

ANDRZEJ TRAUTMAN

EINSTEIN A GEOMETRYZACJA FIZYKI

1. Poszukiwanie geometrycznej i jednolitej teorii pól fizycznych odegrało ważną rolę w twórczości Alberta Einsteina. Wkrótce po powstaniu ogólnej teorii względności (1916), Hermann Weyl zaproponował (1918) model geometryczny oddziaływań grawitacyjnych i elektromagnetycznych, stanowiący uogólnienie modelu riemannowskiego, używanego w teorii Einsteina. W r. 1921 Einstein skrytykował teorię Weyla, ale zafascynowało go zagadnienie zbudowania jednolitej teorii, opisującej w języku geometrii różniczkowej pole grawitacyjne i elektromagnetyczne. Temat ten stale podejmował w następnych latach i poświęcił mu całą uwagę w ostatnim okresie życia.

2. Program budowania jednolitej teorii grawitacji i elektromagnetyzmu był wielokrotnie i ostro krytykowany przez fizyków, którzy zarzucali mu, że ignoruje rozwój fizyki po 1935 r., kiedy stało się jasne, iż istnieją podstawowe oddziaływania (słabe i silne), niesprowadzalne do sił grawitacyjnych i elektromagnetycznych. Brakuje ponadto fizycznych argumentów za łączeniem grawitacji i elektromagnetyzmu w jedną całość.

3. Rozwój fizyki w ostatnich latach skłania do nowego spojrzenia na ideę geometryzacji fizyki i uznania jej aktualności. Wydaje się, że wszystkie podstawowe oddziaływania, jakie zna fizyka, wykazują podobieństwa, najłatwiejsze do uchwycenia w języku geometrii różniczkowej. Wylania się możliwość zbudowania jednolitej teorii oddziaływań słabych i elektromagnetycznych (teoria Weinberga-Salama).

4. Postulat geometryzacji fizyki jest dyrektywą metodologiczną, o której słuszności można sądzić jedynie na podstawie osiąganych rezultatów. Zaufanie do tego postulatu opiera się głównie na powodzeniu geometrii Riemanna w teorii grawitacji. Warto wspomnieć, że Einstein został „zmuszony przez fizykę” do przyjęcia modelu geometrycznego zjawisk zarówno w szczególnej, jak i ogólnej teorii względności. Jak wiadomo, czterowymiarowa przestrzeń pseudoeuklidesowa została zaproponowana jako mo-

del czasoprzestrzeni przez Minkowskiego (1908), a nie przez Einsteina, który użył jej po raz pierwszy w pracy opublikowanej w r. 1910.

5. Obok teorii Weyla, w r. 1921 pojawiła się teoria T. Kaluzy proponująca pięciowymiarową geometrię Riemanna jako model grawitacji i elektromagnetyzmu. Teoria ta, rozwinięta i udoskonalona przez O. Kleina, a później przez innych autorów, jest prawidłowa w tym sensie, że zgodna z dobrze ugruntowaną teorią Maxwella, ale nie w pełni zadowalająca, gdyż zbyt mało jednolita.

6. Wszystkie dotychczasowe „rozsądne” teorie fizyczne opierają się na założeniu, że czasoprzestrzeń jest czterowymiarową różniczkową (występuje ona także w teorii Kaluzy-Kleina). Różniczkowość ta niesie dodatkowe struktury, które mogą być „absolutne” (np. czas w teorii Newtona lub metryka Minkowskiego) lub dynamiczne (np. pola podlegające równaniom ewolucji).

7. Elementy metryczne teorii, do których należy zaliczyć czas absolutny, odpowiadają możliwości wykonywania pomiarów odległości, kątów i odstępów czasu. Teoria względności zakłada jeden taki element, a mianowicie tensor metryczny, który jest absolutny w teorii szczególnej i dynamiczny — w teorii ogólnej.

8. Koneksja liniowa jest także strukturą geometryczną, charakterystyczną dla wszystkich teorii czasoprzestrzeni. Odpowiada ona możliwości równoległego przenoszenia wektorów i innych obiektów geometrycznych wzdłuż krzywych w czasoprzestrzeni. Wektor przenoszony równolegle wzdłuż krzywej zamkniętej nie wraca na ogół do położenia wyjściowego: doznaje obrotu w przybliżeniu proporcjonalnego do wielkości powierzchni rozpiętej na krzywej. Pojawiająca się w ten sposób „powierzchniowa gęstość obrotu” jest miarą krzywizny czasoprzestrzeni. Obok krzywizny pojawia się skręcenie, będące „powierzchniową gęstością przesunięcia”.

9. Równania Einsteina wiążą krzywiznę z gęstością energii i pędem materii. Pewna modyfikacja teorii Einsteina, zaproponowana przez Élie Cartana (1922), przewiduje podobny związek między skręceniem i gęstością wewnętrznego momentu pędu (spinu) materii.

10. Koneksja i metryka w teorii Einsteina są zgodne: przeniesienie równoległe zachowuje długość wektorów i kąty między nimi. W teorii Einsteina skręcenie znika; koneksja bez skręcenia, zgodna z metryką, jest w pełni przez tę metrykę wyznaczona. W geometrii Riemanna, będącej podłożem ogólnej teorii względności, wystarczy mówić o tensorze metrycznym: koneksja i krzywizna są wielkościami pochodnymi.

11. Nawiązując do idei Weyla — choć nie do wszystkich szczegółów jego teorii z r. 1918 — można przekonać się, że potencjały pola elektromagnetycznego mają w stosunku do fazy funkcji falowej znaczenie podobne do tego, jakie ma koneksja wobec wektorów: potencjały elektromagne-

tyczne określają zmiany fazy funkcji falowej cząstki naładowanej, poruszającej się w polu elektromagnetycznym. Analogia ta jest dość głęboka i trafna. W szczególności natężenie pola („powierzchniowa gęstość zmiany fazy”) jest odpowiednikiem krzywizny (okazuje się jednak, że nie ma elektromagnetycznego odpowiednika skręcenia). Przekształcenia cechowania są odpowiednikiem zmian układu współrzędnych teorii grawitacji.

12. Uogólniając powyższe spostrzeżenia i analogie dochodzi się do pojęcia nieabelowego pola cechowania, opisującego oddziaływanie między cząstkami o niekoniecznie skalarnych ładunkach. Zamiast fazy i związanej z nią grupy $U(1)$ mamy tu pewną algebrę Liego i odpowiadającą jej grupę; najczęściej jest to jedna z prostych zwartych grup Liego $SO(n)$, $SU(n)$, lub $Sp(n)$. Podobnie jak w elektrodynamice potencjały pola odpowiadają współczynnikom koneksji, a natężenia — krzywiznie. W języku współczesnej matematyki pola cechowania to koneksje określone w wiązkach głównych nad czasoprzestrzenią.

13. Teorie z cechowaniem budzą obecnie duże zainteresowanie, gdyż okazało się, że po skwantowaniu są one renormalizowalne. Ponadto, dzięki tzw. spontanicznemu łamaniu symetrii teorie nieabelowe prowadzą do cząstek wektorowych z masą różną od zera. W elektrodynamice, która jest abelową teorią z cechowaniem, odpowiednia cząstka (foton) ma zerową masę, dzięki czemu siły elektromagnetyczne są długozasięgowe. Cząstki wektorowe z masą są niezbędne do wyjaśnienia krótkozasięgowego charakteru sił jądrowych.

14. Reasumując, wydaje się, że cztery oddziaływania, które prawdopodobnie leżą u podstaw wszystkich zjawisk fizycznych, można opisać za pomocą koneksji, związanych z pewnymi grupami Liego. Dla grawitacji jest to grupa Lorentza, dla elektrodynamiki — $U(1)$, w jednolitej teorii oddziaływań słabych i elektromagnetycznych — $U(1) \times SU(2)$, w teorii oddziaływań silnych, zwanej chromodynamiką — $SU(3)$.

15. Jeśli dalszy rozwój fizyki potwierdzi obecne nadzieje związane z polami cechowania, to tym samym zostanie zrealizowane — choć w zmienionej formie — marzenie Einsteina o geometrycznym ujęciu podstawowych praw przyrody.