

# Dlaczego fizycy poszukiwali bozonu Higgsa?

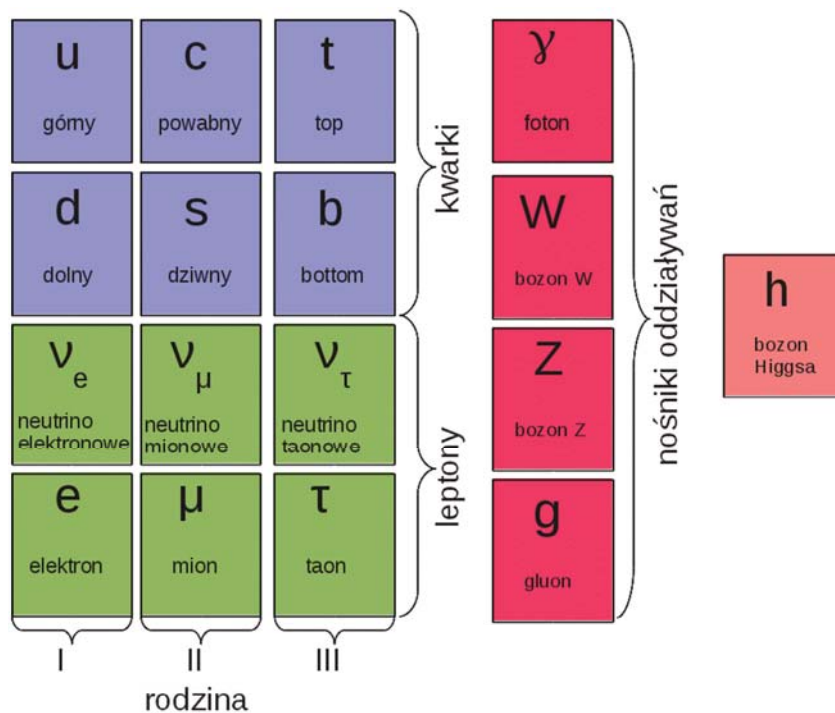
Artur Kalinowski

Dnia 8 października 2013 r. Komitet Noblowski ogłosił nazwiska laureatów Nagrody Nobla w dziedzinie fizyki. Tegoroczną nagrodę otrzymali François Englert oraz Peter W. Higgs „za teoretyczne odkrycie mechanizmu, który przyczynia się do zrozumienia pochodzenia mas cząstek elementarnych i który został niedawno potwierdzony poprzez odkrycie przewidywanej cząstki elementarnej dokonane przez grupy ATLAS i CMS w LHC (CERN)”. Odkrycie, o którym mówi komunikat Komitetu, zostało ogłoszone 4 lipca 2012 r. w Europejskiej Organizacji Badań Jądrowych (CERN) przez rzeczników dwóch wielkich eksperymentów: ATLAS i CMS działających przy Wielkim Zderzaczu Hadronów (LHC)<sup>1</sup>.

W wielu artykułach można przeczytać, w jaki sposób istnienie bozonu Higgsa powoduje, że znane cząstki posiadają masę. Tu postaram się pokazać, dlaczego fizycy w ogóle wymyślili bozon Higgsa i dlaczego wielu z nich było tak głęboko przekonanych o istnieniu tej hipotetycznej cząstki, że zaangażowali się w jej wieloletnie poszukiwania.

## Model Standardowy

Świat cząstek elementarnych jest opisywany przez teorię, która nazywana jest Modelem Stan-



Rys. 1. Cząstki wchodzące w skład Modelu Standardowego

dardowym (w skrócie MS). Model Standardowy to jedna z najdokładniej sprawdzonych teorii fizycznych. Niektóre z jego przewidywań zostały sprawdzone doświadczalnie z dokładnością do ośmiu cyfr znaczących! Cząstki elementarne dzielimy na cząstki materii, cząstki przenoszące oddziaływania oraz bozon Higgsa. W MS występują trzy oddziaływania: słabe, silne i elektromagnetyczne<sup>2</sup>.

Cząstkami przenoszącymi oddziaływania słabe są bozony  $W^+$ ,  $W^-$  oraz  $Z^0$  (indeks górny oznacza tutaj ładunek elektryczny). Oddziaływanie silne jest przenoszone przez

osiem neutralnych elektrycznie gluonów oznaczanych wspólnym symbolem  $g$ , a oddziaływanie elektromagnetyczne jest przenoszone przez elektrycznie obojętny foton oznaczany symbolem  $\gamma$ . Cząstki materii kategorujemy według tego, jakim oddziaływaniom podlegają. Leptony podlegają oddziaływaniom słabym i jeśli mają ładunek elektryczny, to oddziaływaniu elektromagnetycznemu. Kwarki podlegają oddziaływaniom słabym, silnym i elektromagnetycznym. Dotychczasowe obserwacje wskazują, że cząstki materii możemy podzielić na trzy rodziny. Każda rodzina zawiera dwa

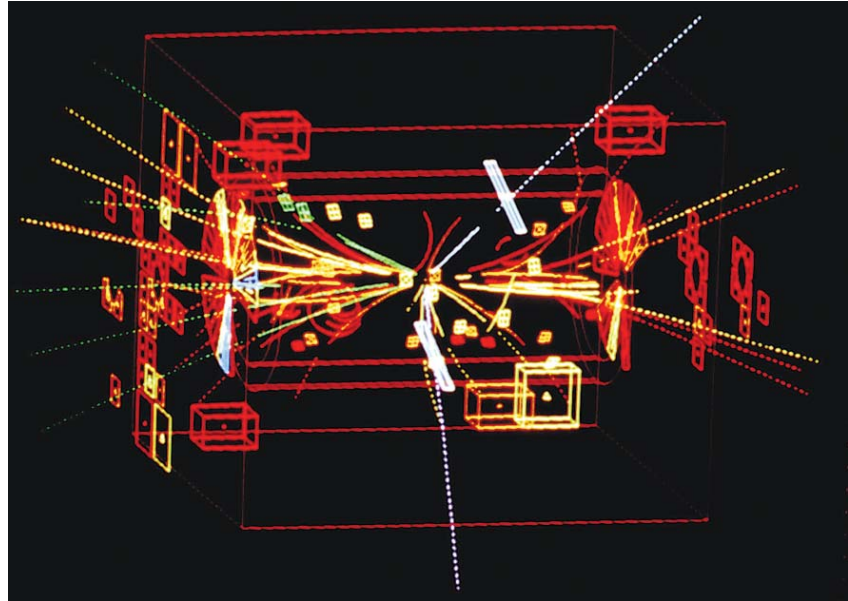
<sup>1</sup> O Wielkim Zderzaczu Hadronów można przeczytać w „Fizyce w Szkole” nr 6/2011.

<sup>2</sup> Jak widać, siła grawitacji, czyli oddziaływanie grawitacyjne, nie występuje w Modelu Standardowym. Wynika to z dwóch powiązanych powodów. Po pierwsze, grawitacja jest bardzo słaba w porównaniu z innymi oddziaływaniami i może być zaniebana w opisie zjawisk na poziomie cząstek elementarnych. Po drugie, opis grawitacji w języku mechaniki kwantowej i la-granżjanu to problem bardzo trudny i nierozwiązany do tej pory.

leptony i dwa kwarki. Podstawowa cecha różniąca cząstki wchodzące w skład poszczególnych rodzin to ich masa: pierwsza rodzina zawiera najlżejsze cząstki, trzecia najcięższe. W skład pierwszej rodziny wchodzi leptony: elektron i neutrino elektronowe, a także kwarki: dolny i górny. Druga rodzina to mion i neutrino mionowe oraz kwarki powabny i dziwny. Trzecia rodzina to taon, neutrino taonowe oraz kwarki t i b. Schematycznie wszystkie trzy rodziny przedstawiono na rys. 1. Nie jest to jednak koniec kategoryzacji: każdy kwark występuje w trzech rodzajach zwanych kolorem i, na koniec, każda cząstka materii ma swoją antycząstkę.

### Lagranżjan

Teorie opisujące cząstki elementarne są definiowane przez lagranżjan – wzór, który określa, jakie cząstki występują w przyrodzie, jakie są ich podstawowe własności, jaki ładunek elektryczny, spin czy masa oraz jakim oddziaływaniom (czyli rodzajom sił) podlegają te cząstki. **Na podstawie lagranżjanu mogą być obliczone w zasadzie<sup>3</sup> wszystkie przewidywania dotyczące świata cząstek elementarnych, takie jak czasy życia cząstek, które podlegają rozpadom, czy prawdopodobieństwo produkcji jednych cząstek w zderzeniach innych cząstek.** Cała skomplikowana struktura MS jest zawarta w jego lagranżjanie, a sam lagranżjan jest w dużej mierze wyznaczony przez własność określaną jako *symetrie lagranżjanu*. W dużym uproszczeniu pisanie lagranżjanu, który ma za zadanie opisywać zjawiska w domenie cząstek elementarnych, polega na tym, że postuluje się, jakie cząstki



Rys. 2. Wizualizacja zderzenia zarejestrowanego 30 kwietnia 1983 r. podczas eksperymentu UA1. Dwa proste białe tory, wychodzące ze środka rysunku, przedstawiają tor mionu i antymionu pochodzących z rozpadu bozonu  $Z^0$

Źródło: CERN

materii w nim występują, a następnie wymagamy, by cały lagranżjan był niezmienniczy ze względu na pewne symetrie, czyli nie zmieniał się przy transformacjach zmiennych opisujących cząstki. O co tu tak naprawdę chodzi, pokażę na prostym przykładzie. Wyobraźmy sobie, że mamy jedną cząstkę opisywaną przez zmienną  $x$ . Chcemy teraz napisać wzór, który ma być niezmienniczy przy transformacji  $x \rightarrow -x$ . Jakie wyrażenia zawierające  $x$  mogą występować w naszym wzorze? Nie może to być np.  $3x + 5$ , ponieważ po zamianie  $x \rightarrow -x$  otrzymamy  $-3x + 5$ , ale za to wzór  $3x^2 + 5$  jest już dopuszczalny, ponieważ po zamianie  $x \rightarrow -x$  mamy:

$$3(-x)^2 + 5 = 3x^2 + 5.$$

Wniosek jest więc taki, że jeśli chcemy, by nasz wzór był niezmienniczy ze względu na symetrię  $x \rightarrow -x$ , to może zawierać tylko parzyste potęgi  $x$ . Funkcje opisujące

cząstki są dużo bardziej skomplikowanymi tworamii matematycznymi niż zmienne typu  $x$ , tak samo sam lagranżjan jest dużo bardziej skomplikowanym wzorem niż  $3x + 5$ , ale zasada jest ta sama: lagranżjan zawiera tylko takie wyrażenia, które są dopuszczone przez symetrię.

### Weryfikacja teorii: bozony W i Z

Symetrie określonego wzoru wydają się czymś bardzo abstrakcyjnym, ale historia fizyki wysokich energii pokazuje, że tak nie jest. Postulat, by lagranżjan był niezmienniczy ze względu na symetrie nazywane<sup>4</sup>  $SU(2) \times U(1)$ , prowadził do przewidywania istnienia cząstek  $W^+$ ,  $W^-$ ,  $Z^0$ : do lagranżjanu trzeba było dopisać dodatkowe wyrażenia, które zawierałyby definicje tych cząstek, by był on niezmienniczy ze względu na symetrię  $SU(2) \times U(1)$ .

Cząstki  $W^+$  i  $W^-$  i  $Z^0$  zaobserwowano doświadczalnie w laborato-

<sup>3</sup> Niestety jest wiele wielkości, o których wiadomo, że są określone przez postać lagranżjanu, ale są zbyt trudne do obliczenia. Do takich wielkości należą np. masy cząstek złożonych z kwarków. Nie jest to jednak sytuacja szczególna w fizyce. Mechanika klasyczna jest dobrze znaną teorią, o której uczymy się też w szkole, a nadal jest wiele problemów, które nie dają się rozwiązać przy obecnym stanie wiedzy matematycznej. W takich sytuacjach, podobnie jak w przypadku obliczeń w zakresie cząstek elementarnych, stosuje się często przybliżone metody wykorzystujące komputery.

<sup>4</sup> Nazwa  $SU(2) \times U(1)$  zawiera definicję transformacji. Na przykład  $SU(2)$  oznacza, że transformacja jest wykonywana przez mnożenie odpowiednich elementów lagranżjanu przez pewną specjalną dwuwymiarową macierz. Opisywana wcześniej transformacja  $x \rightarrow -x$  nazywa się  $Z_2$ .

rium CERN w Szwajcarii w 1983 r. Na rys. 2 przedstawiono pierwszy przypadek produkcji bozonu  $Z^0$  zarejestrowany 30 kwietnia 1983 r. podczas eksperymentu o nazwie UA1. Masy<sup>5</sup> cząstek W i Z wyznaczone w tych i późniejszych doświadczeniach wynoszą około  $100 \text{ GeV}/c^2$  i to jest pewien problem. Otóż symetrie  $SU(2) \times U(1)$  nie pozwalają na dopisanie do lagranżjanu wyrażenia opisujących masy bozonów W i Z. W tej sytuacji może się wydawać, że wyniki eksperymentów wskazują, że symetria  $SU(2) \times U(1)$ , a być może i cała metoda lagranżjanu nie jest dobra do opisu rzeczywistości, ale może to również oznaczać, że czegoś w nim brakuje. Może istnieją jakieś nowe cząstki, które pozwalają „wygenerować” masę bozonów W i Z? Fakt, że wiele procesów fizycznych jest bardzo dobrze opisywanych przez lagranżjan Modelu Standardowego, oraz odkrycie cząstek W i Z wskazują, że należy raczej coś do niego dopisać, niż wymyślać wszystko od nowa. Tym dodatkowym elementem jest właśnie bozon Higgsa.

### Mechanizm Higgsa

W jaki sposób obecność bozonu Higgsa w lagranżjanie pozwala na dopisanie wyrażenia opisujących masę bozonów W i Z? Wróćmy do przykładu z symetrią  $x \rightarrow -x$  i założmy teraz, że obecność wyrazu  $3x$  oznacza, że cząstka opisywana przez zmienną  $x$  ma masę 3 w jakichś jednostkach. Stwierdziliśmy jednak, że symetria  $x \rightarrow -x$  nie pozwala na występowanie wyrazów z nieparzystymi potęgami, więc aby dopisać ten wyraz do naszego wzoru, musimy go jakoś rozwinąć. Rozwinięcie to polega na tym, że postulujemy istnienie nowej cząstki opisywanej przez zmienną  $y$ , która podlega transformacji jednocześnie ze zmienną  $x$ : kiedy zamieniamy  $x \rightarrow -x$ , to jedno-

nocześnie musimy dokonać zamiany  $y \rightarrow -y$ . Mając teraz dwie cząstki do dyspozycji, możemy dopisać do naszego wzoru dodatkowe wyrażenia, które nie będą łamały naszej symetrii, w szczególności wyraz  $x \cdot y$  nie łamie symetrii, ponieważ po transformacji zmiennych otrzymujemy:

$$x \cdot y \rightarrow (-x) \cdot (-y) = x \cdot y.$$

Mamy więc już wyrażenie ze zmienną  $x$  w pierwszej potędze, ale gdzie jest masa? W przypadku „zwykłych” cząstek wartością minimalną zmiennej, która je opisuje, jest 0. Co się stanie, gdy założymy, że dla cząstki Higgsa wartość minimalna jest różna od 0 (oznaczmy ją  $y_0$ )? Możemy wtedy opisać obserwowalne cząstki, używając nowej zmiennej, nazwijmy ją  $y^{\text{obs}}$ , pokazującej różnicę względem minimum (to minimum nazywa się stanem próżni):

$$y = y^{\text{obs}} + y_0.$$

Wstawiając to do naszego wzoru, otrzymujemy:

$$\begin{aligned} x \cdot y &= x \cdot (y^{\text{obs}} + y_0) = \\ &= x \cdot y^{\text{obs}} + x \cdot y_0. \end{aligned}$$

Po tej operacji mamy w naszym uproszczonym lagranżjanie dwa wyrazy zamiast jednego:  $x \cdot y^{\text{obs}}$  opisuje oddziaływanie cząstki  $x$  z cząstką  $y$ , a  $x \cdot y_0$  opisuje masę cząstki  $x$  wynoszącą  $y_0$ . Tak długo, jak zakładamy, że  $y_0 = 0$ , co ma miejsce dla „zwykłych” cząstek, nasz lagranżjan pozostaje niezmienny czy ze względu na symetrie, które wybraliśmy. Ale kiedy doświadczenie wskaże jakąś wartość  $y_0$  różną od zera (w naszym przykładzie będzie to wartość  $y_0 = 3$ ), czyli masę cząstki  $x$ , symetria naszego lagranżjanu zostaje spontanicznie złamana. Bozon Higgsa jest właśnie taką cząstką dopisaną do Modelu Standardowego, która pozwala na obecność „członów masowych”

dla bozonów W i Z w lagranżjanie MS. Istotne jest to, że bozon Higgsa jest wpisany w strukturę Modelu Standardowego dokładnie wyznaczoną przez jego symetrie, co oznacza, że większość jego własności jest ustalona, włączając w to fakt, że bozon Higgsa „nadaje” masę także cząstkom materii: leptonom i kwarkom. Jedynym nieznanym parametrem jest masa bozonu Higgsa, wszystko inne można obliczyć, znając zmierzone wcześniej masy innych cząstek.

**W tym miejscu historia się powtarza, podobnie jak to było w przypadku bozonów W, Z: na podstawie pewnych abstrakcyjnych rozważań matematycznych dochodzimy do wniosku, że w przyrodzie istnieje coś, czego do tej pory nie widzieliśmy, czyli bozon Higgsa. By sprawdzić tę hipotezę, planujemy i przeprowadzamy eksperymenty mające na celu produkcję i obserwację tego nowego obiektu.**

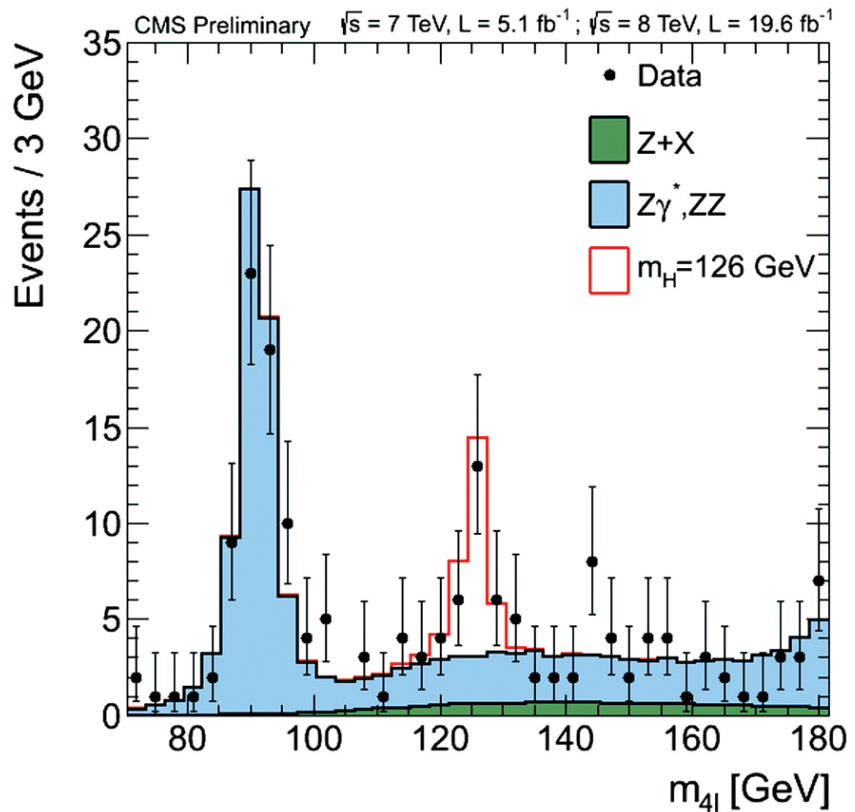
### Weryfikacja teorii: bozon Higgsa

Poszukiwania bozonu Higgsa były prowadzone podczas wielu eksperymentów. Bozonu Higgsa szukano w zderzeniach elektronów i antyelektronów (pozytonów) o energii zderzeń  $200 \text{ GeV}$ , przeprowadzanych w zderzaczu LEP w laboratorium CERN w Genewie do 2000 r. Nie zaobserwowano tam cząstki Higgsa, można było więc stwierdzić, że jego masa była za duża, by można było go wyprodukować w tych zderzeniach. Z tego okresu pochodziła dolna granica masy bozonu Higgsa, która wynosiła  $114,4 \text{ GeV}/c^2$ . Po eksperymentach badających w CERN zderzenia elektron – pozyton poszukiwano bozonu Higgsa w zderzeniach proton – antyproton o energii  $1900 \text{ GeV}$  w zderzaczu Tevatron w laboratorium Fermilab w Stanach Zjednoczonych. Eksperymenty te prowadzone były przez około 10

<sup>5</sup> W fizyce cząstek elementarnych jako jednostki energii używa się elektronowolta:  $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$  i jego wielokrotności, np.  $10^9 \text{ eV} = 1 \text{ GeV}$ . Jako jednostki masy, zgodnie ze wzorem Einsteina, używa się jednostek energii podzielonych przez prędkość światła do kwadratu, czyli np.  $\text{GeV}/c^2$ .

lat, a zakończyły się 30 września 2011 r. Niestety i tym razem nie zaobserwowano cząstki Higgsa. Można było jedynie stwierdzić, że jeśli cząstka Higgsa istnieje, to jej masa jest poza zakresem  $147 < m_H < 179 \text{ GeV}/c^2$ . Ostatni etap poszukiwań bozonu Higgsa miał miejsce w CERN przy użyciu Wielkiego Zderzacza Hadronów. Zderzenia proton – proton przy energiach 7000 GeV w 2011 r. i 8000 GeV w 2012 r. były rejestrowane m.in. przez detektory ATLAS i CMS, które zbudowano do poszukiwania nowych cząstek, w tym bozonu Higgsa. Po skrupulatnej analizie danych zebranych podczas tych eksperymentów okazało się, że istnieje nieznaną wcześniej cząstka o masie około  $125 \text{ GeV}/c^2$ . Analiza własności nowej cząstki wykazała zgodność w ramach niepewności pomiarowej z własnościami oczekiwany dla bozonu Higgsa.

Na rys. 3 przedstawiono wyniki poszukiwań bozonu Higgsa w ramach eksperymentu CMS. Rysunek obrazuje wynik analizy przypadków zderzeń proton – proton, w których zaobserwowano cztery leptony, a dokładniej pary: elektron – antyelektron lub mion – antymion. Dla każdego takiego przypadku obliczono masę (oznaczoną skrótem  $m_{4l}$ ) cząstki, z której te leptony mogły powstać. Na rysunku wykreślono liczbę przypadków, w których ta masa mieściła się w kolejnych przedziałach o szerokości  $3 \text{ GeV}/c^2$ , czyli 100–103, 103–106 itd. Obecność cząstki, która może rozpaść się na cztery leptony, widać na takim wykresie jako



Rys. 3. Wyniki poszukiwań bozonu Higgsa w ramach eksperymentu CMS. Czerwona linia pokazuje przewidywania wyniku w obecności bozonu Higgsa, czarne punkty pokazują wynik eksperymentu

Źródło: CERN/CMS

„górkę” w okolicy  $m_{4l}$  równej masie tej cząstki. Z rozważań teoretycznych wiadomo było, że bozon Higgsa może się rozpaść na cztery leptony, dlatego też analizowano ten „kanał rozpadu”. Czerwona linia pokazuje przewidywania przy założeniu, że bozon Higgsa istnieje i ma masę równą  $126 \text{ GeV}/c^2$ , a czarne punkty pokazują wynik rzeczywistego eksperymentu. Jak widać, przewidywania są zgodne z wynikami doświadczenia.

**Poszukiwania bozonu Higgsa w tym kanale rozpadu, a także**

**w wielu innych dają zgodne rezultaty. Wyniki badań pokrywają się również z wynikami uzyskanymi podczas dwóch niezależnych eksperymentów: ATLAS i CMS. Na tej podstawie fizycy cząstek elementarnych mogli ogłosić, że odkryto bozon Higgsa poszukiwany od lat 70. XX w. Od tego momentu istnienie wszystkich cząstek występujących w Modelu Standardowym zostało doświadczalnie potwierdzone.**

Artur Kalinowski  
Wydział Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego

## Astronomia w programach szkolnych

Przełot dużego bolidu w pobliżu Czelabińska 15 lutego ubiegłego roku był głównym tematem w niemal wszystkich czasopismach. W telewizji, w programach radiowych i notatkach prasowych cytowano wypowiedzi naocznych świadków tego zdarzenia, a wielu tzw. przypadkowych przechodniów komentowało to zjawisko.

Niestety, w większości przypadków odpowiedzi udzielane przez te osoby ujawniały brak podstawowej wiedzy o istocie samego zjawiska, nie wspominając już o powszechnym myleniu terminów: *planetoida (asteroida) – meteoroid – meteor – bolid – meteoryt*.

Brak zrozumienia elementarnych zjawisk astronomicznych (a także fizycznych) jest w naszym społeczeństwie zjawiskiem powszechnym. Nawet spora część niedawnych maturzystów rozpoczynających studia nie rozumie i nie potrafi wytłumaczyć podstawowych zjawisk w otaczającym nas świecie.