

Fizyka poza Modelem Standardowym

W 2012 roku, gdy bozon Higgsa został potwierdzony w Wielkim Zderzaczu Hadronów (LHC) w CERN, Model Standardowy (SM) był teoretycznie kompletny. Każda przewidywana cząstka została odkryta. Jego równania przeszły wszystkie testy eksperymentalne z zadziwiającą precyzją.

Jednak atmosfera w fizyce nie była zamknięciem, lecz poczuciem niekompletności. Podobnie jak prawa Newtona przed Einsteinem czy fizyka klasyczna przed mechaniką kwantową, Model Standardowy był zbyt skuteczny w skalach, które możemy testować, ale niezdolny do odpowiedzi na głębsze pytania. To niemal idealna mapa – ale tylko małej części krajobrazu.

Grawitacja: Brakująca siła

Najbardziej oczywistym brakiem jest grawitacja.

- SM opisuje trzy z czterech znanych sił fundamentalnych: elektromagnetyzm, siłę słabą i siłę silną.
- Grawitacja, opisana przez **ogólną teorię względności (GR)** Einsteina, jest całkowicie nieobecna.

To nie jest zwykłe przeoczenie. Ogólna teoria względności traktuje grawitację jako krzywiznę czasoprzestrzeni, gładkie pole geometryczne, podczas gdy SM traktuje siły jako pola kwantowe mediowane przez cząstki. Próby kwantyzacji grawitacji w ten sam sposób napotykają nieskończoności, których nie można znormalizować.

Model Standardowy i GR są jak dwa różne systemy operacyjne – znakomite w swoich dziedzinach, ale fundamentalnie niekompatybilne. Połączenie ich jest być może największym wyzwaniem współczesnej fizyki.

Masy neutrin

SM przewiduje, że neutrina nie mają masy. Jednak eksperymenty, poczynwszy od detektora Super-Kamiokande w Japonii (1998) i potwierdzone na całym świecie, wykazały, że neutrina oscylują między różnymi smakami (elektronowym, mionowym, tau). Oscylacje wymagają masy.

To był pierwszy potwierdzony dowód na fizykę poza Modelem Standardowym. Odkrycie to przyniosło Nagrodę Nobla w 2015 roku Kajicie i McDonaldowi.

Neutrina są niezwykle lekkie, co najmniej milion razy lżejsze od elektronu. Ich masy nie są wyjaśnione przez SM – ale mogą wskazywać na nową fizykę, taką jak **mechanizm seesaw**, neutrina sterylne lub powiązania z wczesnym wszechświatem. W niektórych scenariuszach

ciężkie neutrino seesaw umożliwiając **leptogenezę**, gdzie we wczesnym wszechświecie powstaje asymetria leptonów, która następnie przekształca się w obserwowaną **asymetrię materia-antymateria**.

Ciemna materia

Widzialna materia opisana przez SM stanowi mniej niż 5% wszechświata. Reszta jest niewidzialna.

- **Ciemna materia** (~27% wszechświata) ujawnia się tylko poprzez grawitację: galaktyki obracają się szybciej, niż pozwala na to widzialna materia, gromady galaktyk zakrzywiają światło bardziej, niż powinny, a kosmiczne tło mikrofalowe wymaga dodatkowej niewidzialnej masy.
- Żadna z cząstek SM nie może tego wyjaśnić. Neutrino są zbyt lekkie i szybkie. Zwykła materia jest zbyt rzadka.

Teorie proponują nowe cząstki: WIMP (słabo oddziałujące masywne cząstki), aksjony, neutrino sterylne lub coś jeszcze dziwniejszego. Jednak pomimo dekad poszukiwań – podziemnych detektorów, eksperymentów zderzeniowych, badań astrofizycznych – ciemna materia pozostaje nieuchwytna.

Ciemna energia

Jeszcze bardziej tajemnicza jest **ciemna energia**, siła napędzająca przyspieszoną ekspansję wszechświata.

- Odkryta w 1998 roku dzięki obserwacjom supernowych, ciemna energia stanowi ~68% wszechświata.
- W zasadzie mogłaby być wyjaśniona jako „energia próżni” pól kwantowych. Jednak naiwne obliczenia QFT przewidują gęstość energii próżni o 120 rzędów wielkości za dużą – najgorsza przewidywanie w fizyce.

Ten **problem stałej kosmologicznej** jest prawdopodobnie najostrzejszym konfliktem między teorią pól kwantowych a grawitacją. Model Standardowy nie ma nic do powiedzenia na temat ciemnej energii. To ogromna luka w naszym zrozumieniu kosmosu.

Problem hierarchii

Kolejna głęboka zagadka dotyczy samego bozonu Higgsa.

Masa Higgsa jest mierzona na poziomie 125 GeV. Jednak korekty kwantowe powinny pchnąć ją w stronę skali Plancka (10^{19} GeV), chyba że wystąpią cudowne znoszenia. Dlaczego jest tak lekka w porównaniu do naturalnych skal energii grawitacji?

To **problem hierarchii**: Higgs wydaje się być anomalnie precyzyjnie dostrojony. Fizycy podejrzewają nową fizykę, taką jak **supersymetria (SUSY)**, która może stabilizować masę Higgsa, wprowadzając cząstki partnerskie, które znoszą niebezpieczne korekty. (Debaty na

temat **naturalności** obejmują pomysły od dynamicznych rozwiązań po rozumowanie **antropiczne** w możliwym „krajobrazie” próżni.)

Asymetria materia-antymateria

SM uwzględnia pewne naruszenie symetrii CP, ale za mało, by wyjaśnić, dlaczego obecny wszechświat jest pełen materii, a nie równych ilości materii i antymaterii. Jak wspomniano powyżej, mechanizmy takie jak **leptogeneza** (często związane z pochodzeniem mas neutrin typu seesaw) oferują przekonującą ścieżkę, w której fizyka poza SM przechyla szalę.

Piękny, lecz niekompletny obraz

Model Standardowy jest czasem nazywany „najbardziej udaną teorią w fizyce”. Jego przewidywania zgadzają się z eksperymentami do 10-12 miejsc po przecinku. Wyjaśnia niemal wszystko, co widzimy w akceleratorach cząstek i laboratoriach.

Ale jest niekompletny:

- Ignoruje grawitację.
- Nie może wyjaśnić mas neutrin.
- Nie może wyjaśnić ciemnej materii ani ciemnej energii.
- Pozostawia głębokie zagadki, takie jak problem hierarchii i asymetria materia-antymateria, bez odpowiedzi.

Fizycy stoją teraz przed znajomym momentem w historii. Tak jak mechanika Newtona ustąpiła miejsca teorii względności, a fizyka klasyczna mechanice kwantowej, Model Standardowy musi ostatecznie ustąpić miejsca czemuś głębszemu.

Święty Graal: Teoria unifikacji

Ostatecznym celem jest **Wielka Teoria Unifikacji (GUT)** lub nawet **Teoria Wszystkiego (ToE)**: ramy, które łączą cztery siły, wyjaśniają wszystkie cząstki i działają spójnie od najmniejszych skal (grawitacja kwantowa) po największe (kosmologia).

To Święty Graal współczesnej fizyki. Dlatego badacze przesuwają akceleratory na wyższe energie, budują masywne detektory neutrin, mapują kosmos za pomocą teleskopów i wymyślają odważne nowe matematyki.

Kolejne rozdziały omówią główne kandydatki:

- **Supersymetria (SUSY)** – symetria między cząstkami materii i siły.
- **Teoria strun i teoria M** – gdzie cząstki są wibrującymi strunami, a grawiton pojawia się naturalnie.
- **Dodatkowe wymiary** – od wczesnej idei Kaluzy–Kleina po współczesne modele Randall–Sundrum.
- **Inne podejścia** – takie jak kwantowa grawitacja pętlowa i bezpieczeństwo asymptotyczne.

Każdy z tych pomysłów nie narodził się jako dogmat, lecz jako nauka w najlepszym wydaniu: zauważanie piękności, budowanie nowych teorii i testowanie ich w konfrontacji z rzeczywistością.

Supersymetria: Kolejna wielka symetria?

Fizyka ma długą historię unifikacji poprzez symetrię. Równania Maxwella połączyły elektryczność i magnetyzm. Szczególna teoria względności połączyła przestrzeń i czas. Teoria elektroslaba połączyła dwie z czterech sił fundamentalnych. Każdy postęp wynikał z odkrycia ukrytej symetrii w naturze.

Supersymetria – lub SUSY, jak pieszczotliwie nazywają ją fizycy – to śmiała propozycja, że kolejna wielka symetria łączy dwie pozornie różne kategorie cząstek: **materię i siły**.

Fermiony i bozony: Materia kontra siła

W Modelu Standardowym cząstki dzielą się na dwie główne rodziny:

- **Fermiony (spin 1/2):** Obejmują kwarki i leptony, budulce materii. Ich półcałkowity spin oznacza, że podlegają zasadzie wykluczenia Pauliego: dwa identyczne fermiony nie mogą zajmować tego samego stanu. To wyjaśnia, dlaczego atomy mają strukturalne powłoki i dlaczego materia jest stabilna.
- **Bozony (całkowity spin):** Obejmują fotony, gluony, bozony W i Z oraz Higgsa. Bozony pośredniczą w siłach. W przeciwieństwie do fermionów, mogą gromadzić się w tym samym stanie, co wyjaśnia istnienie laserów (fotonów) i kondensatów Bosego-Einsteina.

Krótko mówiąc: fermiony tworzą materię, bozony przenoszą siły.

Hipoteza supersymetrii

Supersymetria proponuje symetrię łączącą fermiony i bozony. Dla każdego znanego fermionu istnieje bozonowy partner. Dla każdego znanego bozonu – fermionowy partner.

- Kwarki → **skwarki**
- Leptony → **sleptony**
- Gluony → **gluiny**
- Sektor gauge/Higgs → **neutraliny** (mieszanki bino, wino, higgsino; neutralne) i **charginy** (mieszanki wino, higgsino; naładowane)

(„Fotino” i „zino” to starsze pseudonimy dla stanów własnych gauge; eksperymenty poszukują w rzeczywistości wspomnianych powyżej **stanów własnych masy**.)

Dlaczego proponować tak radykalne podwojenie świata cząstek? Ponieważ SUSY obiecuje eleganckie rozwiązania dla niektórych najgłębszych problemów pozostawionych przez Model Standardowy.

Rozwiązanie problemu hierarchii

Jednym z największych atutów SUSY jest jej zdolność do rozwiązania **problemu hierarchii**: dlaczego bozon Higgsa jest tak lekki w porównaniu do skali Plancka.

W Modelu Standardowym korekty kwantowe od cząstek wirtualnych powinny pchnąć masę Higgsa w stronę ogromnych wartości. Supersymetria wprowadza spartykuły, których wkłady znoszą te rozbieżności. Rezultat: masa Higgsa jest naturalnie stabilizowana, bez konieczności precyzyjnego dostrajania (przynajmniej w „naturalnych” widmach SUSY).

SUSY i wielka unifikacja

Kolejna motywacja dla SUSY pochodzi z unifikacji sił.

- Obliczając stałe sprzężenia sił silnej, słabej i elektromagnetycznej przy wyższych energiach, w Modelu Standardowym niemal się spotykają, ale nie do końca, w jednym punkcie.
- Z SUSY, dzięki wkładowi spartykuł, sprzężenia pięknie zbiegają się około 10^{16} GeV.

To sugeruje, że przy ekstremalnie wysokich energiach trzy siły mogą połączyć się w jedną **Wielką Teorię Unifikacji (GUT)**.

SUSY jako kandydat na ciemną materię

Supersymetria dostarcza również naturalnego kandydata na **ciemną materię**.

Jeśli SUSY jest poprawna, jedna ze spartykuł powinna być stabilna i elektrycznie neutralna. Głównym kandydatem jest **najlżejszy neutralino**, mieszanka bino, wino i higgsino.

Neutraliny oddziałują tylko słabo, pasując do profilu WIMP (słabo oddziałujących masywnych cząstek). Jeśli zostaną odkryte, mogą wyjaśnić brakującą 27% materii wszechświata.

Poszukiwania eksperymentalne SUSY

Przez dekady fizycy mieli nadzieję, że cząstki supersymetryczne pojawią się tuż powyżej już zbadanych skal energii.

- **LEP (CERN, lata 90.):** Brak cząstek SUSY do ~ 100 GeV.
- **Tevatron (Fermilab, lata 90.–2000):** Brak spartykuł.
- **LHC (CERN, lata 2010–2020):** Zderzenia proton-proton do **13,6 TeV** (projekt: **14 TeV**). Pomimo szeroko zakrojonych poszukiwań, brak dowodów na skwarki, gluiny czy neutraliny do skal rzędu kilku TeV.

Brak odkryć SUSY w LHC był rozczarowujący. Wiele najprostszych wersji SUSY, takich jak „Minimalny Supersymetryczny Model Standardowy” (MSSM), jest teraz mocno ograniczonych. „Naturalne” widma są przesunięte w stronę wyższych mas, co implikuje więcej precyzyjnego dostrajania, jeśli SUSY istnieje blisko skali TeV.

Jednak SUSY nie została wykluczona. Bardziej złożone modele przewidują cięższe lub bardziej subtelne spartykuły, być może poza zasięgiem LHC, lub z oddziaływaniami zbyt słabymi, by łatwo je wykryć.

Matematyczne piękno SUSY

Poza motywacjami fenomenologicznymi, SUSY ma głęboką elegancję matematyczną.

- Jest to jedyne możliwe rozszerzenie symetrii czasoprzestrzeni, zgodne z teorią względności i mechaniką kwantową.
- Teorie supersymetryczne są często bardziej obliczalne: okiełznują nieskończoności i odsłaniają ukryte struktury w QFT.
- W teorii strun SUSY jest niezbędna dla spójności: bez niej teoria zawiera tachiony i inne patologie.

Nawet jeśli natura nie realizuje SUSY przy dostępnych energiach, jej matematyka już wzbogaciła fizykę.

Stan supersymetrii

Dziś SUSY zajmuje dziwną pozycję.

- Pozostaje jednym z najbardziej przekonujących ram dla fizyki poza Modelem Standardowym.
- Rozwiązuje problem hierarchii, wspiera unifikację i oferuje kandydata na ciemną materię.
- Jednak nie znaleziono jeszcze eksperymentalnych dowodów.

Jeśli LHC i jego następcy nic nie znajdą, SUSY może być realizowana tylko w skalach energii znacznie poza naszym zasięgiem – lub być może natura wybrała zupełnie inną drogę.

Metoda, nie dogmat

Supersymetria ilustruje metodę naukową w działaniu.

Fizycy zidentyfikowali problemy: problem hierarchii, unifikację, ciemną materię. Zaproponowali nową, odważną symetrię, która rozwiązuje je wszystkie. Zaprojektowali eksperymenty, aby ją przetestować. Jak dotąd wyniki są negatywne – ale to nie oznacza, że pomysł był daremny. SUSY udoskonaliła nasze narzędzia, wyjaśniła, czego szukamy, i kierowała całymi pokoleniami badań.

Podobnie jak eter czy epicykle przed nią, SUSY może okazać się trampoliną do głębszej prawdy, niezależnie od tego, czy przetrwa jako ostateczne słowo, czy nie.

Teoria strun i teoria M

Fizyka poza Modelem Standardowym jest często motywowana poprawkami: rozwiązaniem problemu hierarchii, wyjaśnieniem ciemnej materii, unifikacją sprzężeń gauge. Teoria

strun jest inna. Nie zaczyna się od konkretnej zagadki. Zaczyna się od matematyki – i kończy na przeformułowaniu całej naszej koncepcji przestrzeni, czasu i materii.

Początki: Teoria zrodzona z niepowodzenia

Zaskakująco, teoria strun nie zaczęła się jako teoria wszystkiego, lecz jako nieudana próba zrozumienia silnej siły jądrowej.

Pod koniec lat 60., zanim QCD została w pełni rozwinięta, fizycy próbowali wyjaśnić zoo hadronów. Zauważyli wzorce w danych rozpraszania, które sugerowały, że rezonanse można modelować za pomocą wibrujących strun.

„Model rezonansu dualnego”, wprowadzony przez Veneziano w 1968 roku, opisywał silne oddziaływania, jakby hadrony były wzbudzeniami maleńkich strun. Był elegancki, ale szybko porzucony, gdy QCD wyłoniła się jako prawdziwa teoria siły silnej.

Jednak teoria strun nie chciała umrzeć. Ukryte w jej równaniach były niezwykle cechy, które wydawały się wskazywać daleko poza fizykę jądrową.

Zaskakujące odkrycie: Grawiton

Gdy teoretycy skwantowali wibracje strun, odkryli, że widmo nieuchronnie zawiera **cząstkę bezmasową o spinie 2**.

To było szokujące. Teoria pól kwantowych pokazała, że cząstka bezmasowa o spinie 2 jest unikalna: musi być kwantem grawitacji, **grawitonem**.

Jak później zauważył John Schwarz: *„Ale pojawił się zaskakujący fakt: matematyka teorii strun nieuchronnie zawierała cząstkę bezmasową o spinie 2 – grawiton.”*

To, co zaczęło się jako teoria hadronów, przypadkowo stworzyło budulec kwantowej grawitacji.

Centralna idea: Struny, nie punkty

W sercu teorii strun cząstki punktowe są zastąpione maleńkimi jednowymiarowymi obiektami: strunami.

- Struny mogą być **otwarte** (z dwoma końcami) lub **zamknięte** (pętle).
- Różne tryby wibracji struny odpowiadają różnym cząstkom.
 - Określona wibracja może wyglądać jak foton.
 - Inna jak gluon.
 - Jeszcze inna jak kwark.
 - A jeden tryb, nieuchronnie, jak grawiton.

Ta prosta zmiana – z punktów na struny – rozwiązuje wiele nieskończoności, które nękały kwantową grawitację. Ograniczony rozmiar struny rozmywa interakcje, które w

przeciwnym razie eksplodowałyby w zerowej odległości.

Supersymetria i superstruny

Wczesne wersje teorii strun miały problemy: zawierały tachiony (niestabilności) i wymagały nierealistycznych cech. Przełomem było wprowadzenie **supersymetrii**, prowadzące do **teorii superstrun** w latach 70. i 80.

Superstruny wyeliminowały tachiony, włączyły fermiony i przyniosły nową spójność matematyczną.

Ale był haczyk: teoria strun działa tylko w wyższych wymiarach. Konkretnie, **10 wymiarów czasoprzestrzeni**.

- Cztery, które widzimy (trzy przestrzenne, jeden czasowy).
- Sześć innych, zwiniętych lub skompymowanych w maleńkich skalach, niewidocznych dla obecnych eksperymentów.

Ta idea, choć wydaje się radykalna, nie była zupełnie nowa. W latach 20. **teoria Kaluzy-Kleina** zasugerowała, że dodatkowe wymiary mogą unifikować grawitację i elektromagnetyzm. Teoria strun ożywiła i znacznie rozwinęła tę ideę.

Pięć teorii strun

W połowie lat 80. fizycy odkryli, że teoria strun nie jest jednolita, lecz występuje w **pięciu różnych wersjach**:

1. **Typ I** – Struny otwarte i zamknięte, w tym struny zorientowane i niezorientowane.
2. **Typ IIA** – Zamknięte, zorientowane struny, niechiralne.
3. **Typ IIB** – Zamknięte, zorientowane struny, chiralne.
4. **Heterotyczna $SO(32)$** – Zamknięte struny z hybrydową konstrukcją.
5. **Heterotyczna $E_8 \times E_8$** – Wysoce symetryczna wersja, kluczowa później dla połączenia z realistyczną fizyką cząstek.

Każda wydawała się matematycznie spójna, ale dlaczego natura miałaby wybrać jedną?

Pierwsza rewolucja superstrun

W 1984 roku Michael Green i John Schwarz pokazali, że teoria strun może automatycznie znosić anomalie kwantowe – coś, co teorii pól kwantowych musiały starannie zaprojektować. To odkrycie wywołało **pierwszą rewolucję superstrun**, gdy tysiące fizyków zwróciło się ku teorii strun jako kandydatce na teorię unifikującą wszystkie siły.

Były to pierwsze poważne ramy, w których kwantowa grawitacja była nie tylko spójna, ale nieuchronna.

Druga rewolucja superstrun: Teoria M

W połowie lat 90. miała miejsce druga rewolucja. Edward Witten i inni odkryli, że pięć różnych teorii strun nie było rywalami, lecz różnymi limitami jednej, głębszej teorii: **teorii M**.

Uważa się, że teoria M istnieje w **11 wymiarach** i obejmuje nie tylko struny, ale także obiekty o wyższych wymiarach zwane **branami** (skrót od membran).

- Brany 1-wymiarowe = struny.
- Brany 2-wymiarowe = membrany.
- Brany o wyższych wymiarach do 9 wymiarów przestrzennych.

Te brany dały początek nowym, bogatym możliwościom: całe wszechświaty mogłyby istnieć jako 3-brany unoszące się w przestrzeni o wyższym wymiarze, z grawitacją rozprzestrzeniającą się w objętości, podczas gdy inne siły pozostają ograniczone. Ten obraz zainspirował współczesne modele dodatkowych wymiarów, takie jak **Randall-Sundrum**.

Godne uwagi przykłady: Kaluza-Klein i Randall-Sundrum

- **Kaluza-Klein (lata 20.):** Zaproponował piąty dodatkowy wymiar, aby unifikować grawitację i elektromagnetyzm. Pomysł ten był odłożony na półkę przez dekady, ale teoria strun ożywiła go w bardziej okazałej formie. Skompromowane dodatkowe wymiary pozostają centralną cechą modeli strun.
- **Randall-Sundrum (1999):** Zaproponował „zakrzywione” dodatkowe wymiary, w których nasz wszechświat jest 3-braną osadzoną w wyższych wymiarach. Grawitacja rozprzestrzenia się w objętości, wyjaśniając, dlaczego jest słabsza od innych sił. Takie modele przewidują możliwe sygnały w zderzaczach cząstek lub odchylenia od prawa Newtona na bardzo krótkich odległościach.

Wskazówki eksperymentalne i wyzwania

Teoria strun stawia śmiałe twierdzenia, ale ich przetestowanie jest niezwykle trudne.

- **Dodatkowe wymiary:** Mogą ujawnić się poprzez sygnały brakującej energii lub **wzbudzenia Kaluzy-Kleina** – potencjalnie dla **grawitonów lub nawet pół Modelu Standardowego**, w zależności od konfiguracji. Ograniczenia zderzaczy zwykle sięgają zakresu **multi-TeV**.
- **Grawitony:** Przewiduje się cząstkę bezmasową o spinie 2, ale wykrycie pojedynczego grawitonu jest poza możliwościami obecnej technologii. Możliwe są efekty pośrednie, takie jak odchylenia w falach grawitacyjnych.
- **Supersymetria:** Teoria strun wymaga SUSY na pewnej skali, ale LHC nie znalazł jeszcze spartykuł.
- **Kosmologia:** Wczesny wszechświat, inflacja i kosmiczne tło mikrofalowe mogą zawierać odciski fizyki strun, choć dotychczasowe wyniki są niejednoznaczne.

Pomimo wyzwań, teoria strun dostarczyła żyznego gruntu dla matematyki, inspirując postępy w geometrii, topologii i dualnościach, takich jak AdS/CFT (która łączy grawitację w wyższych wymiarach z teorią pól kwantowych bez grawitacji).

Piękno i kontrowersje

Zwolennicy twierdzą, że teoria strun jest najbardziej obiecującą drogą do teorii unifikacyjnej: obejmuje kwantową grawitację, unifikuje wszystkie siły i wyjaśnia, dlaczego grawiton musi istnieć.

Krytycy argumentują, że bez potwierdzenia eksperymentalnego teoria strun ryzykuje oderwanie od nauki empirycznej. Jej ogromny „krajobraz” możliwych rozwiązań (do 10^{500}) utrudnia uzyskanie jednoznacznych przewidywań.

Obie strony zgadzają się w jednym: teoria strun zmieniła sposób, w jaki myślimy o fizyce, oferując nowy język dla unifikacji.

Ku teorii wszystkiego

Jeśli supersymetria jest kolejnym krokiem poza Modelem Standardowym, teoria strun jest krokiem następnym: kandydatką na długo poszukiwaną **Teorię Wszystkiego**.

Jej najśmielsze twierdzenie nie polega tylko na tym, że obejmuje Model Standardowy i grawitację, ale że są one nieuchronnymi konsekwencjami wibrujących strun w wyższych wymiarach. Grawiton nie jest dodatkiem – jest wbudowany.

To, czy natura wybrała tę ścieżkę, pozostaje do odkrycia.

Eksploracja granic: Eksperymenty poza Modelem Standardowym

Teorie są siłą napędową fizyki, ale eksperymenty są jej pulsem. Supersymetria, teoria strun i dodatkowe wymiary to piękne konstrukcje matematyczne, ale żyją lub umierają na podstawie dowodów. Jeśli mają być czymś więcej niż spekulacjami, muszą pozostawić ślady w danych.

Fizycy opracowali sprytnie sposoby poszukiwania tych śladów – w zderzaczach, w kosmosie i w samej strukturze czasoprzestrzeni.

Zderzacze: Polowanie na spartykuły i grawitony

Wielki Zderzacz Hadronów (LHC) w CERN jest najpotężniejszym akceleratorem cząstek na świecie, zderzającym protony przy energiach do **13,6 TeV** (projekt: **14 TeV**). Był głównym narzędziem ludzkości do badania fizyki poza Modelem Standardowym.

Supersymetria w LHC

- **Poszukiwanie spartykuł:** Eksperymenty ATLAS i CMS przeszukiwały dane w poszukiwaniu skwarków, gluino i neutralino/chargino. Często pojawiałyby się jako sygnatyry „brakującej energii”, ponieważ cząstki SUSY uciekają detekcji.
- **Wyniki:** Nie znaleziono potwierdzonych cząstek SUSY do skal rzędu kilku TeV. Wykluczono wiele najprostszych wersji SUSY i przesunięto „naturalną” SUSY w stronę

cięższych i bardziej dostrojonych terytoriów.

Grawitony i dodatkowe wymiary

- **Tryby Kaluzy–Kleina:** Jeśli istnieją dodatkowe wymiary, **grawitony lub nawet pola SM** mogą pojawić się jako masywne wzbudzenia KK, wykrywalne jako rezonanse w kanałach dileptonowych, difotonowych lub dijetowych.
- **Sygnały Randall–Sundrum:** Zakrzywione dodatkowe wymiary mogłyby wytworzyć rezonanse grawitonów z charakterystycznymi wzorcami kątowymi spinu 2.
- **Wyniki:** Poszukiwania LHC nie znalazły dotychczas dowodów, ale przesunęły granice do zakresu **multi-TeV**, ograniczając rozmiar, zakrzywienie i geometrię dodatkowych wymiarów.

Mikro-czarne dziury

Niektóre teorie sugerują, że jeśli grawitacja staje się silna w skali TeV, w zderzeniach LHC mogłyby powstawać małe czarne dziury, które wyparowują w wybuchach cząstek. Nie zaobserwowano takich zdarzeń.

Eksperymenty precyzyjne: Testowanie grawitacji w małych skalach

Jeśli istnieją dodatkowe wymiary, prawo grawitacji Newtona może załamać się na krótkich odległościach.

- **Eksperymenty z balansem torsyjnym („Eöt-Wash”):** Testują prawo odwrotności kwadratu odległości do skal **submilimetrowych** – obecnie **dziesiątek mikronów** ($\sim 50 \mu\text{m}$).
- **Wyniki:** Nie wykryto odchyłeń. Eksperymenty te **wykluczają** szeroką klasę scenariuszy dodatkowych wymiarów z charakterystycznymi długościami **powyżej** $\sim 10^{-4} \text{ m}$ (w zależności od modelu).

Te eksperymenty stołowe są niezwykle czułe, badając skale niedostępne dla zderzaczy.

Fale grawitacyjne: Nowe okno na grawitację kwantową

Odkrycie fal grawitacyjnych przez LIGO w 2015 roku otworzyło nową granicę.

- **Dodatkowe polaryzacje / zmodyfikowana propagacja:** Niektóre modele grawitacji kwantowej lub dodatkowych wymiarów przewidują odchylenia od GR (dodatkowe polaryzacje, dyspersja lub zmodyfikowane tłumienie).
- **Spektroskopia tłumienia:** „Brzęczenie” czarnych dziur po fuzji może ujawnić subtelne odchylenia od GR.
- **Pierwotne fale grawitacyjne:** Fale z Wielkiego Wybuchu mogą nosić ślady fizyki strun, wykrywalne przez przyszłe obserwatoria, takie jak LISA czy Teleskop Einsteina.

Jak dotąd obserwacje są zgodne z GR w granicach obecnych niepewności, ale większa precyzja może ujawnić niespodzianki.

Kosmologia: Wszechświat jako laboratorium

Sam kosmos jest ostatecznym akceleratorem cząstek.

- **Kosmiczne tło mikrofalowe (CMB):** Małe fluktuacje mapują wczesny wszechświat. Niektóre modele strun przewidują specyficzne sygnatury, takie jak niegaussowskość lub cechy oscylacyjne.
- **Inflacja:** Szybka ekspansja wszechświata mogła być napędzana przez pola związane z teorią strun. Wykrycie pierwotnych modów B w CMB byłoby silną wskazówką.
- **Poszukiwania ciemnej materii:** Neutraliny SUSY są głównymi kandydatami na ciemną materię. Eksperymenty takie jak XENONnT, LUX-ZEPLIN i PandaX poszukują WIMP poprzez odrzuty jądrowe.
- **Aksjony:** Teoria strun przewiduje również cząstki podobne do aksjonów, które mogą być wykryte poprzez rezonansowe jamy lub obserwacje astrofizyczne.

Jak dotąd niebo milczy. Ciemna materia pozostaje niewykryta, a dane kosmologiczne pasują do modelu Λ CDM bez wyraźnych śladów strun.

Obecny stan: Ograniczenia, nie potwierdzenia

Dekady poszukiwań nie potwierdziły SUSY, dodatkowych wymiarów ani sygnałów strun. Ale brak dowodów nie jest dowodem na brak:

- SUSY może istnieć w skalach poza zasięgiem LHC lub w mniej widocznych widmach; dotychczasowe zerowe wyniki **faworyzują bardziej dostrojone wersje („mniej naturalne”)**, jeśli SUSY jest blisko skali TeV.
- Dodatkowe wymiary mogą być mniejsze, bardziej zakrzywione lub w inny sposób ukryte przed obecnymi sondami.
- Teoria strun może pozostawiać wykrywalne ślady tylko we bardzo wczesnym wszechświecie, dostępne jedynie przez kosmologię.

Niektóre **anomalie precyzyjne** (np. pomiar (**g-2**) mionu i pewne napięcia w **fizyce smaków**) pozostają **intrygujące, ale nierozwiązane**; motywują dalsze badania, ale jeszcze nie obalają SM.

Eksperymenty ograniczyły **przestrzeń parametrów**. Powiedziały nam, gdzie SUSY nie istnieje, jak małe muszą być dodatkowe wymiary i jak mocno lub słabo może oddziaływać ciemna materia.

Droga naprzód

Przyszłe eksperymenty obiecują głębsze badania:

- **LHC o wysokiej jasności (HL-LHC):** Zbierze ~10 razy więcej danych, badając SUSY do wyższych mas i rzadkich procesów.
- **Future Circular Collider (FCC-hh):** Propozycja zderzacza 100 TeV, wystarczająco potężnego, by zbadać skalę energii, gdzie może pojawić się fizyka GUT.
- **LISA (lata 30. XXI wieku):** Kosmiczne obserwatorium fal grawitacyjnych, czułe na pierwotne sygnały z wczesnego wszechświata.

- **Detektory ciemnej materii nowej generacji:** Z czułością na słabe sygnały, mogą w końcu uchwycić WIMP lub aksjon.

Nauka jako podróż

Eksperymentalna historia fizyki poza Modelem Standardowym nie jest opowieścią o porażce, lecz o procesie.

- Zerowe wyniki wykluczają proste modele i doskonalą nasze teorie.
- Każde ograniczenie prowadzi nas ku bardziej wyrafinowanym i predykcyjnym ramom.
- Brak SUSY lub dodatkowych wymiarów w skali TeV nie zabija pomysłów – przesuwają je na nowe terytoria.

Podobnie jak eksperyment Rutherforda z folią złotą obalił model śliwkowego puddingu, czy LIGO rozwiało wątpliwości co do fal grawitacyjnych, kolejne wielkie odkrycie może nadejść nagle – i zmienić wszystko.

Ku teorii wszystkiego

Przez wieki fizyka rozwijała się poprzez unifikację. Newton połączył niebo i Ziemię pod jednym prawem grawitacji. Maxwell połączył elektryczność i magnetyzm. Einstein połączył przestrzeń i czas. Teoria elektroslaba pokazała, że dwie bardzo różne siły są aspektami jednej.

Kolejny krok jest jak dotąd najśmielszy: połączenie **czterech fundamentalnych oddziaływań** – silnego, słabego, elektromagnetycznego i grawitacyjnego – w jedną, spójną ramę. To Święty Graal fizyki: **Teoria Wszystkiego (ToE)**.

Dlaczego ToE jest ważna

Pełna unifikacja to nie tylko filozoficzna elegancja; rozwiązuje głębokie problemy praktyczne i koncepcyjne:

- **Grawitacja kwantowa:** Ogólna teoria względności załamuje się w skali Plancka (10^{19} GeV). Tylko kwantowa teoria grawitacji może wyjaśnić czarne dziury i osobliwość Wielkiego Wybuchu.
- **Naturalność i precyzyjne dostrajanie:** Problem hierarchii i problem stałej kosmologicznej wymagają głębszego wyjaśnienia.
- **Parametry Modelu Standardowego:** Dlaczego cząstki mają takie masy i ładunki? Dlaczego trzy generacje kwarków i leptonów? ToE może wyjaśnić te tajemnice.
- **Kosmologia:** Ciemna materia, ciemna energia i inflacja mogą być powiązane z fizyką w skali unifikacji.

ToE nie tylko zjednoczyłaby siły – zjednoczyłaby skale, od najmniejszych strun teorii kwantowej po największe struktury kosmiczne.

Supersymetria i wielka unifikacja

Supersymetria (SUSY), jeśli zrealizowana w naturze, zapewnia trampolinę do ToE.

- **Rozwiązany problem hierarchii:** Spartykuły znoszą rozbieżne korekty masy Higgsa.
- **Zunifikowane sprzężenia gauge:** Z SUSY siły trzech oddziaływań pięknie zbiegają się przy 10^{16} GeV, sugerując **Wielką Teorię Unifikacji (GUT)**.
- **Kandydat na ciemną materię:** Neutralino dostarcza naturalnego wyjaśnienia dla kosmicznej ciemnej materii.

GUT inspirowane SUSY (takie jak SU(5), SO(10) lub E_6) wyobrażają sobie, że przy ultra-wysokich energiach kwarki i leptoni łączą się w większe multiplets, a siły łączą się w jedną grupę gauge.

Ale SUSY jeszcze nie pojawiła się w eksperymentach. Jeśli istnieje tylko w skalach poza naszym zasięgiem, jej moc unifikacyjna może pozostać kusząca, lecz ukryta.

Teoria strun: Grawitacja kwantowa i graviton

Teoria strun idzie dalej. Zamiast łątać Model Standardowy, przepisuje fundamenty:

- **Struny, nie punkty:** Wszystkie cząstki są wibracjami maleńkich strun.
- **Grawiton pojawia się naturalnie:** Bezmasowe wzbudzenie o spinie 2 jest nieuchronne, co oznacza, że kwantowa grawitacja jest wbudowana.
- **Unifikacja:** Różne tryby wibracji tworzą wszystkie znane cząstki – kwarki, leptoni, bozony gauge, Higgsa – w jednej ramie.
- **Dodatkowe wymiary:** Teoria strun wymaga 10 wymiarów czasoprzestrzeni; teoria M wymaga 11, z ukrytymi wymiarami skomprimowanymi lub zakrzywionymi.

W tej wizji unifikacja nie jest przypadkiem – to geometria. Siły różnią się, ponieważ struny wibrują na różne sposoby, kształtowane przez topologię dodatkowych wymiarów.

Teoria M i światy bran

Odkrycie, że pięć teorii strun jest połączonych przez dualności, doprowadziło do teorii M, jeszcze bardziej okazałej ramy:

- Obejmuje struny, membrany i brany o wyższych wymiarach.
- Sugeruje, że nasz wszechświat może być 3-braną osadzoną w objętości o wyższym wymiarze.
- Oferuje naturalne wyjaśnienia, dlaczego grawitacja jest słabsza (rozprzestrzenia się w dodatkowych wymiarach) i jak wiele wszechświatów może istnieć w „multiwszechświecie”.

Teoria M jest wciąż niekompletna, ale reprezentuje najbardziej ambitny krok, jaki kiedykolwiek podjęto w stronę ToE.

Inne ścieżki do grawitacji kwantowej

Teoria strun i teoria M nie są jedynymi ścieżkami. Fizycy badają wiele ram, każda z różnymi mocnymi stronami:

- **Kwantowa grawitacja pętlowa (LQG):** Próbuje bezpośrednio kwantyzować czasoprzestrzeń, przewidując, że przestrzeń jest dyskretna w skali Plancka.
- **Bezpieczeństwo asymptotyczne:** Sugeruje, że grawitacja może być dobrze zachowana przy wysokich energiach dzięki nietrywialnemu punktowi stałemu.
- **Kauzalne triangulacje dynamiczne (CDT):** Buduje czasoprzestrzeń z prostych geometrycznych bloków budulcowych.
- **Teoria twistorów i amplituhedry:** Nowe matematyczne ramy, które reimaginują czasoprzestrzeń i amplitudy rozpraszania.

Chociaż żadna z nich nie dorównuje jeszcze unifikacyjnemu zasięgowi teorii strun, ilustrują bogactwo poszukiwań.

Rola eksperymentu

ToE musi ostatecznie być testowalna. Chociaż skala Plancka jest daleko poza obecnymi eksperymentami, fizycy poszukują pośrednich dowodów:

- **Zderzacze:** Cząstki SUSY, dodatkowe wymiary lub mikro-czarne dziury.
- **Testy precyzyjne:** Odchylenia od prawa Newtona w krótkich skalach.
- **Fale grawitacyjne:** Egzotyczne polaryzacje lub echa z wyższych wymiarów.
- **Kosmologia:** Ślady inflacji, kandydaci na ciemną materię lub aksjony przewidywane przez teorię strun.

Jak dotąd ToE pozostaje poza zasięgiem, ale każdy zerowy wynik przycina możliwości.

Piękno i wyzwanie

Prawdziwa ToE nie tylko zjednoczyłaby fizykę – zjednoczyłaby **ludzką wiedzę**. Połączyłaby mechanikę kwantową i teorię względności, mikro i makro, cząstkę i kosmos.

Jednak napotyka paradoks: sama skala, w której zachodzi unifikacja, może być na zawsze poza zasięgiem eksperymentalnym. Zderzacz 100 TeV bada tylko ułamek drogi do skali Plancka. Możemy być zmuszeni polegać na kosmologii, spójności matematycznej lub pośrednich sygnaturach.

Marzenie pozostaje żywe dzięki głębokiej elegancji ram. Jak zauważył Witten, teoria strun to nie tylko „zbiór równań”, ale „nowa rama dla fizyki”.

Nauka jako metoda, nie dogmat

Poszukiwanie ToE nie polega na ogłaszaniu teorii strun, SUSY czy jakiegokolwiek pojedynczej idei jako „prawdziwej”. Chodzi o **metodę naukową**:

- Zauważanie pęknięć w istniejących teoriach.
- Proponowanie nowych, odważnych ram.
- Testowanie ich w konfrontacji z rzeczywistością, odrzucanie lub udoskonalanie w razie potrzeby.

Historia jest daleka od zakończenia. Ale to właśnie ta otwartość – odmowa traktowania jakiegokolwiek teorii jako świętej – sprawia, że fizyka jest żywą nauką, a nie dogmatem.

Horyzont przed nami

Kolejne stulecie fizyki może ujawnić:

- Dowody na supersymetrię lub jej alternatywy.
- Dane kosmologiczne potwierdzające lub obalające przewidywania strun.
- Głębsze przeformułowanie samej czasoprzestrzeni.

Albo być może prawdziwa ToE to coś, czego nikt jeszcze nie wyobraził.

Ale samo poszukiwanie – pragnienie unifikacji, wyjaśnienia, zobaczenia natury w całości – jest tak samo częścią człowieczeństwa, jak same równania.

Referencje i dalsze lektury

Supersymetria i wielka unifikacja

- Wess, J., & Bagger, J. (1992). *Supersymmetry and Supergravity*. Princeton University Press.
- Baer, H., & Tata, X. (2006). *Weak Scale Supersymmetry: From Superfields to Scattering Events*. Cambridge University Press.
- Georgi, H., & Glashow, S. L. (1974). "Unity of All Elementary-Particle Forces." *Physical Review Letters*, 32(8), 438.

Teoria strun i teoria M

- Green, M. B., Schwarz, J. H., & Witten, E. (1987). *Superstring Theory* (Vol. 1 & 2). Cambridge University Press.
- Polchinski, J. (1998). *String Theory* (Vol. 1 & 2). Cambridge University Press.
- Witten, E. (1995). "String Theory Dynamics in Various Dimensions." *Nuclear Physics B*, 443(1), 85–126.
- Becker, K., Becker, M., & Schwarz, J. H. (2006). *String Theory and M-Theory: A Modern Introduction*. Cambridge University Press.

Kwantowa grawitacja pętlowa i alternatywy

- Rovelli, C. (2004). *Quantum Gravity*. Cambridge University Press.
- Thiemann, T. (2007). *Modern Canonical Quantum General Relativity*. Cambridge University Press.
- Ambjørn, J., Jurkiewicz, J., & Loll, R. (2005). "Reconstructing the Universe." *Physical Review D*, 72(6), 064014.

Granice eksperymentalne

- Aad, G., et al. (ATLAS Collaboration). (2012). "Observation of a New Particle in the Search for the Standard Model Higgs Boson." *Physics Letters B*, 716(1), 1–29.

- Chatrchyan, S., et al. (CMS Collaboration). (2012). "Observation of a New Boson at a Mass of 125 GeV." *Physics Letters B*, 716(1), 30–61.
- Abbott, B. P., et al. (LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration). (2016). "Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger." *Physical Review Letters*, 116(6), 061102.

Dostępne opowieści popularnonaukowe

- Greene, B. (1999). *The Elegant Universe: Superstrings, Hidden Dimensions, and the Quest for the Ultimate Theory*. W. W. Norton.
- Randall, L. (2005). *Warped Passages: Unraveling the Mysteries of the Universe's Hidden Dimensions*. Harper Perennial.
- Rovelli, C. (2016). *Seven Brief Lessons on Physics*. Riverhead Books.
- Wilczek, F. (2008). *The Lightness of Being: Mass, Ether, and the Unification of Forces*. Basic Books.