

MT: Dzień dobry, Panie Tomku! Po ostatniej rozmowie muszę się Panu przyznać, że ciężko było mi zasnąć. Myślałam o słynnym $E=mc^2$ i jak do jego odkrycia doszło. Wciąż jestem pod wielkim wrażeniem tego eksperymentu myślowego.

TS: Muszę przyznać, że jak pierwszy raz usłyszałem to rozumowanie, to również byłem bardzo podekscytowany. Myślę, że obok eksperymentu myślowego Galileusza o zjeżdżających kulkach (MT 03/06) jest to jedna z najbardziej fascynujących konstrukcji logicznych, o jakich rozmawialiśmy. Ale jeszcze nie raz opowiemy sobie o równie ciekawych przemysleniach.

MT: Obiecał mi Pan powiedzieć, jaka była droga od tego rozumowania do energii atomowej.

TS: Wydaje mi się, że każdy, kto dobrze zrozumie tamto rozumowanie, od razu wie, jak można je ulepszyć. To właściwie narzuca się samo.

MT: Słucham? Co można ulepszyć w konstrukcji, w której występuje jedynie zamknięte pudełko



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.

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.

Jak masa może się zamieniać w energię i odwrotnie?



i światło przelatujące z jednego końca do drugiego. Proszę mi wyjaśnić.

TS: No to może troszkę Panią naprowadzę. Nie bez powodów wspominałem wcześniej o eksperymencie Galileusza z toczącymi się kulkami. Pamięta Pani, jaki był kluczowy moment eksperymentu?

MT: Pamiętam, że kulki toczyły się po drogach o różnych kształtach, ale zawsze z tej samej wysokości. Chodziło o to, że Galileo zauważył, że niezależnie od kształtu toru kulka na końcu zawsze wracała na tę samą wysokość.

TS: Świetna pamięć! Ale zaraz potem Galileusz zrobił niesamowity krok myślowy – całkowicie zaskakujący. Zadał sobie pytanie, co stałoby się, gdyby droga w pewnym momencie stawiała się prosta i nigdy nie zawracała w górę. Pamięta Pani?

MT: Pamiętam, pamiętam. Z tego wynikało, że na prostym odcinku kulka musi zachowywać swoją prędkość, bo będąc w pewnym miejscu prostego odcinka „musi być przygotowana” na to, że droga może zawrócić.

TS: Tak! I wtedy musi mieć taką prędkość, aby wtoczyć się na wysokość początkową. Gdyby straciła troszkę prędkości na równym odcinku, to nie mogłaby się wtoczyć na górę. A to byłoby sprzeczne z wcześniejszym spostrzeżeniem, że kulka wraca zawsze na tę samą wysokość.

MT: Tak. W ten sposób odkrył I zasadę dynamiki. Ale jaki to ma związek z Einsteinem i jego wzorem? Przecież tu nie ma żadnych kulek, a tym bardziej spadków i wjazdów. Jest tylko pudełko – całe czarne w środku i puste. Dodatkowo odizolowane od otoczenia.





TS: No to przypatrzmy się dokładnie eksperymentowi myślowemu Einsteina. Jest sobie pudełko i w pewnym momencie jedna ścianka emituje promieniowanie w kierunku przeciwległej. Ta druga światło pochłania. I sytuacja jest dokładnie taka sama jak przed wyemitowaniem promieniowania. Z jedną różnicą!

MT: Tak! Pudełko się przesunęło. Było to związane z faktem, że światło przenosi oprócz energii również pęd.



TS: Doskonale! Ale ponieważ pudełko się przesunęło, a zewnętrzny obserwator nie wie, co się dzieje w środku, to może ten fakt wytłumaczyć równie dobrze inaczej. Może powiedzieć, że to nie promieniowanie, ale pewna porcja masy przesunęła się z jednego końca na drugi. Stąd brała się równoważność masy i energii – przeniesienie z jednego miejsca na drugie masy m jest równoważne przeniesieniu energii E , która, jak się okazuje, wynosi mc^2 .

MT: Nic nie rozumiem. Gdzie tu jakiś Galileusz?

TS: Galileusz zauważył, że kulka będąc w danym miejscu na trasie, nie może nic wiedzieć o tym, jak ta trasa dalej będzie wyglądać. W związku z tym w kulce musi być jakoś zakodowana informacja o tym, z jakiej wysokości zjeżdża i jaką prędkość musi mieć, będąc na danym poziomie. Tylko wtedy, niezależnie od kształtu toru, zawsze będzie mogła mieć odpowiednią w danej sytuacji prędkość. Tak aby móc wrócić na wysokość początkową, gdy tylko tor zacznie piąć się w górę. Informacja ta zakodowana jest w energii kulki, która zachowuje się podczas toczenia. Podobnie jest w eksperymencie Einsteina.

MT: Chce Pan powiedzieć, że...

TS: Chcę po prostu powiedzieć, że podobnie jest ze światłem. No bo od razu narzuca się pytanie, co się stanie, jeśli światło nigdy nie trafi na ściankę po dru-

giej stronie pudełka? Albo gdy niespodziewanie ścianka będzie się znajdowała w połowie drogi? Przecież światło nie wie, co je czeka. Podobnie jest w eksperymencie myślowym Galileusza. Tam kulka również nie może się spodziewać, co ją czeka podczas dalszej drogi.

MT: Nie rozumiem.

TS: Pudełko i propagujące się w nim światło są w pewnym sensie obiektami całkowicie niezależnymi. Tylko podczas emisji i pochłaniania ze sobą oddziałują. W pozostałych chwilach nic o sobie nie wiedzą. Zatem jeśli jest tak, że cały proces (od wyemitowania światła, aż po jego pochłonięcie) jest równoważny przemieszczeniu pewnej porcji masy z jednego końca na drugi, to światło musi nieść w pewnym sensie informację, jaką masę przenosi. Przecież może zdarzyć się tak, że pudełko na końcu będzie otwarte, a światło trafi na jakies inne pudełko. Wtedy gdy zostanie tam pochłonięte, to zewnętrzny obserwator będzie mógł powiedzieć, że to po prostu ktoś przeniósł masę z jednego pudełka do drugiego.

MT: Faktycznie musi tak być. To znaczy, że już w momencie emitowania światła ścianka musiała stracić część swojej masy.

TS: Dokładnie tak. Ścianka straciła część swojej masy, która została zamieniona na energię światła, zgodnie ze wzorem $E = mc^2$. W momencie, gdy światło dociera do ścianki pochłaniającej, jego energia zamienia się na masę tej ścianki.

MT: Hm... Bardzo ciekawe. Ale czy to rzeczywiście się tak dzieje?

TS: Wg mnie najlepsze intuicyjne rozumienie tego zjawiska zostało wytłumaczone przez Feynmana – słynnego fizyka, laureata Nagrody Nobla. Feynman przekonywał, że przed emisją energia tak naprawdę ciągle siedzi w pierwszej ściance. Tylko my, patrząc z zewnątrz, nie jesteśmy w stanie odróżnić tej energii od samej ścianki, bo jest ona w niej uwięziona. Dlatego gdy wykonujemy pomiar masy, to tak naprawdę mierzymy masę ścianki wraz z uwięzioną w niej energią. W momencie gdy następuje emisja, światło i ścianka stają się rozróżnialne i tym samym ścianka ma dla nas inną masę niż wcześniej. Teraz bowiem umiemy zmierzyć osobno energię światła, które zostało wyemitowane i masę ścianki.

MT: Czyli energia to tak jakby masa. Dobrze myślę?

TS: Energia jest nieodróżnialna od masy, ale tylko wtedy, gdy jest uwięziona w materii. W momencie gdy energia jest przenoszona przez promieniowanie, to nie jest oczywiście masą tego promieniowania, tylko jego energią. To oznacza, że jeśli dana porcja materii ma zdolność do wyemitowania promieniowania, to musi mieć większą masę, niż taka sama porcja materii, która takiej zdolności nie ma. To jest kluczowe spostrzeżenie, którego nie rozumie większość ludzi. Dlatego to prowadzi do wielu nieporozumień.

MT: Dlaczego?

TS: Otóż powszechnie mówi się, że każdą materię o masie m można zamienić na promieniowanie o energii E zgodnie ze wzorem Einsteina. Zgodnie z tym, co sobie powiedzieliśmy wcześniej, nie jest to prawdą. Materia nie zamienia się w promieniowanie i nie może sobie ot tak zniknąć. Materia może mieć jedynie zdolność do wyemitowania promieniowania i wtedy ma większą masę. Ale nie dlatego ma większą

masę, że tej materii jest więcej, a tylko dlatego, że ma tę zdolność. Jeszcze dobitniej widać to na gruncie współczesnej teorii opisującej zachowanie obiektów w mikroświecie, zwanej mechaniką kwantową, o której już wkrótce sobie troszkę opowiemy. Jeśli np. wyobraźmy sobie dwa atomy wodoru, z których jeden ma zdolność emitowania promieniowania (mówimy, że jest wzbudzony), a drugi nie, to rzeczywiście tak będzie, że ten pierwszy będzie miał większą masę niż drugi. W momencie gdy atom wzbudzony wyemituje promieniowanie, stanie się taki sam jak ten drugi i będzie miał taką samą masę. Proszę zauważyć, że ciągle mieliśmy do czynienia z atomem wodoru, który jedynie był w dwóch różnych stanach – wzbudzonym i niewzbudzonym. Ale zawsze to był ten sam atom wodoru. I nie jest prawdą, że ten atom może sobie zniknąć i zamienić się cały na promieniowanie.

MT: Rozumiem. To rzeczywiście zmienia całkowicie moje myślenie o wzorze Einsteina. Wzór ten faktycznie mówi, że masa i energia są sobie równoważne, ale w bardzo specyficznych i dobrze określonych warunkach. I nic nie mówi o żadnym znikaniu materii.

TS: Brawo! Tak właśnie należy rozumieć ten wzór i trzeba zawsze pamiętać, że zbyt uproszczone tłumaczenie pewnych rzeczy może prowadzić do bardzo wielu nieporozumień. A tego powinniśmy unikać.

MT: No dobrze. Ale tak naprawdę, jaki to ma związek z energią atomową?

TS: Teraz jesteśmy gotowi, aby to wytłumaczyć. Ze szkoły wiemy, że atomy składają się z dodatnio naładowanego jądra i ujemnych elektronów, które krążą wokół niego. Każde jądro atomu składa się z pewnej liczby protonów (cząstek dodatnio naładowanych) i neutronów (cząstek obojętnych), których masa jest bardzo zbliżona. Atomy o takiej samej liczbie protonów w jądrze nazywamy pierwiastkami. Np. wodór ma jeden proton, hel dwa, a tlen aż osiem. Najcięższe pierwiastki mogą zawierać nawet sto kilkadziesiąt protonów. Każdy pierwiastek ma kilka odmian, które nazywamy izotopami. Różne izotopy tego samego pierwiastka różnią się od siebie liczbą neutronów w jądrze. Np. wodór ma trzy izotopy: prot (0 neutronów), deuter (1 neutron) i tryt (2 neutrony).

MT: No tak, to pamiętam ze szkoły.

TS: Skupmy się na chwilkę na wodorze i helu. Najpopularniejszy izotop helu ${}^4\text{He}$ (czyt. hel cztery) ma dwa protony i dwa neutrony w jądrze. Okazuje się, że masa jądra helu, którą można mierzyć pewnymi wyrafinowanymi metodami, jest o ok. 0,7% mniejsza niż sumaryczna masa dwóch swobodnych protonów i dwóch neutronów.

MT: To chyba jakiś żart. Chce mi Pan powiedzieć, że dwa neutrony i dwa protony mają razem większą masę niż jądro helu, które składa się właśnie z dwóch protonów i dwóch neutronów?

TS: Tak, właśnie to chcę powiedzieć. I są na to dowody doświadczalne. Wystarczy wziąć i zmierzyć. Ale nic w tym nas nie powinno dziwić, skoro już wiemy, że ta sama materia może mieć różne masy. Ten obserwacyjny fakt oznacza tylko tyle, że materia, składająca się z dwóch niezwiązanych protonów i dwóch niezwiązanych neutronów przechodząc do stanu związanego jednego jądra helu, ma zdolność do wyemitowania promieniowania. I różnica tych mas jest właśnie równoważna energii wyemitowanego promieniowania podczas takiego połączenia (fizycy mówią syntezy) składników w jądro. Gdyby udało się jakoś doprowadzić do połączenia tych czterech składników w jądro helu, to podczas takiego procesu zostałoby wyemitowane promieniowanie.

MT: Ale czy to w ogóle da się sprawdzić? Czy ktoś to kiedyś w ogóle zrobił, czy to tylko takie gdybanie?

TS: Oczywiście! Jako pierwsza zrobiła to... natura. Taki właśnie proces łączenia protonów i neutronów zachodzi na naszym Słońcu. Dwa protony, czyli jądra wodoru, w skomplikowanym procesie najpierw zamieniają się na neutrony, a później z dwoma innymi protonami łączą się, tworząc jądro helu. W wyniku takiego procesu można powiedzieć, że „znikają” cztery jądra wodoru, a „powstaje” jedno jądro helu i wydziela się energia w postaci promieniowania. Proces ten w swoich szczegółach jest dość skomplikowany i jako pierwszy wytłumaczył go Hans Bethe – fizyk, który w roku 1967 otrzymał za to Nagrodę Nobla.

MT: Chce Pan powiedzieć, że na Słońcu wodór zamienia się w hel i dlatego ono świeci?

TS: Dokładnie to chcę powiedzieć. Na Słońcu w ciągu każdej sekundy 657 milionów ton wodoru zamienia się w 652 miliony ton helu. Ta różnica mas, tzn. 5 milionów ton na sekundę, zamienia się na energię zgodnie ze słynnym wzorem Einsteina. Dzięki temu Słońce jest największą elektrownią termojądrową w tej części Wszechświata. Jego moc to 100 000 000 000 000 000 GW. Dla porównania sumaryczna moc wszystkich elektrowni zbudowanych przez człowieka na świecie to zaledwie 8 000 GW.

MT: Niesamowite, Słońce traci 5 mln ton masy w ciągu każdej sekundy swojego istnienia. Czy to znaczy, że Słońce w końcu zniknie?





TS: Nie! Po prostu w pewnym momencie zabraknie wodoru. W ciągu całego tego okresu, kiedy wodór będzie zamieniał się w hel, Słońce straci zaledwie 0,1% swojej masy. Choć teoretycznie później mogłoby świecić dalej dzięki syntezie helu w kolejne cięższe pierwiastki, to przestanie to robić z innych powodów, o których nie chciałbym teraz wspominać.

MT: Dlaczego zatem w elektrowniach atomowych nie wykorzystuje się wodoru i helu, ale uranu?

TS: Można powiedzieć, że z powodów czysto technicznych. Ale jest również jednak pewna bardzo istotna różnica, która odróżnia obie sytuacje. Jądro uranu zawiera aż 92 protony i w zależności od izotopu sto czterdzieści kilka neutronów. W przypadku wodoru i helu emisja energii następuje w wyniku łączenia jąder lżejszych (wodoru) w cięższe (helu). W przypadku uranu jest odwrotnie. Okazuje się, że jądro uranu ma większą masę niż sumaryczna masa jąder pierwiastków, na które się on rozpada. To znaczy, że uran rozpadając się na mniejsze jądra (a nie łącząc się w większe), powoduje wyemitowanie energii w postaci promieniowania.

MT: Hm... to dziwne. A dlaczego tak jest?

TS: Są ku temu bardzo poważne powody, ale nie chciałbym tu wchodzić w szczegóły, bo nie są one w tym momencie dla nas tak bardzo ważne. Można natomiast powiedzieć tak, że jądra lżejszych pierwiastków zachowują się tak jak wodór – łącząc się, wydzielają energię. Natomiast, żeby je rozbić, trzeba energii dostarczyć. Natomiast jądra cięższe (tak jak uran), gdy się rozpadają na lżejsze, to wydzielają energię. Aby je połączyć, trzeba energii dostarczyć. Jądrem granicznym jest ŻELAZO. Zarówno jądra cięższe, rozpadają się na jądra żelaza, jak i lżejsze, łącząc się w te jądra, powodują wydzielenie się energii. Dlatego jądro żelaza jest bardzo stabilne. Niezależnie od tego, czy chcemy je rozbić na mniejsze, czy złączyć w większe, musimy dostarczyć energii.

MT: Rozumiem. Ale skąd my właściwie wiemy, że istnieją jądra atomowe? Skąd wiemy, że są jakieś protony i neutrony. I że wokół nich krążą elektrony? Ktoś widział kiedyś jądro pierwiastka pod mikroskopem?

TS: To są bardzo ciekawe pytania. Myślę, że przyszedł najwyższy czas, abyśmy wrócili jeszcze raz do początku XX wieku, kiedy rodziła się teoria względności. Tym razem jednak opowiemy sobie, jak się rodziła mechanika kwantowa. Jakie to eksperymenty i rozumowania doprowadziły do jej powstania. A jest dużo do opowiedzenia. Tę fascynującą podróż zaczniemy od następnej rozmowy. Zapraszamy!

MT: Już się nie mogę doczekać! ●



Mini Rynek

Informacji na temat zasad zamieszczania ogłoszeń w tej rubryce udziela dział reklamy: tel. (022) 568 99 95

MUZEUM TECHNIKI

Godziny otwarcia:
Wt.-Pt.: 9.00-17.00
Sb.: 10.00-17.00
Nd.: 10.00-17.00
Pon.: nieczynne

Pałac Kultury i Nauki
pl. Defilad 1, Warszawa

www.muzeum-techniki.waw.pl



ul. Piotrkowska 286, 93-034 Łódź

MODEL FAN

Modele zdalnie kierowane, aparatury, silniki...
Materiały i akcesoria do budowy modeli.
Modele plastikowe, kartonowe, kolejki.
Usługi modelarskie: od projektu do wykonania.
Profesjonalna i fachowa pomoc. **ZAPRASZAMY!**

tel./fax: 042-682-66-29 0-602-610-741
www.model-fan.com.pl modelfan@toya.net.pl

MUZEUM LOTNICTWA W KRAKOWIE



ul. Jana Pawła II 39, Kraków
Godziny otwarcia:
Poniedziałek 9:00 – 17:00
Od wtorku do piątku 9:00 – 17:00
W soboty i niedziele 10:00-16:00
www.muzeumlottnictwa.pl

Broń bez zezwoleń, militaria. Broń pneumatyczna – wiatrówki. Repliki broni palnej air soft gun. Wykrywacze metali. Broń biała. Alkomaty – testery trzeźwości. Akcesoria dla formacji ochron. Artykuły modelarskie.

Sklep militarex.pl

www.militarex.pl

Szczecin, ul. Bat. Chłopskich 96, tel./fax 091 461 34 65

MUZEUM MOTORYZACJI I TECHNIKI

ul. Warszawska 21,
Otrębusy



czynne jest codziennie
w godzinach 10.00-17.00.

www.muzeum-motoryzacji.com.pl

www.modelpartner.ig.pl

MUZEUM KOLEJNICTWA W WARSZAWIE

ul. Towarowa 1 (dawny Dworzec Warszawa Główna), Warszawa
Czynne od wtorku do niedzieli
w godz. 10.30-15.30

www.pkp.pl/muzeum/



Moduły fotowoltaiczne 3-120W/12V
Generatory wiatrowe 60-220W/12V
<http://www.gtb-solaris.pl>
tel./fax (22) 835-64-26, 864-25-36/7
ul. Przytyk 6/31, 01-962 Warszawa