



Geneza masy

Marek Zralek

Zakład Teorii Pola i Cząstek Elementarnych, Instytut Fizyki,
Uniwersytet Śląski, Katowice

Ostatnie wyniki z dwóch eksperymentów w LHC najprawdopodobniej potwierdzają istnienie cząstki Higgsa. Spowodowało to ponowną intensywną dyskusję o pochodzeniu masy. Chodzi o skromną część (5%) masy Wszechświata, o materię świecąca, a więc wszystko to, co we Wszechświecie bezpośrednio obserwujemy. Być może uzyskamy odpowiedzi na pytania stawiane od czasów Newtona, między innymi co jest źródłem masy, tej widzialnej części materii Wszechświata? Wszystko wskazuje na to, że znamy to źródło. Chromodynamika Kwantowa¹ na sieci pozwala wyznaczyć ponad 95% masy dowolnego ciała. Pozostała część to skala naszej niewiedzy i nadziei, że odkrycie cząstek Higgsa doprowadzi nas do ostatecznego rozwiązania problemu. Czy tak rzeczywiście będzie? Na razie pełnego rozwiązania nie znamy, chociaż wiemy jak go poszukiwać.

1. Wstęp

Pojęcie masy zostało po raz pierwszy użyte przez Izaaka Newtona w jego fundamentalnym dziele *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* w 1687 roku [1]. Masa pojawia się tam w dwóch znaczeniach, jako masa bezwładna i grawitacyjna, chociaż trudno doszukać się w tej pracy ścisłej definicji tego pojęcia. Newton uważał, że wszystkie obiekty składają się z maleńkich kuleczek, które stworzył Bóg. W związku z tym masa jest zachowana i addytywna. Uważał te własności za atrybuty boskie i jako takie niepodlegające weryfikacji. W połowie XVIII wieku prawo zachowania masy sformułowane przez Łomonosowa i Lavoisiera oraz addytywność masy stały się podstawą badań chemicznych. W tym samym czasie Faraday, a później Maxwell, wprowadzili pojęcie pola przez długi czas przeciwstawianego materii. Podział wszystkiego, co nas otacza, na materię i pole wydawał się bardzo naturalny. Powstanie Szczególnej Teorii Względności i mechaniki kwantowej na początku XX wieku spowodowało ujednoczenie opisu. Podział na cząstki, związane z materią, i fale reprezentujące pola, stał się bezpodstawny. Dualizm korpuskularno-falowy spowodował, że cząstki czasami zachowywały się jak fale, a fale można było interpretować jako strumień cząstek. Poza tym pojęcie masy należące w fizyce klasycznej, obok czasu i przestrzeni, do fundamentalnych własności przyrody, straciło swoją pierwszoplanową rolę na rzecz energii.

¹ Kwantowa teoria pola opisująca tzw. oddziaływania silne.

Przełom w poznawaniu źródła masy nastąpił po wykryciu w 1905 roku przez Einsteina związku pomiędzy masą i energią, chociaż na efekty trzeba było jeszcze długo czekać. Kluczowe było tu odkrycie Standardowego Modelu (SM) oddziaływań fundamentalnych, a w szczególności Chromodynamiki Kwantowej (QCD). Obecnie, korzystając z relacji podanej przez Einsteina, potrafimy obliczyć wkład energii do masy materii w każdej skali, pochodzący od cząsteczek, atomów, jąder i wreszcie nukleonów. Poza tym wiemy, dlaczego masa w naszym świecie jest tak dobrze zachowana. „Skala naszej niewiedzy” to masy dwóch kwarków „up” i „down” oraz masa elektronu. SM przewiduje, w jaki sposób cząstki materii nabywają masę, odpowiedzialny za to jest tzw. mechanizm Higgsa. Odpowiada on jednak tylko za mniej niż 5% masy materii, stąd padają żartobliwe sugestie, aby przestać nazywać „Boską cząstką”, prawdopodobnie już odkrytą cząstkę Higgsa [2].

W dalszej części artykułu przedstawimy, w jaki sposób określa się obecnie masę substancji, o której już tak dużo wiemy, i którą potrafimy analitycznie i numerycznie obliczyć. Powrócimy do, jeszcze często obecnie dyskutowanej w literaturze i podręcznikach szkolnych, masy zależnej od prędkości cząstek. Pokażemy, że na obecnym poziomie zrozumienia struktury materii, takie określenie masy jest niewłaściwe i wprowadza niepotrzebny zamęt. W punkcie 3 pokażemy, jak ruch cząstek wewnątrz ciał, energia oddziaływania pomiędzy składnikami cząstek i w jakich proporcjach dają wkład do masy. Jak zobaczymy, masa materii spotykanej na co dzień, to głównie masa protonów i neutronów w jądrach. Mimo tego, przedstawimy wszystkie źródła masy, nawet te, które praktycznie nie mają znaczenia. Pozwala to zrozumieć, dlaczego tak długo masa pozostawała zachowaną wielkością. W podpunkcie 3.1 pokażemy, jak obecnie próbuje się wyjaśnić masę kwarków i leptonów.

2. Co to jest masa?

Nie będziemy omawiać historii pojęcia masy. Ważne jest tylko, że od czasu, gdy po raz pierwszy pojawiło się w nauce, a więc od końca XVII aż do początku XIX wieku, masa była addytywną i bezwzględnie zachowaną wielkością fizyczną. W oddziaływaniach sprężystych zachowana była także energia całkowita (suma energii kinetycznej i potencjalnej). W zderzeniach niesprężystych energia przechodziła w ciepło i w konsekwencji energia mechaniczna nie była zachowana. Praca Einsteina z 1905 roku [3] zmieniła zupełnie pojmowanie masy, a przy okazji także energii i pędu. Dla cząstki o masie m , poruszającej się z szybkością v , jej całkowita energia E i pęd p mają postać:

$$E = \gamma m c^2, \quad p = \gamma m v, \quad \text{gdzie} \quad \gamma(v) = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}. \quad (1)$$

Masa przestała być bezwzględnie zachowaną wielkością fizyczną. Rolę taką przejęła energia. Po powstaniu Ogólnej Teorii Względności (OTW) energia stała się też źródłem krzywizny czasoprzestrzeni, a więc oddziaływań grawitacyjnych. W tym momencie warto zatrzymać się na chwilę, gdyż ciągle jest duży problem z właściwym rozróżnieniem tych wielkości, pomimo wysiłków wielu autorów i prac na ten temat napisanych, także popularnych, np. [4]. Obecnie przyjmuje się następującą definicję masy:

**Masa jest całkowitą energią ciała (podzieloną przez c^2)
mierzoną w jego układzie spoczynkowym,**

$$m = \frac{E_{\text{spocz.}}}{c^2}. \quad (2)$$

Jest to jedyna jej definicja akceptowana obecnie w fizyce oddziaływań podstawowych. Wyraźnie rozdziela masę od energii kinetycznej poruszającego się ciała. Pozwala wprowadzić prawo zachowania całkowitej energii i daje możliwość obliczenia masy ciał w dowolnym układzie odniesienia. Przejście do innego układu powoduje zmianę energii całkowitej ciała, pozostawiając jego masę niezmienną. Masa jest niezmiennikiem transformacji pomiędzy różnymi układami odniesienia (transformacje Lorentza). Dla zderzających się niesprężyste kul zmiana ich energii wewnętrznej powoduje zmianę masy zlepionych ciał (nie jest ona, jak w fizyce klasycznej, sumą mas zderzających się obiektów) prowadząc, co łatwo zauważyć, do niezachowania masy, nie zmienia się natomiast całkowita energia.

Termin „masa relatywistyczna” jest wciąż używany w wielu popularnych opracowaniach i jest też dość często spotykany w podręcznikach szkolnych². Na szczęście coraz rzadziej pojawia się w pracach osób zajmujących się profesjonalnie fizyką. W tej sytuacji wciąż aktualna jest anegdota Carla Adlera [5]: zapytany przez swojego syna, ucznia licealnego, czy masa rzeczywiście zależy od prędkości, odpowiedział: *Nie, chociaż tak, w rzeczywistości nie, ale nie mów o tym swojemu nauczycielowi. Zobaczmy, w jaki sposób i w jakim zakresie, przyjęta definicja masy pozwala ją obliczyć.*

3. Masa substancji, atomu, jądra i nukleonów

Korzystając z definicji (2) możemy obliczyć prawie całą masę materii. Prześledzimy to na przykładach. Zaczniemy od **substancji** składającej się z niezwiązanych cząsteczek (gaz lub ciecz) i zobaczymy, jak zmienia się jej masa na skutek ruchów termicznych, o ile wzrośnie przykładowo masa butelki z wodą, gdy ją podgrzejemy? Energia kinetyczna cząsteczek wody zależy od jej temperatury:

² Zob. rozważania Ludwika Lehmana.

$$E_{kin} = \frac{5}{2} kT, \quad (3)$$

gdzie k jest stałą Boltzmana ($k = 8,617332 \cdot 10^{-5}$ eV/K), natomiast T – temperaturą bezwzględną ($T = 273,15 + t$ °C). Łatwo teraz obliczymy o ile zmieni się energia kinetyczna cząsteczki wody w stosunku do energii spoczynkowej, gdy jej temperatura wzrośnie od t_1 do t_2 . Biorąc pod uwagę, że cząsteczka wody ma masę $M_{H_2O} = 16\,893$ MeV/c², gdy $t_2 - t_1 = 60$ °C, otrzymamy:

$$\frac{\Delta_{t_1}^{t_2}(M_{H_2O})}{M_{H_2O}} = \frac{5k(t_2 - t_1)}{2c^2 M_{H_2O}} = 7,65 \cdot 10^{-13}, \quad (4)$$

Widać więc, że ruch termiczny może zostać zupełnie pominięty w pełnym bilansie masy materii. Można przyjąć, że cała masa materii skupiona jest w masie **cząsteczek chemicznych**.

Następny więc etap to **wiązania chemiczne** w substancji. Znanych jest kilka rodzajów takich wiązań. Nie będziemy ich tu omawiać. Warto tylko podać skalę. Dla cząstki o silnym wiązaniu chemicznym, np. dla tlenku węgla, energia wiązania jest równa 1071,8 kJ/mol. Po przeliczeniu, stosunek energii wiązania $|\Delta V|$ do masy tlenku węgla $M_{CO} = 26\,087$ MeV/c² jest równy:

$$\frac{|\Delta V|}{M_{CO}} = 4,26 \cdot 10^{-10}. \quad (5)$$

Warto tu wspomnieć, że energie wiązania ΔV są ujemne. Oznacza to, że masa tlenku węgla jest mniejsza od łącznej masy tlenu i węgla, gdy są one niezwiązane. Widać więc, że i w tym przypadku wiązania chemiczne w cząsteczkach nie mają praktycznie żadnego wpływu na ich masę, bo jest ona skupiona w atomach.

Atomy to jądra i związane elektrony. Przedstawmy sytuację na przykładzie najbliższego atomu – atomu wodoru. Tu pierwszy raz spotykamy się z cząstką, której masy nie potrafimy obliczyć. Masa elektronu jest znana z doświadczenia i wynosi $m_e = 0,511$ MeV/c². Masa protonu to $M_p = 938,27$ MeV/c². Ponieważ energia jonizacji atomu wodoru to 1 Ry (rydberg) = 13,6 eV, tak więc masa atomu wodoru jest równa:

$$M_H = (M_p + m_e - 13,6 \text{ eV}/c^2) = 9,38 \cdot 10^8 \text{ eV}/c^2. \quad (6)$$

Energia wiązania elektronu z protonem w atomie wodoru daje także niewielki wkład do masy atomu.

$$\frac{13,6 \text{ eV}/c^2}{M_H} = 1,45 \cdot 10^{-8}. \quad (7)$$

W atomach wieloelektronowych średnia energia wiązania na jeden elektron jest większa, ale nie zmienia to w zasadniczy sposób masy atomu. Tak małe energie oddziaływań w stosunku do mas substancji, cząsteczek czy atomów, były powodem bardzo dobrze sprawdzającego się w praktyce przez kilkaset lat prawa zachowania i addytywności masy.

Elektron też wnosi niewielki wkład do masy atomów, np. dla atomu wodoru,

$$\frac{m_e}{M_H} = 5,45 \cdot 10^{-4}. \quad (8)$$

W atomach wieloelektronowych, z uwagi na coraz większy udział neutronów w jądrze, ten stosunek jest jeszcze mniejszy. Decydujący więc wkład do masy atomu, z dokładnością do części promila, wnoszą jądra. Warto jednak przypomnieć, że masa elektronu ma bardzo istotny wpływ na rozmiary i strukturę materii. Tzw. promień orbity Bohra a_B zależy od masy elektronu,

$$a_B = \frac{4\pi\epsilon_0\hbar^2}{m_e e^2}. \quad (9)$$

Jądra atomowe składają się z protonów i neutronów. Ich energie wiązania rozpatrzmy na przykładzie najprostszego jądra deuteru ${}^2_1\text{H}$ – deuteronu, składającego się jedynie z jednego protonu i jednego neutronu. Masa neutronu $M_n = 939,57 \text{ MeV}/c^2$. Energia wiązania w deuteronie, którą mierzymy eksperymentalnie i wyznaczamy z teorii sił jądrowych, wynosi $2,224 \text{ MeV}$. Masa deuteronu jest więc równa:

$$M_{{}^2_1\text{H}} = (M_p + M_n - 2,224 \text{ MeV}/c^2) = 1875,62 \text{ MeV}/c^2, \quad (10)$$

a stąd widać, że jądrowa energia wiązania też daje niewielki wkład do masy:

$$\frac{2,224 \text{ MeV}/c^2}{M_{{}^2_1\text{H}}} = 1,2 \cdot 10^{-3}. \quad (11)$$

Dla jąder cięższych (maksymalnie dla żelaza) energia wiązania przypadająca na nukleon jest prawie 8 razy większa w porównaniu z deuterem, co powoduje, że wkład energii wiązania do masy jąder jest mniejszy niż 1%. Jest to jednak już na tyle dużo, iż w tym wypadku zaczęto obserwować odstępstwa od prawa zachowania i addytywności masy.

Tak więc podstawowy wkład do masy materii wnoszą nukleony – proton i neutron. Zanim jednak przejdziemy do opisu pochodzenia masy nukleonów warto nadmienić, że te wszystkie jej źródła przedstawione do tej pory można było odseparować, bo zawsze różniły się o kilka rzędów wielkości. Wpływ ruchu termicznego na ich energię wiązania cząsteczek chemicznych w normalnych warunkach jest niewielki. Podobnie uwięzienie atomów w cząsteczkach

ma nieduży wpływ na ich wiązania atomowe. Te z kolei nie wpływają na wiązanie nukleonów w jądrach. Jądra w atomach można traktować jak cząstki bez wewnętrznej struktury.

Co obecnie wiemy o najważniejszych cząstkach dających masę otaczającej nas materii, o nukleonach? **Proton i neutron** składają się z kwarków u oraz d połączonych – przenoszącymi oddziaływanie silne – bezmasowymi gluonami. Oddziaływanie to opisuje QCD. Jest to specyficzna teoria, posiadająca własność nazywaną „uwięzieniem kwarków”. Powoduje to, że w obszarze małych energii, istotnych dla obliczeń struktury, a więc także masy hadronów, nie można stosować metody kolejnych przybliżeń, zwanej rachunkiem zaburzeń. W tym celu została opracowana teoria, która w odniesieniu do oddziaływań silnych nosi nazwę **QCD na sieci**. Nie będziemy teorii tej przedstawiać. Dla nas jest ważne, że daje ona możliwość obliczenia energii oddziaływania gluonów łączących kwarki w hadronach, a także potrafi przewidzieć masy kwarków. Z tego powodu, że masy kwarków nie da się na razie obliczyć w ramach istniejących teorii, musimy je wyznaczyć ze znanych z doświadczenia mas kilku cząstek. Zwykle jako dane wejściowe przyjmuje się masy dwóch mezonów π oraz K i barionu Ξ . To, co otrzymujemy, jest niezwykle zaskakujące. Masy lekkich kwarków są bardzo małe. Otrzymano (według [6]):

$$m_u = 2,3_{-0,5}^{+0,7} \text{ MeV}/c^2, \quad m_d = 4,8_{-0,3}^{+0,7} \text{ MeV}/c^2. \quad (12)$$

Oznacza to, że większość mas protonu M_p i neutronu $M_n \simeq 939 \text{ MeV}/c^2$ stanowi energia kinetyczna gluonów. Przy takim oszacowaniu kwarki wnoszą tylko około 1% do masy nukleonów. Poza tym, w przypadku cząstek elementarnych energia wiązania jest dodatnia, suma mas kwarków jest mniejsza od masy nukleonu. Wykonuje się też obliczenia mas nukleonów przyjmując masy lekkich kwarków (u, d, s) za równe zero oraz nieskończone masy kwarków ciężkich (c, b, t). Wtedy zgodność jest trochę mniejsza, około 95% [7, 8]. W najgorszym wypadku pozostaje więc do wyjaśnienia mniej niż 5% masy standardowej materii.

3.1. Problem masy kwarków i leptonów

Widzimy, że do kompletnej odpowiedzi na pytanie, co jest genezą masy otaczającej nas materii, brakuje jeszcze informacji o masie elektronu i dwóch kwarków. W SM wszystkie cząstki posiadające masę, a więc także kwarki i leptony, nabywają ją przez oddziaływanie z polem Higgsa. Masa zależy od siły tego oddziaływania, a jej niestety nie znamy. Wiemy więc jak, ale nie wiemy ile. Pozostaje do wyjaśnienia problem ogromnej różnicy mas pomiędzy najlżejszymi leptonami (neutrino mają masę rzędu $1 \text{ eV}/c^2$) a ciężkimi kwarkami – np. kwark t ma masę powyżej $170 \text{ GeV}/c^2$. Są podejmowane różne próby rozwiązania tego problemu, ale na razie bez większego powodzenia. Chociaż wydaje się,

że dla problemu masy materii to raptem niecałe 5%, to dla funkcjonowania SM, a więc tego, który problem masy wyjaśnia, mechanizm Higgsa ma znaczenie zasadnicze.

4. Podsumowanie

Problem masy standardowej materii sprowadza się zasadniczo do wyznaczenia masy protonów i neutronów. W tym celu potrzebna jest głównie znajomość oddziaływania kolorowych gluonów w ramach QCD. Nieznane z teorii masy kwarków u oraz d mogą zostać wyznaczone i wtedy ich wkład do masy jest mniejszy niż 1%. Można też przyjąć, iż lekkie kwarki są bezmasowe i w takich warunkach wyznaczyć masy nukleonów. Reprodukujemy wtedy ponad 95% masy otaczającej nas materii. Dla pełnego wyjaśnienia genezy masy potrzebna jest jeszcze znajomość masy elektronu. Chociaż masa ta daje niewielki wkład do masy materii, jest bardzo istotna dla wyjaśnienia jej rozmiarów i struktury. Oddziaływanie cząstek i ich wiązanie za pomocą fotonów i gluonów wyjaśnia praktycznie całą masę materii. To pierwsze, chociaż w genezie masy ma niewielkie znaczenia, decyduje o kształcie i rozmiarach wszystkiego co nas otacza. Fakt, że oddziaływania silne (przenoszone przez gluony) jest znacznie silniejsze od oddziaływania elektromagnetycznego (przenoszonego przez fotony) powoduje, iż masa wydaje się praktycznie wielkością zachowaną i addytywną.

Literatura

- [1] Polskie tłumaczenie: Isaac Newton, *Matematyczne zasady filozofii przyrody*, Copernicus Center, Kraków 2011.
- [2] D. Goldberg, <http://io9.com/5923170/stop-calling-it-the-god-particle>.
- [3] Polskie tłumaczenia tej pracy Einsteina można znaleźć w książce *Albert Einstein, 5 prac, które zmieniły oblicze fizyki*, Wydawnictwo Uniwersytetu Warszawskiego, Warszawa 2005.
- [4] D. Mermin *Czas na czas, klucz do teorii Einsteina*, Prószyński i S-ka, Warszawa 2008.
- [5] Carl G. Adler, „American Journal of Physics”, 55, 739 (1987).
- [6] J. Beringer i in. (Particle Data Group), Phys. Rev. D 86, 010001 (2012).
- [7] F. Wilczek, Central Eur. J. Phys., 10, 1021 (2012).
- [8] Zobacz także: http://www.frankwilczek.com/Wilczek_Easy_Pieces/342_Origin_of_Mass.pdf.