
Grawitacja widziana z Obserwatorium Astronomicznego Uniwersytetu Jagiellońskiego

Gravity seen from the Astronomical Observatory of the Jagiellonian University

Leszek M. Sokołowski* Sebastian Szybka**

Zakład Astrofizyki Relatywistycznej i Kosmologii UJ

Abstrakt. W artykule omawiamy badania dotyczące zjawisk grawitacyjnych, które są prowadzone w Zakładzie Astrofizyki Relatywistycznej i Kosmologii, w Obserwatorium Astronomicznym Uniwersytetu Jagiellońskiego.

Słowa kluczowe: grawitacja, Einstein, ogólna teoria względności, OTW, Uniwersytet Jagielloński, zmodyfikowane teorie grawitacji, fale grawitacyjne

Abstract. In this article, we discuss research on gravitational phenomena being conducted at the Department of Relativistic Astrophysics and Cosmology in the Astronomical Observatory of the Jagiellonian University.

Keywords: gravity, Einstein, general relativity, Jagiellonian University, modified theories of gravity, gravitational waves

Od ponad pół wieku w fizyce zjawisk grawitacyjnych dużo się dzieje, chcemy zatem opowiedzieć o udziale pracowników Zakładu Astrofizyki Relatywistycznej i Kosmologii (ZARiK) UJ w tych badaniach.

Zaczynamy od kwestii fundamentalnej, od tego jaka teoria opisuje oddziaływania grawitacyjne. Powszechnie uważa się, że jest nią ogólna teoria względności (OTW) Einsteina, jednak wkrótce po jej sformułowaniu okazało się, że jest podatna na rozmaite modyfikacje. Trudno jest zmodyfikować mechanikę kwantową tak, by nowa teoria przewidywała nowe efekty, a jednocześnie z dużą dokładnością odtwarzała znane i potwierdzone wyniki. Podobnie jest z elektrodynamiką. Teorię Einsteina można dowolnie rozbudowywać za cenę znacznej komplikacji. Częściowo odpowiada za to natura tej teorii, a częściowo fakt, że jest słabo potwierdzona eksperymentalnie. Minęły już czasy, gdy OTW opierała się na dwu obserwacjach astronomicznych i jednym eksperymencie, dla teorii marginalnym, więc zarejestrowanie w 2015 fal grawitacyjnych było jej wielkim sukcesem. Jednak w porównaniu z mechaniką kwantową i elektrodynamiką liczba potwierdzających ją zjawisk i ich różnorodność jest bardzo uboga. Rejestrujemy fale grawitacyjne z dalekich obiektów astrofizycznych, lecz nie panujemy nad tymi falami czynnie: nie potrafimy ich dowolnie wytwarzać i rejestrować; mó-

wić obrazowo, jesteśmy przed epoką Heinricha Hertza i jego eksperymentami z emisją i detekcją fal elektromagnetycznych. Nadal nie zmierzylśmy fundamentalnego zjawiska OTW – krzywizny czasoprzestrzeni. Zmodyfikowane teorie grawitacji wcale łatwiejsze do weryfikacji nie są, wręcz przeciwnie; konceptualnie jest to ich wadą, lecz w praktyce badawczej pozwala dłużej zajmować się daną teorią.

Uogólnienia OTW idą we wszystkich wyobraźalnych kierunkach, nie ma żadnej ich klasyfikacji i chyba nie ma nikogo, kto byłby kompetentny we wszystkich tych teoriach. Tu powiemy o dość wąskiej klasie modyfikacji, którym można przypisać *a priori* sensowne (choć niekoniecznie prawdziwe, jak zobaczymy) uzasadnienie. Pierwszą znaną modyfikacją (pomijając wczesną teorię Hermanna Weyla, która szybko się wywróciła) była teoria Bransa–Dickego (1961), w której stała grawitacji Newtona G została zastąpiona dynamicznym polem skalarnym. Po paru latach uznano, że dane obserwacyjne czynią ją mało prawdopodobną; było to jednak oparte na interpretacji tej teorii, która, jak powiemy dalej, nie była jedyną możliwą. W latach 70. XX w. badano najbardziej chyba sensowną generalizację, teorię Einsteina–Cartana (m. in. Andrzej Trautman), według której źródłem grawitacji jest też spin materii, wytwarzający skręcenie koneksji metrycznej. Niestety skręcenie nie propaguje się i teorię zarzucono. Dalsza motywacja tworzenia teorii alternatywnych przyszła z dwu kierunków. Na przełomie

*ORCID 0000-0003-3010-2924

**ORCID 0000-0003-3648-9285

lat 70. i 80. XX w. wielkie nadzieje wiązano z wielowymiarowymi teoriami Kaluzy–Kleina. W wyniku redukcji wymiarowej z przestrzeni wielowymiarowej do fizycznej czasoprzestrzeni pojawiała się teoria Einsteina, zwykle z pewnymi poprawkami. Gdy okazało się, że teoria Kaluzy–Kleina nie pasuje do znanych cząstek elementarnych, zarzucono ją i zastąpiono inną koncepcją świata wielowymiarowego – teorią strun i jej rozszerzeniami. Przechodząc od tych konstrukcji do świata realnego ponownie dostaje się pole fizyczne przypominające einsteinowską grawitację.

Drugim, mocniejszym powodem zajmowania się modyfikacjami OTW były obserwacje kosmologiczne. Od 1999 gromadzono obserwacje wskazujące na to, że wszechświat Friedmanna–Lemaître’a–Robertsona–Walkera (FLRW) rozszerza się coraz szybciej. Tego efektu nie da się uzyskać w ramach standardowej OTW, w której źródłem grawitacji jest materia w postaci gazu z ciśnieniem nieujemnym. Intuicyjnie najprostsza hipoteza: skoro w realnym świecie kosmiczna materia nie jest rozłożona idealnie równomiernie, jak tego wymaga geometria FLRW, to te niewielkie niejednorodności odpowiadają za akcelerację, wywołała gwałtowne polemiki i w końcu upadła; bardziej radykalne odstępstwa od tej geometrii nie dały dotąd interesujących wyników i pozostajemy we Wszechświecie jednorodnym. Wymyślono trzy sposoby wytworzenia tej akceleracji. Po pierwsze, daje je uzupełnienie równań Einsteina o *człon kosmologiczny*, wprowadzony przez Einsteina z innych powodów i zawierający sławną stałą kosmologiczną Λ . Jest to podejście minimalistyczne, dające wyniki zgodne z obserwacjami, więc fenomenologicznie zadowalające, lecz konceptualnie mało zasadne. Nie mamy interpretacji fizycznej stałej Λ , nie potrafimy wyliczyć jej z zasad pierwszych (wyznać ją przez stałe fundamentalne \hbar , c i G) i prowadzi ona do dziwnych „subtelnych dostrojów” we Wszechświecie. W tej sytuacji stałą Λ zastąpiono koncepcją „ciemnej energii”, czyli klasycznego pola fizycznego, wypełniającego równomiernie cały Wszechświat i mającego duże ujemne ciśnienie. Powstały rozmaite fantastyczne hipotezy o tym, czym ciemna energia faktycznie jest. Ciemna energia jest niezgodna z kwantowym obrazem materii, którego konkretną postacią jest Model Standardowy cząstek. Kosmiczna akceleracja wydaje się zbyt słabym uzasadnieniem tak radykalnej modyfikacji fizyki. W porównaniu z nią bardziej zasadna jest nader zachowawcza idea modyfikacji teorii grawitacji, pola klasycznego, które eksperymentalnie wciąż znamy dość słabo. Kłopot w tym, że ta akceleracja jest efektem zbyt niejasnym, by wskazać w jaką stronę winno zmierzać konstruowanie teorii grawitacji.

W tej sytuacji o kierunku poszukiwań decydują nie obiektywne czynniki zewnętrzne, lecz osobiste preferen-

cje badaczy. Tu wspomnimy o jednej tylko klasie alternatywnych teorii grawitacji, będących minimalnym odstępstwem od OTW Einsteina, bowiem nie wprowadzają żadnych nowych pojęć, a tylko zmieniają dynamikę. Są to teorie metrycznej nieliniowej grawitacji (MNLG), w których równania Einsteina, będące równaniami drugiego rzędu, są zastąpione równaniami rzędu czwartego (również dla metryki czasoprzestrzeni). Nieliniowe równania Einsteina należą do najbardziej skomplikowanych równań fizyki i są zastępowane daleko bardziej złożonymi równaniami wyższego rzędu, innymi słowy badacze sami proszą się o kłopoty. W OTW równania Einsteina, analogicznie jak równania Newtona, Lagrange’a i Maxwella wprowadza się jako równania wariacyjne z postulatu ekstremalności (faktycznie z postulatu stacjonarności) funkcjonalu działania. W tym sensie OTW jest najprostszą możliwą metryczną teorią grawitacji, gdyż jej lagrangian jest najprostszy jako że jest liniową funkcją skalarą krzywizny, $L = R$. W teoriach MNLG lagrangian jest nieliniowy, $L = f(R, R_{\alpha\beta}R^{\alpha\beta}, R_{\alpha\beta\mu\nu}R^{\alpha\beta\mu\nu}, \dots)$ – jest dowolną, gładką, funkcją skalarną czternastu (14) niezależnych algebraicznie niezmienników tensora krzywizny. Mamy więc od razu do dyspozycji nieskończenie wiele (*continuum*) teorii MNLG, tyle bowiem jest różnych funkcji f . Jeżeli $L = f(R)$, to rozwiązania próżniowych równań Einsteina $R_{\mu\nu} = 0$ są też rozwiązaniami równań tych teorii (lecz nie na odwrót); dla ogólniejszych lagrangianów tylko wąskie klasy rozwiązań pokrywają się. Teorie MNLG można testować tylko na rozwiązaniach nie istniejących w OTW, lecz ich znalezienie nie jest łatwe. Można oczywiście poszukiwać analogonów czarnych dziur w OTW, ale dla weryfikacji tych teorii niewiele to daje. W praktyce najczęściej rozwiązywano numerycznie równania danej teorii dla kosmicznego czynnika skali w czasoprzestrzeni FLRW w nadziei, że odtworzy on faktyczną historię Wszechświata i da obserwowaną akcelerację. Wyniki nie są zachęcające.

W tym miejscu warto umieścić badania teorii MNLG prowadzone przez Leszka M. Sokołowskiego. Jego zdaniem testowanie tych teorii za pomocą obserwacji kosmologicznych powinno być końcowym, a nie początkowym etapem badań. Należy skoncentrować się na ustaleniu fizycznej treści teorii. Czy posiada ona jednoznaczny i stabilny stan podstawowy (tak jak OTW ma, zależnie od znaku Λ , przestrzeń Minkowskiego, de Sittera lub anti-de Sittera)? Wiele teorii (tzn. lagrangianów) tego kryterium nie spełnia. Czy istnieje, analogicznie jak dla OTW, przejście do granicy newtonowskiej? Istnienie takiego przejścia okazuje się bardzo słabym kryterium.

Według OTW pole grawitacyjne ma dwa stopnie swobody; w ogólnej teorii MNLG jest ich osiem. Dodatkowe sześć stopni należy interpretować jako nowe pola

fizyczne, skalarne, wektorowe i tensorowe. W wielu wypadkach pola te mają dziwaczne, niefizyczne własności i nigdy nie przypominają pól znanych z eksperymentu.

Tak długo, jak nie jesteśmy w stanie efektywnie zmierzyć krzywizny czasoprzestrzeni (co w próżni może okazać się w ogóle niewykonalne), tak długo teorii MNLG są inherentnie wieloznaczne. Zauważył to już w latach 50. XX w. Wolfgang Pauli. Rozważmy czasoprzestrzeń, w której jest tylko klasyczne pole skalarne ϕ i ono grawituje. W układzie pól $\{g_{\mu\nu}, \phi\}$ dokonujemy odwzorowania konforemnego $\tilde{g}_{\mu\nu} = F_1(\phi)g_{\mu\nu}$ i $\tilde{\phi} = F_2(\phi)$, gdzie $F_1 > 0$ i F_2 są dowolnymi funkcjami skalarnymi. Która metryka jest fizyczna, tzn. określa relacje czasoprzestrzenne (odwzorowanie zmienia odległości)? W OTW metryka jest określona jednoznacznie; w teoriach MNLG trzeba najpierw w próżni (tj. w obecności tylko ośmiu grawitacyjnych stopni swobody) ustalić, która metryka jest prawdziwa i dopiero wtedy dodać opis zwykłej materii. W mechanice klasycznej mamy transformacje kanoniczne mieszające położenia i pędy, które nie zmieniają funkcjonalnie równań Hamiltona; jednak dobrze wiemy, które zmienne dynamiczne są położeniami, a które pędami i z nich konstruujemy hamiltonian, następnie wedle potrzeby upraszczając równania ruchu odpowiednią transformacją kanoniczną i transformacją odwrotną, otrzymujemy rozwiązania w zmiennych fizycznych, co pozwala je zinterpretować. W teoriach MNLG konieczność analogicznej procedury jest nieoczywista i wielu autorów naiwnie zakłada, że metryka, w której zapisali lagrangian, jest jedyna i fizyczna. W teorii Bransa–Dickego, gdy przeskaluje się konforemnie metrykę i tę przeskalowaną uzna za fizyczną, to obserwacje wykluczające tę teorię tracą ważność. W teoriach MNLG nie ma fizycznie uzasadnionego, uniwersalnego kryterium pozwalającego ustalić, która metryka jest prawdziwa geometrycznie i fizycznie.

W podsumowaniu szeregu swoich prac Leszek M. Sokołowski dochodzi do wniosku, że przy obecnym stanie wiedzy empirycznej wszelkie próby zastąpienia OTW Einsteina lepszą teorią grawitacji są przedwczesne i nie mogą doprowadzić do pożądanego celu.

W ZARiK UJ prowadzone są również badania dotyczące fal grawitacyjnych w OTW. Istnienie tych fal zasugerował Henri Poincaré w roku 1905 (na dziesięć lat przed powstaniem OTW). Spostrzeżenie Poincarégo wiązało się odkrytą w tym samym roku szczególną teorią względności, według której wszelkie oddziaływania rozchodzą się ze skończoną prędkością. Już w roku 1916 teoretycznymi badaniami fal grawitacyjnych zajął się sam Einstein. Ze względu na złożoność równań, Einstein studiował fale w ramach zlinearyzowanej teorii, czyli przy założeniu, że nie są one zbyt silne. Rozwiązania zlinearyzowane mają sens pod warunkiem, że istnieją

rozwiązania falowe pełnych równań Einsteina. Chociaż w roku 1925 czesko-niemiecki naukowiec Guido Beck znalazł opis fal grawitacyjnych w ramach pełnej teorii, to brak przepływu informacji sprawił, iż wielu naukowców, w tym sam Einstein, nie wiedziało o tym odkryciu i zaczęło powątpiewać w istnienie fal grawitacyjnych. Wątpliwości dotyczące istnienia fal grawitacyjnych ostatecznie rozwiała dopiero ich bezpośrednia detekcja w roku 2015. Obecnie astronomia fal grawitacyjnych jest dynamicznie rozwijającą się gałęzią astronomii, a detekcje fal pochodzących ze zderzeń czarnych dziur zniknęły z pierwszych stron gazet stając się częścią astronomicznej rutyny.

Pomimo ponad stu lat teoretycznych badań dotyczących fal grawitacyjnych, wiele fundamentalnych problemów pozostało do dziś nierozwiązanych. W szczególności dotyczy to rozwiązań falowych pełnych nieliniaryzowanych równań Einsteina. W naszym Zakładzie, Sebastian Szybka wraz ze współpracownikami, prowadzi badania matematyczne jednej z najprostszych konfiguracji takich fal, tj. *grawitacyjnych fal stojących*. Choć nie wszyscy może zdają sobie z tego sprawę, to mechaniczne fale stojące są dobrze znane z życia codziennego. Drgająca struna skrzypiec, czy powietrze w pudle rezonansowym instrumentu, to najprostsze przykłady mechanicznych fal stojących. W przypadku takich fal energia praktycznie nie jest przenoszona wzdłuż kierunku drgań. Jeśli drgania struny są niewielkie, to można dobrze je opisać za pomocą zlinearyzowanych równań – ten rodzaj fal nie kryje przed nami tajemnic. Jeśli jednak rozważymy fale o dużej amplitudzie, dla których przybliżenie liniowe przestaje działać, to pojawia się bogactwo zjawisk, których złożoność zadziwia i wymyka się naszym próbom opisu. Przykładem takich nieliniowych fal mechanicznych są fale Faradaya. W roku 1831 Michael Faraday przeprowadził prosty eksperyment umieszczając ciecz w drgającym pionowo talerzu. Jakie wzory na powierzchni utworzą fale? Okazało się, że odpowiedź na to pytanie zależy od wielu czynników: charakterystyki drgań talerza i jego kształtu, właściwości mechanicznych cieczy. Dla dużych amplitud drgań istnieje olbrzymie bogactwo możliwych konfiguracji. Badanie matematycznych możliwości związane jest z *równaniami Naviera–Stokesa*. Prawie dwieście lat później ciągle nie rozumiemy w pełni tego zjawiska.

Za Faradayem możemy postawić sobie analogiczne pytanie w odniesieniu do fal grawitacyjnych. Choć czasoprzestrzeni nie możemy umieścić w kosmicznym talerzu, to stojące fale grawitacyjne mogą powstać wskutek niejednorodności kosmicznego Wielkiego Wybuchu, z którego wyłonił się nasz Wszechświat (Wszechświat jest jednorodny i izotropowy tylko w statystycznym sensie). Jeśli pominiemy trudności techniczne i spojrzymy w byt może odległą przyszłość, to cylindryczne stojące fale gra-

witacyjne będzie można prawdopodobnie wygenerować w laboratorium za pomocą elektromagnetycznego rezonatora wężkowego. Równania Einsteina są o wiele bardziej skomplikowane od równań Naviera–Stokesa, więc jak można przypuszczać, matematyczne badania grawitacyjnych fal stojących nie należą do łatwych. Pomimo to odkryliśmy, iż nawet proste modele „zabawkowe” takich fal dopuszczają istnienie niezmiernie złożonych zjawisk – na przykład ruch drobnej cząstki w czasoprzestrzeni odpowiadającej cylindrycznej grawitacyjnej fali stojącej może być chaotyczny. Pionierem badań chaosu pod koniec dziewiętnastego wieku był wspomniany wcześniej Henri Poincaré.

Rodzaj chaosu deterministycznego, który w modelu cylindrycznym wywołany zostaje przez grawitacyjne fale stojące, jest bardzo interesujący. Wiąże się on z istnieniem *sieci heteroklinicznej* w przestrzeni fazowej możliwych ruchów cząstki. W teorii układów dynamicznych sieci heterokliniczne pełnią ważną rolę. Za ich pomocą

można modelować procesy decyzyjne niektórych zwierząt, a także przetwarzać informacje, czyli prowadzić obliczenia. Choć badania fal grawitacyjnych prowadzone w Zakładzie są ściśle matematyczne i oddzielone barierą technologiczną od potencjalnych zastosowań, to fakt, iż wibracja pustej czasoprzestrzeni (rozważane fale grawitacyjne odpowiadają próżniowym rozwiązaniom równań Einsteina) może zostać użyta do modelowania skomplikowanych zjawisk, takich jak procesy decyzyjne, wydaje się nader obiecujący.

Alternatywne teorie grawitacji oraz grawitacyjne fale stojące, to tylko dwa przykłady zagadnień badanych w ZARiK UJ. Rozwój technologii spowodował, iż na przestrzeni ostatnich kilku lat OTW Einsteina przeżywa swój rozkwit: choć bardzo trudno testować tę teorię w laboratoryjnych warunkach, to olbrzymią ilość napływających danych astronomicznych można obecnie skonfrontować z wizją Kosmosu wynikającą z równań odkrytych przez Einsteina ponad sto lat temu.