

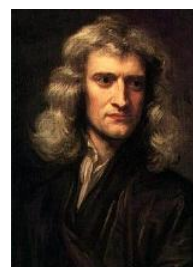
Krótką historia pojęcia energii*

Andrzej Staruszkiewicz
Instytut Fizyki UJ

Przedstawię krótko historię pojęcia energii i powody, dla których to niezwykle użyteczne pojęcie tracimy bezpowrotnie w Ogólnej Teorii Względności, która musi być stosowana do opisu Wszechświata jako całości.

Zarówno słowo „energia” jak i nazwane tym słowem pojęcie pojawiają się stosunkowo późno w ponad trzechsetletniej historii fizyki. O ile pojęcia masy i siły występują w *Principiach* Newtona w całkowicie poprawnym znaczeniu, znaczeniu tożsamym ze znaczeniem współczesnym, o tyle słowa „energia” nie ma w *Principiach*, mimo że twórcy mechaniki, np. Huygens, zdawali sobie sprawę z zachowania całkowitej energii w procesach mechanicznych. W szczególności teoria zegara wahadłowego Huygensa jest *implicite* oparta na całej energii.

Kartezjusz wypowiedział myśl, że w procesach przyrodniczych pewna wielkość powinna być stała w czasie. Za taką uznał iloczyn masy i prędkości, który nazwał „ilością ruchu”. Leibniz wypowiedział taką samą myśl, ale za wielkość stałą w czasie uznał iloczyn masy i kwadratu prędkości, który nazwał „siłą żywą” (*vis viva*). (Czynnik $1/2$ dodano później.) Dało to początek sławetnej debacie o tym, co jest prawdziwą miarą „ilości ruchu”. Kant swoją pierwszą pracę naukową poświęcił właśnie temu problemowi, czym zasłużył sobie na zabawny epigramat niemieckiego poety Lessinga, którego treść jest mniej więcej taka: *Wziąwszy się za problem, który go przerasta, Kant uczy świat jak mierzyć siły żywe, a nie potrafi zmierzyć swoich własnych.*



Isaac Newton
(1643–1727)



Gottfried W. Leibniz
(1646–1716)

* Komentarz do artykułu Tamary M. Davis „Czy Wszechświat gubi energię?” (*Świat Nauki*, sierpień 2010, s. 31–37) wygłoszony na posiedzeniu Komisji Astrofizyki PAU w dniu 17.12.2010 i opublikowany w Pracach Komisji Astrofizyki PAU, Kraków 2011, t. 13, s. 33. Autor [AS] uważa, że opublikowanie tego artykułu jest smutnym świadectwem niskiego poziomu umysłowego ludzi, którzy redagują *Scientific American* i *Świat Nauki*. W całym artykule Tamary M. Davis autor [AS] znalazł tylko jedno zdanie prawdziwe, które brzmi tak: *całkowita energia Wszechświata nie jest ani zachowywana, ani tracona – po prostu nie można jej zdefiniować!*

Redakcja dziękuje profesorowi Kazimierzowi Grotowskiemu za udzielenie pozwolenia na przedruk artykułu.

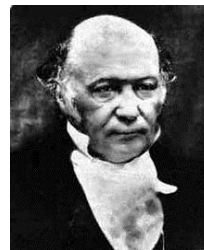
Problem ten rozstrzygnął w połowie XVIII wieku d'Alembert, który uznał, że jest to spór o słowa: obie wielkości są miarami „ilości ruchu” tylko różnymi, tak jak np. wzrost i waga są różnymi miarami wielkości człowieka lub zwierzęcia.

Równolegle do idei stałości w czasie pewnej wielkości kształtowała się idea, że procesy fizyczne odbywają się zgodnie z pewną zasadą najmniejszego oporu. Idea ta też pochodzi od Leibniza, znalazła m.in. wyraz w jego często ośmieszanej tezie, że żyjemy w świecie najlepszym z możliwych. Obecnie wielkość, która jest najmniejsza w ruchu rzeczywistym nazywamy działaniem Hamiltona. Pierwsze matematycznie poprawne sformułowanie zasady najmniejszego działania pochodzi od Eulera, który zresztą wielkodusznie odstąpił część swojej zasługi Prezydentowi Królewskiej Pruskiej Akademii Nauk o nazwisku Maupertuis. Działania Eulera i Maupertuis nie należy mylić z działaniem Hamiltona.

Za twórców współczesnego rozumienia prawa zachowania energii uważa się dość powszechnie Mayera, Helmholtza i Joule'a. Charakterystyczne, że Mayer i Helmholtz byli z wykształcenia lekarzami. Być może to właśnie zwróciło ich uwagę na fakt, że człowiek jest maszyną, która może wykonać pracę mechaniczną, np. wnieść walizkę na IV piętro. Zatem w realnym świecie energia mechaniczna może być zmieniona przez wysiłek mięśni, a więc stała w czasie może być co najwyżej sumą energii mechanicznej i wszystkich pozostałych form energii, np. cieplnej, chemicznej etc. Joule wyznaczył mechaniczny równoważnik ciepła tzn. ilość ciepła, którą można uzyskać z danej ilości energii mechanicznej. Podstawowa praca Helmholtza nosi tytuł *Über die Erhaltung der Kraft*; Helmholtz nazywa energię siłą, mimo że już Newton używał słowa siła we współczesnym znaczeniu. Termin „energia” we współczesnym znaczeniu wprowadzili w drugiej połowie XIX wieku brytyjscy fizycy Rankine, Thomson i Tait.

Maxwell wniósł bardzo ważny wkład określając energię, która jest zawarta w przestrzeni, w której istnieje pole elektromagnetyczne. W ten sposób do poprzednio znanych rodzajów energii doszła niezwykle ważna energia pola.

Na przełomie XIX i XX wieku prawo zachowania energii zaczęło być postrzegane jako najważniejsze prawo całej



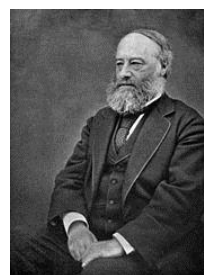
William R. Hamilton
(1805–1865)



Julius R. von Mayer
(1814–1878)



Hermann von
Helmholtz
(1821–1894)



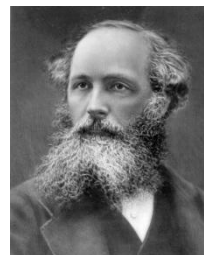
James Prescott Joule
(1818–1889)

fizyki i podstawa naukowego poglądu na świat. Wpływowi uczeni, np. Laureat Nagrody Nobla Wilhelm Ostwald głosili pogląd zwany energetyzmem, według którego celem nauki jest badanie wzajemnych przemian różnych rodzajów energii.

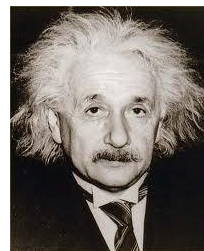
Po tej, z konieczności bardzo krótkiej prehistorii omówię trochę dokładniej trzy wydarzenia kluczowe dla współczesnego rozumienia pojęcia energii.

W roku 1905 powstała Szczególna Teoria Względności Einsteina. Teoria ta jest przykładem „konserwatywnej rewolucji”. Przy całej swojej doniosłości tworzy obraz świata, który tylko nieznacznie różni się od obrazu, który stworzył Newton. Jej znaczenie dla omawianego przez nas pojęcia energii bierze się z dwu okoliczności. Po pierwsze, Szczególna Teoria Względności jest koniecznym wstępem do Ogólnej Teorii Względności, która jest też rewolucją ale nie konserwatywną. Po drugie, energia w mechanice Newtona jest całą pierwszą równań ruchu, a więc z definicji wielkością określoną z dokładnością do dowolnej stałej. Szczególna Teoria Względności znosi tę dowolność; energia jest wielkością absolutną a nie odniesioną do umownie wybranego poziomu. Nie będę komentować znanego wszystkim równania $E = mc^2$, bo równanie to obrosło tak obszerną literaturą pisaną w stylu pani Davis, że wyprostowanie wszystkich głupstw przerasta moje siły i ramy tego wykładu.

Ogólna Teoria Względności ukończona przez Einsteina w roku 1916 zakłada, że przestrzeń i czas zwane razem czasoprzestrzenią stanowią rozmaitość różniczkową o strukturze Riemanna z nieznikającym tensorem Riemanna. To od razu unieważnia znane z mechaniki Newtona i Szczególnej Teorii Względności pojęcie energii całkowitej danego układu fizycznego. Ażeby to zrozumieć, rozpatrzmy zderzenie dwu kul bilardowych, zderzenie na tyle silne, że kule te rozpryskują się na części. Jest to oczywisty klasyczny odpowiednik eksperymentów robionych w Genewie przy użyciu urządzenia zwanego Large Hadron Collider. Podstawowa analiza tego procesu polega na ułożeniu bilansu całkowitego czteropędu. Przed zderzeniem całkowity czteropęd jest sumą wektorową czteropędów obu kul. Kule te są odległe od siebie, a więc musimy dodać do siebie czterowektory zaczepione w różnych punktach czasoprzestrzeni. W Szczególnej Teorii Względności jest to dobrze określona operacja, bo czasoprzestrzeń Szczególnej Teorii Względności jest wyposażona w teleparalelizm tzn. możliwość orzekania równoległości wektorów odległych od siebie. Możemy te wektory sprowadzić równoległe do wspólnego punktu i dodać stosując regułę równoległoboku opisaną jeszcze w *Principiach* Newtona. Tymczasem w czasoprzestrzeni Ogólnej Teorii Względ-



James Clerk Maxwell
(1831–1879)



Albert Einstein
(1879–1955)

ności nie ma teleparalelizmu, co znaczy, że cała procedura układania bilansu czteropędu jest od początku niewykonalna.

Człowiekiem, który chyba pierwszy dostrzegł głębokie konsekwencje odrzucenia teleparalelizmu był wielki matematyk Hilbert. Hilbert zaprosił do siebie do Getyngi matematyczkę Emmy Noether w określonym celu przyjrzenia się pojęciowym konsekwencjom nowej teorii grawitacji. Emmy Noether udowodniła w 1918 r. dwa niezwykle ważne twierdzenia, z których pierwsze stanowi ukoronowanie opisanego wcześniej doskonalenia w ciągu ponad dwu stuleci pojęcia energii. Sformułuję pierwsze twierdzenie Emmy Noether ze wszystkimi koniecznymi szczegółami, żeby nie popadać w pisaninę podobną do tej, która jest demonstrowana w omawianym artykule.

Pierwsze Twierdzenie Emmy Noether: Jeżeli działanie Hamiltona układu fizycznego nie zmienia się, jeżeli układ ten poddać aktywnie rozumianym transformacjom tworzącym jednoparametrową grupę transformacji ciągłych, to istnieje całka pierwsza równań ruchu charakterystyczna dla tej grupy.

Przez transformację ciągłą rozumie się transformację, która może być utworzona w sposób ciągły z jedyńki. Przypominam o tym, bo pani Davis uważa za transformacje ciągle także odbicia lustrzane. Pierwsze twierdzenie Emmy Noether pozwala *określić* pojęcie energii: energia w mechanice Newtona i Szczególnej Teorii Względności jest to całka pierwsza równań ruchu, która istnieje dlatego, że układ fizyczny można przesunąć w czasie nie zmieniając jego działania Hamiltona. Otóż tego przesunięcia nie można dokonać w Ogólnej Teorii Względności, bo nie pozwala na to krzywizna czasoprzestrzeni. Łatwo to zrozumieć na następującym przykładzie: jedną książkę można przesunąć po drugiej, bo okładki obu książek są płaskie. Natomiast rękawiczki nie można przesunąć po ręce, bo nie pozwala na to krzywizna obu tych przystających do siebie powierzchni.

Czy utrata pojęcia energii jest czymś bardzo dotkliwym? Odpowiedź na to pytanie zależy od tego, do czego chcemy stosować całkę energii. W prostych problemach mechanicznych takich jak wahadło matematyczne całka energii jest niezwykle użyteczna, bo pozwala sprowadzić rozwiązanie równań ruchu do kwadratury. Jednakże w Ogólnej Teorii Względności mamy do czynienia z układem o nieskończenie wielu stopniach swobody i posiadanie jednej całki pierwszej w żaden sposób nie posuwa naprzód problemu całkowania. Z tego punktu widzenia strata jest niewielka. Z drugiej jednak strony całka energii, ze względu na swe unikalne własności, pozwala często przewidywać jakościowo zachowanie się układów fizycznych. Posiadanie jakiegoś ekwiwalentu w Ogólnej Teorii Względności byłoby bardzo cenne. Co więcej, wydaje się, że taki ekwiwalent powinien istnieć. Powinien istnieć dlatego, że w Przyrodzie zawsze



Amalie Emmy Noether
(1882–1935)

sprawdza się pewna ogólna zasada równowagi, którą wyrażają nawet znane porzekadła takie jak „z pustego i Salomon nie naleje” lub „nie ma nic za darmo”, lub „nie istnieje darmowy obiad, istnieją tylko obiady, za które ktoś zapłacił” (powiedzenie Winstona Churchilla). Nie może być możliwe wyciągnięcie ze zmiennego pola grawitacyjnego, np. fali grawitacyjnej, dowolnie dużej ilości energii dającej się zużytkować w danym miejscu, np. na Ziemi. Matematyczne sformułowanie tych prostych i z całą pewnością trafnych intuicji byłoby niezwykle cenne.

Chciałbym te dość smutne rozważania zakończyć jakimś weselszym akcentem. Dlatego pozwolę sobie zwrócić uwagę, że od napisania *Principiów* (rok 1687) do udowodnienia Pierwszego Twierdzenia Emmy Noether (rok 1918) minęło $1918 - 1687 = 231$ lat. To określa skalę czasu potrzebnego dla doskonalenia pojęciowego poważnej nauki jaką jest mechanika Newtona. (Gdyby zamiast Pierwszego Twierdzenia Emmy Noether użyć twierdzenia Kołmogorowa, Arnolda i Mosera, skala ta jeszcze by się wydłużyła.) Jeżeli dodać 231 lat do roku 1916 (rok ukończenia Ogólnej Teorii Względności) to otrzymamy $1916 + 231 = 2147$. Stąd wynika, że mamy jeszcze trochę czasu, ażeby nie okazać się ludźmi mniej kreatywnymi niż nasi wielcy poprzednicy.



Polsko-Ukraiński Konkurs Fizyczny „Lwiątko 2012”

*Stowarzyszenie Absolwentów i Przyjaciół V LO
im. Augusta Witkowskiego w Krakowie*

Zapraszamy gimnazja, licea, licea profilowane i technika do udziału w X edycji **Polsko-Ukraińskiego Konkursu Fizycznego „Lwiątko 2012”**. Konkurs zostanie przeprowadzony **26 marca 2012 roku**.

Szkoły mogą zgłosić uczestników w terminie **do 31 stycznia 2012 roku** wyłącznie za pośrednictwem formularza zamieszczonego na stronie internetowej Konkursu.

Więcej informacji dotyczących harmonogramu oraz zasad Konkursu można uzyskać na stronie internetowej Konkursu **www.lwiatko.org**. Tu również można znaleźć zadania konkursowe z lat ubiegłych.