

Wszechświat Cząstek Elementarnych dla Humanistów

Wprowadzenie

Aleksander Filip Żarnecki

Wykład ogólnouniwersytecki



12 lipca 2021

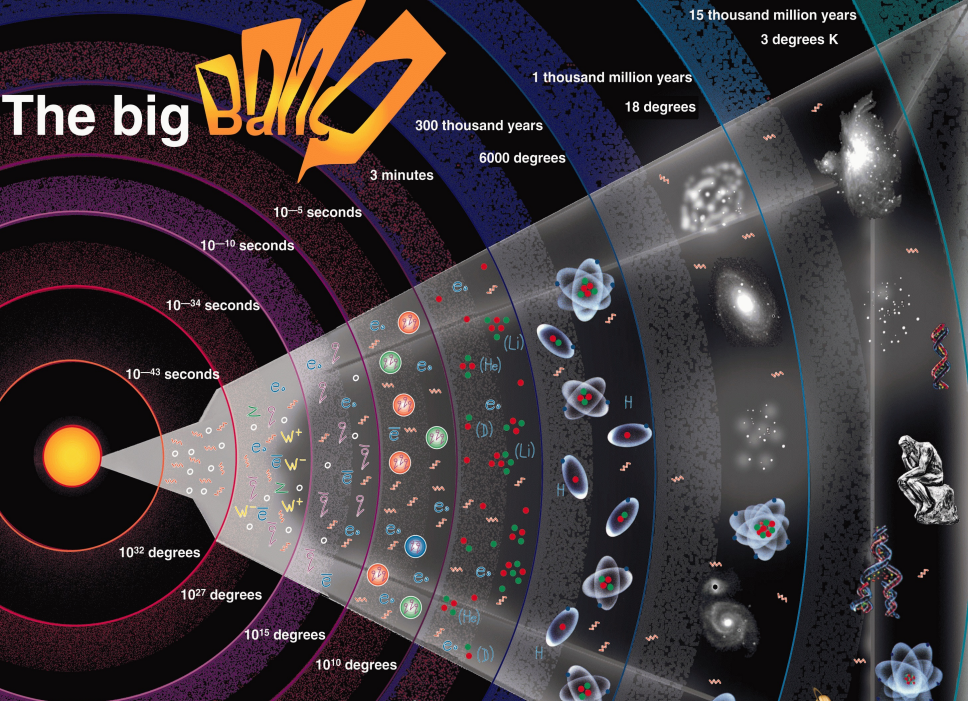
Cel wykładu

Wykład poświęcony będzie (w przeważającej części) zjawiskom, które zachodzą na poziomie subatomowym: **cząstkom elementarnym** i ich **oddziaływaniom**.

Jest to świat zupełnie różny od tego (makroskopowego), który nas otacza. Rządzi się odmiennymi prawami...

Celem wykładu będzie przybliżenie tej dziedziny: **własności cząstek fundamentalnych i elementarnych**, opisowi (jakościowemu) ich **oddziaływań**, a także roli jaką oddziaływanie te miały w **powstaniu i ewolucji Wszechświata**.

The big Bang



Zasady prowadzenia wykładu

Wykład prowadzony zdalnie za pośrednictwem platformy Kampus:

<https://kampus-student2.ckc.uw.edu.pl/course/view.php?id=7346>

Obecność na wykładach jest obowiązkowa.

Po każdym wykładzie powinni Państwo rozwiązać krótki test (5 pytań), który będzie jednocześnie pełnił rolę **listy obecności**.

Materiały z wykładu będą również umieszczane na stronie:

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

dostępne są też materiały z lat ubiegłych (linki na dole strony).

oba linki można też znaleźć na stronie USOS przedmiotu

W tej “edycji” wykładu przewidziane jest **13 wykładów**:

codziennie (w dni robocze) **od 12 do 28 lipca 2021**, od 10:15 do 11:45.

Warunki zaliczenia

- Obecność na wykładzie
dopuszczone 2 nieobecności, **każda kolejna obniża ocenę**
- 50% punktów z testów pisemnych:
 - Testy wykładowe: wchodzi z wagą 0.5
 - Test końcowy na platformie Kampus
90 minut, 30 pytań wielokrotnego wyboru
cztery odpowiedzi, **dokładnie jedna poprawna**
przykładowe pytania będą udostępnione na stronie wykładu

Test końcowy, również na platformie Kampus:

30 lipca 2021 (piątek), godz. 10:15-11:45 (w godzinach wykładu)

Osoby, które nie mogą podejść do egzaminu w tym terminie proszę o kontakt.

- 1 Fizyka przełomu XIX i XX wieku
- 2 Skale w fizyce
- 3 Granice stosowalności fizyki klasycznej
- 4 Szczególna Teoria Względności

- 1 Fizyka przełomu XIX i XX wieku
- 2 Skale w fizyce
- 3 Granice stosowalności fizyki klasycznej
- 4 Szczególna Teoria Względności

Fizyka klasyczna

Pod koniec XIX wieku fizyka wydawało się, że badania podstawowe w dziedzinie fizyki zmierzają ku końcowi. Praktycznie wszystkie obserwowane zjawiska mogły być wytłumaczone w oparciu o niewielką liczbę fundamentalnych praw

Fizyka klasyczna

Pod koniec XIX wieku fizyka wydawało się, że badania podstawowe w dziedzinie fizyki zmierzają ku końcowi. Praktycznie wszystkie obserwowane zjawiska mogły być wytłumaczone w oparciu o niewielką liczbę **fundamentalnych praw**

Prawa dynamiki Newtona (1687)

- *Każde ciało trwa w swym stanie spoczynku lub ruchu prostoliniowego i jednostajnego, jeśli siły przyłożone nie zmuszają ciała do zmiany tego stanu (pojęcie bezwładności \Rightarrow masa)*
- *Zmiana ruchu jest proporcjonalna do przyłożonej siły poruszającej i odbywa się w kierunku prostej, wzdłuż której siła jest przyłożona. (pojęcie siły)*
- *Każdemu działaniu towarzyszy równe i przeciwnie skierowane przeciwdziałanie.*

\Rightarrow **bardzo dobrze opisują otaczający nas świat !**

Grawitacja jest najbardziej “widocznym” oddziaływaniem. Mimo to stosunkowo długo brak było spójnej teorii grawitacji. Dopiero Newton dostrzegł związek między np. ruchem planet i lotem kuli armatniej.

Prawo powszechnego ciążenia

Newton pokazał także, że **każde ciało** we Wszechświecie przyciąga każde inne ciało siłą zależną od **ich mas** i **odległości** między nimi. Podał bardzo prosty wzór:

$$F_g = G_N \cdot \frac{m_1 m_2}{r^2} \quad G_N \approx 6.67 \cdot 10^{-11} \frac{\text{m}^3}{\text{kg s}^2}$$

Nie widzimy oddziaływania między dwoma jabłkami, bo grawitacja zbyt słaba...

Grawitacja jest najbardziej “widocznym” oddziaływaniem. Mimo to stosunkowo długo brak było spójnej teorii grawitacji. Dopiero Newton dostrzegł związek między np. ruchem planet i lotem kuli armatniej.

Prawo powszechnego ciążenia

Newton pokazał także, że **każde ciało** we Wszechświecie przyciąga każde inne ciało siłą zależną od **ich mas** i **odległości** między nimi. Podał bardzo prosty wzór:

$$F_g = G_N \cdot \frac{m_1 m_2}{r^2} \quad G_N \approx 6.67 \cdot 10^{-11} \frac{\text{m}^3}{\text{kg s}^2}$$

Nie widzimy oddziaływania między dwoma jabłkami, bo grawitacja zbyt słaba...

Piękno i uniwersalność praw natury \Rightarrow analogiczny wzór opisuje oddziaływanie ładunków elektrycznych (**prawo Coulomba**):

$$F_{el} = k \cdot \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

Budowa materii

W chemii, dzięki pracom Daltona i Avogadro, ugruntowało się pojęcie atomu jako **najmniejszej, niepodzielnej drobiny** pierwiastka chemicznego.

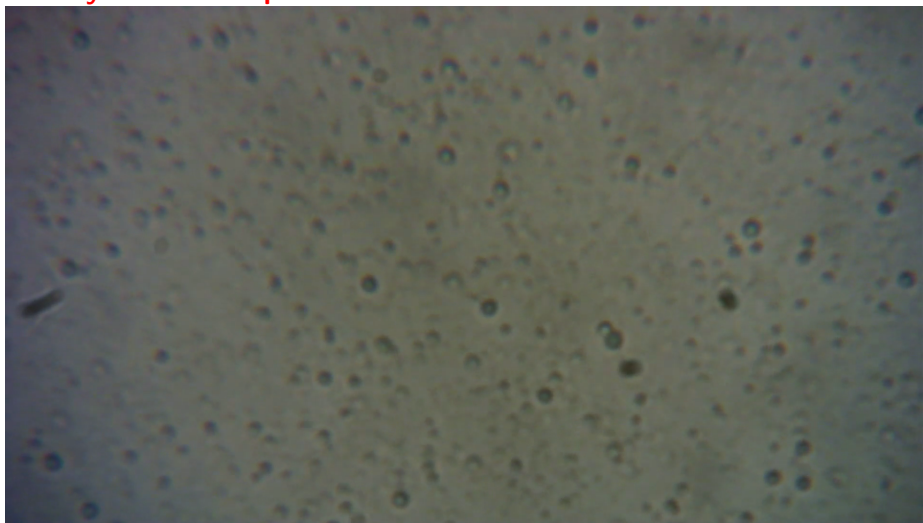
Było to jedyne sensowne wytłumaczenie odkrytego w XVIII wieku tzw. prawa stosunków stałych.

Doświadczalnym potwierdzeniem atomowej budowy materii były **ruchy Browna** (1827), choć wtedy nie potrafiono ich jeszcze opisać ilościowo.

Atomy były głównie domeną **zainteresowania chemików!**

Fizycy mało się nimi interesowali, nie były im potrzebne...

Ruchy Browna - pokaz

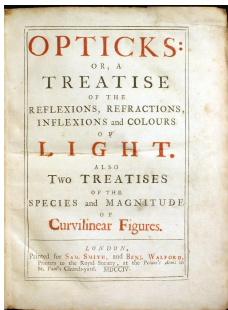


Ruchy Browna - pokaz



Światło

Teoria emisyjna światła, której zwolennikiem był m.in. Newton, zakładała że światło jest **strumieniem** “nadzwyczaj subtelných” **cząstek materii**. Teoria ta pozwalała wyjaśnić przewidywania optyki geometrycznej.



1704

Światło

W XIX wieku przyjęto jednak powszechnie teorię Younga (1801), zgodnie z którą światło jest **falą**. Dowodem była obserwacja zjawisk **dyfrakcji i interferencji** światła.

Światło

W XIX wieku przyjęto jednak powszechnie teorię Younga (1801), zgodnie z którą światło jest **falą**. Dowodem była obserwacja zjawisk **dyfrakcji i interferencji** światła.

Sformułowanie **Równań Maxwella** (1865) stanowiło ukoronowanie prowadzonych w XVIII i XIX wieku badań nad **elektrycznością i magnetyzmem**. Były one “podumowaniem” całej naszej wiedzy o klasycznych oddziaływaniach ładunków elektrycznych.

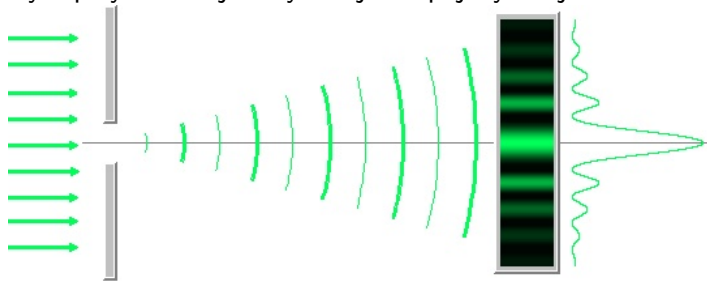
Jednocześnie **przewidywały one istnienie fal elektromagnetycznych** rozchodzących się z prędkością zgodną z mierzoną prędkością światła.
⇒ “udowodniły”, że światło jest **falą elektromagnetyczną**

Dyfrakcja

Zjawiska dyfrakcji i interferencji możemy obserwować **wyłącznie dla fal!**

Obserwujemy je zarówno dla fal mechanicznych (dźwięk, fale na wodzie) jak i w szerokim spektrum fal elektromagnetycznych (radiowe, mikrofałe, światło, promienie rentgena)

Najprostrzym przykładem jest dyfrakcja na pojedynczej szczelinie



Fala płaska ugina się na szczelinie i rozchodzi się w różnych kierunkach.

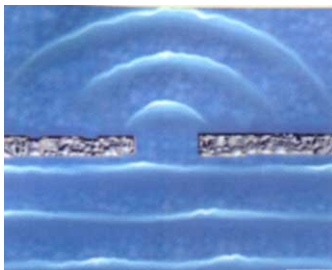
Dyfrakcja

Zjawiska dyfrakcji i interferencji możemy obserwować **wyłącznie dla fal!**

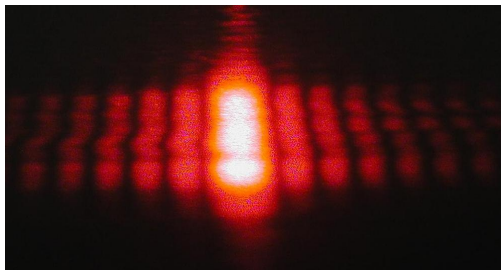
Obserwujemy je zarówno dla fal mechanicznych (dźwięk, fale na wodzie) jak i w szerokim spektrum fal elektromagnetycznych (radiowe, mikrofałe, światło, promienie rentgena)

Najprostrzym przykładem jest dyfrakcja na pojedynczej szczelinie

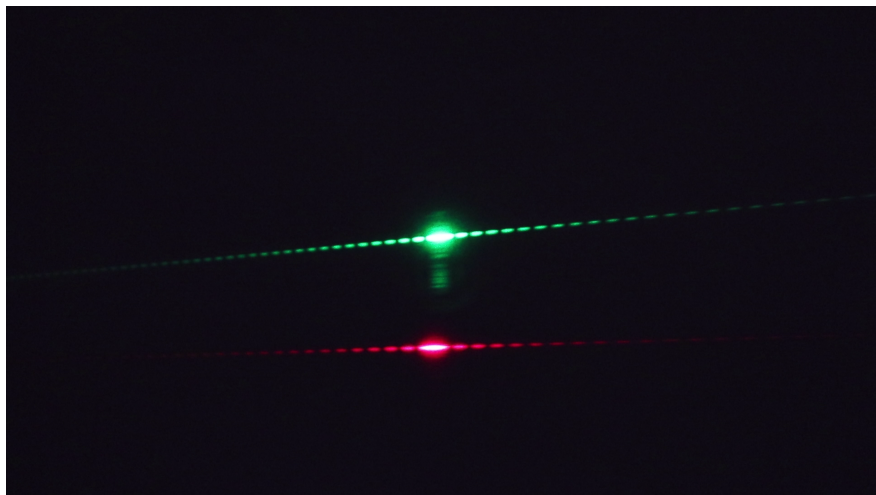
Fale na wodzie



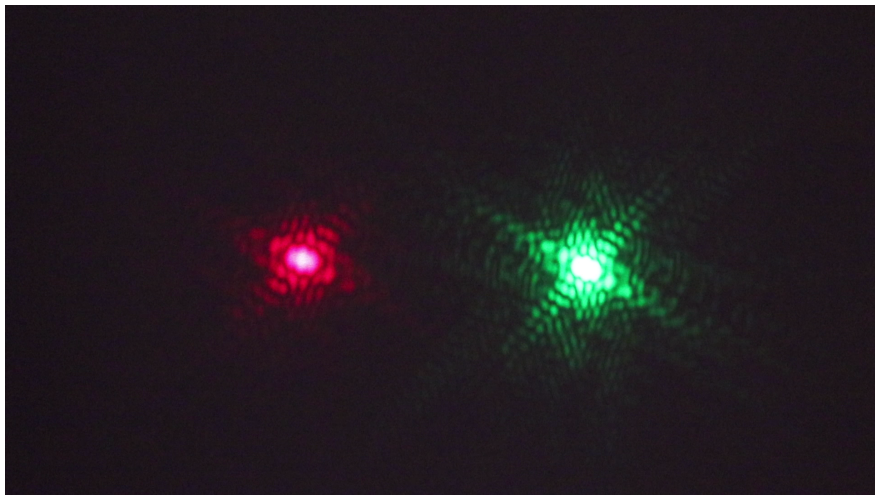
Światło



Dyfrakcja - pokaz



Dyfrakcja - pokaz



Koniec XIX wieku

Odkrycie fal elektromagnetycznych przez Heinricha Hertza (1886)

⇒ wielki sukces, potwierdzenie teorii Maxwella

Choć wciąż nie była jasna natura ładunku elektrycznego, ani pochodzenie linii widmowych pierwiastków...

fizyka wydawała się być dziedziną bez większej przyszłości!

Koniec XIX wieku

Odkrycie fal elektromagnetycznych przez Heinricha Hertza (1886)

⇒ wielki sukces, potwierdzenie teorii Maxwella

Choć wciąż nie była jasna natura ładunku elektrycznego, ani pochodzenie linii widmowych pierwiastków...

fizyka wydawała się być dziedziną bez większej przyszłości!

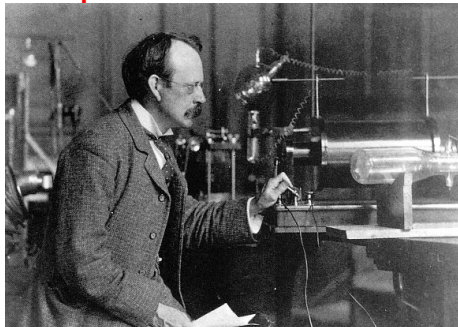
Przełom XIX i XX wieku

Przyniósł szereg przełomowych, nieoczekiwanych odkryć

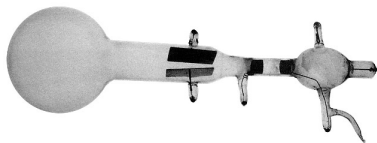
- odkrycie promieni X przez Wilhelma Röntgena w 1895,
- odkrycie promieniotwórczości przez Henri Becquerel'a w 1896,
- odkrycie elektronu przez Josepha Thomsona w 1897,
- badania efektu fotoelektrycznego (Lenard, 1902) ⇒ foton (Einstein)

⇒ wszystko to wymagało zupełnie nowego spojrzenia na fizykę

Joseph Thomson 1897



Thomson badał tzw. **promienie katodowe**



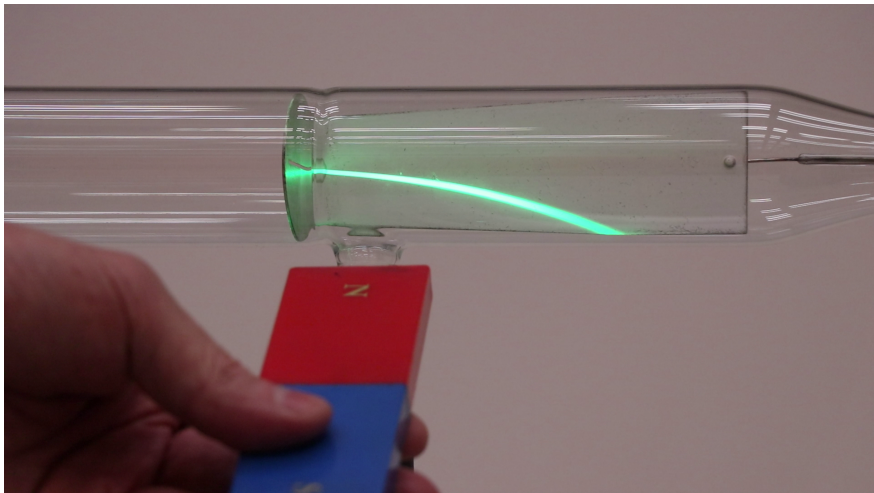
pokazał, że promienie te odchylają się w polu elektrycznym.

Wynikało z tego że jest to **strumień cząstek** (elektronów), ale z pomiaru mógł wyznaczyć jedynie stosunek ładunku do masy elektronu

Dopiero w 1909 roku Robert Millikan wyznaczył **ładunek** elektronu, i obliczył jego **masę**: była **2000 razy mniejsza od masy atomu wodoru !!!**

Atom wodoru był najmniejszą znaną cząstką subatomowa \Rightarrow **cząstka subatomowa**

Odchylenie promieni katodowych - pokaz



- 1 Fizyka przełomu XIX i XX wieku
- 2 Skale w fizyce
- 3 Granice stosowalności fizyki klasycznej
- 4 Szczególna Teoria Względności

SI - Systéme Internationale

Międzynarodowy układ jednostek wprowadzony w 1960 roku.

ale ciągle aktualizowany, także w tym roku (Dz.U. 2020 Poz. 1024)

Długość	metr	[m]
Masa	kilogram	[kg]
Czas	sekunda	[s]
Natężenie prądu elektrycznego	amper	[A]
Temperatura termodynamiczna	kelwin	[K]
Ilość substancji	mol	[mol]
Światłość	kandela	[cd]

Ale to są jednostki “klasyczne”, użyteczne w “życiu codziennym”...

Jak poradzić sobie gdy mamy do czynienia z wartościami dużo większymi lub dużo mniejszymi?

Notacja naukowa

Ułatwia zapisywanie bardzo dużych i bardzo małych liczb:

- prędkość światła: $c \approx 300000000 \text{ m/s} = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$
 $= 3 \cdot 10 \cdot 10 \cdot 10 \cdot 10 \cdot 10 \cdot 10 \cdot 10 \cdot 10 \text{ m/s}$

Notacja naukowa

Ułatwia zapisywanie bardzo dużych i bardzo małych liczb:

- prędkość światła: $c \approx 300000000 \text{ m/s} = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$
- rozmiar protonu: $r \sim 0.0000000000000001 \text{ m} = 1/10^{15} \text{ m} = 1 \cdot 10^{-15} \text{ m}$
 $= 1/10/10/10/10/10/10/10/10/10/10/10/10/10/10/10 \text{ m}$

Notacja naukowa

Ułatwia zapisywanie bardzo dużych i bardzo małych liczb:

- prędkość światła: $c \approx 300000000 \text{ m/s} = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$
- rozmiar protonu: $r \sim 0.000000000000001 \text{ m} = 1/10^{15} \text{ m} = 1 \cdot 10^{-15} \text{ m}$
- masa Ziemi: $m_Z \approx 5972000000000000000000000 \text{ kg} = 5.972 \cdot 10^{24} \text{ kg}$

Notacja naukowa

Ułatwia zapisywanie bardzo dużych i bardzo małych liczb:

- prędkość światła: $c \approx 300000000 \text{ m/s} = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$
- rozmiar protonu: $r \sim 0.000000000000001 \text{ m} = 1/10^{15} \text{ m} = 1 \cdot 10^{-15} \text{ m}$
- masa Ziemi: $m_Z \approx 5972000000000000000000000 \text{ kg} = 5.972 \cdot 10^{24} \text{ kg}$

Wykładnik potęgi 10 określa nam "rząd wielkości"

Różnica o rząd wielkości to dużo!



⇐ ×10 ⇒



Notacja naukowa

Ułatwia zapisywanie bardzo dużych i bardzo małych liczb:

- prędkość światła: $c \approx 300000000 \text{ m/s} = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$
- rozmiar protonu: $r \sim 0.000000000000001 \text{ m} = 1/10^{15} \text{ m} = 1 \cdot 10^{-15} \text{ m}$
- masa Ziemi: $m_Z \approx 5972000000000000000000000 \text{ kg} = 5.972 \cdot 10^{24} \text{ kg}$

Wykładnik potęgi 10 określa nam “rząd wielkości”

Różnica o rząd wielkości to dużo!

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



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



Jednostki pochodne

jotta	10^{24}	Y	decy	10^{-1}	d
zetta	10^{21}	Z	centy	10^{-2}	c
eksa	10^{18}	E	mili	10^{-3}	m
peta	10^{15}	P	mikro	10^{-6}	μ
tera	10^{12}	T	nano	10^{-9}	n
giga	10^9	G	piko	10^{-12}	p
mega	10^6	M	femto	10^{-15}	f
kilo	10^3	k	atto	10^{-18}	a
hekto	10^2	h	zepto	10^{-21}	z
deka	10	da	jokto	10^{-24}	y

np. $1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m} = 0.000\ 000\ 001 \text{ m}$

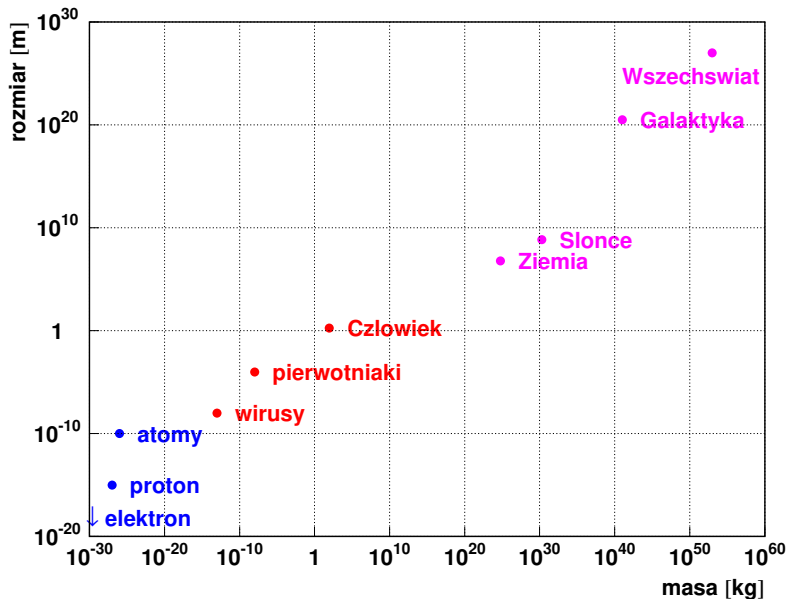
Rozmiary badanych obiektów:

1 m	10^0 m	ludzie, fale radiowe,
10 km	10^4 m	najwyższe góry, komety
10 tys. km	10^7 m	promień Ziemi
1 mln km	10^9 m	promień Słońca
1 AU	10^{11} m	orbita Ziemi
30 AU	10^{13} m	układ słoneczny (orbita Neptuna)
4 ly	10^{16} m	najbliższa gwiazda (Proxima Centauri)
150 tys. ly	10^{21} m	Droga Mleczna (nasza galaktyka)
100 mln ly	10^{24} m	supergromada galaktyk
14 mld. ly	10^{26} m	promień obserwowanego Wszechświata

Ciekawa animacja: <http://htwins.net/scale2/>

Rozmiary badanych obiektów:

1 m	10^0 m	ludzie, fale radiowe,
1 mm	10^{-3} m	ziarna piasku, pchła
100 μm	10^{-4} m	ludzki włos, pierwotniaki
10 μm	10^{-5} m	komórki zwierzęce
1 μm	10^{-6} m	bakterie
10 nm	10^{-8} m	małe wirusy
1 nm	10^{-9} m	grubość nici DNA
1 Å	10^{-10} m	rozmiar atomu
1 fm	10^{-15} m	proton, jądro atomowe
poniżej	10^{-18} m	ograniczenie na rozmiar elektronu



- 1 Fizyka przełomu XIX i XX wieku
- 2 Skale w fizyce
- 3 Granice stosowalności fizyki klasycznej**
- 4 Szczególna Teoria Względności

Fizyka klasyczna

Dobrze opisuje zjawiska “dnia codziennego”:

- obiekty makroskopowe
- poruszające się z “umiarkowanymi” prędkościami
- w słabych polach grawitacyjnych
(same też nie mogą być zbyt masywne)

Fizyka klasyczna

Dobrze opisuje zjawiska “dnia codziennego”:

- obiekty makroskopowe
- poruszające się z “umiarkowanymi” prędkościami
- w słabych polach grawitacyjnych
(same też nie mogą być zbyt masywne)

Szczególna Teoria Względności

Wkracza wtedy, gdy prędkości względne stają się porównywalne z prędkością światła $c \equiv 299\,792\,458\text{ m/s} \approx 300\,000\text{ km/s}$.

Fizyka współczesna bardzo często wymaga stosowania podejścia relatywistycznego. Nie tylko w przypadku dużych prędkości...

Bez uwzględnienia efektów relatywistycznych nie jest także możliwe pełne zrozumienie wielu “codziennych” zjawisk, np. oddziaływań magnetycznych!

Odejście od zasad fizyki klasycznej także w przypadku obiektów mikroskopowych. **Ale nie rozmiar jest najistotniejszy!**

Mechanika kwantowa

Wkracza gdy badane zjawiska zachodzą na skalach porównywalnych ze stałą Plancka:

$$h = 6.626 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$$

Skala zjawiska może dotyczyć energii i czasu, pędu i długości, momentu pędu

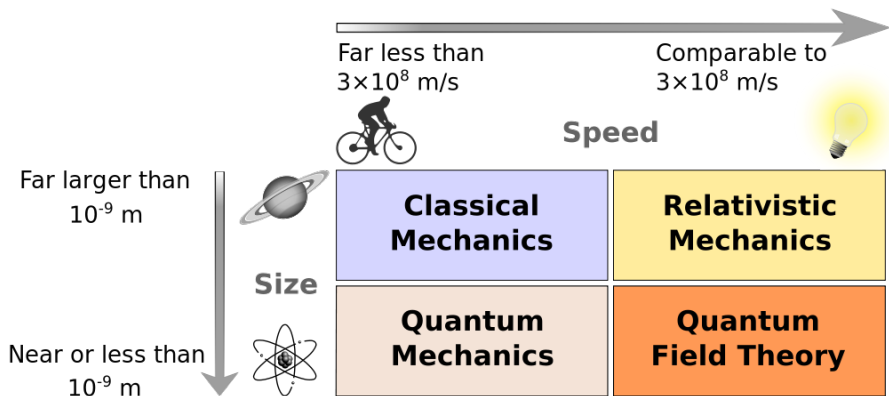
Stała Plancka jest niesłychanie mała.

Fizyka kwantowa istotna dopiero na poziomie subatomowym.

$$h \sim m_p \cdot r_p \cdot c \quad m_p, r_p - \text{masa i promień protonu}$$

Dla wszelkich obiektów makroskopowych stosujemy fizykę klasyczną
W fizyce cząstek nieodzowna staje się **mechanika kwantowa!**

Relatywistyczne i kwantowe rozszerzenia mechaniki klasycznej



Współczesna fizyka cząstek opisywana jest w języku **Kwantowych Teorii Pola** łączących szczególną teorię względności z mechaniką kwantową
Jest to świat bardzo różny od tego do którego jesteśmy przyzwyczajeni...

- 1 Fizyka przełomu XIX i XX wieku
- 2 Skale w fizyce
- 3 Granice stosowalności fizyki klasycznej
- 4 Szczególna Teoria Względności**

Problem:

Z równań Maxwella wynika, że prędkość światła

nie zależy od układu odniesienia!

Jest to sprzeczne z zasadami mechaniki klasycznej!

albo światło musiałyby się rozchodzić w ośrodku, eterze...

Doświadczenie potwierdziło słuszność równań Maxwella ! (eter nie istnieje)

Problem:

Z równań Maxwella wynika, że prędkość światła

nie zależy od układu odniesienia!

Jest to sprzeczne z zasadami mechaniki klasycznej!

albo światło musiałoby się rozchodzić w ośrodku, eterze...

Doświadczenie potwierdziło słuszność równań Maxwella ! (eter nie istnieje)

W roku 1905 Einstein opublikował pracę "O elektrodynamice ciał w ruchu".

Zawarł w niej dwa postulaty:

- prawa fizyki są identyczne we wszystkich układach odniesienia (zasada względności - obowiązuje też w fizyce klasycznej!)
- prędkość światła w próżni, c , jest jednakowa we wszystkich układach odniesienia, niezależnie od wzajemnego ruchu obserwatora i źródła (uniwersalność prędkości światła)

Konsekwencje

Drugi postulat Einsteina oznacza, że **czas przestaje być uniwersalny!**
Każdy pomiar zależy od układu odniesienia, w którym jest wykonany!

Każdy układ odniesienia (obserwator) musi mieć **własny zegar!**
Inaczej nie może poprawnie dokonywać pomiarów...

Konsekwencje

Drugi postulat Einsteina oznacza, że **czas przestaje być uniwersalny!**
Każdy pomiar zależy od układu odniesienia, w którym jest wykonany!

Każdy układ odniesienia (obserwator) musi mieć **własny zegar!**
Inaczej nie może poprawnie dokonywać pomiarów...

Pomiar czasu pomiędzy dwoma zdarzeniami
(np. startem i lądowaniem rakiety albo produkcją cząstki i jej rozpadem)
zależy od układu odniesienia, z którego prowadzimy obserwację!

Czas lotu samolotu mierzony przez pilota i przez kontrolera lotów jest różny
(potwierdzone doświadczalnie choć różnice są na poziomie ns!)

Konsekwencje

Drugi postulat Einsteina oznacza, że **czas przestaje być uniwersalny!**
Każdy pomiar zależy od układu odniesienia, w którym jest wykonany!

Każdy układ odniesienia (obserwator) musi mieć **własny zegar!**
Inaczej nie może poprawnie dokonywać pomiarów...

Pomiar czasu pomiędzy dwoma zdarzeniami
(np. startem i lądowaniem rakiety albo produkcją cząstki i jej rozpadem)
zależy od układu odniesienia, z którego prowadzimy obserwację!

Czas lotu samolotu mierzony przez pilota i przez kontrolera lotów jest różny
(potwierdzone doświadczalnie choć różnice są na poziomie ns!)

Zdarzenia równoczesne dla jednego obserwatora mogą nie być równoczesne dla innego!
(względność równoczesności)

Dylatacja czasu

Jeśli obserwujemy szybko **poruszający się zegar** to wydaje nam się, że **chodzi wolniej** niż powinien

Dylatacja czasu

Jeśli obserwujemy szybko **poruszający się zegar** to wydaje nam się, że **chodzi wolniej** niż powinien

Skrocenie Lorentza

Jeśli zmierzmy **długość szybko poruszającego się obiektu** to będzie ona **mniejsza** niż jego długość rzeczywista (w spoczynku)

Dylatacja czasu

Jeśli obserwujemy szybko **poruszający się zegar** to wydaje nam się, że **chodzi wolniej** niż powinien

Skrocenie Lorentza

Jeśli zmierzmy **długość szybko poruszającego się obiektu** to będzie ona **mniejsza** niż jego długość rzeczywista (w spoczynku)

Składanie prędkości

Jeśli z rakiety poruszającej się z prędkością V względem Ziemi wystrzelimy pocisk z prędkością V' względem rakiety to prędkość pocisku względem Ziemi:

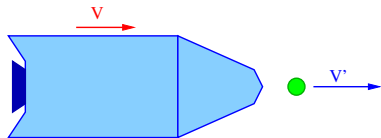
$$U < V + V'$$

w taki sposób, że nigdy osiągniemy prędkości światła!

⇒ Prędkość światła jest prędkością graniczną dla wszystkich cząstek!

Składanie prędkości

Z rakiety poruszającej się z prędkością V względem Ziemi wystrzelono pocisk z prędkością V' względem rakiety.



Jaka jest prędkość U pocisku względem Ziemi?

V/c	V'/c	U/c
0.00004	0.00004	0.00008
0.0001	0.0001	0.0002
0.001	0.001	0.001999998
0.01	0.01	0.019998
0.1	0.1	0.1980

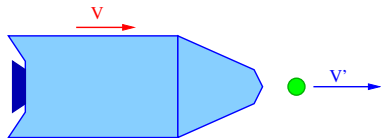
Apollo 10

Ziemia dookoła Słońca

W granicy małych prędkości słuszne jest klasyczne dodawanie prędkości.

Składanie prędkości

Z rakiety poruszającej się z prędkością V względem Ziemi wystrzelono pocisk z prędkością V' względem rakiety.



Jaka jest prędkość U pocisku względem Ziemi?

V/c	V'/c	U/c
0.2	0.2	0.3846
0.4	0.4	0.6897
0.5	0.5	0.8000
0.6	0.6	0.8824
0.8	0.8	0.9756
0.9	0.9	0.9945

Jednak prędkość światła jest “barierą”, której nie możemy przekroczyć.

Równoważność masy i energii

W teorii Einsteina wciąż ściśle obowiązuje **zasada zachowania energii** oraz **zasada zachowania pędu** (jak w fizyce klasycznej)
Tylko definicja energii i pędu musi zostać zmieniona!

Równoważność masy i energii

W teorii Einsteina wciąż ściśle obowiązuje **zasada zachowania energii** oraz **zasada zachowania pędu** (jak w fizyce klasycznej)
Tylko definicja energii i pędu musi zostać zmieniona!

Zawsze zachowana jest energia całkowita układu,
która uwzględnia **energie spoczynkową** związaną z masą cząstki:

$$E_0 = m c^2$$

Równoważność masy i energii

W teorii Einsteina wciąż ściśle obowiązuje **zasada zachowania energii** oraz **zasada zachowania pędu** (jak w fizyce klasycznej)
Tylko definicja energii i pędu musi zostać zmieniona!

Zawsze zachowana jest energia całkowita układu,
która uwzględnia **energię spoczynkową** związaną z masą cząstki:

$$E_0 = m c^2$$

Masa nie jest zachowana!

Cząstki (masa) mogą być produkowane (kosztem np. energii kinetycznej),
mogą też się rozpadać, anihilować...

Powoduje to, że możliwe jest wiele procesów, które nie mają klasycznych odpowiedników...

Równoważność masy i energii - analogia klasyczna

