bosons in the SM and Beyond - EPS 2013







# More than 20 years of continuous work...



P. Conde Muño

Higgs Searches at ATLAS



# On behalf of the CMS Collaboration





2013 NOBEL PRIZE IN PHYSICS

# François Englert Peter W. Higgs



© © The Nobel Foundation, Photo: Lovisa Engblom.

The Nobel Prize in Physics 2013

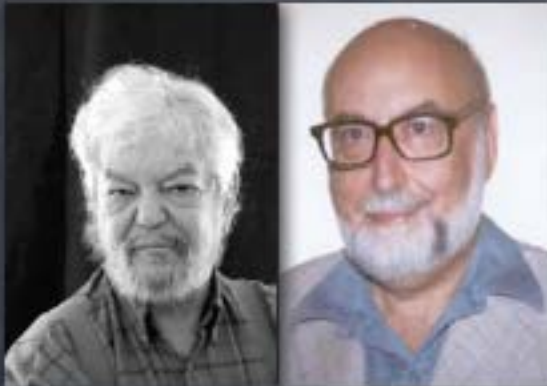
François Englert and Peter W. Higgs

"for the theoretical discovery of a mechanism that contributes to our understanding of the origin of mass of subatomic particles, and which recently was confirmed through the discovery of the predicted fundamental particle, by the ATLAS and CMS experiments at CERN's Large Hadron Collider"

październik 2013

# 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)



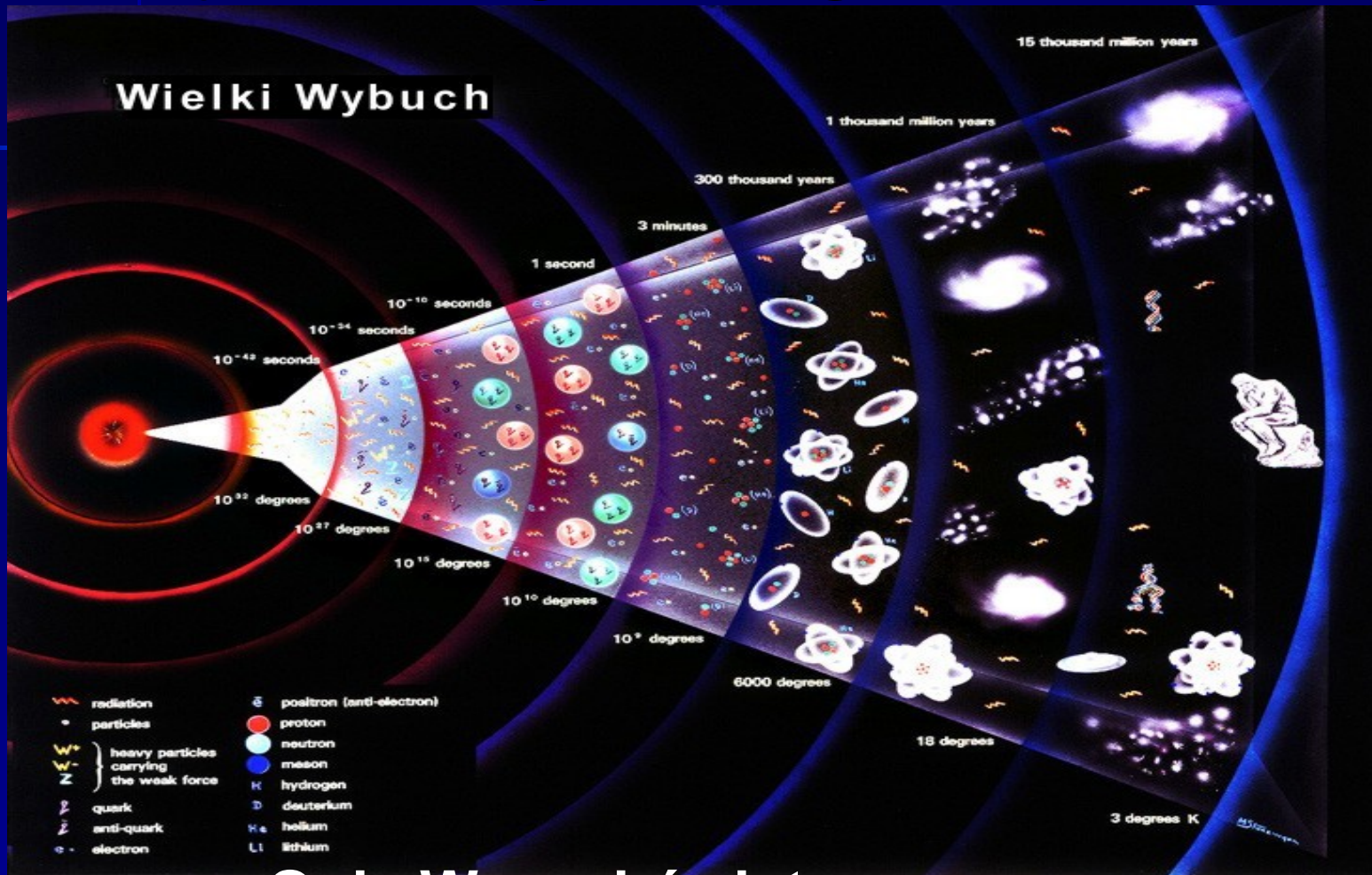
Nambu, Nobel 2008

Za wprowadzenie SSB do fizyki cząstek elementarnych





# Skąd ten tytuł wykładu?



Opis Wszechświata  
nie jest możliwy bez zrozumienia  
oddziaływań cząstek elementarnych.



# Warunki zaliczenia / zaliczenie na ocenę:

---

1. obecność na wykładach obowiązkowa  
*dopuszczona jest 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 – 7 czerwca 2014 r (godz. 11-14, sala SDD)

# 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)

# 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:  $1 \text{ AU} = 1.5 * 10^{11} \text{ m}$  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	<b>k</b>	<b>M</b>	<b>G</b>	<b>T</b>	.....	$10^{24}$
$10^1$	$10^2$	$10^3$	$10^6$	$10^9$	$10^{12}$		

Małe liczby

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

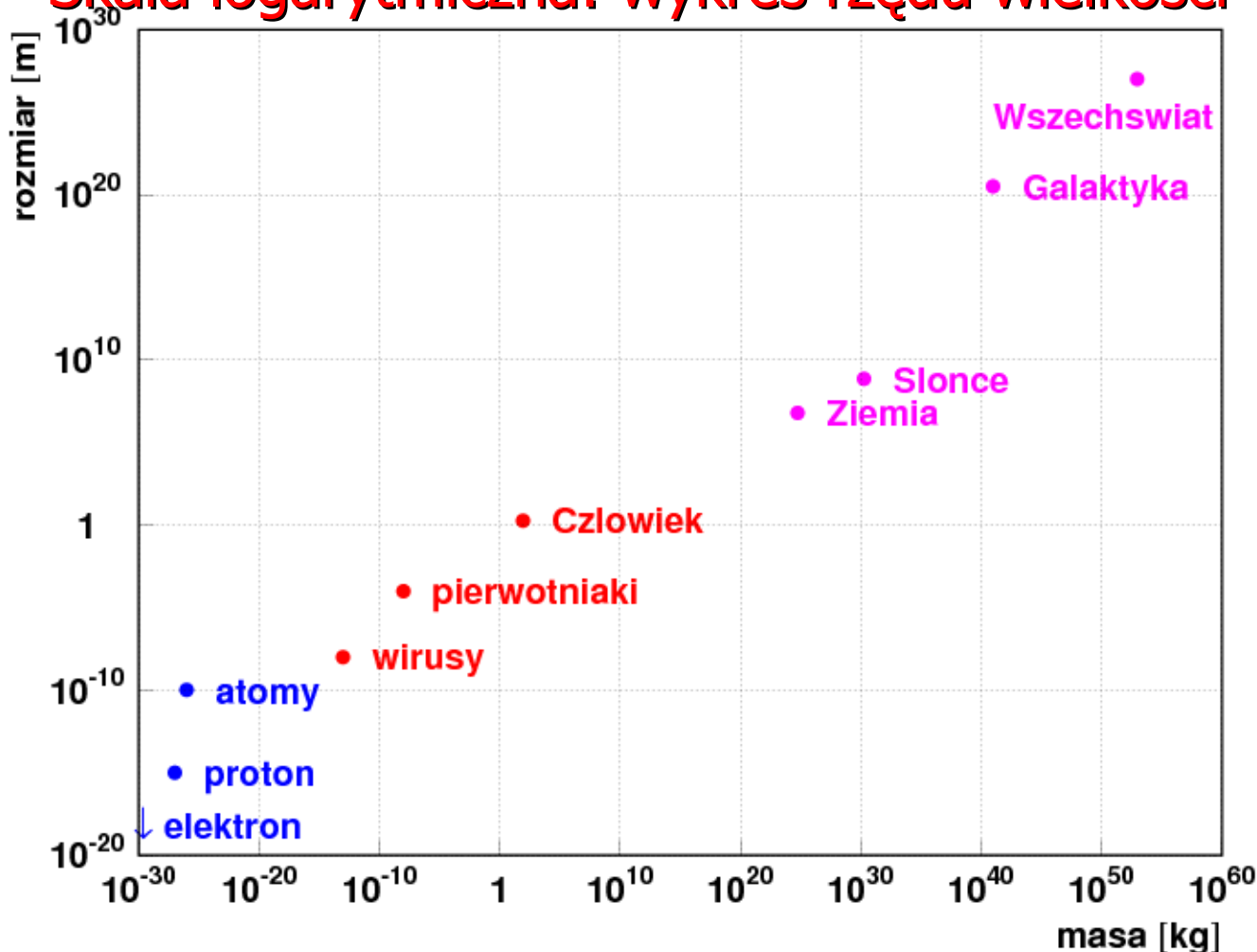
d	c	m	$\mu$	n	p	<b>f</b>	.....	$10^{-24}$
$10^{-1}$	$10^{-2}$	$10^{-3}$	$10^{-6}$	$10^{-9}$	$10^{-12}$	$10^{-15}$		

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



Physique des Particules

Cosmologie

Physique Nucleaire

Astrophysique

Physique du Solide

Astronomie

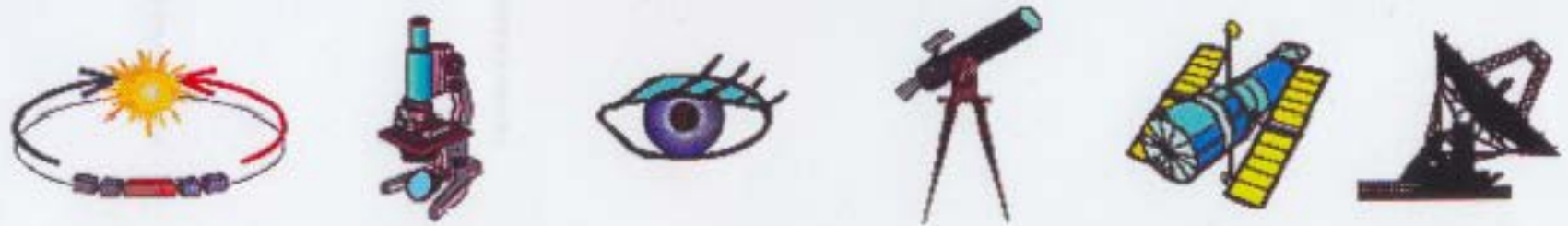
# Materia i Wszechświat



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



fm pm nm  $\mu$ m mm m km Mm Gm Tm Pm Em



← atto, zepto, yocto

peta, exa, zetta, yotta



# 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

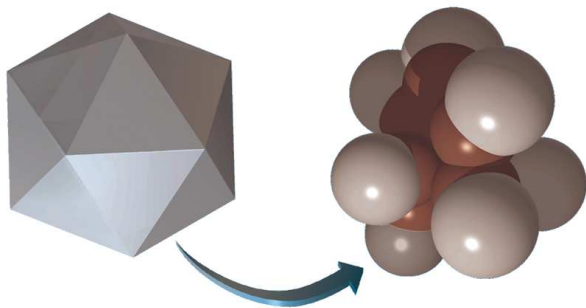
(doświadczenie Rutherforda w 1911 r) nukleony

- Jądra = stany związane protonów i neutronów



## Budowa materii

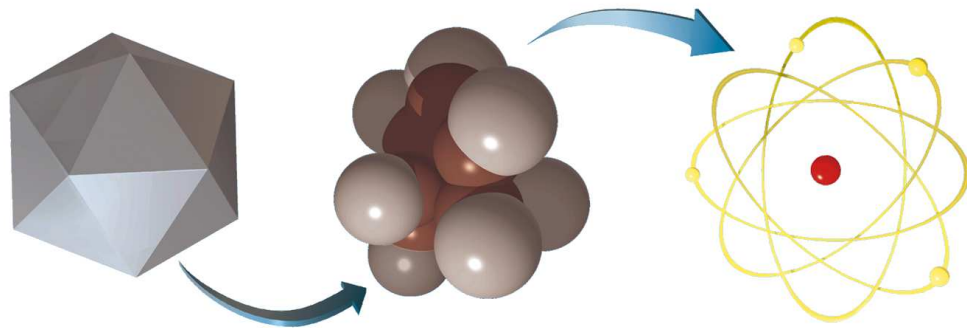
Cząsteczka



$10^{-9}$  m

# Budowa materii

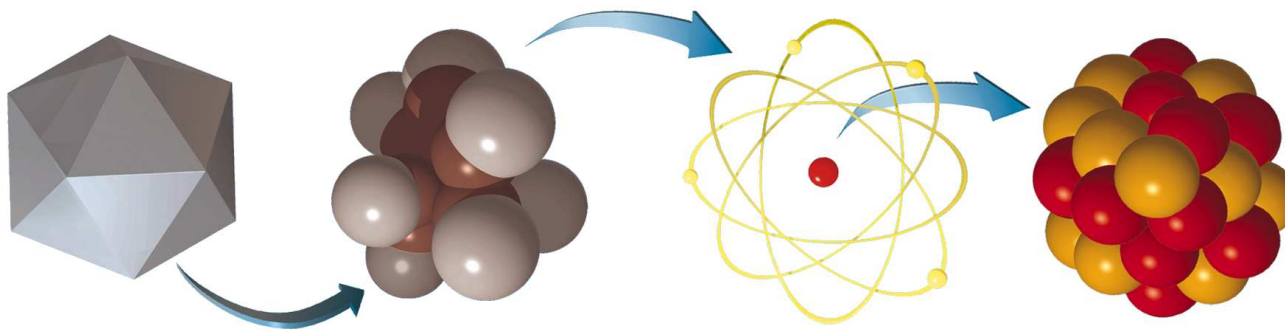
Atom



$10^{-10}$  m

# Budowa materii

Jądro atomowe

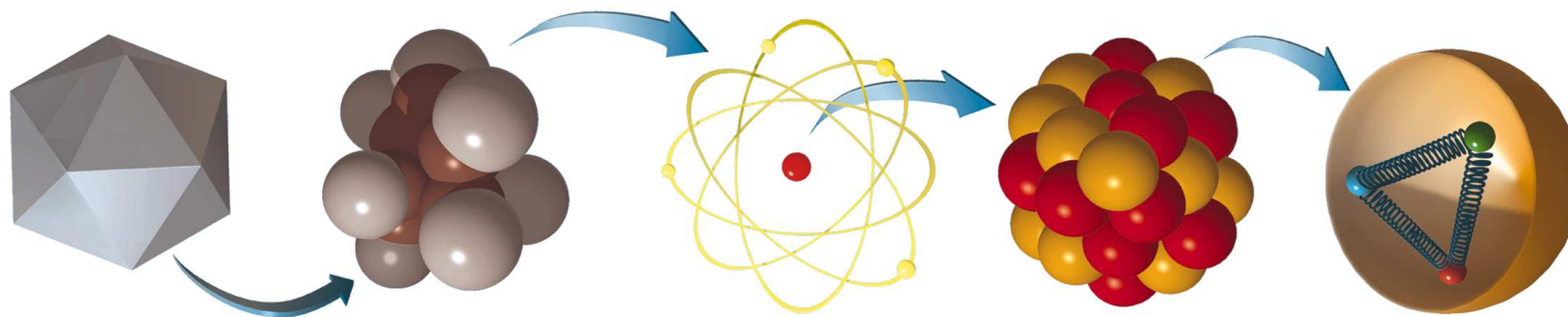


$10^{-14}$  m



# Budowa materii

Nukleony



$10^{-15}$  m

# Zoo cząstek elementarnych

Definicja: cząstka elementarna to

'obserwowany' 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

# 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

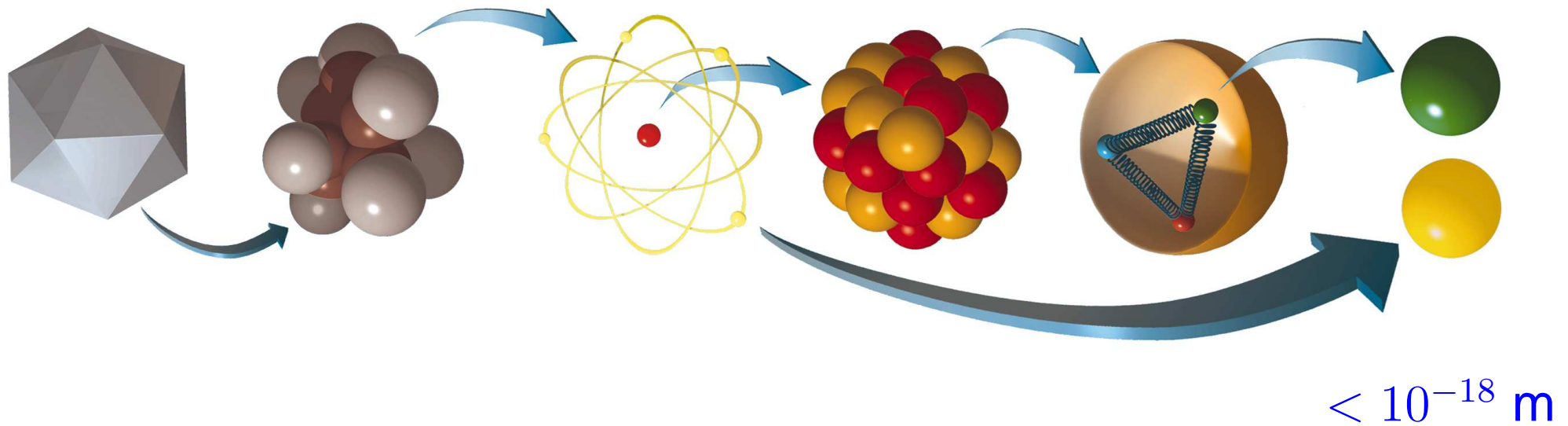
Deuter D = pn + e - ciężki wodór (→ ciężka woda)

Tryt T = pnn + e

Hel He = ppnn + ee (→ ppnn = cząstka alfa  $\alpha$ )

**Fizyka jądrowa → badanie jąder atomowych**

# Budowa materii



Kwarki i  
elektrony

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



# 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  
- P. Dirac' 1928 (*mylnie uważał proton za antycząstkę do elektronu, choć kłopot z masami..*)

- Cząstka i antycząstka mogą oddziaływać b. gwałtownie – zniknąć (anihilacja) i pojawiać się w parach (kreacja)

- Cząstka może być swoją antycząstką

- We Wszechświecie nadwyżka materii nad antymateria!

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

# 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

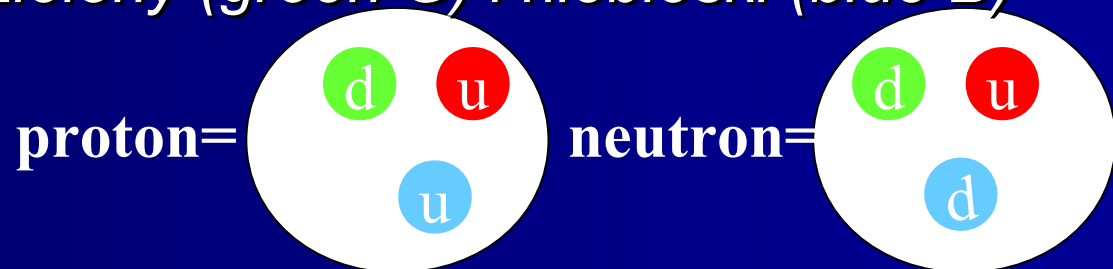
Cząstki przenoszące oddziaływania fundamentalne – to też cząstki fundamentalne

# 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) )

## 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

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

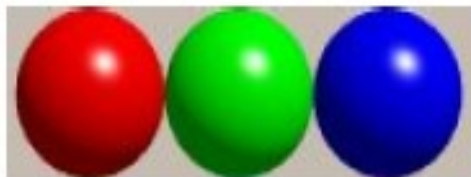
- W mechanice kwantowej -> zasada nieoznaczoności Heisenberga → większa energia umożliwia dotarcie do coraz mniejszych struktur
- Teoria względności → relacja  $E = mc^2$  → większa energia umożliwia produkcję nowych bardziej masywnych cząstek

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



# Kolor

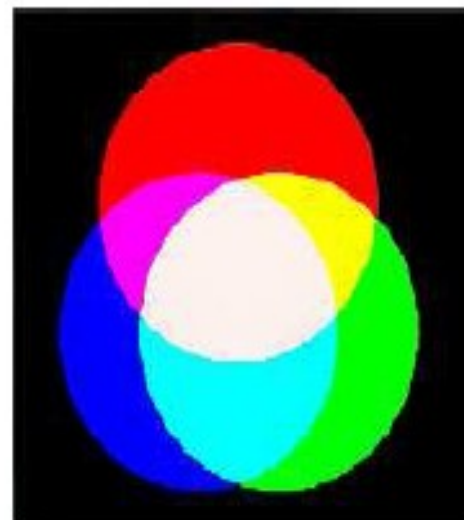
Każdy z kwarków obdarzony jest ładunkiem kolorowym:  $R$ ,  $G$  lub  $B$ .



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"):



$$R + G + B = 0$$

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

# 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

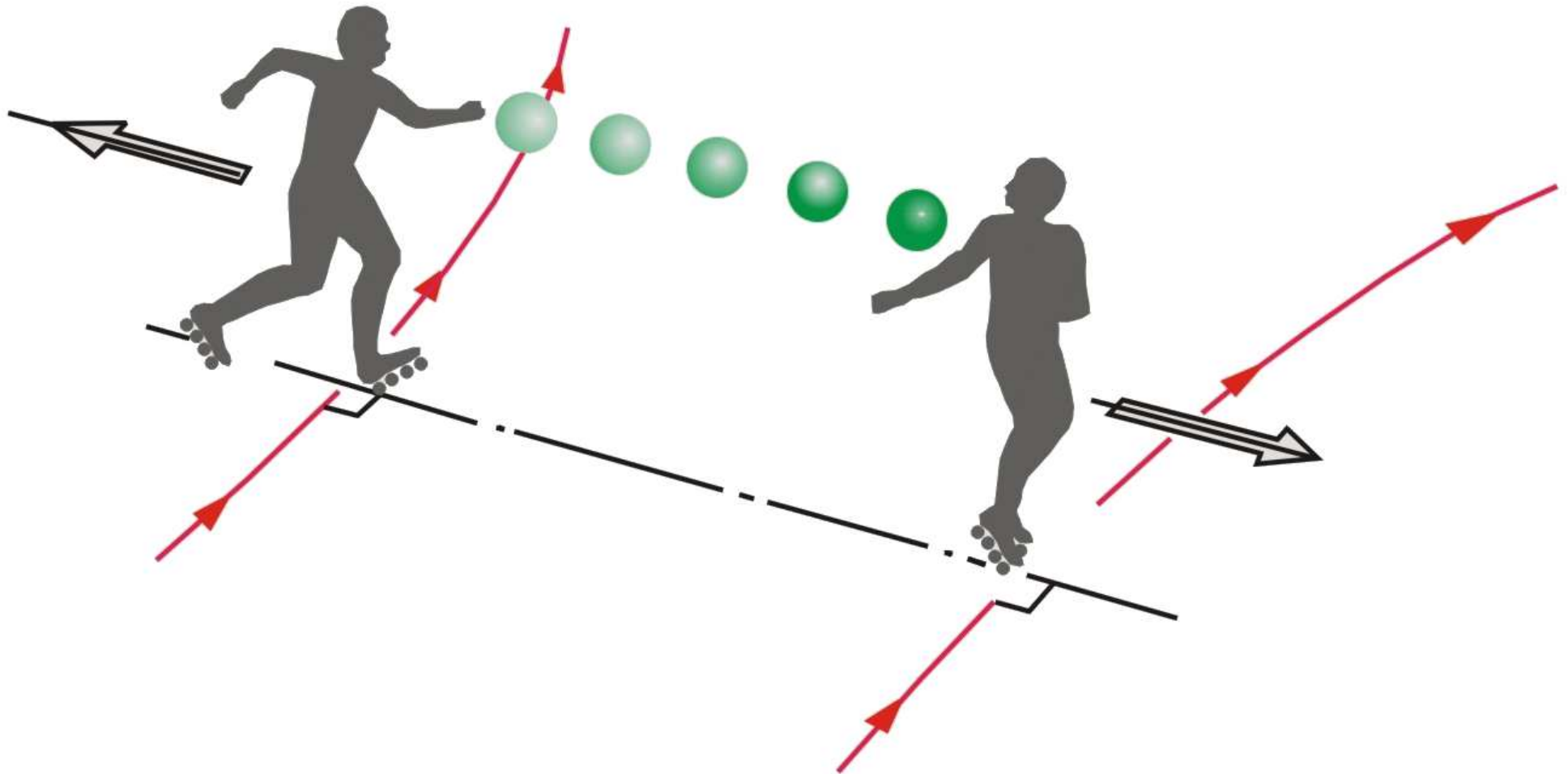
Energia w teorii względności :

- 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

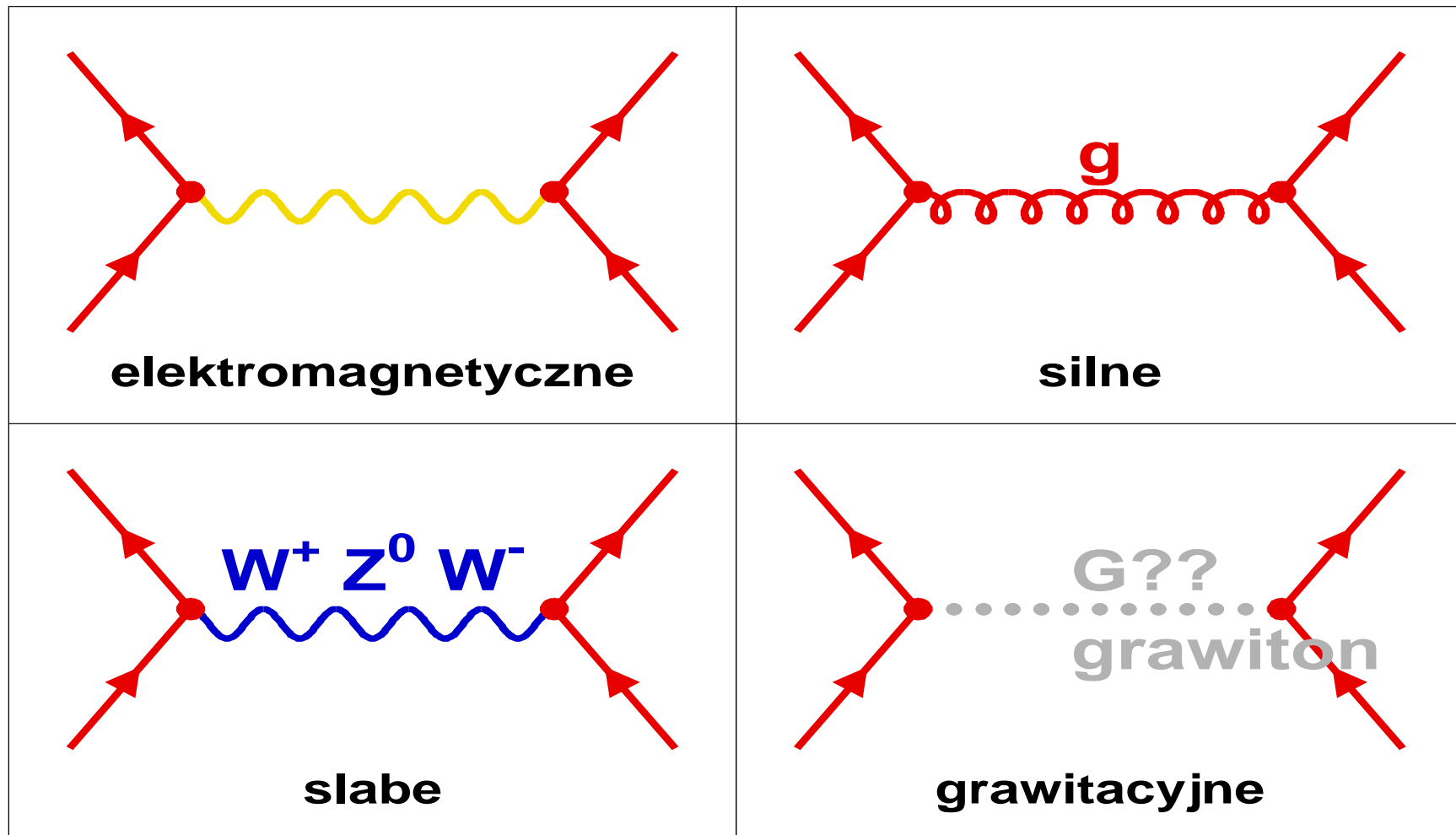
⇒ Dzięki temu możemy produkować nowe cząstki i badać ich własności!

**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	$\gamma$ 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

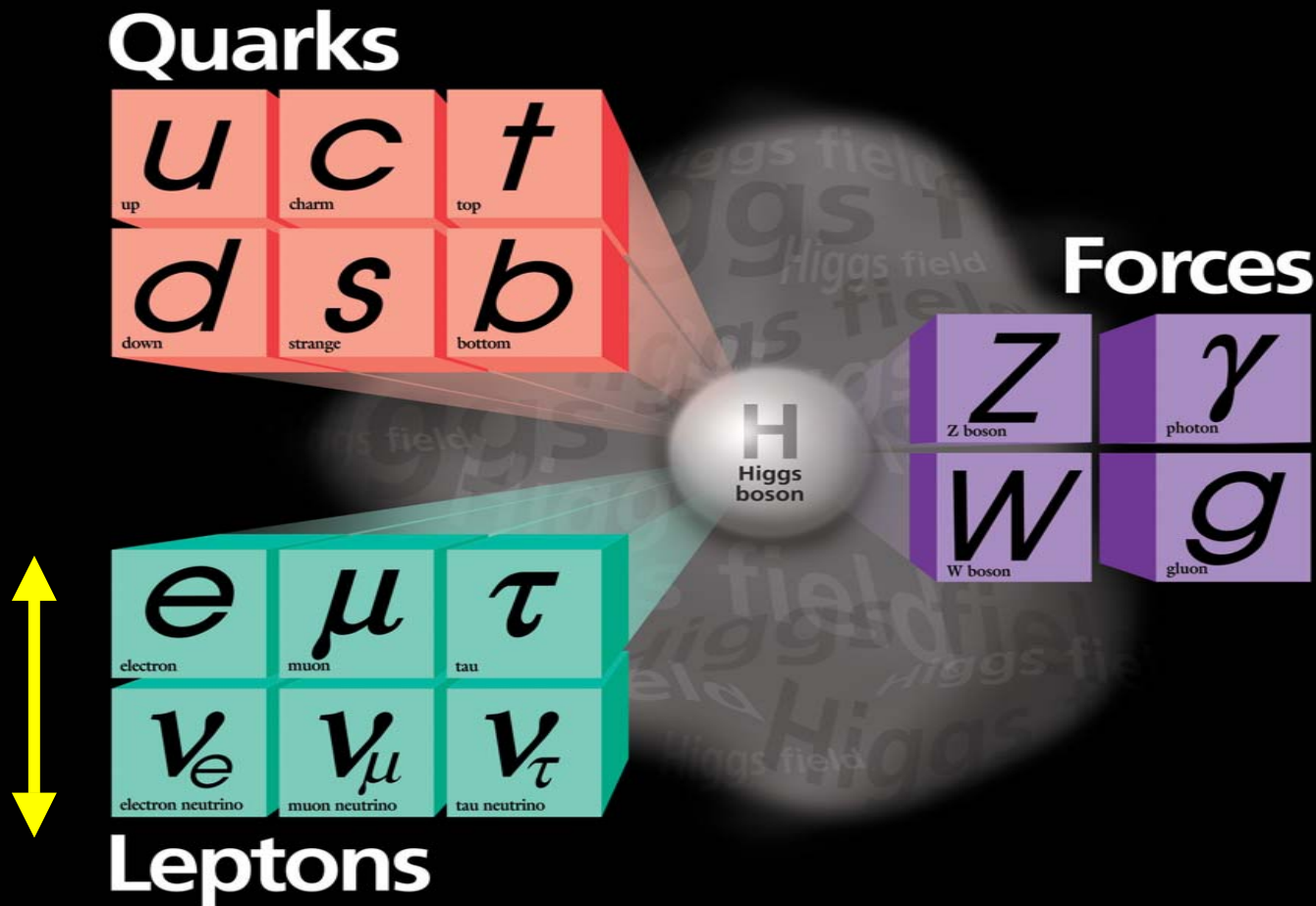
## **Budowa materii (stan obecny)**

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

	leptony		kwarki	
<b>pokolenie 1</b>	$e$ <i>elektron</i>	$\nu_e$ <i>neutrino el.</i>	$d$ <i>down</i>	$u$ <i>up</i>
<b>pokolenie 2</b>	$\mu$ <i>mion</i>	$\nu_\mu$ <i>neutrino mionowe</i>	$s$ <i>strange</i>	$c$ <i>charm</i>
<b>pokolenie 3</b>	$\tau$ <i>taon</i>	$\nu_\tau$ <i>neutrino taonowe</i>	$b$ <i>beauty</i> <i>(bottom)</i>	$t$ <i>top</i> <i>(truth)</i>
<b>ładunek [e]</b>	-1	0	-1/3	+2/3

+ **anty-fermiony** (kolejnych 12)

# Cząstki fundamentalne w Modelu Standardowym





# Elektryczność i magnetyzm lata 60-e XIXw - opis J. Maxwella

Oddziaływania magnetyczne  
i elektryczne – wspólny opis

*-> pole elektromagnetyczne*

Siły te nie działają natychmiastowo-

Pole rozchodzi się z prędkością b. dużą

- prędkością światła

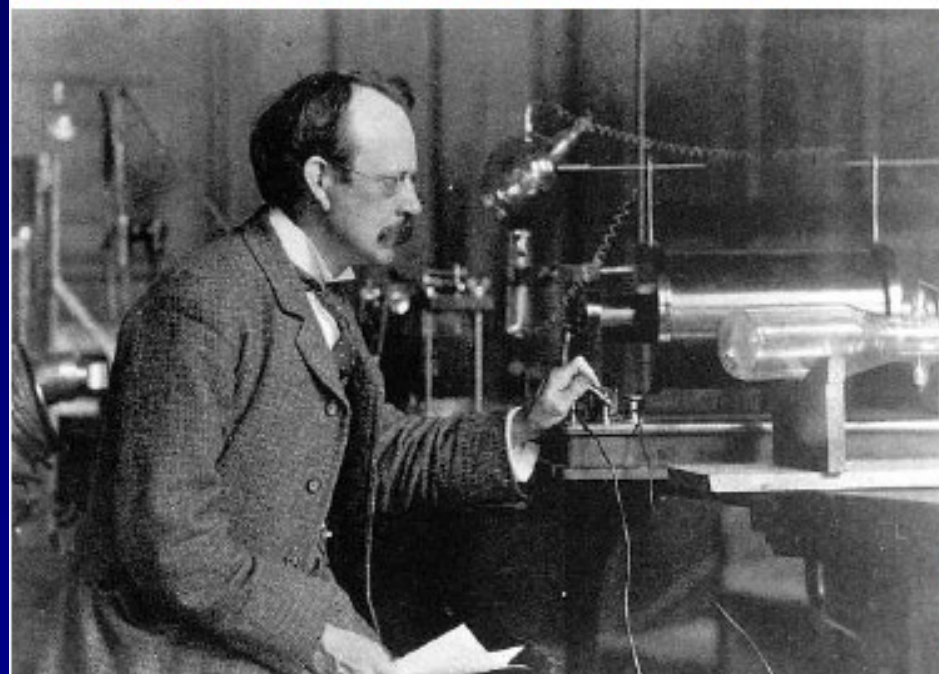
*Bo wg. Maxwella to jest światło!*

Światło jako fala elektromagnetyczna

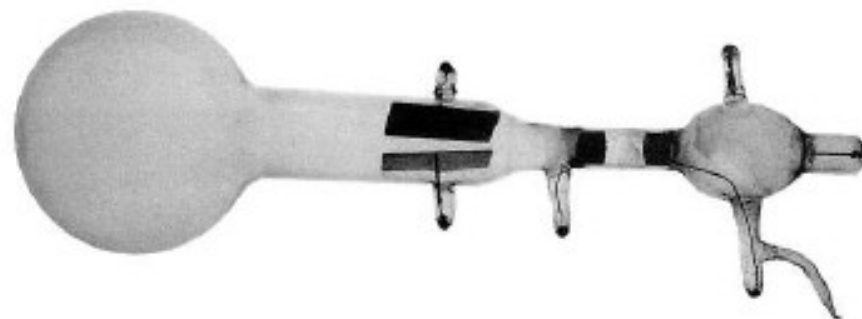
Odkrycia

# Odkrycie elektronu

**Joseph Thomson** 1897



Thomson badał tzw. **promienie katodowe**



pokazał, że promienie te odchylają się w polu elektrycznym

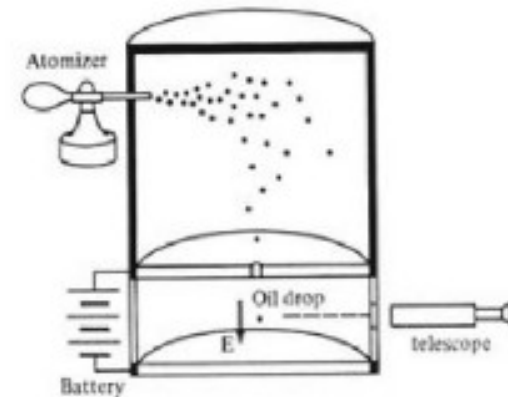
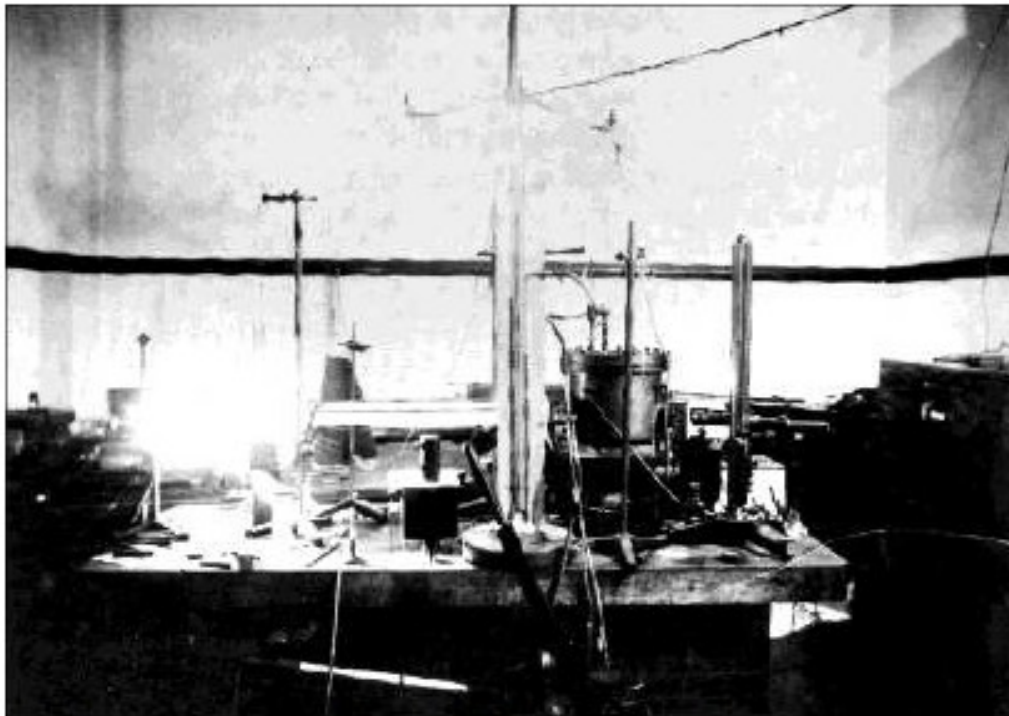
Wyznaczył stosunek ładunku do masy elektronu:

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

# 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

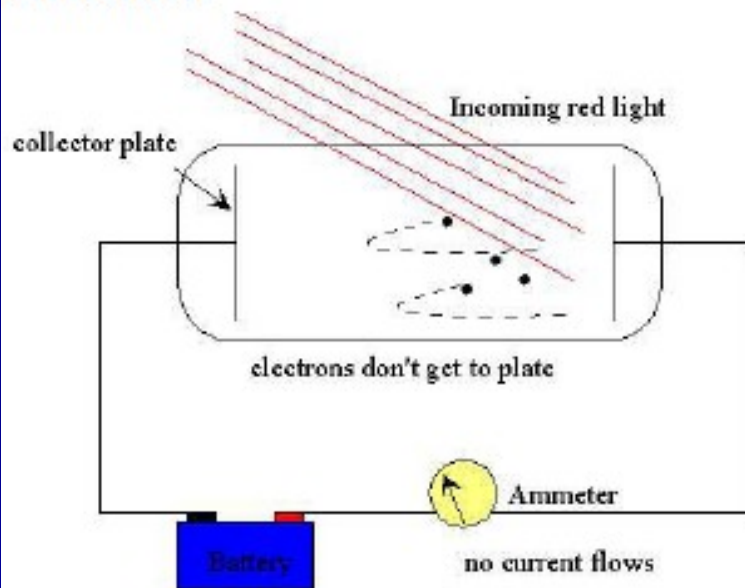
## Efekt fotoelektryczny

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  $E_{\gamma}$  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...

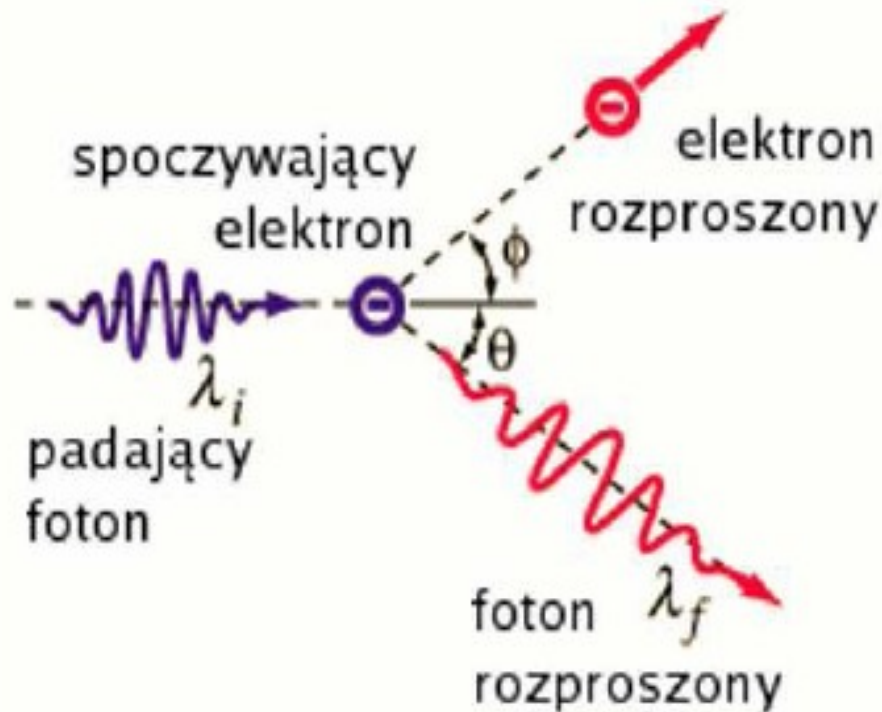
- Bohr - uważał "kwantowość " za własność atomów nie promieniowania (wolał zrezygnować z zachowania energii i pędu..)

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

# Odkrycie fotonu

I znowu  
doświadczenie

**Arthur Compton** 1923  
Rozpraszanie fotonów na elektronach



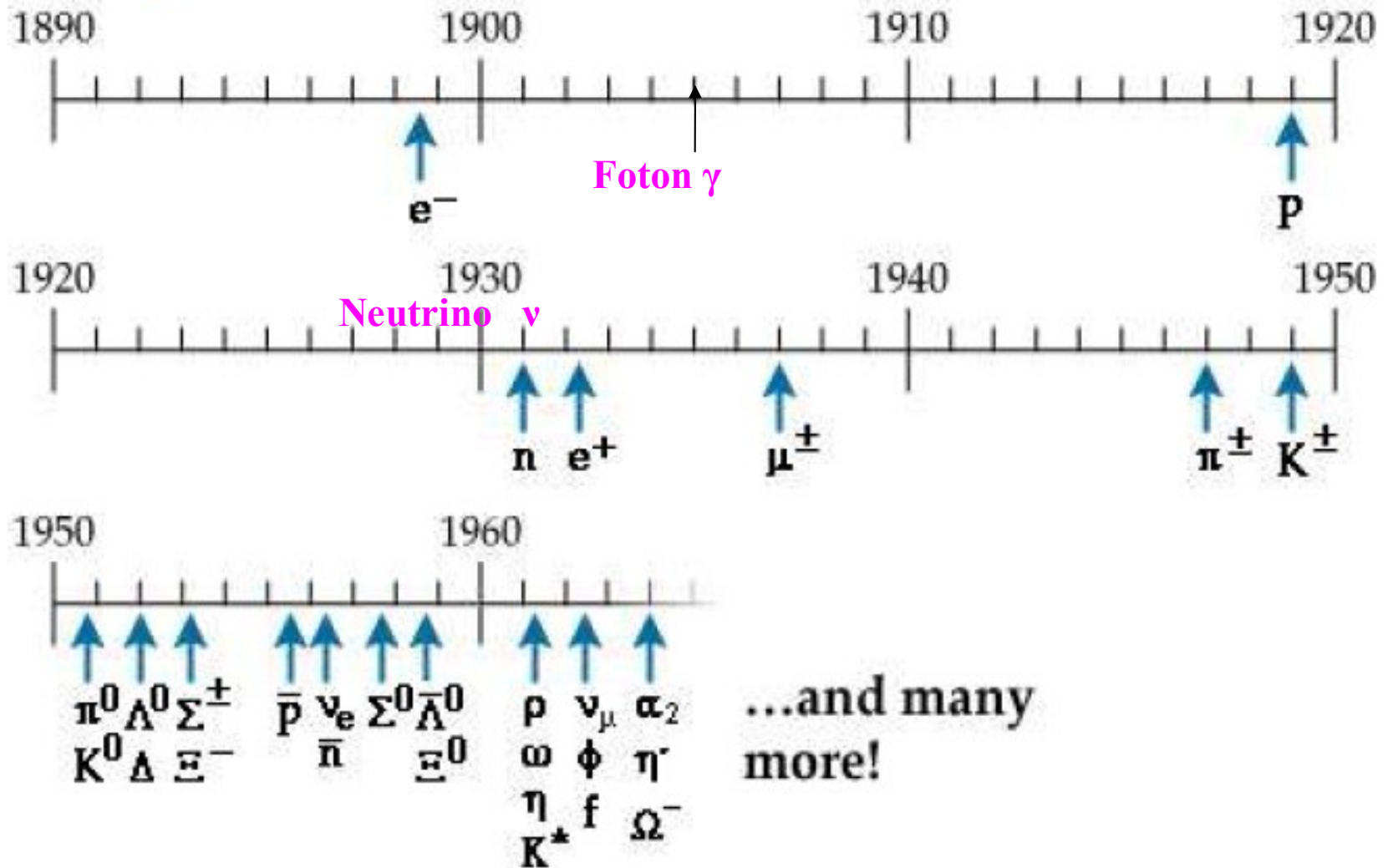
Compton pokazał, że fotony niosą nie tylko **energię**, ale i **pęd**  
⇒ zachowują się jak **cząstki**

## Light quanta - cząstki światła

- 1900 - Planck → kwant energii promieniowania elektromagnetycznego  $E = h\nu$  (nagroda Nobla - 1918 )
- 1905 - Einstein → kwant światła ( $\gamma$ ) - 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 właściwości związanych z momentem pędu - spinem; foton - spin  $1 \hbar/2\pi$



# 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?