

Masa ludzi szuka w środkach masowego przekazu przepisu na zmniejszenie indywidualnej masy ciała. A jednak z ogólnej masy towarowej wybieramy raczej masę kakaową, masę mleczną czy masę orzechową, masowo pakowaną w przetworzoną masę plastyczną lub masę papierową. Czasami w masie spadkowej udaje nam się natknąć na masę perłową, ale już masa upadłościowa zdecydowanie źle kojarzy się masom pracującym. W ogóle masa spraw wiąże się z masą. Jedni chcieliby umieć sterować masami, inni woleliby po prostu mieć masę pieniędzy, żeby masę swoich spraw pozalać. A fizycy próbują zrozumieć, co to tak naprawdę jest masa.

Masa, z łaciny *massa*, ciasto, bryła, zadomowiła się w większości języków pochodzenia europejskiego i w większości z nich pisze się i brzmi podobnie oraz ma podobnie szerokie znaczenie. Jest również jednym z pierwszych pojęć poznawanych na lekcjach fizyki. Masa jest z jednej strony miarą trudności, którą napotykamy przy próbie zmiany prędkości danego ciała, ujętą po raz pierwszy ilościowo w II prawie Newtona $F = m_b a$, które stwierdza, że przyspieszenie ciała jest proporcjonalne do działającej siły, a stałą proporcjonalności jest właśnie m_b , czyli tzw. masa bezwładna. Z drugiej strony masa pełni rolę ładunku we wzorze na siłę grawitacyjną $F = m_g g$, gdzie g jest natężeniem pola grawitacyjnego. Oba wzory wyglądają identycznie, ale m_g nie musi równać się m_b . Obecnie wiemy, że równość $m_g = m_b$ jest spełniona z bardzo dużą dokładnością. Konsekwentne zastosowanie hipotezy równości mas – bezwładnej i grawitacyjnej – doprowadziło Einsteina do ogólnej teorii względności, czyli teorii grawitacji, w której siła grawitacyjna jest przejawem zakrzywienia czasoprzestrzeni spowodowanego obecnością mas. Teoria ta nie wyjaśnia natomiast, co to jest masa.

Co wiemy o masie? Masa jest wielkością charakteryzującą pojedyncze ciało lub odosobniony układ ciał niezależnie od układu odniesienia. Mówimy, że jest skalarem ze względu na transformację Lorentza, tzn. niezmiennikiem szczególnej teorii względności. W ogólności

$$m = \sqrt{\left(\sum_i \frac{E_i}{c^2}\right)^2 - \left(\sum_i \frac{\vec{p}_i}{c}\right)^2},$$

gdzie sumowanie przebiega po elementach układu ciał, którego masę obliczamy. Czasami dodaje się tak określonej masie przymiotniki „spoczynkowa” i „niezmiennicza”. Dlaczego spoczynkowa, wyjaśnimy trochę później, a niezmiennicza – po to, aby odróżnić masę układu jako całości od sumy mas poszczególnych składników

$$\sum_i m_i = \sum_i \sqrt{\left(\frac{E_i}{c^2}\right)^2 - \left(\frac{\vec{p}_i}{c}\right)^2}.$$

Do tej właśnie sytuacji odnosi się popularne rozumienie najslyniejszego wzoru fizyki $E = „m”c^2$, który ponoć opisuje możliwość zamiany masy w energię. Rozumienie to jest uzasadnione jedynie wtedy, gdy pamiętamy, że „ m ” równa się Δm , a nie m . Inną poprawną interpretacją wzoru Einsteina jest podstawienie pod „ m ” tzw. masy relatywistycznej, czyli wielkości $\frac{m}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}$. Wtedy

masa relatywistyczna dla $v = 0$, czyli m jest nazywana masą spoczynkową. Masa relatywistyczna jest po prostu energią wyrażoną w odpowiednich jednostkach, i to ona, a nie m , pełni rolę ładunku grawitacyjnego tam, gdzie możemy posługiwać się hybrydą złożoną z newtonowskiej grawitacji i szczególnej teorii względności.

W tym ostatnim przypadku mamy pewne „trudności techniczne” związane z brakiem ogólnej metody rozwiązywania równań teorii oddziaływań silnych – radzimy sobie za pomocą modeli i rozwiązań numerycznych.

Jeżeli nie nadajemy cząstkom wielkich pędów, tzn. $(E_i/c^2)^2 \gg (\vec{p}_i/c)^2$, to zanedbując wyrazy pędowe w powyższych wzorach, otrzymujemy $m = \sum_i m_i$ i masa staje się zwykłą wielkością addytywną. Dzięki temu mamy prawo mówić, że masa dwóch worków ziemniaków jest dwa razy większa od masy jednego worka, masa substratów jest równa masie produktów reakcji chemicznej, a nawet uważać za równe masy atomu w stanie podstawowym i wzbudzonym. Tak dochodzimy do reakcji jądrowych, w których różnica mas $\Delta m = m - \sum_i m_i$ nie jest już zanedbywalna. Warto zwrócić uwagę, że m jest takie samo przed i po reakcji, natomiast Δm ma sens tylko po reakcji rozpadu (lub przed reakcją syntezy), kiedy określa wyzwalaną w reakcji energię (Δm zdefiniowane jako dodatnie dla reakcji rozpadu jest, oczywiście, ujemne dla reakcji syntezy).

Jak na razie wydaje się, że wszystko rozumiemy. Rozkładamy materię na coraz mniejsze elementy i masę obliczamy jako prostą sumę mas składników pomniejszoną o energię wiązania (np. worków z ziemniakami). Czy tak będzie w nieskończoność? Nie jest to wykluczone, ale wydaje się z jednej strony nudne, a z drugiej napotyka pewne trudności. W ten sposób możemy załatwić sprawunki w sklepie warzywniczym, zrozumieć masy atomowe, z grubsza proporcjonalne do liczby nukleonów w jądrze, oraz masy hadronów (proton, neutron, piony i ich krewniacy) jako układów zbudowanych z kwarków.

Zagadką natomiast pozostają masy leptonów, czyli elektronu i jego krewniaków, oraz masy kwarków. Po pierwsze – nie udało nam się stwierdzić ich struktury, po drugie – różnice mas są tu bardzo duże, po trzecie – wygląda na to, że mamy dokładnie trzy pokolenia składające się z dwóch leptonów i dwóch kwarków każde. Jeżeli leptony i kwarki zbudowane są z jakichś bardziej elementarnych bezmasowych składników (masywne składniki pozostawiają pytanie o masę nierozwiązane), to ich dynamika powinna wyjaśnić liczbę pokoleń oraz

obserwowane różnice mas między nimi (np. stosunek masy najcięższego naładowanego leptonu τ do masy elektronu, wynoszący około 3500, czy stosunek mas kwarków $m_t/m_u \approx 400\,000$).

Ale to nie koniec tajemnic związanych z masą w świecie cząstek elementarnych. Oprócz królestwa cząstek materii, czyli leptonów i kwarków, mamy jeszcze królestwo cząstek przenoszących oddziaływania, którego najlepiej znanym przedstawicielem jest bezmasowy foton. Oprócz niego znajdujemy tu – również bezmasowe – gluony, czyli nośniki oddziaływań międzykwarkowych oraz trzy – niespodzianka – masywne bozony W^+ , W^- i Z^0 , przenoszące oddziaływania słabe, odpowiedzialne za np. rozpad neutronu. Masa tych bozonów jest około 100 razy większa od masy nukleonów albo, jeśli kto woli, równa mniej więcej połowie masy najcięższego kwarku.

Wyjaśnienia zagadki mas bozonów pośredniczących dostarcza mechanizm Higgsa, który dodatkowo potrafi nadać masę i leptonom, i kwarkom bez postulowania ich złożoności. W zasadzie nie jest on nowy. Jego źródła można się doszukać w fizyce ciała stałego. Np. własności półprzewodników wyjaśniane są często za pomocą tzw. pseudocząstek, elektronów i dziur, zachowujących się jak swobodne cząstki obdarzone tzw. masą efektywną, zależną od budowy półprzewodnika, a będącą wynikiem kolektywnego zachowania „prawdziwych” elektronów.

Żeby w podobny sposób wyjaśnić pochodzenie masy cząstek elementarnych, trzeba zapostulować obecność w czasoprzestrzeni czegoś, z czym oddziaływanie nadałoby masy znanym cząstkom. Ponieważ masy są skalarami, więc to coś powinno też być skalarem. Dodatkowo, ponieważ tylko nośniki oddziaływania słabego są masywne, więc nasze coś powinno być czułe tylko na oddziaływania słabe.

Takim najprostszym cosiem jest skalarne pole o czterech stopniach swobody. (Wnikanie w matematyczną strukturę cosia zaprowadziłoby nas za daleko, ale może pomocne będzie stwierdzenie, że np. pole elektromagnetyczne związane z bezmasowym fotonem ma dwa stopnie swobody odpowiadające liczbie niezależnych stanów polaryzacyjnych.) Ale to jeszcze nie koniec minimalnego zestawu cech cosia. Konieczne jest, aby samooddziaływanie cosia sprawiało, że stan o najniższej energii nie jest stanem o najwyższej symetrii. Wtedy, podobnie jak ferromagnetyk spontanicznie magnesuje się poniżej temperatury Curie, tak nasze coś spontanicznie polaryzuje się poniżej pewnej temperatury. W efekcie, bozony pośredniczące, bezmasowe przy bardzo wysokich energiach, zaczynają wyglądać, jakby miały masę. Każdy z nich „dobiera sobie” po jednym brakującym stopniu swobody z pola cosia (bezmasywne bozony pośredniczące mają, jak foton, tylko dwie możliwe polaryzacje, a masywne trzy). Ostatni – czwarty stopień swobody pozostaje jako obserwowalna skalarna cząstka, tzw. bozon Higgsa.

W tym podejściu masy leptonów i kwarków pojawiają się w wyniku oddziaływania z polem Higgsa, a różnice mas tłumaczone są poprzez różnice w sile tego oddziaływania, co, niestety, nie wygląda zbyt elegancko.

Czy tak jest naprawdę? Przewidywania opisanego mechanizmu, będącego podstawą tzw. modelu standardowego cząstek elementarnych, są w bardzo dobrej zgodności z doświadczeniem. Brakuje tylko zaobserwowania samej cząstki Higgsa. Polowanie na nią odbywa się we wszystkich możliwych miejscach. Jak na razie udało się ją osaczyć w granicach od jednej do dziesięciu mas Z^0 . Ostateczny werdykt powinien zostać wydany w ciągu dekady.

Albo znajdziemy bozon Higgsa, albo okaże się, że mechanizm Higgsa jest niskoenergetycznym efektywnym opisem nieznannej dynamiki przy bardzo wysokich energiach, albo ... patrząc w lustro, powiemy do siebie „ty ciemna maso!”, co by świadczyło, że odkryliśmy coś zupełnie nowego. Pewne jest tylko jedno. W ciągu kilku lat, bez względu na to, którą z trzech możliwości zaobserwujemy, rozpocznie się nowa, fantastyczna przygoda na tropach tajemnic natury.

Pomysł na to, skąd bierze się masa W^+ , W^- , wart był dwóch Nagród Nobla (dla w sumie pięciu laureatów) i zaowocował przewidzeniem wartości ich masy oraz wykryciem nie tylko samych W^+ i W^- , ale również ich neutralnego towarzysza Z^0 , przejawów obecności którego wcześniej w przyrodzie nie obserwowano.

