H. MERCZYNG,
Profesor zwyczajny.

O ZASADZIE WZGLĘDNOŚCI W POJĘCIU FIZYCZNEM CZASU I PRZESTRZENI.

(HYPOTEZY LORENZA i EINSTEINA).

Szkic z fizyki teoretycznej.

Rzecz wygłoszona na połączonem posiedzeniu Sekcyi nauk ścisłych i filozoficznych XI Zjazdu przyrodników i lekarzy polskich w Krakowie.

Odbitka z „Wszechświata"

Drukarnia L. Bogusławskiego, Ś-tokrzyska 11.
WARSZAWA
—
1912.

Pojęcia czasu i przestrzeni do epoki najnowszej stanowiły wyłącznie przedmiot badań filozoficznych. Dzieje filozofii podają nam cały szereg określeń, zapomocą których różni myśliciele, zaczynając od starożytności przez Kanta aż do chwili współczesnej, starali się wyjaśnić zagadnienie tych „trybów bytowania“. Zupełnie niespodziewanie jednak dwaj badacze fizyczni, najpierw profesor holenderski Lorenz, a następnie rozszerzając i pogłębiając przypuszczenia tego ostatniego młody profesor praski Einstein, wystąpili z hypotezami, dotyczącemi owych pojęć zasadniczych, bardzo zmieniającemi wszystkie dotychczasowe poglądy. Wprawdzie hypotezy Lorenza i Einsteina nie mają pretensyi do prawdy bezwzględnej i są tylko t. zw., w myśl teoryi Macha, hypotezami „roboczemi“, dążącemi do objaśnienia w sposób umysłowo najekonomiczniejszy pewnego szeregu faktów fizycznych; pomimo tego jednak zasługują na największą uwagę nie tylko fizyków, lecz i wszystkich badaczów, których interesują odwieczne zagadki przyrody. Tą powodowani myślą postaramy się poniżej w dostępnym ile możności wykładzie wyłożyć zasadnicze myśli Lorenza i Einsteina i ich stronników [1]).

---

1) Literatura przedmiotu, niezależnie od rozpraw specyalnych Lorenza i Einsteina i ich matematycznego rozwinięcia przez Minkowskiego, jest nawet w t. zw. popularnej literaturze bardzo znaczna. Nie możemy jednak nie zauważyć, że wielcy mistrze nauki, jak Poincaré i inni, w swych rozprawach „popularyzacyjnych" nie zawsze mogą być zrozumiani przez zwykłego czytelnika. Przytaczamy tu jednak najważniejsze z rozpraw rzeczonych:

W. Wien. Ueber Elektronen, rozdział Relativitaetstheorie, zdaniem naszem najdostępniejszy wykład przedmiotu (Lipsk 1909).

Henryk Poincaré. La nouvelle Mécanique, odczyt w Berlinie 1910 r.

E. Cohn. Physikalisches über Raum und Zeit, odczyt w Strasburgu 1910.

Berg. Das Relativitaetsprinzip der Elektrodynamik. Getynga 1910.

Planck. Vorlesungen über theoretische Physik. Lipsk 1910, prelekcya ósma.

Bardzo dostępny wykład teoryi względności opracował także rodak nasz, p. Białobrzeski, w Ki-

I.

Już dawno badacze zwrócili uwagę na fakt, że jeśli t. zw. „eter“ czyli konieczne podścielisko zjawisk świetlnych i elektrycznych (w myśl teoryi Maxwella) nie jest bezpośrednio związany z ciałami materyalnemi i jeżeli ziemia np. nasza w ruchu swym w przestrzeni przesuwa się, to eter „przestrzeniowy“ przechodzi przez cząstki materyalne jak woda przez klatkę np. kąpielową pogrążoną w prąd rzeczny. Jeżeli jednak przyjmiemy tę hy-

---

jowskim „Przeglądzie fizycznym“ (1910 roku) w języku rossyjskim.

Pierwsze hypotezy Lorenza (skracanie ciał pod wpływem ruchu) ogłoszone zostały już 1892 roku, w rozprawach Akademii niderlandzkiej nauk i zostały przez nas zreferowane w ogłoszonem w „Ateneum“ 1892 r. studyum „Eter“, a następnie przedrukowane w naszych „Dumaniach przyrodnika“. Warszawa 1900.

Hypotezy Einsteina w jego własnym wykładzie znajdzie czytelnik w Zeitschrift für Radioaktivitaet und Elektronik w 1907 i współczesnych Annalen der Physik. Matematyczne uzupełnienia Minkowskiego w jego Die Grundgleichungen der Elektrodynamik für bewegte Körper (Goettinger Nachrichten 1908) i tegoż autora „Raum und Zeit“.

potezę (przeciwnej hypotezie, że cząstki eteru są unoszone razem z ważką materyą w jej ruchu, przeczy szereg bezpośrednich doświadczeń), to, zdawało się, możnaby obmyśleć doświadczenia, zapomocą których byłoby możliwem oznaczyć absolutny kierunek ruchu w przestrzeni. Doświadczenie takie, znane w teoryi optyki, polega na następujących podstawach.

Jeżeli eter względem ciał materyalnych będących w ruchu jest w stanie bezwzględnego spokoju, to promień świetlny, biegnący w kierunku np. ruchu ziemi i w kierunku wprost przeciwnym temu ruchowi, wymaga różnego czasu do przebieżenia tej samej odległości na ziemi. Rzeczywiście, jeżeli chyżość ziemi w jej ruchu jest v, prędkość rozszerzania się światła c, to czas potrzebny, by promień światła przeszedł przestrzeń odmierzoną na ziemi a będzie w pierwszym przypadku $t_1 = \frac{a}{c-v}$, w drugim $t_2 = \frac{a}{c+v}$, przyczem c jest zawsze większe od v. (Dla ruchu ziemi koło słońca $v : c = 1/_{10\,000}$). Oczywiście zatem, że czas przebiegu promienia w kierunku ruchu t_1 będzie zawsze większy niż w kierunku wprost przeciwnym.

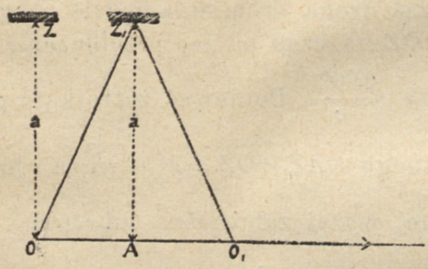
By ten prosty wynik algebraiczny fizycznie sobie uwidocznić, co jest konieczne dla zrozumienia dalszego wykładu naszego, wyobraźmy sobie, że ziemia jest, zgodnie z hypotezą zasadniczą, klatką, która, w ruchu swym przez eter, swobodnie przezeń przechodzi. Rozchodzenie się światła wyobraźmy jako prąd wody, w której porusza się nasza klatka z szybkością v zawsze mniejszą od szybkości światła c, t. j. naszego prądu wody. Jest rzeczą jasną, że czas, który będzie potrzebny, by woda przepłynęła od jednej ściany klatki do drugiej, jeżeli klatka bieży równolegle z prądem, będzie tem mniejszy im prędzej przemieszcza się klatka i równy $\frac{a}{c-v}$. Jeżeliby klatka biegła z szybkością równą prądowi ($c=v$), to czas ten stałby się nieskończenie wielkim, co jest oczywiste, gdyż w tym przypadku cząsteczki wody będą zawsze w jednakiej odległości od ścianek klatki i przesunięcie się względne jest niemożliwe. Oczywiście także, że gdy klatka bieży przeciw prądowi czas będzie tem krótszy, im większe v i wogóle równy $\frac{a}{c+v}$.

Zasadnicze te pojęcia, przeniesione na zjawiska świetlne, pouczają nas, że jeżeli z określonego źródła światła wyślemy promień w kierunku ruchu ziemi i następnie w odległości a ustawimy zwierciadło, które promień ten odbije w kierunku przeciwnym ruchowi ziemi, to promień na tę podwójną drogę zużyje czas (jeżeli zachowamy poprzednie znakowanie) równy $t = t_1 + t_2 =$

$$a\left(\frac{1}{c-v} + \frac{1}{c+v}\right) = \frac{2ac}{c^2-v^2} =$$

$$= \frac{2a}{c\left\{1-\frac{v^2}{c^2}\right\}} \quad \ldots \text{I)}$$

Wyobraźmy sobie, że niezależnie od promienia wysyłanego w kierunku ruchu Ziemi i z powrotem, będziemy badali promień z tego samego ogniska, wyrzucony w kierunku prostopadłym do ruchu Ziemi. Promień taki niechaj również spotka zwierciadło, znajdujące się w odległości a od ogniska, i zostanie odbity i zwrócony do miejsca wysłania, t. j. do tegoż ogniska. Łatwo zauważyć, że jeżeli ziemia jest w ruchu, to z nią razem i zwierciadło. Wskutek tego promień prostopadły po przejściu przestrzeni a $(=OZ)$, już tam zwierciadła nie za-stanie (przejdzie ono do Z_1) i nie zostanie odbity. Lecz ognisko promieniuje



Z O pierwotne położenie zwierciadła i ogniska. Z_1 i O_1 położenie zwierciadła i ogniska: pierwsze po upływie czasu, gdy promień przejdzie drogę OZ_1 i drugie po przejściu drogi $OZ_1 + Z_1O_1$.

we wszystkie strony, i dlatego jeden z promieni, OZ_1, trafi na zwierciadło i będzie odbity. Będzie to oczywiście taki promień, który przejdzie przestrzeń OZ_1 w tym samym czasie, gdy zwierciadło z Ziemią przejdzie przestrzeń $ZZ_1 = OA$. Lecz przestrzenie te, przebiegane w jednym czasie przez dwa różnej chyżości działania (ruch Ziemi i bieg światła), będą w stosunku prostym do odpowiednich chyżości, t. j.

$$\frac{OA}{OZ_1} = \frac{v}{c}.$$

Z drugiej strony odbity promień światła przejdzie do O_1 drogę $O_1Z_1 = OZ_1$, całkowita zaś droga promienia będzie oczywiście $2OZ_1$, a czas na jej przebieżenie potrzebny $\frac{2OZ_1}{c}$. Ponieważ z trójkąta prostokątnego OAZ_1, $\overline{OZ_1}^2 = a^2 + \overline{OA}^2$, a z przytoczonej wyżej zależności $OA = OZ_1 \cdot \frac{v}{c}$

więc $\overline{OZ_1}^2 = a^2 + \overline{OZ_1}^2 \cdot \frac{v^2}{c^2}$ i $OZ_1 = \frac{a}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$,

czas zaś potrzebny na przebieżenie przez światło przestrzeni $2OZ_1$ z chyżością c będzie:

$$t' = \frac{2a}{c\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad \ldots \text{II)}$$

Wzory I) i II) są podstawowe dla wyjaśnienia hypotezy względności przestrzeni i czasu, do której objaśnienia obecnie przystępujemy. Wskazują one, że na znajdującym się w ruchu ciele materyalnem czas potrzebny dla przebieżenia tam i napowrót tej samej przestrzeni a przez promień w dwu różnych przypadkach — równolegle lub prostopadle do kierunku biegu jest różny i w drugim przypadku jest mniejszy niż w pierwszym

$$(t = \frac{2a}{c\left\{1 - \frac{v^2}{c^2}\right\}} \qquad t' = \frac{2a}{c\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$$

ponieważ $\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} < 1$ (bo $v < c$),

więc zawsze $\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} > 1 - \frac{v^2}{c^2}$,

i $t' < t$).

Zanim przejdziemy do wyników z dopiero co wyprowadzonego wniosku, musimy zauważyć, czy wogóle różnica tych czasów nie jest znikomo mała. By tak ile możności nie było, należy wybrać stosunek $\frac{v}{c}$ i odległość a możliwie wielkie. Najszybszy ruch materyalny, jaki mamy w doświadczeniu do rozporządzenia, jest to ruch Ziemi około Słońca, około 30 kilometrów na sekundę. Wobec szybkości światła 300 000 kilometrów na sekundę daje to $\frac{v}{c} = \frac{1}{10\,000}$, jak już wyżej wspomniano. Nietrudno zauważyć, że

$$t' = t\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} = Kt, \text{ gdzie } K =$$

$$= \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} < 1$$

Dla nieznacznych wartości $\frac{v}{c}$ mamy w przybliżeniu $K = \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} =$ $= 1 - \frac{1}{2} \frac{v^2}{c^2}$, t. j. dla $\frac{v}{c} = \frac{1}{10^4}$ $K = 1 - \frac{1}{2} \frac{1}{10^8}$ czyli czas przebiegu światła na ziemi równolegle do jej biegu jest o $\frac{1}{200\,000\,000}$ dłuższy niż prostopadle do tegoż biegu. Jest to bardzo niewiele, jednakże może być już zmierzone w razie zastosowania dzisiejszych środków obserwacyjnych i wielkości a znacznej, porządku kilkunastu kilometrów. Podobny pomiar został dwa razy uskuteczniony przez uczonego amerykańskiego Michelsona, pierwszy raz w roku 1881, drugi raz 1887 r. razem z Morleyem, i obecnie poraz trzeci przez jednego z badaczów angielskich. Samo doświadczenie polega na t. zw. interferencyi promienia równoległego z prostopadłym. Z wyliczonego powyżej spóźnienia można bez trudności znaną w optyce drogą obliczyć przesunięcie pasm interferencyi, które łatwo mogą być bezpośrednio spostrzegane. Otóż wszystkie trzy razy otrzymano rezultat najzupełniej negatywny. Najszczegółowsze badania nie dały żadnej różnicy dla promienia równoległego i prostopadłego, t. j. fakty zaprzeczyły wszystkim poprzednim wywodom [1]).

II.

W takim stanie rzeczy znakomity fizyk holenderski H. A. Lorenz wygłosił w 1892 roku hypotezę, że niezgodność doświadczenia Michelsona z wnioskami teoryi polega na tem, iż wszystkie rozciągłości ciał materyalnych na ciele będącem w ruchu i dla obserwatora, na niem się znajdującego, podczas przejścia od położenia prostopadłego względem kierunku ruchu do położenia równoległego zmieniają się w stosunku $1 : \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} = \frac{1}{K}$; ponieważ doświadczenie uczy, że $t = t'$ (wzory I i II),

[1]) W rzeczywistości Michelson w doświadczeniu 1887 r. otrzymał pewne odchylenie, lecz 20 razy mniejsze od wymaganego przez teoryę i znajdujące się w granicach błędów doświadczenia.

więc być to może tylko wtedy, gdy a w t' będzie inne, niż w t, i, mianowicie, oznaczając odległość a w t' przez a', wobec

$$t = \frac{2a}{c\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)} \text{ i } t' = \frac{2a'}{c\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

będziemy mieli

$$a = a' \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} = Ka' \ . \ . \ . \text{ III}),$$

t. j. gdy wszystkie rozciągłości, przechodząc z kierunku prostopadłego względem ruchu do równoległego, będą zmniejszone w stosunku $\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} = K$.

Teoretycznie oczywiście nie ulega najmniejszej wątpliwości, że jeżeli hypoteza Lorenza jest fizycznie słuszna, to niezgodność doświadczenia z teoryą jest najzupełniej wyjaśniona. Czy jest ona jednak możliwa fizycznie i czy nie prowadzi za sobą jeszcze jakich innych wniosków, mogących nas posunąć jeszcze dalej w sferze domniemań?

Przypuszczenie Lorenza, że rozciągłość ciał będących w ruchu zależy od chyżości ruchu, jest czemś zupełnie nowem dla umysłów, które wyrosły w innych pojęciach. Ponieważ każda cząstka materyalnego wszechświata jest w ruchu, więc pojęcie rozciągłości staje się zupełnie względnem. Bezwzględna wartość rozciągłości może istnieć tylko w stanie bezwzględnego spokoju, a zatem jest dla nas zupełnie niedościgła. Obserwatorowie na różnych ciałach niebieskich różnie oceniać będą te same rozciągłości. Obserwator na Słońcu naprzykład oznaczy w mierze swej tę samę przestrzeń inaczej, niż obserwator na Ziemi i t. d.

Drugą trudność stanowi (co wskazuje szczególniej Poincaré), iż rzeczony stosunek, w którym każde rozciągłe ciało na Ziemi zmienia swe rozmiary w razie zmian położenia, jest jednaki i równy $K = \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$ dla wszystkich ciał materyalnych, bez względu na ich naturę fizyczną...

Jeżeli nareszcie zwrócimy się do wielkości liczebnej owego skrócenia, to wynosi ono dla Ziemi, jak wyżej obliczono, $^1/_{200\,000\,000}$. Stanowi to, dla całej średnicy Ziemi (ok. 13 500 kil.) w przybliżeniu $\frac{13,5}{200}$ metra, tj. wielkość około dwu cali[1]),

[1]) Rachunek ten ogłosiliśmy jeszcze w roku 1893 w naszej rozprawie p. t. „Eter“ (Ateneum).

na jaką określony promień Ziemi się skraca w czasie od południa do zachodu Słońca i rozszerza od zachodu do północy. I każde narzędzie miernicze, każdy łokieć lub metr na Ziemi, każda rozciągłość przechodzi przez te same zmiany. Są to jednak dla stosunku biegu Ziemi do biegu światła $\left(\frac{v}{c} = \frac{1}{10\,000}\right)$ zmiany nader nieznaczne. Jakież one jednak będą dla większych chyżości? Zupełnie elementarnym arytmetycznym rachunkiem otrzymać można następującą tabliczkę:

			skrócenie wyn.
Dla	$\frac{v}{c} = \frac{1}{10\,000}$	tj. $v = 30$ *km*|sek.	$\frac{1}{200\,000\,000}$
„	„ $= \frac{1}{7}$	„ $v = 40\,000$ „	$\frac{1}{100}$
„	„ $= \frac{1}{4}$	„ $v = 75\,000$ „	$\frac{1}{33}$
„	„ $= \frac{1}{2}$	„ $v = 150\,000$ „	$\frac{1}{8}$
„	„ $= \frac{3}{4}$	„ $v = 225\,000$ „	$\frac{1}{3}$
„	„ $= 1$	„ $v = 300\,000$ „	1

W tym ostatnim przypadku, niemożliwym fizycznie, rozmiar ciała równolegle do kierunku biegu powinien znikać zupełnie. Ponieważ jestto niemożliwe więc $v < c$, t. j. żadne ciało fizyczne nie może się poruszać z szybkością równą chyżości światła. Wniosek ten znajdziemy potwierdzony następnie i na podstawie innych względów.

Zobrazować jednak fizycznie hypotezę Lorenza będziemy mogli aż wtedy, gdy zapoznamy się z jej dalszem rozwinięciem na pojęcie czasu, co zawdzięczamy dopiero Einstenowi.

III.

Każde oznaczenie trwania czasu polega na możności oznaczenia jednoczesności dwu zjawisk. Jeżeli np. chcę sprawdzić bieg dwu zegarów znajdujących się w dwu różnych miejscach, to powinienem, gdy na pierwszym z nich przypuśćmy jest 12-sta, dać sygnał np. akustyczny wystrzałem z działa. Jeżeli odległość drugiego zegara jest niezbyt znaczna (tak, że sygnał może być usłyszany) i znana, to w chwili, gdy właściciel drugiego zegara usłyszy wystrzał, będzie rozumował, że zegar nastawić należy na 12 + tyle sekund, ile dźwięk potrzebował na przebieżenie przestrzeni między zegarami. Jeśli ta przestrzeń była np. 3 kilometry, i jeśli w chwili usłyszenia sygnału na 12, drugi zegar będzie wskazywał 12^h 10 sek., obserwatorowie będą mieli pewność, że zegarki ich będą w danej chwili mieć wskazanie jednakie, synchronistyczne. Jeżeli jednak dla uregulowania zegarów na znaczniejszych odległościach wypadnie użyć innego środka, np. prądu elektrycznego lub sygnału świetlnego, to rzecz staje się bardziej skomplikowaną, gdyż czas przebiegu wysiłów eterowych jest, jakeśmy już wyżej widzieli, w zależności od szybkości i kierunku biegu ciał materyalnych.

Wyobraźmy sobie, że gdy na zegarze *A* mamy 12-stą, dajemy sygnał świetlny obserwatorowi zegaru w *B*, przyczem kierunek sygnału jest zgodny z ruchem Ziemi, t. j. *B* jest od *A* położone w stronę biegu ziemskiego [1]) w danej chwili. Dla oznaczenia jednoczesności wypadnie przesłać sygnał od *A* do *B* i (odbiwszy go tam np. od zwierciadła) powrócić do *A*. Przypuśćmy, że na tę podwójną drogę (od *A* do *B* i od *B* do *A*) światło zużyje 10 sekund, które obserwator w *A* zmierzy na swym zegarze. Wtedy rozumować będzie (ponieważ wpływ ruchu Ziemi nie może być dostrzeżony, zgodnie ze zjawiskiem Michelsona), że obserwator w *B*

---

[1]) Wszystkie miejscowości położone na wschód od danej będą w nocy wyprzedzały daną miejscowość w ruchu koło Słońca, a we dnie biedz będą poza nią.

otrzymał sygnał po upływie połowy 10 sekund, a zatem dla otrzymania jednoczesności należy, by zegar w B wskazywał 12^h 5 sek., gdy sygnał nadejdzie do B, a w A 12^h 10 sek., gdy sygnał powróci do A. W takim razie obserwatorowie ziemscy będą przekonani, że zegary ich mają wskazania równoczesne. W rzeczywistości jednak dla obserwatora nieruchomego wskazania owych zegarów nie będą takiemi. Już wyżej widzieliśmy, że dla takiego obserwatora trwanie biegu promienia w kierunku ruchu $\left(\frac{a}{c-v}\right)$ jest dłuższe, niż w kierunku przeciwnym $\left(\frac{a}{c+v} < \frac{a}{c-v}\right)$. Stąd wynika, że od A do B nie jest ono połową 10 sek., lecz więcej niż połową, np. 6 sek., a od B do A mniej niż połową, np. 4 sek. Wskutek tego, gdy zegary w A i B są nastawione, jak wyżej wskazano, t. j. gdy B, w chwili otrzymania sygnału, nastawiono na 12^h 5 sek., w rzeczywistości dla nieruchomego obserwatora było już w B 12^h 6 sek., t. j. dany zegar w B spóźnia się o 1 sek. i wogóle zegary nastawione na podstawie sygnałów eterowych (świetlnych lub elektrycznych) spóźniają się względem czasu obserwatora nieruchomego, w porównaniu z zegarami w miejscach znajdujących się poza niemi w kierunku ruchu, i odwrotnie. Nietrudno łatwym rachunkiem ocenić wielkość tej różnicy w zależności od stosunku $\frac{v}{c}$, stosunku chyżości ruchu do prędkości światła. Jest rzeczą oczywistą, że różnica owa jest połową różnicy czasów zużytych na przebieżenie drogi w jednę i drugą stronę (w naszym przykładzie 1 sek. $= \frac{1}{2}$ (6 — 4)), t. j. szukana różnica $\Delta t = \frac{1}{2}\left\{\frac{a}{c-v} - \frac{a}{c+v}\right\} =$

$$= \frac{a}{2}\left\{\frac{1}{c-v} - \frac{1}{c+v}\right\} = \frac{av}{c^2\left\{1 - \frac{v^2}{c^2}\right\}}.$$

Ponieważ jednak, zgodnie z poprzednio wyłuszczoną hypotezą Lorenza, wszystkie rozciągłości równoległe do kierunku ruchu skracają się o $\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$, tu zaś mamy właśnie zjawisko równoległe do ruchu, zatem zamiast a należy podstawić $a\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$, i wtedy ostatecznie

$$\Delta t = \frac{av}{c^2 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{av}{Kc^2} \ldots . \text{IV)}$$

Nietrudno stąd np. obliczyć, jakiego porządku wielkości jest granica możności regulowania dwu zegarów na Ziemi. Biorąc największą odległość np. transmisyi fal elektrycznych (telegraf bezdrutowy)

$a = 5\,000$ *km*, wobec $\frac{v}{c} = {}^1/_{10\,000}$,

mamy $\Delta t = \frac{av}{c^2} \left(1 + {}^1/_2 \frac{v^2}{c^2}\right) =$

$= \frac{a}{c} \cdot {}^1/_{10\,000} \left(1 + {}^1/_2 \cdot {}^1/_{10^8}\right) = {}^1/_{60} \cdot {}^1/_{10^4} =$

${}^1/_{600\,000}$ sek.

Widzimy więc, że granica oznaczenia jednoczesności dwu wypadków na Ziemi, leży znacznie niżej, niż dają nam możność zauważyć to najczulsze chronometry. Jeżeliby Ziemia jednak biegła około Słońca 1 000 razy chyżej, to granica oznaczenia jednoczesności byłaby znacznie wyższa, ${}^1/_{600}$ sekundy dla tego samego wypadku.

Tylko co wyjaśniona względność pojęcia jednoczesności pozwala nam wyraźniej uwidocznić pierwszy postulat Lorenza, skracania rozciągłości ciała ruchomego wzdłuż ruchu. Wyobraźmy sobie [1], że dwaj obserwatorowie oddaleni jeden od drugiego o *a* jedności rozciągłości chcą zmierzyć tę rozciągłość na skali bezwzględnej nieruchomej, np. przytwierdzonej do „niebios“. Na czem polega proces mierzenia ciała ruchomego względem skali nieruchomej? Na tem, by obserwatorowie stojący u końców owego ruchomego *a* jednocześnie zauważyli, jakim wskazaniom skali nieruchomej odpowiada początek i koniec mierzonego *a*. Ponieważ jednak jednoczesność, w myśl powyższego na ciele ruchomem jest tylko względna, więc obserwator na końcu *a* postawiony (licząc „koniec“ w kierunku ruchu), którego zegar spóźnia się względem zegara na początku *a*, zapisze swe wskazanie później niż należy, t. j. rozciągłość zmierzona na skali nieruchomej bezwzględnej okaże się dłuższą, niż ta sama odległość odmierzona na tejże skali przez nieruchomego obserwatora, dla którego jednoczesność zachowuje pojęcie bezwzględne i który zatem na tej

---

[1]) Obraz ten jest z pewnemi modyfikacyami zaczerpnięty z Cohna „Physikalisches über Raum und Zeit.“.

samej skali nieruchomej odetnie odpowiednią długość w czasie właściwym, t. j. krótszym, a zatem otrzyma ją mniejszą. Tym więc sposobem nieruchomy obserwator w ciele względem niego ruchomem zauważy skrócenie wszystkich rozciągłości równoległych do kierunku ruchu. Rozciągłości zaś do kierunku ruchu prostopadłe, ponieważ dla nich wskazania czasu są jednakie, zmianie dla nieruchomego obserwatora nie ulegną. Tym sposobem np. krzyż znajdujący się na Ziemi i zdający się być równoramiennym dla obserwatora na Ziemi, będzie dla obserwatora na Słońcu wydawał się nierównoramiennym, a mianowicie ramię do kierunku ruchu prostopadłe będzie obserwatorowi słonecznemu wydawało się dłuższem niż równoległe. Jest rzeczą także oczywistą, że obserwator będący w ruchu zauważyć swego „własnego“ skrócenia nie może, gdyż wszystkie skale ruchome, na których on tylko pomiar uskutecznić może, ulegają tej samej zmianie, jak i odległość mierzona.

Lecz nietylko bieg zegarów nie jest jednoczesny na ciele, które się porusza. Einstein zwrócił uwagę na jeszcze jeden wniosek ze zjawiska Michelsona, a mianowicie, że i bieg tych zegarów jest na ciele ruchomem różny od biegu zegarów pozostających w spokoju, t. j. samo określenie przeciągłości czasu jest inne na ciele ruchomem aniżeli na ciele w spokoju, a samo pojęcie czasu staje się względnem, jak już u Lorenza pojęcie rozciągłości przestrzennej.

By ilustrować ten ostatni, może najważniejszy, wniosek teoryi względności, zauważymy, że podstawą tej teoryi jest fizyczna niemożliwość wykazania doświadczeniem na ciele ruchomem (zjawisko Michelsona) wpływu na zjawiska np. optyczne (i wszelkie inne) ruchu ciała. Ponieważ, jakeśmy wyżej widzieli, promień przebiegający w kierunku ruchu i z powrotem przestrzeń $2a$ zużywa na to czas

$$\frac{2a}{c\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)},$$ i, ponieważ zgodnie z hypotezą Lorenza, w kierunku ruchu rozciągłość przestrzenna skraca się z a do

$$a\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}},$$ więc czas potrzebny promieniowi do przebieżenia wspomnianej przestrzeni na ciele ruchomem będzie

$$t_r = \frac{2a}{c} \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{2a}{cK}.$$

Jeżeli zaś ciało się nie porusza, czas będzie oczywiście ($v = 0$)

$$t_n = \frac{2a}{c}$$

Zatem, by niemożna było zauważyć z obserwacyi biegu promieni kierunku ruchu, trzeba, aby czas t_r na zegarach ruchomych był odczytaniem jednaki jak czas t_n, któryby te same zegary wskazały, gdyby ciało się zatrzymało (lub gdyby np. mierzono czas promienia prostopadłego do kierunku ruchu). By zaś tak było, jak widać z odpowiednich wzorów, trzeba, by (ponieważ $t_r > t_n$, bo $K < 1$) godzina np. zmierzona na zegarze ruchomym była w rzeczywistości dłuższa niż na zegarze nieruchomym. Przedłużenie to jest naturalnie nadzwyczajnie małe, i tylko przez długie okresy astronomiczne mogłoby być wykryte [1]). Znaczniej-

---

[1]) Poincaré wspomina, że zastosowanie teoryi Einsteina do obliczenia pewnych niezgodności z obserwacyą ruchów planety Merkurego wprawdzie dało poprawkę tego samego znaku, jakiego wymagały obserwacye, lecz otrzymana wartość liczbowa (5″) była znacznie mniejsza od wymaganej (38″).

sze zmiany w naszych określeniach czasu wymagają szybkości niezmiernie wielkich. Ażeby trwanie godziny określonej na Ziemi równało się 40 minutom oznaczonym dla tegoż trwania czasu przez obserwatora nieruchomego, trzeba, by $K = {}^2/_3$, co odpowiada chyżości 225 000 kilometrów na sekundę, którąby w takim razie Ziemia mieć musiała.

IV.

Aby otrzymane dotychczas wnioski oświetlić i ocenić, pozwalamy sobie jeszcze raz zamieścić ich możliwie zwięzłe streszczenie. Opierając się na negatywnym wyniku zjawiska Michelsona i przypuszczając, że istnieje niemożliwość wykazania wpływu ruchu jednostajnego ciał w biegu będących na odbywające się na nich procesy eterowe (świetlne, elektryczne i t. d.), stronnicy teoryi względności przyjmują:

a) że każda rozciągłość materyalna na ciele w ruchu będącem, równolegle do kierunku ruchu, dla nieruchomego obserwatora skraca się w stosunku

$K = \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$. Tym sposobem np. dla obserwatora na Słońcu dwie równej długości dla ziemskiego obserwatora na krzyż złożone belki, nie tworzą krzyża równoramiennego; sama Ziemia zdaje się ma być spłaszczoną w kierunku swej orbity i jeżeliby ten obserwator słoneczny posiadał narzędzia dostatecznej siły to mógłby to skrócenie wynoszące $^1/_{200\,000\,000}$ zmierzyć;

b) pojęcie jednoczesności dwu faktów staje się iluzorycznem. To, co się nazywa jednoczesnością na ciele w ruchu będącem, będzie jednoczesnością pozorną czasów miejscowych i będzie zależało od szybkości ruchu;

c) trwanie czasu między dwoma faktami jest inne, mierzone przez obserwatora nieruchomego niż przez ruchomego. Dla pierwszego godzina na jego zegarze jest krótsza niż godzina drugiego. Pomiar czasu staje się względnym, jak w myśl a) i pomiar przestrzeni.

Takie niezwykłe wnioski wyprowadzono ze zjawiska Michelsona. Czy jednak mamy już potwierdzenie doświadczalne tego wszystkiego i czy oprócz przytoczonych niema jeszcze innych danych, któreby jeszcze bardziej radykalnie zmieniły nasz pogląd na świat?

Zaczynając od ostatniego pytania musimy przedewszystkiem zauważyć, że wyniki Lorenza i Einsteina rozwinął dalej w czysto matematycznym kierunku Herman Minkowski (1908). Nie możemy tu w popularnym wykładzie rozwinąć jego analizy; zauważymy tylko, że hypoteza względności wymaga, by wprowadzając do równań Maxwellowskich elelektromagnetyczne wartości współrzędnych, zależne od ruchu, otrzymać znowu zasadnicze równania wyprowadzone dla ciał będących w spoczynku. Przytoczone wyżej przypuszczenia Lorenza i Einsteina są fizyczną ilustracyą tego postulatu. Otóż Minkowski dowiódł, że przechodząc od trójwymiarowych spółrzędnych do czterowymiarowych, przyczem za 4-ty wymiar uważa on czas, można rzeczone transformacye dokonywać w sposób bardzo prosty. Wartość, zależną od 4 zmiennych: 3 spółrzędnych i czasu, Minkowski uważa za „punkt światowy“ (Weltpunkt), takie punkty tworzą następnie linie światowe i t. d.

Pozostawiając jednak na stronie te spekulacye czysto matematyczne, musimy zwrócić uwagę jeszcze na kilka innych wniosków z teoryi Einsteina, mających znaczenie fizyczne i mechaniczne.

Z teoryi tej między innemi wypada, że dla obserwatora nieruchomego (np. słonecznego, obserwującego zjawiska na Ziemi) nie ma zastosowania znane prawidło cynematyczne równoległoboku sił. Jeżeli u' będzie szybkość ciała mierzona np. na Ziemi, u ta sama szybkość mierzona ze Słońca (t. j. przez nieruchomego obserwatora), to, gdy szybkość ta u jest równoległa do v, zwykła mechanika dałaby nam zależność

$$u_s = u' + v, \ldots.$$

nowa zaś daje wyrażenie [1])

$$u_n = \frac{u' + v}{1 + \frac{u' v}{c^2}}$$

---

[1]) Transformacye matematyczne dla otrzymania tych wzorów są bardzo proste. Jeżeli mamy dwa systemy współrzędnych S ze zmiennemi x, y, z i czas w min. liczony t, oraz S' ze zmiennemi x', y', z' i czasem t', przyczem S' porusza się względem S z chyżością v równoległą do osi xx (lub, co jedno i to samo, S względem S' z chyżością $-v$), to zasada względności wymaga

a) wyrażenia matematycznego, że światło w obu systemach rozszerza się kulisto, t. j. z je-

t. j. $u_n < u_s$, szybkości nie sumują się algebraicznie. Stąd Einstein wyprowadza niemożność ruchu szybszego niż światło dla ruchomego obserwatora. Niechby $u' = U > c$, wtedy (przyjmując ruch ciała z szybkością $- v$)

---

dnaką szybkością we wszystkich kierunkach. Stąd warunki

$$x^2 + y^2 + z^2 = c^2 t^2$$
$$x'^2 + y'^2 + z'^2 = c^2 t'^2.$$

b) Spółrzędne i czas w jednym systemacie powinny być tak wyrażone przez spółrzędne i czas w drugim systemacie, że

ba) równania powyższe przez podstawienie przechodzą jedno w drugie,

bb) w razie zastąpienia w owych zależnościach spółrzędnych v przez $- v$ powinniśmy otrzymać symetrycznie przejście od systematu S do S' i odwrotnie. Warunkom tym odpowiadają wzory

$$t = K \left(t' + \frac{v}{c^2} x'\right);\ t' = K \left(t - \frac{v}{c^2} x\right)$$
$$x = K (x' + vt');\ x' = K (x - vt)$$
$$y' = y;\ z' = z \text{ wobec } K = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}.$$

Stąd łatwo już otrzymać wyrażenie przytoczone w tekście dla chyżości $U_n = \frac{x}{t} =$

$$= \frac{x' + vt'}{t' + \frac{v}{c^2} x'} = \frac{u' + v}{1 + \frac{v}{c^2} u'},$$ jak wyżej.

$$u_n = \frac{U - v}{1 + \frac{Uv}{c^2}}.$$

Dla przejścia przestrzeni np. a, potrzebnyby był wtedy czas

$$t = \frac{a}{u_n} = \frac{a\left(1 - \frac{Uv}{c^2}\right)}{U - v}.$$

Ponieważ $\frac{U}{c} > 1$, więc zawsze można wybrać taką szybkość v systematu, w którym obserwujemy zjawisko, iżby

$$\frac{U}{c} \cdot \frac{v}{c} > 1$$

a wtedy $t < 0$, t. j. zanim zjawisko się zaczęło, już ruch był skończony. Ponieważ to jest logicznie niemożliwe, więc $u' < c$, nie może być ruchu szybszego od światła.

Ten ostatni wynik jest tak charakterystyczny, że musimy przy nim się jeszcze nieco zatrzymać.

Przedewszystkiem kwestya charakteru czysto arytmetycznego. Jeżeli nie możemy mieć szybkości $> c$, t. j. 300 000 *km*, to możemy jednak zrealizować szybkość np. 200 000 *km*, a wtedy, wyobrażając sobie, że nasz obserwator porusza się z tą chyżością, przedstawić sobie drugie ciało materyalne biegnące z chyżością także 200 000 *km* względem obserwatora. Wówczas jakgdyby jest możność otrzymania względnej szybkości 400 000 $km > c$. Nieprawidłowość tego wniosku można już wyprowadzić z poprzednich wzorów. Pamiętać należy przedewszystkiem, że teorya utrzymuje, iż dla danego obserwatora nie może istnieć ruch względem niego szybszy niż c. Jeżeli więc nieruchomy obserwator widzi dwa ruchy przeciwne, a chyżość każdego z nich jest 200 000 *km*, to stąd nie wypływa, żeby dla obserwatora w jednym z tych ruchów drugi odbywał się z chyżością względną 200 000 *km* + 200 000 *km* = 400 000 *km*. By tę chyżość względną otrzymać, trzeba zastosować nasz wzór $u_n = \dfrac{u' + v}{1 + \dfrac{u' v'}{c^2}}$, który rozwiązując względem u' otrzymamy $u' = \dfrac{u - v}{1 - \dfrac{uv}{c^2}}$

gdzie u i v prędkości obudwu ruchów dla nieruchomego obserwatora, równe każdy 200 000 $km = \frac{2}{3}\, c$ i znakiem przeciwne; u' szukana szybkość ruchu względnego. Podstawiając, otrzymamy

$u' = \frac{2 \times {}^2/_3\, c}{1 + {}^4/_9} = {}^{36}/_{39}\, c$, t. j. około 270 000 *km*.

Druga uwaga może dotyczeć fizycznego zobrazowania przyczyny, dlaczego ruchy szybsze niż światło wogóle nie mogą istnieć. Tę przyczynę teorya znajduje we wniosku, że masa ciał, a właściwie opór ich ruchowi stawiany jest zależny od szybkości ruchu i dla szybkości światła staje się nieskończenie wielki.

Czy jednak absolutnie wyłączona jest możność istnienia zjawiska, któreby prędzej się rozchodziło niż światło? Tu szczególniej przychodzi na myśl siła ciążenia, która między innemi może także być silnym zarzutem przeciwko Einsteinowskiej krytyce pojęcia jednoczesności [1]. Prędkość światła dlatego gra taką rolę w teoryi, że wchodzi w równania Maxwellowskie, które teorya chce pogodzić ze spostrzeganiem na ciałach w ruchu. Gdyby znalazły się ruchy szybsze, równania te należałoby zmienić.

---

[1]) W ostatnich swych publikacyach Einstein dotyka już i tego zarzutu.

Jeżeli więc zgodnie z powyższemi teoryami uznamy c za fizyczny kres chyżości dostrzegalnych, łatwo zrozumiemy, że obraz t. zw. „Lumena“, istoty, która się, w poetycznym obrazie Flammariona, oddalała od Ziemi po bitwie pod Waterloo z szybkością większą niż światło i skutkiem tego widziała bieg wypadków w bitwie w kierunku odwrotnym niż w rzeczywistości, jest niemożliwy.

Pozostaje nam teraz jeszcze choć w krótkości wspomnieć pytanie, czy drogą doświadczalną udało się otrzymać jakie potwierdzenie teoryi względności. Co do zjawisk złączonych z ruchem Ziemi, to bezpośrednie dostrzeganie wskutek zbyt małej wartości stosunku $\frac{v}{c}$, jakeśmy już wspominali, jest nadzwyczaj utrudnione i do tej pory mimo usiłowań i wskazań rozmaitych możliwych metod, nie zostało wykonane w sposób zadowalający [1]. Lecz posiadamy na Ziemi ru-

[1]) Rayleigh (1902) i Brace (1904) starali się wykazać powstawanie podwójnego załamania w ciałach przezroczystych, oczekując, że kontrakcya ich wskutek ruchu Ziemi w myśl Lorenza powinna ją wywołać. Tronton i Rankine (1908) oczekiwali zmian oporu elektrycznego drutu pod wpływem kontrakcyi. Wszystkie te próby dały dotąd rezultat negatywny.

chy, których prędkość zbliża się do szybkości światła. Są to chyżości w świecie elektronów—promienie katodalne i emanacya radu. Tę ostatnią studyował początkowo Kaufmann (1903), a następnie Bucherer (1908); Buchererowi udało się, przepuszczając promienie emanacyi przez skrzyżowane pole kondensatora elektrycznego i solenoidu magnetycznego, otrzymać odchylenia, które są zgodne z hypotezą Lorenza, t. j. ze spłaszczeniem cząsteczki w kierunku ruchu [1]. Hupka (1909) podobnież studyował promienie katodalne i wyniki były również zgodne z Lorenzem. O sprawdzeniu zasady na podstawie zjawisk niebieskich mówiliśmy już wyżej.

Jakie będą dalsze losy hypotezy względności, trudno jeszcze dziś przewidzieć. Z jednej strony powstają nawet głosy krytyki przeciw nienależytemu oświetle-

---

[1] W związku z temi doświadczeniami należy zaznaczyć, że dalsze zastosowanie wyników Lorenza i Einsteina do dynamiki wskazuje zmienność masy ciała ruchomego w zależności od szybkości, a także konieczność rozróżniania t. zw. masy „poprzecznej" i „podłużnej". Nie będziemy się tu jednak dłużej zatrzymywali nad temi nadzwyczaj ciekawemi hypotezami.

niu zjawiska Michelsona (Kohl, 1909), i żądanie powtórzenia go (co, w nieco zmienionej formie, lecz z tymże rezultatem zostało właśnie obecnie dokonane w Anglii); z drugiej jednak cały szereg prac teoretycznych stara się pogłębić znaczenie zasady w różnych dziedzinach fizyki (hydrodynamika i t. d.), a entuzyasta zasady względności, Minkowski, już 1908 wygłosił radykalne zdanie [1]); „Poglądy na przestrzeń i czas, które roz„winę, powstały na doświadczalno-fizycz„nym gruncie. Tendencya ich jest ra„dykalna. Odtąd przestrzeń sama w so„bie i czas sam w sobie stają się cienia„mi i tylko jeszcze ich połączenie ma „zachować samodzielność“.

Temi słowy wielkiego matematyka zakończymy i my nasz referat.

---

[1]) Odczyt na Zjeździe przyrodników niemieckich w Kolonii.

5,-