Odbitka z czasopisma Kosmos 1921.
Extrait de Kosmos, bulletin de la société polonaise des Naturalistes a Leopol 1921.

Czas, przestrzeń, materia i kosmos w świetle Einsteinowskiej teorii względności.

Wykłady w Polskim Towarzystwie przyrodników im. Kopernika we Lwowie w styczniu 1921 r.
[Le temps, l'espace, la matiére et l'univers au point de vue de la théorie de relativité]

napisał
M. T. HUBER.

WSTĘP.

Niemal jednocześnie z rozegraniem się niebywałego co do rozmiarów światowego dramatu na polach bitew, dokonywał się w ciszy naukowych pracowni prawie bezprzykładny w dziejach wiedzy ostateczny przewrót fundamentalnych pojęć „filozofii przyrody", radykalna przebudowa podstaw całej, tym mianem w Anglii nazwanej nauki o nieożywionej przyrodzie, tj. fizyki.

Ten przewrót zapoczątkowała jeszcze w r. 1905 rozprawa **Alberta Einsteina** pod skromnym tytułem: „**Zur Elektrodynamik bewegter Körper**" (Ann. d. Ph. 17), a zakończyła na razie w r. 1916 pracą tegoż autora: „**Die Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie**" (Ann. d. Ph. 49). Że ta rewolucja naukowa była częściowo zarazem decydującym zwycięstwem pewnych nurtujących od dawna filozoficznych poglądów, to, jak sądzę, w niczym nie umniejsza ogromnych zasług twórcy tzw. „**teorii względności**", który, jak zobaczymy, zajrzał może głębiej w ustrój rzeczywistości na tle współczesnej nauki, niż to uczynił wielki fundator klasycznej mechaniki **I. Newton** na gruncie swojej epoki.

Podkreślając tymi słowy mój szczery podziw dla całości koncepcji **Einsteina**, skrystalizowanej ostatecznie w „ogólnej teorii względności i grawitacji", chcę zarazem wyrazić swoje najgłębsze przekonanie, że nowa teoria wyjdzie zwycięsko i z tych trudności, jakie jej nastręczają pewne doświadczalne fakty o charakterze *experimentum crucis*, niezbadane jeszcze tak dokładnie, aby mogły dać definitywne rozstrzygnięcie „za" lub „przeciw". Lecz o nich będzie mowa później; teraz zaś wypada przede wszystkim skreślić nadzwyczajnie ciekawą genezę teorii względności, bo już sama ta geneza wyjaśni wiele i utoruje drogę na wyżynę nowożytnego reformatora fizyki.

I.
Fizyka materii i fizyka „eteru". „Bezwzględny czas Newtona".

Do niedawna rozpadała się cała fizyka na dwie dość luźnie ze sobą związane części: na fizykę podlegającej naszym zmysłom **materii**, oraz na fizykę zjawisk w pozbawionej materii przestrzeni, zwaną krótko fizyką **eteru**. Pod tym ostatnim mianem rozumiemy, jak wiadomo, fikcyjną substancję, jaką wypełniamy sobie w myśli materialną próżnię owej przestrzeni dla umożliwienia najprzystępniejszej dla naszego umysłu, tj. mechanicznej interpretacji tych zjawisk.

Im dalej cofamy się myślą w dziejach poznania przyrody, tym więcej napotykamy takich hipotetycznych, niematerialnych substancji. Nazywano je dawniej fluidami. Takim fluidem było np. niegdyś ciepło, nazywane u nas z tego powodu „cieplikiem". Tak ten fluid, jak i inne, poznikały bezpowrotnie z teorii fizykalnych, a tylko chętnie wojują nimi jeszcze różni dyletanci, nie uznający oczywiście niedostępnej dla ich umysłów, poważnej, ścisłej nauki, którą z przekąsem „oficjalną" zowią. Ostatni trwalszego, uniwersalnego znaczenia fluid, tj. wszystko przenikający, niedostrzegalny i niewyczuwalny „eter", przechodził dziwne koleje, a teraz, jak zobaczymy, zagroziła mu bankructwem teoria względności.

Prawie jedynym elementem, wiążącym ściśle obydwa wymienione działy fizyki, co prawda elementem ogromnej doniosłości, była od czasów **J. R. Mayera**, **J. P. Jou1e'a** i **H. Helmholtza** zasada zachowania energii. Z natury rzeczy fizyka materii, a więc przede wszystkim mechanika, była zrazu bardziej rozwinięta od fizyki eteru. Na fundamentach dynamiki, wzniesionych przez **Galileusza** i **Newtona**, wybudował ten ostatni wraz z całym szeregiem wybitnych badaczy dwu stuleci, na drodze matematycznej analizy, gmach teorii ruchu ciał materialnych, imponujący prostotą i dokładnością w oddaniu niemal wszelkich obserwowanych w przyrodzie ruchów materii. Nader liczne i wielkie sukcesy tej teorii w astronomii, geofizyce, naukach technicznych i wielu innych są zbyt dobrze znane, ażeby je tutaj omawiać. Te sukcesy przyczyniły się do ugruntowania wiary w niewzruszoność podstaw mechaniki, sformułowanych przez **Newtona** w jego słynnym dziele „*Philosophiae naturalis principia mathematica*" (1687), jakkolwiek w minionym stuleciu coraz częściej wstrząsał tymi podstawami sceptycyzm niektórych wybitnych myślicieli. Atoli ta słuszna krytyka filozoficzna fundamentów klasycznej mechaniki nie dała przez długi czas impulsu do ich radykalnej przebudowy, albowiem badania doświadczalne uspokajały niejako fizyków zapewnieniami, że przyroda nie domaga się tego. Doświadczenie zdawało się mimo wszystko przemawiać na korzyść poglądów **Newtona**, który np. w pojawieniu się sił odśrodkowych, warunkujących, jak wiadomo, spłaszczenie ziemi, (podobnie, jak i każdego ciała, wprawionego na ziemi w ruch obrotowy), kazał widzieć oczywisty dowód „bezwzględnego" obrotu ziemi. Zmarły niedawno **E. Mach** podniósł już przed paru dziesiątkami lat („**Die Mechanik in ihrer Entwicklung**" I. wyd. z r. 1883), że rozumowanie **Newtona** nie ma przekonywującej siły, ale o tym później.

Teraz zajmiemy się pierwszym punktem, w który godziły ataki sceptyków. Było nim postawione przez **Newtona** na czele mechaniki pojęcie „**bezwzględnego czasu**", określonego przezeń w następujący sposób: „**Bezwzględny, prawdziwy** i **matematyczny czas** upływa z natury rzeczy jednostajnie i bez odniesienia do jakiegokolwiek przedmiotu".

Bezwzględny czas **Newtona** jest najwidoczniej abstrakcją wyłącznie uprawnionego w fizyce fenomenologicznego pojęcia czasu, jako wielkości dającej się mierzyć zmiennością jakiegokolwiek dogodnie obranego zjawiska - krótko mówiąc: **czasu fizykalnego**. Jedynie bowiem po tym, że się cośkolwiek dzieje w przyrodzie, poznajemy, że czas upływa. (Wszak zdecydowawszy się wkroczyć chwilowo na grunt metafizyki, możemy sobie pomyśleć zatrzymanie, a potem znowu puszczenie w ruch całego, niezmiernego mechanizmu świata zjawisk; a wtedy cóż nam określi trwanie tej przerwy?) Fizyka może i powinna się zajmować tylko tym, co się da mierzyć, a **Newton** nie dał i nie mógł dać sposobu mierzenia swego „bezwzględnego" czasu. Czas fizykalny można mierzyć tylko zjawiskami fizykalnymi, a to da się oczywiście wykonać w bardzo różnorodny sposób. Rzecz jasna, że przy tym będzie korzystne obierać takie zjawiska, aby odpowiadająca miara czasu prowadziła do możliwie najprostszych praw, czyli możliwie najprostszego opisu zjawisk przyrody - w tym przypadku ruchu ciał materialnych.

Z tego to, a nie z innego powodu wypada ustalić sposób mierzenia czasu koniecznie tak, aby przedział czasu, odpowiadający jakiemukolwiek zjawisku powtarzającemu się kolejno w możliwie tych samych warunkach, można było uważać każdym razem za równy, z tym samem przybliżeniem, lub wreszcie prawdopodobieństwem, z jakim zachodzi równość warunków zjawiska. Na tym postulacie polegają najdawniejsze i najprostsze przyrządy do mierzenia czasu, tj. klepsydry. Miały one oczywiście obok innych tę kardynalną wadę, że nie działały samoczynnie dowolnie długo, lecz zmuszały do wprowadzenia niepożądanego elementu subiektywnego, tj. wmieszania się żywej istoty. Dlatego cenniejszą od dawien dawna miarą czasu był dzienny obrót pozornej kuli niebieskiej, którego regularność uderzyła najdawniejszych badaczy, każąc im wierzyć, że warunki tego zjawiska są zawsze jednakowe. Dziś wiemy, że te warunki ulegają pewnym, aczkolwiek drobnym zmianom i z tego zdawał sobie doskonalę sprawę już **Newton**. Sądził jednak, że przynajmniej da się pomyśleć takie bądź to okresowe, bądź też nieokresowe zjawisko ruchu, którego warunki są zupełnie niezmienne i które wskutek tego mogłoby służyć do pomiaru „bezwzględnego" czasu.

Tego rodzaju fikcyjne zjawisko ruchu opisuje mianowicie podstawowe prawo mechaniki klasycznej, tj. **prawo bezwładności**, które powiada, że ruch ciała, na które żadne siły nie działają, jest prostoliniowy i jednostajny. Ale pojęcie ruchu jest samo w sobie względne i, mówiąc o ruchu danego ciała, musimy ustalić jakieś inne ciało, lub związany z nim niezmiennie układ współrzędnych, do którego ruch odnosimy, czyli **układ odniesienia**. Do jakiegoż układu odniesienia stosuje się prawo bezwładności?

Tutaj występuje druga abstrakcja mechaniki klasycznej, tj. „**bezwzględna przestrzeń**". Lecz wróćmy jeszcze do pierwszej, tj. do bezwzględnego czasu. Ogromną użyteczność tego pojęcia ilustruje znakomicie dwuwiekowy rozwój mechaniki i opierających się na niej innych działów fizyki. Atoli przyjęcie bezwzględnego czasu było zarazem roztropną i konieczną rezygnacją z głębszego zajrzenia w rzeczywisty ustrój świata zjawisk fizykalnych. Roztropną, bo nadzwyczajnie upraszczała matematyczny obraz tego ustroju; konieczną zaś, bo ani stan ówczesny matematyki, ani też wyniki badań doświadczalnych nie pozwalały na zapuszczenie wzroku teoretyka jeszcze głębiej. Mógł to uczynić dopiero **Einstein** nie tylko siłą swego geniuszu, lecz także dzięki temu, że już dojrzały niezbędne do tego warunki. Zdaje mi się, że chociaż angielscy uczeni w epoce ponewtonowskiej niezbyt wiele filozofowali na temat bezwzględnego czasu i przestrzeni, to jednak wybornie odczuwali utylitarny niejako i tymczasowy charakter tych abstrakcji.

II.
„Bezwzględna" przestrzeń Newtona. Zasada względności mechaniki klasycznej. Krytyka E. Macha. Daremne poszukiwania układu bezwzględnego w „eterze". Uogólniona zasada względności.

Przejdźmy teraz do drugiej, już wymienionej abstrakcji klasycznej mechaniki, tj. do „bezwzględnej przestrzeni". Pojęcie tej przestrzeni powstało w następujący sposób. Ciała stałe przyrody okazują w zwykłych warunkach wysoki stopień niezmienności swej postaci, dzięki czemu można na nich i za pomocą nich wykonywać pomiary, przede wszystkim pomiary długości. Przy takich pomiarach doświadczenie nie dawało dotąd powodu do przypuszczenia, że wymiary ciała mogą być zależne od stanu ruchu układu odniesienia, w którym ciało spoczywa. Ta sama np. płyta metalowa, zmierzona na ziemi, a potem na okręcie podczas jego ruchu, wykazałaby w obu wypadkach te same rozmiary, a jeśliby znaleziono jakieś różnice, to one zawsze dawałyby się wytłumaczyć innymi wpływami, jak np. różnicą temperatur, ciśnień, błędami pomiarów itd. Nagromadzenie pomiarów i doświadczeń natury technicznej poprowadziło przez abstrakcję do pojęcia ciała sztywnego, absolutnie nie zmieniającego swojej postaci i rozmiarów przy jakiejkolwiek zmianie płożenia względem innych ciał, a dalsza abstrakcja od materii, z której ciała są utworzone, dała pojęcie ciał, czyli brył geometrycznych.

Badaniem metrycznych własności tych abstrakcyjnych utworów zajmowano się, jak wiadomo, już w starożytności (a więc na długo przed naukowym traktowaniem mechaniki), stwarzając naukę matematyczną o wielkiej praktycznej użyteczności, zwaną geometrią. Jej najstarszym pomnikiem o przedziwnej doskonałości jest znane dzieło **Euklidesa** z III. wieku przed n. Chr. Logiczna budowa metrycznej geometrii jest w nim oparta na niewielu tzw. pewnikach, z których jeden (piąty), wyrażający, że przez punkt obok prostej można zawsze jedną i tylko jedną równoległą do niej poprowadzić, budził z nowożytnym rozwojem nauki podejrzenia, że jest raczej zamaskowanym twierdzeniem, czyli, że da się dowieść na podstawie reszty pewników **Euklidesa**. Atoli wszelkie próby dowodu okazały się daremne. Dlaczego, o tym wiemy od czasu słynnych prac **J. Bolyai'a** i **M. J. Łobaczewskiego** z r. 1830/31. Te prace bowiem wykazały, że można wznieść logicznie zwarty gmach metrycznej geometrii bez piątego pewnika **Euklidesa**; zastępując go innym, wyrażającym np., że jest więcej prostych przechodzących przez dany punkt i równoległych do danej prostej, albo że nie ma takich prostych.

Ale taka geometria będzie inna, niż ta, która się zawiera w XII. księgach **Euklidesa**. Z tego wynikało, że piąty pewnik dowieść się nie da, a zarazem, że ten pewnik, a raczej postulat, charakteryzuje szczególny rodzaj geometrii traktowanej w dziele **Euklidesa**, którą z tego powodu nazwano Euklidesową. Wszelkie zaś inne geometrie zowią nieeuklidesowymi. Przestrzeń, zaludniona, że się tak wyrażę, utworami każdej z tych geometrii, jest dla każdej z nich różna i różne posiada własności. Każda z tych przestrzeni tworzy, jak mówią matematycy, inne trójwymiarowe *kontinuum* punktów.

Nasuwa się tedy pytanie, czy przestrzeń zjawisk fizykalnych ma charakter przestrzeni euklidesowej, czy też nie? Za czasów **Newtona** nie było jeszcze o tym mowy; nic tedy dziwnego, że przestrzeni fizykalnej, ucieleśnionej w postaci ciała sztywnego, którego rozmiary możemy we wszystkich kierunkach przedłużać bez granic, przypisywano charakter euklidesowy, a **Newton** przyjął tego rodzaju pomyślaną przestrzeń o euklidesowej strukturze za „bezwzględną" przestrzeń swojej mechaniki, i, co zatem idzie, całej fizyki. Tak pojęta przestrzeń, niezależna od materii i zjawisk fizykalnych, była niejako dogodnym rusztowaniem myślowym, z którego **Newton** patrzał na wsze strony w nieskończoność, widząc wszędzie materię posłuszną odkrytemu przez się, tajemniczemu prawu powszechnego ciążenia (grawitacji) i komunikującą się promieniami światła, utworzonymi według jego „emisyjnej" teorii przez niezmiernie drobne ciałka, wyrzucane prostoliniowo z olbrzymią prędkością 300000 km/s. Nic tedy dziwnego, że już **Newton** przypuszczał możliwość wpływu grawitacji na światło, o czym zapomniano później, kiedy undulacyjna teoria **Huygensa** zatryumfowała nad emisyjną, a tym bardziej, gdy **Maxwell** przeobraził undulacyjną teorię na elektro-magnetyczną.

Abstrakcyjny obraz bezwzględnej przestrzeni i bezwzględnego czasu dawał umysłowi **Newtona** widocznie pewnego rodzaju zadowolenie i poczucie pewności, jakie i obecnie jest dla niektórych umysłów jednym ze źródeł rozpaczliwego oporu przeciw zwycięskiemu pochodowi nowoczesnej fizyki relatywistycznej. Przypomina się mimo woli, jak przed wiekami przeciwnicy nauki **Kopernika** trzymali się kurczowo dawnego poglądu **Ptolomeusza**, który ziemię uważał za „nieruchomy" środek świata, bo to uprzywilejowane stanowisko ziemi napełniało ich duszę ambitnym zadowoleniem i wygodnym poczuciem pewności. Podobnież współcześni przeciwnicy teorii względności, odrzucającej bezwzględną przestrzeń i bezwzględny czas, widzą właśnie w tych pojęciach jak gdyby jedyne stałe punkty zakotwienia swoich myśli, Archimedesowe „Δός μοι ποῦ στώ..." („Dajcie mi punkt oparcia…" – przyp. Sep.) bez czego, jak im się zdaje, pozostaliby bezradni i niezadowoleni.

Ale wróćmy jeszcze do mechaniki Newtonowskiej. Już sformułowanie zasadniczych praw dynamiki odebrało przestrzeni fizykalnej **Newtona** w znacznej części charakter bezwzględności. Skoro bowiem znajdziemy jeden z układów odniesienia, w którym obowiązuje prawo bezwładności (układ Galileuszowy), to każdy układ, poruszający się względem niego jednostajnie i prostoliniowo, ma oczywiście również tę samą własność.

Dzięki temu nie spostrzegamy np. żadnej różnicy w zjawiskach mechanicznych na ziemi, a na płynącym jednostajnie i prostoliniowo statku, lub w poruszającej się jednostajnie klatce liftu. We wszystkich trzech przypadkach okazuje się, że ciała, puszczone swobodnie, spadają pionowo z przyspieszeniem g=9,81 m/s^2, że wahadło pobudzone do wahnień ma okres wyrażony formułą $T = 2\pi\sqrt{l/g}$ itd. (Biorąc ściśle, nie jest ziemia układem Galileuszowym, inaczej bowiem nie mówiłaby mechanika klasyczna o jej obrocie w takimże układzie, zrealizowanym z bardzo wielką dokładnością przez układ gwiazd stałych: ale ta nieścisłość przy powyższym uzmysłowieniu równouprawnienia układów o jednostajnej, względnej translacji nie psuje instruktywności tego obrazu).

Wszystkie zatem układy Galileuszowe, poruszające się względem siebie jednostajnie i prostoliniowo są równouprawnione przy opisie zjawisk ruchu ciał materialnych. Nie ma układu uprzywilejowanego, który by grał rolę „przestrzeni bezwzględnej”.

Powyższe wysłowienie wyraża tzw. **zasadę względności** mechaniki klasycznej, której uogólnienie stanowi punkt wyjścia Einsteinowskiej teorii względności.

Jakkolwiek **Newton** zdawał sobie bardzo dobrze sprawę ze znaczenia zasady względności w powyższej postaci, to jednak nie porzucił myśli o bezwzględnej przestrzeni, bo, jak już poprzednio wspomniałem, tylko przy jej pomocy umiał sobie objaśnić zjawisko spłaszczenia ziemi na biegunach, uwarunkowane siłami odśrodkowymi, jako siłami bezwładności przy obrocie. Sądził, że gdyby nawet ziemia była wiecznie otulona chmurami, niepozwalającymi obserwować gwiaździstego nieba, to i tak z pomiaru ziemi i rozmieszczenia na niej siły ciężkości musielibyśmy wywnioskować, że ona się obraca w „przestrzeni bezwzględnej”, niezależnie od niedającego się w tych pomyślanych warunkach stwierdzić ruchu postępowego.

Muszę tutaj zapobiec możliwemu nieporozumieniu. Sformułowaną poprzednio zasadę względności klasycznej mechaniki należy odróżnić od zasadniczej względności pojęcia ruchu, o jakiej mówi się w kinematyce, tj. teorii ruchu, oderwanej od materii poruszających się ciał i sił, jako przyczyn ruchu. Ze stanowiska kinematyki jest np. system Kopernikowski równouprawniony z Ptolomeuszowym i zaleca go tylko prostota, podczas gdy rzecz się ma inaczej ze stanowiska Newtonowskiej dynamiki.

Wracając teraz do sprawy Newtonowskiego dowodu „bezwzględnego” obrotu ziemi, przedstawię w jaki sposób **E. Mach** wykazał, że argumenty **Newtona** wcale nie zniewalają do przyjęcia bezwzględnego charakteru ruchów obrotowych.

Newton powołuje się na swoje doświadczenia z płynem wirującym w naczyniu walcowym, które wprawił w ruch obrotowy w ten sposób, że zawiesił je na długim sznurku, a skręciwszy ten sznurek wielokrotnie przez obrót naczynia, napełnił je wodą i puścił następnie swobodnie. Sznurek, rozkręcając się, wprawiał z początku w obrót samo naczynie, podczas gdy woda w nim pozostawała w spoczynku (względem ziemi). Świadczyło o tym jej płaskie zwierciadło. W miarę jak tarcie na ścianach naczynia porywało wodę, udzielając jej stopniowo prędkości obrotowej, coraz bardziej zbliżonej do prędkości naczynia, stawało się zwierciadło wody wklęsłe. **Newton** widział w tym widoczny skutek sił odśrodkowych, których nie było na początku, kiedy ruch wody w naczyniu był tylko „względny”, a pojawiły się dopiero, gdy się stał bezwzględnym.

Otóż **Mach** zwraca słusznie uwagę na to, że, podczas gdy w pierwszym przypadku, tj. dopóki zwierciadło wody w naczyniu było płaskie, obracała się dokoła walca wodnego tylko masa naczynia, to w przypadku drugim zachodzi ze stanowiska kinematycznego obrót całej, niezmiernie wielkiej masy reszty wszechświata. Chociaż tedy **Newton** nie mógł dostrzec powstania sił odśrodkowych w wodzie wskutek obrotu względnego znikomo małej masy naczynia, to jednak z tego powodu nie można z góry wykluczać przypuszczenia, że takie siły dałyby się może stwierdzić, gdybyśmy ścianom naczynia dali dostatecznie wielką grubość, np. kilkuset metrów, jeżeli nie kilometrów. Tylko doświadczenie mogłoby zaprzeczyć temu przypuszczeniu.

Idąc za tymi myślami **Macha**, próbowali bracia **B.** i **J. Friedländer** w r. 1896 stwierdzić doświadczalnie istnienie sił odśrodkowych, wywołanych względnym obrotem potężnego koła zamachowego, w jakie są zaopatrzone współczesne wielkie maszyny parowe. W tym celu umieścili w pobliżu koła na jego geometrycznej osi nader czułą wagę skręcenia i śledzili, czy obrót koła nie wywoła odchylenia igiełki wagi ku płaszczyźnie obrotu. Wynik doświadczeń był, jak było do przewidzenia, ujemny, albowiem najcięższe koła, jakimi rozporządzamy, mają znikomo małą masę w. porównaniu do masy reszty wszechświata. (Można by wprawdzie myśleć o zwiększeniu szukanego wpływu na drodze powiększenia prędkości kątowej koła, ale temu znów stoi na przeszkodzie ograniczona wytrzymałość materiału i połączone z tym niebezpieczeństwa jego eksplozji, której fatalne skutki dobrze są znane w nowoczesnej technice).

Nie mogę tutaj przytaczać zdań całego szeregu wybitnych myślicieli epoki ponewtonowskiej, począwszy od **Eulera** a skończy wszy na **Poincare'm**, aby przedstawić, jak powoli coraz silniej utrwalało się przekonanie o konieczności oparcia fundamentów mechaniki nie na transcedentalnych (według terminologii **Kanta**) pojęciach „bezwzględnej" przestrzeni i czasu, lecz na pojęciach fizykalnych, podlegających faktycznie obserwacji. Toż samo odnosi się i do drugiej części fizyki, którą dla krótkości będziemy dalej nazywali po staremu „fizyką eteru", a która również aż do naszych czasów borykała się ż powyższymi abstrakcjami. Bo nawet zdawało się nie tak dawno, że sam eter będzie tym, dla wielu, umysłów tak pożądanym, „nieruchomym" układem odniesienia w „bezwzględnej" przestrzeni.

Te szczątkowe, metafizyczne marzenia nie od razu prysły w ogniu doświadczalnych badań fizyków **Fizeau'a**, **Michelsona** i **Morleya**, oraz obserwacji astronoma **de Sittera**. Zrazu usiłowano, jak zobaczymy, ratować je nowymi hipotezami, aż znalazł się myśliciel, który rozbił je doszczętnie, pochwyciwszy z niesłychaną bystrością i odwagą nić czerwoną postulatu względności, wijącą się prawie od dwu wieków w filozofii przyrody i utkawszy z niej to arcydzieło, które pod nazwą teorii względności uczyniło tak potężne wrażenie w sferach naukowych całego świata.

Ale przejdźmy do szczegółów, zaczynając od pierwszego ze wspomnianych doświadczeń. **Fizeau** postawił sobie za zadanie zbadać, jaki wpływ ma prędkość v wody, płynącej w rurze, na szybkość c' przenoszenia się światła przez tę wodę względem ścian rury. Doświadczenie **Fizeau** miało rozstrzygnąć następujące pytanie, postawione w duchu klasycznej mechaniki i undulacyjnej teorii światła: Czy materia porusza się względem eteru nieruchomego w „bezwzględnej" przestrzeni, czy też zabiera niejako ze sobą swój eter, tak jak zamknięty wagon powietrze w swoim wnętrzu? W pierwszym przypadku dałoby doświadczenie tę samą prędkość w wodzie płynącej, co w spokojnej, w drugim zaś byłaby ta prędkość, stosownie do zasady względności klasycznej mechaniki, równa $c'+v$, lub $c'-v$ zależnie od tego, czy fala świetlna postępuje z prądem wody, czy też przeciw niemu. Tymczasem, ku wielkiemu zakłopotaniu ówczesnych teoretyków, doświadczenie nie potwierdziło żadnej z tych alternatyw lecz wykazało z wielką dokładnością, że wskutek ruchu jakiegokolwiek przeźroczystego środowiska materialnego prędkość światła w nim przyrasta lub ubywa nie o v, lecz tylko o pewien drobny ułamek tej ostatniej prędkości, a mianowicie o $v(1-1/n^2)$, jeżeli n oznacza współczynnik załamania światła w odpowiadającym środowisku. Przy tym jest, jak wiadomo, $c'=c/n$.

Powyższy wynik interpretowano zrazu w ten sposób, że materia, poruszając się w eterze, unosi go z sobą tylko częściowo. Dopiero głośna u progu bieżącego stulecia, Lorentzowska teoria zjawisk elektromagnetycznych w ciałach poruszających się pogodziła rezultat doświadczenia **Fizeau** z hipotezą stałego, bezwzględnie nieruchomego eteru, tłumacząc wystąpienie „współczynnika unoszenia”, jako skutek budowy materii, a w szczególności wzajemnego działania między elektronami a materią. Za to napotkała teoria **Lorentza** inną, bardzo poważną trudność. Nastręczyły ją słynne doświadczenia **Michelsona**, powtórzone później razem z **Morleyem** z jeszcze większą precyzją. Te doświadczenia miały na oku po prostu stwierdzenie ruchu ziemi względem eteru za pomocą optycznych pomiarów. Skoro bowiem przyjmiemy z **Maxwellem**, że zaburzenia elektromagnetyczne przenoszą się przez eter w postaci fal poprzecznych, działających na wzrok przy pewnych długościach fal, jako promienie światła, a zarazem przypuścimy z **Lorentzem**, że eter jest nieruchomy w „bezwzględnej” przestrzeni, to prędkość światła ze źródeł ziemskich powinna się okazać inną w kierunku chwilowej prędkości ziemi w jej ruchu po ekliptyce, a inną w kierunku doń prostopadłym. Atoli wielokrotne pomiary nie wykazały żadnej różnicy, jakkolwiek dokładność użytej metody była tak wielka, że wystarczyłaby do stwierdzenia efektu kilkadziesiąt razy mniejszego od przewidywanego. Ten efekt był wyznaczony bardzo prostym rachunkiem, opartym na zasadzie względności klasycznej mechaniki. Skoro go nie znaleziono, to było to dowodem, że zasada względności klasycznej mechaniki nie stosuje się do zjawisk optycznych.

Atoli stwierdziwszy ten fakt (dowodzący zarazem, że światło ze źródeł ziemskich rozchodzi się z tą samą prędkością na wszystkie strony, bez względu na to pod jakim kątem promień światła jest nachylony do kierunku ruchu ziemi względem gwiazd stałych), należało jakoś objaśnić ujemny wynik doświadczeń **Michelsona**, zwłaszcza, że i inne doświadczenia, jakie obmyślano dla stwierdzenia ruchu materii względem eteru tak samo zawiodły. **Fitzgerald** i **Lorentz** uczynili to niezależnie od siebie za pomocą dodatkowej hipotezy, że wszystkie ciała doznają podczas ruchu w eterze (ruchu „bezwzględnego”) skurczenia w kierunku ruchu w stosunku $\sqrt{1-v^2/c^2}$, jeżeli v oznacza prędkość ciała, a c prędkość światła w próżni. Suponując tę wartość skurczenia, ratowano w ten sposób zasadę względności klasycznej mechaniki, z której wypływało, że fale, wzbudzone w „nieruchomym” eterze, musiałyby objawiać na ziemi w kierunku jej ruchu prędkość przenoszenia się o v różną od c. Ale prędkość rozchodzenia się w próżni falowania elektromagnetycznego okazała się doświadczalnie nie tylko dla światła, pochodzącego ze źródeł ziemskich, stałą we wszystkich kierunkach względem ziemi, jako układu odniesienia. **De Sitter** dowiódł na obserwacjach gwiazd podwójnych, że ta prędkość c jest także (dla ziemi jako układu odniesienia) niezależną od prędkości, z jaką źródło światła oddala się lub zbliża do ziemi, tj. układu, na którym wykonywamy pomiar. Zważywszy nadto, że, co już dawno stwierdzono, prędkość światła w próżni jest niezależna od jego barwy tj. od częstości drgań, czyli niezależna od długości fali, niepodobna zaprzeczyć, że mamy tutaj do czynienia ze stałą fizykalną wyjątkowego znaczenia.

Doniosłość tych faktów ocenił należycie dopiero **Einstein**, czyniąc uniwersalną stałość prędkości światła w próżni jednym, a uogólnioną stosownie zasadę względności drugim postulatem swojej „szczególnej teorii względności”, ogłoszonej w r. 1905.

Uogólniona przez **Einsteina** zasada względności powiada, że nie tylko zjawiska ruchu materii (zjawiska mechaniczne), ale i wszelkie inne zjawiska fizykalne są zawsze i wszędzie niezależne od prędkości ruchu postępowego układu odniesienia. Ta prosta fizykalna hipoteza jest widocznie w zgodzie z wynikami wymienionych fundamentalnych doświadczeń i, jak się później przekonano, nie koliduje z innymi doświadczalnymi faktami; obchodzi się nadto doskonale bez abstrakcyjnego, niefizykalnego pojęcia bezwzględnej przestrzeni i bez hipotetycznego eteru, a wreszcie z postulatem prędkości światła w próżni, jako uniwersalnej stałej w przyrodzie, prowadzi do zupełnie zadowalającego określenia fizykalnego czasu. W ten sposób, jak zobaczymy, usuwa za jednym zamachem wszelkie trudności i niejasności podstaw mechaniki klasycznej. Prowadząc do tych samych wyników w elektrodynamice, co teoria **Lorentza**, nie posiada jej słabych stron i czyni zadość wszelkim wymaganiom doskonałej teorii fizykalnej.

III.
Podstawy „szczególnej teorii względności”. Względność równoczesności. Względność pomiaru długości ciała sztywnego.

Dopiero teraz pora przystąpić do przedstawienia toku myśli **Einsteina**. Zestawmy przedtem krótko materiał faktyczny i myślowy, którym rozpoczął swoją budowę:

1. Zasada względności klasycznej mechaniki stosuje się do fizyki materii, a nie stosuje się do fizyki eteru.

2. Mimo to żadnymi doświadczeniami nie można było stwierdzić ruchu materii względem eteru.

3. Wszelkie zaburzenia elektromagnetyczne w próżni lub, jak kto chce, w eterze, a więc światło, elektryczność, ciepło promieniste itd. rozprzestrzeniają się falami kulistymi w każdym z Galileuszowych układów odniesienia (poruszających się względem siebie jednostajnie i prostoliniowo)[1]).

Toby był materiał faktyczny. Przejdźmy teraz do myślowego.

1. Skoro hipotetyczny eter nie posiada żadnych atrybutów fizykalnej substancji, które by dały się obserwować i mierzyć, to można będzie obejść się bez hipotezy eteru w teorii zasadniczej, opartej wyłącznie na materiale obserwacyjnym, bez elementów transcedentalnych.

2. Zjawiska dostrzegalne powinny dać się tak opisywać, czyli podlegać takim prawom, aby zasada względności stosowała się do całego świata zjawisk fizykalnych, a nie tylko do fizyki materii.

3. Niedający się obserwować ani mierzyć „bezwzględny czas” należy zastąpić czasem fizykalnym, mierzonym najprostszym i najmniej alterowanym wpływami zewnętrznymi zjawiskiem, tj. rozchodzeniem się światła w próżni.

Nie twierdzę, aby zestawiony w powyższych trzech punktach materiał myślowy, był dokładnym tłem koncepcji **Einsteina**, ale nie o to idzie. Główna rzecz w tym, ażeby pójść najprostszą drogą za tokiem jego myśli. Nawiążmy w tym celu do ostatniego punktu, który prowadzi bezpośrednio do określenia jednostki czasu fizykalnego w danym Galileuszowym układzie odniesienia. Będzie nią ten przedział czasu, w którym światło w próżni przebiega pewną określoną drogę. (Jednej sekundzie odpowiada droga 300000km)[2]). Ale to określenie nie wystarcza jeszcze do przydzielenia wartości czasu t jakiemukolwiek zdarzeniu w danym miejscu tego układu. Do tego potrzebny nadto zegar znaczący w tym miejscu optycznie lub akustycznie owe sekundy, a postulat stałej prędkości światła dostarcza tylko ściśle określonego sposobu regulowania tego zegara. Dajmy na to, że posiadamy taki zegar, że posiadamy ich więcej, najdokładniej jednakowych, aby móc oznaczyć czas dla różnych zdarzeń, zachodzących w różnych miejscach układu. Wtedy pozostaje jeszcze koniecznie znaleźć sposób sprawdzenia, czy jakiekolwiek dwa zegary w różnych punktach A i B idą synchronicznie. Stosownie do postulatu stałej prędkości światła będzie ten sposób teoretycznie bardzo prosty, a między innymi, równoważnymi, np. następujący. Obserwator staje w środku S prostej, łączącej AB i celuje przyrządem zwierciadełkowym lub pryzmowym, dobrze znanym każdemu inżynierowi, do obu punktów A i B. Jeżeli obrazy wskazówek wraz z tarczami się zlewają, to zegary idą równocześnie. Takie określenie równoczesności jest widocznie jednoznaczne, wolne od sprzeczności i odnosi się do wszelkich zjawisk, zachodzących w różnych punktach danego układu odniesienia.

Zobaczymy teraz, jakie z powyższych określeń wypływają konsekwencje dla innego układu odniesienia, który posuwa się jednostajnie względem danego. Niechaj nim będzie np. bardzo długi pociąg, jadący po prostym torze i złożony z wagonów równej znacznej długości. Umieśćmy tuż obok toru, w odstępach równych długości jednego wagonu, zegary Z_1, Z_2, Z_3,…, których synchronizm sprawdziliśmy na ziemi w powyższy sposób. Niechaj każdy z tych zegarów, (lub też z umieszczonych przy nich obserwatorów) wysyła sygnał świetlny w chwili, gdy mija go początek lub koniec jednego wagonu. Każmy teraz obserwatorom, znajdującym się w środku wagonów, przekonać się o synchronizmie sygnałów wysłanych z Z_1, Z_2, Z_3,… (równoczesnych dla obserwatorów na ziemi). Łatwo zrozumieć, że dla obserwatorów w pociągu, którzy swoje zegary regulują promieniami światła ze źródeł, umieszczonych na pociągu, **nie będą** te sygnały synchroniczne. Mianowicie sygnał z Z_2 ukaże się odpowiadającemu obserwatorowi w wagonie wcześniej od sygnału Z_1, albowiem środek wagonu, uciekając od fali świetlnej, idącej od Z_1, biegnie zarazem na spotkanie fali, pochodzącej z Z_2. Dla obserwatorów w pociągu przedstawiają się przeto zegary Z_1, Z_2,... na ziemi jako nie synchroniczne. Każdy następny pokazuje godzinę nieco późniejszą od poprzedzającego. Ale i nawzajem zegary W_1, W_2, W_3,…, umieszczone w przeciwnym porządku w takichże odstępach na pociągu i zsynchronizowane tamże za pomocą sygnałów świetlnych, nie mogą uchodzić za synchroniczne dla obserwatorów na ziemi. Odczytają oni na zegarze np. W_2 godzinę późniejszą nieco od W_1, czyli zupełnie tak samo, jak poprzednio, na zegarze, do którego się zbliżamy, odczytamy godzinę nieco późniejszą, niż godzina na zegarze, od którego się oddalamy.

Z tego widać, że **czas jednego i tego samego zdarzenia musi się określać inaczej w układzie pierwszym, a inaczej w układzie drugim**. Ale z pomiarem czasu jest ściśle związany pomiar długości wskutek postulatu stałej prędkości światła. Z tego łatwo sobie zdać sprawę w następujący sposób.

Dajmy na to, że chcemy zmierzyć długość wagonu w biegu ze stanowiska na ziemi. Wówczas polecimy obserwatorom umieszczonym na początku i na końcu wagonu zaznaczyć **jednocześnie** obydwa te punkty na torze. Ponieważ zdarzenia jednoczesne dla pociągu nie są jednoczesnymi dla ziemi, przeto odstęp znaków na torze nie będzie dokładnie równy długości wagonu. Będzie on, jak wypadnie z obliczenia, mniejszy w stosunku $\sqrt{1-v^2/c^2}:1$, a więc dokładnie o tyle, ile wynosi Lorentzowskie skurczenie. (Tutaj oznacza *v* względną prędkość obu układów, a *c*, jak poprzednio, prędkość światła). Podstawą rachunku jest oczywiście postulat stałej prędkości światła w każdym z układów i związany z tym, określony powyżej wybór jednostki czasu dla danego układu odniesienia. Te dane w ramach uogólnionej zasady względności układów Galileuszowych wystarczają do rozwiązania następującego ogólnego zadania.

Dane zjawisko fizykalne określają w układzie *U* wartości *x*, *y*, *z*, *t* współrzędnych i czasu; jakie wartości *x'*, *y'*, *z'*, *t'* określają to samo zjawisko w odniesieniu do układu *U'*, poruszającego się względem *U* jednostajnie i prostoliniowo, np. w kierunku osi *X* z prędkością *v*? Osie obu układów przyjmiemy dla uproszczenia równoległe.

W duchu klasycznej mechaniki rozwiązują to zadanie równania:

$x'=x-vt$; $y'=y$; $z'=z$; $t'=t$,

noszące nazwę przekształcenia **Galileusza**. Natomiast postulatom uogólnionej zasady względności czyni zadość rozwiązanie:

$$x'=\frac{1}{k}(x-vt);\ y'=y;\ z'=z;\ t'=\frac{1}{k}\left(t-\frac{v}{c^2}x\right), \ldots \text{I)}$$

przy czym $k=\sqrt{1-v^2/c^2}$.

Te podstawowe wzory „**szczególnej teorii względności**" noszą nazwę równań przekształcenia **Lorentza**, ponieważ ten genialny fizyk wyprowadził je pierwszy za pomocą zawiłych analitycznych rozważań nad niezmiennością Maxwellowskich równań różniczkowych pola elektromagnetycznego. Ich „szczególny” („speziell” w terminologii **Einsteina**) charakter polega na tym, że się odnoszą tylko do szczególnego przypadku układów odniesienia, przesuwających się względem siebie jednostajnie i prostoliniowo. Łatwo tedy zrozumieć, że stosowanie szczególnej teorii względności do innych przypadków może snadnie prowadzić do sprzeczności i wyników niemożliwych, jakie też wyszukiwali z upodobaniem przeciwnicy teorii, w zgoła płonnej nadziei jej obalenia. Źródła i psychologiczne pobudki takich przedsięwzięć starałem się oświetlić w broszurce pt. „**Albert Einstein i jego teoria**”. (Lwów 1920. Nakładem Spółki wydawniczej „Słowa polskiego”). Każdy taki rzekomy „paradoks” teorii względności wyjaśniał się najzupełniej ku konfuzji oponentów.

1) Biorąc ściśle, jest to już uogólnieniem faktu doświadczalnego, stwierdzonego tylko dla jednego układu odniesienia, tj. ziemi, bezpośrednio.
2) Okrągłość tej liczby jest dziełem przypadku. Jako średnią wartość z najlepszych pomiarów podają 299848 km/s.

IV.
Uzasadnienie wzorów przekształcenia Lorentza. Zachowanie się miar (prętów) i zegarów.

Wzory przekształcenia **Lorentza** można wyprowadzić drogą całkiem elementarną z postulatów uogólnionej zasady względności i stałej prędkości światła. Skoro w obu układach rozpoczniemy czas mierzyć od chwili, w której się odpowiadające osie nakrywały, to początek układu *U’* ma w czasie *t* i w odniesieniu do układu *U* współrzędną $x=vt$, czyli współrzędna *x* początku układu *U’* czyni zadość równaniu
$x'-vt=o$.
Tenże sam punkt ma w odniesieniu do układu *U’* współrzędną
$x'=o$.
Z tego wynika, że dla dowolnego punktu musi być
$\frac{x-vt}{x'}$=stałej, np.$=k$, czyli $kx'=x-vt$,
albowiem związek między *x* i *x’* może być tylko liniowy i niezależny od pozostałych współrzędnych.

Ale według zasady względności są obydwa układy zupełnie równouprawnione; a zatem początek układu *U* ma w czasie *t’* i w odniesieniu do układu *U’* współrzędną $x'=-vt'$ (znak - dlatego, ponieważ prędkość względna układu *U* w odniesieniu do *U’* jest skierowana przeciwnie, jak prędkość względna układu *U’* w odniesieniu do *U*), czyli dla początku układu *U* spełnia się równanie $x'+vt'=o$,
a zarazem równanie $x=o$.
Rozumując tak samo, jak poprzednio, możemy napisać
$\frac{x'-vt'}{x}$=stałej,
która to stała ma tę samą, co poprzednio, wartość *k* z powodu równouprawnienia obu układów.

W ten sposób uzyskaliśmy równania
$kx'=x-vt$ i $kx=x'+vt'$.
Rugując z nich *x’*, znajdujemy z łatwością:

$kt'=\frac{k^2-1}{v}x+t$.

To równanie wraz z pierwszym z poprzedzających pozwoli obliczyć *x'* i *t'*, skoro *x* i *t* są dane, jeżeli jeszcze znajdziemy wartość nieoznaczonego współczynnika *k*. Wyznaczymy go z warunku, wyrażającego postulat stałej prędkości światła.

Ten warunek można napisać w postaci
$x^2+y^2+z^2-c^2t^2=o$ i $x'^2+y'^2+z'^2-c^2t'^2=o$,
co wyraża, że sygnały świetlne wysłane z początków *O* i *O'* obu układów *U* i *U'* dosięgają w . czasie *t*, wzgl. *t'*, z tą samą prędkością *c* powierzchni kulistych o środkach *O* i *O'*. Skoro tedy wysłano jeden sygnał w chwili, gdy oba początki układów były w jednym punkcie i od tej chwili zaczynamy mierzyć czas *t* i *t'* w obu układach, to musi się spełnić tożsamość
$x^2+y^2+z^2-c^2t^2\equiv x'^2+y'^2+z'^2-c^2t'^2$,
czyli - innymi słowy - wyrażenie
$F= x^2+y^2+z^2-c^2t^2$
jest **niezmiennikiem** dla szukanego przekształcenia. W myśl postulatu stałej prędkości światła musi to wyrażenie być niezmiennikiem przy dowolnym kierunku względnego przesuwania się obu układów ze stałą prędkością *v*. Ponieważ powyżej przyjęliśmy dla uproszczenia kierunek osi X-ów w obu układach jako równoległy do *v*, a odpowiadające osie Y-ów i Z-ów także do siebie równoległe, przeto możemy przyjąć z góry
$y'=y$; $z'=z$.
To pociąga za sobą tożsamość
$y'^2+z'^2\equiv y^2+z^2$,
wobec czego poprzedni warunek sprowadza się do niezmiennika
$G=x^2-c^2t^2\equiv x'^2-c^2t'^2$.
Wstawiwszy tutaj wartości powyżej znalezione
$x'=\frac{1}{k}(x-vt)$, $t'=\left(k-\frac{1}{k}\right)\frac{x}{v}+\frac{t}{k}$,
mamy:

$$x^2-c^2t^2\equiv\frac{1}{k^2}\left(x^2-2vtx+v^2t^2\right)-c^2\left[\left(k^2-2+\frac{1}{k^2}\right)\frac{x^2}{v^2}+2\left(k^2-1\right)\frac{xt}{v}+\frac{t^2}{k^2}\right]=$$

$$x^2\frac{1}{k^2}\left[1-\frac{c^2}{v^2}\left(k^2-1\right)^2\right]-2tx\frac{1}{k^2}\left[v+\frac{c^2}{v}\left(k^2-1\right)\right]+t^2\frac{v^2-c^2}{k^2}$$

Aby prawa strona tego równania stała się identyczną z lewą, muszą widocznie spełnić się 3 warunki:

$$\frac{1}{k^2}\left[1-\frac{c^2}{v^2}\left(k^2-1\right)^2\right]=1,\ v+\frac{c^2}{v}\left(k^2-1\right)=o,\ \frac{v^2-c^2}{k^2}=-c^2 .$$

Z każdego z nich wypływa zgodnie (najprościej z trzeciego):
$k=\sqrt{1-v^2/c^2}$.
A zatem $t'=\frac{1}{k}\left[t+\left(k^2-1\right)\frac{x}{v}\right]=\frac{1}{k}\left(t-\frac{v}{c^2}x\right)$.
W ten sposób wyprowadziliśmy wszystkie cztery wzory przekształcenia **Lorentza**.
Rozwiązawszy je względem *x*, *y*, *z* i *t*, znajdujemy:

$x=\frac{1}{k}(x'+vt')$, y=y', z=z', $t=\frac{1}{k}\left(t'+\frac{v}{c^2}x'\right)$….II)

Wzory przekształcenia odwrotnego są, jak widać, zupełnie tak samo zbudowane, jak wzory pierwotne, i można je z nich otrzymać wprost, zamieniając wielkości kreskowane na niekreskowane i nawzajem, tudzież zastępując *v* przez *-v*. To jest oczywiście matematycznym wyrazem zupełnej równoważności obu układów *U* i *U'*.

Nie trudno dowieść, że wzory **Lorentza** są jedynymi, które czynią zadość uogólnionej zasadzie względności i postulatowi stałej prędkości światła. Wszelako to wymaga dość długiego rachunku, na który tutaj nie ma miejsca.

Przypatrzmy się teraz, jak z równań przekształcenia **Lorentza** wypływają podane poprzednio konsekwencje co do miar i zegarów.

Niechaj każdy z obu obserwatorów w układzie *U* (ziemia) i *U'* (pociąg) rozporządza metrami i zegarami najdokładniej jednakowymi, tj. sprawdzonymi, jako takie, w stanie spoczynku w jednym z układów. Obserwator w *U'* kładzie swój metr na osi X-ów tak, aby początek schodził się z początkiem współrzędnych. Wtedy oczywiście przypisze odciętym x_1' i x_2' początku i końca metra wartości

$x_1'=0$ $x_2'=1$.

Co teraz powie o długości pręta obserwator w *U*?

Dla niego początek i koniec obserwowanego pręta, (który spoczywa w układzie *U'*) ma współrzędne x_1 i x_2, zmieniające się z czasem i jako jego długość musi oczywiście uważać tylko tę różnicę współrzędnych x_2-x_1, która jest niezależna od czasu *t*, tj. czasu na zegarach spoczywających w jego układzie *U*. Niezależną zaś jest tylko różnica jednoczesnych (w *U*) współrzędnych x_2 i x_1. Pierwsze z równań (I) daje:

$$0=x_1'=\frac{1}{k}\left(x_1-vt\right),\ 1=x_2'=\frac{1}{k}\left(x_2-vt\right);$$

a stąd $x_1=vt$, $x_2=k.1+vt$,

czyli $x_2\text{-}x_1=k.1=\sqrt{1-v^2/c^2}$.

Obserwator w *U* musi przeto uznać pręt obserwatora w *U'* za **krótszy** w stosunku *k*:1 [3]).

Ale do takiego samego wniosku dojdzie obserwator w *U'* (pociągu), mierząc metr spoczywający w *U* (na ziemi), któremu obserwator w *U* przypisze

$x_1=0$, $x_2=1$.

Obserwator w *U'* musi się posługiwać wzorami (II) i znajdzie

$$0=x_1=\frac{1}{k}\left(x_1'+vt'\right),\ 1=x_2=\frac{1}{k}\left(x_2'+vt'\right),$$

a stąd przy tej samej wartości *t'* (jednoczesność w układzie *U'*)

$x_2'\text{-}x_1'=k(x_2\text{-}x_1)=k.1$;

wobec tego zawyrokuje, że metr obserwatora w *U* jest **krótszy** od jego własnego w stosunku *k*:1.

Tutaj słyszy się często pytanie: „który z nich ma słuszność?" To pytanie dowodzi niezrozumienia lub apriorycznego nieuznawania zasady względności.

W myśl tej zasady obaj mają słuszność, gdyż obydwa układy są równouprawnione do matematycznego sformułowania praw przyrody. Żadne doświadczenia nie dały powodu do wyróżnienia jednego z układów Galileuszowych, jako układu spoczywającego bezwzględnie. Kto zatem zasady względności „nie uznaje", jak to się i teraz jeszcze po piętnastu latach jej nieprzerwanych sukcesów zdarza, ten winien podać fakt doświadczalny z nią niezgodny, tj. wyróżniający jeden z układów w powyższy sposób. A możliwość tego staje się coraz mniej prawdopodobną. Tak zwane „filozoficzne" zarzuty, również nierzadko napotykane, świadczą tylko o ślepej wierze oponentów w dogmaty „niezależności zdarzeń od przestrzeni i czasu", kierujące niegdyś myślami **Newtona** w jego wiekopomnym dziele i wiążące przedmiotowy charakter pojęć fizykalnych z podmiotowością pojęć metafizycznych. Obalił je raz na zawsze **Einstein**, **relatywizując**, a zarazem **obiektywizując** wszelkie pojęcia fizykalne.

Weźmy teraz pod uwagę zegary w obu układach *U* i *U'*. Niechaj wskazówka zegara spoczywającego w *U* obiega tarczę raz do koła w *T* sekundach. Pomyślmy sobie zegar tak mały, że współrzędne końca wskazówek nie dają się odróżnić od współrzędnych środka tarczy. W rozważaniach teorii względności trzeba zawsze mieć na myśli taki zegar „punktowy", czyli zegar **Einsteinowski**. Taki sam zegar spoczywa w układzie *U'*, czyli porusza się względem *U* z prędkością *v*. („Taki sam", to znaczy, że oba zegary umieszczone razem w tych samych warunkach fizykalnych, a więc będące także i w tym samym stanie ruchu, czyli spoczywające w tym samym układzie, idą synchronicznie). Co teraz powie o zegarze w *U'* obserwator w *U*?

Obserwator w *U'* (w pociągu) określi chwilę początkową wartością czasu $t'_1=o$, zaś końcową (gdy wskazówka obiegła tarczę) wartością $t'_2=T$, czyli zanotuje
$t'_2 - t'_1=T$.
Dla obserwatora w *U* jest według trzeciego z równań (II)

$$t_1=\frac{1}{k}\left(t_1'+\frac{v}{c^2}x'\right),\ t_2=\frac{1}{k}\left(t_2'+\frac{v}{c^2}x'\right).$$

Nie można tutaj stosować wprost trzeciego z równań (I), ponieważ różnym wartościom dla naszego zegara odpowiadają różne wartości *x*, a tylko *x'* nie ulegają zmianie. Odjąwszy od siebie powyższe równania, otrzymamy:

$$t_2-t_1=\frac{1}{k}\left(t_2'-t_1'\right)=\frac{1}{k}T\ .$$

Obserwator w *U* zawyrokuje tedy, że zegary spoczywające w *U'*, tj. poruszające się względem *U* **prostoliniowo z prędkością stałą** *v*, idą **wolniej** od zegarów spoczywających w *U* w stosunku *k*:1.

Nawzajem uznać musi obserwator w *U'*, że zegary spoczywające w układzie *U*, tj. poruszające się jednostajnie i prostoliniowo w odniesieniu do *U'*, idą w tym samym stosunku wolniej od zegarów spoczywających w *U'*. O tym poucza rachunek zupełnie analogiczny do powyższego.

Wszystko to wynika jako prosta matematyczna konsekwencja wzorów **Lorentza**. Nie ma w tym nic dziwnego ze stanowiska zasady względności i tylko dzięki głęboko zakorzenionemu w naszych umysłach a wielce wygodnemu pojęciu bezwzględnego czasu, oraz wierze, iż wymiary ciał są zupełnie niezależne od ich stanu ruchu, mogły te wyniki budzić zrazu instynktowne niedowierzanie i wydawać się co najmniej dziwaczne. Atoli zważywszy, że całe rozumowanie, prowadzące do naszych równań - oparte z jednej strony na faktach doświadczalnych, a z drugiej na postulacie, aby nie tylko prawa mechaniki, ale wszystkie prawa fizykalne były niezależne od układu. odniesienia - jest najzupełniej ścisłe, musimy się starać przyzwyczaić do mniej wygodnych pojęć względnego czasu i względnej miary długości, albowiem właśnie im tylko można przypisać byt realny.

3) Jak się przedstawia miara nachylona dowolnie do kierunku prędkości, o tym poucza następujący obraz geometryczny. Pomyślmy sobie kulę, której średnicą jest dana miara jednostkowa i spłaszczmy ją w kierunku prędkości *v* na sferoidę o tym samym równiku, co kula. Niechaj przy tym spłaszczeniu średnica kuli równoległa do *v* dozna skurczenia **Lorentza**, zamieniając się przez to na oś sferoidy. Natenczas każda dowolna średnica sferoidy w stosunku do odpowiadającej średnicy kuli określa wartość skurczenia tej ostatniej.

V.

Znaczenie stałej *c* (prędkości światła). Einsteinowskie prawidło składania prędkości. Energia kinetyczna w mechanice relatywistycznej. Utożsamienie masy z energia. Zasada Dopplera itd. Heurystyczne znaczenie teorii względności.

Dla usunięcia trudności oswojenia się z nowymi pojęciami, trzeba dobrze zdać sobie sprawę ze znaczenia stałej *c*. Jeżeli równania teorii względności mają się odnosić do wszelkich zjawisk fizykalnych, to stała *c* musi określać prędkość przenoszenia się wszelkich działań fizykalnych przez próżnię (bez pośrednictwa materii), a więc także i grawitacji! Gdyby bowiem znaleziono działanie przenoszące się z inną prędkością, np. *c'*, to dla zjawisk, w których ono bierze udział, przestałaby być ważną zasada względności, prowadząca do równań **Lorentza** ze stałą *c*, a obowiązywałaby inna zasada określona takimiż równaniami ze stałą *c'*. Przypuśćmy na chwilę, co wprawdzie trudno pojąć, ale co uznawał milcząco **Newton** w swej teorii powszechnego ciążenia, że do przeniesienia jakiegoś działania nie potrzeba wcale czasu, czyli że $c'=\infty$, to wówczas równania **Lorentza** przechodzą widocznie w zwykłe równania przekształcenia **Galileusza**. Wtedy czas fizykalny przybrałby charakter czasu bezwzględnego, wobec czego dotychczasowa rola tego pojęcia w klasycznej mechanice staje się jasną i zrozumiałą. Tak samo jasne i zrozumiałe jest stanowisko teorii względności, jak długo nie znajdziemy w przyrodzie działań przenoszących się na odległość (bez pośrednictwa materii) z prędkością różną od prędkości światła. Zdawało się nawet z początku, że właśnie w grawitacji mamy do czynienia z takim działaniem, atoli uogólniona teoria względności i grawitacji **Einsteina** usunęła wynikającą stąd ostatnią trudność najogólniejszego stosowania zasady względności. Zanim jednakże nią się zajmiemy, godzi się omówić bodaj po krotce inne najważniejsze, a niemniej zadziwiające konsekwencje szczególnej teorii względności.

1. Weźmy znów pod uwagę przykład pociągu jadącego po prostym torze ze stałą prędkością *v*. Niechaj wzdłuż tego pociągu spaceruje człowiek ku przodowi z również stałą prędkością *w* (względem pociągu). Na pytanie, jaka jest prędkość *V* człowieka względem ziemi, odpowiada, jak wiadomo, mechanika klasyczna równaniem

$V=v+w$.

Tymczasem z teorii względności wypada[4])

$$V = \frac{v+w}{1+vw/c^2}$$

Na pozór wydaje się, że ten teoretyczny wynik nie ma żadnego praktycznego znaczenia, gdyż nawet przy prędkościach pocisków różnią się liczbowe wyniki obu wzorów dopiero na szóstym miejscu dziesiętnym. Skoro jednakże zastosujemy nowy wzór do doświadczeń **Fizeau** i za *w* podstawimy prędkość światła w wodzie lub innym płynie c/n, to otrzymujemy znakomitą zgodność liczbową.

Godną uwagi jest nadto ta własność nowego wzoru dla składania zgodnie skierowanych prędkości, że prędkość wypadkowa nie może przewyższać prędkości światła w próżni *c*[5]).

2. Przez energię kinetyczną punktu materialnego o masie *m* i prędkości *v* rozumiemy w mechanice klasycznej, jak wiadomo, wyrażenie

$mv^2/2$.

Otóż zatrzymując w nowej mechanice, opartej na teorii względności, jako postulat, zasadę zachowania energii, musimy energię kinetyczną mierzyć wyrażeniem

$$\frac{mc^2}{\sqrt{1-v^2/c^2}},$$

które dla bardzo małych prędkości jest bardzo mało co większe od mc^2. Wobec olbrzymiej wartości *c* przypisuje to wyrażenie nawet punktom materialnym w spoczynku potężny zasób energii (tego samego charakteru, co kinetyczna w dawnym znaczeniu), która podczas ruchu wzrasta jeszcze bez granic, gdy wartość prędkości zdąża do *c*. Stąd wniosek, że żadna siła nie może cząstce materii udzielić prędkości równej prędkości światła.

Odkryte w naszych czasach zjawiska promieniotwórczości niektórych ciał chemicznych potwierdzają bardzo wyraźnie te wyniki teorii.

Związek nowego wyrażenia dla energii kinetycznej z dawnym staje się przejrzystym po rozwinięciu go na szereg

$$mc^2 + \tfrac{1}{2}mv^2 + \tfrac{1}{2}mv^2\left(\tfrac{3}{4}\frac{v^2}{c^2} + \tfrac{5}{8}\frac{v^4}{c^4} + ...\right)$$

Przy niezbyt wielkich wartościach prędkości v znika trzeci wyraz wobec drugiego, uwzględnianego jedynie w mechanice klasycznej. Pierwszy zaś nie wchodzi w rachubę, dopóki tylko pytamy, jak zależy energia kinetyczna punktu materialnego od jego prędkości.

3. Niezmiernie doniosłej zmianie uległo przez teorię względności pojęcie **masy**. Fizyka znała dotąd dwie zasady zachowania o fundamentalnym znaczeniu, a mianowicie zasadę zachowania energii i zasadę zachowania masy, przy czym oba te zasadnicze prawa przedstawiały się jako zupełnie od siebie niezależne. Teoria względności, nie naruszając, jak wspomniałem, zasady zachowania energii, pozbawia tym samym samoistnego znaczenia zasadę zachowania masy, dowodząc, że skoro ciało poruszające się z prędkością v otrzymuje z zewnątrz w postaci promieniowania energię E (mierzoną ze stanowiska w układzie, poruszającym się razem z ciałem), to energia tego ciała zwiększa się o $E\Big/\sqrt{1-v^2/c^2}$. Całkowitą energię naszego ciała określa przeto wyrażenie:

$$\left(m + E/c^2\right)\frac{c^2}{\sqrt{1-v^2/c^2}}\ ,$$

które przedstawia zarazem energię kinetyczną ciała o masie ($m+E/c^2$), poruszającego się z tą samą prędkością v. Przez pochłanianie energii promienistej z zewnątrz wzrasta zatem bezwładna masa ciała o E/c^2, czyli nie jest wielkością stałą, jak przyjmowano dotychczas. Nasuwa się pytanie, dlaczego nie wykryto tego badaniem doświadczalnym, które przecież tak daleko posunęło dokładność mierzenia masy. Otóż po prostu dlatego, bo przez promieniowanie nie podobna było dotąd udzielić ciału tyle energii E, ażeby ona grała dostrzegalną rolę wobec olbrzymiej ilości energii mc^2, jaką zawiera ciało w spoczynku. (Ta ilość energii jest okrągło bilion razy większa od zwykłej energii kinetycznej tej samej masy pędzącej z szybkością armatniego pocisku). Tej to okoliczności zawdzięczaliśmy ustawienie prawa zachowania masy o samoistnym znaczeniu, które to prawo zostało teraz wchłonięte przez zasadę zachowania energii.

Zaznaczywszy jeszcze po krotce, że szczególna teoria względności prowadzi w całkiem prosty i naturalny sposób do tak ważnej w astrofizyce zasady **Dopplera**[6]) i tłumaczy również bez zarzutu odkryte jeszcze przez **Bradley'a** zjawisko aberacji światła, podkreślę heurystyczną wartość teorii, która wynika jasno z jej następującego sformułowania:

Każde ogólne prawo przyrody musi się dać ująć w formę matematyczną, nie ulegającą zmianie, jeżeli zamiast współrzędnych przestrzenno-czasowych *x, y, z, t* pierwotnego układu *U*, wprowadzimy nowe *x', y', z', t'* dla układu *U'*, przy czym matematyczny związek między wielkościami kreskowanymi a niekreskowanymi określa przekształcenia Lorentza.

Matematycy wyrażają to samo zwięźlej, a mianowicie:

Ogólne prawa przyrody są współzmienne ze względu na przekształcenia Lorentzowskie.

W powyższym sformułowaniu teorii względności tkwi, jak widać, określony warunek matematyczny, przepisany przez teorię, przez co ona staje się cennym środkiem pomocniczym w poszukiwaniu ogólnych praw przyrody. Doskonałą ilustracją tego są np. wymienione poprzednio odkrycia zmienności masy i olbrzymiego zasobu energii w samej masie ciał, oczywiście poza energią chemiczną, termiczną, elektryczną itd. Gdyby znaleziono ogólne prawo przyrody, które by nie odpowiadało powyższemu warunkowi, to - wedle własnych słów **Einsteina** - tym samym obalonoby przynajmniej jedno z dwu podstawowych założeń teorii, jakimi są stałość prędkości światła i zasada względności.

Jak już wspomniałem, próbowano to uczynić w ciągu 15 lat, jakie upłynęły od początku teorii względności, a i teraz nie brak odważnych, zwłaszcza między tymi, którzy teorii głębiej nie studiowali, lub jej nie zrozumieli. Bo nie podlega wątpliwości, że nawet dla dobrze matematycznie-przyrodniczo wygimnastykowanego umysłu nie jest bagatelą gruntowne przemyślenie tej rzeczywiście niesłychanie śmiałej koncepcji. Nawet najprzystępniejsze wykłady teorii względności nie są i dla takich umysłów poobiednią lekturą, a już oryginalne, źródłowe prace **Einsteina** czyta się naprawdę „w pocie czoła” (jak słusznie zauważył prof. **Loria** w dyskusji nad swymi wykładami w Towarzystwie Politechnicznym). Tyczy się to zwłaszcza uogólnionej teorii względności i grawitacji, do której właśnie przechodzę, a która stawia nadzwyczaj wysokie wymagania co do matematycznego przygotowania czytelnika. Toteż ograniczyć się muszę do przedstawienia myślowego tła teorii, objaśnienia jej podstaw i podania najważniejszych wyników, bez konkretnego sformułowania jej matematycznego szkieletu. Tylko bowiem szczególna teoria dopuszcza stosowane powyżej całkiem elementarne traktowanie matematyczne, przystępne dla każdego przyrodnika. Ogólna teoria jest w całości jednym wielkim tryumfem matematyki, niejako tryumfem ducha nad materią.

4) Prędkość V określa iloraz różniczkowy $\frac{dx}{dt}$. Aby go obliczyć, rozwiążmy pierwsze z równań (I) względem x i zróżniczkujmy. Mamy tedy

$x=kx'+vt$,

$$V=\frac{dx}{dt}=k\frac{dx'}{dt'}.\frac{dt'}{dt}+v=kw.\frac{dt'}{dt}+v\,,$$

zważywszy, że $w=\frac{dx'}{dt'}$. Iloraz różniczkowy $\frac{dt'}{dt}$ znajdziemy z ostatniego z równań (I), a mianowicie:

$$\frac{dt'}{dt}=\frac{1}{k}\left(1-\frac{v}{c^2}.\frac{dx}{dt}\right)=\frac{1}{k}\left(1-\frac{v}{c^2}V\right).$$

Po wstawieniu tej wartości w wyrażenie dla V, otrzymamy:

$$V=w\left(1-\frac{v}{c^2}V\right)+v\,,$$

a stąd wzór umieszczony w tekście.

5) Skoro podstawimy $w=c$, to wzór dla prędkości wypadkowej daje

$$V=\frac{v+c}{1+\frac{v}{c}}=c.\frac{v+c}{c+v}=c,$$

zgodnie z postulatem stałej prędkości światła we wszystkich układach Galileuszowych.

W doświadczeniu **Fizeau** odpowiada v prędkości płynu, $w=c'=c/n$ prędkości światła w płynie spoczywającym, a V prędkości światła w odniesieniu do ścian rury w płynie poruszającym się.

Z wzoru Einsteina znajdujemy:

$$V=\frac{v+\frac{c}{n}}{1+\frac{v}{cn}}.$$

Ponieważ $\frac{v}{cn}$ jest bardzo małe w porównaniu do 1, więc $1:\left(1+\frac{v}{cn}\right)=1-\frac{v}{cn}+\ldots$ z pominięciem wielkości małych rzędu wyższego. A zatem

$$V=\frac{c}{n}+v\left(1-\frac{1}{n^2}\right)-\frac{v^2}{cn}.$$

Ale ostatni wyraz jest znowu zbyt mały, aby mógł wpłynąć na pomiar przy stosowanych wartościach *v*. Opuściwszy go przeto, otrzymujemy dokładnie wzór empiryczny **Fizeau**.
6) Niechaj wzdłuż osi X-ów układu *U'* rozchodzi się płaska fala jednorodnego światła o częstości drgań *n'* i kącie fazy *α*. (Źródło światła znajduje się gdzieś bardzo daleko na ujemnej części osi). Stosunek odchylenia do amplitudy w miejscu określonym wartością *x'* przedstawia wtedy, jak wiadomo, wyrażenie

$$\cos\left[2\pi n'\left(t'-\frac{x'}{c}\right)+\alpha\right].$$

Zapytajmy, jak to zjawisko przedstawi się dla obserwatora na osi X-ów układu *U*, do którego źródło światła się zbliża?

Wstawiwszy za *t'* i *x'* wartości z równań **Lorentza**, otrzymamy z powyższego:

$$\cos\left[2\pi n'\frac{1+v/c}{k}\left(t-\frac{x}{c}\right)+\alpha\right]$$ albo

$$\cos\left[2\pi n\left(t-\frac{x}{c}\right)+\alpha\right],$$ jeżeli

$$n=n'\sqrt{\frac{1+v/c}{1-v/c}}.$$

Dla obserwatora w układzie *U* będzie zatem częstość drgań *n* większa od *n'* w stosunku zależnym od ilorazu *v/c* powyższego wzoru, wyrażającego zasadę **Dopplera** w postaci relatywistycznej, zupełnie symetrycznej względem obu układów. (Rozwiązując bowiem równanie względem *n'* znajdujemy:

$$n'=n\sqrt{\frac{1-v/c}{1+v/c}},$$

czyli to samo, co byśmy otrzymali zamieniając *v* na -*v*, i *n* na *n'*). Ta postać jest formalnie niezgodna ze znaną klasyczną:
$n=n'(1+v/c)$,
tak jak wszystkie prawie formuły mechaniki klasycznej i nowej, ale przy małych wartościach *v/c*, jakie jedynie występują w przyrodzie, jest widocznie
$\sqrt{\frac{1+v/c}{1-v/c}}=\frac{1+\frac{1}{2}v/c+\ldots}{1-\frac{1}{2}v/c+\ldots}=1+v/c+$(wielkości rzędu v^2/c^2 itd.), czym się tłumaczy zadowalająca zgodność formuły klasycznej z doświadczeniem.

VI.
Ogólna zasada względności. Masa ciężka i masa bezwładna. Einsteinowska zasada równoważności.

Sformułowaną poprzednio zasadę względności dla układów poruszających się względem siebie jednostajnie i prostoliniowo nazwał **Einstein** szczególną (speziell), ponieważ ona się odnosi, biorąc ściśle, tylko do takich układów, w których obowiązuje prawo bezwładności, tj. do układów, w których każde swobodne ciało, usunięte spod działania wszelkich innych mas, porusza się jednostajnie i prostoliniowo. Takie układy nazwaliśmy już krótko Galileuszowymi. Punktem wyjścia ogólnej teorii względności jest **ogólna zasada względności**. Wysłowimy ją na razie w następujący sposób:

Nie tylko układy Galileuszowe, ale i wszelkie układy odniesienia są równouprawnione do matematycznego sformułowania ogólnych praw przyrody, bez względu na ich stan ruchu.

Sukcesy szczególnej teorii względności musiały u jej twórcy obudzić dążność do powyższego uogólnienia. Atoli zdawało się na pozór, że dopięcie tego najwyższego celu natrafi na nieprzezwyciężone przeszkody. Weźmy bowiem pod uwagę nasz przykład pociągu kolejowego jako układu *U'* ruchomego względem ziemi, tj. układu *U*. Dopóki ruch pociągu jest prostoliniowy i jednostajny, bez żadnych wstrząśnień (przyspieszeń), nie doznajemy jako pasażerowie żadnego wrażenia ruchu, a spojrzawszy przez okno, dostrzegamy raczej ruch otoczenia pociągu. Dlatego bez żadnej trudności, bez zadania gwałtu intuicji, potrafimy w myśl zasady względności interpretować stan faktyczny także i w ten sposób, że pociąg spoczywa, a jego otoczenie się porusza.

Skoro jednakże wskutek mniej lub więcej silnego zahamowania stanie się ruch pociągu wyraźnie niejednostajnym, to odczuwamy mniej lub więcej gwałtowne szarpnięcie ku przodowi i trudno nam się oprzeć uznaniu wraz z **Newtonem**, że ruch niejednostajny ma przecież charakter bezwzględnej fizykalnej rzeczywistości[7]). Otóż **Einstein** wykazuje w nadzwyczajnie prosty i przekonywujący sposób, że bynajmniej tak być nie musi. W tym celu zwraca przede wszystkim uwagę na fakt od dawna znany, lecz przedtem nie wyzyskany i uważany raczej za coś przypadkowego, a mianowicie na równość masy bezwładnej i ciężkiej. Tę równość stwierdził doświadczalnie z nadzwyczajną precyzją między innymi węgierski fizyk **R. Eötvös** w r. 1890. (Dokładność pomiarów **Eötvösa** sięgała 1/20000000. Te doświadczenia powtórzono około r. 1909 z dokładnością jednej stumilionowej). Że klasyczna mechanika nie zniewalała do przyjęcia tej równości, tego dowodzą choćby i dawniejsze próby znalezienia różnicy między masą bezwładną, a ciężką (grawitacyjną). Motywem tych poszukiwań była wielka zagadka grawitacji, urągająca uporczywie wszelkim usiłowaniom jej rozwiązania aż do najnowszych czasów. Nie próbował wyjaśnić grawitacji sam **Newton** zasłaniając się dumną dewizą: „*Hypotheses non fingo*" i zadowolił się ustawieniem prawa proporcjonalności siły ciężkości względem masy, stwierdziwszy doświadczalnie jej niezależność od materiału i fizycznego stanu ciała. Z drugiej strony Newtonowskie prawo ruchu przedstawia masę bezwładną jako wielkość proporcjonalną względem siły, wyrażając to związkiem:

Siła=(masa bezwł.).(przyspieszenie).

Skoro siłą przyspieszającą jest ciężar ciała, czyli, gdy siła ma siedzibę w polu grawitacyjnym np. ziemi, to według Newtonowskiego prawa grawitacji jest:

Siła=(masa ciężka).(natężenie pola grawitacyjnego).

Ponieważ doświadczenia wykazują, że w tym samym miejscu pola grawitacyjnego ziemi wszelkie ciała spadają z tym samym przyspieszeniem, przeto przy stosownym obiorze jednostek musi być masa **ciężka** równa masie **bezwładnej** tego samego ciała. **Einstein** interpretuje ten fakt fizykalny słowami:

„Ta sama jakość ciał przyrody uzewnętrznia się stosownie do okoliczności bądź jako **bezwładność**, bądź też jako **ciężkość**".

Dla powiązania tego wyniku z postulatem ogólnej względności przenieśmy się myślą z **Einsteinem** w takie miejsce wszechświata, położone z dala od wszelkich mas kosmicznych, iż można z dostateczną dokładnością przyjąć tam ważność zasady bezwładności. Niechaj w tym miejscu znajduje się obszerna, szczelnie zamknięta skrzynia, zaopatrzona we wszystko, co potrzeba do życia i do obserwacji fizykalnych. Dajmy na to, że jesteśmy we wnętrzu skrzyni i spostrzegamy oczywiście brak objawów siły ciężkości wraz z jego dość zabawnymi konsekwencjami. Musimy bowiem siebie przywiązać do podłogi, jeżeli nie chcemy za każdym potrąceniem o nią ulecieć pod sufit, a każdy najlżej trącony przedmiot leci w powietrzu po linii prostej, dopóki nie trafi na ścianę lub sprzęt naszego pokoju. Niewielka liczba doświadczeń i pomiarów przekonywa nas o zupełnym braku pola grawitacyjnego (co możemy sobie wytłumaczyć także przypadkowym znalezieniem się naszego układu między dwoma lub więcej ciałami niebieskimi, w miejscu gdzie ich ciążenia się znoszą), a wobec tego, że tylko ta kwestia nas interesowała na razie, kładziemy się spać, przywiązawszy się starannie do łóżka.

Tymczasem w „nocy” nadziemska jakaś istota, bo tylko taka mogłaby zrealizować ten eksperyment, rozpoczęła ze stałą siłą ciągnąć - mniejsza o to, skąd - za linę uwiązaną zewnątrz do stropu i udzieliła tym sposobem naszej skrzyni stałego przyspieszenia w naszym, oczywiście Galileuszowym, układzie odniesienia. Przebudziwszy się, stwierdzimy przeto od razu jakąś zmianę, którą po niewielu doświadczeniach określimy z wielkim prawdopodobieństwem jako pojawienie się jednorodnego pola ciężkości i zobaczywszy jeszcze przez dopiero przypadkowo odkryte okno w suficie wyprężoną linę, wywnioskujemy na pewno, że nasze mieszkanie zawieszono w polu grawitacyjnym jakiegoś ciała niebieskiego. Czy można powiedzieć, że jesteśmy w błędzie? Czy nie przedstawia się tutaj sprawa zupełnie podobnie, jak w przypadku jednostajnego biegu pociągu, w którym mieliśmy prawo twierdzić jako pasażerowie, że jesteśmy w spoczynku, a okolica się porusza? Wszak nasze przedstawienie sobie stanu układu jako spoczynku w jednorodnym polu grawitacyjnym prowadzi do zupełnie tych samych fizykalnych konsekwencji w obrębie układu, co poprzednie przedstawienie jako ruchu jednostajnie przyspieszonego w Galileuszowej „przestrzeni” bez pola grawitacyjnego. Obydwa przedstawienia są ze stanowiska matematyczno-fizykalnego opisu zjawisk zupełnie równouprawnione, albowiem nie jesteśmy w stanie żadnymi doświadczeniami we wnętrzu skrzyni (w układzie *U’*) rozstrzygnąć, która z obu alternatyw zachodzi w rzeczywistości.

Ogólna zasada, wynikająca z powyższego rozumowania, nazwana przez **Einsteina** „zasadą równoważności” (Aequivalenzprinzip), odbiera ruchom niejednostajnym, jak np. naszego zahamowanego pociągu, charakter bezwzględnej fizykalnej rzeczywistości i dostarcza silnego argumentu dla uogólnionego postulatu względności. W myśl tej zasady wolno mi bowiem powiedzieć w rozpatrywanym przykładzie, że pociąg jest układem w spoczynku, w którym pojawiło się pole grawitacyjne o poziomych liniach sił i danym natężeniu.

To samo odnosi się widocznie do omawianego już argumentu **Macha** na korzyść ogólnej zasady względności w odniesieniu do ruchów obrotowych, którym **Newton** przypisywał charakter bezwzględny. W obu przypadkach można wszystkie masy reszty wszechświata uważać za współdziałające przy wytworzeniu odpowiadającego pola grawitacyjnego, albowiem w okresie przyspieszenia rozpatrywanego układu *U’* (np. zahamowanego pociągu) są owe masy również przyspieszone i mogą przez to, jak dowodzi **Einstein**, **indukować** pole grawitacyjne, podobnie jak poruszane z przyspieszeniem naboje elektryczne indukują pole elektryczne.

7) Czytelnik zechce porównać refleksje **Lenarda** na ten temat i odpowiedź **Einsteina** w dodatku *A*, umieszczonym na końcu.

VII.
Zakrzywienie promieni światła w polu grawitacyjnym. Matematyczny pomysł Minkowskiego.

Z poprzednich rozważań, obok ostatniego, anticipando przytoczonego wyniku, widać jasno, że ogólna teoria względności musi prowadzić do ważnych wyników dla praw grawitacji. Ale już z samej ogólnej zasady względności dadzą się wyprowadzić doniosłe wnioski. Każmy naszemu pociągowi jechać ze stałym przyspieszeniem p i na jego gładkiej podłodze puśćmy w ruch piłkę w poprzek lub na ukos względem podłużnej osi pociągu. Gdyby ruch pociągu był jednostajny, to piłka toczyłaby się (z pominięciem oporów) po linii prostej. Wskutek przyspieszenia pociągu powstanie według zasad klasycznej mechaniki ruch piłki po paraboli o promieniu krzywizny v^2/p (v=prędkość piłki) w wierzchołku, tj. tam, gdzie kierunek prędkości jest prostopadły do kierunku przyspieszenia. Ze stanowiska szczególnej teorii względności będzie ten wynik niezupełnie ścisły, ale wystarczająco przybliżony do naszego rozważania. To samo stosuje się widocznie także do promienia światła obserwowanego w pociągu (który nie może być prostoliniowy, jak w układzie Galileusza), a zatem w myśl zasady równoważności i do promienia światła w jednorodnym polu grawitacyjnym o natężeniu p. Promień światła puszczony poziomo w próżni nad ziemią zakrzywia się według tego w przybliżeniu promieniem c^2/g, tj. około 9 bilionów km, co oczywiście usuwa się spod obserwacji i pomiarów. Za to w pobliżu słońca, gdzie natężenie pola grawitacyjnego, a więc i zakrzywienie promieni światła jest znacznie większe, obliczył **Einstein** najpierw w przybliżeniu w r. 1911, a później dokładnie w r. 1916 (po opracowaniu ogólnej teorii względności), że promień światła od gwiazd musi się zakrzywić o 1,7’’ zanim dojdzie do naszego oka.

To przewidziane teoretycznie odgięcie promieni świetlnych przez pole grawitacyjne słońca znaleziono potem istotnie pomiarami fotograficznymi podczas zaćmienia słońca 29. maja 1919 r., a ogłoszenie wyników tych pomiarów w Royal Society 6. listopada tegoż roku wywołało w tym słynnym towarzystwie naukowym, któremu przewodniczył wielki **Newton** przez ostatnich 25 lat swego życia, tak potężne wrażenie, że, po wysłuchaniu sprawozdania astronomów **Eddingtona** i **Crommelina**, oświadczył prezydent Royal Society, iż „zebrani zapoznali się z faktem naukowym najbardziej znamiennym od odkrycia przepowiedzianej przez **Leverriera** i **Adamsa** planety Neptuna. Jeżeli zaś fakt ten rozpatruje się jako rezultat ludzkiej myśli, jest on jednym z najważniejszych, jeżeli nie najważniejszym w dziejach nauki”.

Ale powyższy wniosek z ogólnej zasady względności pociąga za sobą drugą nader ważną konsekwencję, znosząc ogólną ważność postulatu szczególnej teorii względności, iż prędkość światła w próżni jest stałą. Albowiem zakrzywienie promieni światła może zajść tylko wtedy, gdy prędkość rozchodzenia się światła zmienia się od miejsca do miejsca. Nie można w tym upatrywać obalenia szczególnej teorii przez ogólną, jak to czynili niektórzy przeciwnicy teorii względności, lecz tylko ograniczenie ważności szczególnej teorii do krańcowego przypadku braku pola grawitacyjnego. Najpiękniejszym losem fizykalnej teorii jest, jak słusznie podnosi **Einstein**, wskazanie drogi do ustawienia teorii obszerniejszej, ażeby zamieszkać w niej nadal w skromniejszej nieco roli krańcowego przypadku.

Zbudowaniu ogólnej teorii względności i grawitacji poświęcił **Einstein** parę lat usilnej pracy, bo trudności, jakie trzeba było pokonać, były całkiem niezwykłe. Sam zaznacza, że gdyby nie sukurs, tkwiący w doniosłym pomyśle matematycznym **Minkowskiego**, to ogólna teoria nie wyszłaby prawdopodobnie dotąd z „powijaków”. Jakiż to pomysł? Na czele swego wykładu na 80 zjeździe niemieckich przyrodników i lekarzy w Kolonii we wrześniu 1908 r. wypowiedział **Minkowski** te pamiętne słowa:

„Zapatrywania na przestrzeń i czas, jakie tutaj rozwinę, wyrosły na gruncie doświadczalnym. Na tym polega ich siła. Tendencja tych poglądów jest radykalna, bo od tej chwili schodzi przestrzeń sama w sobie i czas jako taki do rzędu cieni, a tylko rodzaj unii obu tych pojęć ma zachować samoistność”.

W tych słowach tkwi przede wszystkim stwierdzenie faktu, że fizyka relatywistyczna pozbawiła przestrzeń i czas charakteru bezwzględnego, wskutek czego trójwymiarowe kontinuum przestrzenne i jednowymiarowe kontinuum czasowe, które istniały obok siebie niezależnie w poglądzie na świat klasycznej fizyki, tworzą obecnie jako jedność czterowymiarowe kontinuum przestrzenno-czasowe. Czas przybiera tedy rolę czwartej współrzędnej, w pomyślanej czterowymiarowej przestrzeni zjawisk fizykalnych. Otóż doniosłym dla formalnego rozwoju teorii względności odkryciem **Minkowskiego** było poznanie, że czterowymiarowe przestrzenno-czasowe kontinuum szczególnej teorii względności posiada co do swoich charakterystycznych własności formalnych jak najbliższe pokrewieństwo z trójwymiarowym kontinuum Euklidesowej geometrycznej przestrzeni. Najwyraźniej wychodzi to na jaw przez wprowadzenie do formuł teorii względności, zamiast zwykłej współrzędnej czasowej t, wielkości urojonej x_4, za pomocą podstawienia $x_4^2=-c^2t^2$.
Wówczas bowiem przybierają prawa przyrody, czyniące zadość wymaganiom teorii względności, takie formy matematyczne, w których współrzędna czasowa jest najzupełniej równouprawniona z trzema pozostałymi współrzędnymi przestrzennymi, oznaczonymi przez x_1, x_2, x_3. Wszystkie cztery współrzędne x_1, x_2, x_3, x_4 odpowiadają formalnie dokładnie trzem przestrzennym współrzędnym zwykłej analitycznej geometrii w przestrzeni Euklidesowej. (Każda z nich np. jest prostopadła do trzech pozostałych). Nawet dla najmniej matematycznie wyszkolonego umysłu staje się jasne, że przez takie czysto formalne ujęcie sprawy zyskała teoria nadzwyczajnie na przejrzystości i prostocie. Podkreślam jeszcze raz formalny charakter koncepcji **Minkowskiego**, aby od razu przeciąć nić, jaką chętnie nawiązują ze światem zjawisk fizykalnych drogą abstrakcyjnych idei matematycznych spirytyści, mediumiści i, jak ich tam jeszcze nazywają, wywoływacze duchów, czy też - honny soit qui (mal y pense) - badacze świata pozazmysłowego.

Tutaj przychodzi mi także na myśl wspomniana już dwukrotnie sprawa nazwy teorii **Einsteina**, obrana przezeń może o tyle niezbyt szczęśliwie, że prowadzi do nieporozumień całkiem fatalnych. Zupełnie trafnie podniósł prof. **Loria** w dyskusji nad swoimi wykładami w Towarz. politechn., że to jest raczej teoria bezwzględnej fizykalnej rzeczywistości, bo wyłącza wszelką zależność zjawisk przyrody od niewątpliwie oderwanych, niefizykalnych pojęć bezwzględnego czasu i przestrzeni. Właśnie zespół wszelkich zjawisk fizykalnych nakazuje nam nieodparcie mierzyć czas inaczej w każdym z poruszających się względem siebie układów odniesienia, a użycie do tego mierzenia zjawiska rozchodzenia się światła jest podyktowane jedynie i wyłącznie względami ekonomii myślowej w sensie **Macha**, czyli zupełnie zrozumiałym staraniem o możliwą prostotę w sformułowaniu ścisłych praw przyrody. Że ta prostota nie jest taką, do jakiej nawykliśmy sugestywnie przez przeszło dwa wieki bujnego rozkwitu fizyki na gruncie mechaniki Newtonowskiej, jest to oczywiście „winą” samej przyrody, która jest właśnie taka, a nie inna.

VIII.
Niezgodność geometrii Euklidesowej z postulatem ogólnej względności. Współrzędne Gaussa. Ścisłe sformułowanie ogólnej zasady względności.

Ale wróćmy do roli matematycznej koncepcji **Minkowskiego**, oraz trudności piętrzących się przy budowie ogólnej teorii na postulacie równouprawnienia w sformułowaniu praw przyrody nie tylko układów Galileuszowych, lecz także wszelkich innych układów o dowolnym, względnym ruchu. Te trudności wyjdą dobrze: na jaw z następującego rozważania.

Pomyślmy sobie pewien obszar przestrzenno-czasowy w Galileuszowym układzie *U*, a zarazem drugi układ *U'*, obracający się jednostajnie względem poprzedniego. Dla uzmysłowienia możemy, abstrahując od siły ciężkości, jako pierwszy układ *U* przyjąć ziemię, a jako drugi *U'* poziomy wielki krążek np. sceny obrotowej, karuzelu itp. Odrysujmy kołowy kontur krążka na położonej tuż pod nim, poziomej, gładkiej płaszczyźnie na ziemi. Jeżeli w układzie *U*, tj. ziemi, obowiązuje geometria **Euklidesa**, to, mierząc obwód naszego koła i dzieląc go przez zmierzoną również średnicę, otrzymamy znaną liczbę π=3,14159... Skoro jednakże pomyślimy sobie to samo koło mierzone w układzie *U'* (obracającym się) i użyjemy do pomiaru nieskończenie małych miarek nieruchomych w tym układzie, to otrzymamy wprawdzie tę samą wartość średnicy, co poprzednio, gdyż miarki są prostopadłe do kierunku prędkości, ale nieco większą wartość obwodu z powodu Lorentzowskiego skurczenia miarek, leżących w kierunku ruchu. Widać stąd, że w układzie *U'*, tj. dla krążka, traci ważność geometria Euklidesowa. Ponieważ odśrodkowe działania bezwładności można według zasady równoważności pojmować w każdym punkcie jako działania grawitacji, przeto jest rzeczą jasną, że obecność pola grawitacyjnego domaga się użycia metrycznej geometrii nieeuklidesowej. Otóż biorąc ściśle nie ma nigdzie na świecie skończonego obszaru, całkiem wolnego od działań grawitacji; skoro więc chcemy w fizyce utrzymać ogólny postulat względności, to musimy zrezygnować z matematycznego opisu wzajemnego położenia ciał za pomocą metod zwykłej geometrii Euklidesowej. Nie trzeba jednakże sądzić, że nada się tutaj dla całej przestrzeni fizykalnej któraś inna szczególna geometria, np. **Bo1yai'a-Łobaczewskiego**. Bynajmniej! W każdym w ogóle miejscu musimy przestrzeni przypisać inne metryczne własności, zależne widocznie od rodzaju pola grawitacyjnego, i zastosować odpowiadającą geometrię.

Widzimy w tym przede wszystkim trudność matematyczną, do której pokonania utorował drogę już prawie przed wiekiem sławny **Gauss**. On podał metodę matematycznego traktowania najogólniejszych kontinuów o określonych związkach metrycznych za pomocą całkiem ogólnych współrzędnych, które nazywamy jego imieniem. Metodę **Gaussa** zastosował **Riemann** do rozważań najogólniejszej metrycznej geometrii trójwymiarowej w swojej słynnej rozprawie habilitacyjnej „Ueber die Hypothesen, welche der Geometrie zugrunde liegen" z r. 1854. Dopiero w ostatnich latach zwrócono uwagę na to, że geniusz tego matematyka przeczuł dobrze drogę, na którą dopiero w sześćdziesiąt lat później wstąpił z takim powodzeniem **Einstein**. **Riemann** wprowadził pojęcie krzywizny przestrzeni jako uogólnienia pojęcia krzywizny dwuwymiarowego kontinuum, tj. powierzchni geometrycznej. Łatwo to objaśnić bez matematycznych wywodów przy pomocy analogii. Dwuwymiarowej płaszczyźnie odpowiada trójwymiarowa przestrzeń Euklidesowa. Obie mają krzywiznę równą zeru. Podobnież dwuwymiarowej powierzchni kuli odpowiada trójwymiarowa przestrzeń „sferyczna". Obie mają krzywiznę skończoną, stałą.

Przestrzenno-czasowemu kontinuum fizyki relatywistycznej odpowiadają oczywiście cztery współrzędne **Gaussa**. Nietrudno teraz zauważyć, że poprzednie wysłowienie ogólnej zasady względności nie było ścisłe, albowiem z wyłuszczonych powyżej powodów nie można, biorąc ściśle, używać ciał sztywnych jako układów odniesienia przy opisie przestrzenno-czasowym metodą, stosowaną w szczególnej teorii względności, gdyż metryczne własności tych ciał zależą od pola grawitacyjnego. W miejsce ciał, jako układów odniesienia, wchodzą teraz odpowiadające Gaussowskie układy współrzędnych. Podstawowej myśli ogólnej zasady względności odpowiada teraz następujące ścisłe wysłowienie: „Wszystkie układy współrzędnych **Gaussa** są zasadniczo równoważne przy sformułowaniu ogólnych praw przyrody".

Ogólną zasadę względności można jeszcze wysłowić w innej postaci, cechującej ją jeszcze wyraźniej, jako naturalne rozszerzenie szczególnej zasady względności. Równania wyrażające ogólne prawa przyrody w szczególnej teorii względności dla układu *U*, zamieniają się, jak wiadomo, na równania o tej samej postaci, skoro wprowadzimy zamiast zmiennych przestrzenno-czasowych x, y, z, t nowe zmienne x', y', z', t', odniesione do układu U' przy zastosowaniu przekształcenia Lorentzowskiego. Natomiast podług ogólnej teorii względności muszą te równania przy **dowolnych podstawieniach** zmiennych **Gaussa** x_1, x_2, x_3, x_4 przybierać tę samą formę matematyczną, każdemu bowiem przekształceniu (dowolnemu, nie tylko Lorentzowskiemu) odpowiada zamiana jednego układu współrzędnych **Gaussa** na inny. Ten postulat wyraża **Einstein** w swej fundamentalnej rozprawie z r. 1916 następującymi słowy:

„Ogólne prawa przyrody należy wyrażać równaniami ważnymi dla wszelkich układów współrzędnych, tj. współzmiennych przy wszelkich podstawieniach (ogólnie współzmiennych)".

A dalej pisze tamże:

„Jasne jest, że fizyka, dogadzająca powyższemu wymaganiu czyni zadość ogólnemu postulatowi względności. Albowiem pośród **wszystkich** podstawień muszą się w każdym razie znajdować i te, które odpowiadają wszystkim względnym ruchom układów współrzędnych. Że to wymaganie współzmienności ogólnej, **zabierające przestrzeni i czasowi ostatnią resztę fizykalnej przedmiotowości**, jest wymaganiem naturalnym, wynika z następującego rozważania.

Wszystkie nasze notowania faktów czasowo-przestrzennych sprowadzają się zawsze do wyznaczenia czasowo-przestrzennych koincydencji. Gdyby np. zjawiska (w przyrodzie) polegały jedynie na ruchach punktów materialnych, to nie byłoby ostatecznie nic więcej spostrzegalnego, jak tylko spotkania dwu lub więcej z tych punktów. A i wyniki naszych pomiarów nie są czym innym, jak stwierdzeniem podobnych spotkań punktów materialnych naszych miar z innymi punktami materialnymi, albo też koincydencji między wskazówkami zegara lub punktami tarczy zegarowej a obserwowanymi punktowymi zdarzeniami, jakie zachodzą w tym samem miejscu i czasie.

Wprowadzenie układu współrzędnych nie służy do niczego innego, jak tylko do łatwiejszego opisu zespołu takich koincydencji. Przydzielamy światu cztery zmienne czasowo-przestrzenne x_1, x_2, x_3, x_4 tak, aby każdemu punktowemu zdarzeniu odpowiadał jeden układ wartości tych zmiennych. Dwu koincydującym zdarzeniom punktowym odpowiada tenże sam układ wartości zmiennych $x_1,\ldots x_4$; czyli koincydencję charakteryzuje zupełna zgodność współrzędnych. Skoro tedy wprowadzimy zamiast zmiennych $x_1,\ldots x_4$ ich dowolne funkcje x'_1, x'_2, x'_3, x'_4, jako nowy układ współrzędnych, tak, aby oba układy wartości odpowiadały sobie nawzajem jednoznacznie, to równość wszystkich czterech współrzędnych jest także w nowym układzie wyrazem dla przestrzenno-czasowej koincydencji dwu zdarzeń punktowych. A ponieważ wszystkie nasze fizykalne obserwacje i doświadczenia dadzą się ostatecznie sprowadzić do takich koincydencji, więc przede wszystkim nie ma powodu, aby wyróżniać pewne układy spośród innych, czyli dochodzimy do wymagania ogólnej współzmienności".

Widzę w myśli matematyków, zwłaszcza najnowszej szkoły, którzy, słysząc to, mocno kiwają głowami, oczywiście, jeżeli nie studiowali dotąd ogólnej teorii względności, a słyszą po raz pierwszy tak niesłychanie śmiałe pod względem matematycznym wymagania. Mogę ich uspokoić zapewnieniem, że te zastrzeżenia i ograniczenia, jakie by mieć chcieli, analogiczne np. do podkreślonych przez **Boltzmanna** w odniesieniu do klasycznej mechaniki (ob. jego „Die Prinzipe der Mechanik"), znajdują się i w teorii Einsteina. Najważniejsze wynikają z rozumiejącego się samo przez się założenia:

„Dla nieskończenie małych obszarów czterowymiarowych (kontinuum przestrzenno-czasowego) spełnia się szczególna teoria względności przy stosownym obiorze współrzędnych".

Co się tyczy matematycznej koncepcji **Minkowskiego**, to jej użyteczność dla celów ogólnej teorii względności łatwo pojąć z następującego rozważania. Dajmy na to, że torem danego punktu materialnego jest krzywa płaska, uzmysłowiona na płaszczyźnie rysunku, obranej za płaszczyznę x_1, x_2 prostokątnego układu współrzędnych. Sama krzywa toru nie wystarcza oczywiście do opisu ruchu. Aby ten opis uczynić kompletnym, winniśmy np. w każdym punkcie krzywej zanotować odpowiadającą wartość czasu t. Zamiast tego możemy z korzyścią przyjąć t, jako trzecią współrzędną x_4, np. do tamtych prostopadłą i tym sposobem dany ruch płaski przedstawić dokładnie krzywą przestrzenną w układzie x_1, x_2, x_4. Np. ruch jednostajny po kole na płaszczyźnie x_1, x_2 będzie przedstawiony linią śrubową w trójwymiarowej rozmaitości x_1, x_2, x_4. **Minkowski** nazwał tego rodzaju linie opisujące w zupełności ruch danego p.*m*-go, **liniami światowymi** (Weltlinien) tego punktu. Sam tor p.*m*-go wyraża niejako dowolnie jedną stronę jego ruchu, a mianowicie rzut trójwymiarowej linii światowej na płaszczyznę x_1, x_2. Skoro teraz sam ruch punktu odbywa się już w trójwymiarowej przestrzeni, to jako jego linię światową otrzymamy krzywą w czterowymiarowej rozmaitości x_1, x_2, x_3, x_4 i możemy na tej linii studiować nadzwyczajnie wygodnie wszelkie własności ruchu punktu. Przestrzenny tor punktu jest rzutem jego linii światowej na rozmaitość x_1, x_2, x_3. Ten tor przedstawia zatem dowolnie i jednostronnie tylko niektóre własności ruchu, podczas gdy linia światowa wyraża je w zupełności.

IX.
Ogólne podstawowe prawo dynamiki relatywistycznej. Einsteinowska teoria grawitacji. Wyjaśnienie perturbacji w ruchu perihelium Merkurego. Praktyczne i naukowe znaczenie teorii. Bezwładność w świetle ogólnej teorii względności.

Dla ogólnego zrozumienia samego tylko wysłowienia fundamentalnego prawa nowej teorii (dynamiki relatywistycznej) potrzeba jeszcze objaśnić bliżej pewien jednowymiarowy utwór matematyczny, zwany **linią geodezyjną**. W ogóle można ją określić (choć nie zupełnie ściśle), jako najkrótszą linię, łączącą dwa niezbyt odległe punkty jakiegokolwiek kontinuum. Przymiotnik „geodezyjna" pochodzi od pierwszego ważnego zastosowania takich linii w geodezji, zajmującej się pomiarem ziemi. Linią geodezyjną na płaszczyźnie lub w trójwymiarowej Euklidesowej przestrzeni jest, jak wiadomo, prosta, na powierzchni kuli - łuk koła wielkiego itd. Otóż podstawowe prawo ogólnej teorii względności, stanowiące najobszerniejsze uogólnienie prawa bezwładności klasycznej mechaniki brzmi:

„**Światowa linia p.*m*-go jest linią geodezyjną w kontinuum przestrzenno-czasowym**".

Nie mogę tutaj wdawać się w interesujący wywód tego prawa, a tym mniej w matematyczną konstrukcję wiążącej się z nim arcykunsztownej szczytowej budowli teorii względności, tj. teorii grawitacji; zaznaczę tylko, że powyższe ogólne prawo ruchu przedstawia się równaniem wariacyjnym

$$\delta\int ds = o\,,$$

w którym ds oznacza liniowy element czterowymiarowego kontinuum x_1, x_2, x_3, x_4, przy czym

$$ds^2=g_{11}dx_1^2+g_{12}dx_1dx_2+\ldots..+g_{44}dx_4^2$$

przedstawia kwadrat tego elementu. To równanie zaś jest równoważne czterem zupełnym równaniom różniczkowym drugiego rzędu. Współczynniki g_{11}, g_{12}.... w liczbie 10-u określają tyleż tzw. „potencjałów grawitacyjnych", do których wyznaczenia ustawił **Einstein** 10 równań różniczkowych. Razem tedy mamy 14 równań różniczkowych i to nieliniowych, czyli aparat teoretyczny mogący odebrać odwagę nawet wytrawnym matematykom. Nie uląkł się go sam twórca dzięki tej, łatwej do przewidzenia okoliczności, że najczęściej można poprzestać na rozwiązaniach przybliżonych. Inaczej bowiem mechanika klasyczna, jako teoria przybliżona ze stanowiska teorii względności, nie mogłaby tak dokładnie opisywać niemal wszystkich do niedawna doświadczalnie badanych ruchów w przyrodzie.

Wszakże przed odkryciem promieni katodowych i tzw. promieni *β*, wysyłanych przez rad i inne ciała promieniotwórcze, znano właściwie tylko jedno zjawisko mechaniczne i to w astronomii, które się wyłamywało spod praw Newtonowskiej mechaniki i teorii grawitacji. Jest nim stosunkowo nieznaczna, bo wynosząca 43’’ na stulecie przewyżka obrotu perihelium Merkurego ponad wartością obliczoną z teorii **Newtona** przy uwzględnieniu wpływów innych planet. To zboczenie stwierdzono jednakże z bardzo wielką dokładnością dzięki wyjątkowo znacznemu mimośrodowi orbity Merkurego. Jest rzeczą jasną, że astronomowie kusili się niejednokrotnie o wyjaśnienie tej anomalii od czasu jej stwierdzenia przez **Leverriera**, oczywiście przy pomocy samejże Newtonowskiej mechaniki. Zachęceni przy tym słynnym tryumfem klasycznej teorii, jakim było odkrycie Neptuna przez **Leverriera** i **Adamsa**, wydedukowane matematycznie z perturbacji najdalszej podówczas znanej planety Urana, próbowali przede wszystkim tej samej drogi i szukali tzw. intramerkurialnej planety, której działanie mogłoby wytłumaczyć powyższy ruch perihelium Merkurego. Tymczasem najstaranniejsze przeszukiwanie okolicy słońca nie wykazało nic nowego. Dzieje astronomii ubiegłego stulecia notują przeszło pół tuzina prób objaśnienia anomalii ruchu Merkurego w duchu mechaniki klasycznej. Największym uznaniem u astronomów cieszyła się do niedawna odnośna teoria **H. Seeligera**, zastępująca jedno hipotetyczne ciało perturbacyjne całym bardzo obszernym rojem drobniutkich, w zwykłych warunkach niedostrzegalnych ciałek, czyli pyłem kosmicznym, jaki otacza słońce, wywołując między innymi znane zjawisko światła zodiakalnego. Ale przyjęcie działania roju zodiakalnego jest hipotezą ad hoc, podczas gdy teoria względności i grawitacji **Einsteina** tłumaczy nasze zjawisko ilościowo w sposób najzupełniej zadowalający bez żadnych dodatkowych hipotez.

Einstein dowiódł istotnie, że w pierwszym przybliżeniu przekształcają się jego równania na trzy równania różniczkowe ruchu klasycznej mechaniki i jedno równanie Newtonowskiego potencjału grawitacyjnego; posuwając zaś rachunek do drugiego przybliżenia (dla jednej planety jako p.*m*-go w polu grawitacyjnym układu słońce-planeta), otrzymał powolny obrót perihelium planety, którego wartość dla Merkurego wypadła z rachunku zupełnie zgodnie z obserwacją w granicach jej dokładności. Ścisłe rozwiązanie, jakie znalazł wkrótce potem znakomity astronom getyngeński **Schwarzschild** potwierdziło tylko liczbowy wynik **Einsteina**. Ponieważ wielkość tego relatywistycznego ruchu perihelium maleje nader szybko ze wzrostem odległości planety od słońca (odwrotnie proporcjonalnie względem średniej odległości z wykładnikiem $5/2$), przeto jeszcze tylko dla drugiej najbliższej słońcu planety Wenus osiąga ten ruch wartość teoretyczną nadającą się do sprawdzenia przez obserwacje ubiegłego stulecia. Na nieszczęście ma Wenus tak mały mimośród, że nie podobna wyznaczyć położenia perihelium tej planety z wystarczającą do porównania dokładnością [8]).

Do wymienionych już dwu prób ogniowych doświadczenia, z jakich wyszła zwycięsko teoria **Einsteina**, tj. grawitacyjnej refrakcji promieni światła, przechodzących w pobliżu słońca i wiekowego ruchu perihelium planet, dołączyć należy trzecią, niemniej interesującą i ważną, której wynik nie odpowiedział dotychczas oczekiwaniom. Kombinując mianowicie zasadę **Dopplera** z Einsteinowską zasadą równoważności, dochodzi się elementarną matematyczną drogą do wniosku, że okres drgania każdego określonego rodzaju promieniowania falowego przyrasta w polu grawitacyjnym proporcjonalnie względem przyrostu potencjału grawitacji. Wskutek tego pewną określona linia widmowa światła, pochodzącego od słońca lub innych gwiazd stałych, musi być przesunięta ku czerwonej części widma względem tejże samej linii światła ze źródeł ziemskich.

Trudność stwierdzenia tego dość nikłego efektu polega po pierwsze na tym, że nie łatwo go oddzielić od przesunięcia wynikającego z zasady Dopplerowskiej, po wtóre zaś, że warunki emisji światła na słońcu nie są jeszcze dość dokładnie zbadane, na koniec po trzecie, że nie znamy jeszcze dokładnie systematycznych zafałszowań długości fal także i u ziemskiego, porównawczego źródła światła, tj. lampy łukowej. Staranna analiza spektroskopowych badań dość znacznej liczby gwiazd stałych, przewyższających słońce wielokroć swą masą, dokonana niedawno przez astronoma **E. Freund1icha**, dostarcza wcale pewnych oznak faktycznego grawitacyjnego przesunięcia linii widmowych, jakkolwiek podobno niektórzy amerykańscy astrofizycy dopatrzeć się tego nie mogą. Relatywiści wierzą oczywiście mocno, że dalsze doświadczalne badania muszą wypaść korzystnie dla teorii, a kiedy dokładność pomiaru grawitacyjnej składowej przesunięcia linii widmowych będzie niezbyt wiele ustępować dokładności w pomiarze przesunięcia Dopplerowskiego, to badania spektroskopowe pozwolą nie tylko mierzyć prędkość gwiazd po promieniu widzenia, lecz także ich masę. Ale to muzyka przyszłości. Stojąc na gruncie realnej teraźniejszości, musimy stwierdzić pełny sukces teorii na razie tylko w dwu pierwszych przypadkach. Zarazem widzimy, że jej czysto praktyczne znaczenie jest wcale nie wielkie. Trudno bowiem przewidzieć, kiedy pomiary astronomiczne staną się tak ścisłe, aby do ich uzgodnienia z teorią trzeba było jeszcze w innych przypadkach, jak powyższe, uciekać się do wysoce skomplikowanego matematycznego aparatu ogólnej teorii względności. A już w mechanice ziemskiej, technicznej wystarczy, zdaje się, po wieki wieków to przybliżenie, jakie daje nadzwyczajnie stosunkowo prosta teoria klasyczna.

Za to znaczenie teoretycznie-poznawcze i ogólno-naukowe nowej teorii jest olbrzymie, prawie bezprzykładne w historii wiedzy. Nowa epoka w dziejach przyrodniczej myśli, datująca się od narodzin teorii względności, da się zestawić co do ogólnej doniosłości chyba tylko z jedną, zapoczątkowaną cztery wieki temu przez naukę naszego genialnego rodaka, **Mikołaja Kopernika**. Jak wówczas układ heliocentryczny **Kopernika** zmieniał radykalnie Ptolomeuszowy pogląd na budowę świata, ustalony od przeszło trzynastu stuleci, podobnie teraz teoria względności przeistacza z gruntu zapatrywania naukowe na cały ustrój świata zjawisk fizykalnych, a tym samym i na budowę kosmosu, wiążąc przestrzeń, czas i materię w nierozerwalną całość i pozbawiając każde z tych pojęć samoistności. Da się to lapidarnie wyrazić zdaniem: „Nie ma czasu i przestrzeni bez materii”. Nie należy tego oczywiście brać dosłownie, jak to niestety już się zdarzyło, lecz pojmować w następujący sposób:

Próżna przestrzeń sama w sobie jest „martwym” zupełnie tworem abstrakcyjnym rzeczywistej fizykalnej przestrzeni. Nie ma ona żadnych fizykalnych jakości i żadnej struktury geometrycznej. Nie można przeto umieszczać w niej układów współrzędnych, służących do najprostszego, ścisłego, tj. matematycznego opisu zjawisk, lecz te układy muszą być związane z materią. Dopiero materia „ożywia” przestrzeń i nadaje jej cechy realne. W mechanice klasycznej była przestrzeń bezwzględna niejako zbiornikiem („domem czynszowym”, jak się dowcipnie wyraża szwajcarski matematyk, **H. Weyl**) w którym mieściła się materia. Obecnie zmieniły się role i raczej przedstawia się sprawa odwrotnie. Zaznaczyć przy tym trzeba, że w myśl ważnych konsekwencji teorii względności należy pojmować materię w uogólnionym znaczeniu. Skoro się bowiem okazało, że energia posiada najważniejszy atrybut materii, tj. bezwładność, przeto i przestrzeni, w której się rozchodzi promieniowanie, musimy przypisać cechy materialne. Dlatego to nie można odmówić realnego bytu tzw. próżni, w której się rozchodzi światło. Jeżeli taką „próżnię” nazwiemy sobie „eterem” gwoli tradycji, to nawet **Einstein** nie ma nic przeciw temu, tylko zupełnie słusznie się zastrzega, aby temu eterowi nie przepisywać żadnych własności materialnych, a więc np. nie można mówić o jego prędkości w jakimkolwiek miejscu. Byłoby to bowiem sprzeczne z ogólną zasadą względności, a do tego nie poparte żadnym doświadczeniem.

Co się tyczy Einsteinowskiej teorii grawitacji, to trzeba zaznaczyć, że ona nie zdąża do objaśnienia istoty wzajemnego ciążenia mas, nie szuka mechanicznego modelu uzmysławiającego to działanie na wzór różnych teorii eterowych. Jest zresztą nadzwyczaj wątpliwe czy tego rodzaju usiłowania mogą kiedy doprowadzić do zadowalającej teorii grawitacji. Teoria **Einsteina** jest teorią pola grawitacyjnego, które przenosi działanie grawitacji ze skończoną prędkością przez próżnię. Usuwa ona z fizyki ostatnie „działanie na odległość", jakie przypisywała grawitacji teoria **Newtona** i zdaje doskonale sprawę ze ścisłego związku między objawami bezwładności i ciężkości.

Rozważmy jeszcze, jak wygląda w świetle teorii względności tak ważna własność materii (utożsamionej przez teorię z energia), jak jej **bezwładność**. Według mechaniki klasycznej odnosiła się bezwładność do „bezwzględnego" układu i mierzyła się w każdym punkcie nieskończonej Euklidesowej przestrzeni tą samą wielkością, tj. **masą**. Z postulatów ogólnej teorii względności wypływa jako konsekwencja, że nie może być bezwładności **względem „przestrzeni"**, lecz tylko bezwładność **wzajemna** mas wszechświata. Gdybyśmy przeto byli w stanie jakąś masę oddalić od wszystkich innych mas wszechświata w nieskończoność, to jej bezwładność spadłaby do zera. Nie ma w tym oczywiście żadnej sprzeczności z zachowaniem się ciał, dających się obserwować, albowiem te są tak drobne wobec reszty mas w wszechświecie, że ich bezwładność można uważać z niezmiernie wielką dokładnością za stałą - w zgodzie z doświadczeniem i klasyczną mechaniką. Dopiero, gdy rozpatrujemy świat materialny w całości, musimy się liczyć ż powyższym wnioskiem. Rozważania **Einsteina** na ten temat są godnym uwieńczeniem teorii. Ogłosił je w publikacjach Berlińskiej Akademii w r. 1917 i udoskonalił w dwa lata później. Nie są to oczywiście pierwsze w ogóle dociekania w niezmiernie ciekawej kwestii budowy wszechświata, ale w moich oczach przynajmniej najbardziej zadowalające, jakkolwiek nie mogą mieć, rzecz jasna, pretensji do ostatecznego załatwienia sprawy.

8) Dodatkowo wspomnę o nowszych pracach teoretycznych, opartych na Einsteinowskiej teorii, które miały na celu przygotowanie materiału do dalszego jej sprawdzenia obserwacjami astronomicznymi. Holenderski astronom **de Sitter** (ten sam, który wykazał na gwiazdach podwójnych niezależność prędkości rozchodzenia się światła od ruchu ciała świecącego i przyczynił się przez to do ugruntowania znanego postulatu szczególnej teorii względności), oraz dwaj młodzi wiedeńscy badacze **J. Lense** i **H. Thirring** (Phys. Zeitschr. z r. 1918) obliczyli perturbacje relatywistyczne, wywołane wpływem rotacji planet na ich księżyce. Nie ma takiego wpływu w klasycznej teorii **Newtona**, ale musi on zachodzić według ogólnej teorii względności i grawitacji. Wszystkie te perturbacje okazały się oczywiście bardzo małe ku pewnej może przykrości relatywistów, a ku zadowoleniu ich przeciwników. Największych zakłóceń doznaje V-ty księżyc Jowisza, a mianowicie wiekowa zmiana długości węzła $\Delta\Omega$ wypada dlań 1'53'', a także zmiana średniego dziennego ruchu $1^m5{,}4^s$. Odpowiadające liczby dla naszego księżyca są 2'' i $13{,}9^s$.

X.
Rozmiary i postać wszechświata w świetle ogólnej teorii względności.

Zastosowanie formuł nowej teorii do całego świata prowadziło zrazu do takichże trudności, jakie wychodziły na jaw w mechanice klasycznej. Jedyny bowiem, jak się zdawało, od czasów **Giordana Bruno** filozoficznie zadowalający obraz wszechświata nieograniczonego i nieskończonego, zaludnionego nieskończoną liczbą słońc, nie dał się pogodzić z mechaniką niebieską **Newtona**. Zauważono to już dość dawno, a wspomniany poprzednio astronom **Seeliger** próbował nawet zmodyfikować Newtonowskie prawo grawitacji, aby wybrnąć z tego kłopotu. Trudność polega na tym, że, przy ścisłej ważności tego prawa (według którego wszystkie masy przyciągają się z siłą odwrotnie proporcjonalną względem kwadratu ich wzajemnej odległości), musiałoby przyjęcie masy nieskończenie wielkiej, rozsianej mniej więcej równomiernie w nieskończonej przestrzeni, pociągnąć za sobą nieskończoną wartość i nieoznaczony kierunek siły pola grawitacyjnego w dowolnym punkcie przestrzeni. Ponieważ to jest niemożliwe, przeto przy zastosowaniu teorii **Newtona** wypadało przyjąć rodzaj środka wszechświata, w którym gęstość gwiazd jest największa, a od tego miejsca na zewnątrz maleje aż do zera w nieskończonej odległości. Ale wówczas, jak dowodzi rachunek, nie byłoby przeszkód, aby poszczególne gwiazdy nie wymykały się od czasu do czasu z głównego skupienia i nigdy doń nie wracały. Nadto wskutek promieniowania w przestrzeń zmniejszałaby się stale energia układu, nie mówiąc już o utracie materii z powodu ciśnienia promieniowania, przeciwdziałającego na drobnych cząsteczkach skutecznie grawitacji. W ten sposób zdążałby układ gwiazd systematycznie do rozprószenia się w nieskończonej przestrzeni, co oczywiście zadowolić nas nie może. Omija ten szkopuł wprawdzie hipoteza **Seeligera**, iż przyciąganie dwu mas maleje przy wielkich, wzajemnych odległościach nieco silniej, niż według prawa odwrotnego kwadratu, atoli można wymyśleć dowolną liczbę innych praw, dających, to samo, bez możności podania powodu, dla którego należałoby dać pierwszeństwo jednemu z nich.

Przy zastosowaniu ogólnej teorii względności nie dały się w zupełnie zadowalający sposób ustawić warunki krańcowe dla nieskończonej odległości, które by były zgodne z wymaganiami ogólnej względności, co było zresztą do przewidzenia. Dlatego **Einstein** uogólnił swoje równania różniczkowe dla potencjałów grawitacyjnych $g_{\mu\upsilon}$ w taki sposób, aby stało się możliwe zastosowanie nowej teorii grawitacji na cały wszechświat. Uczynił to przez wprowadzenie tzw. „kosmologicznego czynnika” λ, co go samego nie zadowalało tak długo, aż w następnej pracy zdołał usunąć ten, jak się wyraził, „Schönheitsfehler” teorii. Trudności warunków krańcowych odpadły przy tym z wysoce interesującego powodu. Pokazało się mianowicie, że stosownie do formuł teorii przestrzeń wszechświata, wypełniona równomiernie materią w **spoczynku**, przedstawiałaby się w pierwszym przybliżeniu jako wprawdzie **nieograniczona, a1e skończona**, wobec czego nie występują wcale warunki krańcowe dla nieskończoności. Chociaż założenia, prowadzące do tego wyniku, właściwie nie są spełnione w wszechświecie, bo ani materia nie jest w spoczynku, ani też nie jest całkiem równomiernie rozmieszczona, to jednak należy mieć na względzie, że prędkości materii, stwierdzone u gwiazd, są nadzwyczajnie małe w porównaniu do prędkości światła, występującej jako jednostka w teorii. A także i rozmieszczenie materii nie przedstawia w ogóle żadnych tak rażących nierównomierności, aby schemat utrwalonego, równomiernie wypełnionego światła, był tak znowu dalekim od rzeczywistości. Według tego schematu miałaby przestrzeń wszechświata strukturę bardzo zbliżoną do „sferycznej”, którą już poprzednio omawialiśmy. Nie może ona być ściśle „sferyczną” wskutek zachodzących nierównomierności w rozkładzie mas i ciągłych zmian tego rozkładu, jednakże różnić się będzie od sferycznej tylko bardzo nieznacznie, podobnie jak pomarszczone lekkim wietrzykiem zwierciadło wody w jeziorze od płaszczyzny. W takiej przestrzeni da się zupełnie dobrze pomyśleć trwała budowa wszechświata bez katastrofalnych zmian, psujących jego wspaniałą harmonię, którą duch ludzki podziwia od tysięcy lat. Skończoność nieograniczonej przestrzeni zapobiega skutecznie opustoszeniu świata, gdyż żadna cząstka materii i energii nie może się oddalić w nieskończoność [9]).

Jakkolwiek układ gwiazd dostępnych obserwacji przedstawia, choćby tylko przez samą drogę mleczną, znaczne zboczenia od przybliżonego teoretycznego schematu, to jednak widać, że i tutaj teoria względności toruje nowe drogi i otwiera nie dające się jeszcze objąć wzrokiem horyzonty dla pojmowania świata jako całości.

9) **Einstein** znajduje dla promienia krzywizny świata R i jego masy M wzory

$$R=\sqrt{\frac{2}{k\rho}},\ M=\sqrt{\frac{32\pi^2}{k^3\rho}}, \text{ jeżeli } k=\frac{8\pi K}{c^2}$$

przy czym *K* oznacza stałą grawitacji, a *ρ* średnią gęstość rozmieszczenia materii w całej przestrzeni kosmicznej. Wstawiwszy znane wartości K=6,66.10^{-8}, c=3.10^{10}, mamy k=1,87.10^{-27} w jednostkach c. g. s. Średnia gęstość kosmiczna *ρ* będzie się przedstawiać liczbą bardzo małą, ponieważ skupienia materii w postaci gwiazd są nadzwyczajnie drobne w porównaniu do ich wzajemnych odległości. Wyniki odnośnych obliczeń **de Sittera** znajdzie czytelnik w dodatku E.

Uzupełnienia i dodatki [10]).

A. A. Do art. VI. Zarzuty przeciwko teorii względności podnosili nie tylko filozofujący dyletanci, ale niektórzy wybitni badacze. Przytoczę tutaj jeden, wielce pouczający.

Głośny niemiecki fizyk **Ph. Lenard**, znany z badań w dziedzinie fosforescencji, promieni katodowych itd., omawiając w jednej ze swoich obszerniejszych publikacji na temat eteru teorię względności, ilustruje szczególną teorię, jak zwykle, długim pociągiem kolejowym i pisze mniej więcej te słowa:

„Pozwólmy teraz naszemu pociągowi poruszać się z całkiem wybitną niejednostajnością ruchu, jaką np. pasażerowie pociągu odczuwają jako gwałtowne szarpnięcie. Skoro przy tym wskutek sił bezwładności wszystko w pociągu leci w drzazgi, to, jak sądzę, **nikt ze zdrowym rozsądkiem** nie wysnuje stąd innego wniosku, jak ten, że właśnie pociąg zmienił swój ruch gwałtownie, a nie otoczenie. Otóż uogólniona zasada względności żąda po prostu przyznania i w tym przypadku, że przypuszczalnie całe otoczenie pociągu mogło doznać zmiany prędkości i że cała ta katastrofa pociągu jest skutkiem szarpnięcia świata zewnętrznego, przeniesionego przez „„działanie grawitacji”” na wnętrze pociągu. Na nasuwające się pytanie, dlaczego nie zawaliła się wieża obok toru kolejowego, skoro doznała wraz z otoczeniem szarpnięcia - dlaczego te skutki szarpnięcia objawiają się tak **jednostronnie** tylko w pociągu, podczas gdy mimo to ma być niemożliwym jednostronny wniosek o siedlisku zmiany ruchu - na to pytanie nie dostarcza zasada względności, jak się zdaje, żadnej odpowiedzi, zadowalającej prosty rozum”.

Posłuchajmy teraz, jak na ten zarzut odpowiada **Einstein**:

„Tego przypadku nie można w myśl teorii względności pojmować w takim znaczeniu, „„że przypuszczalnie całe otoczenie pociągu mogło doznać zmiany prędkości””. Nie chodzi bowiem tutaj o dwie różne nawzajem się wykluczające hipotezy co do siedliska ruchu, lecz raczej o dwa zasadniczo równoważne sposoby przedstawienia tego samego stanu rzeczy. [Że wieża się nie przewraca, to pochodzi według drugiego sposobu przedstawienia stąd, ponieważ ona wraz z ziemią **spada swobodnie** w polu grawitacyjnym, zachodzącym podczas szarpnięcia, podczas gdy swobodnemu spadkowi pociągu przeszkadzają siły zewnętrzne (hamujące). A ciało swobodnie spadające zachowuje się co do swych zjawisk wewnętrznych zupełnie tak, jak ciało swobodne, usunięte spod wszelkich wpływów zewnętrznych]. Które z dwu przedstawień stanu rzeczy wybrać, o tym mogą rozstrzygać tylko względy dogodności, a nie argumenty zasadniczego charakteru. Jak dalece zaś nie jest wskazane powoływać się w takich sprawach na tzw. „„zdrowy rozum””, okazuje następujący przykład odwrotny. Sam **Lenard** mówi, że nie można było dotąd podnieść żadnych słusznych zarzutów przeciwko ważności **szczególnej** zasady względności (tj. odnoszącej się do układów przesuwających się jednostajnie). Jednostajnie jadący pociąg można przeto równie dobrze uważać za będący w „„spoczynku””, a tor wraz z całą okolicą jako poruszający się jednostajnie. Czyż zgodzi się na to „„zdrowy rozum”” maszynisty? Wszakże on zarzuci, że przecie nie musi wciąż opalać i smarować okolicy, lecz lokomotywę i że stosownie do tego ona właśnie jest tym, co się porusza za sprawą jego pracy”.

B. W sprawie eteru. Zdyskredytowanie przez teorię względności substancjonalnego, mechanomorficznego (jeżeli wolno się tak wyrazić per anologiam do „antropomorfizmu”) eteru jest jednym z kamieni obrazy, na których się potyka większość przyrodników przy zaznajomieniu się z nową teorią.

Jakkolwiek rozwój teorii fizykalnych podąża widocznie w kierunku zmatematyzowania fizyki, tj. usunięcia mechanicznych modeli zjawisk niemechanicznych i zastąpienia ich równaniami różniczkowymi odpowiadających „pól wektorialnych” lub „tensorowych”, a kierunek ten ma niedającą się zaprzeczyć wyższość nad kierunkiem mechanomorficznym, reprezentowanym zwłaszcza w Anglii (**Kelvin**, **Lodge**), to jednak jeszcze teraz mam wrażenie, iż nawet taki **Lorentz** wierzy po prostu w eter na sposób mało różny od pierwszego lepszego przyrodniczo wykształconego profana. W jego klasycznej pracy z r. 1895 pt. „**Versuch einer Theorie der elektrischen und optischen Erscheinungen in bewegten Körpern**”, czytamy następujące słowa w rozdziale poświęconym uzasadnieniu konieczności znanej hipotezy skurczenia:

„Jakkolwiek ta hipoteza wydaje się dziwaczną na pierwszy rzut oka, to jednak musimy przyznać, że ona nie leży wcale tak daleko, skoro przyjmiemy, że także siły molekularne przenoszą się za pośrednictwem eteru, podobnie jak to obecnie możemy stanowczo twierdzić o siłach elektrycznych i magnetycznych. Jeżeli tak, to translacja zmieni najprawdopodobniej działanie między dwoma molekułami albo atomami w podobny sposób, jak zmienia przyciąganie lub odpychanie między naładowanymi cząsteczkami. Ponieważ zaś postać i rozmiary ciała stałego są w ostatniej instancji uwarunkowane natężeniem działań molekularnych, przeto musi nastąpić zmiana wymiarów”. Prawie to samo powtórzył **Lorentz** w swoich wykładach Haarlemskich o „zasadzie względności” w r. 1914 (str. 5 i 6), po czym jednak, zauważywszy, że w teorii elektronowej wypada przyjąć skurczenie $\sqrt{1-v^2/c^2}$ dla każdego elektronu, aby uczynić zadość wynikom doświadczeń, dodaje z całą obiektywnością uczonego tej miary, że, „skoro postępujemy w ten sposób, to w teorii pozostaje coś niezadowalającego, jakieś szukanie po omacku (**etwas Tastendes**). Bardziej zasadniczo zabrał się do tej kwestii **Einstein**, wysuwając na pierwszy plan zasadę, że zawsze i we wszelkich okolicznościach są zjawiska fizykalne w układzie niezależne od prędkości translacji, jaką ten układ posiada jako całość. To stanowi hipotezę fizykalną, co do której ostateczną decyzję ma wydać doświadczenie. Ta hipoteza zaleca się zresztą przede wszystkim swoją śmiałością”.

Aby zaś nie-fizykom dać wyobrażenie, kim jest **Lorentz**, wspomnę słowa śp. **Smoluchowskiego**, jakie słyszałem po jego powrocie z Getyngi w r. 1913. Uniwersytet getyngeński zaprosił wówczas szereg najwybitniejszych fizyków całego świata dla wygłoszenia wykładów o teoriach materii i elektryczności. Nawiasem mówiąc nie było wówczas jeszcze między nimi **Einsteina**, ale był **Lorentz** i **Smoluchowski**. Otóż kiedy **Smoluchowski** referował w kole tutejszych fizyków swoje wrażenia z naukowych dyskusji w Getyndze, to wyraził się mniej więcej w ten sposób: „Wszystkich obecnych przerastał znacznie **Lorentz**; czuliśmy się czasem wobec niego jak studenci”.

Poprzednio przytoczonym słowom **Lorentza** pozwolę sobie na koniec przeciwstawić wywody **Einsteina**, wyjęte z jego wyborczego dialogu (á la Galileusz) między krytykiem teorii względności, a relatywistą („Naturwissenschaften” z r. 1918, zesz. 48). Pod koniec dialogu zwraca się mianowicie krytyk z zapytaniem: „A cóż tam słychać z tym chorym jegomościem teoretycznej fizyki, z eterem, którego niektórzy z was (relatywistów) ogłosili już za umarłego?”

A na to relatywista:

„Zmienne były koleje jego losu, a wcale nie można powiedzieć, że jest już nieboszczykiem. Przed **Lorentzem** żył już to jako przenikający wszystko płyn, to znów jako coś w rodzaju gazu, lub też w najrozmaitszych innych formach bytowania, zależnie od autora. Przy **Lorentzu** stał się sztywnym i ucieleśniał „spoczywający" układ odniesienia, czyli uprzywilejowany stan ruchu w świecie. Stosownie do szczególnej teorii względności nie było już więcej żadnego uprzywilejowanego stanu ruchu, co oznaczało zaprzeczenie eteru w sensie dawniejszych teorii. Jeżeli bowiem istniał eter, to musiał mieć w każdym przestrzenno-czasowym punkcie określony stan ruchu, który musiałby grać rolę w optyce. Atoli, jak uczyła szczególna teoria względności, nie ma takiego uprzywilejowanego stanu ruchu i dlatego też nie ma eteru w dawnym znaczeniu. Ogólna teoria względności także nie zna żadnego uprzywilejowanego stanu ruchu w danym punkcie, który by np. można interpretować jako prędkość eteru w tym punkcie. Jednakowoż, podczas gdy w szczególnej teorii względności część przestrzeni bez materii i bez pola elektromagnetycznego okazuje się jako próżna, tzn. nie scharakteryzowana jakimikolwiek wielkościami fizykalnymi, to według ogólnej teorii względności ma także i przestrzeń próżna w tym znaczeniu jakości fizykalne, scharakteryzowane matematycznie składowymi potencjału grawitacyjnego, który określa metryczne zachowanie się tej części przestrzeni, a zarazem jej pole grawitacyjne. Ten stan rzeczy można bardzo dobrze pojmować tak, że się mówi o eterze, którego stan zmienia się od punktu do punktu w sposób ciągły. Trzeba się tylko wystrzegać przypisywania temu „eterowi" własności materialnych, jak np. określonej prędkości w każdym miejscu".

C. „Praktyczne", a ogólno-naukowe znaczenie teorii względności. W dyskusji, jaka się wywiązała po wspomnianych już wykładach prof. **Lorii** w Tow. polit., wygłosiłem między innymi uwagi następujące:

Że nie wszyscy z mówców podzielają moją głęboką wiarę w trwałość i najogólniejsze rozpowszechnienie zasadniczych podstaw całej teorii względności, mieliśmy dowód na pierwszym przemówieniu w dyskusji, przemówieniu szczególnej wagi z tego powodu, ponieważ pochodziło od przedstawiciela nauki, która miała dostarczyć pierwszych dowodów zgodności ogólnej teorii względności z doświadczeniem, a mianowicie **astronomii**. Poważne i rzeczowe argumenty prof. **L. Grabowskiego** zasługują w pełni na to, aby je traktować całkiem serio, jakkolwiek szan. oponent zastrzegł się szczerze, że nie studiował bliżej nowej teorii.

Mimo woli przychodzi mi tutaj na myśl westchnienie ulgi, jakie zaraz po pierwszym wykładzie usłyszałem z piersi jednego z najpoważniejszych przedstawicieli nauk technicznych, który, dowiedziawszy się, że zmiany długości i czasu wynikające z teorii względności mają dla wszelkich technicznych prędkości wpływ dopiero na bardzo dalekie miejsca dziesiętne, powiedział do mnie: „Dobrze przynajmniej, że my nie potrzebujemy" uwzględniać tego. Podobne utylitarne stanowisko zajmuje prawdopodobnie znaczna część astronomów, gdyż i astronomiczne prędkości nie są tak wielkie, aby się w ogóle „opłacało" posługiwać w mechanice niebios skomplikowanym matematycznym aparatem teorii względności, dopóki wystarcza klasyczna mechanika. Toteż już w moich felietonach w „Słowie polskim" podkreśliłem, jakby dla uspokojenia wszystkich, którzy się posługują klasyczną mechaniką, że jej praktyczna doniosłość nie dozna po wsze czasy uszczerbku przez to, iż nowa, na teorii względności oparta mechanika zepchnęła klasyczną, biorąc ściśle, na stanowisko teorii przybliżonej.

I ja, jako inżynier, jeszcze przed wojną odetchnąłem z ulgą, przekonawszy się przy studiowaniu teorii względności, że nie ma na razie nawet widoków na jakieś zagadnienia techniczne, które by się domagały traktowania przy pomocy nowej mechaniki. Atoli jako profesor mechaniki, wysilający przez szereg lat daremnie swój umysł, aby znaleźć ścisłe fizykalne określenie miary czasu na gruncie mechaniki klasycznej, bez którego to określenia nie podobna przypisać ściśle określonego znaczenia prawu bezwładności, względnie wszystkim zasadniczym prawom dynamiki; jako taki, który by rad w swojej umiłowanej nauce widzieć ścisłość, np. euklidesowej geometrii, a przestudiowawszy co na ten temat pisali najwybitniejsi myśliciele, miał ciągle wrażenie zamknięcia w błędnym kole (najbardziej stosunkowo zadowolił mnie **Poincaré**); jako taki, powtarzam, zobaczyłem nagle w teorii **Einsteina** „**wyzwalającą**" z tego koła „**potęgę**",, bo ta teoria dała mi nareszcie upragnioną miarę czasu. Wszak postulat stałej prędkości światła we wszystkich układach **Galileusza** jest równoznaczny z określeniem: „Jednostką czasu w jakimkolwiek z tych układów jest czas potrzebny do odbycia przez promieniowanie w próżni drogi 300000 km".

To jasne światło w dotychczasowym mroku, w jakim nurzały się podstawy mechaniki, było dla mnie bodźcem do zagłębienia się w nowej teorii i im dalej w nią wnikałem, tym bardziej byłem olśniony filozoficzną głębią i naukową doniosłością koncepcji **Einsteina**. Dlatego to, aczkolwiek i mnie czasami niemile razi bombastyczny styl popularyzatorów nauki, nie zawahałem się ani na chwilę przemówić do czytelników „Słowa polskiego" w zakończeniu jednego z felietonów pełnymi szczerego entuzjazmu słowami **M. Schlicka** (profesora uniwersytetu w Rostocku), które tak niemile drasnęły sceptyczną chłodną rozwagę szan. Kolegi; dlatego też powtórzyłem przed chwilą prawie dosłownie frazes **Schlicka** o „wyzwalającej potędze" teorii względności, odczuwając ją szczerze na samym sobie po przeszło dziesięciu latach myślowego szamotania się, którego ślady spoczywają w niewydanych rękopisach.

Pewien jestem, że podobne przejścia były udziałem wielu innych zajmujących się poważnie mechaniką. Miałem nawet dowody na to w postaci artykułu jednego ze starszych inżynierów prowincjonalnych na temat definicji pomiaru czasu, nadesłanego około pół roku temu do redakcji Czasop. technicznego. Ta praca świadczyła (pominąwszy pewne cechy dyletantyzmu), że autor odczuwał również braki w przedstawieniu podstaw klasycznej mechaniki i próbował zdać sobie z nich sprawę.

D. Doświadczalne sprawdzenie teorii względności. Przytoczone w toku wykładów trzy możliwości doświadczalnego sprawdzenia teorii względności odnoszą się oczywiście do ogólnej teorii. Szczególna teoria względności rozporządza tak znaczną ilością doświadczalnych faktów ją popierających, że nie podobna było omawiać wszystkich i podkreślać wyższości objaśnienia relatywistycznego w przypadkach, tłumaczonych także nieźle innymi teoriami. Kto by te rzeczy chciał poznać gruntowniej bez znajomości wyższej matematyki, temu mogę polecić świetną książkę **M. Borna** (profesora fizyki w Getyndze) pt. „**Die Relativitätstheorie Einsteins und ihre physikalischen Grundlagen**" (Berlin 1920). Do głębszego studium na podkładzie matematycznym posłuży doskonale **M. v. Laue'go** „**Die Relativitätstheorie, Bd. I. 4 Aufl.**" (Braunschweig 1921). Jedyną książką, traktującą obszernie teorię ogólną, jest obok oryginalnej pracy **Einsteina**, dostępnej w zbiorowym wydaniu fundamentalnych rozpraw **Lorentza**, **Einsteina** i **Minkowskiego** pt. „**Das Relativitätsprinzip**" (III wyd. u Teubnera w 1921) **- H. Weyl'a** ,,**Raum-Zeit-Materie**"; dzieło przedstawiające artystyczny splot filozoficznej myśli z wspaniałą matematyczną konstrukcją teorii, którego IV wydanie ma wyjść niebawem u Springera w Berlinie.

Z trzech sprawdzianów ogólnej teorii względności, tj, I) perturbacji ruchu perihelium Merkurego, II) grawitacyjnej refrakcji i III) grawitacyjnego przesunięcia linii widmowych, był pierwszy znany przed powstaniem teorii, a dwa drugie były **przepowiedziane** przez teorię. Toteż nic dziwnego, że sprawdzenie się przepowiedni co do II wzmogło niesłychanie zainteresowanie się nią nawet u dość jeszcze wówczas licznych przeciwników. Znaleźli się między nimi tacy, którzy mówili: „Wszakże refrakcję promieni światła w pobliżu słońca można wytłumaczyć działaniem jego atmosfery. Wystarczy przyjąć stosowną optyczną gęstość i grubość przeźroczystej części atmosfery, aby otrzymać stwierdzone przy obserwacji całkowitego zaćmienia słońca w r. 1919 wygięcie promieni gwiezdnych wklęsłością ku słońcu".

Na ten zarzut odpowiedziałem przed kilku miesiącami we wspomnianej powyżej dyskusji następującymi słowy: „W odparciu tych wątpliwości mają zwolennicy teorii **Einsteina** wcale łatwe zadanie. Jakże bowiem mało prawdopodobne jest, ażeby taka zgodność obserwacji z przepowiednią teorii, nie posługującej się żadną dodatkową hipotezą, była tylko przypadkowa! A do tego proponowane przez oponentów objaśnienie wymaga aż dwu hipotez ilościowych; jest zaś wielce wątpliwe, czy sama potrzebna tutaj wartość średniej gęstości będzie w zgodzie z ustalonymi już poglądami na niezmierne rozrzedzenie materii w przeźroczystych warstwach słonecznej atmosfery. Jestem przekonany, że w przyszłości, po zgromadzeniu większego materiału obserwacyjnego o znacznej dokładności, okaże się refrakcja atmosferyczna raczej drobną częścią refrakcji grawitacyjnej, zwłaszcza w większych odległościach od optycznego konturu słońca, tj. od powierzchni chromosfery”.

Otóż dziś mogę zaznaczyć z pełną satysfakcją, że te przewidywania zostały całkiem potwierdzone teoretycznymi badaniami **E. Emdena**, jednego z najpoważniejszych znawców praw, rządzących budową atmosfer gazowych u ciał niebieskich. Z tych badań, ogłoszonych w publikacjach bawarskiej Akademii z r. 1920, zdaje właśnie sprawę w 6 zesz. „**Naturwissenschaften**” z b. r. astronom **E. Freundlich**. **Emden** oblicza, że gęstość chromosfery w miejscach odległych od powierzchni fotosfery o $\frac{1}{100}$ promienia słońca jest 10^{26} razy mniejsza od gęstości fotosfery i dochodzi do wniosku, że atmosfera słońca nie może wywołać **żadnego dającego się dostrzec ułamka grawitacyjnej refrakcji**. Ten przeto „**efekt Einsteina**” nie podlega już żadnej wątpliwości.

Podobnież mogę stwierdzić z przyjemnością, że obserwacja nie zawiodła zaufania zwolenników teorii względności i co do trzeciego „efektu”, o którym **Einstein** pisze w 11 wydaniu swej „przystępnej” broszury tak: „Gdyby faktycznie nie zachodziły przesunięcia linii widmowych wskutek potencjału grawitacyjnego, toby upadła ogólna teoria względności”. W niedawno nadeszłych sprawozdaniach zjazdu niemieckich przyrodników w Nauheim w jesieni 1920 r. czytamy bowiem, że powtórne nadzwyczaj skrupulatne badania **Grebego** i **Bachema** w Bonn, dokonane na widmie słonecznym, stwierdziły ponad wszelką wątpliwość istnienie i trzeciego „efektu” o wielkości przewidzianej przez teorię, tudzież wyjaśniły sprzeczności, znalezione przez niektórych amerykańskich badaczy (**S. John**). Taka sama wiadomość przyszła drogą pism codziennych z Indii odnośnie do powtórnych precyzyjnych pomiarów **Evershed’a**, tak, iż można uważać przeciwników teorii za pozbawionych najważniejszej broni argumentów faktycznych. Wszelkie zaś inne nie wytrzymują, jak widzieliśmy i jeszcze zobaczymy, krytyki relatywistów.

E. Skończoność wszechświata jako „przepowiednia” ogólnej teorii względności. Przy upraszczających założeniach wyprowadził **Einstein** (jak wiadomo z art. X) z równań ogólnej teorii względności i grawitacji niezmiernie interesujący wniosek, zgodny z przypuszczeniami **Riemann’a**, **Helmholtz’a** i **Schwarzschilda**, że przestrzeń wszechświata ma krzywiznę skończoną i w pierwszym przybliżeniu stałą, że zatem wszechświat jest wprawdzie nieograniczony (ograniczenie wszechświata nie dałoby się pomyśleć), ale **skończony**. Ta ważna konsekwencja jest, jak się zdaje, uwarunkowana już samym postulatem ogólnej względności. Gdyby bowiem wszechświat był nieskończony, to jakkolwiek dałaby się utrzymać zasada względności układów Galileuszowych, jednakże trudno by obstawać przy wymaganiu ogólnej względności. Można przeto powyższą konkluzję **Einsteina** uważać za przepowiednię ogólnej teorii względności i oczekiwać jej sprawdzenia przez obserwacje astronomiczne. Dobre horoskopy co do tego daje już sam fakt próby obliczenia krzywizny przestrzeni kosmicznej przez **Schwarzschilda** jeszcze z r. 1900 (a więc przed powstaniem teorii względności) na podstawie samych dat astronomicznych. Astronom ten ocenił wówczas promień krzywizny przestrzeni na 10^8 promieni ekliptyki, przyjmując przy tym, że otaczający nas układ gwiazd stałych wypełnia całą przestrzeń, a wszelkie mgławice znajdują się wewnątrz układu.

Teorię względności zastosował do tego rodzaju obliczeń **de Sitter** w r. 1917, wychodząc z prawdopodobniejszego założenia, że nasz układ gwiazd stałych jest jednym z wielu układów o rozmiarach tego samego rzędu, a stosunkowo wielkich wzajemnych odległościach, które to układy obserwujemy na niebie w postaci mgławic spiralnych lub skupień gwiazdowych. **De Sitter** znajduje promień krzywizny przestrzeni równy 10^{12} promieni ekliptyki, czyli $l,5.10^{20}$km.

Przyszłość pokaże czy astronomia dostarczy dat potrzebnych do tak pewnego obliczenia krzywizny przestrzeni, aby stwierdzenie jej skończoności dostarczyło niewzruszonego fundamentu doświadczalnego ogólnej teorii względności, tak jak stwierdzona eksperymentalnie niezależność prędkości światła od kierunku ruchu ziemskiego laboratorium względem gwiazd stałych była fundamentem teorii szczególnej.

W związku z tym wypada jeszcze omówić zarzut, jaki już nieraz wysuwano przeciw ogólnej teorii względności z powodu (fizykalnego, nie tylko kinematycznego) równouprawnienia przez nią dwu zdań następujących: 1) Ziemia obraca się względem układu gwiazd stałych; 2) Układ gwiazd stałych obraca się względem ziemi.

Oponenci rozumują tak: „Przecież według drugiego zdania musielibyśmy gwiazdom stałym przypisać prędkości, przekraczające wielokrotnie prędkość światła, której według teorii względności materia osiągnąć nie może. Czyż nie tkwi w tym widoczna sprzeczność?” Bynajmniej! Albowiem w ogólnej teorii względności jest prędkość światła zmienna w dowolnych granicach, a jej wartość zależy od wielkości $g_{\mu\upsilon}$, charakteryzujących pole grawitacyjne w Gaussowskim układzie współrzędnych. Tylko w szczególnej teorii, obowiązującej ściśle w obszarach bez pola grawitacyjnego, a raczej o stałym potencjale grawitacyjnym, jest prędkość światła c stałą. Szczególna teoria jest oczywiście także ważna w jakimkolwiek obszarze, jeżeli ten obszar jest dostatecznie małym, aby w nim można było potencjał grawitacji uważać za stały. Określenie czasu w takim obszarze polega na postulacie stałej prędkości światła, atoli mierząc otrzymaną jednostką czasu prędkość światła w innym obszarze dostatecznie odległym od pierwszego (ze stanowiska w pierwszym obszarze), znajdziemy w ogóle inną wartość prędkości światła i tylko ta wartość będzie w drugim obszarze wartością nieprzekraczalną. W ogólnej teorii względności pozostaje przeto ważnym twierdzenie, że **żadna prędkość w przyrodzie nie może być większą od prędkości światła**, ale od prędkości światła **w tym samym miejscu**. To zaś wcale nie stoi w sprzeczności ze zdaniem (2), iż gwiaździste niebo obraca się dokoła ziemi. Obydwa zdania są zasadniczo równoważne, a tylko praktyczne względy mogą przemawiać na korzyść pierwszego.

Ta okoliczność, że wiążąc układ współrzędnych z układem gwiazd stałych, otrzymujemy bardzo nieznaczne różnice prędkości światła w całym olbrzymim obszarze, obejmującym gwiazdy i ziemię, przemawia za praktyczną korzyścią wyboru tego właśnie układu odniesienia. Wtedy bowiem wystarczają w bardzo znacznym przybliżeniu prawidła geometrii Euklidesowej, jedynej, jaką się posługiwała mechanika Newtonowska. Nic tedy dziwnego, że prawa tej ostatniej wyróżniały ów układ odniesienia od układu związanego stale z ziemią i przypisywały pierwszemu charakter bezwzględny.

10) Z końca lutego 1921 r.

ZUSAMMENFASSUNG.

Die Entwicklung des Relativitätsgedankens und seine Durchführung durch **Albert Einstein**. Bedeutung der speziellen und der allgemeinen Relativitätstheorie und deren Prüfung durch die Erfahrung.