

Heller, Michał

Dzieje pewnego rozumienia zasady Macha

Kwartalnik Historii Nauki i Techniki 19/1, 59-69

1974

Artykuł umieszczony jest w kolekcji cyfrowej Bazhum, gromadzącej zawartość polskich czasopism humanistycznych i społecznych tworzonej przez Muzeum Historii Polski w ramach prac podejmowanych na rzecz zapewnienia otwartego, powszechnego i trwałego dostępu do polskiego dorobku naukowego i kulturalnego.

Artykuł został zdigitalizowany i opracowany do udostępnienia w internecie ze środków specjalnych MNiSW dzięki Wydziałowi Historycznemu Uniwersytetu Warszawskiego.

Tekst jest udostępniony do wykorzystania w ramach dozwolonego użytku.



DZIEJE PEWNEGO ROZUMIENIA ZASADY MACHA

1. WPROWADZENIE

Idea względności przybierała różne oblicza w dziejach naszego rozumienia przyrody. Prawdopodobnie pierwsze uległy relatywizacji pojęcia „góra — dół” (ludzie znajdujący się na antypodach nie stoją „do góry nogami”). Zrozumienie, że „miejsce” można wyznaczyć tylko względem czegoś, pociągnęło za sobą pojmowanie przestrzeni nie jako bytu niezależnego, lecz określonego rozkładem ciał. W fizyce nowożytnej wyraźnie sformułowana zasada względności pojawiła się już u Newtona. Klasyczna (newtonowska) jej wersja postuluje równouprawnienie wszystkich inercjalnych układów odniesienia ze względu na prawa mechaniki. Następnym etapem relatywizacji było rozciągnięcie zasady względności z praw mechaniki na wszystkie prawa fizyki. Krok ten uczyniła szczególna teoria względności. Wreszcie ogólna teoria względności dokonała uogólnienia od równouprawnienia układów inercjalnych do równouprawnienia wszystkich układów odniesienia.

Sama zasada względności w fizyce relatywistycznej bywa rozumiana bądź jako postulowanie pewnych symetrii czasoprzestrzeni¹, bądź jako uznanie dotychczasowych zmiennych kinetycznych za zmienne dynamiczne², czasem w obydwu znaczeniach jednocześnie³.

Ogólna teoria względności nie zakończyła procesu relatywizacji fizyki. Wiele zagadnień pozostało otwartych. Przede wszystkim sprawa zrealizowania fizycznego modelu czasoprzestrzeni całkowicie względnej (określonej wyłącznie przez rozkład materii) i wiążąca się z tym kwestia względności bezwładności. Pierwszy problem łączy się zwykle z nazwiskiem Berkeleyya i Leibniza, którzy ostro występowali przeciw absolutnemu czasowi i absolutnej przestrzeni Newtona; drugi — z nazwiskiem Macha, który postulował mierzenie bezwładności nie względem absolutnej przestrzeni, lecz względem wszystkich mas obecnych we Wszechświecie.

Ten ostatni postulat Einstein nazwał zasadą Macha i pragnął go zrealizować w ogólnej teorii względności. Jednak, jak dobrze wiadomo, teoria ta urzeczywistnia zasadę Macha w stosunkowo niewielkim stopniu. W ogólnej teorii względności czasoprzestrzeń jest tylko częściowo określona rozkładem mas, energii, pędów, etc., a częściowo absolutna (czasoprzestrzeń bez materii posiada ściśle określoną strukturę geometryczną); a co za tym idzie bezwładność mierzy się tylko częściowo względem materii wypełniającej Wszechświat, a częściowo nadal względem absolutnej czasoprzestrzeni. Co więcej, na skutek nieliniowości

¹ Por. V. A. Fock: *Teorija prostranstwa, wriemieni i tjagotienija*. Moskwa 1961.

² A. Trautman: *Teoria względności*. „Postępy Fizyki” T. 17: 1966 z. 12 s. 129—141.

³ Por. M. Heller: *Kopernikańskie układy odniesienia w ogólnej teorii względności*. „Roczniki Filozoficzne”. T. 21: 1973 z. 3 s. 43—52.

równań pola grawitacyjnego, obydwa przyczynki — i ten pochodzący od materii, i ten od przestrzeni pustej — są „wymieszane nieliniowo” i nie sposób ich jednoznacznie od siebie oddzielić.

Zasada Macha stała się czymś w rodzaju widma — postrachu dla fizyków relatywistów. Widmo to przybiera taką różnorodność wcieleń, że trudno zorientować się w gąszczu różnych sformułowań pretendujących do roli zasady Macha. Autor niniejszych słów kilka lat temu zebrał około 20 różnych „zasad Macha”⁴, a i tak co jakiś czas w literaturze znajduje się nowe, nie objęte tamtą listą. Treść tych sformułowań rozciąga się od zwykłego stwierdzenia względności ruchu, przez różne ujęcia zasady względności, względności bezwładności, względności czasu i przestrzeni, zmienności stałych fizycznych (w szczególności stałej grawitacji) aż do maksymalistycznego postulatu domagającego się skonstruowania samouzgadniającego się modelu świata, w którym wszystkie jego własności wynikałyby z siebie nawzajem, bez przyjmowania czegokolwiek *a priori*.

Co jakiś czas w literaturze naukowej pojawiają się głosy protestu przeciwko zasadzie Macha⁵ i ciągle pojawiają się nowe prace, głoszące, że tym razem udało się podać matematyczne sformułowanie zasady Macha i zbudować jej fizyczny model. Sukcesy tych prac z reguły polegają na tym, że podają one nowe sformułowanie „zasady Macha”, takie, które istotnie da się wyrazić matematycznie, ale które nie ma wiele wspólnego z oryginalną ideą Macha. Wzbogaca się lista nowych sformułowań zasady Macha, a sam problem — w najlepszym razie — posuwa się naprzód zaledwie fragmentarycznie. Nie zamierzam wcale negować wartości tych prac. Często przyczyniają się one do wynajdywania nowych metod matematycznych i do rozwoju teorii grawitacji. Tak się składa, że zasada Macha zawsze dobrze spełniała rolę inspiratora nowych idei, mimo że sama skutecznie opierała się wszelkim próbom ufizycznienia.

Rozwój fizyki był ściśle związany (a często wręcz uwarunkowany) rozwojem idei względności i chyba dlatego fizykom tak trudno zrezygnować z zasady Macha, która te relatywistyczne tendencje w sobie wyraża.

Próby zbudowania teorii „w pełni machowskiej” idą na ogół w dwu kierunkach: albo próbuje się „machowsko” uogólnić ogólną teorię względności⁶, albo ortodoksyjną teorię względności zinterpretować nieortodoksyjnie, np. na równania pola grawitacyjnego nałożyć dodatkowe, „machowskie”, warunki brzegowe⁷.

W dalszym ciągu pragnę przedstawić dzieje jednej z takich prób, starającą się nadać ogólnej teorii względności machowską interpretację. Na próbę tę składa się seria prac D. W. Sciamy, B. L. Altshulera, D. Lynden-Bella, P. C. Waylena i R. C. Gilmana.

⁴ *Mach's Principle and Differentiable Manifolds*. „Acta Physica Polonica” Vol. B1: 1970, fasc. 2 s. 131—138.

⁵ Por. np. W. H. Mc Crea: *Doubts about Mach's Principle*. „Nature” Vol. 230: 1971 nr 5289 s. 95—97.

⁶ Np. C. Brans, R. H. Dicke: *Mach's Principle and Relativistic Theory of Gravitation*. „The Physical Review” vol. 124: 1961 nr 3 s. 925—935.

⁷ Np. J. A. Wheeler: *Mach's Principle as Boundary condition for Einstein's Equations*. A report given at the Conference on Relativistic Theories of Gravitation. Warszawa — Jabłonna, 25—31 July 1962.

2. WEKTOROWY MODEL SCIAMY

W 1953 r. na łamach czasopisma „Monthly Notices of the Royal Astronomical Society” ukazała się praca D. W. Sciamy zatytułowana: *On the Origin of Inertia*⁸. Autor zaprezentował w niej „machowski”, wektorowy model pola bezwładności. Znaczenie tej pracy leży nie w jej bezpośrednich wynikach, lecz w fakcie, że zapoczątkowała ona pewien kierunek badań nad zasadą Macha.

Idea Sciamy jest niezwykle prosta. Założył on, że pole bezwładności w pierwszym przybliżeniu jest polem wektorowym, a równania tego pola formalnie mają kształt równań Maxwella. Dodatkowe założenia: przestrzeń Wszechświata podlega geometrii Minkowskiego; rozkład materii jest jednorodny i izotropowy; Wszechświat ekspanduje zgodnie z prawem Hubble’a. Stosując maxwellowskie równania pola bezwładności do takiego rozkładu materii, można wyliczyć, jak masy obecne we Wszechświecie indukują bezwładność ciała próbnemu. Rachunki przebiegają ściśle analogicznie do odpowiednich rozważań w elektrodynamice.

Sukces Sciamy ma charakter prowizoryczny. Jak wiadmo bowiem, równania Maxwella w przestrzeni pustej prowadzą do równania d’Alemberta, które opisuje rozchodzenie się bezźródłowych fal elektromagnetycznych, czy w wersji Sciamy — grawitacyjnych⁹. Istnienie bezźródłowych fal jest kompromitującym efektem anty-machowskim. Ponadto pole bezwładności powinno być polem tensorowym (drugiego rzędu), a nie wektorowym. Sciama uważał wyniki swojej pracy za obiecujące, ale tymczasowe; obiecał też rozbudowanie modelu do postaci tensorowej.

3. MACHOWSKI PROGRAM SCIAMY

Kolejno w latach 1963 i 1964 ukazały się dwie prace Sciamy¹⁰, nie tyle rozwijające wektorowy model bezwładności, ile raczej zawierające pewne idee, które by pozwoliły w przyszłości przejść od modelu wektorowego do tensorowego.

Pierwsza praca dotyczyła bezpośrednio „kosmologicznych aspektów” równań Maxwella. Problem był następujący: Istnieją dwa kosmologiczne wyznaczniki kierunku czasu: rozszerzanie się Wszechświata oraz nieodwracalność procesów związana z wypromieniowywaniem energii przez ciała niebieskie, świadcząca o braku równowagi termodynamicznej w obserwowanej części przestrzeni. Czy te dwa wyznaczniki kierunku czasu są jakoś ze sobą związane?

Równania Maxwella są, jak wiadomo, symetryczne względem odwrócenia czasu; mogłyby one określać kierunek czasu, gdyby jakieś racje fizyczne wyeliminowały z nich rozwiązania przyspieszone (*advanced solutions*), pozostawiając jedynie rozwiązania opóźnione (*retarded*). Czy tego rodzaju eliminacji nie dokonuje proces ekspansji Wszechświata?

⁸ Vol. 113: 1953 nr 1 s. 34—42.

⁹ Por. L. Landau, E. Lifszic: *Teoria pola*. Warszawa 1958 s. 128—129.

¹⁰ *Retarded Potentials and the Expansion of the Universe*. „Proceedings of the Royal Society” Vol. A 273: 1963 s. 484—495; *The Physical Structure of General Relativity*. „Reviews of Modern Physics” Vol. 36 1964 s. 463—494.

Sciama rozpatrywał równania Maxwella zapisane w postaci równania Kirchoffa. Symbolicznie:

$$\text{potencjał w danym punkcie} = \text{ pewna całka po objętości } V + \text{ pewna całka po powierzchni } S \text{ otaczającej objętość } V \quad (1)$$

Równanie Kirchoffa (1) prowadzi do konwencjonalnych rozwiązań opóźnionych wtedy, gdy: (a) przyczynek do potencjału w danym punkcie od źródeł znajdujących się na zewnątrz objętości V dąży do zera, gdy sama objętość V dąży do nieskończoności, tzn. S -całka $\rightarrow 0$, gdy $V \rightarrow \infty$ (S -całka oznacza drugi składnik znajdujący się po prawej stronie równania (1), analogicznie będziemy mówić o V -całce); (b) nie istnieje promieniowanie bezźródłowe, warunek ten Sciama nazwał warunkiem machowskim (*Mach-type condition*). Zwyczajnie warunek (a) jest zrealizowany przez rozkład źródeł tylko wewnątrz pewnego skończonego obszaru. W kosmologii taki rozkład nie wchodzi pod uwagę i sytuacja znacznie się komplikuje. Sciama rozpatrywał pod tym kątem dwa modele kosmologiczne. Okazało się, że w modelu Einsteina-de Sittera istnieje taki rozkład źródeł, dla których teoria Maxwella prowadzi do rozwiązań opóźnionych, ale nie wyklucza istnienia promieniowania bezźródłowego. W modelu stanu stacjonarnego teoria Maxwella również prowadzi do rozwiązań opóźnionych oraz wyklucza istnienie promieniowania bezźródłowego.

Przedmiot drugiej pracy Sciamy (z 1964 r.) — był to referat wygłoszony na Trzeciej Międzynarodowej Konferencji Poświęconej Efektowi Mössbauera, Cornell University, 4—7 wrzesień 1963 — stanowiła „fizyczna treść” ogólnej teorii względności. W referacie tym autor wyraził przekonanie, że einsteinowskie sformułowanie zasady Macha: „siły bezwładności są wywierane przez materię, a nie absolutną przestrzeń” zawiera w sobie dwie idee: (a) siły bezwładności mają raczej dynamiczne niż kinematyczne pochodzenie i dlatego powinny być wyprowadzone z teorii pola; (b) całe pole bezwładności musi pochodzić od źródeł i dlatego przy rozwiązywaniu równań pola bezwładności należy wybrać właściwe warunki brzegowe. Sciama sądzi, że można w ten sposób zinterpretować ogólną teorię względności, by zawierała obydwie te idee. Co więcej, właśnie taka interpretacja wydobywa fizyczną treść ogólnej teorii względności.

Referat Sciamy zawierał już nawet próbę tego rodzaju interpretacji. Nie będziemy jej tutaj omawiać. Zauważmy tylko, że wspomniane warunki brzegowe były już przygotowane przez poprzednią pracę (z 1963 r.): równania pola bezwładności należy zapisać w postaci całkowej, analogicznie do równania Kirchoffa (1) i zażądać znikania S -całki w granicy gdy V -całkowanie rozciąga się na stożki przeszłości i przyszłości tego punktu, w którym oblicza się potencjał.

Podsumowując ten etap prac Sciamy, można zakonkludować: 1° pewien określony program zrealizowania zasady Macha został już sformułowany; 2° zapowiedziana w pracy o wektorowym modelu tensorowa teoria bezwładności będzie w gruncie rzeczy odpowiednio zinterpretowaną ogólną teorią względności, interpretacja ta będzie polegać na: a) zapisaniu równań pola w postaci całkowej, b) nałożeniu na rozwiązania równań pola określonych, „machowskich” warunków brzegowych.

4. PRACE ALTSHULERA I LYNDEN-BELLA

Równania pola ogólnej teorii względności są nieliniowymi równaniami różniczkowymi. Ponieważ są to równania różniczkowe, opisują pole lokalnie; ponieważ są nieliniowe, nie istnieje dokładna (tj. nieprzybliżona) i jednoznaczna metoda przedstawiania ich w formie całkowej. Zagadnienie zapisania równań pola w postaci całkowej podjęli niemal równocześnie i zupełnie niezależnie od siebie B. L. Altshuler¹¹ i D. Lynden-Bell¹². Obydwie prace są uderzająco podobne.

Zarówno Altshuler jak i Lynden-Bell, celem uzyskania całkowej postaci równań pola, wykorzystują teorię bitensorowej, opóźnionej funkcji Greena. Wynik sumowania tensora energii pędu w różnych punktach nie jest wszędzie tensorem. J. L. Synge¹³ oraz B. de Witt i R. Brehme¹⁴ opracowali metodę przewyciężenia tej trudności przy pomocy techniki bitensorowej. Wykorzystując tę metodę de Witt i Brehme¹⁵ oraz A. Lichnerowicz¹⁶ stworzyli teorię tensorowych funkcji Greena dla liniowych równań różniczkowych w zakrzywionych przestrzeniach.

Lynden-Bell powołuje się ponadto na ideę zapożyczoną od F. Hoyle'a i J. V. Narlikara¹⁷. Autorowie ci zaproponowali, aby określać przyczynę bezwładności indukowany masie próbnej przez dane ciało w obecności innych mas we Wszechświecie zakładając, że efekty bezwładności rozchodzą się liniowo, ale po czasoprzestrzeni zakrzywionej przez zawartą w nich materię. Uzyskane w ten sposób wyrażenie całkowite jest wprawdzie *explicite* liniowe, ale *implicitie*, przez zależność od geometrii, nieliniowe.

W wyborze równań dla funkcji Greena istnieje duża dowolność. Obydwaj autorowie stosują różne kryteria ograniczenia tej dowolności, uzyskując różne funkcje Greena. Otrzymane całkowite równania pola zawierają w sobie warunki brzegowe nałożone na zwykłe równania pola ogólnej teorii względności. Obszarem całkowania jest wnętrze stożka świetlnego przeszłości danego punktu czasoprzestrzeni. „Przy tym — pisze Altshuler — zasada Macha oznacza po prostu, ażeby za słuszne przyjmować równania Einsteina nie w różniczkowej, lecz w całkowej postaci”¹⁸.

Lynden-Bell sądzi, że dla kosmologicznych modeli Robertsona-Walkera i być może dla świata Gödla da się wyznaczyć funkcję Greena i sprawdzić, czy światy te są rozwiązaniem całkowych równań pola, a co za tym idzie czy są one machowskie. Może się okazać, że tylko modele ze stałą kosmologiczną różną od zera są machowskie. Byłaby

¹¹ *Integralnaja forma urawnienij Ejnstejnaja i kowariantnaja formulirowka principa Macha*. „Zurnał Eksperimentalnoj i Teorietyčeskoj Fiziki” T. 51: 1966 wyp. 4(10) s. 1143—1150.

¹² *On the Origins Of Space-Time and Inertia*. „Monthly Notices of the Royal Astronomical Society” vol. 135: 1967 nr 4 s. 413—428.

¹³ *Relativity. The General Theory*. Amsterdam 1960.

¹⁴ *Radiation Damping in a Gravitational Field*. „Annals of Physics” vol. 9: 1960 nr 2 s. 220—259.

¹⁵ Tamże.

¹⁶ *Relativity. Groups and Topology* (praca zbior.). New York — London — Paris 1963 s. 823 i nast.

¹⁷ *A New Theory of Gravitation*. „Proceedings of the Royal Society” vol. A 282: 1964 nr 1389 s. 191—207.

¹⁸ B. L. Altshuler, jw. s. 1143.

to, zdaniem Lynden-Bella, jedyna racja fizyczna przemawiająca na korzyść stałej kosmologicznej.

Altshuler zauważył, że w celu określenia, czy jakiś model kosmologiczny jest machowski, czy nie, nie zawsze trzeba *explicite* rozwiązywać równanie dla funkcji Greena; czasem wystarczą pewne rozważania wykorzystujące symetrie modelu. Stosując tę metodę Altshuler doszedł do następujących wniosków: 1° Statyczny świat Einsteina (stała kosmologiczna różna od zera!) odpowiada brzegowym warunkom machowskim; 2° Dla wszechświatów jednorodnych i izotropowych (Robertsona-Walkera), dla których w pobliżu osobliwości równaniem stanu jest: $p = a \rho$ (p — ciśnienie, ρ — gęstość, $a = \text{const.}$), przy żadnej wartości a nie jest spełniony machowski warunek brzegowy (z wyjątkiem gdy $a \rightarrow \infty$, co oznacza obecność w pobliżu osobliwości „nieścieśliwego jądra”).

Wnioski te zostały wyprowadzone z równań Altshulera, prawdopodobnie jednak pozostają one także słuszne w formalizmie Lynden-Bella.

5. TEORIA SWG

W 1969 r. w „The Physical Review” ukazał się artykuł D. W. Sciame, P. C. Waylena i R. C. Gilmana¹⁹ (w dalszym ciągu tę spółkę autorską będziemy określać skrótem SWG). Autorowie wyznają, że ich praca jest obiecany przez Sciame rozwinięciem jego wektorowego modelu bezwładności do postaci tensorowej. W 1970 r. Gilman²⁰ zastosował teorię SWG do kosmologii. Starał się on rozstrzygnąć, które modele kosmologiczne są machowskie w sensie SWG. Rozważał jednak tylko modele Robertsona-Walkera, modele typu Schwarzschilda oraz Kantowskiego-Sachsa-Torna.

Praca SWG podejmuje program machowski nakreślony przez Sciame (1964), ale realizuje go w oparciu o (z wyraźnym powołaniem się) wyniki Altshulera, a zwłaszcza Lynden-Bella. Zasadnicza różnica pomiędzy SWG a Altshulerem i Lynden-Bellem polega na tym, że SWG wyraźnie sformułowali warunki jednoznacznie determinujące funkcję Greena oraz całkowym równaniom pola nadali postać równania Kirchoffa (1). W teorii SWG człon kosmologiczny λg_{ik} traktuje się jako człon źródłowy (*source term*); ponieważ teoria z założenia ma być machowska, w równaniach pola człon kosmologiczny musi być równy zeru.

Warunki jednoznacznie determinujące funkcję Greena wyraźnie sformułowal Gilman w swojej rozprawie doktorskiej²¹. Trzeba wszakże zaznaczyć, że o wyborze takich a nie innych warunków decydowały głównie racje estetyczne.

Całkowe równania pola są kształtu (1), przy czym V -całka określa wkład do lokalnego pola pochodzący od źródeł znajdujących się wewnątrz objętości V ; S -całka określa wkład do lokalnego pola pochodzący od źródeł znajdujących się poza objętością V oraz „promieniowanie z nieskończoności” (bezzródłowe). Na obszar całkowania V jest nałożony

¹⁹ Generally Covariant Integral Formulation of Einstein's Field Equations. „The Physical Review” vol. 187 1969 nr 5 s. 1762—1766.

²⁰ Machian Theory of Inertia and Gravitation. „The Physical Review” D, vol. 2: 1970 nr 8 s. 1400—1410.

²¹ A Completely Covariant Integral Theory of Inertia and Gravitation and Its Machian Implications (Thesis, Princeton University) 1969 s. 33—38.

warunek globalnej hiperboliczności. Globalna hiperboliczność wyklucza istnienie zamkniętych krzywych czasopodobnych. Globalnie hiperboliczne modele mogą być dwojakiego rodzaju: albo posiadają horyzont cząstek w skończonej przeszłości, albo sięgają w przeszłość nieskończenie daleko. Określamy teraz powierzchnię δS . Dla modeli posiadających w przeszłości horyzont cząstek, δS jest powierzchnią leżącą wewnątrz lub na stożku świetlnym danego punktu x i będącą horyzontem cząstek linii świata punktu x . Dla modeli nie posiadających horyzontu cząstek δS jest „powierzchnią» w nieskończonej przeszłości, właściwą dla danego modelu”²². Zdefiniujmy także:

$$I(x) = \lim_{S \rightarrow \delta S} (S - \text{całka}) \quad (2)$$

Gdy S dąży do δS wówczas do objętości V ograniczonej powierzchnią S wchodzi wszystkie źródła pola znajdujące się wewnątrz i na stożku świetlnym przeszłości punktu x , a zatem $I(x)$ przedstawia przyczynę do lokalnego pola (w punkcie x) nie pochodzący od żadnego obserwowanego źródła. Zasada Macha w sensie SWG stwierdza: model kosmologiczny jest machowski wtedy i tylko wtedy, gdy: 1° jest rozwiązaniem einsteinowskich równań pola z $\lambda = 0$, 2° $I(x) = 0$.

(2°) jest warunkiem brzegowym dla równań Einsteina. Ażeby uzyskać światy machowskie, należałoby rozwiązać równania pola z tym warunkiem brzegowym. Jest to jednak zadanie matematycznie bardzo skomplikowane; łatwiej sprawdzić, które spośród znanych rozwiązań są machowskie w sensie SWG. W tym celu dla danego modelu należy obliczyć: a) funkcję Greena, b) S -całkę c) $I(x)$. Gilman (1970) zrealizował ten program dla kilku znanych modeli, a także podał ogólny schemat klasyfikacji modeli kosmologicznych pod kątem tego, czy spełniają one, czy też nie spełniają zasadę Macha w sformułowaniu SWG. Schemat ten i wyniki obliczeń Gilmana przedstawiają się następująco:

Klasa I: $I(x) = 0$ dla każdego x , $\lambda = 0$; modele w pełni machowskie: wiele (prawdopodobnie wszystkie) nie pustych relatywistycznych modeli Robertsona-Walkera z $\lambda = 0$ oraz z równaniem stanu: $0 \leq p \leq \rho c^2$.
Klasa II: $I(x) = 0$ nie dla wszystkich x , $\lambda = 0$; modele nie-machowskie, ale mogą być machowskie, jeżeli je traktować jako „części” modeli machowskich (klasy I): czasoprzestrzeń Minkowskiego, Schwarzschilda, Kerra (z odpowiednim rozwiązaniem wewnętrznym), Kantowskiego-Sachsa-Torna.

Klasa III: $I(x)$ dowolne, $\lambda \neq 0$; modele nie-machowskie: model Gödla i wszystkie modele z $\lambda \neq 0$.

Ponadto wszystkie rozwiązania typu Schwarzschilda i wszystkie kosmologiczne rozwiązania puste ($T_{ik} = 0$) należą do klasy II lub III.

6. UWAGI KRYTYCZNE

Koncepcja SWG spotkała się z krytyką ze strony J. H. Higbie’go²³. Według klasyfikacji Gilmana wszystkie w pełni machowskie modele kosmologiczne (klasa I) posiadają osobliwość początkową. Znaczenie tego faktu — zdaniem Higbie’go — jest następujące: w modelu z nie-

²² R. C. Gilman, jw. s. 1400—1401.

²³ Mach’s Principle in General Relativity. „General Relativity and Gravitation” vol. 3: 1972 nr 2 s. 101—109.

skończoną przeszłością w dowolnej epoce istnieje układ inercjalny, na który nie wpływa pewna „porcja materii” znajdująca się wewnątrz lub na stożku świetlnym dzisiejszego obserwatora: zasada Macha w ujęciu SWG wyklucza takie modele. Jak wykazali Arnowitt, Deser i Misner²⁴, 10 składowych tensora metrycznego można rozdzielić (aczkolwiek w ogólnym przypadku nie jednoznacznie) na 4 zmienne cechowania, 2 zmienne kanoniczne, reprezentujące stopnie swobody pola grawitacyjnego i 4 tzw. „zmiennne więzów” (*constraint variables*). Można zatem mówić w pewnym sensie o niezależnych wzbudzeniach pola (istnieją 2 stopnie swobody); co więcej, tego typu wzbudzenia pola mogą nie być generowane przez materię, lecz mogą „być częścią struktury początkowej osobliwości”²⁵. Wchodzą więc one jako istotny przyczynek do S -całki całkowych równań pola w ujęciu SWG. „Okazuje się zatem, przyjąwszy słuszność ogólnej teorii względności, że cała treść zasady Macha jest zawarta w stwierdzeniu, że Wszechświat wyewoluował z początkowego wybuchu nie zawierającego początkowego promieniowania grawitacyjnego”²⁶. Innymi słowy, zasada Macha domaga się, by „początkowa geometria” była (w pewnym sensie) jak najbardziej symetryczna. Z drugiej strony Higbie przychyliła się do poglądu E. Harrisona²⁷, który utrzymuje, że obecne asymetrie w rozkładzie mas mają swoje źródło w asymetrycznej strukturze początkowej osobliwości. Jeśli przyjmie się taki pogląd, to Wszechświat jest zdeterminowany tylko wtedy, gdy są określone numeryczne wartości początkowych asymetrii. Ale postulat zdeterminowania Wszechświata mieści się w doktrynie Macha. Zasada Macha postuluje zatem symetryczność i równocześnie asymetryczność początkowej osobliwości. Zdaniem Higbie’go konsekwentnie potraktowana zasada Macha prowadzi do sprzeczności.

Należałoby tu zauważyć, że: 1° rozumowanie Higbie’go zakłada słuszność poglądów Harrisona, które wcale nie są ogólnie przyjętą doktryną; 2° sprzeczność pojawia się przy porównywaniu dwu różnych zasad Macha: zasady Macha głoszącej, że Wszechświat ma być zdeterminowany przez warunki początkowe i zasady Macha w ujęciu SWG.

W związku z zasadą Macha w ujęciu SWG nasuwają się następujące uwagi:

1° Do dziś nie jest znana dokładna i jednoznaczna metoda przedstawiania równań pola w postaci całkowej. Zarówno metody Altshulera, Lynden-Bella, jak i metoda SWG są tylko przybliżone. O niejednoznaczności tych metod wyraźnie świadczy fakt, że ten sam program prowadzi do odmiennych konkluzji: w wersji Altshulera modele Robertsona-Walkera z osobliwościami nie spełniają machowskiego warunku brzegowego, w wersji SWG modele takie są machowskie.

2° Pojawienie się osobliwości w modelu jest własnością wybitnie anty-machowską. Świadczą o tym następujące, znane fakty:

a) W pobliżu osobliwości obecność materii nie wpływa na geometrię czasoprzestrzeni. Np. wszystkie modele kosmologiczne Robertsona-Walkera w pobliżu osobliwości przechodzą w model Einsteina-de Sittera.

²⁴ *Gravitation, an Introduction to Current Research* (prac. zbior.). New York 1962, rozdział 7.

²⁵ J. H. Higbie, jw. s. 103.

²⁶ Tamże.

²⁷ *Galaxy Formation in the Early Universe*. „Monthly Notices of the Royal Astronomical Society” vol. 148: 1970 nr 1 s. 119–130.

b) Warunki twierdzenia Hawkinga-Penrose'a²⁸, produkujące osobliwość (rozumianą jako geodezyjną niezupełność czasoprzestrzeni), są bardzo ogólne, mogą się one realizować przy bardzo wielu fizycznie realistycznych rozkładach materii. Pojawienie się osobliwości „mało zależny” od materii, jest raczej związane z samą strukturą teorii grawitacji.

3° Program SWG jest pewnym postulatem dotyczącym wyboru niektórych modeli kosmologicznych. Postulat ten nie ma jednak wiele wspólnego z oryginalną ideologią Macha-Einsteina i można wątpić w jego przydatność na terenie kosmologii relatywistycznej. Z formalnego punktu widzenia wartościowe wydają się próby zapisania równań pola w postaci całkowej. Nie zostały one jednak, jak widzieliśmy, uwieńczone pełnym sukcesem.

4° Źródła niepowodzeń w zrealizowaniu zasady Macha leżą w pojęciu różniczkowej różniczkowej. Żadna teoria, która przypisuje czasoprzestrzeni strukturę różniczkowej różniczkowej nie może być w pełni machowska²⁹.

Ostatnio do autora niniejszego artykułu dotarła informacja o przygotowanej do publikacji pracy D. J. Raine, rozwijającej w istotny sposób machowski program SWG³⁰.

М. Геллер

ИСТОРИЯ ОДНОГО ПОНИМАНИЯ ПРИНЦИПА МАХА

Развитие физики было тесно связано с развитием идеи относительности. Общая теория относительности не закончила процесса релятивизации физики. Осталась открытой проблема реализации физической модели вполне относительного пространства—времени континуум и связанная с этим проблема относительности инерции. Последнюю проблему обыкновенно связывают с именем Маха. Так называемый принцип Маха является выражением релятивистских тенденций современной физики.

Существует много неэквивалентных способов понимания принципа Маха. Статья представляет эволюцию одной возможной интерпретации Маха в физике на протяжении последних лет. Этой новой интерпретации принципа Маха положила начало работа Д. В. Шямы в 1953 г. (Month. Not. Roy. Astr. Soc. 113: 1953, 34—42.). Автор представил в ней Маховскую векторную модель поля инерции. Поле инерции является (приблизительно) векторным полем, а уравнения этого поля формально имеют форму уравнений Максвелла. Необходимо, однако, заметить, что уравнения Максвелла в пустом пространстве ведут к уравнениям Даламбера, описывающих расхождение безисточниковых волн. Это — компрометирующий анти-маховский эффект,

Ясную программу реализации принципа Маха Шяма описал в двух очередных работах в 1963 и 1964 гг. (Proc. Roy. Soc. Lond. A 273: 1963, 484—495; Rev. Mod. Phys. 36: 1964, 463—494). По этой же самой линии были направлены, написанные независимо друг от друга, но очень похожие работы В. Л. Альтшулера (Журнал экспер. и теор. физики 51: 1966, 1143—1150) и Д. Линден-Белла (Mon. Not. Roy. Astr. Soc. 135: 1967, 413—428). На основе этих работ маховскую интерпретацию общей теории относительности предложили Д. В. Шяма, П. С. Вэйлен, Р. С. Гильман (в сокращении ШВГ) (Pfis. Rev. 187: 1969, 1763—1766), а также Р. С. Гильман (Phys. Rev. 2D: 1970, 1400—1410). Предложенная реализация принципа Маха заключается в:

а) представлении уравнений поля в интегральном виде, б) в определении предпосылок

²⁸ S. W. Hawking, R. Penrose: *The Singularities of Gravitational Collapse and Cosmology*. „Proceedings of Royal Society” vol. A 314: 1970 s. 529—548.

²⁹ Por. M. Heller: *Mach's Principle and Differentiable Manifolds*, jw.

³⁰ Por. M. Reinhardt: *Mach's Principle — A Critical Review*. „Zeitschrift für Naturforschung” Bd 28a: 1973 Heft 3/4 s. 529—537.

существования местного поля инерции, обусловленных: (1) материей, существующей в пространстве-времени, (2) пустым пространственно-временным континуум (безисточниковым полем), (3) космологическим членом (рассматриваемым как источниковый элемент).

Принцип Маха в изложении ШВГ постулирует исчезновение предпосылок (2) и (3). Кроме того, Гильман указал схему классификации известных космологических моделей с точки зрения удовлетворения положениям принципа Маха в трактовке ШВГ.

Концепция ШВГ столкнулась с критикой со стороны Д. Х. Гибги (GRG, 3: 1972, 101—109). Все маховские (в трактовке ШВГ) космологические модели имеют начальную сингулярность без начального гравитационного излучения (симметричная сингулярность). С другой стороны, если стать на точку зрения Гаррисона (асимметрии в распределении масс происходят вследствие малых начальных асимметрий), то в соответствии с принципом Маха эволюция Вселенной детерминирована лишь в том случае, если определены числовые значения начальных асимметрий. А тем самым принцип Маха приводит к противоречию (одновременно постулируя симметрию и асимметрию начальной сингулярности). Необходимо отметить, что противоречие появляется при сравнении двух разных принципов Маха; принципа Маха, гласящего, что Вселенная описывается начальными условиями, и принципа Маха в трактовке ШВГ. Кроме того, теория Гаррисона не является теорией, имеющей сейчас общее признание.

В связи с принципом Маха в трактовке ШВГ возникают следующие замечания.

1. До сегодняшнего дня неизвестны методы точного и однозначного выражения уравнений поля в интегральной форме. О неоднозначности предложенных методов свидетельствует факт, что эта же программа приводит к разным выводам: в варианте Альтшулера модели Робертсона-Уолкера с сингулярностями не удовлетворяют краевым условиям Маха, в варианте ШВГ — это маховские модели,

2. Появление в модели сингулярностей является явно анти-маховским свойством. Как известно вблизи сингулярностей присутствие материи не оказывает влияния на геометрию пространства-времени. Кроме того, условия принципа Хоукинга-Пенрозе, вводящие сингулярность, очень общие и могут осуществляться при очень многих физических реальных распределениях материи. Появления сингулярности „зависят незначительно” от материи.

3. С формальной точки зрения ценными кажутся попытки записать уравнение поля в интегральной форме, хотя эти попытки еще не увенчались полным успехом.

4. Причины неудач в осуществлении принципа Маха кроются в понятии дифференциального многообразия. Теория, приписывающая пространству-времени структуру дифференциального многообразия, не может быть полностью маховской (сравни М. Геллер Acta Phys. Pol., B1: 1970, 131—138).

M. Heller

THE HISTORY OF A CERTAIN UNDERSTANDING OF MACH'S PRINCIPLE

The development of physics is closely associated with the development of the idea of relativity. The general relativity theory did not bring the process of the relativization of physics to an end. The question of constructing a physical model of space — time which would be completely relative and the problem of the relativity of inertia remained open. This latter problem is usually associated with the name of Mach. The so-called Mach's Principle is an expression of the relativistic tendencies in modern physics.

There is a number of non-equivalent ways of understanding Mach's Principle. The article presents the evolution of one of the possible interpretations of Mach's Principle in the physics of the past decades. This new interpretation of Mach's Principle was initiated by the work of D. W. Sciama in 1953 (Month. Not. Roy. Astr. Soc. 113: 1953, 34—42). The author presented Machian vector model of the inertia field. The inertia field is (approximately) a vector field and the equations

of this field have, from formal point of view, the shape of Maxwell's equations. However, one should notice that Maxwell's equations in empty space lead to d'Alembert's equations, describing the propagation of sourceless waves. This is a compromising anti-Mach effect.

Sciama proposed a clear programme of carrying out Mach's Principle in his papers from 1963 and 1964 (Proc. Roy. Soc. Lond. A 273: 1963, 484—495; Rev. Mod. Phys. 36: 1964, 463—494). The papers of B. L. Altshuler (Zhur. eksp. i ter. phys. 51: 1966, 1143—1150) and D. Lynden-Bell (Mon. Not. Roy. Astr. Soc. 135: 1967, 413—428), written independently but very similar, followed the same lines. D. W. Sciama, P. C. Waylen, R. C. Gilman (SWG for short) (Phys. Rev. 187: 1969, 1762—1766) as well as R. C. Gilman (Phys. Rev. 2D: 1970, 1400—1410) proposed a Mach interpretation of the general relativity theory on the basis of those papers. The proposed realization of Mach's Principle consists in: A) presenting the field equations in an integral form, B) distinguishing contributions to the local inertia field originating from a) matter present in space-time, b) empty space-time (sourceless field), c) the cosmological term (which is treated as a source term). Mach's Principle in the interpretation of SWG postulates the disappearance of contributions (b) and (c). Gilman also gave a classification draft of known cosmological models from the point of view of whether they fulfill Mach's Principle in the SWG sense or not.

The SWG conception was criticized by J. H. Higbie (GRG, 3: 1972, 101—109). All Machian (in the SWG sense) cosmological models have an initial singularity without a primordial gravitation radiation (symmetric singularity). On the other hand, if one is to adopt Harrison's opinion (the asymmetries in the present distribution of masses have their source in small initial asymmetries), then, according to Mach's Principle, the evolution of the Universe is only determined if the numeric values of initial asymmetries are defined. Thus Mach's Principle leads to a contradiction (at the same time it postulates symmetry and asymmetry of the initial singularity). One should notice that the discrepancy appears when two *different* Mach's Principles are compared: Mach's Principle states that the Universe is to be determined by the initial conditions and Mach's Principle as interpreted by SWG. In addition, Harrison's theory is not a theory which is generally accepted today.

In connection with Mach's Principle as interpreted by SWG the following comments come to mind:

1° An exact and unique method of presenting field equations in an integral form is not known to this very day. The fact that the same programme leads to various conclusions can testify to the ambiguity of proposed methods: in Altshuler's version the models of Robertson-Walker with singularities do not fulfill Mach's boundary condition, in the SWG version such models are Machian.

2° The appearance of singularities in the model is an outstanding anti-Machian feature. As it is known, in the neighbourhood of singularities the presence of matter does not influence the geometry of space-time. Also the conditions of Hawking-Penrose theorem, producing singularities, are very general; they can be carried out within a number of physically realistic distributions of matter. The appearance of singularities "depends very little" on matter.

3° From the formal point of view attempts to write down field equations in an integral form seem valuable, even if these attempts have not proved to be fully successful.

4° The sources of failures in carrying out Mach's Principle lie in the notion of differential manifold. The theory ascribing the structure of a differential manifold to space-time cannot be fully Machian (see M. Heller, Acta. Phys. Pol., B1: 1970, 131—138).