

Fizyka mało znana



Zbigniew Osiak

**Lista
Ginzburga**

04

ORCID

Linki do moich publikacji naukowych i popularnonaukowych, e-booków oraz audycji telewizyjnych i radiowych są dostępne w bazie ORCID pod adresem internetowym:

<http://orcid.org/0000-0002-5007-306X>

OZNACZENIA

B – notka biograficzna

C – ciekawostka

D – propozycja wykonania doświadczenia

H – informacja dotycząca historii fizyki

I – adres strony internetowej

K – komentarz

P – przykład

U – uwaga

Zbigniew Osiak (Tekst)

FIZYKA MAŁO ZNANA
Lista Ginzburga

Małgorzata Osiak (Ilustracje)

© Copyright 2013 by
Zbigniew Osiak (text) and Małgorzata Osiak (illustrations)

Wszelkie prawa zastrzeżone.
Rozpowszechnianie i kopiowanie całości lub części publikacji
zabronione bez pisemnej zgody autora tekstu i autorki ilustracji.

Portret autora zamieszczony na okładkach przedniej i tylnej
Rafał Pudło

Wydawnictwo: Self Publishing

ISBN: 978-83-272-4150-4

e-mail: zbigniew.osiak@gmail.com

“Fizyka mało znana – Lista Ginzburga” zawiera pomocnicze materiały do prowadzonego przeze mnie seminarium dla słuchaczy Uniwersytetu Trzeciego Wieku w Uniwersytecie Wrocławskim.

Szczegółowe informacje dotyczące sygnalizowanych tam zagadnień zainteresowani Czytelnicy znajdą w innych moich eBookach:

Z. Osiak: *Elektryczność*. Self Publishing (2011).

Z. Osiak: *Szczególna Teoria Względności*. Self Publishing (2012).

Z. Osiak: *Ogólna Teoria Względności*. Self Publishing (2012).

Z. Osiak: *Antygravitacja*. Self Publishing (2012).

Z. Osiak: *Giganci Teorii Względności*. Self Publishing (2012).

Z. Osiak: *Energia w Szczególnej Teorii Względności*. SP (2012).

Z. Osiak: *Energy in Special Relativity*. Self Publishing (2011).

Z. Osiak: *Encyklopedia Fizyki*. Self Publishing (2012).

Z. Osiak: *Zadania Problemowe z Fizyki*. Self Publishing (2011).

Seminarium

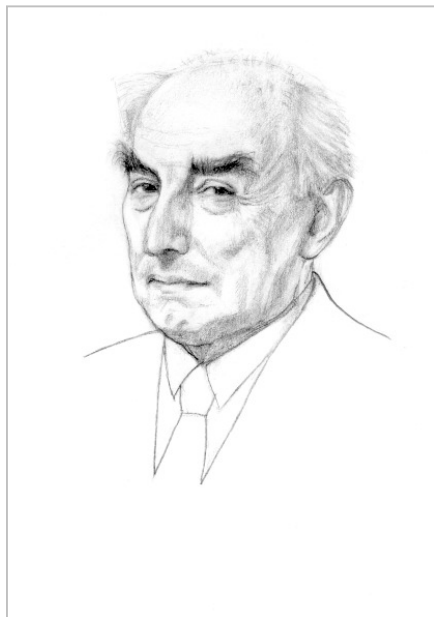
FIZYKA MAŁO ZNANA

Lista Ginzburga

dr Zbigniew Osiak

Portrety i rysunki wykonała

Małgorzata Osiak



[Виталий Лазаревич Гинзбург]

[Vitaly L. Ginzburg]

rosyjski fizyk-teoretyk, astrofizyk i historyk fizyki

1916 - Urodził się 4 października w Moskwie.

1938 - Ukończył Uniwersytet Moskiewski.

1940 - Rozpoczął pracę w Instytucie Fizycznym Akademii Nauk ZSRR.

1942 - Doktoryzował się.

1953 - Został członkiem korespondentem Akademii Nauk.

1945/68 - Był profesorem Uniwersytetu Gorkowskiego.

1966 - Został członkiem rzeczywistym Akademii Nauk.

1968 - Rozpoczął pracę jako profesor w Moskiewskim Instytucie Fizyki i Technologii.

1971/88 - Był dyrektorem Departamentu Fizyki Teoretycznej w Instytucie Fizycznym Akademii Nauk.

2003 - Otrzymał wspólnie z A. J. Leggerttem i A. A. Abrikosowem Nagrodę Nobla z fizyki za “pionierski wkład do teorii nadprzewodników i nadcieczy (nadprzewodnictwa i nadciekłości)”.
2009 - Zmarł 8 listopada w Moskwie.

Tematyka badawcza

- Ginzburg zajmował się niemal wszystkimi działami fizyki.
- W szczególności opracował wraz z L. D. Landauem teorię nadprzewodności (1950) oraz wspólnie z L. P. Pitajewskim teorię nadciekłości (1958).

Ciekawostki

- Profesor Witalij Łazarewicz Ginzburg był członkiem dziesięciu Akademii Nauk, redaktorem miesięcznika *Uspiechi Fizycznych Nauk*, laureatem licznych nagród i wyróżnień, wymieńmy choćby Medal Mariana Smoluchowskiego (1984), Złoty Medal Londyńskiego Królewskiego Towarzystwa Astronomicznego (1991), Nagrodę Bardeena (1991), Złoty Medal Nielsa Bohra (1999).
- Polskiemu czytelnikowi Ginzburg jest znany jako autor książki pod tytułem *O fizyce i astrofizyce* [PWN, Warszawa 1979].
- Witalij Łazarewicz pisał artykuły barwnym językiem, odwołując się do licznych porównań, dygresji, żartów, refleksji i wspomnień.

Cytaty

- “A jak wskazać liderów w nauce, kiedy badania prowadzone są przez liczne kolektwy uczonych i inżynierów (rola tych ostatnich może być bynajmniej nie drugorzędna)? Dobrze wiemy, że w wielu przypadkach pewne premie i nagrody otrzymują “z urzędu” naczelnicy oddziałów, kierownicy naukowcy, w ogólności “bossowie”. Nie rzadko figurują oni w spisie współautorów różnych publikacji (artykułów), patentów, itd., w powstaniu których mieli wątpliwy udział.”
- “Aktywnie pracujący fizycy zwykle mało interesują się przeszłością. Ja sam nie jestem wyjątkiem – zacząłem zajmować się teorią nadprzewodności w 1943, a dopiero w 1979 zdecydowałem się przejrzeć klasyczne prace Kamerlingh-Onnesa (1853-1926). I zostałem w pełni usatysfakcjonowany.”

Cytaty

- “Nie raz zetknąłem się z takim obrazkiem: dobry, zdolny student albo już pracownik naukowy, autor oryginalnych artykułów, posiada nader wąski horyzont. Zapoznał się z głębokimi i trudnymi problemami kwantowej teorii pola, ale o gwiazdach neutronowych, czarnych dziurach, ferroelektrykach, nadprzewodnikach, ciekłym helu-trzy i wielu innych nie posiada dostatecznego wyobrażenia nawet na jakościowym poziomie.”

- Lista Ginzburga jest listą problemów fizyki i astrofizyki, które są obecnie szczególnie ważne i interesujące.
- Na świecie żyje ponad pół miliona tworzących fizyków. Lista Ginzburga jest wskazaniem tego, co każdy fizyk wiedzieć powinien, ma pomóc zwłaszcza młodym badaczom w wyborze zagadnień, którymi warto się zająć.
- Kolejne wersje Listy Ginzburga były publikowane w miesięczniku *Uspiechi Fizycznych Nauk* w latach 1971, 1999, 2002, 2004 i 2007.
УФН **103**, 1 (1971) 87-119.
УФН **169**, 4 (1999) 419-441.
УФН **172**, 2 (2002) 213-219.
УФН **174**, 11 (2004) 1240-1255.
УФН **177**, 4 (2007) 346-346.

MAKROFIZYKA

- 01.** Kontrolowana synteza jądrowa.
- 02.** Nadprzewodnictwo w wysokich i pokojowych temperaturach.
- 03.** Metaliczny wodór. Inne substancje egzotyczne.
- 04.** Dwuwymiarowa ciecz elektronowa (anomalny efekt Halla i niektóre inne efekty).
- 05.** Pewne problemy fizyki ciała stałego (heterostruktury w półprzewodnikach, kwantowe studnie i kropki, przejścia metal-dielektryk, fale gęstości ładunku i spinu, mezoskopia).
- 06.** Przejścia fazowe drugiego rodzaju i im pokrewne. Niektóre przykłady takich przejść. Ochładzanie (w szczególności laserowe) do super niskich temperatur. Kondensacja Bosego-Einsteina w gazach.

- 07.** Fizyka powierzchni. Klastery.
- 08.** Ciekłe kryształy. Ferroelektryki. Ferrotoroiki.
- 09.** Fullereny. Nanorurki.
- 10.** Zachowanie się substancji w super silnych polach magnetycznych.
- 11.** Fizyka nieliniowa. Turbulentność. Solitony. Chaos. Dziwne atraktory.
- 12.** Rasery, grasery, lasery dużej mocy.
- 13.** Superciężkie pierwiastki. Egzotyczne jądra.

MIKROFIZYKA

14. Spektrum mas. Kwarki i gluony. Chromodynamika kwantowa. Plazma kwarkowo-gluonowa.

15. Jednolita teoria oddziaływań słabych i elektromagnetycznych. Bozony W i Z. Leptony.

16. Model standardowy. Wielka unifikacja. Super unifikacja. Rozpad protonu. Masy neutrin. Monopole magnetyczne.

17. Długość fundamentalna (skwantowana przestrzeń). Oddziaływania cząstek o wysokich i superwysokich energiach. Kolidery.

18. Niezachowanie parzystości kombinowanej CP.

19. Zjawiska nieliniowe w próżni i super silnych polach elektromagnetycznych. Przejścia fazowe w próżni.

20. Struny. M-teoria.

ASTROFIZYKA

21. Eksperymentalne potwierdzenie ogólnej teorii względności.
22. Fale grawitacyjne i ich detekcja.
23. Problemy kosmologiczne. Inflacja. Λ -człon i “kwintesencja” (ciemna energia). Związek między kosmologią i fizyką wysokich energii.
24. Gwiazdy neutronowe i pulsary. Gwiazdy supernowe.
25. Czarne dziury. Struny kosmiczne (?).
26. Kwazary i jądra galaktyk. Powstawanie galaktyk.
27. Problem ciemnej materii (ukrytej masy) i jej detekcji.
28. Pochodzenie promieniowania kosmicznego o superwysokiej energii.

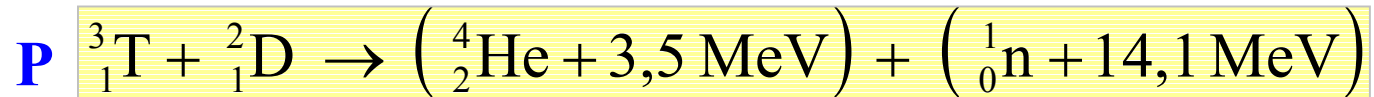
29. Rozbłyski gamma. Hipernowe.

30. Fizyka i astronomia neutrinowa. Oscylacje neutrin.

MAKROFIZYKA

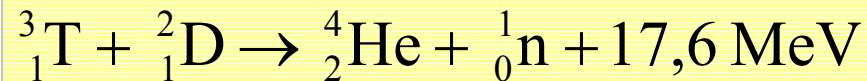
- Reakcja termojądrowa (fuzja)
- Bomba wodorowa
- Kontrolowana synteza jądrowa
- Tokamak
- ITER
- Zimna fuzja

- Reakcja termojądrowa (fuzja) \Leftrightarrow reakcja jądrowa, w której z dwóch jąder lekkich powstaje nowe jądro. W reakcji termojądrowej wyzwala się duża ilość energii, ponieważ suma mas substratów jest większa od sumy mas produktów. Do zajścia reakcji termojądrowej wymagana jest temperatura rzędu 10^8 K, stąd przedrostek termo w nazwie tej reakcji.



- Reakcja termojądrowa nazywana jest też reakcją termonuklearną, syntezą jądrową lub fuzją jądrową.

- Bomba wodorowa \Leftrightarrow bomba, w której zachodzi niekontrolowana reakcja termojądrowa syntezy jąder helu z nuklidów ${}^2_1\text{D}$, ${}^3_1\text{T}$ oraz ${}^6_3\text{Li}$.



- Zapalnikiem w bombie wodorowej jest bomba atomowa. Bomba wodorowa nazywana jest też bombą termojądrową lub termonuklearną.

- Kontrolowana synteza jądrowa \Leftrightarrow reakcja termojądrowa (fuzja) przebiegająca w pełni kontrolowanych warunkach laboratoryjnych. Jedną z możliwości jest przeprowadzenie tej reakcji w “naczyniu” utworzonym z odpowiednio uformowanego silnego pola magnetycznego, którego źródłem są nadprzewodnikowe elektromagnesy. Zapalnikiem jest laser o gigantycznej mocy.

-
- Tokamak \Leftrightarrow urządzenie służące do wytwarzania i przechowywania gorącej plazmy, co umożliwia przeprowadzenie kontrolowanej reakcji termojądrowej (fuzji). Pierwszy tokamak zbudowano w Moskwie w 1956.
 - Nazwa **tokamak** pochodzi od pierwszych sylab rosyjskich słów **т**ороидальная **к**амера с **м**агнитными **к**атушками (toroidalna komora z magnetycznymi cewkami).

-
- ITER \Leftrightarrow międzynarodowy eksperymentalny reaktor termojądrowy.
 - Nazwa **ITER** pochodzi od pierwszych liter angielskich słów **I**nternational **T**ermonuclear **E**xperimental **R**eactor.

-
- Zimna fuzja \Leftrightarrow kontrolowana synteza jąder lekkich pierwiastków (fuzja), którą można przeprowadzić w zdecydowanie niższej temperaturze niż 10^8 K.

02. Nadprzewodnictwo w wysokich i pokojowych temperaturach

- Nadprzewodnictwo
- Efekt Meissnera-Ochsenfelda
- Nadprzewodniki wysokotemperaturowe

- Nadprzewodnictwo \Leftrightarrow zjawisko polegające na gwałtownym zaniku oporu elektrycznego i względnej przenikalności magnetycznej niektórych metali i stopów w bardzo niskich temperaturach bezwzględnych, nazywanych temperaturami krytycznymi.
- Metale wykazujące nadprzewodnictwo noszą nazwę nadprzewodników.
- Nadprzewodnictwo zanika, gdy natężenie zewnętrznego pola magnetycznego osiąga lub przekracza wartość krytyczną (H_C) dla danej temperatury krytycznej, oraz gdy w nadprzewodniku płynie prąd elektryczny o zbyt dużym natężeniu.
- Krytyczne wartości natężenia pola magnetycznego i natężenia prądu zwiększają się wraz ze zmniejszaniem się temperatury krytycznej.

H Nadprzewodnictwo rtęci, $T_C = 4,15^\circ \text{ K}$, odkrył Kamerlingh-Onnes w 1911.

H Fenomenologiczną teorię nadprzewodnictwa podali Ginzburg i Landau w 1950.

H Mikroskopową teorię nadprzewodnictwa sformułowali Bardeen, Cooper i Schrieffer w 1957. Nazywana jest ona teorią BCS.

B Heike Kamerlingh-Onnes (1853-1926), holenderski fizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1913.

B Witalij Lazarewicz Ginzburg (1916-2009), rosyjski fizyk teoretyk i astrofizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 2003.

B Lew Dawidowicz Landau (1908-1968), radziecki (rosyjski) fizyk teoretyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1962.

B John Bardeen (1908-1991), amerykański fizyk, dwukrotny laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1956 oraz 1972.

B Leon Neil Cooper (ur. 1930), amerykański fizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1972.

B John Bardeen (1908-1991), amerykański fizyk, dwukrotny laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1956 oraz 1972.

B Leon Neil Cooper (ur. 1930), amerykański fizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1972.

B John Robert Schrieffer (ur. 1931), amerykański fizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1972.

• H. Kamerlingh Onnes: *Further experiments with liquid helium. C. On the change of electric resistance of pure metals at very low temperatures, etc. IV. The resistance of pure mercury at helium temperatures.*

Proceedings of the Koninklijke Nederlandse Akademie van Wetenschappen **13** (1911) 1274-1276.

• H. Kamerlingh Onnes: *Further experiments with liquid helium. D. On the change of electric resistance of pure metals at very low temperatures, etc. V. The disappearance of the resistance of mercury.*

Proceedings of the Koninklijke Nederlandse Akademie van Wetenschappen **14** (1911) 113-115.

• H. Kamerlingh Onnes: *Further experiments with liquid helium. G. On the change of electric resistance of pure metals at very low temperatures, etc. VI. On the sudden change in the rate at which the resistance of mercury disappears.*

Proceedings of the Koninklijke Nederlandse Akademie van Wetenschappen **14** (1911-1912) 818-821.

(Communicated in the meeting of November 25, 1911.)

• В. Л. Гинзбург, Л. Д. Ландау: *К теории сверхпроводимости.*

Журнал Экспериментальной и Теоретической Физики **20** (1950) 1064-1082. *On the theory of superconductivity.*

• L. N. Cooper: *Bound Electron Pairs in a Degenerate Fermi Gas.* Physical Review **104**, 4 (November 1956) 1189-1190.

• J. Bardeen, L. N. Cooper, and J. R. Schrieffer: *Microscopic Theory of Superconductivity.* Physical Review **106**, 1 (1957) 162-164.

• J. Bardeen, L. N. Cooper, and J. R. Schrieffer: *Theory of Superconductivity.* Physical Review **108**, 5 (December 1957) 1175-1204.

- Efekt Meissnera-Ochsenfelda \Leftrightarrow zjawisko odkryte w 1933 przez Meissnera i Ochsenfelda, polegające na tym, że zewnętrzne pole magnetyczne jest wypychane z nadprzewodnika znajdującego się w stanie nadprzewodzącym.

B Fritz Walther Meissner (1882-1974), niemiecki fizyk.

B Robert Ochsenfeld (1901-1993), niemiecki fizyk.

• W. Meißner, R. Ochsenfeld:
Ein neuer Effekt bei Eintritt der Supraleitfähigkeit.
Die Naturwissenschaften **21**, 44 (1933) 787-788.

- Nadprzewodniki wysokotemperaturowe \Leftrightarrow materiały wykazujące nadprzewodnictwo w temperaturze wyższej od temperatury skraplania azotu ($77,4^\circ \text{ K}$) pod ciśnieniem atmosferycznym.

H W 1986 Bednorz i Müller odkryli nadprzewodnictwo tlenku barowo-lantanowo-miedziowego w temperaturze 35° K .

B Johannes Georg Bednorz (ur. 1950), niemiecki fizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1987.

B Karl Alexander Müller (ur. 1927), szwajcarski fizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1987.

P Dla $\text{HgBa}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{8+x}$ $T_C = 135^\circ \text{ K}$.

- Temperatura skraplania helu wynosi $4,2^\circ \text{ K}$.
- Temperatura skraplania wodoru wynosi $20,3^\circ \text{ K}$.
- Temperatura skraplania azotu wynosi $77,4^\circ \text{ K}$.

• J. G. Bednorz and K. A. Müller: *Possible high T_c superconductivity in the Ba-La-Cu-O system*. Zeitschrift für Physik B **64**, 1 (1986) 189-193.

- Metaliczny wodór
- Anomalna woda

- Pod ciśnieniem atmosferycznym cząsteczkowy wodór zamarza w temperaturze 14° K i jest dielektrykiem.
- Zestalony wodór pod ciśnieniem rzędu stu giga paskali (milion atmosfery) staje się nadprzewodzącym metalem.

C Ostatnio pojawiła się hipoteza, że w jądrze Ziemi znajduje się metaliczny wodór w stanie nadprzewodzącym. Hipoteza ta wyjaśnia w prosty sposób pochodzenie ziemskiego pola magnetycznego oraz zmiany jego natężenia w powiązaniu z aktywnością słoneczną.

$$1 \text{ Tr} = 1 \text{ mm Hg} = \frac{101325}{760} \text{ Pa} \approx 133,322 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ atm} = 760 \text{ Tr} = 101325 \text{ Pa} \approx 10^5 \text{ Pa}$$

-
- Anomalna woda \Leftrightarrow woda o cząsteczkach typu $(\text{H}_2\text{O})_n$ i gęstości $1,4 \text{ g/cm}^3$.
 - Anomalna woda nazywana jest także polimeryzowaną wodą lub super gęstą (nadgęstą) wodą.

- Dwuwymiarowa ciecz elektronowa \Leftrightarrow ciecz z elektronów mogących poruszać się swobodnie w dwóch kierunkach, podczas gdy w trzecim kierunku ich ruch jest mocno ograniczony przez bardzo wąską studnię potencjału.
- W przedstawionym przypadku elektrony stanowią dwuwymiarową warstwę zanurzoną w trójwymiarowej przestrzeni.

- Efekt Halla
- Współczynnik Halla
- Napięcie Halla
- Hallotron
- Anomalny efekt Halla
- Kwantowy efekt Halla
- Spinowy efekt Halla

- Efekt Halla \Leftrightarrow zjawisko polegające na powstawaniu pola elektrycznego o natężeniu (\mathbf{E}_H) w umieszczonym w polu magnetycznym o indukcji (\mathbf{B}) przewodniku lub półprzewodniku z prądem o gęstości (\mathbf{j}).

$$\mathbf{E}_H = R_H (\mathbf{B} \times \mathbf{j})$$
$$E_H = R_H B j \sin \alpha$$

- R_H – współczynnik Halla • $[R_H] = \text{m}^3/\text{C}$
- α – kąt zawarty między wektorami (\mathbf{B}) i (\mathbf{j})

H Zjawisko to odkrył Hall w 1879, badając wpływ pola magnetycznego na prąd elektryczny w cienkiej złotej folii.

B Edwin Herbert Hall (1855-1938), amerykański fizyk.

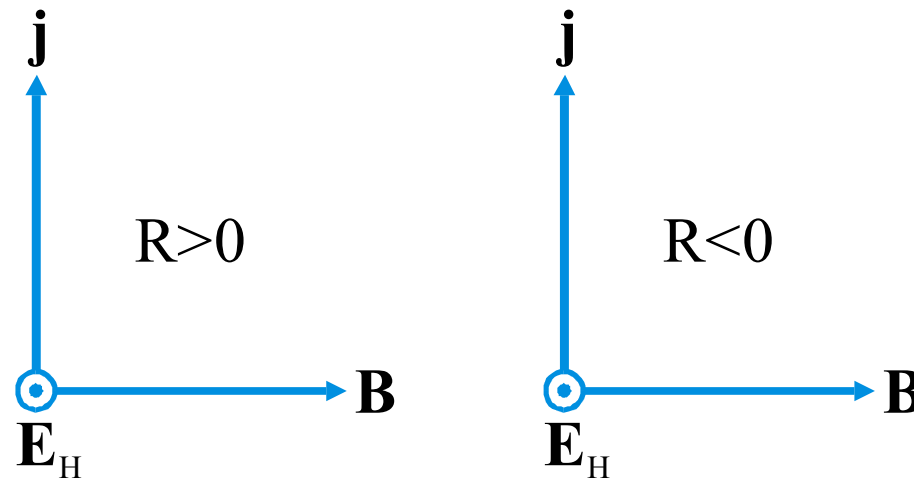
- E. H. Hall: *On a new Action of the Magnet on Electric Current*. American Journal of Mathematics **2**, 3 (1879) 287-292. Praca zawiera fragmenty dysertacji doktorskiej Halla.
- E. H. Hall: *On a new Action of the Magnet on Electric Current*. The Philosophical Magazine **9**, 55 (March 1880) 225-230. Jest to przedruk poprzedniej pracy.

- E. H. Hall: *On the new Action of Magnetism on a permanent Electric Current.*
The Philosophical Magazine **10**, 63 (November 1880) 301-328.
- E. H. Hall: *On the “Rotational Coefficient” in Nickel and Cobalt.*
The Philosophical Magazine **12**, 74 (September 1881) 157-172.
- Edwin H. Hall: *“Rotational Coefficients” of various Metals.*
The Philosophical Magazine **15**, 95 (May 1883) 341-346.

- W pracach Halla “rotational coefficient” to wielkość (E_H/j) mająca wymiar oporu właściwego (rezystywności).
- Wielkość (E_H/j), oznaczana przez (ρ_{xy}) lub (ρ_H), nazywana jest też rezystywnością Halla.
- Rezystywność Halla, gdy wektory (\mathbf{B}) i (\mathbf{j}) są prostopadłe względem siebie, spełnia poniższą relację:

$$\frac{E_H}{j} = R_H B$$

K Wyniki uzyskane przez Halla pojawiły się przed odkryciem elektronu (1897) i siły Lorentza (1892).



- Wzajemne położenie wektorów \mathbf{j} , \mathbf{B} i \mathbf{E}_H w przypadku $R > 0$. (Współczynnik Halla jest dodatni, gdy nośnikami prądu elektrycznego są ładunki dodatnie.)

- Wzajemne położenie wektorów \mathbf{j} , \mathbf{B} i \mathbf{E}_H w przypadku $R < 0$. (Współczynnik Halla jest ujemny, gdy nośnikami prądu elektrycznego są ładunki ujemne.)

- Współczynnik Halla (R_H) posiada następującą interpretację mikroskopową:

$$|R_H| = \frac{1}{ne}$$

- n – koncentracja nośników prądu elektrycznego
- $[n] = \text{m}^{-3}$
- $e = 1,60217653 \times 10^{-19} \text{ C}$ – elementarny ładunek elektryczny

- Napięcie Halla (U_H) \Leftrightarrow napięcie związane z polem elektrycznym powstającym w zjawisku Halla.

P Gdy prostopadłościenna płytka metalowa, w której płynie prąd elektryczny, znajduje się w polu magnetycznym o kierunku prostopadłym do kierunku przepływu prądu, to napięcie Halla jest wprost proporcjonalne do natężenia prądu (I) oraz wartości wektora indukcji magnetycznej (B), a odwrotnie proporcjonalne do grubości (a) mierzonej w kierunku zgodnym z polem magnetycznym. Współczynnikiem proporcjonalności jest współczynnik Halla (R_H).

$$U_H = R_H \frac{IB}{a}$$

- Hallotron \Leftrightarrow przyrząd służący głównie do pomiaru indukcji magnetycznej. Zasada działania hallotronu oparta jest na wykorzystaniu efektu Halla.

C Nazwa hallotron pochodzi od nazwiska Hall.

B Edwin Herbert Hall (1855-1938), amerykański fizyk.

- Anomalny efekt Halla \Leftrightarrow zjawisko opisywane przez dodatkowy człon empiryczny ($R_S\mu_0M$), który należy uwzględnić w wyrażeniu na rezystywność Halla w ferromagnetykach i paramagnetykach:

$$\frac{E_H}{j} = R_H B + R_S \mu_0 M = R_H B \left[1 + \frac{R_S}{R_H} \left(1 - \frac{1}{\mu} \right) \right] = R_H B \left[1 + \frac{\chi R_S}{\mu R_H} \right]$$

- $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ N/A}^2$ – przenikalność magnetyczna próżni
- μ – względna przenikalność magnetyczna ośrodka
- χ – podatność magnetyczna ośrodka
- R_S – anomalny współczynnik Halla
- M – wartość wektora namagnesowania

- Kwantowy efekt Halla \Leftrightarrow zjawisko zachodzące podczas przepływu prądu w dwuwymiarowym gazie elektronowym znajdującym się w niskiej temperaturze i silnym polu magnetycznym, będące kwantową wersją efektu Halla, polegające na tym, że rezystywność Halla przyjmuje skwantowane wartości.

$$\frac{E_H}{j} = \frac{h}{\nu e^2}$$

- $h = 6,6260693 \cdot 10^{-34}$ J·s – stała Plancka
- $e = 1,60217653 \cdot 10^{-19}$ C – ładunek elementarny
- ν – współczynnik przyjmujący całkowite lub ułamkowe wartości
- $\nu = 1, 2, 3, \dots$ [lub] $\nu = 1/3, 2/5, 3/7, 1/5, 2/9, 3/13, 5/2, 12/5, \dots$
- Kwantowy efekt Halla dla całkowitych lub ułamkowych współczynników (ν) nazywany jest odpowiednio całkowitym lub ułamkowym kwantowym efektem Halla.

H Całkowity kwantowy efekt Halla odkrył w 1980 Klaus von Klitzing razem ze współpracownikami.

H Ułamkowy kwantowy efekt Halla odkryli w 1982 Daniel C. Tsui, Horst L. Störmer i Arthur C. Gossard.

H Naturę ułamkowego kwantowego efektu wyjaśnił w 1983 Robert Betts Laughlin.

B Klaus von Klitzing (ur. 1943), niemiecki fizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1985.

B Daniel Chee Tsui (ur. 1939), amerykański fizyk pochodzenia chińskiego, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1998.

B Horst Ludwig Störmer (ur. 1949), niemiecki fizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1998.

B Arthur C. Gossard (ur. 1935), amerykański fizyk.

B Robert Betts Laughlin (ur. 1950), amerykański fizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1998.

- K. von Klitzing, G. Dorda, M. Pepper:
New Method for High-Accuracy Determination of the Fine-Structure Constant Based on Quantized Hall.
Physical Review Letters **45**, 6 (1980) 494-497.
- D. C. Tsui, H. L. Störmer and A. C. Gossard:
Two-Dimensional Magnetotransport in the Extreme Quantum Limit.
Physical Review Letters **48**, 22 (1982) 1559-1562.
- R. B. Laughlin:
Anomalous Quantum Hall Effect: An Incompressible Quantum Fluid with Fractionally Charged Excitations.
Physical Review Letters **50**, 18 (1983) 1395-1398.

- Spinowy efekt Halla \Leftrightarrow zjawisko polegające na tym, że w nieobecności zewnętrznego pola magnetycznego elektrony o antyrównoległych spinach gromadzą się po przeciwnie położonych względem siebie ścianach prostopadłościennego półprzewodnika z prądem.

H Spinowy efekt Halla przewidzieli teoretycznie M. I. Dyakonov oraz V. I. Perel w 1971.

H Termin “spinowy efekt Halla” wprowadził J. E. Hirsch w 1999.

H Spinowy efekt Halla w półprzewodnikach potwierdzili doświadczalnie Y. Kato i współpracownicy w 2004 oraz Joerg Wunderlich i współpracownicy w 2005.

- M. I. Dyakonov and V. I. Perel:
Possibility of Orienting Electron Spins with Current.
Sov. Phys. JETP Let. **13**, 11 (1971) 467-469.
- M. I. Dyakonov and V. I. Perel:
Current-induced spin orientation of electrons in semiconductors.
Physics Letters A **35**, 6 (1971) 459-460.
- J. E. Hirsch:
Spin Hall Effect.
Physical Review Letters **83**, 9 (August 30, 1999) 1834-1837.
- Y. Kato, R. C. Myers, A. C. Gossard, D. D. Awschalom:
Observation of the Spin Hall Effect in Semiconductors.
Science **306**, 5703 (11 November 2004) 1910-1913.
- J. Wunderlich, B. Kaestner, J. Sinova and T. Jungwirth:
Experimental Observation of the Spin-Hall Effect in a Two-Dimensional Spin-Orbit Coupled Semiconductor System.
Physical Review Letters **94**, 4 (2005) 047204.

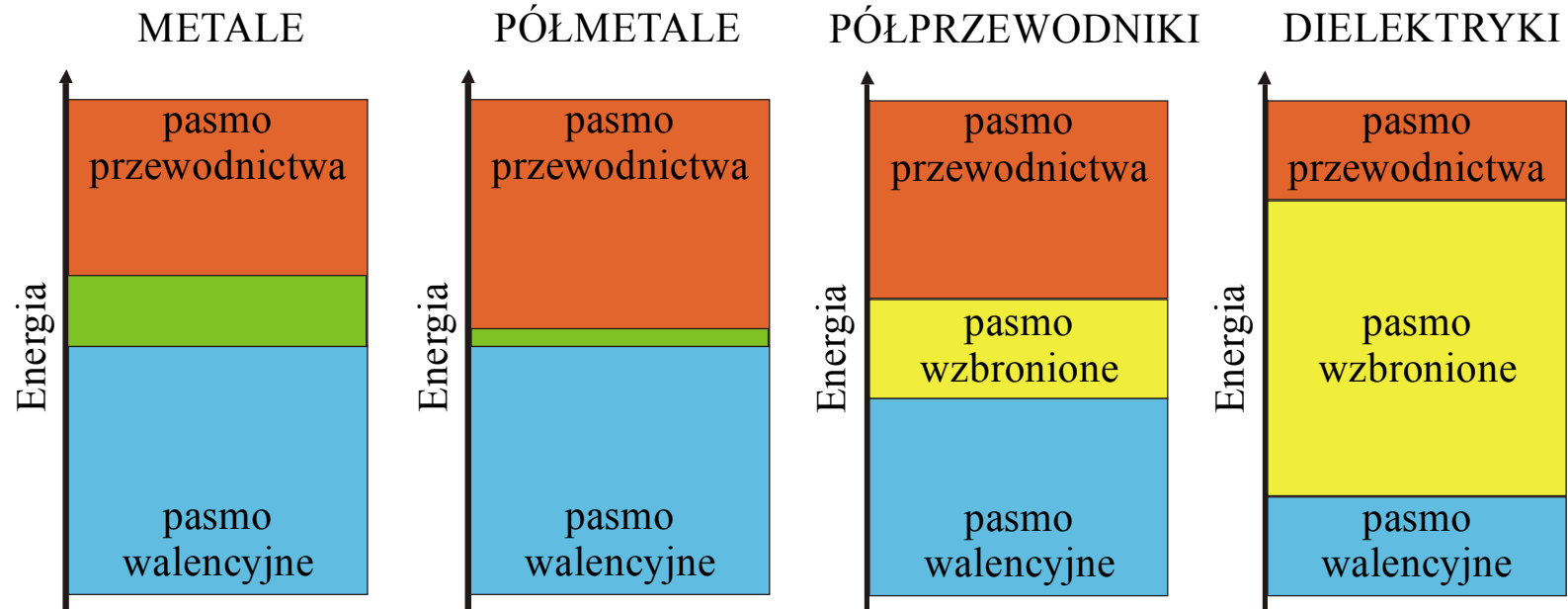
- Kwantowe studnie
- Kwantowe druty
- Kwantowe kropki

-
- Kwantowa studnia \Leftrightarrow dwuwymiarowa struktura kwantowa, którą w praktyce można utworzyć, zmniejszając rozmiary kryształu w jednym kierunku do kilkudziesięciu nanometrów.
 - Cząstka uwięziona w studni kwantowej może poruszać się tylko w dwóch kierunkach (wymiarach).
 - Grubość studni kwantowej powinna być porównywalna z długością fali de Broglie'a uwięzionej cząstki.
 - Przykładem studni kwantowej jest dwuwymiarowy gaz elektronowy.

-
- Kwantowy drut \Leftrightarrow jednowymiarowa struktura kwantowa, którą w praktyce można utworzyć, zmniejszając rozmiary kryształu w dwóch kierunkach do kilkudziesięciu nanometrów (nie mniej niż długość fali de Broglie'a uwięzionej w nim cząstki).
 - Cząstka uwięziona w drucie kwantowym może poruszać się tylko w jednym kierunku (wymiarze).
 - Przykładem drutu kwantowego jest jednowymiarowy gaz elektronowy.
 - Drut kwantowy nazywany jest też nanodrutem.

-
- Kwantowa kropka \Leftrightarrow zero-wymiarowa struktura kwantowa, którą w praktyce można utworzyć, zmniejszając rozmiary kryształu we wszystkich trzech kierunkach do kilku nanometrów (nie mniej niż długość fali de Broglie'a uwięzionej w niej cząstki).
 - Kwantowe kropki nazywane są też nanokryształami, kryształami zero-wymiarowymi lub sztucznymi atomami.

- Pasmowy model ciała stałego
- Dielektryki (izolatory)
- Półprzewodniki
- Półmetale
- Metale
- Przejście metal-dielektryk
- Przejście półmetal-półprzewodnik



- Pasmowy model ciała stałego

- Kolorem zielonym zaznaczono wspólną część pasm przewodnictwa i walencyjnego.

-
- Dielektryki (izolatory) \Leftrightarrow materiały praktycznie nieprzewodzące prądu elektrycznego, o oporze elektrycznym właściwym większym od $10^8 \Omega\text{m}$.
 - Wielkością charakteryzującą dany dielektryk jest jego stała dielektryczna.
 - W pasmowym modelu ciała stałego dielektrykom odpowiada szerokość pasma wzbronionego większa od 5 eV.

- Półprzewodniki \Leftrightarrow substancje o oporze elektrycznym właściwym (ρ) większym niż przewodników, a mniejszym niż dielektryków.

$$10^{-3} \Omega\text{m} < \rho < 10^8 \Omega\text{m}$$

- W pasmowym modelu ciała stałego półprzewodnikom odpowiada szerokość pasma wzbronionego mniejsza od 5 eV.

-
- Półmetale \Leftrightarrow substancje dla których w pasmowym modelu ciała stałego dno pasma przewodnictwa i szczyt pasma walencyjnego zachodzą na siebie w niewielkim stopniu.
 - Klasycznymi półmetalicznymi pierwiastkami są arsen (As), antymon (Sb), bizmut (Bi), α -cyna (Sn) oraz grafit (odmiana alotropowa węgla).

- Metale \Leftrightarrow substancje o małym oporze elektrycznym właściwym (ρ).

$$10^{-8} \Omega\text{m} < \rho < 10^{-3} \Omega\text{m}$$

- W pasmowym modelu ciała stałego w przypadku metali pasma przewodnictwa i walencyjne częściowo pokrywają się.

-
- Przejście metal-dielektryk \Leftrightarrow przejście fazowe pierwszego rodzaju podczas którego następuje zmiana typu przewodnictwa elektrycznego odpowiadającego metalom na typ przewodnictwa elektrycznego odpowiadającego dielektrykom.

- Przejście półmetal-półprzewodnik \Leftrightarrow przejście fazowe pierwszego rodzaju podczas którego następuje zmiana typu przewodnictwa elektrycznego odpowiadającego półmetalom na typ przewodnictwa elektrycznego odpowiadającego półprzewodnikom.

- Fala gęstości ładunku \Leftrightarrow sinusoidalnie modulowana w przestrzeni gęstość ładunku elektronów przewodnictwa powstająca w wyniku lokalnego odkształcenia sieci krystalicznej przez poruszające się elektrony w kryształach.
- Kwanty fal gęstości ładunku nazywane są polaronami.

H Istnienie fal gęstości ładunku pierwszy przewidział Rudolf Peierls w latach trzydziestych ubiegłego wieku.

B Rudolf Ernst Peierls (1907-1995), brytyjski fizyk pochodzenia niemieckiego.

- Fala gęstości spinu \Leftrightarrow zmieniająca się sinusoidalnie w przestrzeni gęstość spinu elektronów przewodnictwa.
- Kwanty fal gęstości spinu nazywane są magnonami.

- Mikroskopowy
- Makroskopowy
- Mezoskopowy
- Mezoskopika

- Mikroskopowy \Leftrightarrow dotyczący małych obiektów: cząsteczek, atomów, jąder atomowych oraz cząstek elementarnych.

K Obiekty mikroskopowe są przedmiotem badań fizyki kwantowej.

-
- Makroskopowy \Leftrightarrow dotyczący obiektów, znacznie większych niż atomy i cząsteczki, które można obserwować gołym okiem.

K Obiekty makroskopowe są opisywane w ramach fizyki klasycznej.

-
- Mezoskopowy \Leftrightarrow dotyczący obiektów w skali pośredniej między skalami mikroskopową a makroskopową.

-
- Mezoskopika \Leftrightarrow dział fizyki dotyczący badania struktur o wymiarach liniowych większych niż nanometry i mniejszych niż mikrometry.

- Przejścia fazowe pierwszego rodzaju
- Przejścia fazowe drugiego rodzaju
- Nadpłynność (nadciekłość)

- Przejścia fazowe pierwszego rodzaju \Leftrightarrow zjawiska polegające na skokowych zmianach niektórych wielkości fizycznych ciała jednorodnego chemicznie i fizycznie, podczas których ciało to pobiera lub oddaje ciepło. Przykładami przejść fazowych pierwszego rodzaju są zmiany stanu skupienia.

- Przejścia fazowe drugiego rodzaju \Leftrightarrow zjawiska polegające na skokowych zmianach niektórych wielkości fizycznych ciała jednorodnego chemicznie i fizycznie, podczas których ciało to nie pobiera i nie oddaje ciepła.
- Przykładami przejść fazowych drugiego rodzaju są:
 - nagła utrata lepkości przez ciekły hel ${}^4_2\text{He}$ poniżej temperatury 2,19 K (nadpłynność),
 - nagła utrata lepkości przez ciekły hel ${}^3_2\text{He}$ poniżej temperatury 0,0027 K (nadpłynność),
 - przejście żelaza w temperaturze Curie z ferromagnetyka w paramagnetyk,
 - nagła utrata oporu elektrycznego niektórych metali poniżej temperatury krytycznej (nadprzewodnictwo).

• Nadpłynność (nadciekłość) \Leftrightarrow zjawisko polegające na zaniku lepkości ciekłego helu ${}^4_2\text{He}$ i ${}^3_2\text{He}$ w bardzo niskich temperaturach bezwzględnych. Hel ${}^4_2\text{He}$ staje się nadciekły poniżej temperatury 2,19 K, a hel ${}^3_2\text{He}$ – poniżej temperatury 0,0027 K.

H Nadpłynność helu ${}^4_2\text{He}$ odkrył Kapica w 1937.

H Teorię nadciekłości helu ${}^4_2\text{He}$ opracował Landau w 1941.

H Nadpłynność helu ${}^3_2\text{He}$ odkryli i zbadali Osheroff, Lee i Richardson w 1972.

B Piotr Leonidowicz Kapica (1894-1984), radziecki (rosyjski) fizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1978.

B Lew Dawidowicz Landau (1908-1968), radziecki (rosyjski) fizyk teoretyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1962.

B David Morris Lee (ur. 1931), amerykański fizyk, laureat Nagrody Nobla z Fizyki w 1996.

B Robert Coleman Richardson (ur. 1937), amerykański fizyk, laureat Nagrody Nobla z Fizyki w 1996.

B Douglas Dean Osheroff (ur. 1945), amerykański fizyk, laureat Nagrody Nobla z Fizyki w 1996.

- P. Kapitza:

Viscosity of liquid helium below the λ -point.

Nature **141** (8 January 1938) 74-74.

- Л. Д. Ландау:

Теория сверхтекучести гелия-II.

ЖЭТФ **11**, 6 (1941) 592.

[Istnieje przedruk:] УФН **93** (1967) 495-520.

- D. D. Osheroff, R. C. Richardson, D. M. Lee:

Evidence for a New Phase of Solid He³.

Physical Review Letters **28**, 14 (1972) 885-888.

- Ochładzanie laserowe do super niskich temperatur \Leftrightarrow spowolnianie ruchu atomów przez światło laserowe, co powoduje obniżenie temperatury gazu do temperatury ok. 10^{-7} K.

H Chu, Cohen-Tannoudji oraz Phillips otrzymali w 1997 Nagrodę Nobla z fizyki “za rozwój metod chłodzenia i pułapkowania atomów światłem laserowym”.

B Steven Chu (ur. 1948), amerykański fizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1997.

B Claude Cohen-Tannoudji (ur. 1933), francuski fizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1997.

B William Daniel Phillips (ur. 1948), amerykański fizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1997.

- Spin elektronu
- Spiny innych cząstek
- Fermiony
- Bozony
- Zakaz Pauliego
- Kondensat Bosego-Einsteina
- Lasery atomowe

- Spin elektronu (\mathbf{K}_s) \Leftrightarrow wielkość wektorowa charakteryzująca elektron, której wartość określona jest poniżej.

$$K_s = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \hbar = \sqrt{s(s+1)} \cdot \hbar, \quad s = \frac{1}{2}, \quad [K_s] = \text{J} \cdot \text{s}$$

- $\hbar = h/2\pi$ • h – stała Plancka • s – spinowa liczba kwantowa
- W zewnętrznym polu magnetycznym spin ustawia się tak, aby jego rzut (K_{sB}) na kierunek wektora indukcji (\mathbf{B}) przyjmował jedną z dwóch dozwolonych wartości ($+0,5 \hbar$) lub ($-0,5 \hbar$).

$$K_{sB} = m_s \cdot \hbar, \quad m_s = \pm \frac{1}{2}$$

- m_s – spinowa magnetyczna liczba kwantowa

H Pojęcie spinu elektronu wprowadzili Uhlenbeck i Goudsmit w 1925.

B George Eugene Uhlenbeck (1900-1988), amerykański fizyk pochodzenia holenderskiego.

B Samuel Abraham Goudsmit (1902-1978), amerykański fizyk pochodzenia holenderskiego.

- G. E. Uhlenbeck, S. Goudsmit:

Ersetzung der Hypothese vom unmechanischen Zwang durch eine Forderung bezüglich des inneren Verhaltens jedes einzelnen Elektrons.

Naturwissenschaften **13**, 47 (November 20, 1925) 953.

Replacement of the Hypothesis of Nonmechanical Connection by an Internal Degree of Freedom of the Electron.

- G. E. Uhlenbeck and S. Goudsmit:

Spinning Electrons and the Structure of Spectra.

Nature **117** (February 20, 1926) 264-265.

- Spin nazywany jest też własnym momentem pędu.

U Spinowa liczba kwantowa nazywana jest potocznie spinem.

K Pojęcie spinu można rozszerzyć na inne cząstki elementarne oraz jądra atomowe.

$$K_s = \sqrt{s(s+1)} \cdot \hbar$$

- Spinowe liczby kwantowe (s)
 - bozonów są dodatnimi liczbami całkowitymi lub zerem (0, 1, 2, 3, ...),
 - fermionów są dodatnimi liczbami połówkowymi (1/2, 3/2, 5/2, ...).
- Rzut (K_{sB}) spinu na kierunek wektora indukcji (\mathbf{B}) zewnętrznego pola magnetycznego może przyjmować jedną z $(2s+1)$ wartości.

$$K_{sB} = m_s \cdot \hbar, \quad m_s = s, (s-1), (s-2), \dots, (-s)$$

- Fermiony \Leftrightarrow cząstki elementarne mające spiny połówkowe. Fermionami są leptony, kwarki oraz bariony. Najbardziej znanym fermionem jest elektron, którego spin ma wartość $1/2$.

C Nazwa fermion pochodzi od nazwiska Fermi.

B Enrico Fermi (1901-1954), włoski fizyk-teoretyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1938.

- Bozony \Leftrightarrow cząstki elementarne o spinach całkowitych. Bozonami są mezony oraz nośniki oddziaływań silnych, słabych i elektromagnetycznych. Najbardziej znanym bozonem jest foton, którego spin ma wartość równą 1.

C Nazwa bozon pochodzi od nazwiska Bose.

B Satyendra Nath Bose (1894-1974), hinduski fizyk-teoretyk.

• Zakaz Pauliego \Leftrightarrow zasada głaszająca, że w danym stanie kwantowym może znajdować się tylko jeden fermion. Z zakazu Pauliego wynikają m.in. reguły dotyczące rozmieszczenia elektronów w atomach. Na danej powłoce elektronowej, określonej główną liczbą kwantową (n), może znajdować się nie więcej niż $(2n^2)$ elektronów.

H Zasadę zakazu sformułował Pauli w 1925.

B Wolfgang Ernst Pauli (1900-1958), szwajcarski fizyk-teoretyk pochodzenia austriackiego, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1945.

• W. Pauli Jr.:

Über den Zusammenhang des Abschlusses der Elektronengruppen im Atom mit der Komplexstruktur der Spektren.
Zeitschrift für Physik **31**, 1 (1925) 765-783.

- Kondensat Bosego-Einsteina \Leftrightarrow nowa forma materii, tworzą ją identyczne bozony, które w temperaturze bliskiej zera bezwzględnej znajdują się w takim samym stanie kwantowym o najniższej dozwolonej energii. Bozony te zachowują się jak pojedynczy “superatom”.

H Istnienie kondensatu zostało przewidziane niezależnie w 1924 przez Bosego oraz Einsteina.

H Pierwszy kondensat utworzyli Cornell, Wieman i współpracownicy 5 czerwca 1995 w Joint Institute for Laboratory Astrophysics w Boulder (Kolorado). Ochłodzili oni 2000 atomów rubidu ${}^{87}_{37}\text{Rb}$ do temperatury $1,7 \cdot 10^{-7}$ K, uzyskali kondensat Bosego-Einsteina i utrzymali go przez 10 sekund.

H Cornell i Wieman oraz Ketterle otrzymali w 2001 Nagrodę Nobla z fizyki “za uzyskanie kondensacji Bosego-Einsteina w rozrzedzonych gazach atomów alkalicznych, oraz za wczesne podstawowe badania własności tych kondensatów”.

B Albert Einstein (1879-1955), genialny fizyk-teoretyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1921.

B Satyendra Nath Bose (1894-1974), indyjski fizyk-teoretyk.

B Carl Edwin Wieman (ur. 1951), amerykański fizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 2001.

B Wolfgang Ketterle (ur. 1957), niemiecki fizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 2001.

B Eric Allin Cornell (ur. 1961), amerykański fizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 2001.

- S. N. Bose:

Plancks Gesetz und Lichtquantenhypothese.

Zeitschrift für Physik **26**, 1 (1924)178-181.

- Albert Einstein:

Quantentheorie des einatomigen idealen Gases.

Sitzungsberichte der Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften (1924) 261-267.

- Albert Einstein:

Quantentheorie des einatomigen idealen Gases II.

Sitzungsberichte der Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften (1925) 3-14.

- Albert Einstein:

Quantentheorie des einatomigen idealen Gases.

Sitzungsberichte der Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften (1925) 18-25.

-
- Lasery atomowe \Leftrightarrow urządzenia wytwarzające spójne, swobodnie poruszające się fragmenty lub strumienie kondensatu Bosego-Einsteina.
 - Pierwszy laser atomowy powstał w 1997.

- Fizyka powierzchni \Leftrightarrow dziedzina fizyki, której przedmiotem badań są zjawiska zachodzące na granicy dwóch faz:
 - ciało stałe-ciecz
 - ciało stałe-gaz
 - ciało stałe-próżnia
 - ciecz-gaz

- Klastery \Leftrightarrow małe wieloatomowe cząstki zawierające do 3×10^7 atomów.
- Termin ten odnosi się też do połączeń protonów i neutronów w jądrach atomowych. Na przykład cząstka alfa (znana też jako α -klaster) składa się z dwóch protonów i dwóch neutronów.
- Klasterologia stanowi już odrębną dziedzinę nauki, której przedmiotem badań są zjawiska kolektywne.
- Spektakularnymi przykładami klasterów są fullereny i nanorurki.
- Z ilu atomów powinien składać się klaster, aby zaszło w nim dane zjawisko kolektywne? Na to i inne ciekawe pytania będzie można jednoznacznie odpowiedzieć, w ramach klasterologii.

- Ciekły kryształ \Leftrightarrow substancja w stanie pośrednim między cieczą a kryształem. Podstawową cechą ciekłych kryształów jest anizotropia ich własności fizycznych. Dlatego nazywane są też cieczami anizotropowymi. Wpływ temperatury, pola elektrycznego i magnetycznego oraz innych czynników na barwę światła selektywnie odbitego od powierzchni ciekłego kryształu znalazł wiele zastosowań praktycznych.

H Ciekłe kryształy odkrył Reinitzer w 1888.

H Nazwę ciekły kryształ zaproponował Lehmann w 1889.

H Podział ciekłych kryształów na nematyczne, smektyczne i cholesterolowe wprowadził Friedel w 1922.

B Friedrich Richard Kornelius Reinitzer (1857-1927), austriacki botanik.

B Otto Lehmann (1855-1922), niemiecki fizyk.

B Georges Friedel (1865-1933), francuski krytalograf.

- F. Reinitzer:

Beiträge zur Kenntnis des Cholesterins.

Monatshefte für Chemie **9** (1888) 421-441.

Contributions to the understanding of cholesterol.

- O. Lehmann:

Über fließende Krystalle.

Zeitschrift für Physikalische Chemie **4** (1889) 462-472.

On Flowing Crystals.

- G. Friedel:

Les états mésomorphes de la matière.

Annales de Physique **18** (1922) 273-474.

The mesomorphic states of matter.

- Polaryzacja elektryczna
- Namagnesowanie
- Moment toroidalny
- Tensor deformacji
- Tensor naprężenia
- Ferroiki
- Pętla histerezy dielektrycznej
- Pętla histerezy magnetycznej
- Pętla histerezy ferrotoroidalnej
- Pętla histerezy ferroelastycznej
- Multiferroiki

- Polaryzacja elektryczna (\mathbf{P}) \Leftrightarrow wielkość wektorowa mierzona w amperach na metr kwadratowy [C/m^2], będąca sumą momentów dipolowych wszystkich cząsteczek dielektryka (\mathbf{p}_i) podzieloną przez jego objętość (V).

$$\mathbf{P} = \frac{1}{V} \sum_{i=1}^N \mathbf{p}_i$$

- Polaryzacja elektryczna nazywana jest też wektorem polaryzacji.

- Namagnesowanie (\mathbf{M}) \Leftrightarrow wielkość wektorowa mierzona w amperach na metr [A/m], będąca stosunkiem sumy momentów magnetycznych cząsteczek (\mathbf{m}_i) znajdujących się w danej próbce do objętości (V) tej próbki.

$$\mathbf{M} = \frac{1}{V} \sum_{i=1}^N \mathbf{m}_i$$

- Namagnesowanie nazywane jest też wektorem namagnesowania.

- Moment toroidalny (\mathbf{t}) \Leftrightarrow wielkość wektorowa charakteryzująca dyskretny zbiór (N) płaskich obwodów z prądami.

$$\mathbf{t} = \sum_{i=1}^N \mathbf{r}_i \times \mathbf{m}_i$$

- \mathbf{r}_i – i-ty promień wodzący
- \mathbf{m}_i – moment magnetyczny i-tego obwodu z prądem

H Pojęcie momentu toroidalnego w ogólnym przypadku wprowadzili V. M. Dubovik i L. A. Tosunian w 1983.

- В. М. Дубовик, Л. А. Тосунян:
Тороидные моменты в физике электромагнитных и слабых взаимодействий.
Физика элементарных частиц и атомного ядра **14**, 5 (1983) 1193-1228.

-
- Tensor deformacji \Leftrightarrow symetryczny tensor drugiego rzędu opisujący deformacje ciała stałego (kryształu).
 - Składowe tensora deformacji są wielkościami bezwymiarowymi.

-
- Tensor naprężenia \Leftrightarrow symetryczny tensor drugiego rzędu opisujący rozkład gęstości powierzchniowych sił działających na ciało stałe (kryształ).
 - Składowe tensora naprężenia podawane są w paskalach, czyli niutonach na metr kwadratowy.

-
- Ferroiki \Leftrightarrow grupa materiałów do której należą ferroelektryki, ferromagnetyki, ferrotoroiki oraz ferroelastyki.
 - Ferroelektryki \Leftrightarrow substancje charakteryzujące się spontaniczną polaryzacją elektryczną.
 - Ferromagnetyki \Leftrightarrow substancje charakteryzujące się spontanicznym namagnesowaniem.
 - Ferrotoroiki \Leftrightarrow substancje charakteryzujące się spontaniczną gęstością momentu toroidalnego.
 - Ferroelastyki \Leftrightarrow substancje charakteryzujące się spontaniczną deformacją struktury.

H Termin ferrotoroiki wprowadził D. G. Sannikov.

H Termin ferroiki zaproponował Kêitsiro Aizu w 1969 i 1970.

ferroics – ferroiki

toroidal moment – moment toroidalny

ferrotoroics – ferrotoroiki

ferrotoroidicity – ferrotoroidalność

- Kêitsiro Aizu:

Possible Species of “Ferroelastic” Crystals and of Simultaneously Ferroelectric and Ferroelastic Crystals.

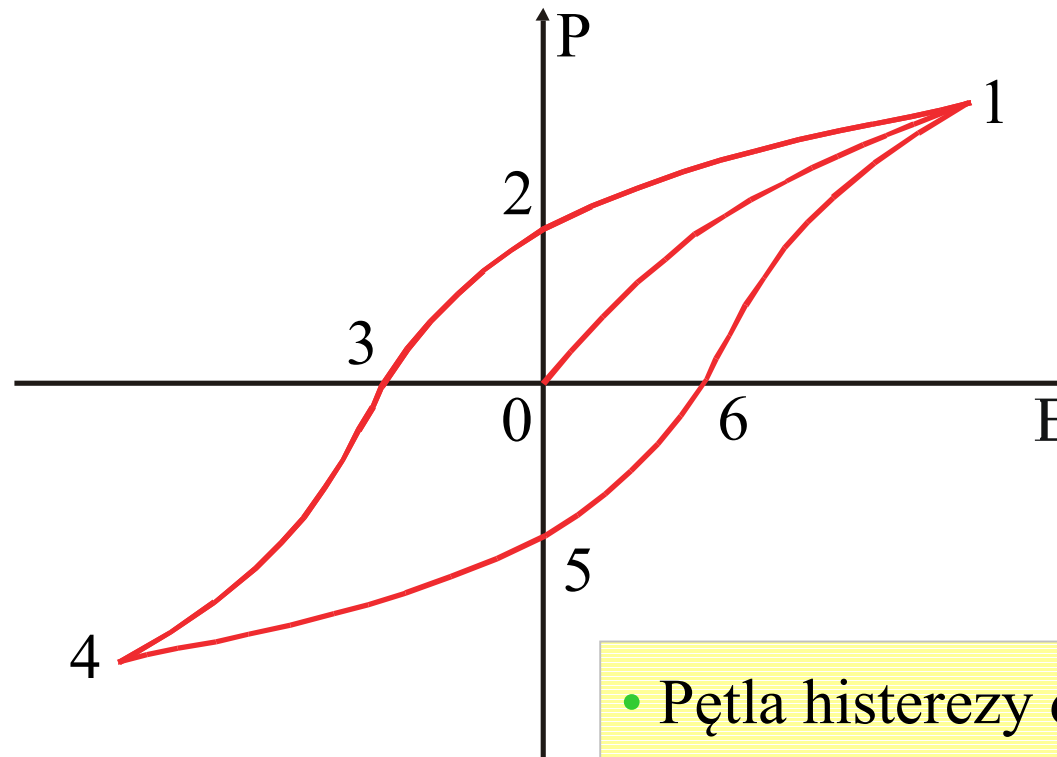
Journal of the Physical Society of Japan **27**, 2 (1969) 387-396.

- Kêitsiro Aizu:

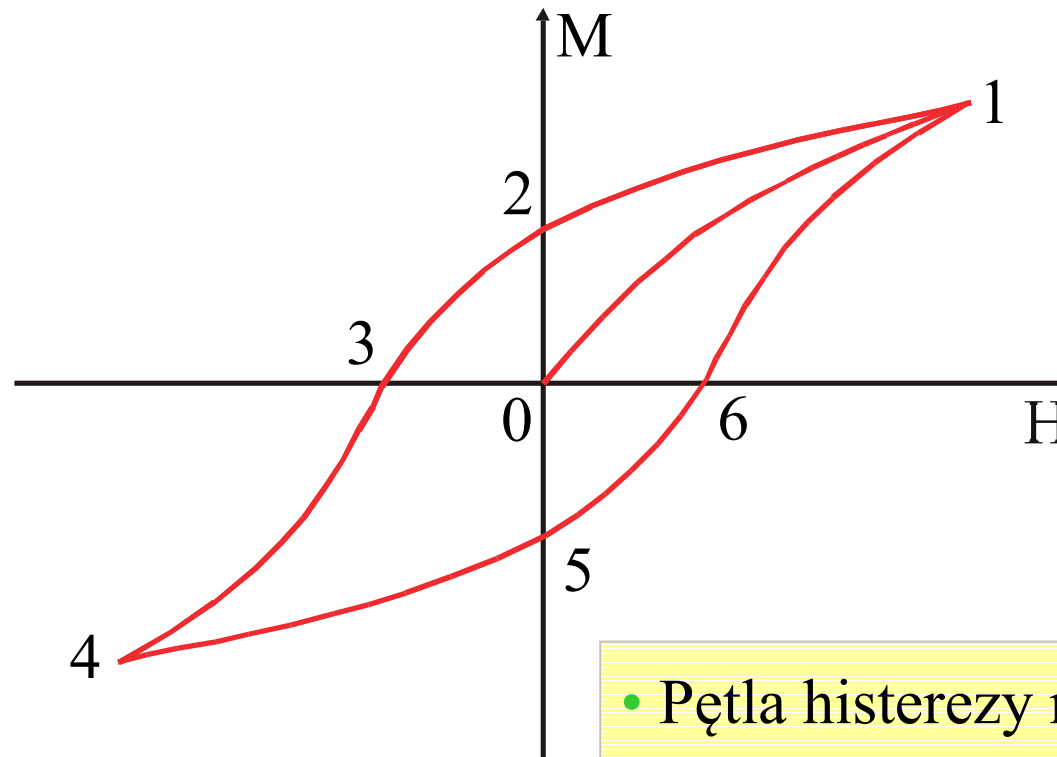
Possible Species of Ferromagnetic, Ferroelectric, and Ferroelastic Crystals.

Physical Review B **2**, 3 (1970) 754-772.

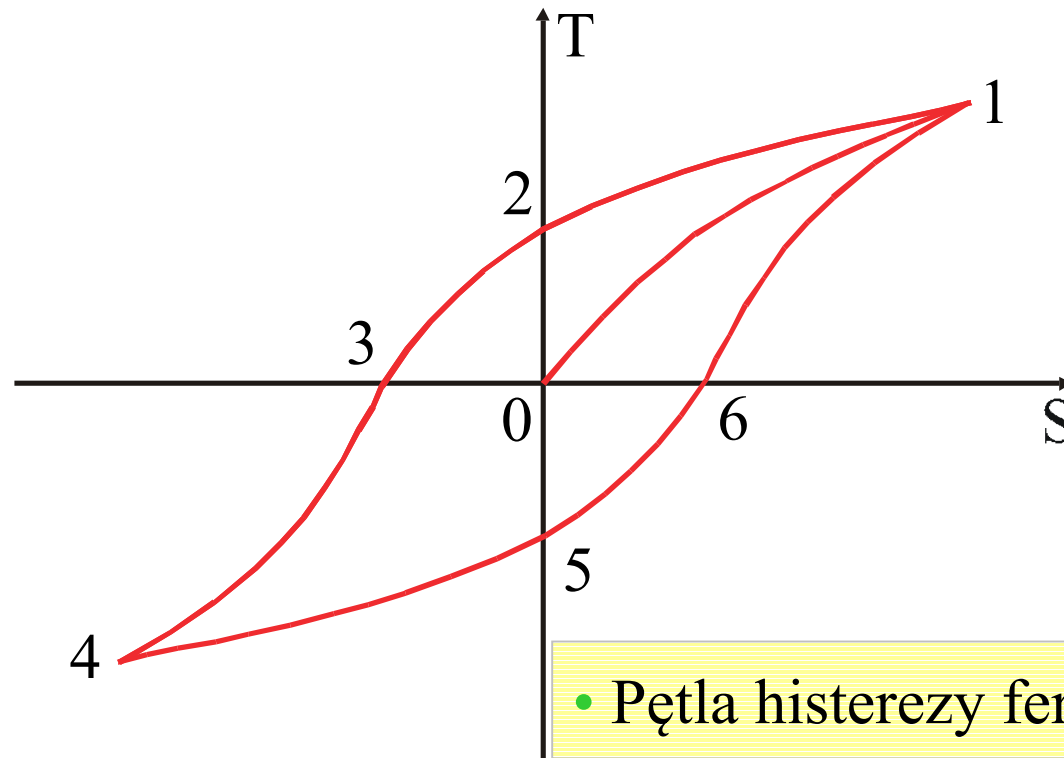
- Pętla histerezy dielektrycznej \Leftrightarrow wykres zależności wartości polaryzacji (P) ferroelektryka od wartości natężenia (E) zewnętrznego pola elektrycznego.



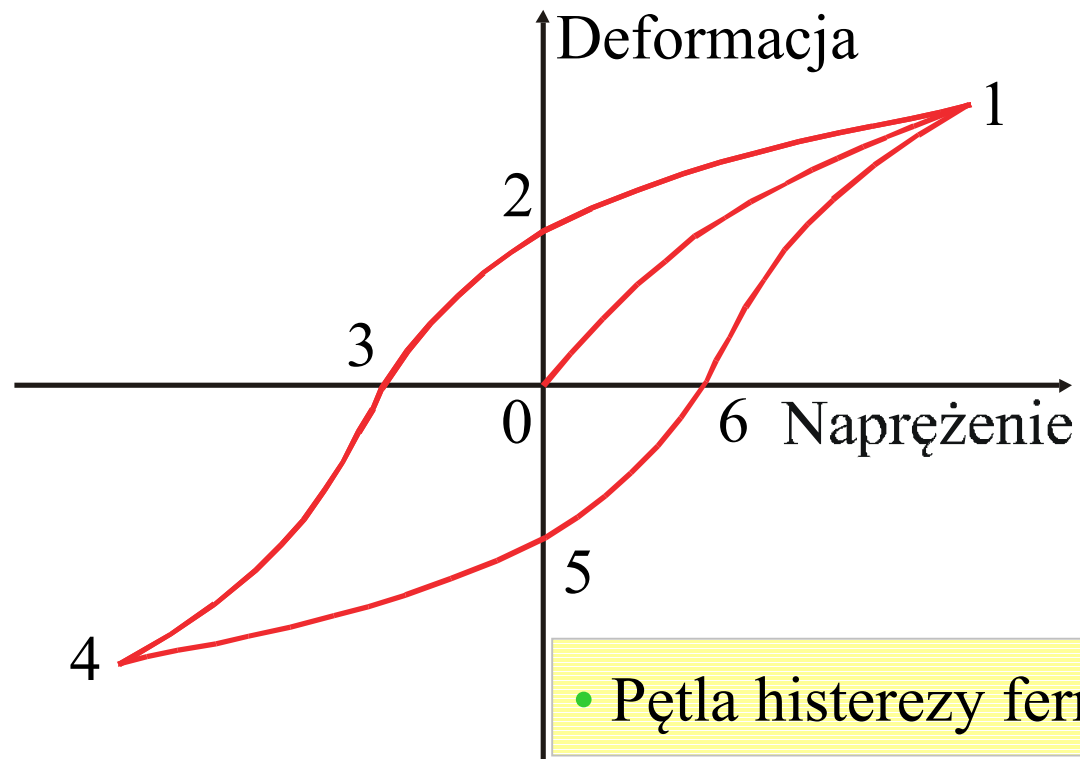
- Pętla histerezy magnetycznej \Leftrightarrow wykres zależności wartości namagnesowania (M) od wartości natężenia (H) zewnętrznego pola magnetycznego.



- Pętla histerezy ferrotoroidalnej \Leftrightarrow wykres zależności wartości gęstości momentu toroidalnego (T) od wartości wektora $\mathbf{S} = \mathbf{E} \times \mathbf{H}$.



- Pętla histerezy ferroelastycznej \Leftrightarrow wykres zależności składowej tensora deformacji spontanicznej kryształu od składowej tensora naprężenia mechanicznego.



-
- Multiferroiki \Leftrightarrow materiały charakteryzujące się jednocześnie co najmniej dwoma wymienionymi niżej cechami:
 - spontaniczną polaryzacją elektryczną
 - spontanicznym namagnesowaniem
 - spontanicznym momentem toroidalnym
 - spontaniczną deformacją struktury

- Fullereny (fulereny) \Leftrightarrow cząsteczki zawierające od 28 do 1500 atomów węgla rozmieszczonych w regularny sposób na zamkniętej wirtualnej powierzchni.

H Fullereny odkryli w 1985 Kroto oraz Curl i Smalley z zespołem.

C Nazwa fullereny pochodzi od nazwiska Fuller.

B Richard Buckminster Fuller (1895-1983), amerykański architekt.

B Robert Floyd Curl Jr. (ur. 1933), amerykański chemik, laureat Nagrody Nobla z chemii w 1996.

B Sir Harold Walter Kroto (ur. 1939), angielski chemik, laureat Nagrody Nobla z chemii w 1996.

B Richard Errett Smalley (1943-2005), amerykański chemik, laureat Nagrody Nobla z chemii w 1996.

• Harold Kroto, James R. Heath, Sean O'Brien, Robert Curl and Richard Smalley:

C(60): Buckminsterfullerene.

Nature **318** (November 14, 1985) 162-163.

- Nanorurki węglowe \Leftrightarrow cząsteczki utworzone z atomów węgla rozmieszczonych w regularny sposób na bocznej powierzchni wirtualnego walca.
- Nanorurki węglowe mogą mieć średnicę rzędu jednego nanometra.

H Nanorurki węglowe odkrył Iijima w 1991.

B Sumio Iijima (ur. 1939), japoński fizyk.

• Sumio Iijima:

Helical microtubules of graphitic carbon.

Nature **354**, 6348 (7 November 1991) 56-58.

- Grafen \Leftrightarrow dwuwymiarowa struktura utworzona z atomów węgla.

H Za badania grafenu Gejm i Nowosiołow otrzymali w 2010 Nagrodę Nobla z fizyki.

B Andriej Konstantinowicz Gejm (ur. 1958), rosyjsko-holenderski fizyk pochodzenia niemieckiego, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 2010.

B Konstantin Siergiejewicz Nowosiołow (ur. 1974), rosyjski fizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 2010.

- K. S. Novoselov, *et al.*:

Electric Field Effect in Atomically Thin Carbon Films.

Science **306** (22 October 2004) 666-669.

- K. S. Novoselov, *et al.*:

Two-dimensional atomic crystals.

Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America **102**, 30 (2005) 10451-10453.

- K. S. Novoselov, A. K. Geim, *et al.*:

Two-dimensional gas of massless Dirac fermions in graphene.

Nature **438** (10 November 2005) 197-200.

- A. K. Geim and K. S. Novoselov:

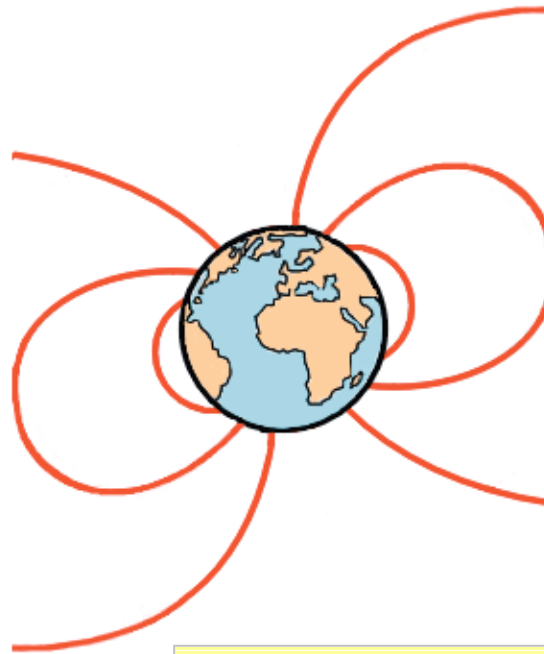
The rise of graphene.

Nature Materials **6** (2007) 183-191.

10. Zachowanie się substancji w super silnych polach magnetycznych

- Pole magnetyczne Ziemi
- Pasy radiacyjne Van Allena
- Super silne pola magnetyczne
- Zachowanie się substancji w super silnych polach magnetycznych

- Pole magnetyczne Ziemi \Leftrightarrow pole magnetyczne, którego źródłem są prądy elektryczne w zewnętrznym jądrze Ziemi.
- Indukcja [natężenie] pola magnetycznego Ziemi przyjmuje wartości od 30 mikrotlesli [24 A/m] na małych i średnich szerokościach geograficznych do 60 mikrotlesli [48 A/m] w pobliżu biegunów magnetycznych.



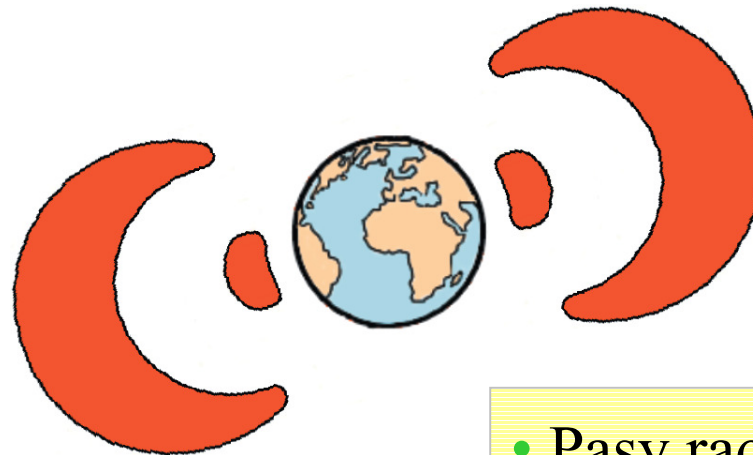
- Linie sił pola magnetycznego Ziemi

- Pasy radiacyjne Van Allena \Leftrightarrow dwa rozłączne obszary otaczające Ziemię, w których poruszają się po spiralnych torach naładowane cząstki promieniowania kosmicznego “przechwycone” przez pole magnetyczne naszej planety.

Wewnętrzny pas nad równikiem rozciąga się od wysokości 1000 km do wysokości 5000 km, a zewnętrzny – od 15 000 km do 25 000 km.

H Pasy radiacyjne odkrył Van Allen w 1958.

B James Alfred Van Allen (1914-2006), amerykański fizyk.



• Pasy radiacyjne Van Allena

- Super silne pola magnetyczne \Leftrightarrow pola magnetyczne o natężeniu [indukcji] powyżej 80×10^6 A/m [100 T].



- Uwaga: silne pole magnetyczne!

- Г. М. Страховский, Н. В. Кравцов:

Сильные магнитные поля.

Успехи физических наук **70**, 4 (1960) 693-714.

W pracy omówiono metody wytwarzania silnych pól magnetycznych.

$$1 \text{ Gs} = 10^{-4} \text{ T}$$

$$1 \text{ Oe} = \frac{1000}{4\pi} \cdot \frac{\text{A}}{\text{m}} \approx 79,577 \cdot \frac{\text{A}}{\text{m}}$$

10. Zachowanie się substancji w super silnych polach magnetycznych

- Przykłady zjawisk zachodzących w super silnych polach magnetycznych można znaleźć między innymi w:

- J. K. Daugherty & A. K. Harding:

- Pair production in superstrong magnetic fields.*

- Astrophysical Journal **273** (October 15, 1983) 761-773.

- V. R. Khalilov:

- Electroweak Nucleon Decays in a Superstrong Magnetic Field.*

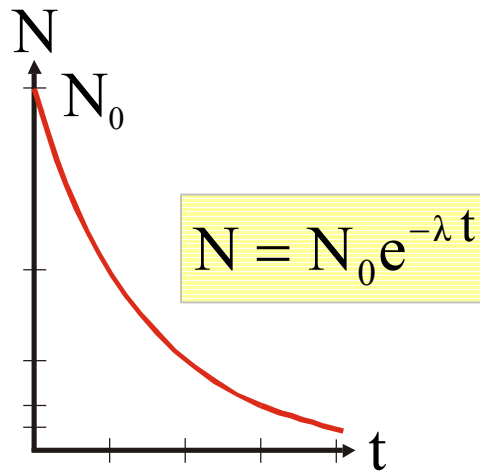
- Teoreticheskaya i Matematicheskaya Fizika **145**, 1 (2005) 108-122.

- Zjawiska liniowe
- Zjawiska nieliniowe

- Zjawiska liniowe \Leftrightarrow zjawiska opisywane przez liniowe równania różniczkowe.

P Przykładem zjawiska liniowego jest rozpad promieniotwórczy jąder atomowych, dynamika tego procesu opisywana jest poniższym równaniem.

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N$$



- Wykres zależności liczby jąder (N), które pozostały w próbce pierwiastka promieniotwórczego, od czasu (t).
- N_0 – początkowa liczba jąder
- λ – stała rozpadu (zaniku)

- Zjawiska nieliniowe \Leftrightarrow zjawiska opisywane przez nieliniowe równania różniczkowe.

P Przykładem zjawiska nieliniowego jest przebieg reakcji chemicznych, dynamika tego procesu w pewnych przypadkach* może być opisana poniższym równaniem.

$$\frac{dn_i}{dt} = \sum_{k=1}^N \beta_k^i n_k + \sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^N \gamma_{kl}^i n_k n_l + \alpha_i, \quad (i = 1, \dots, N)$$

gdzie współczynniki β_k^i , γ_{kl}^i oraz wyraz wolny α_i są stałe.

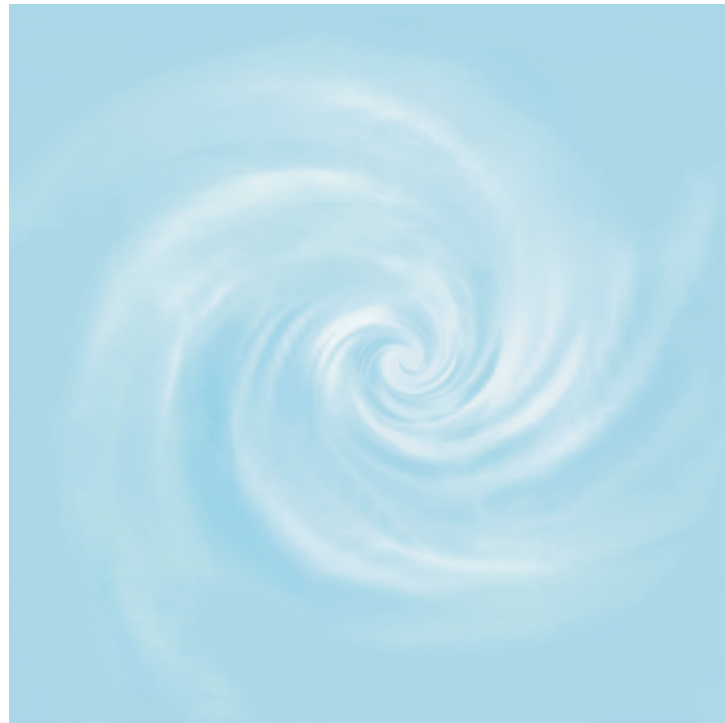
- Powyższe równania stanowią układ równań różniczkowych zwyczajnych, pierwszego rzędu, autonomicznych i nieliniowych.
- W równaniach tych człon nieliniowy jest formą biliniową.

* Z. Osiak: *Zastosowanie teorii grafów do analizy stabilności stanów stacjonarnych w sieciach reakcji enzymatycznych*. Self Publishing (2012). ISBN: 978-83-272-3613-5

- Przepływ laminarny
- Przepływ turbulentny
- Liczba Reynoldsa
- Wiry pierścieniowe

-
- Przepływ laminarny \Leftrightarrow warstwowy przepływ płynu, podczas którego cząsteczki płynu nie przechodzą z warstwy do warstwy.

- Przepływ turbulentny \Leftrightarrow burzliwy przepływ płynu, podczas którego pojawiają się wiry i inne chaotyczne ruchy płynu.



- Przepływ turbulentny

- Liczba Reynoldsa (Re) \Leftrightarrow liczba bezwymiarowa określona jako:

$$Re = \frac{r\rho v}{\eta}$$

- r – charakterystyczny rozmiar liniowy przekroju poprzecznego rury (średnica koła, bok kwadratu)
 - ρ – gęstość cieczy
 - v – szybkość przepływu cieczy
 - η – współczynnik lepkości cieczy
- Liczba Reynoldsa, zwana też liczbą podobieństwa, charakteryzuje rodzaj przepływu. Jeżeli wartość tej liczby jest mniejsza od tzw. wartości krytycznej, to przepływ jest laminarny, a jeżeli jest większa, to przepływ jest turbulentny.

B Osborne Reynolds (1842-1912), irlandzki inżynier.

- Osborne Reynolds: *An experimental investigation of the circumstances which determine whether the motion of water shall be direct or sinuous, and of the law of resistance in parallel channels*. Philosophical Transactions of the Royal Society **174** (1883) 935-982.

- Wiry pierścieniowe \Leftrightarrow turbulentny ruch cząsteczek gazu (na przykład dymu), wypływającego ze zbiornika przez kołowy otwór, spowodowany skokowym wzrostem ciśnienia w zbiorniku. Cząsteczki gromadzą się w obszarze torusa, jednocześnie wirując w jego przekrojach poprzecznych. Promień danego torusa wzrasta wraz z odległością od zbiornika.



- Wiry pierścieniowe

- Solitony \Leftrightarrow pojedyncze, bardzo stabilne “samotne fale”, które podczas wzajemnych zderzeń zachowują się tak jak cząstki.

H Solitony odkrył przypadkowo w 1834 Russell podczas konnej przejażdżki wzdłuż wąskiego kanału w pobliżu Edynburga. Według jego relacji fala wytworzona przez łódkę, która się nagle zatrzymała, zachowała prawie bez zmian swój kształt i prędkość na drodze około jednej lub dwóch mil. Nazwa “soliton” została wprowadzona w 1965 przez Normana J. Zabusky’ego i Martina D. Kruskala. Russel używał nazwy *wave of translation*.

B John Scott Russell (1808-1882), szkocki inżynier.

B Martin David Kruskal (1925-2006), amerykański matematyk i fizyk.

B Norman J. Zabusky (ur. 1929), amerykański fizyk.

- N. J. Zabusky, M. D. Kruskal:

Interaction of "Solitons" in a Collisionless Plasma and the Recurrence of Initial States.

Physical Review Letters **15**, 6 (1965) 240-243.

- Teoria chaosu \Leftrightarrow dziedzina matematyki, której przedmiotem badań są zjawiska (opisywane na ogół przez nieliniowe równania różniczkowe), których przebieg jest w znacznym stopniu uzależniony od przyjętych warunków początkowych.
- Edward Norton Lorenz (1917-2008), amerykański matematyk i meteorolog, pionier teorii chaosu, w 1972 zadał znane pytanie: “Czy machnięcie skrzydeł motyla w Brazylii wywoła tornado w Teksasie?” (“Does the Flap of a Butterfly’s Wings in Brazil Set off a Tornado in Texas?”).
- Drastyczne zmiany wartości rozwiązań nieliniowych równań różniczkowych modelujących przebieg danego zjawiska, będące następstwem niewielkich zmian wartości warunków początkowych, bywają nazywane efektem motyla.

- Układ dynamiczny
- Przestrzeń fazowa
- Atraktory
- Dziwne atraktory

-
- Układ dynamiczny \Leftrightarrow matematyczny model danego procesu, którego przebieg w czasie jest wyznaczony jednoznacznie przez zadane warunki początkowe, opisywany przez układ równań różniczkowych zwyczajnych.

- Przestrzeń fazowa \Leftrightarrow zbiór wszystkich możliwych stanów układu dynamicznego. Każdy stan reprezentowany jest przez punkt w tej przestrzeni.

P Zamknięta krzywa fazowa oznacza, że układ może wrócić do stanu początkowego.

-
- Atraktor \Leftrightarrow podzbiór przestrzeni fazowej układu dynamicznego do którego zmierza większość trajektorii.

- Dziwny atraktor \Leftrightarrow atraktor posiadający strukturę fraktalną.

H Pierwszy dziwny atraktor został odkryty przez Lorenza w 1963.

H Nazwę dziwny atraktor zaproponowali w 1971 Ruelle i Takens.

B Edward Norton Lorenz (1917-2008), amerykański matematyk i meteorolog, pionier teorii chaosu.

B David Pierre Ruelle (ur. 1935), belgijsko-francuski fizyk-teoretyk.

B Floris Takens (1940-2010), holenderski matematyk.

- Edward N. Lorenz:

Deterministic nonperiodic flow.

Journal of Atmospheric Sciences **20**, 2 (March 1963) 130-141.

- David Ruelle and Floris Takens:

On the nature of turbulence.

Communications in Mathematical Physics **20**, 3 (1971) 167-192 and **23** (1971) 343-344.

- Raser \Leftrightarrow źródło spójnego, monochromatycznego promieniowania rentgenowskiego o energiach fotonów z przedziału 124 eV÷120 keV. Działanie rasera oparte jest na zjawisku wymuszonej emisji bezodrzutowego promieniowania izomerów jądrowych.
- Nazwa **raser** pochodzi od pierwszych liter angielskich słów **roentgen-ray amplification by stimulated emission of radiation**.

- Graser \Leftrightarrow źródło spójnego, monochromatycznego promieniowania gamma o energiach fotonów powyżej 120 keV. Działanie graseru oparte jest na zjawisku wymuszonej emisji bezodrutowego promieniowania izomerów jądrowych.
- Nazwa **graser** pochodzi od pierwszych liter angielskich słów **gamma-ray amplification by stimulated emission of radiation**.

- Lasery \Leftrightarrow źródła spójnego światła monochromatycznego o energiach fotonów należących, w przypadku popularnych konstrukcji, do przedziału $0,117 \text{ eV} \div 3,69 \text{ eV}$.
- Działanie lasera oparte jest na zjawisku emisji wymuszonej.
- Nazwa **laser** pochodzi od pierwszych liter angielskich słów **light amplification by stimulated emission of radiation**.

P Laser o mocy $1,3 \times 10^{15} \text{ W}$ znajduje się w Lawrence Livermore Laboratory.

H Pierwszy laser (rubinowy) zbudował Maiman w 1960.

H Nazwę laser zaproponował Gould w 1959.

B Theodore Harold Maiman (1927-2007), amerykański fizyk.

B Gordon Gould (1920-2005), amerykański fizyk.

• Theodore Maiman: *Stimulated Optical Radiation in Ruby*.

Nature **187** (6 August 1960) 493-494.

• R. Gordon Gould: *The LASER, Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*. [in:]

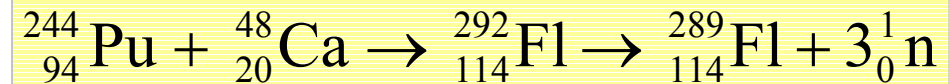
The Ann Arbor Conference on Optical Pumping, the University of Michigan, June 15 through June 18, 1959.

Edited by P. A. Franken and R. H. Sands. [Strona 128]

- Transuranowce
- Flerovium
- Wyspa stabilności
- Pierwiastki ósmego okresu

- Najcięższym znanym w przyrodzie naturalnym pierwiastkiem jest uran ${}_{92}^{238}\text{U}$, którego jądra składają się $Z = 92$ protonów i $N = 146$ neutronów.
- Transuranowce \Leftrightarrow pierwiastki chemiczne o liczbach atomowych z przedziału $93 \div 118$.
- Znane transuranowce o $Z < 114$ charakteryzują się bardzo krótkimi okresami połowicznego rozpadu o wartościach rzędu jednej sekundy.

- Flerovium \Leftrightarrow pierwiastek o $Z = 114$, $N = 184$, $A = Z + N = 298$ otrzymany po raz pierwszy przez zespół rosyjskich i amerykańskich fizyków w Zjednoczonym Instytucie Badań Jądrowych w Dubnej w Rosji w grudniu 1998 (doniesienie zostało opublikowane 18.10.1999).



- Okres połowicznego rozpadu tego pierwiastka wynosi 30 sekund.

• Yu. Ts. Oganessian, V. K. Utyonkov, Yu. V. Lobanov, F. Sh. Abdullin, A. N. Polyakov, I. V. Shirokovsky, Yu. S. Tsyganov, G. G. Gulbekian, S. L. Bogomolov, B. N. Gikal, A. N. Mezentsev, S. Iliev, V. G. Subbotin, A. M. Sukhov, G. V. Buklanov, K. Subotic, M. G. Itkis, and K. J. Moody, J. F. Wild, N. J. Stoyer, M. A. Stoyer, R. W. Lougheed:
Synthesis of Superheavy Nuclei in the ${}^{48}\text{Ca} + {}^{244}\text{Pu}$ Reaction.
Physical Review Letters **83**, 16 (18 October 1999) 3154-3157.
(Received 8 March 1999)

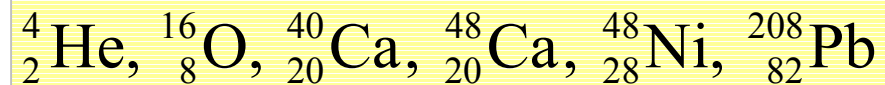
- Wyspa stabilności \Leftrightarrow hipoteza sformułowana przez Seaborga, według której izotopy pierwiastków chemicznych, których liczby Z oraz N przyjmują wartości zbliżone odpowiednio do 110 oraz 180, powinny mieć względnie długie okresy połowicznego rozpadu.

B Glenn Theodore Seaborg (1912-1999), amerykański chemik, laureat Nagrody Nobla z chemii w 1951.

-
- Pierwiastki ósmego okresu \Leftrightarrow hipotetyczne pierwiastki chemiczne o liczbach atomowych z przedziału 119÷168, które powinny znajdować się w ósmym rzędzie układu okresowego pierwiastków.

- Liczby magiczne
- Jądra o symetrycznym kształcie
- Jądra o niesymetrycznym kształcie
- Jądra egzotyczne
- Hiperjądra

- Liczby magiczne \Leftrightarrow liczby protonów lub/i neutronów w jądrach atomowych należące do zbioru (2, 8, 20, 28, 50, 82, 126).
- Jądra magiczne \Leftrightarrow jądra, dla których liczby tworzących je protonów lub/i neutronów są liczbami magicznymi. Jądra magiczne mają dużą energię wiązania i są bardzo stabilne (trwałe), a ich moment kwadrupolowy jest równy zeru (mają kształt kuli).
- Jądra podwójnie magiczne \Leftrightarrow jądra, dla których zarówno liczby protonów jak i neutronów są liczbami magicznymi.
- Przykładami jąder podwójnie magicznych są:



- Jądro o symetrycznym kształcie \Leftrightarrow jądro przyjmujące kształt elipsoidy obrotowej lub elipsoidy trójosiowej.
- Jądro magiczne przyjmuje kształt kuli.
- Jądro, posiadające jeden lub dwa nukleony więcej niż najbliższe jądro magiczne, przyjmuje kształt dysku (spłaszczonej elipsoidy obrotowej).
- Jądro, różniące się wieloma nukleonami w stosunku do sąsiednich jąder magicznych, przyjmuje kształt cygara (wydłużonej elipsoidy obrotowej).

-
- Jądra o niesymetrycznym kształcie \Leftrightarrow jądra, których nie można zmodelować elipsoidą trójosiową.

-
- Jądra egzotyczne \Leftrightarrow jądra, dla których stosunek liczby neutronów do liczby protonów jest dużo większy lub dużo mniejszy niż dla jąder znalezionych w naturze.

- Hiperony \Leftrightarrow grupa cząstek elementarnych będących fermionami, zbudowanych z trzech kwarków, w tym co najmniej jednego dziwnego (s). Hiperony są barionami.
- Hiperjądra \Leftrightarrow jądra atomowe zawierające co najmniej jeden hiperon lambda zero.

P Jądro hiperwodoru 3 składa się z protonu, neutronu i hiperonu lambda zero.

H Pierwsze hiperjądro odkryli Danysz i Pniewski w 1952.

B Marian Danysz (1909-1983), polski fizyk.

B Jerzy Pniewski (1913-1989), polski fizyk.

• M. Danysz, J. Pniewski:

Delayed Disintegration of a Heavy Fragment Emitted in Nuclear Explosion.

Bulletin de l'Académie Polonaise des Sciences Cl. III, Vol. I, Nos. 1-2 (1953) 42.

[Communicated by A. Sołtan at the meeting of October 20, 1952]

• M. Danysz, J. Pniewski:

Delayed Disintegration of a Heavy Nuclear Fragment.

Philosophical Magazine **44** (March 1953) 348-352.

[Received December 1, 1952]

MIKROFIZYKA

- Spektrum mas
- Spontaniczne łamanie symetrii
- Mechanizm Higgsa
- Bozon Higgsa

- Spektrum mas (trzecia spektroskopia)* \Leftrightarrow teoria wyjaśniająca wartości mas i innych parametrów cząstek elementarnych.

* Termin zaproponowany w 1968 przez Weisskopfa.

Pierwsza spektroskopia dotyczy atomów i molekuł, druga – jąder atomowych.

B Victor Friedrich Weisskopf (1908-2002) amerykański fizyk-teoretyk

- Victor Friedrich Weisskopf:

The Three Spectroscopies.

Scientific American **218**, 5 (1968) 15.

- В. Ф. Вайскопф:

Три спектроскопии.

Успехи Физических Наук **96**, 10 (1969) 673-695.

- Spontaniczne łamanie symetrii \Leftrightarrow sytuacja pojawiająca się wtedy, gdy stan podstawowy układu fizycznego ma niższą symetrię niż najbardziej symetryczny stan układu.

B Yoichiro Nambu (ur. 1921), amerykański fizyk japońskiego pochodzenia, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 2008 “za odkrycie mechanizmu spontanicznego łamania symetrii w fizyce subatomowej”.

B Giovanni Jona-Lasinio (ur. 1932), włoski fizyk-teoretyk.

- Yoichiro Nambu:

Quasi-Particles and Gauge Invariance in the Theory of Superconductivity.

Physical Review **117**, 3 (1960) 648-663.

- Yoichiro Nambu:

Axial Vector Current Conservation in Weak Interactions.

Physical Review Letters **4**, 7 (1960) 380-382.

- Yoichiro Nambu, Giovanni Jona-Lasinio:

Dynamical Model of Elementary Particles Based on an Analogy with Superconductivity. I.

Physical Review **122**, 1 (1961) 345-358.

- Yoichiro Nambu, Giovanni Jona-Lasinio:

Dynamical Model of Elementary Particles Based on an Analogy with Superconductivity. II.

Physical Review **124**, 1 (1961) 246-254.

-
- Mechanizm Higgsa \Leftrightarrow mechanizm nadawania masy cząstkom fundamentalnym, w którym istotną rolę odgrywa spontaniczne łamanie symetrii.
 - Cały wszechświat wypełnia skalarne pole kwantowe, nazywane polem Higgsa.
 - Gdyby pole Higgsa zostało nagle wyłączone, wszystkie cząstki elementarne utraciłyby masę.
 - Mechanizm Higgsa nazywany jest też mechanizmem Englerta-Brouta-Higgsa-Guralnika-Hagena-Kibble'a.

H Mechanizm Higgsa zaproponowali w 1964 niezależnie od siebie Englert i Brout, Higgs oraz Guralnik, Hagen i Kibble. Stanowi on rozwinięcie pomysłu przedstawionego w 1963 przez Andersona.

B Philip Warren Anderson (ur. 1923), amerykański fizyk-teoretyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1977.

B Peter Ware Higgs (ur. 1929), szkocki fizyk-teoretyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 2013.

B François Englert (ur. 1932), belgijski fizyk-teoretyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 2013.

B Robert Brout (1928-2011), amerykańsko-belgijski fizyk-teoretyk.

B Gerald Stanford Guralnik (ur. 1936), amerykański fizyk-teoretyk.

B Carl Richard Hagen (ur. 1937), amerykański fizyk-teoretyk pochodzenia norweskiego.

B Tom Walter Bannerman Kibble (ur. 1932), brytyjski fizyk-teoretyk.

- Nagrodę Nobla z fizyki w 2013 otrzymali wspólnie François Englert i Peter W. Higgs “za teoretyczne odkrycie mechanizmu dającego wkład w nasze zrozumienie istoty masy subatomowych cząstek, który ostatnio został potwierdzony przez odkrycie przewidzianej cząstki fundamentalnej w eksperymentach ATLAS i CMS w Wielkim Zderzaczach Hadronów (LHC) w CERN-ie”

- P. W. Anderson: *Plasmons, Gauge Invariance, and Mass*.

Physical Review **130**, 1 (1963) 439-442.

Received 8 November 1962; published in the issue dated April 1963.

- François Englert, Robert Brout:

Broken Symmetry and the Mass of Gauge Vector Mesons.

Physical Review Letters **13**, 9 (1964) 321-323.

Received 26 June 1964; published in the issue dated 31 August 1964.

- Peter W. Higgs:

Broken Symmetries and the Masses of Gauge Bosons.

Physical Review Letters **13**, 16 (1964) 508-509.

Received 31 August 1964; published in the issue dated 19 October 1964.

- G. S. Guralnik, C. R. Hagen, T. W. B. Kibble:

Global Conservation Laws and Massless Particles.

Physical Review Letters **13**, 20 (1964) 585-587.

Received 12 October 1964; published in the issue dated 16 November 1964.

-
- Bozon Higgsa \Leftrightarrow hipotetyczna cząstka o zerowym spinie, będąca kwantem pola Higgsa, tłumacząca dlaczego leptony, kwarki oraz bozony W i Z mają masę. Postulowana masa bozonu Higgsa powinna być większa niż $112 \text{ GeV}/c^2$.
 - Bozon Higgsa nazywany jest też higonem.

- Kwarki
- Gluony

- Kwarki \Leftrightarrow grupa cząstek fundamentalnych, do której należą: kwark górny (u), kwark dolny (d), kwark powabny (c), kwark dziwny (s), kwark szczytowy (t), zwany też prawdziwym, kwark denny (b), nazywany również pięknym, oraz ich antycząstki, antykwark górny (\bar{u}), antykwark dolny (\bar{d}), antykwark powabny (\bar{c}), antykwark dziwny (\bar{s}), antykwark szczytowy (\bar{t}) oraz antykwark denny (\bar{b}).
- Kwarki należą do klasy fermionów o spinie 1/2, jako cząstki fundamentalne nie mają struktury wewnętrznej. Hadrony, czyli bariony i mezony, zbudowane są z kwarków.

- Podstawowe własności kwarków zestawiono w poniższej tabelce:

Kwark	u	d	c	s	t	b
Masa $\left[\frac{\text{GeV}}{c^2} \right]$	0,005	0,01	1,5	0,2	170	4,7
Ładunek elektryczny	$\frac{2}{3}e$	$-\frac{1}{3}e$	$\frac{2}{3}e$	$-\frac{1}{3}e$	$\frac{2}{3}e$	$-\frac{1}{3}e$

- Każdy z kwarków może znajdować się w jednym z trzech stanów w zależności od posiadanego ładunku kolorowego. Analogicznie, każdy z antykwarków również może znajdować się w jednym z trzech stanów w zależności od posiadanego ładunku antykolorowego.
- Pośrednie doświadczalne dowody na istnienie wszystkich kwarków przeprowadzono w latach 1968-1994.

U Kwarki nie funkcjonują jako samoistne obiekty, lecz jedynie w postaci układów, tworząc hadrony (zasada uwięzienia).

H Pojęcie kwarków wprowadził w 1964 Gell-Mann i niezależnie Zweig, który kwarki nazywał asami.

B Murray Gell-Mann (ur. 1929), amerykański fizyk teoretyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1969 “za wkład i odkrycia dotyczące klasyfikacji cząstek elementarnych i ich oddziaływań”.

B George Zweig (ur. 1937), amerykański fizyk i neurobiolog.

- M. Gell-Mann:

A schematic model of baryons and mesons.

Physics Letters B **8**, 3 (1964) 214-215.

- G. Zweig:

An SU(3) model for strong interaction symmetry and its breaking. II.

CERN preprint 8419/TH412 (21 February 1964) 1-77.

• Gluony \Leftrightarrow bezmasowe bozony o spinie 1, niemające ładunku elektrycznego, pośredniczące w oddziaływaniach silnych między kwarkami. Każdemu gluonowi przyporządkowana jest para ładunek kolorowy-ładunek antykolorowy. W zbiorze trzech ładunków kolorowych i trzech antykolorowych może być tylko osiem niezależnych kombinacji dwuelementowych utworzonych z par ładunek kolorowy-ładunek antykolorowy. Dlatego jest tylko osiem gluonów.

U Gluony nie funkcjonują jako samoistne obiekty, są uwięzione w hadronach.

- Chromodynamika kwantowa (QCD – quantum chromodynamics)
⇔ teoria opisująca oddziaływania silne między kwarkami.

H Kwantową chromodynamikę zaproponowali w 1973 Fritzsche, Gell-Mann i Leutwyler.

B Murray Gell-Mann (ur. 1929), amerykański fizyk teoretyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1969.

B Heinrich Leutwyler (ur. 1938), szwajcarski fizyk teoretyk.

B Harald Fritzsche (ur. 1943), niemiecki fizyk teoretyk.

• H. Fritzsche, M. Gell-Mann and H. Leutwyler:
Advantages of the color octet gluon picture.
Physics Letters B 47, 4 (26 November 1973) 365-368.

- Plazma
- Plazma kwarkowo-gluonowa

• Plazma \Leftrightarrow całkowicie zjonizowany gaz, w którym liczby ładunków dodatnich i ujemnych są jednakowe. Plazma nazywana jest też czwartym stanem skupienia.

H Pojęcie plazmy wprowadził Langmuir w 1928.

B Irving Langmuir (1881-1957), amerykański fizykochemik, laureat Nagrody Nobla z chemii w 1932.

• I. Langmuir:

Oscillations in ionized gases.

Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America **14**, 8 (1928) 627-637.

-
- Plazma kwarkowo-gluonowa \Leftrightarrow hipotetyczna materia utworzona ze swobodnych kwarków i gluonów w warunkach wysokiego ciśnienia i temperatury.

15. Jednolita teoria oddziaływań słabych i elektromagnetycznych

- Oddziaływania słabe
- Oddziaływania elektromagnetyczne
- Jednolita teoria oddziaływań słabych i elektromagnetycznych

- Oddziaływania słabe \Leftrightarrow krótkozasięgowe oddziaływania, których nośnikami są bozony W^+ , W^- i Z^0 , przejawiające się między innymi podczas rozpadów kwarków i leptonów oraz w rozpadach beta minus i beta plus. W oddziaływaniach słabych nie są spełnione zasady zachowania dziwności (S), parzystości (P), piękna (B), powabu (C), prawdy (T) oraz trzeciej składowej izospinu (I_3).

- Oddziaływania elektromagnetyczne \Leftrightarrow oddziaływania opisywane równaniami Maxwella i wynikającymi z nich prawami szczegółowymi. Oddziaływania elektromagnetyczne są jednym z czterech znanych oddziaływań fundamentalnych. Pozostałe trzy to oddziaływania grawitacyjne, słabe i silne.

15. Jednolita teoria oddziaływań słabych i elektromagnetycznych

- Jednolita teoria oddziaływań słabych i elektromagnetycznych \Leftrightarrow teoria opisująca w ramach jednego formalizmu oddziaływania słabe i elektromagnetyczne fermionów, tłumacząc je wymianą bozonów pośredniczących Z^0 , W^+ , W^- i fotonów między tymi fermionami.

H Unifikację oddziaływań słabych i elektromagnetycznych zaproponowali niezależnie od siebie Glashow (1967), Weinberg (1967) oraz Salam (1968), wprowadzając oddziaływanie elektroślabe.

B Abdus Salam (1926-1996), pakistański fizyk-teoretyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1979.

B Sheldon Lee Glashow (ur. 1932), amerykański fizyk-teoretyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1979.

B Steven Weinberg (ur. 1933), amerykański fizyk-teoretyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1979.

- S. Weinberg: *A Model of Leptons*. Physical Review Letters **19**, 21 (1967) 1264-1266.
- A. Salam: *Weak and Electromagnetic Interactions*. [in:] Elementary Particle Physics. Edited by N. Svarholm. Almqvist and Wiksell, Stockholm 1968. [Strony 367-377].

- Bozony W i Z \Leftrightarrow cząstki elementarne pośredniczące w oddziaływaniach słabych.
- Bozon W (wuon) występuje w dwóch postaciach W^+ i W^- , każda o spinie 1 oraz masie $(80,425 \pm 0,03) \text{ GeV}/c^2$. Bozony W^+ i W^- posiadają ładunki elektryczne przeciwnych znaków, stanowią parę cząstka-antycząstka.
- Bozon Z (zeton) ma masę $(91,1876 \pm 0,0021) \text{ GeV}/c^2$, nie posiada ładunku elektrycznego. Bozon Z jest identyczny ze swoją antycząstką.
- $c = 2,99792458 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ – wartość prędkości światła w próżni
- $m_e = 9,1093826 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$ – masa elektronu

- Leptony \Leftrightarrow grupa dwunastu cząstek fundamentalnych, do której należą: elektron (e), mion (μ), taon (τ), neutrino elektronowe (ν_e), neutrino mionowe (ν_μ), neutrino taonowe (ν_τ) oraz ich antycząstki.
- Elektron, mion i taon obdarzone są ujemnym ładunkiem elementarnym, natomiast neutrina nie mają ładunku elektrycznego.
- Leptony należą do klasy fermionów o spinie $1/2$, jako cząstki fundamentalne nie mają struktury wewnętrznej. Leptony biorą udział w oddziaływaniach elektromagnetycznych i słabych.

- Model standardowy \Leftrightarrow teoria rozwinięta w latach 1970-1973, opisująca cząstki elementarne oraz podstawowe oddziaływania między nimi (z pominięciem oddziaływań grawitacyjnych).
- W modelu tym cząstki fundamentalne, czyli niemające wewnętrznej struktury, podzielono na kwarki oraz leptony.
- Cząstki elementarne o złożonej strukturze wewnętrznej, zwane hadronami, zbudowane są z kwarków.
- Nośnikami oddziaływań silnych, wiążących kwarki wewnątrz hadronów, są gluony.
- Nośnikami oddziaływań słabych, przejawiających się między innymi w rozpadach beta minus i beta plus, są bozony W i Z.
- Nośnikami oddziaływań elektromagnetycznych są fotony.
- Hipotetycznymi nośnikami oddziaływań grawitacyjnych są grawitony.

- Teorie wielkiej unifikacji (GUT – Grand Unification Theory) \Leftrightarrow teorie usiłujące opisać w ramach jednego formalizmu oddziaływania elektromagnetyczne, słabe i silne.

- Super unifikacja \Leftrightarrow teoria, nazywana też teorią wszystkiego, która opisywałaby wszystkie zjawiska fizyczne w ramach jednego formalizmu.

- Proton
- Antyproton
- Neutron
- Antyneutron
- Rozpad neutronu (rozpad beta minus)
- Rozpad protonu (rozpad beta plus)
- Rozpad swobodnego protonu

- Proton (p) \Leftrightarrow cząstka elementarna będąca podstawowym składnikiem jądra atomowego, mająca masę (m_p) i ładunek (q_p), wynoszące odpowiednio:

$$m_p = 1,67262171 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

$$m_p \cdot c^2 = 938,272029 \text{ MeV}$$

$$\frac{m_p}{m_e} = 1836,15267261$$

$$q_p = 1,60217653 \cdot 10^{-19} \text{ C} = e$$

- $c = 2,99792458 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ – wartość prędkości światła w próżni
- $m_e = 9,1093826 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$ – masa elektronu

- Proton jest fermionem o spinie $1/2$, utworzonym z trzech kwarków (uud), ma niezerowy moment magnetyczny. Swobodny proton jest stabilny, jego okres półtrwania wynosi ponad $1,6 \cdot 10^{33}$ lat.

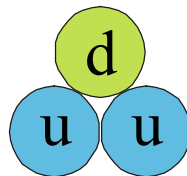
H Proton odkrył Rutherford w 1919.

H Moment magnetyczny protonu odkrył Stern.

B Sir Ernest Rutherford (1871-1937), brytyjski fizyk, laureat Nagrody Nobla z chemii w 1908.

B Otto Stern (1888-1969), niemiecko-amerykański fizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1935.

proton



- Kwarkowy model protonu

- R. Frisch, O. Stern:

Über die magnetische Ablenkung von Wasserstoffmolekülen und das magnetische Moment des Protons. I.

Zeitschrift für Physik **85**, 1-2 (1933) 4-16.

- I. Estermann, O. Stern:

Über die magnetische Ablenkung von Wasserstoffmolekülen und das magnetische Moment des Protons. II.

Zeitschrift für Physik **85**, 1-2 (1933) 17-24.

- I. Estermann, O. C. Simpson, O. Stern:

The Magnetic Moment of the Proton.

Physical Review **52**, 6 (1937) 535-545.

- Antyproton \Leftrightarrow antycząstka protonu, utworzona z trzech antykwarków ($\bar{u} \bar{u} \bar{d}$).

H Antyproton odkryli Chamberlain, Segrè, Wiegand i Ypsilantis w 1955.

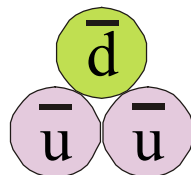
B Owen Chamberlain (1920-2006), amerykański fizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1959.

B Emilio Gino Segrè (1905-1989), amerykański fizyk pochodzenia włoskiego, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1959.

B Clyde Edward Wiegand (1915-1996), amerykański fizyk.

B Thomas (Tom) John Ypsilantis (1928-2000), grecko-amerykański fizyk.

antyproton



- Kwarkowy model antyprotonu

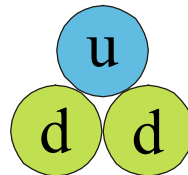
- Neutron (n) \Leftrightarrow cząstka elementarna będąca podstawowym składnikiem jądra atomowego. Masa (m_n) neutronu wynosi:

$$m_n = 1,67492728 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$
$$m_n \cdot c^2 = 939,565360 \text{ MeV}$$
$$\frac{m_n}{m_e} = 1838,6836598$$

- $c = 2,99792458 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ – wartość prędkości światła w próżni
- $m_e = 9,1093826 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$ – masa elektronu

- Neutron jest fermionem o spinie $1/2$, utworzonym z trzech kwarków (udd), nie ma ładunku elektrycznego, ma niezerowy moment magnetyczny. Swobodny neutron jest niestabilny, jego okres półtrwania wynosi $614,6 \pm 1,3$ s, ulega rozpadowi wskutek rozpadu beta minus.

neutron



- Kwarkowy model neutronu

H Neutron przewidział Rutherford w 1920, a odkrył Chadwick w 1932.

H Moment magnetyczny neutronu wyznaczyli Bloch i Alvarez w 1940.

B Sir Ernest Rutherford (1871-1937), brytyjski fizyk, laureat Nagrody Nobla z chemii w 1908.

B Sir James Chadwick (1891-1974), brytyjski fizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1935.

B Luis Walter Alvarez (1911-1988), amerykański fizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1968.

B Felix Bloch (1905-1983), amerykański fizyk pochodzenia szwajcarskiego, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1952.

- E. Rutherford:

Bakerian Lecture: Nuclear Constitution of Atoms.

Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences **97**, 686 (1920) 374-400.

- James Chadwick:

Possible Existence of a Neutron.

Nature **129**, 3252 (1932) 312.

- J. Chadwick:

Bakerian Lecture: The Neutron.

Proceedings of the Royal Society A: Mathematical and Physical Sciences **142**, 846 (1933) 1-25.

- Luis W. Alvarez, F. Bloch:

A Quantitative Determination of the Neutron Moment in Absolute Nuclear Magnetons.

Physical Review **57**, 2 (1940) 111-122.

[Received 30 October 1939; published in the issue dated January 1940]

- Antyneutron \Leftrightarrow antycząstka neutronu, utworzona z trzech antykwarków ($\bar{u} \bar{d} \bar{d}$).

H Antyneutron odkryli Cork, Lambertson, Piccioni i Wenzel w 1956.

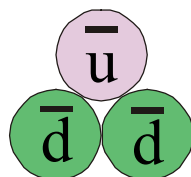
B Bruce Cork (1916-1994), amerykański fizyk.

B Glen R. Lambertson, amerykański fizyk.

B Oreste Piccioni (1916-2002), amerykański fizyk pochodzenia włoskiego.

B William A. Wenzel, amerykański fizyk.

antyneutron



- Kwarkowy model antyneutronu

• B. Cork, G. R. Lambertson, O. Piccioni, W. A. Wenzel:
Antineutrons Produced from Antiprotons in Charge Exchange Collisions.
Physical Review **104**, 4 (1956) 1193-1197.

- Rozpad neutronu (rozpad beta minus) \Leftrightarrow emisja elektronu (e) przez jądro, będąca skutkiem przekształcenia się w jądrze neutronu (n) w proton (p).



- ${}^0_0\bar{\nu}_e$ – antyneutrino elektronowe
- Nowo powstałe jądro ma liczbę atomową o jeden większą, a jego liczba masowa nie zmienia się.



- Rozpad protonu (rozpad beta plus) \Leftrightarrow emisja pozytronu przez jądro, będąca skutkiem przekształcenia się w jądrze protonu (p) w neutron (n).



- ${}^0_0\nu_e$ – neutrino elektronowe
- Nowo powstałe jądro ma liczbę atomową o jeden mniejszą, a jego liczba masowa nie zmienia się.

-
- Rozpad swobodnego protonu \Leftrightarrow hipotetyczny proces rozpadu swobodnego protonu, postulowany w teoriach będących uogólnieniem modelu standardowego, inny niż rozpad beta plus.

- Neutrino elektronowe
- Neutrino mionowe
- Neutrino taonowe
- Oscylacje neutrin
- Antyneutrino elektronowe
- Antyneutrino mionowe
- Antyneutrino taonowe

- Neutrino elektronowe (ν_e) \Leftrightarrow cząstka fundamentalna pierwszej generacji, powstająca podczas rozpadu beta plus. Neutrino elektronowe jest jednym z dwunastu leptonów, nie ma ładunku elektrycznego, jest fermionem o spinie 1/2, ma masę mniejszą niż 50 eV/c². Neutrino cechuje bardzo duża przenikliwość, nie są pochłaniane przez ośrodek, ponieważ nie biorą udziału w oddziaływaniach silnych i elektromagnetycznych.



H Istnienie neutrino elektronowego postulował Pauli w 1930, nazywając je neutronem. Nazwę neutrino zaproponował Fermi w 1933. Neutrino elektronowe odkryli Reines i Cowan oraz ich współpracownicy w 1956.

B Wolfgang Pauli (1900-1958), szwajcarski fizyk teoretyk pochodzenia austriackiego, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1945.

B Enrico Fermi (1901-1954), włoski fizyk teoretyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1938.

B Frederick Reines (1918-1998), amerykański fizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1995.

B Clyde Lorrain Cowan (1919-1974), amerykański fizyk.

- E. Fermi:

Tentativo di una teoria dell'emissione dei raggi "beta".

La Ricerca Scientifica **2**, 12 (31 dicembre 1933) 491-495.

- E. Fermi:

Versuch einer Theorie der β -Strahlen. I.

Zeitschrift für Physik **88**, 3-4 (1934) 161-177.

- C. L. Cowan Jr., F. Reines, F. B. Harrison, H. W. Kruse, A. D. McGuire:

Detection of the Free Neutrino: a Confirmation.

Science **124**, 3212 (July 20, 1956) 103-104.

- Neutrino mionowe (ν_μ) \Leftrightarrow cząstka fundamentalna drugiej generacji. Neutrino mionowe jest jednym z dwunastu leptonów, nie ma ładunku elektrycznego, jest fermionem o spinie 1/2, ma masę mniejszą niż $0,5 \text{ MeV}/c^2$. Neutrino cechuje bardzo duża przenikliwość, nie są pochłaniane przez ośrodek, ponieważ nie biorą udziału w oddziaływaniach silnych i elektromagnetycznych.

H Neutrino mionowe odkryli Lederman, Schwartz oraz Steinberg wraz z zespołem w 1962.

B Jack Steinberger (ur. 1921), amerykański fizyk pochodzenia niemieckiego, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1988.

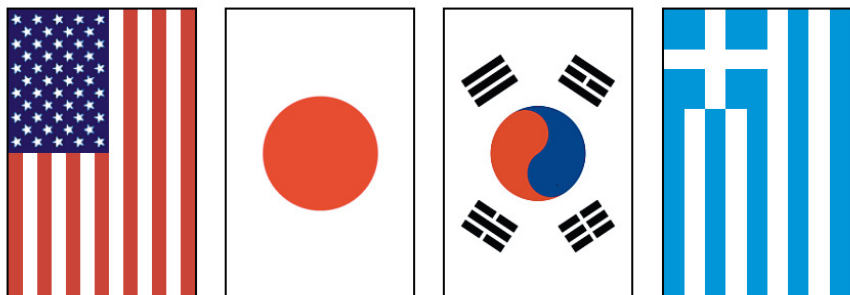
B Leon Max Lederman (ur. 1922), amerykański fizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1988.

B Melvin Schwartz (1932-2006), amerykański fizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1988.

• G. Danby, J.-M. Gaillard, K. Goulianos, L. M. Lederman, N. B. Mistry, M. Schwartz, J. Steinberger: *Observation of High-Energy Neutrino Reactions and the Existence of Two Kinds of Neutrinos*. Physical Review Letters **9**, 1 (1962) 36-44.

- Neutrino taonowe (ν_τ) \Leftrightarrow cząstka fundamentalna trzeciej generacji. Neutrino taonowe jest jednym z dwunastu leptonów, nie ma ładunku elektrycznego, jest fermionem o spinie 1/2, ma masę mniejszą niż $70 \text{ MeV}/c^2$. Neutrino cechuje bardzo duża przenikliwość, nie są pochłaniane przez ośrodek, ponieważ nie biorą udziału w oddziaływaniach silnych i elektromagnetycznych.

H Neutrino taonowe zostało odkryte w lipcu 2000 przez zespół 52 fizyków z USA, Japonii, Korei i Grecji, uczestniczących w eksperymencie o nazwie DONUT (Direct Observation of Nu Tau).



- Flagi państw, z których fizycy uczestniczyli w eksperymencie DONUT.

● Oscylacje neutrin \Leftrightarrow zjawisko polegające na tym, że neutrina danego rodzaju z upływem czasu przekształcają się w neutrina innego rodzaju i *vice versa*.

H Hipotezę o oscylacji neutrin sformułował Pontecorvo w 1957. Potwierdzono ją w 1998 za pomocą detektora Super-Kamiokande w Japonii oraz detektora SNO (Sudbury Neutrino Observatory) w Kanadzie.

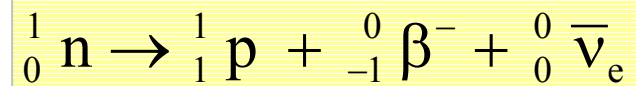
B Bruno Pontecorvo (1913-1993), rosyjski fizyk pochodzenia włoskiego.

B Takaaki Kajita (ur. 1959), japoński fizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 2015.

B Arthur Bruce McDonald (ur. 1943), kanadyjski fizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 2015.

* Zobacz także strony 284 i 285.

- Antyneutrino elektronowe ($\bar{\nu}_e$) \Leftrightarrow antycząstka neutrina elektronowego, jeden z dwunastu leptonów, powstająca podczas rozpadu beta minus. Antyneutrino elektronowe jest cząstką fundamentalną pierwszej generacji, nie ma ładunku elektrycznego, jest fermionem o spinie 1/2, ma masę mniejszą niż 50 eV/c².



- n – neutron
- p – proton
- β^- – cząstka beta minus (elektron)

- Antyneutrino mionowe ($\bar{\nu}_\mu$) \Leftrightarrow antycząstka neutrina mionowego, jeden z dwunastu leptonów. Antyneutrino mionowe jest cząstką fundamentalną drugiej generacji, nie ma ładunku elektrycznego, jest fermionem o spinie $1/2$, ma masę mniejszą niż $0,5 \text{ MeV}/c^2$.

-
- Antyneutrino taonowe ($\bar{\nu}_\tau$) \Leftrightarrow antycząstka neutrina taonowego, jeden z dwunastu leptonów. Antyneutrino taonowe jest cząstką fundamentalną trzeciej generacji, nie ma ładunku elektrycznego, jest fermionem o spinie 1/2, ma masę mniejszą niż $70 \text{ MeV}/c^2$.

- Monopol magnetyczny \Leftrightarrow hipotetyczny analog ładunku elektrycznego będący źródłem jednobiegunowego pola magnetycznego.

- Długość fundamentalna \Leftrightarrow długość, która jest prawdopodobnie nie mniejsza niż długość Plancka (l_p).

$$l_p = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^3}} = 1,61624 \times 10^{-35} \text{ m}$$

K Dla odpowiednio małych różnic wartości współrzędnych czasowych i przestrzennych czasoprzestrzeń ma prawdopodobnie ziarnistą strukturę.

- Kolider (zderzacz) \Leftrightarrow olbrzymi akcelerator służący do badania zderzeń cząstek o wysokich i superwysokich energiach.

C Największy na świecie kolider hadronów, LHC (Large Hadron Collider), znajduje się w CERN. Energia kinetyczna dwóch zderzających się protonów (w układzie środka ich mas) w tym akceleratorze może osiągnąć łączną wartość 14 TeV.

17. Oddziaływania cząstek o wysokich i superwysokich energiach

- Badania zderzeń protonów w LHC doprowadziły do odkrycia (4 lipca 2012) bozonu Higgsa, umożliwiając poszukiwania supersymetrycznych cząstek oraz potwierdzenie istnienia hipotetycznego procesu rozpadu swobodnego protonu.

Jeżeli mechanika kwantowa nie jest w stanie opisać zderzenia dwu protonów przy setkach czy tysiącach elektronowoltów, to jak taka teoria może stanowić podstawę opisu zderzeń w wielkich współczesnych akceleratorach?

Michał Gryziński (1930-2004)

Zderzenia.

Podstawowe źródło informacji o mikroskopowym świecie.

[18 grudnia 2002]

- Parzystość przestrzenna P
- Zasada zachowania parzystości przestrzennej P
- Niezachowanie parzystości przestrzennej P
- Doświadczenie Goldhabera-Grodzinsa-Sunyara
- Parzystość ładunkowa C
- Zasada zachowania parzystości ładunkowej C
- Parzystość kombinowana CP
- Zasada zachowania parzystości kombinowanej CP
- Niezachowanie parzystości kombinowanej CP
- Parzystość kombinowana CPT
- Zasada zachowania parzystości kombinowanej CPT

- Parzystość przestrzenna (P) \Leftrightarrow multiplikatywna liczba kwantowa charakteryzująca cząstki elementarne, związana z operacją inwersji współrzędnych przestrzennych, określona w następujący sposób:
 - P = +1 dla cząstki opisywanej parzystą funkcją falową
 $\Psi(x, y, z) = \Psi(-x, -y, -z)$.
 - P = -1 dla cząstki opisywanej nieparzystą funkcją falową
 $\Psi(x, y, z) = -\Psi(-x, -y, -z)$.
- Parzystość układu cząstek jest równa iloczynowi parzystości poszczególnych cząstek układu. Dla fermionów P = +1, a dla antyfermionów P = -1. Dla bozonów i antybozonów P = +1.
- Cząstki o dodatniej parzystości nazywane są też prawoskrętnymi, a o ujemnej – lewoskrętnymi.
- Zachowanie parzystości przestrzennej jest równoważne żądaniu, aby prawa fizyki były takie same w danym układzie odniesienia i jego lustrzanym odbiciu.

- Zasada zachowania parzystości przestrzennej P \Leftrightarrow zasada stwierdzająca, że w przypadku oddziaływań elektromagnetycznych oraz silnych prawa fizyki są takie same w danym układzie odniesienia i jego lustrzanym odbiciu.

K Początkowo sądzono, że zasada zachowania parzystości przestrzennej jest spełniona również w przypadku oddziaływań słabych.

H Lee i Yang w październiku 1956 sformułowali hipotezę, że zasada zachowania parzystości przestrzennej P nie jest spełniona w oddziaływaniach słabych. Słuszność tej hipotezy wykazała doświadczalnie Wu z zespołem w lutym 1957. Okazało się, że jądra kobaltu wirujące zgodnie z kierunkiem ruchu wskazówek zegara podczas rozpadu beta minus zachowywały się inaczej (emitowały inną ilość elektronów) niż jądra wirujące w kierunku przeciwnym.

H Lee i Yang otrzymali Nagrodę Nobla z fizyki w następnym roku po dokonaniu odkrycia.

B Tsung-Dao Lee (ur. 1926), amerykański fizyk-teoretyk pochodzenia chińskiego, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1957.

B Chen-Ning Franklin Yang (ur. 1922), amerykański fizyk-teoretyk pochodzenia chińskiego, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1957.

B Chien-Shiung Wu (1912-1997), amerykańska fizyczka pochodzenia chińskiego.

- Tsung Dao Lee and Chen-Ning Yang:
Question of Parity Conservation in Weak Interactions.
Physical Review **104**, 1 (1 October 1956) 254-258.
- Chien Shiung Wu et al.:
Experimental Test of Parity Conservation in Beta Decay.
Physical Review **105**, 4 (02/1957) 1413-1415.

- Doświadczenie Goldhabera-Grodzinsa-Sunyara \Leftrightarrow doświadczenie, w którym Goldhaber, Grodzins i Sunyar wykazali (1957), że spiny neutrin są antyrównoległe do kierunku ich ruchu (neutrina są lewoskrętne).

B Maurice Goldhaber (1911-2011), amerykański fizyk austriackiego pochodzenia.

B Lee Grodzins (ur. 1926), amerykański fizyk.

B Andrew William Sunyar (1920-1986), amerykański fizyk.

K W przyrodzie istnieją tylko lewoskrętne neutrino i prawoskrętne antyneutrino. Zjawisko to nazywane jest łamaniem parzystości dla neutrin.

• M. Goldhaber, L. Grodzins, A. W. Sunyar:
Helicity of Neutrinos.
Physical Review **109** (1958) 1015-1017.
[Received December 11, 1957]

- Parzystość ładunkowa C \Leftrightarrow liczba kwantowa charakteryzująca cząstki elementarne, związana z operacją zamiany cząstek (o liczbach kwantowych Q, B, S, L) na ich antycząstki (o liczbach kwantowych wynoszących odpowiednio $-Q, -B, -S, -L$) i *vice versa*.

Q – ładunek elektryczny

B – liczba barionowa

L – liczba leptonowa

S – dziwność

- Parzystość ładunkowa nazywana jest też odbiciem ładunkowym oraz parzystością C.
- Operator zamiany cząstki na jej antycząstkę nazywany jest operatorem sprzężenia cząstka-antycząstka lub operatorem sprzężenia ładunkowego.

P Dla fotonów $C = -1$. Dla mezonów $C = +1$.

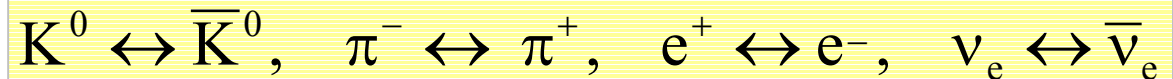
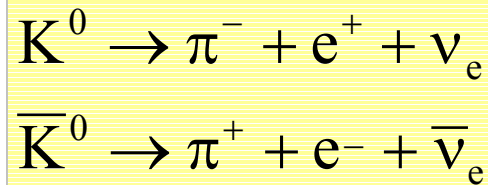
- Zasada zachowania parzystości ładunkowej C \Leftrightarrow zasada stwierdzająca, że w przypadku oddziaływań elektromagnetycznych oraz silnych zamiana wszystkich cząstek układu na ich antycząstki (lub *vice versa*) nie wpływa na żadne właściwości tego układu.

-
- Parzystość kombinowana CP \Leftrightarrow liczba kwantowa charakteryzująca cząstki elementarne, związana ze złożeniem operacji zamiany cząstek na antycząstki oraz inwersji współrzędnych przestrzennych.

- Zasada zachowania parzystości kombinowanej CP \Leftrightarrow zasada stwierdzająca, że w przypadku oddziaływań elektromagnetycznych oraz silnych zamiana wszystkich cząstek układu na ich antycząstki (lub *vice versa*) z równoczesną inwersją współrzędnych przestrzennych nie wpływa na żadne właściwości tego układu.

- Niezachowanie parzystości kombinowanej CP \Leftrightarrow naruszenie niezmienności praw fizyki względem zamiany cząstek na ich antycząstki (i odwrotnie) z jednoczesnym zwierciadlanym odbiciem.
- Niezachowanie parzystości kombinowanej CP nazywane jest też łamaniem symetrii ładunkowo-przestrzennej.

H Cronin i Fitch odkryli w 1964 naruszenie parzystości CP w rozpadach neutralnych mezonów K^0 i \bar{K}^0 na mezony π^- i π^+ .



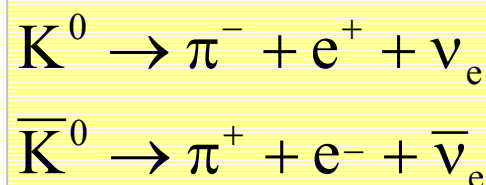
B James Watson Cronin (ur. 1931), amerykański fizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1980.

B Val Logsdon Fitch (ur. 1923), amerykański fizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1980.

$$\Delta = \frac{\text{il. rozpad. } (K^0 \rightarrow \pi^- + e^+ + \nu_e) - \text{il. rozpad. } (\bar{K}^0 \rightarrow \pi^+ + e^- + \bar{\nu}_e)}{\text{il. rozpad. } (K^0 \rightarrow \pi^- + e^+ + \nu_e) + \text{il. rozpad. } (\bar{K}^0 \rightarrow \pi^+ + e^- + \bar{\nu}_e)}$$

$$\Delta \approx 3 \times 10^{-3}$$

Prawdopodobieństwa zajścia rozpadów



różnią się od siebie, powstaje w nich więcej pozytronów niż elektronów. Nierównowaga cząstki-antycząstki jest wynikiem niezachowania parzystości kombinowanej CP.

- J. H. Christenson, J. W. Cronin, V. L. Fitch, and R. Turlay:
Evidence for the 2π Decay of the K_2^0 Meson.
Physical Review Letters **13**, 4 (July 1964) 138-140.

- W pracy “Naruszenie CP niezmienniczości, C asymetria i barionowa asymetria wszechświata” Sacharow postulował (1967) , że podczas Wielkiego Wybuchu wystąpiła nadwyżka materii nad antymaterią. Ta tzw. asymetria barionowa [na każdy miliard antybarionów utworzyło się miliard i jeden barionów] umożliwiła powstanie wszechświata. Inaczej mówiąc, w promieniowaniu reliktowym powinniśmy obserwować miliard fotonów na każdy barion we wszechświecie. W przypadku braku asymetrii barionowej materia i antymateria uległyby anihilacji.

B Andriej Dymitriewicz Sacharow (1921-1989), radziecki fizyk-teoretyk, laureat pokojowej Nagrody Nobla w 1975.

- А. Д. Сахаров:
Violation of CP Invariance, C Asymmetry, and Baryon Assymetry of the Universe.
Письма в Журнал Экспериментальной и Теоретической Физики **5** (01/1967) 32-35.
Naruszenie CP niezmienniczości, C asymetria i barionowa asymetria wszechświata.
- A. D. Sakharov:
Violation of CP Invariance, C Asymmetry, and Baryon Assymetry of the Universe.
Journal of Experimental and Theoretical Physics Letters **5** (1967) 24-27.

- Parzystość kombinowana CPT \Leftrightarrow liczba kwantowa charakteryzująca cząstki elementarne, związana ze złożeniem operacji zamiany cząstek na antycząstki oraz inwersji współrzędnych przestrzennych i czasu.
- Zgodnie z zasadą zachowania parzystości kombinowanej CPT prawa fizyki są niezmiennie względem złożenia operacji C, P i T w oddziaływaniach słabych, elektromagnetycznych i silnych.

- Zasada zachowania parzystości kombinowanej CPT \Leftrightarrow zasada stwierdzająca, że w przypadku oddziaływań elektromagnetycznych, słabych oraz silnych zamiana wszystkich cząstek układu na ich antycząstki (lub *vice versa*) z równoczesną inwersją współrzędnych przestrzennych i czasu nie wpływa na żadne właściwości tego układu.
- Z zasady zachowania parzystości kombinowanej CPT wynika między innymi, że masy, spiny, czasy życia oraz bezwzględne wartości ładunków elektrycznych cząstek i odpowiadających im antycząstek są takie same.

- Energia punktu zerowego
- Energia próżni
- Fluktuacje kwantowe
- Efekt Casimira
- Przejścia fazowe w próżni a złamanie pierwotnej symetrii

- Energia punktu zerowego \Leftrightarrow najniższa z możliwych energii danego układu kwantowego znajdującego się w stanie podstawowym.

P Energia punktu zerowego oscylatora kwantowego o częstotliwości (ν) jest równa jego energii w temperaturze zera bezwzględnego i wynosi:

$$E = \frac{1}{2} h\nu$$

- $h = 6,6260693 \cdot 10^{-34}$ J·s – stała Plancka

- Energia próżni \Leftrightarrow energia punktu zerowego wszystkich pól w przestrzeni, w tym pola Higgsa.

K W kwantowej teorii pola próżnia jest definiowana jako podstawowy stan wszystkich pól, a nie jako pusta przestrzeń.

- Fluktuacje kwantowe \Leftrightarrow tymczasowe zmiany ilości energii w danym punkcie przestrzeni, będące konsekwencją zasady nieokreśloności Heinsenberga.

$$\Delta E \cdot \Delta t \geq \frac{h}{4\pi}$$

- $h = 6,6260693 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$ – stała Plancka
 - ΔE – tymczasowa zmiana (fluktuacja) energii
 - Δt – czas trwania fluktuacji energii
- Fluktuacje kwantowe powodują powstawanie bardzo krótko żyjących wirtualnych par cząstka-antycząstka. Przykładem zjawiska spowodowanego przez fluktuacje kwantowe jest efekt Casimira.

- Efekt Casimira \Leftrightarrow zjawisko przewidziane przez Casimira w 1948, polegające na przyciąganiu się dwóch nienaładowanych zwierciadeł metalowych znajdujących się bardzo blisko siebie w próżni.
- Siła ta została wyznaczona doświadczalnie 10 lat później. Jest ona wprost proporcjonalna do powierzchni zwierciadeł i odwrotnie proporcjonalna do czwartej potęgi odległości między nimi.
- Na przykład dwa zwierciadła o powierzchni 1 cm^2 odległe o $1 \text{ }\mu\text{m}$ przyciągają się z siłą Casimira wynoszącą około 10^{-7} N , ale już z odległości 10 nm siła ta wynosi około 10 N .

C Siła Casimira jest spowodowana różnicą ciśnień wywieranych na zwierciadła przez wirtualne cząstki. W ramach kwantowej grawitacji sformułowano hipotezę, że grawitacja jest długozasięgową siłą Casimira.

B Hendrik Brugt Gerhard Casimir (1909-2000), holenderski fizyk.

• H. B. G. Casimir: *On the attraction between two perfectly conducting plates*.
Proceedings of the Koninklijke Nederlandse Akademie van Wetenschappen **51** (1948) 793-795.

19. Przejścia fazowe w próżni a złamanie pierwotnej symetrii

- Przejścia fazowe w próżni a złamanie pierwotnej symetrii \Leftrightarrow pierwotnie wszystkie oddziaływania były zunifikowane, a masy wszystkich cząstek zerowe. Ekspansja Wszechświata spowodowała złamanie tej pierwotnej symetrii, które można interpretować jako przejście fazowe próżni do stanu, w którym nastąpiło umasowienie cząstek fundamentalnych.

- Teoria strun
- Supersymetria
- Teoria superstrun

- Teoria strun \Leftrightarrow teoria zakładająca, że cząstki fundamentalne są jednowymiarowymi obiektami (strunami).
- Formalizm teorii strun wymaga posługiwania się przestrzenią co najmniej 10-wymiarową.

- Supersymetria (SUSY) \Leftrightarrow hipoteza głosząca, że po zamianie każdej cząstki elementarnej, będącej fermionem [bozonem], odpowiadającym jej “superpartnerem”, będącym bozonem [fermionem], właściwości wszechświata nie ulegną zmianie.
- Spiny danej cząstki i jej “superpartnera” różnią się o $1/2$.

P Przykładowe pary cząstek i ich “superpartnerów” podano poniżej:

cząstka	spin	superpartner	spin
foton	1	fotino	$1/2$
zeton zero	1	zino zero	$1/2$
wuon plus	1	wino plus	$1/2$
wuon minus	1	wino minus	$1/2$
elektron	$1/2$	selektron	0

-
- Teoria superstrun \Leftrightarrow teoria będąca połączeniem teorii strun z ideą supersymetrii.

- M-teoria \Leftrightarrow teoria wszystkiego, sformułowana w 1995 przez Edwarda Wittena, będąca rozszerzeniem teorii superstrun.
- Podstawowymi n-wymiarowymi obiektami w tej teorii są n-brany.

B Edward Witten (ur. 1951), amerykański fizyk-teoretyk i matematyk.

ASTROFIZYKA

21. Eksperymentalne potwierdzenie ogólnej teorii względności

- Grawitacyjne przesunięcie linii spektralnych
- Grawitacyjna dyfrakcja światła
- Soczewkowanie grawitacyjne
- Anomalny obrót peryhelium Merkurego
- Doświadczenie Pounda-Rebki
- Doświadczenie Shapiro
- GPS (Global Positioning System)

- Grawitacyjne przesunięcie linii spektralnych ku czerwieni \Leftrightarrow zjawisko polegające na tym, że widmo światła docierającego do Ziemi ze źródła znajdującego się na masywnym obiekcie nieruchomym względem Ziemi jest przesunięte ku czerwieni w stosunku do widma światła emitowanego z identycznego źródła znajdującego się na Ziemi. Światło oddalające się od emitera zmniejsza swoją częstotliwość, wchodząc w obszar słabszego pola grawitacyjnego.
- Grawitacyjne przesunięcie ku czerwieni nazywane jest też grawitacyjnym poczerwienieniem.

H Grawitacyjne przesunięcie ku czerwieni przewidział Einstein w 1907.

B Albert Einstein (1879-1955), genialny fizyk teoretyk, laureat nagrody Nobla z fizyki w 1921.

• A. Einstein: *Über das Relativitätsprinzip und die aus demselben gezogenen Folgerungen*. Jahrbuch der Radioaktivität und Elektronik 4 (1907) 411-462. *O zasadzie względności i jej konsekwencjach*.

- Grawitacyjna dyfrakcja światła \Leftrightarrow zjawisko polegające na ugięciu promieni świetlnych przelatujących w pobliżu Słońca lub innej gwiazdy.

H Ugięcie promieni świetlnych w polu grawitacyjnym przewidział Einstein w 1907 i dokładnie obliczył w 1915.

H Przeprowadzone 29 maja 1919 pod kierunkiem Eddingtona obserwacje zaćmienia Słońca potwierdziły przewidziane przez ogólną teorię względności odchylenie promieni świetlnych w polu grawitacyjnym tej gwiazdy.

B Albert Einstein (1879-1955), genialny fizyk teoretyk, laureat nagrody Nobla z fizyki w 1921.

B Sir Arthur Stanley Eddington (1882-1944), brytyjski astronom, astrofizyk, fizyk i matematyk.

- A. Einstein: *Über das Relativitätsprinzip und die aus demselben gezogenen Folgerungen.*

Jahrbuch der Radioaktivität und Elektronik **4** (1907) 411-462. *O zasadzie względności i jej konsekwencjach.*

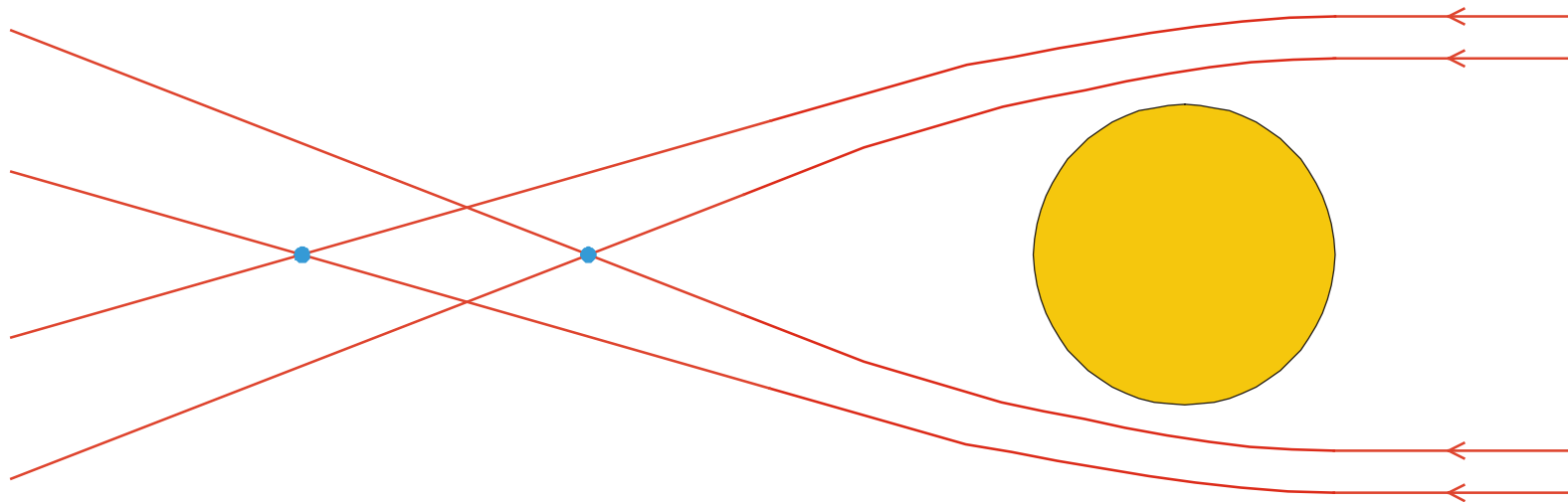
- A. Einstein: *Erklärung der Perihelbewegung der Merkur aus der allgemeinen Relativitätstheorie.*

Sitzungsberichte der Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften **2**, 47 (1915) 831-839.

[Gesamtsitzung vom 18. November 1915] *Wyjaśnienie ruchu peryhelium Merkurego w ogólnej teorii względności.*

- Soczewkowanie grawitacyjne \Leftrightarrow działanie pola grawitacyjnego na wiązkę fal elektromagnetycznych tak, jak soczewka o wielu ogniskach. Dla promieni biegnących dalej od źródła pola grawitacyjnego ogniskowa jest większa.

H Soczewkowanie grawitacyjne opisał Einstein w 1936.



• Soczewka grawitacyjna

• Anomalny obrót peryhelium Merkurego \Leftrightarrow zjawisko polegające na tym, że peryhelium Merkurego przesuwa się o 574 sekundy kątowne na stulecie wskutek ruchu tej planety po rozecie eliptycznej, z czego 43 sekundy kątowne nie dają się wyjaśnić przez teorię Newtona.

H Zjawisko to zaobserwował w 1859 Le Verrier.

H Einstein wyjaśnił jakościowo i ilościowo 18 listopada 1915 anomalny obrót peryhelium Merkurego (i pozostałych planet).

B Urbain Jean Joseph Le Verrier (1811-1877), francuski astronom.

B Albert Einstein (1879-1955), genialny fizyk teoretyk, laureat nagrody Nobla z fizyki w 1921.

• Urbain Jean Joseph Le Verrier: *Sur la théorie de Mercure et sur le mouvement du périhélie de cette planète*. Comptes Rendus des séances de l'Académie des Sciences, Paris **49** (1859) 379-383.
[Séance du lundi 12 septembre 1859]

• A. Einstein: *Erklärung der Perihelbewegung der Merkur aus der allgemeinen Relativitätstheorie*. Sitzungsberichte der Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften **2**, 47 (1915) 831-839.
[Gesamtsitzung vom 18. November 1915] *Wyjaśnienie ruchu peryhelium Merkurego w ogólnej teorii względności*.

• Doświadczenie Pounda-Rebki \Leftrightarrow doświadczenie przeprowadzone przez Pounda i Rebkę w 1960, polegające na zmierzeniu w warunkach laboratoryjnych przesunięcia linii widmowych spowodowanego polem grawitacyjnym Ziemi. Eksperyment z większą dokładnością powtórzyli Pound i Snider w 1964 oraz 1965.

B Robert Vivian Pound (1919-2010), kanadyjsko-amerykański fizyk.

B Glen Anderson Rebka (ur. 1931), amerykański fizyk.

B Joseph L. Snider, amerykański fizyk.

- R. V. Pound and G. A. Rebka, Jr.: *Apparent weight of photons*. Physical Review Letters **4**, 7 (April 1, 1960) 337-341.
- R. V. Pound and J. L. Snider: *Effect of Gravity on Nuclear Resonance*. Physical Review Letters **13**, 18 (11/1964) 539-540.
- R. V. Pound and J. L. Snider: *Effect of Gravity on Gamma Radiation*. Physical Review **140**, 3 B (11/1965) B788-B803.

• Doświadczenie Shapiro \Leftrightarrow doświadczenie wykonane przez Shapiro w 1968, które wykazało, że czas przelotu sygnału radarowego na trasie Ziemia-Wenus (Merkury)-Ziemia w pobliżu Słońca jest dłuższy niż czas przelotu z dala od Słońca. Retardacja (opóźnienie) sygnału jest jednym z testów ogólnej teorii względności.

H Efekt ten został przewidziany przez Shapiro w 1964.

B Irwin I. Shapiro (ur. 1929), amerykański fizyk i astrofizyk.

- Irwin I. Shapiro: *Fourth test of general relativity*. Physical Review Letters **13**, 26 (28 December 1964) 789-791.
- Irwin I. Shapiro, Gordon H. Pettengill, Michael E. Ash, Melvin L. Stone, William B. Smith, Richard P. Ingalls, and Richard A. Brockelman: *Fourth test of general relativity: Preliminary results*. Physical Review Letters **20**, 22 (May 1968) 1265-1269.
- Irwin I. Shapiro, Gordon H. Pettengill, Michael E. Ash, Melvin L. Stone, William B. Smith, Richard P. Ingalls, and Richard A. Brockelman: *Fourth test of general relativity: Preliminary results*. Physical Review Letters **21**, 4 (July 1968) 266-266.

-
- GPS (Global Positioning System) \Leftrightarrow globalny system nawigacyjny.
 - Aby określić pozycję w przestrzeni i czas, konieczny jest jednoczesny odbiór sygnałów z przynajmniej czterech satelitów.
 - Nie uwzględnienie poprawek wynikających z teorii względności spowodowałoby błąd w pomiarze czasu wynoszący 38580 ns na dobę, a w pomiarze odległości 11578 m na dobę.

- Fale grawitacyjne
- Pośredni (astronomiczny) dowód istnienia fal grawitacyjnych

• Fale grawitacyjne \Leftrightarrow rozchodzące się w przestrzeni zaburzenia pola grawitacyjnego w postaci zmian składowych tensora metrycznego. Fale grawitacyjne są falami poprzecznymi, ich propagacja odbywa się z prędkością o wartości równej maksymalnej wartości prędkości rozchodzenia się sygnałów.

H Teorię fal grawitacyjnych sformułował Einstein w 1916.

B Albert Einstein (1879-1955), genialny fizyk teoretyk, laureat nagrody Nobla z fizyki w 1921.

• A. Einstein: *Näherungsweise Integration der Feldgleichungen der Gravitation*.

Sitzungsberichte der Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften **1**, 32 (1916) 688-696.

Przybliżone całkowanie równań pola grawitacyjnego.

Po raz pierwszy została sformułowana teoria fal grawitacyjnych.

• A. Einstein: *Über Gravitationswellen*. Sitzungsberichte der Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften **1** (1918) 154-167.

O falach grawitacyjnych.

Podał między innymi wzór kwadrupolowy na moc energii wysyłanej w formie fal grawitacyjnych przez poruszające się ciała będące emiterami.

• A. Einstein, N. Rosen: *On Gravitational Waves*. Journal of the Franklin Institute **223** (1937) 43-54.

O falach grawitacyjnych.

Podali rozwiązanie równań pola dla cylindrycznych fal grawitacyjnych.

22. Pośredni (astronomiczny) dowód istnienia fal grawitacyjnych

- Pośredni (astronomiczny) dowód istnienia fal grawitacyjnych \Leftrightarrow obserwacyjny dowód sfinalizowany w 1979 przez Taylora, który wykazał, że podwójny pulsar (PSR B1913+16) emituje fale grawitacyjne.
- Po czterech latach obserwacji zarejestrował, że okres obiegu orbity pulsara zmniejsza się o 75 milionowych części sekundy na rok. Jest to spowodowane emisją fal grawitacyjnych. Pulsar i towarzysząca mu gwiazda neutronowa tracą energię i zbliżają się do siebie. Zgodnie z trzecim prawem Keplera okres obiegu orbity staje się krótszy.

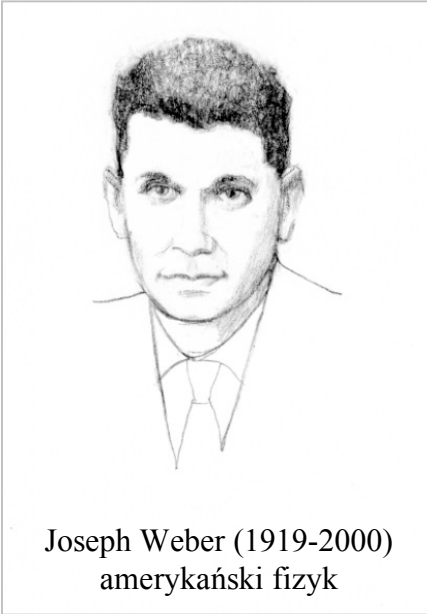
B Joseph Hooton Taylor (ur. 1941), amerykański astrofizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1993.

• J. H. Taylor, L. A. Fowler and P. M. McCulloch: *Measurements of General Relativistic Effects in the Binary Pulsar PSR1913+16*. Nature **277** (1979) 437-440.

- Cylindryczne detektory rezonansowe
 - Detektor Webera
 - AURIGA
 - EXPLORER
 - NAUTILUS
 - ALLEGRO
- Sferyczne detektory rezonansowe
 - Detektor Forwarda
 - MiniGRAIL

- Naziemne laserowe detektory interferencyjne
 - TAMA 300
 - GEO 600
 - VIRGO
 - LIGO
 - AIGO
 - CLIO
 - LCGT
- Kosmiczne laserowe detektory interferencyjne
 - LISA

- Cylindryczny detektor rezonansowy \Leftrightarrow walec wykonany z jednorodnego metalu, na powierzchni którego umieszczone są przetworniki piezoelektryczne rejestrujące drgania wywołane przez falę grawitacyjną.



Joseph Weber (1919-2000)
amerykański fizyk

- Pierwszy detektor promieniowania grawitacyjnego został zbudowany przez Webera w 1960.
- Stanowiły go dwa zawieszone w próżni aluminiowe cylindry o średnicy 90 cm i masie 3,5 tony, oddalone od siebie o 1000 km. Czujnikami drgań były kryształy piezoelektryczne.
- Tylko równoczesna detekcja sygnału przez oba walce miała stanowić dowód istnienia fal grawitacyjnych.
- Antena Webera jest anteną wąskopasmową. Może rejestrować tylko sygnały o częstotliwościach odpowiadających częstotliwościom drgań własnych anteny, czyli około 1,6 kHz.

AURIGA

Typ rezonansowy (cylindryczny)

Materiał aluminium

Zakres 920 Hz

Szerokość pasma

Czułość

Masa 2.300 kg

Długość

Średnica 60 cm

Temperatura 0,1 K

Kraj Włochy

Start 1997

- Czułość = $|\Delta l|/l$ – względna zmiana rozmiarów liniowych detektora
- Δl – zmiana rozmiarów liniowych detektora
- l – pierwotny rozmiar liniowy detektora

EXPLORER

Typ rezonansowy (cylindryczny)

Materiał aluminium

Zakres 906 Hz i 923 Hz

Szerokość pasma

Czułość

Masa 2.270 kg

Długość 3 m

Średnica 60 cm

Temperatura 2,6 K

Kraj Szwajcaria

Start 2000

NAUTILUS

Typ rezonansowy (cylindryczny)

Materiał aluminium

Zakres 908 Hz i 924 Hz

Szerokość pasma

Czułość

Masa 2.300 kg

Długość 3 m

Średnica 60 cm

Temperatura 0,1 K

Kraj Włochy

Start 1995

ALLEGRO

Typ rezonansowy (cylindryczny)

Materiał

Zakres 900 Hz

Szerokość pasma

Czułość

Masa 2.300 kg

Długość

Średnica

Temperatura 4,2 K

Kraj USA

Start 1991

-
- Sferyczny detektor rezonansowy \Leftrightarrow kula wykonana z jednorodnego metalu, z rozmieszczonymi na jej powierzchni przetwornikami piezoelektrycznymi rejestrującymi drgania wywołane przez falę grawitacyjną.

- Detektor Forwarda \Leftrightarrow sferyczny detektor rezonansowy zaproponowany przez Forwarda w 1971.

B Robert Lull Forward (1932-2002), amerykański fizyk.

MiniGRAIL

Typ rezonansowy (sferyczny)

Materiał Cu Al (6 %)

Zakres 2,9 kHz

Szerokość pasma 230 Hz

Czułość $4 \cdot 10^{-21}$

Masa 1.150 kg

Średnica 68 cm

Temperatura 20 mK

Kraj Holandia

Start

- Naziemny laserowy detektor interferencyjny \Leftrightarrow detektor fal grawitacyjnych będący interferometrem. Światło emitowane przez laser zostaje rozdzielone na dwie wiązki skierowane do dwóch ramion interferometru, na końcach których znajdują się masywne lustra w układzie Fabry-Pérot. Spotykające się wiązki, po odbiciu od luster, ulegają interferencji. Podczas przejścia fali grawitacyjnej, nastąpi zmiana długości ramion interferometru (odległości między lustrami), co zmieni obraz prążków interferencyjnych.

TAMA 300

Typ interferencyjny (laserowy)

Zakres

Szerokość pasma

Czułość

Długość ramion 300 m

Średnica

Ciśnienie

Temperatura

Kraj Japonia

Start 1995

GEO 600

Typ interferencyjny (laserowy)

Zakres 50 Hz ÷ 1,5 kHz

Szerokość pasma > 60 Hz

Czułość 10^{-26} ÷ 10^{-20}

Długość ramion 600 m

Średnica 60 cm

Ciśnienie < 10^{-6} Pa

Temperatura

Kraj Niemcy

Start wrzesień 1995

ciśnienie atmosferyczne $\approx 10^5$ Pa

VIRGO

Typ interferencyjny (laserowy)

Zakres 10 Hz ÷ 10 kHz

Szerokość pasma

Czułość

Długość ramion 3 km

Średnica

Ciśnienie

Temperatura

Kraj Włochy

Start 2003

LIGO (Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory)

Typ interferencyjny (laserowy)

Zakres

Szerokość pasma

Czułość $10^{-22} \div 10^{-21}$

Długość ramion 2 km i 4 km

Średnica

Ciśnienie

Temperatura

Kraj USA (Livingston w stanie Luizjana)

Start 2002

14 września 2015 zarejestrowano sygnał pochodzący od zlewających się dwóch czarnych dziur.

- B. P. Abbott et al. (LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration):
Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger.
Physical Review Letters **116** (11 February 2016) 061102 (16 pages).

LIGO (Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory)

Typ interferencyjny (laserowy)

Zakres

Szerokość pasma

Czułość $10^{-22} \div 10^{-21}$

Długość ramion 4 km

Średnica

Ciśnienie

Temperatura

Kraj USA (Hanford w stanie Waszyngton)

Start 2002

14 września 2015 zarejestrowano sygnał pochodzący od zlewających się dwóch czarnych dziur.

- B. P. Abbott et al. (LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration):
Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger.
Physical Review Letters **116** (11 February 2016) 061102 (16 pages).

AIGO (Australian International Gravitational Observatory)

Typ interferencyjny (laserowy)

Zakres

Szerokość pasma

Czułość

Długość ramion

Średnica

Ciśnienie

Temperatura

Kraj [Australia](#)

Start

CLIO (Cryogenic Laser Interferometer Observatory)

Typ interferencyjny (laserowy)

Zakres

Szerokość pasma

Czułość

Długość ramion 100 m

Średnica

Ciśnienie

Temperatura 20° K

Kraj Japonia

Start

LCGT (Large Cryogenic Gravitational-wave Telescope)

Typ interferencyjny (laserowy)

Zakres

Szerokość pasma

Czułość

Długość ramion 3 km

Średnica

Ciśnienie

Temperatura

Kraj Japonia

Start 2009

- Kosmiczny laserowy detektor interferencyjny \Leftrightarrow detektor fal grawitacyjnych wykorzystujący zjawisko interferencji światła. Elementy składowe tego detektora będą orbitowały wokół Słońca.

LISA (Laser Interferometer Space Antenna)

Typ Interferencyjny (laserowy)

Będą tworzyć go trzy satelity umieszczone w wierzchołkach trójkąta równobocznego o boku 5 mln km, którego środek poruszać się będzie 50 mln km za Ziemią po jej orbicie okołosłonecznej.

Zakres 10^{-5} Hz ÷ 1 Hz

Kraj USA (NASA), Unia Europejska (ESA)

Start 2020

NASA – National Aeronautics and Space Administration

NASA – National Aeronautics and Space Administration

ESA – European Space Agency

- Paradoks Olbersa
- Promieniowanie tła
- Problem horyzontu
- Problem płaskości
- Osobliwości w rozwiązaniach równań pola
 - Osobliwość w próżniowym rozwiązaniu Schwarzschilda
 - Osobliwości w kosmologicznych rozwiązaniach Friedmana

• Paradoks Olbersa \Leftrightarrow paradoks sformułowany w 1826 przez Olbersa: “Skoro wszechświat jest statyczny, jednorodny i nieskończony w czasie i przestrzeni, to dlaczego niebo w nocy jest ciemne?”. Olbers próbował wytłumaczyć ten paradoks, przyjmując, że materia międzygwiazdna pochłania zdążające ku Ziemi światło. Paradoks Olbersa rozwiązano dopiero prawie sto lat później w ramach teorii rozszerzającego się wszechświata Friedmana i bazującej na niej hipotezie wielkiego wybuchu. Niebo w nocy jest ciemne, ponieważ wiek wszechświata jest skończony i światło z odległych gwiazd jeszcze nie zdążyło dotrzeć do nas, a ponadto jego widmo jest przesunięte ku czerwieni.

C Paradoks Olbersa nazywany jest też paradoksem fotometrycznym.

B Heinrich Wilhelm Matthias Olbers (1758-1840), niemiecki astronom i lekarz.

• H. W. M. Olbers: *Über die Durchsichtigkeit des Weltraums*. Berliner astronomisches Jahrbuch für das Jahr 1826.
O przezroczystości przestrzeni kosmicznej.

- Promieniowanie tła \Leftrightarrow mikrofalowe promieniowanie, odpowiadające temperaturze 2,7 stopni Kelvina, docierające do Ziemi równomiernie ze wszystkich kierunków. Nazywane jest również promieniowaniem reliktowym lub szczątkowym.

H Promieniowanie tła odkryli Penzias i Wilson w 1965. Byli oni wtedy pracownikami w Laboratoriach Bella, zajmowali się łącznością radiową z satelitami. Używali do tego celu sześciometrowej anteny kierunkowej, pojawiający się w niej szum okazał się mikrofalowym izotropowym promieniowaniem tła. Odkrycie to potwierdziło hipotezę o istnieniu promieniowania szczątkowego jako pozostałości po wielkim wybuchu. Hipotezę taką sformułował po raz pierwszy Gamow w 1948.

• A. A. Penzias and R. W. Wilson: *A Measurement of Excess Antenna Temperature at 4080 MHz*, Astrophysical Journal **142** (07/1965) 419-421.
Pomiar nadwyżki temperatury anteny przy 4080 MHz.

B George (Gieorgij Antonowicz) Gamow (1904-1968), amerykański fizyk-teoretyk pochodzenia ukraińskiego.

B Arno Allan Penzias (ur. 1933), amerykański astrofizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1978.

B Robert Woodrow Wilson (ur. 1936), amerykański radioastronom, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1978.

• Problem horyzontu \Leftrightarrow paradoks związany z teorią wielkiego wybuchu. Termiczne promieniowanie tła jest izotropowe, jego długość nie zależy od kierunku obserwacji. Aby to było możliwe, różne obszary przestrzeni powinny znajdować się w równowadze termicznej. Ale jak mogą oddziaływać ze sobą dwa źródła położone symetrycznie względem nas po przeciwnych stronach na horyzoncie obserwowalnego wszechświata, skoro w chwili dotarcia do Ziemi światło zdążyło pokonać dopiero połowę odległości między nimi? Paradoks ten stawiało wielu kosmologów, w tym Misner w 1969.

B Charles William Misner (ur. 1932), amerykański astronom i fizyk.

• Problem płaskości \Leftrightarrow paradoks związany z teorią wielkiego wybuchu. W sekundę po wielkim wybuchu gęstość materii we wszechświecie powinna być zbliżona z dokładnością do piętnastego miejsca po przecinku do wartości krytycznej, czyli takiej, przy której wszechświat staje się przestrzennie płaski, a szybkość ekspansji ulega spowolnieniu. W przeciwnym przypadku nastąpiłby wielki kolaps lub stan rozrzedzenia uniemożliwiający powstanie galaktyk.

H Problem płaskości sformułowali Dicke i Peebles w 1979.

B Robert Henry Dicke (1916-1997), amerykański fizyk.

B Phillip James Edwin Peebles (ur. 1935), amerykański kosmolog pochodzenia kanadyjskiego.

• R. H. Dicke and P. J. E. Peebles: *The big bang cosmology - enigmas and nostrums*. [in:]
General relativity: An Einstein centenary survey.
Edited by S. W. Hawking and W. Israel.
Cambridge University Press, Cambridge 1979.
[Strony 504-517]

- Osobliwość w próżniowym rozwiązaniu Schwarzschilda \Leftrightarrow osobliwość pojawiająca się, gdy odległość od punktowego źródła pola jest równa promieniowi Schwarzschilda.

B Karl Schwarzschild (1873-1916), niemiecki astronom i fizyk.

• K. Schwarzschild: *Über das Gravitationsfeld eines Massenpunktes nach der Einsteinschen Theorie.*

Sitzungsberichte der Königlich Preußischen Akademie der Wissenschaften **1**, 7 (1916) 189-196. [Gesamtsitzung vom 13. Januar 1916]

O polu grawitacyjnym punktowej masy według teorii Einsteina.

Znalazł pierwsze dokładne rozwiązanie równań pola grawitacyjnego Einsteina w przypadku statycznego sferycznie symetrycznego pola grawitacyjnego w pustej przestrzeni, którego źródłem jest nieruchoma punktowa masa.

- Osobliwość w kosmologicznych rozwiązaniach Friedmana \Leftrightarrow osobliwość, w której objętość wszechświata jest równa zero, a jego gęstość nieskończoności.

H Pierwszą hipotezę, łączącą tę osobliwość z aktem kreacji wszechświata, wysunął w 1931 Lemaître.

B Aleksandr Aleksandrowicz Friedman (1888-1925), rosyjski matematyk i fizyk.

B Georges Henri Joseph Édouard Lemaître (1894-1966), belgijski astrofizyk i kosmolog.

- A. Friedman: *Über die Krümmung des Raumes*. Zeitschrift für Physik **10**, 6 (1922) 377-386. *O krzywiznie przestrzeni*. Zaproponował model wszechświata o zmiennej w czasie dodatniej krzywiznie przestrzeni (w danej chwili krzywizna w różnych punktach przestrzeni jest taka sama), jednorodnie wypełnionego materią.
- A. Friedmann: *Über die Möglichkeit einer Welt mit konstanter negativer Krümmung des Raumes*. Zeitschrift für Physik **21**, 5 (1924) 326-332. *O możliwości świata o stałej ujemnej krzywiznie*. Przedstawił model wszechświata o zmiennej w czasie ujemnej krzywiznie przestrzeni (w danej chwili krzywizna w różnych punktach przestrzeni jest taka sama), jednorodnie wypełnionego materią.
- G. E. Lemaître: *The Beginning of the World: from the Point of View of Quantum Theory*. Nature **127**, 3210 (May 9, 1931) 706. *Początek świata: z punktu widzenia teorii kwantowej*.

- Inflacja \Leftrightarrow wydarzenia, jakie miały miejsce w 10^{-35} sekundy po wielkim wybuchu i które trwały 10^{-32} sekundy. Nastąpił wtedy gwałtowny (inflacyjny) wzrost promienia obserwowalnego wszechświata. Podczas inflacji gęstość zmalała do wartości krytycznej. Ponieważ przed inflacją wszechświat był niezwykle mały, zdążyła ustalić się w nim równowaga termiczna. Dzięki temu obecnie obserwowalny wszechświat jest prawie płaski przestrzennie, a promieniowanie tła izotropowe.

H Hipotezę o inflacyjnej fazie kreacji wszechświata zaproponował Guth w 1981 w pracy “Wszechświat inflacyjny: Możliwe rozwiązania problemów horyzontu i płaskości”.

B Alan Harvey Guth (ur. 1947), amerykański fizyk-teoretyk i kosmolog.

- Człon kosmologiczny
- Ciemna energia
- Kwintesencja

- Człon kosmologiczny \Leftrightarrow człon $(\Lambda g_{\mu\nu})$ dodany przez Einsteina w 1917 do równań pola grawitacyjnego. Zmodyfikowane równania pola zapisywane są w dwóch równoważnych postaciach.

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R + \Lambda g_{\mu\nu} = -\frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

$$R_{\alpha\beta} + \Lambda g_{\alpha\beta} = -\frac{8\pi G}{c^4} \left(T_{\alpha\beta} - \frac{1}{2} g_{\alpha\beta} T \right)$$

- Λ – stała kosmologiczna
- Opierając się na równaniach pola grawitacyjnego z członem kosmologicznym, Einstein przedstawił w 1917 pierwszy model wszechświata w ramach ogólnej teorii względności.

• Albert Einstein: *Kosmologische Betrachtungen zur allgemeinen Relativitätstheorie*. Sitzungsberichte der Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften 1, 6 (1917) 142-152. *Problemy kosmologii i ogólna teoria względności*.

- Poniżej podamy interpretację członu kosmologicznego:

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R + \Lambda g_{\mu\nu} = -\frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R = -\frac{8\pi G}{c^4} \left(T_{\mu\nu} + \frac{c^4 \Lambda g_{\mu\nu}}{8\pi G} \right)$$

$$T_{\mu\nu}^* = \frac{c^4 \Lambda g_{\mu\nu}}{8\pi G}$$

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R = -\frac{8\pi G}{c^4} (T_{\mu\nu} + T_{\mu\nu}^*)$$

$T_{\mu\nu}^*$ – tensor energii - pędu próżni

- Ciemna energia \Leftrightarrow hipotetyczna, dodatkowa energia wypełniająca wszechświat, której istnienie jest “niezbędne”, by wyjaśnić w ramach modelu Friedmana rozszerzającej się przestrzeni obserwowany gwałtowny wzrost poczerwienienia światła docierającego do Ziemi z bardzo odległych źródeł.

H Pojęcie ciemnej energii zaproponował Michael S. Turner w 1998.

B Michael S. Turner (ur. 1949), amerykański astrofizyk-teoretyk i kosmolog.

K Istnieją modele wszechświata inne niż model wielkiego wybuchu oparty o rozwiązanie Friedmana, niewymagające przyjmowania postulatu o istnieniu ciemnej energii. Jednym z nich jest model zaproponowany przeze mnie w 2012.

- Michael S. Turner: *Dark Matter and Dark Energy in the Universe*. [in:] The Third Stromlo Symposium: The Galactic Halo. Edited by B. K. Gibson, T. S. Axelrod, & M. E. Putman. ASP Conference Series **165** (1999) 431-452.
- Z. Osiak: *Antygravitacja*. Self Publishing (2012). ISBN: 978-83-272-3649-4

- Kwintesencja \Leftrightarrow hipotetyczna forma ciemnej energii, rozpatrywana jako piąte fundamentalne oddziaływanie.

H Pojęcie kwintesencji zaproponował Steinhardt w 1998.

B Paul J. Steinhardt, amerykański fizyk-teoretyk.

•R. R. Caldwell, Rahul Dave, and Paul J. Steinhardt:
Cosmological Imprint of an Energy Component with General Equation of State.
Physical Review Letters **80**, 8 (23 February 1998) 1582-1585.
(Received 28 July 1997)

- Gwiazdy neutronowe \Leftrightarrow gwiazdy zbudowane prawie całkowicie z neutronów.

H Istnienie gwiazd neutronowych przewidział Landau w 1932.

H Istnienie gwiazd neutronowych sugerowali również Baade i Zwicky w 1934.

H Model sferycznie symetrycznej, statycznej gwiazdy neutronowej podali Oppenheimer i Volkoff w 1939.

B Wilhelm Heinrich Walter Baade, (1893-1960) niemiecko-amerykański astronom.

B Fritz Zwicky (1898-1974), szwajcarsko-amerykański astronom i astrofizyk.

B J. Robert Oppenheimer (1904-1967), amerykański fizyk.

B Lew Dawidowicz Landau (1908-1968), radziecki fizyk-teoretyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1962.

B George Michael Volkoff (1914-2000), kanadyjski fizyk-teoretyk.

- L. D. Landau: *К meopuu звезд*. Physikalische Zeitschrift der Sowjetunion **1**, 2 (1932) 285-288. *O teorii gwiazd*.
- W. Baade and F. Zwicky: *Cosmic Rays from Super-novae*. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America **20**, 5 (1934) 259-263.
- W. Baade and F. Zwicky: *Remarks on Super-Novae and Cosmic Rays*. Physical Review **46**, 1 (07/1934) 76-77.
- J. R. Oppenheimer and G. M. Volkoff: *On Massive Neutron Cores*. Physical Review **55**, 4 (February 15, 1939) 374-381.

- Pulsar \Leftrightarrow wirująca gwiazda neutronowa emitująca okresowo impulsy promieniowania elektromagnetycznego.
- Podwójny pulsar \Leftrightarrow układ dwóch gwiazd krążących wokół ich środka masy, przy czym jedna z tych gwiazd powinna być pulsarem.

H Pierwszego pulsara odkryła Bell (doktorantka Hewisha) w 1967, za co jej promotor otrzymał Nagrodę Nobla z fizyki w 1974.

Doniesienie zostało opublikowane w 1968.

H Pierwszego podwójnego pulsara odkrył w 1974 Hulse (student Taylora), który obsługiwał Arecibo Radio Telescope w Puerto Rico, za co obaj otrzymali Nagrodę Nobla z fizyki w 1993. Pulsar ten okrąża swojego towarzysza, będącego gwiazdą neutronową, z okresem wynoszącym 7,75 godzin i obraca się wokół swojej osi w ciągu 0,06903 sekundy. Odległy jest od Ziemi o 1600 lat świetlnych.

B Antony Hewish (ur. 1924), brytyjski radioastronom, laureat Nagrody Nobla z Fizyki w 1974.

B Joseph Hooton Taylor (ur. 1941), amerykański astrofizyk, laureat Nagrody Nobla z Fizyki w 1993.

B Susan Jocelyn Bell-Burnell (ur. 1943), brytyjska astrofizyczka.

B Russell Alan Hulse (ur. 1950), amerykański astronom, laureat Nagrody Nobla z Fizyki w 1993.

- A. Hewish, S. J. Bell, J. D. H. Pilkington, P. F. Scott, and R. A. Collins: *Observation of a Rapidly Pulsating Radio Source*. Nature **217** (1968) 709.
- S. J. Bell, J. D. H. Pilkington, A. Hewish, and T. W. Cole: *Observations of Some Further Pulsed Radio Source*. Nature **218** (1968) 126.
- R. A. Hulse, J. H. Taylor: *Discovery of a Pulsar in a Close Binary System*. Bulletin of the American Astronomical Society **6** (09/1974) 453.
- R. A. Hulse, J. H. Taylor: *Discovery of a pulsar in a binary system*. Astrophysical Journal **195** (January 15, 1975) L51-L53.

- Gwiazda supernowa \Leftrightarrow gwiazda, która wskutek eksplozji emituje super intensywne promieniowanie elektromagnetyczne.

H Termin supernowa zaproponowali Baade i Zwicky w 1934.

B Wilhelm Heinrich Walter Baade (1893-1960) niemiecko-amerykański astronom.

B Fritz Zwicky (1898-1974), szwajcarsko-amerykański astronom i astrofizyk.

- W. Baade and F. Zwicky: *On Super-novae*.

Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America **20**, 5 (1934) 254-259.

W pracy tej pojawiło się po raz pierwszy pojęcie *supernowa*. Autorzy wysunęli hipotezę, że supernowa jest gwiazdą neutronową.

- Czarna dziura
- Promień Schwarzschilda
- Horyzont zdarzeń

- Istnienie czarnych dziur byłoby potwierdzeniem słuszności OTW w przypadku silnych pól grawitacyjnych dla których maksymalna wartość bezwzględna potencjału jest równa kwadratowi wartości prędkości światła.
- Dla porównania, na powierzchni Słońca:

$$\frac{|\varphi|}{c^2} = \frac{GM}{rc^2} = 2,12 \times 10^{-6}$$

- Czarna dziura \Leftrightarrow ciało w kształcie kuli, dla którego stosunek masy (M) do promienia (R) spełnia nierówność

$$\frac{M}{R} > \frac{c^2}{2G} = 0,6733055 \cdot 10^{27} \frac{\text{kg}}{\text{m}}$$

- $c = 2,99792458 \cdot 10^8$ m/s – maksymalna wartość prędkości rozchodzenia się sygnałów
- $G = 6,6742 \cdot 10^{-11}$ m³/kg·s² – stała grawitacyjna

C Nazwę czarna dziura zaproponował Wheeler (1967 – wykład, 1968 – artykuł).

B John Archibald Wheeler (1911-2008), amerykański fizyk teoretyk.

• J. A. Wheeler: *Our universe: The known and the unknown*. Address before the American Association for the Advancement of Science, New York, 29 December 1967. [w:] *The American Scholar* **37** (1968) 2488-274. [oraz:] *American Scientist* **56** (1968) 1-20.

- Promień Schwarzschilda (r_s) \Leftrightarrow promień sfery, otaczającej czarną dziurę, z której wartość prędkości ucieczki jest równa maksymalnej wartości prędkości rozchodzenia się sygnałów.

$$r_s = \frac{2GM}{c^2}, \quad \frac{2G}{c^2} = 1,5 \cdot 10^{-27} \cdot \frac{\text{m}}{\text{kg}}$$

- Promień Schwarzschilda nazywany jest też promieniem grawitacyjnym.
- $c = 2,99792458 \cdot 10^8$ m/s – maksymalna wartość prędkości rozchodzenia się sygnałów
- $G = 6,6742 \cdot 10^{-11}$ m³/kg·s² – stała grawitacyjna

B Carl Schwarzschild (1873-1916), niemiecki astronom i fizyk.

-
- Horyzont zdarzeń \Leftrightarrow sfera o promieniu równym promieniowi Schwarzschilda, otaczająca czarną dziurę. Prędkość ucieczki z horyzontu zdarzeń jest równa maksymalnej wartości prędkości rozchodzenia się sygnałów.

- Struny kosmiczne \Leftrightarrow jednowymiarowe defekty topologiczne czasoprzestrzeni.

H Istnienie strun kosmicznych postulował Kibble w 1976.

B Thomas Walter Bannerman Kibble (ur. 1932), brytyjski fizyk-teoretyk.

- Kwazar \Leftrightarrow gwiazdopodobne źródło fal radiowych i światła widzialnego.

H Pierwsze kwazary odkryli Matthews i Sandage w 1963.

B Allan Rex Sandage (1926-2010), amerykański astronom.

• Thomas A. Matthews, Allan R. Sandage:
Optical Identification of 3C 48, 3C 196, and 3C 286 with Stellar Objects.
Astrophysical Journal 138 (1963) 30-56.

- Jądro galaktyki \Leftrightarrow zwykle małe, bardzo jasne, gęste skupisko gwiazd i innych obiektów znajdujące się w centrum galaktyki.

- W ramach teorii wielkiego wybuchu stwierdza się, że powstanie galaktyk związane jest z pojawieniem się lokalnych niejednorodności w przestrzennym rozkładzie gęstości materii w początkowej fazie ekspansji wszechświata.

- Ciemna materia (ukryta masa) \Leftrightarrow hipotetyczna, dodatkowa materia wypełniająca wszechświat, której istnienie jest “niezbędne” do wyjaśnienia faktów obserwacyjnych dotyczących wielu lokalnych zjawisk we wszechświecie.

H Pojęcie ciemnej materii zaproponował Fritz Zwicky w 1933.

B Fritz Zwicky (1898-1974), szwajcarsko-amerykański astronom i astrofizyk.

- Promieniowanie kosmiczne o superwysokiej energii \Leftrightarrow cząstki promieniowania kosmicznego o energii kinetycznej większej niż 10^{19} eV.

- Rozbłysk gamma \Leftrightarrow krótkotrwały, nagły wzrost natężenia promieniowania gamma pojawiający się w małym obszarze nieba średnio raz na dobę. Przestrzenny rozkład rozbłysków gamma jest izotropowy.

- Hipernowa \Leftrightarrow gwiazda, która wskutek eksplozji emituje promieniowanie elektromagnetyczne o intensywności ponad stukrotnie większej niż supernowa.

H Termin hipernowa został zaproponowany przez Paczyńskiego w 1998.

B Bohdan Paczyński (1940-2007), polski astronom i astrofizyk.

• Bohdan Paczyński:
Are Gamma-Ray Bursts in Star-Forming Regions?
The Astrophysical Journal **494**, 1 (1998) L45-L48.

- Astronomia neutrinowa \Leftrightarrow dział astronomii zajmujący się badaniem wszechświata przy użyciu detektorów rejestrujących neutrina docierające do Ziemi z przestrzeni kosmicznej.

H Pionierami astronomii neutrinowej byli Bahcall i Davis, którzy w 1964 opublikowali prace poświęcone neutrinom słonecznym.

B John Norris Bahcall (1934-2005), amerykański astrofizyk.

B Raymond Davis (1914-2006), amerykański astrofizyk i chemik, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 2002.

- John N. Bahcall:

Solar Neutrinos. I. Theoretical.

Physical Review Letters **12**, 11 (1964) 300-302.

- Raymond Davis, Jr.:

Solar Neutrinos II. Experimental.

Physical Review Letters **12**, 11 (1964) 303-305.

- Problem niedoboru neutrin słonecznych
- Oscylacje neutrin

-
- Problem niedoboru neutrin słonecznych \Leftrightarrow problem polegający na tym, że liczba neutrin elektronowych docierających faktycznie do Ziemi ze Słońca jest dwukrotnie mniejsza niż liczba tych neutrin przewidywana teoretycznie.

● Oscylacje neutrin \Leftrightarrow zjawisko polegające na tym, że neutrina danego rodzaju z upływem czasu przekształcają się w neutrina innego rodzaju i *vice versa*.

H Hipotezę o oscylacji neutrin sformułował Pontecorvo w 1957. Potwierdzono ją w 1998 za pomocą detektora Super-Kamiokande w Japonii oraz detektora SNO (Sudbury Neutrino Observatory) w Kanadzie.

B Bruno Pontecorvo (1913-1993), rosyjski fizyk pochodzenia włoskiego.

B Takaaki Kajita (ur. 1959), japoński fizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 2015.

B Arthur Bruce McDonald (ur. 1943), kanadyjski fizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 2015.

- Bruno Pontecorvo:

Mesonium and anti-mesonium.

Журнал Экспериментальной и Теоретической Физики **33** (1957) 549-551.

- Bruno Pontecorvo:

Neutrino experiments and the problem of conservation of leptonic charge.

Журнал Экспериментальной и Теоретической Физики **53** (1957) 1717.

- Y. Fukuda, ..., T. Kajita *et al.* (Super-Kamiokande Collaboration):

Evidence for Oscillation of Atmospheric Neutrinos.

Physical Review Letters **81**, 8 (24 August 1998) 1562-1567.

- Q. R. Ahmad, ..., A. B. McDonald *et al.* (SNO Collaboration):

Measurement of the rate of $\nu_e + d \rightarrow p + p + e^-$ interactions produced by 8B solar neutrinos at the Sudbury Neutrino Observatory.

Physical Review Letters **87**, 7 (13 August 2001) 071301 (6 pages).

- Q. R. Ahmad, ..., A. B. McDonald *et al.* (SNO Collaboration):

Direct Evidence for Neutrino Flavor Transformation from Neutral-Current Interactions in the Sudbury Neutrino Observatory.

Physical Review Letters **89**, 1 (1 July 2002) 011301 (6 pages).

Fizyka mało znana



Zbigniew Osiak

**Lista
Ginzburga**

04