

Grawitacja

Grawitacja, nazywana czasami **ciężeniem powszechnym**, to jedno z czterech oddziaływań podstawowych wyróżnianych przez fizykę.

Najważniejszą cechą grawitacji jest jej **powszechność**. Ciężenie działa tak samo na wszystkie obiekty fizyczne niezależnie od ich natury. Nie można w żaden sposób ani odizolować żadnego obiektu od wpływu ciężenia, ani zakłócić tego wpływu.

Na gruncie fizyki klasycznej oddziaływanie grawitacyjne jest zależne od masy poszczególnych ciał i od odległości między nimi.

We współczesnej fizyce grawitację opisuje ogólna teoria względności. Oddziaływanie grawitacyjne jest w niej skutkiem zakrzywienia czasoprzestrzeni przez różne formy materii (obiekty fizyczne). Grawitacja jest konsekwencją niezerowego tensora energii-pędu w danym punkcie czasoprzestrzeni, którego składowe są związane z energią, pędem i ciśnieniem w tym punkcie (niekiedy formułowane jest to tak, iż to tensor energii-pędu, czy też napięcia, ciśnienia i pędy są jej źródłami)^[1]. Energia, i w konsekwencji grawitacja, nie zawsze może być przypisana konkretnej cząstce. Istnieje np. tzw. energia próżni, lub ujemna grawitacyjna samoenergia układu^[2].

Obecność ciężkich (tzn. oddziałujących grawitacyjnie) obiektów zmienia czasoprzestrzeń w dwojaki sposób. W pobliżu Ziemi (przy niewielkim zakrzywieniu czasoprzestrzeni) najważniejszym skutkiem grawitacji jest grawitacyjna dylatacja czasu. Na powierzchni Ziemi zegary działają wolniej niż w przestrzeni kosmicznej. Wartość opóźnienia jest niewielka, ale jej wpływ na ruch ciał jest bardzo duży. Dylatacja czasu powoduje powstawanie siły skierowanej do środka naszej planety.

W pobliżu tak potężnych źródeł grawitacji jak czarne dziury zakrzywienie czasoprzestrzeni jest największe. Oprócz dylatacji czasu widoczne staje się odejście od geometrii euklidesowej (przyjmowanej intuicyjnie przez człowieka). Większość najbardziej egzotycznych zjawisk opisywanych przez ogólną teorię względności staje się widoczna właśnie w takich warunkach.

Oddziaływanie grawitacyjne w skalach odległości, z którymi mamy do czynienia na co dzień, jest dużo słabsze niż elektromagnetyczne, słabe czy silne. Jednak ciężenie jako jedyne może wpływać na bardzo od siebie oddalone, nie oddziałujące elektromagnetycznie ciała. Grawitacja jest oddziaływaniem, które sprawia, że obiekty astronomiczne tworzą się z rozrzedzonych obłoków gazu wypełniających Wszechświat. Ciężenie powoduje zapadanie się tych obłoków i powstawanie galaktyk, gwiazd i planet. W codziennym życiu ciężenie przejawia się w postaci przyspieszenia ziemskiego. Przedmioty spadają, bo działa na nie siła grawitacji. W skali astronomicznej ciężenie wyjaśnia, dlaczego planety krążą wokół Słońca, a Księżyc dookoła Ziemi. Grawitacja zawsze powoduje przyciąganie, a nigdy odpychanie. Może ona utrzymać w równowadze tak burzliwe procesy jak reakcje termojądrowe w jądrze Słońca. W szczególnym przypadku ciężenie może spowodować zapadanie się gwiazd i powstawanie czarnych dziur.

Najnowsze pomiary kosmologiczne (Perlmutter i in. 1999, Astier i in. 2006) wskazują, że Wszechświat rozszerza się coraz szybciej. Dlatego stawiane są hipotezy o oddziaływaniu odpychającym, które mogłyby być silniejsze od przyciągania grawitacyjnego obiektów astronomicznych. Nie wiadomo jednak, jakie mogłyby być źródła takiego oddziaływania, ani jaki dokładnie miałyby charakter. Zjawisko zyskało ogólne miano ciemnej energii, a opisywane jest poprzez kwintesencję.

Mechanika klasyczna

Mechanika klasyczna
$\mathbf{F} = \frac{d}{dt}(m\mathbf{v})$
II zasada dynamiki Newtona
Wprowadzenie Historia Aparat matematyczny

Poglądy starożytnych

Już u zarania ludzkości ludzie zaobserwowali, że przedmioty puszczone spadają. Codzienne potoczne obserwacje mówią nam, że obiekty cięższe znajdują się na ziemi wcześniej niż lżejsze. Jeżeli zrzucimy z pewnej wysokości kulke kamienną lub metalową oraz piórko, to piórko spadnie później. Co więcej istnieją obiekty takie jak np. mgła, dym czy balony, które pozornie bez udziału siły zewnętrznej unoszą się do góry. Podobne codzienne obserwacje, pomijające opór i siłę wyporu powietrza, przekonały greckiego filozofa Arystotelesa, że proces spadania jest zależny od "natury" przedmiotu. Pogląd ten zawarł w swoich dziełach dotyczących fizyki wydanych w latach 355-322 p.n.e. Starożytni w żaden sposób nie kojarzyli opadania ciał na Ziemi z ruchami planet w niebiosach. Zachowanie ciał niebieskich opisywał model geocentryczny, który nie pozwalał na dostrzeżenie jakichkolwiek analogii pomiędzy ruchem spadającego ciała, a ich torami. Istniało powszechne przekonanie, że ziemia i niebo rządzą się całkowicie odmiennymi prawami.

Renesans

W roku 1515 Kopernik zaproponował opublikowany dopiero w roku 1543, heliocentryczny model Układu Słonecznego. Słońce znajdowało się w środku, a planety poruszały się po kołowych orbitach. W roku 1584 Giordano Bruno zaproponował zasadę, według której zarówno Ziemią jak i niebem rządzą te same powszechne prawa.

W roku 1604 Galileusz podważył wywodzące się ze starożytności idee dotyczące spadania ciał. Jego zdaniem pozorne różnice między ciężeniem działającym na różne obiekty są skutkiem zjawisk takich jak opór, albo wypieranie. W podręcznikach podaje się, że Galileusz wykonał szereg eksperymentów z kulami o różnych masach zrzucanymi z wieży lub staczającymi się po równi pochyłej. Wielu współczesnych historyków nauki sądzi, że ten wielki uczyony dowiódł niezależności przyspieszenia ziemskiego od natury ciała w sposób czysto spekulatywny. Galileusz działał zgodnie z powszechnie uznawaną w jego czasach scholastyczną metodą analizy zjawisk.

Badacz ten wyobraził sobie dwie spadające cegły. Gdyby ich przyspieszenie zależało od masy, wówczas każda z cegieł oddzielnie spadałaby inaczej, niż gdyby połączyć je luźnym sznurkiem. Galileusz doszedł do wniosku, że założenie zależności przyspieszenia od masy ciała prowadzi do logicznej sprzeczności. Połączenie ciał sznurkiem nie zmienia ich fizycznych własności.

W latach 1609-18 niemiecki astronom Jan Kepler sformułował prawa dotyczące ruchu orbitalnego. Zgodnie z nimi planety kreślą w przestrzeni wielkie elipsy. Sformułował też prawo wiążące średni promień orbity z okresem obiegu:

Kwadrat stosunków czasów potrzebnych dwóm planetom na przejście całej swojej orbity jest równy sześciannowi stosunków ich średnich odległości od Słońca.

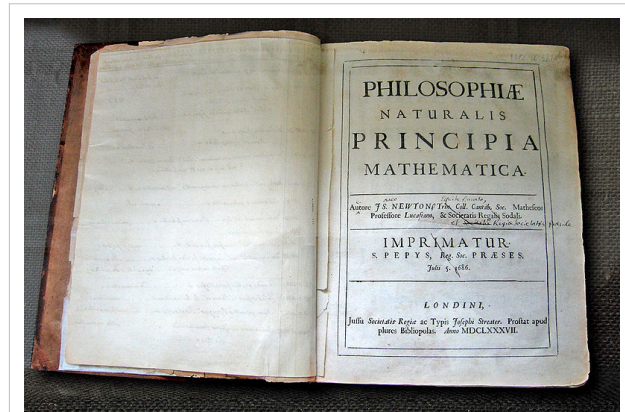
Prawo powszechnego ciężenia

Dnia 5 lipca roku 1687 Izaak Newton wydał dzieło, w którym przedstawił spójną teorię grawitacji opisującą zarówno spadanie obiektów na ziemi, jak i ruch ciał niebieskich. Angielski fizyk oparł się na zaproponowanych przez siebie zasadach dynamiki oraz prawach Keplera dotyczących odległości planety od Słońca.

Prawo powszechnego ciężenia głosi, że:

Między dowolną parą ciał posiadających masy pojawia się siła przyciągająca, która działa na linii łączącej ich środki mas, a jej wartość rośnie z iloczynem ich mas i maleje z kwadratem odległości.

Matematycznie związek ten wyraża się wzorem:



Egzemplarz dzieła Newtona wydanego 5 lipca 1687 r. pod tytułem *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica*

$$F^i = G \frac{m_1 m_2}{r^2} e^i,$$

gdzie:

G – stała grawitacji,

m_1 - masa pierwszego ciała

, m_2 – masa drugiego ciała,

x – wektor łączący środki mas obu ciał, a

r jest długością tego wektora,

$e^i = \frac{x^i}{r}$ jest wektorem jednostkowym ($e^i e^i = 1$) łączącym środki mas obu ciał.

Siła $F = F^i e^i$ jest wektorem a jej wartość (długość tego wektora $F = F e$) jest równa:

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}.$$

Grawitacja na powierzchni Ziemi

Kiedy znajdujemy się na powierzchni naszej planety, odległość od środka ciężkości Ziemi jest dużo większa niż wysokość, na której możemy się przemieszczać (bez rakiet). W takiej sytuacji można założyć, że pole grawitacyjne jest jednorodne.

Korzystając z zależności na siłę grawitacyjną można obliczyć, że przedmiot o masie m na powierzchni naszej planety działa siła F_g :

$$F_g = \frac{GM_z m}{r_z^2}$$

gdzie $M_z \approx 5,9736 \times 10^{24}$ kg – masa Ziemi, $r_z \approx 6373,14$ km, a zgodnie z drugą zasadą dynamiki:

$$a = \frac{F_g}{m},$$

Podstawiając zależność na siłę można obliczyć przyspieszenie ziemskie g :

W praktyce wartość przyspieszenia ziemskiego zależy od wielu czynników. Umowna wartość g (dodaje się indeks "n" w celu zaznaczenia, że jest to przyspieszenie "normalne") to:

$$g_n = 9,80665 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

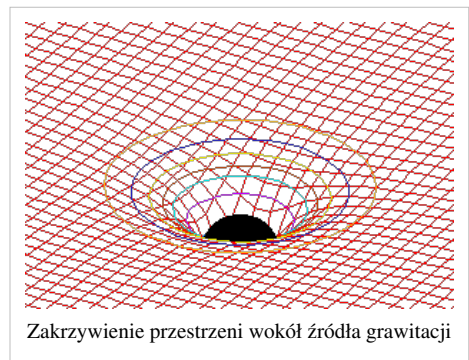
Spadający człowiek porusza się z przyspieszeniem ziemskim tylko przez kilka sekund. Potem opór powietrza staje się na tyle znaczący, że równoważy siłę grawitacji. Punkt równowagi odpowiada zwykle 200 km/h. Spadochron zwiększa siłę oporu powietrza i prędkość opadania stabilizuje się na dużo mniejszej wartości.

Na Księżycu brak atmosfery powoduje, że wszystkie ciała spadają z takim samym przyspieszeniem. Podczas lotów programu Apollo astronauta przeprowadzili pokazy ze zrzucaniem różnych przedmiotów, które transmitowała telewizja. Brak atmosfery hamującej ruch pojazdu powoduje, że lądowanie na Srebrnym Globie wymaga dużych ilości paliwa raketowego, bowiem z powodu braku powietrza, spadochrony w próżni są bezużyteczne.

Grawitacja w ogólnej teorii względności

Opis matematyczny

W Ogólnej Teorii Względności stworzonej przez Alberta Einsteina opis matematyczny grawitacji polega na określeniu związku pomiędzy tensorem metrycznym, opisującym lokalne stosunki długości i interwałów czasowych w czasoprzestrzeni, a energią zawartą w określonym obszarze czasoprzestrzeni. Punktem wyjścia dla teorii jest uogólnienie zasady względności Galileusza, o równoważności opisu zjawisk fizycznych w dowolnych układach inercjalnych, na dowolne, także nieinercjalne, układy odniesienia. Próba takiego zapisania praw mechaniki, aby ich postać matematyczna była identyczna w dowolnym układzie odniesienia, prowadzi do utożsamienia grawitacji i sił bezwładności, masy grawitacyjnej i bezwładnej i w końcu do równań pola grawitacyjnego łączących krzywiznę czasoprzestrzeni (tensor metryczny) z tensorem energii-pędu. Można powiedzieć, że w ogólnej teorii względności grawitacja jest konsekwencją zakrzywienia czasoprzestrzeni.



Zakrzywienie to opisuje tensor metryczny $g_{\mu\nu}$, definiujący w czasoprzestrzeni odległość między dwoma punktami o współrzędnych x^μ i $x^\mu + dx^\mu$

$$ds^2 = g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu.$$

Sferycznie symetryczna czasoprzestrzeń opisana jest przez element długości:

$$ds^2 = e^{\nu(r)} (dx^0)^2 - e^{\lambda(r)} dr^2 - r^2 d\theta^2 - r^2 \sin^2(\theta) d\phi^2.$$

Funkcje $\nu(r)$ i $\lambda(r)$ określa rozwiązanie równań Einsteina. Funkcja $\nu(r)$ definiuje potencjał grawitacyjny $U(r)$

$$e^{\nu(r)} = 1 + \frac{2\varphi(r)}{c^2}$$

gdzie: $U(r) = m_2 \varphi(r)$.

Równania Einsteina mają otwarty charakter w tym sensie, że geometria przestrzeni zależy od gęstości energii w rozpatrywanych obszarach, zaś ilość materii i jej przestrzenny rozkład (a więc i gęstość energii) zależy od geometrii. Nie pozwalają one traktować żadnej z tych wielkości jako bardziej podstawowej, co sprawia, że uzyskiwanie rozwiązań tych równań nie jest trywialne i zwykle możliwe jest jedynie dla wyjątkowo symetrycznych konfiguracji,

jak rozwiązanie Schwarzschilda z symetrią kulistą i bez materii.

Rozwiązanie Schwarzschilda dla układu w próżni (np. poza gwiazdą) prowadzi do:

$$e^{\nu(r)} = 1 - \frac{r_g}{r}$$

gdzie r_g jest promieniem grawitacyjnym definiującym rozmiar horyzontu zdarzeń czarnej dziury.

W ujęciu ogólnej teorii względności postuluje się, że źródłem grawitacji jest tensor energii-pędu. Nawet cząstki pozbawione masy spoczynkowej (foton) doznają wpływu wynikającego z zakrzywienia przestrzeni a więc oddziałują grawitacyjnie. Generalnie, źródłem grawitacji są wszelkie postacie energii dające wkład do wyżej wymienionego tensora energii pędu: masy, gęstość energii promieniowania i ciśnienia. W szczególności, wkład ciśnienia jest identyczny z wkładem masy, czyli wzrost ciśnienia powoduje wzrost sił przyciągających a nie, jak podpowiada nam intuicja, spadek.

Opis fizyczny (wyjaśniający, co mówi opis matematyczny)

Rozumienie przyciągania ziemskiego, a tym samym ogólnie grawitacji, zmieniało się na przestrzeni wieków. Przed odkryciem Newtona postrzegano jedynie siły przyciągania ziemskiego, nie kojarzono, że na ruchy ciał niebieskich też wpływają siły, i to te same, które odpowiadają za odczucie ciężaru. Newton, odkrywając ogólne prawo grawitacji, a tym samym i oddziaływanie Ziemi i Słońca, zauważył, wbrew wówczas panującemu pogładowi, siły działające na odległość. Utrzymywał, że jego wzory to tylko matematyka umożliwiająca obliczenia, a prawdziwą fizykę oddziaływań trzeba dopiero odkryć. W XIX wieku zauważono, że opis oddziaływań na odległość można zastąpić oddziaływaniem poprzez pole, wyjaśniającym efekty występujące, gdy źródła oddziaływań zmieniają swe parametry. Pole sił grawitacyjnych nazwano polem grawitacyjnym.

Szczególne teoria względności (STW) oraz różne próby połączenia jej przewidywań z mechaniką newtonowską wprowadza pewne problemy związane z masą. Albert Einstein w swej teorii używa konsekwentnie masy tak, jak była rozumiana wcześniej, czyli wielkości niezmienniczej *masa niezmiennicza* nazywana obecnie po prostu "masą" (bez przymiotników), oznaczana obecnie przez m , w niektórych interpretacjach STW nazywana *masą spoczynkową* i oznaczana m_0 . To masa, która nie zmienia się, gdy zmienia się prędkość ciała w układzie, a dla fotonów równa 0. Ma ona taką zaletę, że jest taka sama w każdym układzie odniesienia niezależnie od tego, z jaką prędkością dany układ odniesienia się porusza. Drugi rodzaj masy to *masa relatywistyczna*, nazywana dawniej po prostu "masą" a dzisiaj w miarę potrzeby masą *inercyjną*, *grawitacyjną* albo "energią", bo jest równa energii zawartej w danym obiekcie podzielonej przez prędkość światła do kwadratu (wg popularnego wzoru Einsteina $E = Mc^2$ gdzie M to właśnie ta masa, o której mowa). Fizycy oznaczają ją literą E (pamiętając o tym, że trzeba ją podzielić przez c^2 żeby ją wyrazić w kilogramach. To jest masa, która jest odpowiedzialna za bezwładność i grawitację. Ta masa dla fotonu jest równa jego częstotliwości pomnożonej przez stałą Plancka i podzielonej przez c^2 , więc nigdy nie jest zerowa i w każdym układzie odniesienia może być inna. Zmiana *masy relatywistycznej* fotonu z układu do układu nazywa się *przesunięciem dopplerowskim*. W naszych rozważaniach na temat fizyki grawitacji będzie nas interesowała na ogół *masa grawitacyjna* (czyli *relatywistyczna* zwana też *inercyjną*) którą ma każdy foton (bo każdy ma energię).

Wracając do sił grawitacyjnych, nie musimy się martwić co się z nimi dzieje, kiedy obiekty poruszają się ruchem swobodnym (bo żadnych sił wtedy nie ma). Np. Ziemia porusza się po elipsie dookoła Słońca, bo nie działa na nią żadna siła i to jest jej "ruch swobodny". Podobnie z innymi obiektami. Poruszają się "prosto przed siebie". Tyle, że to "prosto" z naszego punktu widzenia zwykle nie jest proste, bo my widzimy tylko przestrzeń, a nie widzimy czasu. Ten ruch "prosto przed siebie" jest nie w przestrzeni ale w zakrzywionej (obecnością mas) czasoprzestrzeni. Jego rzut na naszą przestrzeń, to co widzimy, jest często nieco pogmatwany i widzimy na ogół hiperbole i elipsy a w szczególnych wypadkach koła i parabole (oczywiście jeżeli mamy tylko dwa obiekty, bo sprawa bardzo się komplikuje nawet przy trzech). To jest główna różnica między grawitacją Einsteina, prostą fizycznie, ale skomplikowaną matematycznie a grawitacją Newtona, prostą matematycznie, ale niemożliwą do wyjaśnienia

fizycznie. W fizyce, której nawet sam Newton nigdy nie chciał uznać, bo nie wierzył w siły działające na odległość. I tych sił w rzeczywistości nie ma. Bo Ziemia nie jest "przyciągana" do Słońca żadną siłą. Porusza się ruchem *swobodnym* ale dla tych którzy wierzą, że ruchem swobodnym można się poruszać tylko po prostej, Ziemia jest "najwidoczniej przyciągana" przez Słońce. Jest to złudzenie wywołane różnicą modeli opisujących rzeczywistość.

Co do siły grawitacyjnej, pojawia się np. kiedy stoimy na Ziemi. Czujemy siłę grawitacyjną, bo pchamy Ziemię, a ona nas równą i przeciwnie skierowaną siłą proporcjonalną do naszej masy (inercyjnej). Skąd się ta siła bierze fizycznie? Otóż okazuje się (co teoretycznie możemy wydedukować z części matematycznej powyżej, ale można to zrobić łatwiej) że masy robią w swoim otoczeniu taką sztukę, że czas w ich pobliżu biegnie tym wolniej im są większe. To zjawisko nazywa się *grawitacyjną dylatacją czasu*. Skoro czas biegnie wolniej to tak samo prędkość światła może zwalniać w pobliżu tych mas. Więc kiedy jakiś obiekt w pobliżu jakiejś masy zewnętrznej (względem tego obiektu) przesunie się w kierunku tej malejącej prędkości światła c^2 to i energia tego obiektu się zmniejszy (bo $E = Mc^2$). Więc dany obiekt zachowuje się tak, jakby był popychany ze swojego wnętrza przez siłę proporcjonalną do zmiany energii obiektu wzdłuż tej drogi w kierunku zewnętrznej masy. I powstaje wrażenie przyciągania przez masę zewnętrzną, podczas gdy w rzeczywistości to sam obiekt jest popychany w kierunku zewnętrznej masy swoją wewnętrzną siłą, bo obiekt dąży do stanu o niższej energii. Możemy teraz obliczyć z ilości zmniejszania się energii obiektu pod wpływem zmiany prędkości światła w otoczeniu zewnętrznej masy wskutek dylatacji czasu i okaże się, że ta siła jest dokładnie taka, jaka wynika ze wzoru Newtona na siłę grawitacyjną. Bez żadnego "przyciągania" i tylko dzięki samej dylatacji czasu i przez to przez zmianę prędkości światła na mniejszą. Może powstać pytanie, czy w rzeczywistości to jakaś tajemnicza siła przyciągająca, czy to tylko dylatacja czasu? Tę sprawę można rozstrzygnąć, mierząc czas precyzyjnym zegarem i okazuje się, że to tylko dylatacja czasu powoduje popychanie obiektu w kierunku zewnętrznej masy (w kierunku mniejszej energii wewnętrznej obiektu) a żadnego dodatkowego przyciągania Newtonowskiego nie ma.

Na pierwszy rzut oka może się wydawać, że to wszystko jedno, czy obiekt jest popychany, czy przyciągany w kierunku zewnętrznej masy i mechanizm fizyczny nie jest istotny. Okazuje się, że jest istotny, jeżeli wchodzi w grę zachowanie energii.

Skąd spadająca na Ziemię cegła bierze swoją rosnącą energię kinetyczną? Jeżeli nie znamy mechanizmu, to nie wiemy. "Skądciś" - mówią zwolennicy teorii Newtona. Z "jakiegoś" tajemniczego "pola grawitacyjnego" umieszczonego "gdzieś" dookoła nas. A Einstein powiedziałby, że z własnej energii wewnętrznej obiektu mc^2 . Bo spadająca cegła zamienia część swojej energii wewnętrznej mc^2 , którą traci wpadając w obszar mniejszej prędkości światła, na energię kinetyczną swojego ruchu i jej całkowita energia pozostaje stała bez żadnego dopływu energii z zewnątrz. I to wyeliminowanie "energii potencjalnej pola grawitacyjnego" z fizyki i umieszczenie "energii potencjalnej" w samym grawitującym obiekcie, jest oryginalnym osiągnięciem Einsteina, widocznym dopiero w opisie fizycznym tego, co stworzył.

Grawitacja a mechanika kwantowa

Współczesna fizyka nie jest w stanie połączyć (zunifikować) Ogólnej Teorii Względności z mechaniką kwantową. Oznacza to, że żadna ze współczesnych teorii nie opisuje poprawnie ruchu cząstki o niewielkiej masie poruszającej się z prędkością porównywalną z prędkością światła w silnym polu grawitacyjnym np. w pobliżu lub we wnętrzu czarnej dziury. Ogólna teoria względności załamuje się również w momencie Wielkiego Wybuchu jak i zaraz po nim. Brak jest prawidłowego opisu zjawisk zachodzących w bardzo małych objętościach porównywalnych z długością Plancka. Jakkolwiek zjawiska te z punktu widzenia przeciętnego człowieka wydają się być dosyć odległe od zjawisk jakie obserwujemy na co dzień, to jednak poprzez ich związek z kosmologią, wyniki uzyskane na tych polach mają bezpośredni wpływ na obraz zjawisk jak najbardziej powszechnych.

Nie oznacza to, że nie podejmuje się ciągle prób opisanie grawitacji w zgodzie z zasadami mechaniki kwantowej. Postęp w tej dziedzinie jest znaczący i obejmuje sformułowanie wielu teorii: od takich, które analizują kwantowanie w przestrzeniach zakrzywionych, poprzez teorie pola posługujące się algebrą grassmanowską aż do teorii superstrun,

nie będącej teorią pola. Wszystkie te teorie dają jakiś wgląd w możliwą naturę kwantowej grawitacji. Jednak brak jest spójnej teorii pozwalającej w dodatku na przewidywanie wyników doświadczeń, która unifikowałaby Ogólną Teorię Względności i mechanikę kwantową.

Literatura

- Schuster "Ogólna teoria Względności"
- P. Astier i in. 2006, A&A, 447, 31, "The Supernova Legacy Survey: measurement of Ω_M , Ω_Λ and w from the first year data set" (en)
- S. Perlmutter i in. 1998, ApJ, 517, 565, "Measurements of Omega and Lambda from 42 High-Redshift Supernovae" (en)

Przypisy

- [1] Bernard F. Schutz: *Wstęp do ogólnej teorii względności*. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN, 2002, s. 116. Cytat: Źródłem pola powinny być *wszystkie* energie, gęstość całkowitej energii T^{00} . Ale, aby mieć jako źródło pola tylko jedną składową tensora */napięcie energii/*, potrzeba by teorii grawitacji, która nie jest niezmiennicza; trzeba byłoby wybrać uprzywilejowany układ, aby policzyć T^{00} . Dlatego Einstein odgadł, że źródłem pola powinien być */tensor napięcie-energii/* T: Wszystkie napięcia, ciśnienia i pędy muszą też działać jako źródła..
- [2] Bernard F. Schutz: *Wstęp do ogólnej teorii względności*. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN, 2002, s. 190. Cytat: Jednym ze sposobów przekonania się że całkowita energia układu nie powinna być sumą energii cząstek, jest zauważenie, iż pomija się to, co w języku newtonowskim nazywane jest grawitacyjną samoenergią układu, ujemną wielkością będącą pracą uzyskaną przez poskładanie układu z cząstek wyizolowanych z nieskończoności. Energia ta, jeśli ma być uwzględniona, nie może być przypisana żadnej poszczególnej cząstce, lecz zawarta jest w samej geometrii.(...) suma energii cząstek nie jest dobrze określona(...) Tylko całkowita energia-pęd układu są, w ogólności, definiowalne, oprócz czteropędów poszczególnych cząstek.

Zobacz też

- antygravitacja
- fale grawitacyjne
- grawiton
- oddziaływania podstawowe
- oddziaływanie elektromagnetyczne
- oddziaływanie silne
- oddziaływanie słabe
- potencjał
- strefa Roche'a
- przegląd zagadnień z zakresu astronomii
- teoria inteligentnego spadania

Źródła i autorzy artykułu

Grawitacja Źródło: <http://pl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=23390800> Autorzy: 4C, Aaaba, AdSR, Azureus, Bartek090, BatiX, Beau, Belfer00, Beno, Bozena Czerny, Buldożer, Cardel, Chepry, D kuba, Datrio, Derbeth, Endrju, Faxe, Gknor, Googl, Gregul, Grotisque, Hashar, Havelock V., Ilario, JimJast, Julo, Kakaz, KamStak23, Kazorek, Lord Ag.Ent, Luke 33, Maddox84, Margoż, Masur, MatFizka, Mathiasrex, Matusz, MesserWoland, Miczek, Minimus, Mpfiz, Nova, Odder, Olaf, Oola11, Patussia, Pawmak, Picus viridis, Pimke, Piotr Parda, Pitak, Pixel, Polimerek, Porkis, Qblik, RManka, Rabidmoon, Rjt, Rozek19, Rzuwig, Sceptyczny, Siedlaro, Stepa, Stok, Superborsuk, TAMM, ToAr, Tomta1, Topory, Turkusowy smok, W2023, Wiher, WojciechSwiderski, Xcor, Zerro, Zuber, conversion script, 95 anonimowych edycji

Źródła, licencje i autorzy grafik

Plik:Rownia tarcie.svg Źródło: http://pl.wikipedia.org/w/index.php?title=Plik:Rownia_tarcie.svg Licencja: Creative Commons Attribution-Sharealike 2.5 Autorzy: 4C

Plik:NewtonsPrincipia.jpg Źródło: <http://pl.wikipedia.org/w/index.php?title=Plik:NewtonsPrincipia.jpg> Licencja: nieznany Autorzy: Anarkman, Aristeas, Aushulz, Duesentrieb, Ephraim33, JackyR, Mdd, Solipsist, Svdmolen, Wst, 1 anonimowych edycji

Plik:Gravitation space source.png Źródło: http://pl.wikipedia.org/w/index.php?title=Plik:Gravitation_space_source.png Licencja: GNU Free Documentation License Autorzy: Duesentrieb, Schekinov Alexey Victorovich, Superborsuk, WikipediaMaster

Licencja

Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 Unported
<http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/>