

Jerzy Kijowski
Centrum Fizyki Teoretycznej PAN
Al. Lotników 32/46
02-668 WARSZAWA

Opinia o pracy doktorskiej mgr Piotra Waluka

Od początku Ogólnej Teorii Względności energia niesiona przez pole grawitacyjne była czymś nieuchwytnym. Najpierw wszyscy teoretycy próbowali używać narzędzi wypróbowanych w Szczególnej Teorii Względności, gdzie "Twierdzenie Noether" prowadziło najczęściej do satysfakcjonującej definicji gęstości energii pola. Wyjątek stanowiła elektrodynamika, gdzie kanoniczny tensor energii-pędu jest zależny od cechowania i wymaga "drobnej poprawki" w celu uzyskania **prawdziwej** wartości energii E_V , niesionej przez pole zawarte w obszarze V :

$$E_V = \frac{1}{2} \int_V (E^2 + B^2) .$$

Ale konieczność tej poprawki została jakoś tam "przełknięta" i panowało przekonanie, że *w zasadzie* twierdzenie Noether wystarcza, by zrozumieć zjawisko unoszenia energii przez dowolne pole.

Tymczasem samo pojęcie "gęstości energii niesionej przez pole grawitacyjne" jest sprzeczne ze zjawiskiem powszechnego ciężenia. Jeśli bowiem E_V oraz E_W reprezentują energię pola zawartą w rozłącznych obszarach V i W , to na pewno ich suma nie może reprezentować energii zawartej w sumie $V \cup W$ tych zbiorów, bowiem energia "waży" (jest równoważna masie) i te dwie masy oddziałują ze sobą grawitacyjnie, zatem należy również uwzględnić energię tego oddziaływania. Musi być zatem:

$$E_{V \cup W} \neq E_V + E_W .$$

Zatem energia ta nie może być dana całką objętościową po obszarze lecz raczej – jak wiemy to z prac A.D.M. (Arnowitt-Deser-Misner) dla energii całkowitej – całką powierzchniową po brzegu obszaru. Na oznaczenie takiej zależności Roger Penrose wprowadził (jeszcze w latach 60' ubiegłego wieku) pojęcie "quasi-lokalnej" energii.

Od tamtego czasu pojawiło się w literaturze ok. 20 różnych definicji takiej “quasi-lokalnej” energii grawitacyjnej. Blisko 30 lat temu zwróciłem uwagę, że “prawdziwa” energia musi być Hamiltonianem układu izolowanego jakim staje się pole zawarte w badanym obszarze po nałożeniu nań odpowiednich warunków brzegowych “izolujących” go od oddziaływań z zewnątrz tego obszaru (odpowiednik warunku Dirichleta dla pola skalarowego). Nie wiedziałem jednak *jakie* to mają być konkretnie warunki brzegowe w przypadku pola grawitacyjnego.

Tymczasem – w przypadku słabych pól – dobrze funkcjonuje zlinearyzowana teoria, której strukturę już dobrze zrozumieliśmy. Ponieważ jest to teoria pola tensorowego ewoluującego w płaskiej przestrzeni Minkowskiego, nie ma wątpliwości co do tego jaką energię niesie to pole. Co więcej: dzięki pracom prof. Jacka Jezierskiego zarówno całą ewolucję pola jak i energię (hamiltonian) potrafimy opisać w języku niezmienników cechowania, mających dobrą interpretację geometryczną i opisujących rzeczywiste stopnie swobody pola grawitacyjnego.

Jest oczywiste, że właściwy opis quasi-lokalnej energii w pełnej (nieliniowej) teorii grawitacji powinien przechodzić w granicy słabych pól w powyższą energię pola liniowego. A dokładniej: człon kwadratowy rozwinięcia Taylora względem niezmienników powinien być identyczny jak powyższa energia pola w teorii liniowej.

Ten test zgodności spełnia definicja globalnej energii (masy) A.D.M., co zostało wykazane już dawno w klasycznej, niezwykle ważnej pracy Brilla i Desera. Chodziło więc o to, by sprawdzić, czy któraś z funkcjonujących w literaturze definicji quasi-lokalnej energii spełnia powyższy test na poziomie lokalnym.

Praca doktorska Piotra Waluka zawiera dowód, że właśnie tzw. energia Hawkinga spełnia ten test, to znaczy że jest dla niej prawdziwa lokalna wersja twierdzenia Brilla-Desera.

Dowód jest trudny i bardzo techniczny. Muszę wyznać, że sam przed wielu laty próbowałem go uzyskać, ale nie starczyło mi sił i wytrwałości, żeby przedrzeć się przez bardzo złożone rachunki. Uzyskanie tego – niezwykle ważnego wyniku – przez pana Piotra Waluka uważam za bardzo poważne osiągnięcie. Jest to zapewne jedna z najlepszych rozpraw doktorskich, z jaką miałem do czynienia w swoim – już bardzo długim życiu.

Podkreślam jednak, że dowód tego twierdzenia wraz ze znakomitym omówieniem całego kontekstu teoretycznego, to jedynie połowa rozprawy – i to druga połowa. A pierwsza część zawiera niezwykle kompetentne i kompletne,

a do tego napisane w bardzo przystępny sposób, omówienie całego problemu energii pola grawitacyjnego, różnych podejść, źródeł trudności i całego kompleksu związanych z tym zagadnień – zarówno matematycznych jak i fizycznych. Tekst ten stanowi bardzo cenne uzupełnienie klasycznego już tekstu Laszlo Sabadosa na temat energii grawitacyjnej, zatytułowanego *Quasi-local Energy-momentum and Angular Momentum in GR* a opublikowanego w bardzo prestiżowej serii Living Reviews in Relativity w roku 2009, stanowiącego właściwie jedyne sensowne źródło informacji na ten temat. Zwraca uwagę niezwykła – jak na młodego człowieka – dojrzałość naukowa oraz wielki talent dydaktyczny. Dzięki nim, tekst czyta się łatwo, a bardzo trudne technicznie zagadnienia, z którymi teoretycy zajmujący się Ogólną Teorią Względności borykali się (ze zmiennym szczęściem!) od stu lat, zostają zaprezentowane w przejrzysty sposób.

Uważam, że mgr Piotr Waluk wykazał w ten sposób swoje ogromne zaangażowanie oraz wielki talent do pracy w zawodzie fizyka-teoretyka. Nie mam wątpliwości, że zasługuje on na dopuszczenie do dalszych etapów obrony doktoratu.

6. IX. 2021

Jerry Kijowski