

MT: Panie Tomku! Cały miesiąc wyczekiwałam tej rozmowy. Obiecał Pan powiedzieć, skąd się wziął najślawniejszy wzór fizyki i dlaczego mówienie, że wynika on z teorii względności, jest małym nieporozumieniem.

TS: Tak. Spodziewałem się takiej reakcji. Rzeczywiście, kiedy pyta się postronnych ludzi, skąd się wzór $E=mc^2$ bierze, to odpowiedź jest niemal zawsze taka sama – z teorii względności Einsteina. A jak się pyta, co on oznacza, to prawie każdy odpowiada, że masa i energia są równoważne, tzn. jedno może się zamieniać w drugie i odwrotnie. Dodatkowo od razu pojawia się informacja o bombie atomowej. Że to Albert Einstein przewidział jej istnienie. Każde z tych twierdzeń jest półprawdą, z którą czas najwyższy po ponad 100 latach w końcu się rozprawi!

MT: Całkowicie mnie Pan teraz zaskoczył. Może zacznijmy od początku. Skoro nie wynika to z teorii względności to skąd się bierze?



Z zamilowania zajmuje się popularyzacją nauki. W roku 2005 był nominowany do nagrody w konkursie Popularyzator Nauki organizowanym przez Ministerstwo Nauki i Informatyzacji oraz Polską Agencję Prasową.

Wyjaśnić udziela **Tomasz Sowiński**.

W 2005 roku skończył z wyróżnieniem studia na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego w zakresie fizyki teoretycznej. Obecnie jest asystentem w Centrum Fizyki Teoretycznej PAN.

Co to właściwie znaczy, że $E=mc^2$?

TS: Jak już sobie powiedzieliśmy, teoria względności to zbiór zasad, jakim powinny podlegać wszelkie zjawiska w przyrodzie. Mówi ona, jak należy rozumieć takie pojęcia, jak równoczesność, wpływ czasu, pomiar długości. Mówi również, jak te pojęcia są różne dla różnych obserwatorów i podaje jednoznaczny przepis, jak można je tłumaczyć od jednego obserwatora do drugiego. Nie mówi natomiast nic o samych zjawiskach fizycznych. Nie mówi o tym, czy dane zjawisko zachodzi, czy nie. A wzór $E=mc^2$ jest związany z całą klasą zjawisk, które na potrzeby tego artykułu nazwiemy oddziaływaniami.

MT: Czy pod tym terminem mam rozumieć powszechnie stosowane znaczenie?

TS: Tak. Oddziaływanie należy rozumieć jako wpływanie jednych obiektów na inne. Bardzo ważne jest, aby tutaj podkreślić, że oddziaływanie jest jedynym sposobem detekcji obiektów. Jeśli istnieje ciało, które nie oddziałuje z żadnymi innymi, to jest niewykrywalne. Bo jedynym sposobem wykrycia jakiegos ciała jest zbadanie jego wpływu na naszą rzeczywistość. Z punktu widzenia nauk przyrodniczych sensowne jest zatem zajmowanie się tylko takimi obiektami, które z czymś oddziałują. Bo tylko takie możemy badać w eksperymentach.



MT: Rozumiem. Zatem oprócz zasad teorii względności potrzebne jest oddziaływanie.

TS: Oddziaływanie, które oczywiście nie może gwałcić praw teorii względności. Ono musi podlegać tym restrykcjom, o których mówiliśmy wcześniej.

MT: Jakie to mogą być oddziaływania?

TS: Najpowszechniejszymi takimi oddziaływaniami w naszym ludzkim świecie są oddziaływania elektromagnetyczne. Mało kto zdaje sobie z tego sprawę, ale sam fakt, że czytelnik będzie czytał ten artykuł, jest wynikiem oddziaływania elektromagnetycznego. To, że gazetę mogę trzymać w ręku, to, że siedzimy teraz na krzesłach, a nawet to, że się widzimy, jest przejawem różnych oddziaływań elektromagnetycznych. Każde oddziaływanie elektromagnetyczne jest przenoszone za pomocą fal elektromagnetycznych o różnej długości. I tu docho- dzimy do sedna sprawy...

MT: Słucham? Jaki może być związek tego, że siedzę na krześle ze słynnym wzorem Einsteina? Znow Pan mnie wpuszcza w maliny?

TS: Ależ skąd! Sama Pani zaraz na to wpadnie. Jakie fale elektromagnetyczne są najbardziej znane? Mówiliśmy już o tym dokładnie pół roku temu, przy omawianiu praw Maxwella (MT 04/06).

MT: Światło widzialne. Pamiętam! Mówił Pan, że było to wielkim zaskoczeniem dla Maxwella, że prędkość rozchodzenia się fal elektromagnetycznych była równa zmierzonej wcześniej prędkości światła. Okazało się, że światło to po prostu fala elektromagnetyczna.



TS: Jest coś jeszcze o świetle, co sprawiło, że powstała teoria względności. Pamięta Pani?

MT: Oczywiście. Doświadczenie Michelsona-Morleya, którego wynik stał się postulatem teorii względności.

TS: To jest bardzo cenna dla nas informacja. Bo tym sposobem załatwiamy warunek, jaki musi spełniać oddziaływanie, abyśmy uznali je za fizycznie dopuszczalne. Chodzi o zgodność z teorią względności. Oddziaływanie elektromagnetyczne w oczywisty sposób jest zgodne z teorią względności, bo było fundamentem, na którym ona powstała.

MT: Dobrze. Ale jaki to ma związek ze wzorem Einsteina? Na razie widzę tylko związek z teorią względności. Ale o tym już tyle mówiliśmy...

TS: Otóż, gdy Albert Einstein zdał sobie sprawę, że to oddziaływanie nie gwałci teorii względności, postanowił sprawdzić, do jakich konsekwencji prowadzą jego własności znane już od XIX wieku. I tu przyszło wielkie zaskoczenie.

MT: Chwileczkę. Skoro coś wiadomo od XIX wieku, to dlaczego dopiero w XX wieku miało jakieś konsekwencje?

TS: Otóż potrzebne było świeże spojrzenie na naturę światła. Do czasów Maxwella uważano, że światło to jakiś taki dziwny byt, który istnieje, ale nie wiadomo było, co to tak naprawdę jest. Później dopiero rozumiano, czym jest pole elektromagnetyczne i przewidziano jego bardzo ciekawe własności. Udało się te własności potwierdzić w eksperymentach, a było to bardzo zaskakujące.

MT: Hm... np. co było zaskakujące?

TS: Pole elektromagnetyczne, rozchodząc się w przestrzeni, przenosi energię. Jest to dziś dla nas całkowicie naturalne. Wiemy przecież, że pod wpływem światła różne rzeczy można podgrzać. Wiemy też, że fale elektromagnetyczne są wykorzystywane przy przesyłaniu informacji. A przesyłanie informacji to przecież nic innego, jak przekazywanie określonych porcji energii. Ale okazuje się, że oprócz energii promieniowania elektromagnetyczne przenosi również PĘD.

MT: Słucham? Chce Pan powiedzieć, że ...

TS: Chcę powiedzieć, że promieniowanie przenosi pęd. Tzn. jak światło pada na jakąś powierzchnię, to naciska na nią z pewną siłą.

MT: Niemożliwe! Czy to da się jakoś sprawdzić?

TS: Oczywiście. Wystarczy wykonać bardzo wyrafinowany eksperyment. Aby go zrozumieć, należy zauważyć, że jeśli siła ta rzeczywiście istnieje (tzn. rzeczywiście promieniowanie przenosi PĘD), to musi ona zależeć od tego, czy promieniowanie się odbija od powierzchni, czy jest przez tę powierzchnię pochłaniane. Dla uproszczenia przyjmijmy, że światło puszczaemy zawsze prostopadle do powierzchni. Wtedy jeśli promieniowanie się odbija, to siła ta będzie dwa razy większa niż w przypadku, gdy promieniowanie jest pochłaniane. Można zatem zrobić np. wiatraczek, którego skrzydełka z jednej strony będą białe, a z drugiej czarne. Jak się poświeci na ten wiatraczek światłem, to w skutek różnicy sił działających na strony o różnych kolorach zacznie się on obracać.

MT: Ale właściwie dlaczego te siły są różne? Daje się to jakoś wytłumaczyć?

TS: Oczywiście, że się daje. Jest to skutek działania powszechnie znanej w fizyce ZASADY ZACHOWANIA PĘDU. Otóż pęd jest taką wielkością fizyczną, która nie może się zmieniać, a jedynie przepływać z jednego obiektu do innego. Podobnie jest z energią.

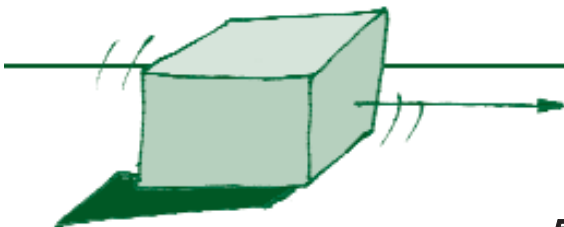
Podczas padania promieniowania prostopadle na powierzchnię odbłaskową światło zmienia swój pęd na przeciwny. Zatem jeśli na początku miało pęd p , to po odbiciu będzie miało pęd $-p$. Zatem zgodnie z zasadą zachowania pędu powierzchni został przekazany pęd $2p$. Bo tylko tak można zapewnić, że sumaryczny pęd przed odbiciem i tuż po nim będzie dokładnie taki sam. Na początku pęd powierzchni był równy 0, a pęd światła p . Czyli w sumie p . Po odbiciu pęd powierzchni wynosi $2p$, a pęd światła $-p$. Czyli w sumie również p .

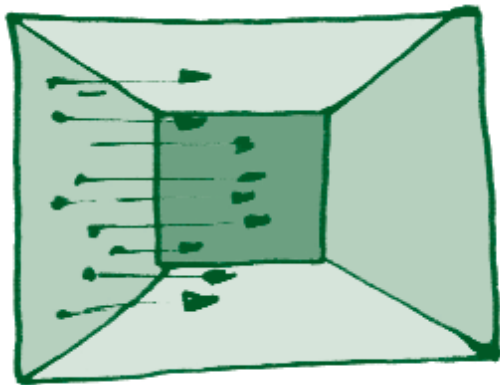
MT: A jak będzie w przypadku powierzchni pochłaniającej?

TS: Jak światło pada na powierzchnię pochłaniającą, to przekazuje po prostu cały swój pęd tej powierzchni. Zatem przed uderzeniem światło miało pęd p , a powierzchnia pęd 0. Po uderzeniu światła w ogóle już nie ma, a zatem pęd płytki musi być równy p . Tylko wtedy bowiem będzie spełniona zasada zachowania pędu. Zatem w tym przypadku przekaz pędu płytce będzie dwa razy mniejszy!

MT: Rozumiem. A pęd ma pewnie związek z siłą.

TS: Tak. Naukowo mówi się, że siła to zmiana pędu w jednostce czasu. Czyli siła jest miarą tego, jak szybko zmienia się pęd (w tym przypadku pęd płytki)





w czasie. A skoro przekaz pędu jest dwa razy mniejszy w drugim przypadku, to również siła będzie dwa razy mniejsza.

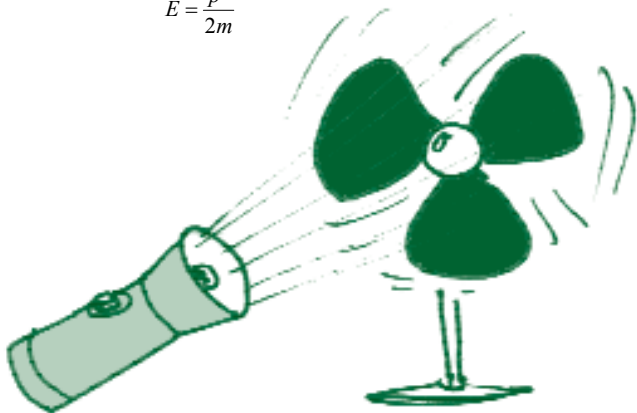
MT: Czy rzeczywiście da się zrobić taki eksperyment z wiatraczkiem? Nie wierzę!

TS: Nie trzeba wierzyć. Wystarczy zobaczyć. Ja po raz pierwszy widziałem taki wiatraczek, jak miałem 15 lat. Byłem wtedy pierwszy raz w życiu na obozie naukowym. Podczas tego obozu była wycieczka do planetarium w Chorzwowie. Tam jest taki wiatraczek i stoi tam do dzisiaj. Kiedy to zobaczyłem, nie byłem w stanie uwierzyć, że coś takiego można zrobić. Wtedy postanowiłem, że kiedyś będę fizykiem. Pewnie takich wiatraczków jest wiele w różnych miejscach. Na pewno kiedyś będzie również w powstającym w Warszawie Centrum Nauki KOPERNIK.

MT: No dobrze, ale chyba troszkę odbiegliśmy od tematu.

TS: Ależ skąd. Wzór $E=mc^2$ (choć nadal jeszcze nie powiedzieliśmy, co on oznacza) wynika właściwie z faktu, że promieniowanie elektromagnetyczne przenosi energię i pęd. Co ciekawsze, jest tak, że wielkości te są do siebie proporcjonalne. Tzn. jak pęd promieniowania wzrośnie dwukrotnie, to niesiona przez nie energia również wzrośnie dwukrotnie. W przypadku zwykłej materii jest inaczej. Np. w przybliżeniu małych prędkości (tzn. gdy prędkość ciała jest mała i można stosować teorię Galileusza) zależność energii kinetycznej od pędu dana jest wzorem:

$$E = \frac{p^2}{2m}$$



Tzn. energia ciała jest proporcjonalna do kwadratu jego pędu. Jeśli pęd ciała wzrośnie dwukrotnie, to jego energia kinetyczna wzrośnie aż cztery razy!

MT: Rozumiem. Zatem światło zachowuje się inaczej niż zwykłe ciała.

TS: Tak, ale to nie jest nic dziwnego. Światło to nie jest zwykła materia. To jest promieniowanie. Np. wiemy, że rozchodzi się z prędkością światła dla każdego obserwatora i nie można go zatrzymać. W przeciwieństwie do zwykłej materii może natomiast zostać zamienione na inny rodzaj energii, np. energię cieplną. Zwykłej materii nie można od tak sobie zniszczyć.

MT: No tak. Ale wciąż nie widzę związku ze słynnym wzorem.

TS: I to mnie wcale nie dziwi. Wszystko, co sobie powiedzieliśmy do tej pory, było znane od początku XX wieku. Aby wyciągnąć niesamowity wniosek z tych puzzli, znów trzeba było wielkiego umysłu. Potrzeba było specjalisty od eksperymentów myślowych. Jakiś kandydat?

MT: Oczywiście Albert Einstein. Już słucham z niecierpliwością.

TS: Wyobraźmy sobie zamknięte, szczęśliwe, czarne wewnątrz pudełko. W środku zupełnie puste. Pudełko jest odizolowane od otoczenia, tzn. nie działają na nie żadne zewnętrzne siły.

MT: Ale po co komuś puste pudełko? Co ten Einstein nie wymyśli...

W pewnym momencie, na skutek zachodzących pewnych zjawisk (np. reakcji chemicznych), na jednej ze ścianek tego pudełka zostaje wyemitowane i wysłane do przeciwległej ścianki promieniowanie elektromagnetyczne (np. światło). Ponieważ pudełko jest puste w środku, to światło dociera do przeciwległej ścianki, która jest czarna i zostaje pochłonięte.

MT: Rozumiem. I co się dzieje dalej?

TS: Nic. Koniec eksperymentu. Z tego wynika, że $E=mc^2$.

MT: Ha, ha, ha... Dobry dowcip. No niech Pan powie, co się dzieje dalej.

TS: Naprawdę nic się nie dzieje. Z tego naprawdę wynika słynny wzór Einsteina.

MT: No dobrze. To niech Pan mi to wytłumaczy, bo jestem w zupełnym lesie. Znam Pana już od pół roku, ale tego się nie spodziewałam.

TS: Przeprowadźmy najpierw inny eksperyment myślowy, który można byloby sprawdzić. Np. na deskorolce. Krzyś stoi na jednym jej końcu i w pewnym momencie skacze w ten sposób, aby wylądować na drugim jej końcu. Co się stanie? Otóż, ponieważ na ten układ fizyczny (deskorolka + Krzyś) nie działają żadne zewnętrzne siły (a ściśle mówiąc – równoważą się one), to jego środek masy nie może się przesuwać. Jedynie, co się stanie, to Krzyś znajdzie się na drugim końcu deskorolki, która się troszkę przesunie w przeciwnym kierunku. Wszystko stanie się tak, aby środek masy tego układu się nie przesuwał.

MT: Hm... Dlaczego?

TS: Jest to spowodowane zasadą zachowania pędu. Na początku, gdy Krzyś stoi na deskorolce, całkowity pęd układu wynosi 0. Gdy Krzyś podskoczy do przodu, będzie miał pewien pęd skierowany do przodu. Zatem, aby była spełniona zasada zachowania pędu i całkowity pęd układu był równy 0, deskorolka musi mieć w tym czasie dokładnie taki sam pęd, ale skiero-

wany do tyłu. Będzie się zatem cofała. Po wylądowaniu Krzysia na drugim końcu znów i Krzys, i deskorolka będą stały w miejscu. Jak się dokładnie to przeanalizuje i przeliczy, to się okaże, że po eksperymencie Krzys jest po drugiej stronie deskorolki, a ona przesunęła się w tył dokładnie o tyle, aby środek masy całego układu się nie przesunął.

MT: Rozumiem. W pudełku Einsteina będzie tak samo?

TS: Zasada zachowania pędu obowiązuje zawsze. Ścianka, emitując promieniowanie elektromagnetyczne w jakimś kierunku, musi zacząć poruszać się (razem z całym pudełkiem) w przeciwnym. Tak aby sumaryczny pęd promieniowania i pudełka był równy 0. Po dotarciu promieniowania do drugiego końca pęd promieniowania zatrzyma pudełko. Na początku (przed emisją) nie było promieniowania i teraz (po pochłonięciu) też nie ma promieniowania. Jest tylko pudełko, które się przesunęło.

MT: No dobrze. Przesunęło się, ale co z tego. Pan mnie zwodzi na manowce.

TS: Ależ skądże. Pomyślmy, co powie osoba, która widzi tylko pudełko, a nie widzi, co się dzieje w środku. Widzi, że pudełko stoi i nie działają na nie żadne siły. Nagle to pudełko zaczyna poruszać się w jedną stronę, a później zatrzymuje. Jeśli taka osoba jest fizykiem, która nie zna eksperymentu Einsteina i nie wierzy w siły nadprzyrodzone, to natychmiast będzie umiała to wytłumaczyć tylko w jeden sposób. Po-

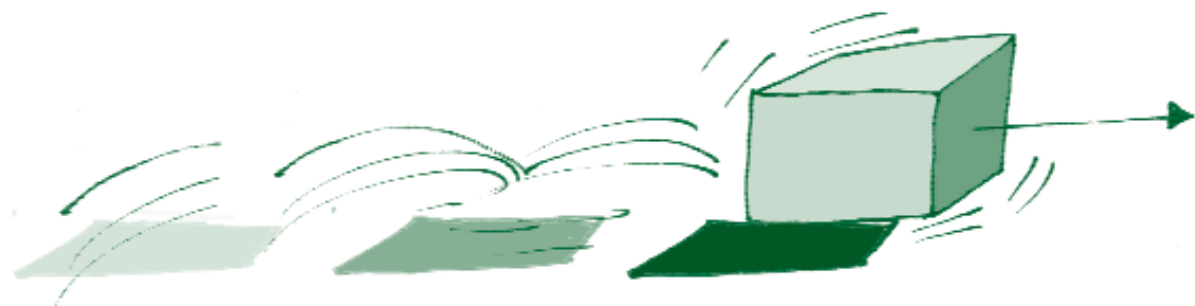


to sytuacja taka jest całkowicie nierozróżnialna (dla zewnętrznego obserwatora) od takiej sytuacji, w której z jednego końca na drugi przesunęła się masa m , jeśli tylko spełniony jest związek:

$$E=mc^2,$$

gdzie c jest prędkością światła.

MT: Czyli to, czego szukamy? Jak zatem mam rozumieć ten wzór?



wie sobie, że zapewne w środku jest coś (tak jak Krzys na deskorolce), co było po jednej stronie pudełka i nagle odepchnęło się od jego ściany i przesunęło do drugiego końca. Po prostu w pudełku przesunęła się pewna masa z jednego końca na drugi.

MT: Hm... rzeczywiście takie wytłumaczenie jest dobre.

TS: Ale my wiemy, że było zupełnie inaczej. To nie masa się przesunęła, a promieniowanie. To energia przepłynęła z jednego końca na drugi. Wykorzystując fakty, o których mówiliśmy, tzn. że energia promieniowania jest proporcjonalna do jego pędu, że środek masy nie może się przesunąć, jeśli nie ma zewnętrznych sił działających na układ oraz oczywiście zasadę zachowania pędu, można dokładnie wyliczyć, jaka masa musiałaby się przemieścić z jednego końca na drugi tego pudełka, aby obie sytuacje były nierozróżnialne. Okazuje się, że ten związek nie zależy ani od tego, jak to promieniowanie jest wysyłane, ani od tego, jaki kształt ma pudełko. **Związek jest uniwersalny!** Jeśli z jednego końca na drugi przepłynęła energia promieniowania E ,

TS: Właśnie w taki sposób, jak przed chwilą powiedzieliśmy. Masa i energia są ze sobą równoważne w tym sensie, że przemieszczenie masy m z jednego miejsca na drugie jest równoważne, tzn. nierozróżnialne dla zewnętrznego obserwatora, przesunięciu energii E danej wzorem Einsteina.

MT: Rozumiem. To faktycznie zdumiewające... Ten eksperyment Einsteina, wydawałoby się, jest taki banalny. Ale wpaść na niego to istny majstersztyk!

TS: Nie tylko wpaść na taki pomysł, ale jeszcze wyciągnąć z tego tak ciekawe wnioski. Tu naprawdę trzeba dużej odwagi w formułowaniu myśli i dużej intuicji co do tego, jak ten świat działa.

MT: No dobrze. Ale zatem dlaczego mówi się, że ten wzór przyczynił się do budowy atomowej? Czy to ma jakiś związek?

TS: Oczywiście, że ma. Ale wcale nie taki banalny. Bo dopiero, jak Einstein zobaczył ten wzór, to sobie uzmysłowił, że na razie dotyczy on tylko oddziaływań elektromagnetycznych. Ale... a zresztą porozmawiamy o tym następnym razem. Zapraszam! ●