

5 441

Li. 12125

ТЕОРИЈА РЕЛАТИВИТЕТА

ПОПУЛАРНО-НАУЧНА СКИЦА

ОД

Др. СИМЕ М. МАРКОВИЋА



БЕОГРАД
ИЗДАВАЧКА КЊИЖАРНИЦА ГЕЦЕ КОНА
1. Кнез Михајлова 1.
1924.



ПРЕДГОВОР

Изгледа да је судбина свих великих научних теорија да се о њима много више говори него што се зна. Сетимо се само случаја дарвинизма или марксизма: шта се све није представљало и још увек не представља, нарочито у такозваној популарној литератури, као дарвинизам и марксизам! Па та судбина није мимоишла ни Теорију Релативитета. Тешко да има данас игде у свету интелигентног човека који није чуо за Ајнштајна и његову Теорију Релативитета, јер нема догађаја — сем Руске Револуције — о коме се последњих година више говорило и писало но што је то случај са револуцијом коју је у области Физике извршила Теорија Релативитета. Па ипак, нећу ни мало претерати кад кажем да једва ако један од хиљаде интелигентних људи има макар мало појма о Теорији Релативитета: о њеном бићу, о њеном смислу. Јер сам имао прилике да се о томе уверим и у културнијим срединама ван Балкана, а у нас је стање несумњиво још горе.¹⁾ И то уосталом није никакво чудо. Јер, иако физикална по садржини, Теорија Релативитета иде, по форми, у најапстрактније области Теориске Математике. И зато је она за нестручњаке уопште тешко схватљива. У толико више, што постоји извесна граница преко које се у популарисању једне научне теорије не може ићи, ако се неће да западне у вулгаризовање, у најгорем смислу те речи. Та граница, у случају Теорије Релативитета, обележена је, по мом нахођењу, знањем Математике и Физике бар у обиму средњешколског образовања. И ја се испод те границе у овој

БЕОГРАД
Штампарија Драг. Грегорића, — Космајска 22.
1924.

¹⁾ Колико је мени познато, у нас је, на српском, из области Теорије Релативитета до сад изашао само један информативни чланак у Српском Књижевном Гласнику крајем 1920. године од г. Д-р Михаила Петровића, и један део једне Ајнштајнове брошуре у преводу г. Б. Ђорића у Мисли (1921. године).

књизи нисам спуштао. Зато бих, варирајући познате речи које су биле написане на улазу у Платонову школу, могао рећи: ко нема ни толико знања из Математике и Физике колико треба да га има сваки свршени гимназист, боље је и да не почиње да чита ову књигу. Јер се без тога минимума стручног знања, које се уосталом, претпоставља скоро код сваког интелегентног човека, не може разумети смисао Теорије Релативитета. Тешкоће леже у природи саме ствари, и оне се не могу ни избећи ни заобићи ако се хоће да добије макар приближна слика о суштини Теорије Релативитета. А без извесне дозе способности за апстрактно мишљење немогуће је, међутим, схватити природу свих оних тешкоћа које је тек револуционарна снага Теорије Релативитета могла да преброди и савлада.

Има уметничких доживљаја које је у стању да изрази само уметност над уметностима: музика; има научних доживљаја које је у стању да оживи само наука над наукама: Математика. Има осећања која се могу описати само тоновима; има мисли које се могу изразити само математичким језиком. Математички језик је несумњиво најразвијенији, најсуптилнији, најсавршенији језик за описивање природних појава. И у томе управо и лежи велико преимућство Математике над свима осталим природним наукама. Математика је оплодила и идеју релативитета: без Математике, идеја релативитета, која је револуционисала Физику, остала би потпуно стерилна и поред свега тога што ју је филозофски инстинкт већ одавно истицао, сасвим природно, као идеју водиљу у формулисању општих природних закона. И зато није никакво чудо што се без Математике не може осетити ни оно што је најдубље ни оно што је највише у Теорији Релативитета.

У овој скици, већ према циљу коме она има да послужи, изложена су само најважнија факта, најглавније чињенице које карактеришу Теорију Релативитета: ова скица представља, према томе, само костур Теорије Релативитета, који се без Математике не може оживети. Али ће, надам се, пажљивији читаоци ипак моћи добити бар приближну идеју о томе шта је Теорија Релативитета. А то је, и само то, циљ ове скице. Распоред материјала и начин излагања подешени су тако да што је могуће више истакну психолошку природност и логичку нужност Теорије Релативитета. На ту сам страну обратио нарочиту пажњу да би читаоцима олакшао борбу против

такозваног „здравог разума“ који се, огрезао у традиционалним предрасудама, буни уопште против свих нових револуционарних идеја.

Жалим што је овога пута морало остати недодирнуто врло интересантно питање о гносеолошкој и, уопште, филозофској вредности Теорије Релативитета. Али ће о томе бити речи на другом месту, којом ћу се приликом осврнути критички на цео идеолошки систем Теорије Релативитета.

Од аутора чија су ми дела послужила као аутентична грађа за ову скицу да поменем само најглавније: Einstein, Lorentz, Minkowski, Weyl, Riemann, Helmholtz, Laue, Pauli, Freundlich, Thirring, Schlick, Born, Bloch.

С. М. Марковић.

заснован на искуству: јер се ни у ком случају не може назвати очевидним тврђење да једно тело, на пример, на које не делује никаква сила, може ипак непрекидно да се креће. То тврђење се чак и противи такозваном „здравом разуму“. Па ипак, поникао из искуства, принцип инерције добио је своје пуно оправдање у искуству, тако да се у његову тачност не може сумњати.

Али, ако горњу формулу принципа инерције подвргнемо логичној анализи, лако ћемо увидети да она показује извесне недостатке који се морају попунити да би се постигла потребна прецизност. Пре свега, појам кретања је по своме бићу релативан. Све што се приликом кретања опажа, то су промене узајамних положаја разних тела. Појам кретања претпоставља, дакле, најмање два тела. Нема никаквог смисла кад се о једном телу каже просто да „мирује“ или се „креће“, јер тек кад се уочи два тела, може се говорити о томе да једно од њих мирује или се креће у односу на оно друго. Како ми увек опажамо само релативна кретања, то је принципијелно сасвим свеједно које ћемо од два уочена тела сматрати, на пример, да „мирује“ у односу на оно друго. Према томе, кад се у горњој формули принципа инерције каже да тело на које не делују никакве силе „остаје у миру или се креће праволиниски“, онда тиме није још ништа прецизно речено, јер једно тело које се у односу на земљу налази у миру кретаће се, на пример, у односу на сунце, као што ће путања једног тела која посматрачу на земљи изгледа праволиниска, са сунца или кога другог небеског тела посматрана изгледати криволиниска.

Казати за једно тело да се креће праволиниски, има само онда смисла ако се истовремено укаже и на друго тело на које се то кретање односи, или — како се то математичким језиком вели — ако се истовремено укаже на координатни систем у коме путања dotyчног тела одиста изгледа праволиниска. И кад принцип инерције говори о праволинском кретању, онда он претпоставља егзистенцију једног нарочитог, одређеног координатног система на који се односи читава садржина принципа. Без тога, принцип инерције не би имао никаквог одређеног смисла. Јер принцип инерције не важи у сваком произвољном координатном систему. Тела на која се са великом приближношћу може применити принцип инерције јесу, на пример, такозване звезде стајачице, јер се за сваку од

њих може узети да је толико удаљена од осталих да на њу, практично, не делују никакве силе. Али ако употребимо координатни систем који је, на пример, чврсто привезан за земљу, онда ћемо констатовати да свака звезда стајачица за 24 сата опише у односу на тај координатни систем један круг са огромним полупречником уместо да се, као што то принцип инерције захтева, креће у правој линији. Шта значи то? То значи да принцип инерције искључује употребу координатних система у којима звезде стајачице описују кружне путање. Координатни системи за које важи принцип инерције зову се Галилејеви или инерцијални системи. И само за такве системе важе закони Галилеј-Њутнове Механике.

Њутн је веровао у апсолутни простор. Он вели: „Апсолутни простор остаје по својој природи, и не односе се ни на какав спољни предмет, увек исти и непокретан“. Појам простора је, по Њутну, независан од свих ствари; он не зависи ни од звезда ни од специфичности људских чула он је апсолутан. У Класичној Механици један одређен Галилејева систем, на који се односе сва кретања, може се сматрати као апсолутни координатни систем који би управо био идентичан са Њутновим апсолутним простором. И мир и кретање у односу на тај систем имају апсолутни карактер. У духу Њутновом могло се, према томе, говорити о правом стварном апсолутном кретању. Сам Њутн вели: „Уосталом сазнати стварна кретања појединих тела и разликовати их од привидних тешка је ствар, јер се делови оног непокретног простора, у коме се тела стварно крећу, не могу чулно сазнати... Али ипак, ствар није сасвим безнадежна“. Показало се, међутим, да је ствар ипак безнадежна. Њутнова концепција се није могла одржати ни до Ајнштајна. Читавих 30 година пре првог фундаменталног Ајнштајновог дела, писао је познати физичар и филозоф Мах: „Ако се остане само на терену чињеница, онда се зна само за релативне просторе и кретања“. Мах одбацује, Њутнову идеју апсолутног простора, јер се апсолутни простор ни на који начин не може констатовати. Пошто не могу бити предмет искуства, апсолутни простор и апсолутно кретање за науку не постоје; они у опште и не иду у област научног физикалног испитивања. У науци се не зна за кретање као такво, за апсолутно кретање, него само за релативно кретање т. ј. кретање у односу на један одређени координатни систем. Исто тако не може бити ни речи о „стварној“ путањи

једног покретног тела, него само о путањи у односу на један одређени координатни систем. То су све ствари које са Ајнштајновом Теоријом Релативитета немају никакве непосредне везе, јер су оне биле расветљене и пречишћене у науци још много пре Ајнштајна.

Мах је био први који је заузео исправан став још у једном важном спору. Познато је да се још од античког доба мислило да се земља налази у апсолутном миру, а да се сунце, планете и све остале звезде окрећу око земље. То учење развио је у научни геоцентрични систем Птолемеј, па се оно по његовом имену обично и зове Птолемејево учење. И читаве две хиљаде година у науци се веровало и проповедало да је земља центар света. Тек је Коперник одлучно раскинуо са тим учењем. Он је одузео земљи ничим незаслужену привилегију да буде центар света и поставио је теорију по којој се и земља и све остале планете окрећу око сунца. Нови хелиоцентрични систем имао је то велико преимућство над геоцентричним што је био у стању да на много простији начин опише кретање свих планета. Уместо необично компликоване Птолемејеве Механике, на основу Коперникове теорије добија се много простија Небеска Механика. И тај факт је управо и био од пресудног значаја у спору између геоцентричног и хелиоцентричног система. И може се рећи да је од Њутнова времена хелиоцентрични систем суверено владао у науци, и ако је католичка црква тек 1813. године дигла анатему са Коперникових дела.

У новије доба, међутим, наука је, посматрајући читаву ствар са једног вишег гледишта, у цео овај спор између Птолемејеве и Коперникове теорије унела нову светлост. До Коперника се веровало да земља мирује, а да се сунце креће. Од Коперника је било обрнуто. Али, ма како иначе изгледале дијаметрално супротне, обе ове теорије имале су ту заједничку црту што су и једна и друга претендовале на апсолутну истинитост. Питање је било овако постављено: Ко има право, Птолемеј или Коперник? Која је теорија истинита? Птолемејева или Коперникова? Веровало се, јер се није дијалектички мислило, да све теорије једне другу апсолутно искључују, да само једна од њих може бити исправна, а она друга мора бити погрешна. И Мах је био први који је формулисао став модерне науке према овом значајном спору. Полазећи од факта да ми уопште опажамо само релативна кретања, Мах закључује да ми и у случају земље и сунца мо-

жемо констатовати само факт њиховог релативног кретања. Зато на питање: Које је гледиште исправно, Птолемејево или Коперниково? — Мах одговара: „Оба су гледишта и исправна, само је последње простије и практичније“ Мах је, дакле, први утврдио формалну равноправност геоцентричног и хелиоцентричног схватања и ако је тек Ајнштајн, као што ћемо видети, ту равноправност и динамички образложио. Ради лакшег разумевања и правилније оријентације како у овоме тако и свима сличним питањима, обраћамо пажњу читаоцима на ову ствар. У науци се често дешава да се за објашњење једне исте појаве поставе две разне теорије које, и ако са разних гледишта, подједнако успешно описују дотичну појаву. Под претпоставком да и све логичне конзеквенције, које се из постављених теораја могу извући, наилазе подједнако на потврду у искуству, питање: која је од тих теорија „истинита“, која управо одговара „стварности“ — нема никаквог смисла. Ми ћемо се ипак одлучити за ону од тих теорија која је простија, практичнија. Једини критеријум, којим се, дакле, ми при томе избору руководимо, јесте целисходност. И могли бисмо рећи да ми данас једино из разлога целисходности учимо децу у школама да се земља окреће око сунца, и поред утврђене логичке равноправности геоцентричног и хелиоцентричног система. Јер на тај начин долазимо до простије и разумљивије слике о сунчаном систему. Па је то преимућство управо и осигурало победу Коперникове теорије над Птолемејевом.

Класична Механика не претпоставља само апсолутни простор него и апсолутно време, т. ј. такво мерење времена које има универзални карактер, један нормални сат који на исти начин показује време свуда у целој васпони. За једно тело каже се да се креће једнаком брзином кад прелази „једнаке путеве за једнака времена“. Принцип инерције говори, као што смо видели, о таквом кретању. Шта се подразумева под „једнаким путевима“, не може бити, у духу Класичне Механике, никакве сумње, јер се једнакост или неједнакост дужина може увек констатовати на познати начин: простијим мерењем утврђене јединице за мерење дужина. Али није само по себи јасно шта треба разумети под „једнаким временима“, јер израз „једнака времена“ има само онда смисла ако се уједно укаже и на сат на чије се податке тај израз односи. Класична Механика претпоставља да постоји један универзални сат који

свуда показује апсолутно време, па се зато сви податци о времену у Класичној Механици односе управо на тај замишљени универзални нормални сат. Њуџн вели у својим Принципима: „Апсолутно, право и математичко време тече само по себи и по својој природи униформно, и не односећи се ни на какав спољни предмет“. Апсолутно време се, дакле, замишља као неки вечити, непрекидни и нечујни ток, који је потпуно независан од свега космичког збивања. Полазећи са становишта да ми до појма времена долазимо уопште тек посматрајући промене у свету, па смо и јединицу за мерење времена у стању да одредимо само на основу периодичних појава које нам пружа природа, Мах је одлучно устао против идеје да се „апсолутно“ време може мерити независно од свих тела, кретања и промена у свету. Одбацујући апсолутистичко схватање појма времена, Мах вели: „Ми не можемо говорити о „апсолутном“ времену (независном од сваке промене). Ово апсолутно време не може се мерити никаквим кретањем, и зато нема никакву практичну па ни научну вредност.“¹⁾ Апсолутно време, како га је замишљала Класична Механика, не може се уопште ни на који начин констатовати: зато оно за науку и не постоји.

Махова критика поколебала је веру у апсолутни простор и апсолутно време Класичне Механике, и у том погледу Мах се може сматрати као један од великих претеча Ајнштајнових. Махова је заслуга у томе што је он јасно указао на релативитет свих кретања и равноправност разних релативних схватања, али он није био у стању да сруши владавину круте апсолутистичке идеологије у Физичи, јер ни он није ни за један тренутак посумњао у то да размак у простору као и размак у времену има увек једну одређену, стварну, апсолутну вредност. Тек је Ајнштајновом генију пошло за руком да смелу мисао изведе до краја и да, на начин који ћемо изложити, и основне појмове природних наука, размак у времену и простору, релативира.

Да би се јасно схватило шта је принципијелно ново у Ајнштајновој Теорији Релативитета, потребно је да се читаоци упознају са суштином принципа релативитета, како га је формулисала Класична Механика. Замислимо један воз који се

¹⁾ Махова критика је само делимично тачна, јер је Мах, устајући с правом против апсолутистичког схватања простора и времена Класичне Механике, пао у једну другу грешку која лежи у основи његове гносеологије на којој је развио читав систем свога филозофског позитивизма. Али ће о томе другом приликом бити речи. —

креће праволиниски једнаком брзином. Ако у томе возу будемо посматрали слободно падање тела, осциловање клатна или ма коју другу механичку појаву, констатоваћемо увек да се све те појаве дешавају у свему по истим законима као, при иначе истим околностима, и у лабораторији која „мирује“, т. ј. не креће се у односу на земљу. То је једна чињеница искуства. Између „мира“ и једнаког праволиниског кретања ми нисмо у стању да правимо, у пракси, никакву разлику — то је суштина класичног принципа релативитета, који се каткад зове и Галилејев принцип релативитета. Класични принцип релативитета, дакле, тврди да ми никаквим механичким средствима нисмо у стању да констатујемо једнако праволиниско кретање. У возу који се креће једнаком брзином у правој линији, ми никаквим механичким експериментима нисмо у стању да утврдимо да ли се воз „креће“ или „мирује“. Основни закони Механике су по својој природи такви да подједнако важе и у односу на један Галилејев координатни систем који „мирује“, и у односу на ма који други координатни систем који се према оном првом (што „мирује“) креће једнаком брзином у правој линији. Приликом једнаког праволиниског кретања не може се, дакле, принцип и једно појавити никакав специфични ефекат који би то кретање одавао. И тако се, у најпучијој сагласности са вековним искуством, дошло до закључка: да се све механичке појаве дешавају по истим општим законима у сваком координатном систему који се према основном Галилејевом координатном систему креће једнаком брзином у правој линији. Сви Галилејеви системи, који се налазе у релативном једнаком праволиниском кретању, потпуно су, према томе, равноправни за описивање механичких појава: сви они имају за Механику исту вредност. То је срж класичног принципа релативитета.

Као што се види, класични принцип релативитета, како је горе изложен, ограничава се: 1-во на механичке појаве, и 2-го на једнака праволиниска кретања.

II

Je ли принцип релативитета општи природни закон? — Миклсонов експеримент. — Специјални принцип релативитета — Сукоб између теорије и праксе. — Принцип констанције брзине светлости. — Сукоб између принципа релативитета и принципа констанције брзине светлости — Ајнштајнова идеја за решење сукоба.

Прво питање које нам се сад одмах намеће јесте ово: је ли могуће да принцип релативитета важи одиста само за механичке појаве? Можда он важи за све природне појаве уопште, за оптичке и електродинамичке исто тако као и за механичке? Наука је била дужна да одговори на та питања и — одговорила је.

Пре свега, један чисто филозофски разлог говори против ограничења принципа релативитета само на механичке појаве. Јер је априори невероватно — као што је Ајнштајн приметно — да један принцип, који са толиком тачношћу важи у пространој области механичких појава, не важи у осталим областима физикалних појава. Али овај филозофски аргуменат има значај само једне теориске претпоставке коју треба експериментално проверити да би у науци стекла право грађанства. И физичари су се дали на посао. Обрађена је најпре пажња на оптичке феномене, јер су они приступачни најфинијим и најтачнијим мерењима. Поставило се питање: има ли кретање земље око сунца утицаја на појаве распростирања светлости, или, другим речима: може ли се оптичким експериментима констативати кретање земље око сунца? У духу теорије светлости која је у науци била у опште примљена, одговор на горње питање морао би бити позитиван. Ствар је у овоме. По теорији, електро магнетски таласи, у којима се управо састоји светлост, замишљани су као таласасто распростирање промене стања једне супстанце која испуњава целу васиону па и празнине између најмањих делова материјалних тела, и која је названа етар. Етар се налази у миру, не учествује ни у каквом кретању. С друге стране, многобројним експериментима је утврђено да се светлост распростире брзином од $v = 300.000$ километара у секунди. При том се подразумева да се та брзина односи на етар, т.ј. на произвољни замишљени координатни систем који би био чврсто привезан за етар. Ако бисмо

сад хтели да брзину светлости измеримо са једног тела које се у односу на носиоца светлосних таласа, на етар, креће једнаком брзином v у правцу простирања светлости, онда бисмо констатовали да брзина светлости има вредност $c - v$, јер, као што је лако увидети, посматрач, који се са телом креће у правцу светлосних зракова брзином v , мора констатовати да се брзина светлости управо за онолико смањила колико износи његова сопствена брзина. Ако се, међутим, посматрач креће истом брзином v , али у супротном смислу, у односу на кретање светлости, онда би његово мерење дало као брзину светлости вредност $c + v$, јер кад се посматрач и светлост крећу у супротном смислу, онда посматрач мора констатовати да се брзина светлости управо за онолико повећала колико износи његова сопствена брзина.

Ми се са земљом налазимо управо у случају горе поменутог посматрача. Земља са свима нама и свима нашим инструментима креће се кроз васионски етар, не реметећи ниуколико његов вечити мир. Како, дакле, етар не учествује у кретању земље, значи да кретање земље према етру има одређен физикални смисао који би се ма на који начин, директно или индиректно, морао манифестовати. Замишљени координатни систем, који би био нераздвојно везан за етар, играо би улогу неке врсте „апсолутног“ координатног система, у коме би се могло посматрати „апсолутно“ кретање, т.ј. кретање у односу на мирни васионски етар. Овај координатни систем морао би имати над свима осталим то преимућство да се у њему природни закони могу најпростије формулисати. У свима осталим координатним системима, који би се према оном основном кретали, природни закони би били компликованији, јер би у њима морали доћи до израза и величина и правац кретања самих тих координатних система. Ако се светлост, у основном координатном систему, креће у свима правцима брзином од 300000 километара у секунди, то не би могао бити више случај ни у једном од координатних система који се крећу у односу на тај основни систем.

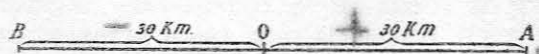
Земља на своје путу око сунца прелази око 30 километара у секунди: том брзином се крећемо, дакле, и ми са свима својим инструментима. То кретање, које се односи, наравно, на етар, може се у довољно малом размаку сматрати као приближно праволиниско. Ако сад уочимо један светлосни зрак који се креће у правцу кретања земље, онда бисмо, према малопређашњем резоновању, добили за брзину светлости вредност

$30\ 000 - 30 = 299970$ километара у секунди
(брзина земље од 30 километара у секунди игра улогу брзине у из малопређашњег општег примери: $v - v$). Ако пак посматрамо светлосни зрак који се креће у смислу који је супротан кретању земље, онда бисмо за брзину светлости добили вредност

$$300\ 000 + 30 = 300\ 030$$

километара у секунди

Како је брзина земљиног кретања (30Км) врло мала према брзини светлости (300 000 Км), настаје питање: могу ли се горње промене у брзини светлости уопште констатовати? Замислимо, на пример, један овакав експеримент. На једном одређеном месту на земљи налази се један експериментатор O , који ће у једном одређеном моменту дати један светлосни сигнал. На 30 километара од O у правцу кретања земље налази се један посматрач A а на истим одстојању 30 километара од O али у супротном смислу још један посматрач B (сл. 1)



Сл. 1.

Посматрачи A и B располажу прецизним и подједнако дотераним сатовима (хронометрима) и имају задатак да управо у моменту кад до њих стигне светлосни сигнал сатове зауставе. Под претпоставком да је све то тачно изведено, да ли ће се моћи констатовати каква разлика у подацима које нам пружају сатови? Према горе изложеном, светлост ће се у правцу од O ка A кретати брзином од 299 970 километара, а у правцу од O ка B брзином од 300 030 километара у секунди. Како раздаљине OA и OB износе по 30 километара, то се време за које светлост пређе сваку од тих раздаљина добија кад се просто те раздаљине поделе одговарајућом брзином. Тако налазимо да ће светлост из O до A стићи за

$$\frac{30}{299\ 970} = 0,000\ 100\ 01 \text{ секунде,}$$

док ће из O стићи у B за

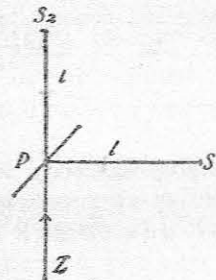
$$\frac{30}{300\ 030} = 0,000\ 099\ 99 \text{ секунде.}$$

Разлика између ових времена износи

$$0,000\ 000\ 02 \text{ секунде,}$$

т. ј. два стотилионита или један десетотилионити део једне секунде. Јасно је да се тако сићушне разлике не могу конста-

товати никаквим сатовима, јер би ти сатови морали бити више него милион пута прецизнији од најпрецизнијих данашњих, да би се горњи замишљени експеримент могао извести. Изгледа, дакле, на први поглед да се, према данашњем стању технике, питање о коме је реч уопште не може решити. Али, и ако се никаквим механичким експериментима тако сићушне разлике у времену као што су оне горе не могу констатовати, постоје оптичке методе помоћу којих се и сто пута мање разлике од оних горњих могу врло тачно мерити. Такав један оптички експеримент извео је први пут пре више од четрдесет година американски физичар Миклсон. Његова је идеја била ова. Кад један светлосни зрак Z падне под углом од 45° на једну стаклену плочу P , расцепи се на два дела: један део се рефлектује у правцу који стоји нормално према првобитном, док други део продире кроз плочу и продужује пут у истом правцу. (сл. 2)



Сл. 2.

И један и други део расцепљеног зрака на извесној подједнакој раздаљини l од тачке цепања налазе на огледала S_1 и S_2 која су постављена нормално на правац кретања светлосних зрака; рефлектујући се о та огледала, и један и други зрак се враћају истим путевима да се опет састану у заједничкој полазној тачци. Међутим, кад се на овај начин један зрак расцепи па се оцепљени делови поново састану, онда се појављују извесне оптичке фигуре: настају такозване појаве интерференције; и довољно је да један од оцепљених зракова закасни на своме путу макар и за један немерљиво мали део секунде, па да то изазове такве промене у појавама интерференције које се могу тачно и опазити и мерити.

На тај начин је Миклсон могао да испита да ли је време за које светлосни зрак пређе један одређен пут тамо и овамо у правцу кретања замље различито од времена за које светлосни зрак пређе исти толики пут тамо и овамо у правцу који је нормалан на правац земљиног кретања. Прост рачун показао нам је, као што смо видели, да та разлика, и ако врло сићушна, постоји. Миклсонов експеримент је по својој природи такав да би се, као што смо већ нагласили, и сто пута сићушније разлике у времену могле констатовати. Све техничке сметње су, дакле, савладане. Али при свем том, на опште изненађење, сви покушаји да се горе поменути разлика констатује испали су негативни, т. ј. показали су да та разлика не постоји. Шта то значи? То значи да земљино кретање нема никаквог утицаја на распрострањавање светлости: светлост се у свима правцима креће истом брзином.

Негативни резултат Миклсоновог експеримента показао је да се ни оптичким путем не може утврдити да ли се посматрач налази у „миру“ или се креће праволинијски једнаком брзином. А то значи, према ономе што смо раније рекли, да принцип релативитета важи и за оптичке појаве.

И тако се, на основу сличног искуства из свих области физике, класични принцип релативитета може у најопштијем облику исказати овако: сви општи природни закони, формулисани у односу на један одређен Галилејев координатни систем, остају исти и у сваком другом координатном систему који се у односу на онај први креће праволинијски једнаком брзином. Овај принцип се обично зове специјални принцип релативитета зато што је у њему реч само о релативитету једнаког праволиноског кретања, т. ј. једне сасвим специјалне класе кретања. Све природне појаве дешавају се на исти начин, на било да систем, у коме се посматрају, „мирује“ или се креће једнаком брзином у правој линији. Не постоји, дакле, никаква разлика између стања „мира“ и једнаког праволиноског кретања — и зато је сасвим свједно које ћемо од тих стања ми схватати као „мир“. То је суштина специјалног принципа релативитета.

Миклсонов експеримент, који је први пут изведен 1881. године а поновљен са још савршенијом апаратуром 1887. године, био је за читаву науку сензација првог реда. Ни о једном

експерименту није се последњих деценија више писало и дискутовало: он је био предмет најразноврснијих интерпретација које су све имале за циљ да, у духу идеја које су владале у науци, објасне његов негативни резултат. Зато ћемо се ми још мало задржати на том експерименту, да би читаоци могли схватити сав његов епохални значај за науку: јер је Миклсонов експеримент управо и дао повода Ајнштајновој Теорији Релативитета.

Као што смо видели, Миклсонов експеримент имао је за циљ да оптичким путем констатује годишње кретање земљино у односу на васионски етар. Принцип експеримента заснован је на опште примљеној теорији светлости с једне, и на сасвим елементарним рачунима у духу Класичне Механике с друге стране. Теориска подлога експеримента била је тако јака а техника мерења тако савршена да уопште није било никакве сумње о томе да ће експеримент постићи свој циљ, да ће потпуно успети. Па ипак, уместо да демонстрира један резултат који нужним начином проистиче из теорије светлости и Класичне Механике, ђудљиви експеримент претворио се сасвим неочекивано у демонстрацију и против теорије светлости и против Класичне Механике! Факта имају своју логику и у науци баш као и у друштву: она зидају али и руше, она крунишу али и револуционишу. И наука, баш као и друштво, развија се дијалектички!

Миклсонов експеримент, уместо да буде један од триумфа и теорије светлости и Класичне Механике, изазвао је дубоку кризу и у теорији светлости и у Класичној Механици. Теорија светлости била је заснована, као што смо већ поменули, на опште примљеној хипотези о етру, која се одиста показала као једна од најплоднијих у историји науке. Али, ако би етар постојао, онда би се његова физикална реалност морала манифестовати на тај начин што би се једним експериментом као што је Миклсонов морало констатовати кретање у односу на етар, т. ј. у односу на произвољан координатни систем који у етру мирује. Другим речима: према теорији светлости, принцип релативитета не би могао важити за оптичке појаве. Експеримент, међутим, показује да он ипак важи и за оптичке појаве. Кад једна теорија дође у сукоб са фактима, не остаје ништа друго него да се теорија, а пре свега оно што је у њој хипотетично — као што је идеја султанцијелног етра у теорији

светлости — жртвује. То је смисао револуције коју је Ајнштајн извршио. Модерна Теорија Релативитета поникла је из г рњег сукоба између теорије и праксе.

Ми смо из Миклсоновог експеримента закључили да се светлост у свима правцима креће константном брзином. Али сем тога, и читав низ теориских и експерименталних испитивања из области Оптике и Електродинимике довели су до неизбежног резултата: да се светлост у вакуму стално креће константном брзином ($c = 300\,000$ километара у секунди) која ниуколико не зависи од стања кретања светлосног извора. Тако је, у пуној сагласности са искуством, постављен општи закон распрострања светлости у вакуму који је Ајнштајн назвао принцип констанције брзине светлости. Он би се укратко могао овако формулисати: у свима координатним системима, који се према једном основном систему крећу праволиниски једнаком брзином, светлост се распростире праволиниски и са истом константном брзином c , без обзира на то да ли се светлосни извор креће или не.

И принцип релативитета и принцип констанције брзине светлости засновани су на најчвршћем темељу егзактне науке: на искуству; најфинији оптички експерименти и најпрецизнија астрономска мерења потврдили су, на један сјајан начин, оба принципа, тако да је, са гледишта егзактне науке, свака сумња у ове принципе потпуно искључена. Па ипак, једно просто резонување у вези са тим принципима било је довољно да и највеће физичаре доведе у најмучнију забуну и најтежу сумњу. И ако је те тешкоће садржао већ Миклсонов експеримент, ми ћемо их још једном, на једном простом примеру, истаћи.

Замислимо један воз који се креће једнаком брзином v у правој линији. У једном одређеном моменту, из средине воза пусти се један светлосни сигнал у правцу кретања воза, па се сад тражи да се измери брзина тог сигнала и у односу на воз који се креће и у односу на насип поред којег се воз креће. Према принципу релативитета, све физикалне појаве у возу који се креће праволиниски једнаком брзином дешавају се исто онако као и у возу који мирује (наравно, у односу на земљу). То значи да ће се, у нашем случају, светлосни зраци, посматрани из покретног воза, кретати и у правцу кретања воза и

у супротном правцу једном истом брзином, баш као што би то био случај кад се воз уопште не би кретао. Према принципу констанције брзине светлости, међутим, брзина светлосних зракова, и кад се посматра са насипа, мора бити у оба правца иста, јер она у опште не зависи од стања кретања светлосног извора. Лако је, међутим, увидети да су горњи закључци, до којих долазимо простом применом принципа релативитета и принципа констанције брзине светлости на наш конкретни случај, инкомпатибилни: да стоје у контрадикцији, да се узјамно искључују! Да би се то што јасније увидело, подсетићемо на један прост пример из Механике. Нека се воз креће у правој линији константном брзином v , и нека се један путник у возу шета у правцу кретања воза константном брзином u . Ако се сад запитамо: којом се брзином (w) креће путник у односу на насип? — простим размишљањем долазимо до закључка који је изражен у познатом класичном ставу о слагању брзина:

$$w = v + u$$

Овај закључак је у пуној сагласности и са „здравим разумом“: он је прекаљен вековним искуством и у облику става о слагању брзина представља један од стубова Класичне Механике.

Вратимо се сад на наш воз са светлосним сигналом. Светлосни сигнал који се у возу креће, као што знамо, константном брзином c , игра улогу путника који се у возу у нашем последњем примеру кретао брзином u . Према томе, кад се воз креће једнаком брзином v , а знамо да се светлосни сигнал, пуштен у возу у правцу кретања воза, креће у односу на воз брзином c , то би, према класичном ставу о слагању брзина, брзина светлосног сигнала у односу на насип морала бити, очевидно:

$$v + c,$$

а то се противи принципу констанције брзине светлости, по коме се светлосни сигнали, и са насипа посматрани, морају у оба правца кретати истом брзином c .

Шта значи то? Значи пре свега то, да се принцип констанције брзине светлости налази у контрадикцији са класичним ставом о слагању брзина. С друге стране, међутим, тешкоће на које смо наишли можемо и овако формулисати: принцип релативитета захтева да закон распрострања светлости, као и сваки други општи природни закон, буде исти и у односу

на насип који „мирује“ и у односу на воз који се, према насипу, креће у правој линији једнаком брзином. Али то, према горњем посматрању, изгледа немогуће, јер се за брзину сигнала у односу на насип добија вредност $v + c$, док та брзина у односу на воз има вредност c , па би, према принципу релативитета, морало бити

$$v + c = c$$

што је, очевидно, бесмислица, пошто v није једнако нули. Из тога закључујемо: ако се светлост у односу на покретни воз креће брзином c , изгледа да закон кретања светлости у односу на насип мора бити другачији, што је у супротности са принципом релативитета.

Као што се види, принцип релативитета и принцип констанције брзине светлости стоје у контрадикцији, узајамно се искључују! Два фундаментална принципа, два стуба егзактне науке — у сукобу! Наука је запала у једну од најдубљих криза: тешкоће које су искрсле изгледале су просто несавладљиве. Јер је требало или бирати између принципа релативитета и принципа констанције брзине светлости, или жртвовати и један и други принцип, и ако су и један и други тако сјајно потврђени искуством и били с правом понос и дика егзактне науке. У тешкој недоумици, неки физичари показивали су склоност да пре жртвују принцип релативитета, и ако се није могла навести ни једна једина чињеница искуства која би била у стању да поколеба тако природну веру у принцип релативитета.

Ако се, међутим, хтело да се до краја остане на терену факата, као што је то Ајнштајн урадио, онда из горње дилеме није било другог излаза него да се једним револуционарним потезом раскине са традиционалним схватањем основних појмова сазивања: са појмовима времена и простора. Ајнштајн, у коме се — како је тачно рекао један немачки професор — искристализовало мишљење једне читаве епохе, имао је генијалне смелости да заплива „против струје“, и да изврши једно велико револуционарно дело чија је круна модерна Теорија Релативитета.

Ајнштајн је овако резонаовао: у тачност принципа релативитета и принципа констанције брзине светлости не може се сумњати, док се хоће да остане на терену егзактне науке; у логику процеса мишљења, који истиче на велику супротност између ова два принципа, такође се не може сумњати. Али у ову размисљања на коме почива цео тај логички процес леже извесне

претпоставке о самосталности и независности појмова времена и простора, претпоставке које изгледају тако несумњиве и очигледне, да никоме није ни на памет падало да у њихову оправданост посумња. Међутим, једна дубља анализа ових појмова показује да је њихова самосталност само привидна и да горње претпоставке не само нису нужне него су сасвим произвољне и непотребне. И кад се те претпоставке одбаце, онда, сама по себи, отпада и супротност између принципа релативитета и принципа констанције брзине светлости.

Тако је Ајнштајн једном прецизном филозофском анализом физикалних појмова времена и простора спасао част егзактне науке: решио је сукоб између два њена фундаментална принципа. Ајнштајн је показао да у ствари не постоји сукоб између принципа релативитета и принципа констанције брзине светлости, и употребио је управо ова два принципа као темељ на коме је изградио своју Специјалну Теорију Релативитета (1905. године), као скуп конзеквенција које нужним начином проистичу из коегзистенције оба поменутог принципа.

III

Релативитет времена и простора. — Специјална Теорија Релативитета. — Појам истовремености и дефиниција времена. — Релативитет истовремености. — Релативитет просторних дужина. — Решење сукоба између принципа релативитета и принципа констанције брзине светлости. —

Не улазећи у суптилности Ајнштајнове анализе појмова времена и простора, ми ћемо истаћи, доследно циљу који смо себи у овој књизи поставили, само најмаркантније моменте, који ће ипак бити довољни да јасно илуструју суштину читаве ствари, под претпоставком, наравно, да читаоци напредну сву своју пажњу.

Ако се светлост у односу на координатни систем K_1 , креће у произвољном правцу брзином c , док се сам координатни систем K_1 , креће у том истом правцу једнаком брзином v , у односу на основни координатни систем K — онда ће, као што смо у прошлом одељку видели, брзина светлости у односу на систем K бити, противно принципу констанције брзине светлости, већа од c , т.ј. једнака $v + c$, под претпоставком да се ду-

на насип који „мирује“ и у односу на воз који се, према насипу, креће у правој линији једнаком брзином. Али то, према горњем посматрању, изгледа немогуће, јер се за брзину сигнала у односу на насип добија вредност $v + c$, док та брзина у односу на воз има вредност c , па би, према принципу релативитета, морало бити

$$v + c = c$$

што је, очевидно, бесмислица, пошто v није једнако нули. Из тога закључујемо: ако се светлост у односу на покретни воз креће брзином c , изгледа да закон кретања светлости у односу на насип мора бити друкчији, што је у супротности са принципом релативитета.

Као што се види, принцип релативитета и принцип констанције брзине светлости стоје у контрадикцији, узајамно се искључују! Два фундаментална принципа, два стуба егзактне науке — у сукобу! Наука је запала у једну од најдубљих криза: тешкоће које су искрсле изгледале су просто несавладљиве. Јер је требало или бирати између принципа релативитета и принципа констанције брзине светлости, или жртвовати и један и други принцип, и ако су и један и други тако сјајно потврђени искуством и били с правом понос и дика егзактне науке. У тешкој недоумици, неки физичари показивали су склоност да пре жртвују принцип релативитета, и ако се није могла навести ни једна једина чињеница искуства која би била у стању да поколеба тако природну веру у принцип релативитета.

Ако се, међутим, хтело да се до краја остане на терену факата, као што је то Ајнштајн урадио, онда из горње дилеме није било другог излаза него да се једним револуционарним потезом раскине са традиционалним схватањем основних појмова сазнања: са појмовима времена и простора. Ајнштајн, у коме се — како је тачно рекао један немачки професор — искристализовало мишљење једне читаве епохе, имао је генијалне смелости да заплива „против струје“, и да изврши једно велико револуционарно дело чија је круна модерна Теорија Релативитета.

Ајнштајн је овако резонувао: у тачност принципа релативитета и принципа констанције брзине светлости не може се сумњати, док се хоће да остане на терену егзактне науке; у логику процеса мишљења, који истиче на висок супротност између ова два принципа, такође се не може сумњати. Али у ову размислима на коме почива цео тај логички процес леже извесне

претпоставке о самосталности и независности појмова времена и простора, претпоставке које изгледају тако несумњиве и очигледне, да никоме није ни на памет падало да у њихову оправданост посумња. Међутим, једна дубља анализа ових појмова показује да је њихова самосталност само привидна и да горње претпоставке не само нису нужне него су сасвим произвољне и непотребне. И кад се те претпоставке одбаце, онда, сама по себи, отпада и супротност између принципа релативитета и принципа констанције брзине светлости.

Тако је Ајнштајн једном прецизном филозофском анализом физикалних појмова времена и простора спасао част егзактне науке: решио је сукоб између два њена фундаментална принципа. Ајнштајн је показао да у ствари не постоји сукоб између принципа релативитета и принципа констанције брзине светлости, и употребио је управо ова два принципа као темељ на коме је изградио своју Специјалну Теорију Релативитета (1905. године), као скуп конзеквенција које нужним начином проистичу из коегзистенције оба поменута принципа.

III

Релативитет времена и простора. — Специјална Теорија Релативитета. — Појам истовремености и дефиниција времена. — Релативитет истовремености. — Релативитет просторних дужина. — Решење сукоба између принципа релативитета и принципа констанције брзине светлости. —

Не улазећи у суптилности Ајнштајнове анализе појмова времена и простора, ми ћемо истаћи, доследно циљу који смо себи у овој књизи поставили, само најмаркантније моменте, који ће ипак бити довољни да јасно илуструју суштину читаве ствари, под претпоставком, наравно, да читаоци напредну своју пажњу.

Ако се светлост у односу на координатни систем K_1 , креће у произвољном правцу брзином c , док се сам координатни систем K_1 , креће у том истом правцу једнаком брзином v , у односу на основни координатни систем K — онда ће, као што смо у прошлом одељку видели, брзина светлости у односу на систем K бити, противно принципу констанције брзине светлости, већа од c , т.ј. једнака $v + c$, под претпоставком да се ду-

жине и времена у оба система K и K_1 мере истим мерама. Ова претпоставка је од увек претпостављена као нешто што се само по себи разуме. Али је Ајнштајн показао да ова претпоставка не само није ништа што се само по себи разуме, него је у ствари једна предрасуда од које се наука мора ослободити да би изашла из кризе у коју је запала. И ту почиње Ајнштајново велико дело. Он размишља овако: ако времена и дужине у оба посматрана система K и K_1 , меримо истим мерама, онда за брзину светлости у тим системима морамо добити различите вредности: $c + v$ и c . Како се, међутим, светлост према принципу констанције брзине светлости и у пуној сагласности са искуством, креће увек константном брзином c , то нам онда не остаје ништа друго него да мерење времена и дужина у посматраним системима K и K_1 тако подесимо да брзина светлости и у једном и у другом систему увек буде једнака c . И ту лежи сва тежина Ајнштајнове револуционарне мисли. Дужине у простору и трајања у времену немају, дакле, апсолутни карактер, нису апсолутне величине — као што се у науци до Ајнштајна стално претпостављало — него имају само релативни карактер, т. ј. зависе од стања кретања координатног система у коме се мере. Како треба модификовати методе мерења времена и простора да би се постигао горњи циљ — то је управо предмет Специјалне Теорије Релативитета.

Мерење дужина врши се уопште, као што је познато, помоћу „чврстих“ тела чија дужина, по претпоставци, не зависи од њиховог места у простору, док се за мерење времена служимо сатом (хронометром). Али се под сатом не морају разумети само вештачки механички инструменти којима се обично служимо, него и свака појава која допушта да се утврде разлике у времену (код Миклсоновог експеримента то је био случај са светлосним осцилацијама). У томе смислу, појам сата и појам мерења времена били би идентични.

Ако желимо да одредимо трајање једног догађаја кад на месту догађаја имамо на расположењу сат, треба само да погледамо на сат у моменту кад је догађај почео и у моменту кад се завршио, па ће нам ти податци управо дати дужину трајања посматраног догађаја. Кад имамо, дакле, на расположењу сат на месту дога-

ђаја, онда не постоје никакве принципијелне тешкоће за одређивање трајања тог догађаја. Јер је појам истовремености два догађаја на једном истом месту сам по себи довољно јасан и не захтева никаква дџла објашњења. Али то више није случај, као што ћемо омах видети, кад је реч о догађајима који се дешавају на разним местима. Ако бисмо поставили, на пример, просто питање: како ћемо утврдити да ли се два светлосна сигнала у два разна места A и B јављају истовремено, или не? — дошли бисмо у недоумицу из које ћемо се, тек после мало дубљег размишљања, моћи извући. Јер појам истовремености два догађаја на разним местима никако није сам по себи јасан и одређен, као што је то био случај са појмом истовремености на једном истом месту: појам истовремености два догађаја на разним местима треба тек дефинисати, и то тако да нам та дефиниција да уједно и могућности да ту истовременост можемо експериментално констатовати. Тек тада појам истовремености добија јасан и одређен смисао.

Узмимо један пример. У једном познатом звезданом јату појави се 1. јуна 1920. године једна нова звезда. Очеvidно је, међутим, да се та нова звезда у ствари појавила раније, пре 1. јуна 1920. године, и то управо за толико раније колико је било потребно времена да светлост дође од нове звезде до нас. Сад се пита: кад се у ствари појавила та звезда? Другим речима: који је датум био на земљи кад се звезда у ствари појавила? Ако нам је раздаљина између звезданог јата и земље позната (на пример, у километрима), онда, пошто знамо брзину светлости, можемо лако израчунати време за које светлост пређе ту раздаљину. Рецимо да смо на тај начин израчунали да је светлости требало да путује тачно 20 година да дође од нове звезде до нас. То значи, да се звезда појавила у ствари још 1. јуна 1900. године. Појава нове звезде и 1. јуни 1900. године биле су, дакле, два истовремена догађаја. Као што се види, ми смо до овог закључка могли доћи само захваљујући претпоставци да се светлост креће константном брзином c . И зато можемо рећи да је горњи закључак само онда тачан ако је принцип констанције брзине светлости тачан, јер ће само у том случају време, за које светлост пређе од звезде до земље, бити увек једнако раздаљини између звезде и земље подељеној константном брзином светлости c , без обзира на то да ли звезда и земља учествују при том још у каквом заједничком

кретању или не. Лако је, међутим, увидети да бисмо иначе, без принципа констанције брзине светлости наишли на несавладљиве тешкоће. Претпоставимо да се земља са целим сунчаним системом и њом звездом креће једнаком брзином у правој линији у правцу земља — звезда. У том случају, ми бисмо ишли у сусрет светлосним зрацима који нам долазе са звезде, па би ти зраци зато допирали до земље за краће време: не би им више требало пуних 20 година него нешто мање, и ми бисмо зато појаву нове звезде констатовали тек после 1. јуна 1900. године. Ако бисмо, међутим, претпоставили да се земља са звездом креће у супротном смислу, т. ј. у правцу звезда — земља, тада бисмо се ми удаљавали од зракова који нам долазе са звезде, тако да би зрацима сад требало нешто више од 20 година да стигну до нас. У овом случају, ми бисмо појаву звезде констатовали пре 1. јуна 1900. године. Али, како се, према принципу релативитета, заједничко једнако праволијско кретање земље и звезде уопште не може констатовати, то ми уопште не бисмо били никако у стању да одредимо датум када се нова звезда „у ствари“ појавила. А шта то управо значи? То значи да уопште нема никаквог смисла говорити о истовремености два просторно раздвојена догађаја! Јер је, одиста, са гледишта егзактне науке бесмислица говорити о истовремености просторно раздвојених догађаја све дотле, док ми принципијелно нисмо у стању да ту истовременост експериментално констатујемо.

Као што се види из наведеног примера, без принципа констанције брзине светлости немогуће је уопште констатовати истовременост два догађаја на разним местима. Јер тек кад усвојимо принцип констанције брзине светлости, можемо рећи да је време, које протече од појаве звезде па до њеног опажања на земљи, једнако раздаљини између звезде и земље подељеној константном брзином светлости c , без обзира на то да ли земља и звезда учествују при том још у каквом заједничком кретању или не.

Из свега овога излази да тек принцип констанције брзине светлости даје смисла појму истовремености. Појам истовремености просторно раздвојених догађаја као такав, сам по себи, нема никаквог смисла он није дат а priori: њега дефинише тек принцип констанције брзине светлости. И та би дефиниција у најпростијем облику гласила: за два догађаја на разним местима

A и **B** кажемо да су истовремени кад посматрач, који се налази на подједнаком растојању од **A** и **B**, истовремено опази појаву оба догађаја. Апсолутна истовременост не постоји, јер се уопште не може констатовати: она је једна фикција старе апсолутистичке идеологије, коју је наука одбацила.

Јасно је да горња Ајнштајнова дефиниција истовремености није ограничена само на два догађаја, него се може проширити и на произвољан број догађаја, па ма како места тих догађаја стајала према посматрачу.

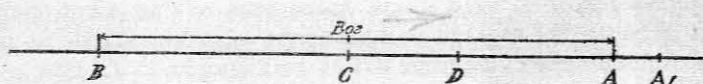
Замислимо сад у местима **A**, **B**, **C**, и т. д. дуж једног насипа потпуно једнаке сатове који су тако дотерани да једнаки положаји њихових казаљака буду истовремени (у смислу горње дефиниције). Тада се под временом појаве једног догађаја разуме податак (положај казаљке) онога сата који се налази на месту догађаја (или у његовој непосредној близини). Тако долазимо до научне дефиниције времена, који нам принципијелно даје могућности да констатујемо време појаве сваког догађаја без разлике. Ова дефиниција времена претпоставља још да „потпуно једнаки сатови“ иду „подједнако брзо“, што је уосталом у пуној сагласности са искуством. Ако су, дакле, сатови, који се налазе у миру на разним местима према утврђеном посматрачу, тако дотерани, да је један положај казаљке једнога сата истовремен (у смислу горње дефиниције) са истим положајем казаљака осталих сатова, онда су једнаки положаји казаљака уопште истовремени.

Вратимо се опет на наш пример воза који се креће у правој линији једнаком брзином. На насипу, у местима **A** и **B**, чија је раздаљина управо једнака дужини воза, налазе се електричне лампе које су тако удешене да се лампа у **A** аутоматски запали у моменту кад почетак воза прође поред ње, а лампа у **B** у моменту кад крај воза прође поред ње. Један посматрач налази се у возу тачно на средини воза, а други на насипу управо на средини између места **A** и **B**. Кад воз прође поред места **A** и **B**, лампе аутоматски засветле, и светлосни зраци који се, као што знамо, крећу константном брзином c , стижу очевидно и из **A** и из **B** истовремено до посматраца на насипу. Посматрач на насипу, дакле, опажа истовремено оба догађаја (појаву светлости у **A** и у **B**), па како су места **A** и **B** подједнако удаљена од њега (што се увек

мерењем може лако констатовати), то ће он, према мало преутврђеној дефиницији, с правом рећи: оба догађаја десила су се истовремено.

А како стоји ствар са посматрачем на средини воза? Кад су лампе засветле, он се несумњиво налазио на средини између њих. Али, како се посматрач у возу креће заједно са возом, са насипа посматрајући, то ће се он у међувремену приближити месту A , тако да ће зраци из A до њега допрети пре него зраци из B , јер он зрацима из A иде у сусрет, а од оних из B се удаљује. Према томе, посматрач у возу ће с правом рећи: оба догађаја нису се десила истовремено.

Потребно је да читаоци о овој ствари мало дубље промисле, јер се управо на овом месту налазимо на раскрсници између Старе и Нове Физике. У духу старе апсолутистичке идеологије могао би неко приметити: посматрач у возу, баш према Ајнштајновој дефиницији истовремености, не би имао права да тврди да се оба догађаја нису десила истовремено, јер се он, кад светлосни зраци допру до њега, не налази више на средини између A и B , док, према Ајнштајновој дефиницији, посматрач може доносити закључке о истовремености или неистовремености само онда ако је подједнако удаљен од догађаја о којима је реч. Примедба изгледа врло озбиљна. Јер, ако би се на пример, на насипу налазио још један посматрач, рецимо у месту B' (сл. 3), које је ближе месту A него B , онда би и он, очевидно, пре опазио светлост у A него у B , али при свем том он не би смео тврдити да се светлост у A и B није појавила истовремено, јер се он не налази на средини између светлосних извора.



Сл. 3.

Међутим, кад посматрач у B' узме у обзир разлику између светлосних путева $A'D$ и $B'D$, онда мора доћи до закључка да су се оба догађаја у ствари десила истовремено. На први поглед изгледа да се и наш посматрач у возу налази у сличном случају као и посматрач у месту B' . И онда би горња примедба била сасвим на свом месту: онда ни посматрач у возу не би

имао права да тврди да се оба догађаја нису десила истовремено. Али се ова аргументација не може одржати. Јер се посматрач у возу несумњиво налазио у моменту кад су лампе засветле управо на средини између њих: и то је главно; у каквом ће положају лампе бити према посматрачу после тога, за питање о коме је реч потпуно је индиферентна ствар. Да би то било још јасније, замислимо да се на почетку и на крају воза налази такође по једна лампа која ће, кад воз буде пролазио поред места A и B , истовремено засветлети са лампама у A и B . Тиме се, очевидно, није у ствари ништа променило у нашем посматраном примеру, само се јасније истакло да се посматрач у возу несумњиво налази на средини између обеју лампа. И кад он и сад опази пре светлост из предње него из задње лампе, значи да он одиста, према нашој дефиницији, има пуно право да каже: оба догађаја нису се десила истовремено.

На тај начин долазимо до значајног закључка: два догађаја, који су за посматрача на насипу истовремени, за посматрача у возу нису истовремени. Како, међутим, према принципу релативитета, посматрач у возу може с правом сматрати да се он налази „у миру“ а да се насип „креће“, то очевидно важи и обрнуто: два догађаја, који су за посматрача у возу истовремени, за посматрача на насипу нису истовремени. Појам истовремености је, као што се види, релативан: он зависи од стања кретања посматрачева. То је суштина става релативитета времена. Егзактно формулисан, он би гласио: сваки координатни систем има своје нарочито време; један временски податак има само онда смисла ако се зна и координатни систем на који се тај податак односи.

Релативирањем појмова времена Ајнштајн је отворио револуцију у науци. До Ајнштајна се веровало да времени податци имају апсолутни карактер: Ајнштајн је тој вековној заблуди учинио крај. Од каквог је замашаја била ова прва револуционарна мисао Ајнштајнова, видеће се из даљег излагања.

Стаavimo сад себи у задатак да измеримо дужину нашег воза који се креће једнаком брзином дуж праволиниског насипа. Ако желимо да дужину воза измеримо са насипа, поступимо овако. Обележићемо најпре на насипу тачке A и B поред којих истовремено прође почетак и крај воза. Кад смо то ура-

дили, onda простим мерењем раздаљине \overline{AB} на насипу добијемо дужину воза, измерену са насипа. Сетимо се сад да су се лампе у нашем малопређашњем примеру управо налазиле у местима A и B поред којих су истовремено — са насипа посматрајући — пролазили почетак и крај воза. Према томе, треба само измерити растојање између ових лампа па добити дужину воза. Нека то растојање износи, на пример, a метара. Тада кажемо да дужина воза, измерена са насипа, износи a метара. Али за посматрача у возу, као што смо видели, појава светлости у A и B није била истовремена. Посматрач у возу опажа пре светлост у A него у B , па затом мора доћи до закључка да је почетак воза пре прошао поред A него крај воза поред B , тј. да је дужина воза већа од раздаљине AB . Јер, да је дужина воза једнака раздаљини AB почетак и крај воза би истовремено прошли поред A и B ; да је, пак дужина воза мања од раздаљине AB онда би крај воза пре прошао поред B него почетак поред A . Дакле: за посматрача у возу дужина воза је већа од a метара одмерених дуж насипа. Да би и за посматрача у возу појава светлости и у предњој и у задњој лампи била истовремена, морала би се предња лампа из A померити мало у правцу кретања воза, на пр до A_1 (сл. 3.). И тада би за посматрача у возу дужина воза била управо једнака раздаљини A_1B . Пошто је, међутим, као што се и из слике види, \overline{AB} мање од $\overline{A_1B}$, то долазимо до значајног закључка: за посматрача са насипа дужина воза је мања него за посматрача у возу. За посматрача у возу раздаљина AB мања је од дужине воза, док је за посматрача са насипа она управо једнака дужини воза. За посматрача који „мирује“ покретни предмети се скраћују, док се за покретног посматрача скраћују предмети који „мирују“. И ма како то изгледало парадоксално, у томе нема никакве контрадикције, само кад се човек ослободи апсолутистичких предрасуда: јер према принципу релативитета и посматрач у возу може с истим правом рећи да он „мирује“, а да се насип „креће“. Појам дужине је, као што се види, релативан: он зависи од стања кретања посматрачева. На тај начин, из става релативитета времена неодољиво проистиче и став релативитета просторних дужина који би се могао овако формулисати: сваки координатни систем има своје нарочите мере за дужину; један податак односно просторних дужина има

само онда смисла ако се зна и координатни систем на који се тај податак односи.

Према томе, питање о „правој“, „стварној“ дужини, на пример, једнога штапа нема никаквог смисла, јер је дужина по своме бићу релативан појам: сваки посматрач може резултат мерења штапа у свом систему с подједнаким правом сматрати као „праву“, „стварну“ дужину штапа, јер су сви координатни системи (који се крећу једнаким праволиним кретањем према основном Галилејевом систему) потпуно равноправни у погледу описивања свих физикалних појава.

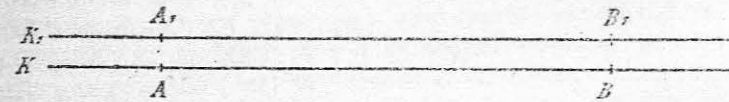
Како је релативирање појмова, времена и дужина оно што је битно, принципијелно ново у науци, потребно је да се смисао ових идеја у потпуности схвати, да би се могла разумети суштина Теорије Релативитета. Ми ћемо се зато још мало задржати на новим методама мерења времена и дужина, да бисмо читаоцима олакшали борбу против „здравог разума“ који се, као талог традиционалних заблуда, буни против нових идеја и отежава њихово схватање. Један од противника Ајнштајнове теорије пише: „Један посматрач налази да су се догађаји у A и B десили истовремено, други напротив да се нису десили истовремено, и по Ајнштајну обојица имају право. Међутим, кад два човека изнесу два супротна тврђења, не могу и један и други имати право.“ Па ипак имају! Јер, прво, горња аргументација претпоставља апсолутно време које је наука одбацила, а сем тога: она не прави уопште разлику између апсолутних и релативних закључака. Кад ја, на пример, кажем да је један воз састављен из 20 вагона, а неко други каже да је тај исти воз састављен из 15 вагона, онда, очевидно, не можемо обојица имати право. И неће имати право онај који не уме да броји. Ако ја нисам тај који не уме да броји, онда мој закључак: да је воз састављен из 20 вагона — има апсолутну вредност и не допушта никакво релативирање. Међутим, ако ја, идући возом из Београда за Лапово, кажем: да се жељезничка станица у Паланци налази на левој страни пруге, а мој пријатељ који путује возом из Лапова за Београд, каже: не, жељезничка станица у Паланци налази се с десне стране пруге — онда ћемо, очевидно, и ја и мој пријатељ имати подједнако право, и ако смо дошли до два супротна закључка који се, на први поглед, узајамно искључују. Јер су појмови „лево“ и „десно“ по својој природи релативни, па зато и закључци који се на њима заснивају имају релативну вредност. Па како је, по Ајнштајну, и истовременост, као што смо показали, релативан по-

јам, који зависи од стања кретања посматрачева, то се горња тврђења о истовремености односно неистовремености догађаја у \mathbb{N} и \mathbb{N}_1 не налазе у ствари ни у каквој логичној контрадикцији, јер та тврђења представљају релативне закључке и имају подједнаку релативну вредност.

Критичари Ајнштајнове теорије видели су логичну контрадикцију и у тврђењу да је, на пример, за посматрача у возу метар у возу (у правцу кретања воза) дужи од метра који (у истом правцу) лежи на насипу; док је за посматрача на насипу обрнуто: метар на насипу дужи од метра у возу. Лако је, међутим, увидети да и у овом случају, баш као и мало пре, привидна контрадикција потиче једино из апсолутистичких заблуда: ако се одбаци вера у апсолутни карактер мера за дужину и води рачуна о разлици између апсолутних и релативних закључака, коју смо мало час истакли, онда не може бити никакве сумње у потпуну логичну и правност горњег тврђења.

За разумевање на први поглед парадоксалних резултата до којих нас доводи ново мерење времена у разним координатним системима, потребно је да се никако не губи из вида ово: прво, једнаки сатови у свима системима иду подједнако брзо, и друго сатови су у сваком систему понаособ дотерани један према другом на основу утврђене дефиниције истовремености, т. ј. њихове казаљке заузимају „у исто време“ исте положаје. За такве сатове каже се да су синхронни. Уочимо сад два координатна система \mathbb{N} и \mathbb{N}_1 који се налазе у релативном једнаком праволинијском кретању (можемо замислити, на пример две дугачке греде које клизе једна поред друге). И један и други систем снабдевен је синхроним сатовима (поређаним, на пример, на извесним растојањима дуж једне и друге греде), т. ј. у сваком систему сатови су дотерани на основу дефиниције истовремености која важи за дотични систем. Како је, међутим, истовременост у разним системима \mathbb{N} и \mathbb{N}_1 различита, то ће, очевидно, и синхронизам сатова у \mathbb{N} и \mathbb{N}_1 бити различит. Како према принципу релативитета можемо систем правом сматрати било \mathbb{N} било \mathbb{N}_1 , да „мирује“, ми ћемо, прегледности ради, претпоставити, на пример, да се \mathbb{N}_1 креће према \mathbb{N} брзином v . Од интереса је сад ово питање: ако посматрачи са \mathbb{N} и \mathbb{N}_1 упоређују своје сатове са сатовима поред којих буду пролазили, до каквих ће резултата доћи? Уочимо у систему \mathbb{N}_1 један сат \mathbb{N}_1 који се налази управо наспрам сата \mathbb{N} у систему \mathbb{N} баш у оном тренутку кад оба сата \mathbb{N} и \mathbb{N}_1 показују тачно 12 сати (Сл. 4.)

Нека се сад и један други сат \mathbb{N}_1 у систему \mathbb{N}_1 налази управо наспрам места B из система \mathbb{K} кад сат у B показује такође 12 сати. Тада ће посматрач у систему \mathbb{K} казати да се A_1 налази наспрам A у исто време (тачно у 12 сати) кад и B_1 наспрам B . Ако се у моменту кад се A_1 налази наспрам A пусти са тог места¹⁾ један светлосни сигнал, онда ће он стићи у B рецимо после 1 секунде и сат у B показиваће, тада, 12 сати и 1 секунду. Сат B_1 , међутим, за то време (за 1 секунду)



Сл. 4.

удаљио се од B за дужину v која је једнака брзини којом се систем \mathbb{K}_1 , по претпоставци, креће у односу на систем \mathbb{K} , па ће се, очевидно, и још нешто мало више удаљити док га светлосни сигнал не стигне. За посматрача у систему \mathbb{K} , према томе, светлосном сигналу је потребно, да би стигао од A_1 до B_1 , више од 1 секунде, јер се B_1 са гледишта посматрача из \mathbb{K} , удаљује од места у коме је пуштен сигнал. То значи: док сатови A_1 и A кад се налазе један наспрам другог, показују исто време као и сат B кад поред њега пролази сат B_1 , сат B_1 у моменту пролаза поред B показује друго време, т. ј. његова казаљка има други положај. Другим речима: док је за посматрача у систему \mathbb{K} пролазак A_1 поред A и пролазак B_1 поред B истовремен, то није случај за посматрача у систему \mathbb{K}_1 .

Све ово потиче, као што је лако увидети, отуда што су сатови у системима \mathbb{K} и \mathbb{K}_1 различито дотерани: системи \mathbb{K} и \mathbb{K}_1 имају сваки своје време, они употребљавају различите сатове, па зато није никакво чудо што и за дужину трајања једног догађаја и за истовременост два догађаја у тако различитим системима добијамо различите вредности.

Сад ће тек бити потпуно јасно и то, зашто је избио конфликт између принципа релативитета и принципа констанције брзине светлости. Посматрајући, у почетку овог одељка, брзину светлости у системима \mathbb{K} и \mathbb{K}_1 , ми смо за ту брзину

¹⁾ Према принципу констанције брзине светлости сасвим је свеједно да ли ће се сигнал пусти из места A или из места A_1 .

добили различите вредности зато, што смо, у духу апсолутистичке идеологије, и време и просторне дужине у оба система мерили и стим мерама. И то је грешка која неминовно доводи до сукоба горња два принципа. Сад, међутим, знамо да дистанције и у времену и у простору немају апсолутни него релативни карактер: да зависе од стања кретања координатног система у коме се посматрају. Сваки координатни систем има свој специфични систем мера за време и дужине. И тај систем мера је управо тако подешен да брзина светлости у сваком координатном систему има једну исту константну вредност c . Ми смо раније у системима K и K_1 добијали за брзину светлости различите вредности јер смо у оба система употребљавали исте мере; данас ми у систему K и у систему K_1 добијамо за брзину светлости исту вредност, јер употребљавамо различите мере.

Тако је Ајнштајн решио сукоб између принципа релативитета и принципа констанције брзине светлости.

IV

Веза између простора и времена. — Лоренцове једначине. — Конзеквенције Лоренцових једначина. — Бројни податци. — Најважније физикалне конзеквенције Специјалне Теорије Релативитета. — Специјална Теорија Релативитета и искуство. — Минковски-ев „свет“. — Унија простора и времена — Суштина Специјалне Теорије Релативитета. —

Као што је пажљивији читалац могао запазити, у преврату који је Ајнштајн извршио у схватању фундаменталних појмова физикалног сазнања, главну улогу играо је принцип констанције брзине светлости. Кад је Класична Механика са својим апсолутистичким схватањем времена и простора довела до неразрешљивог сукоба принцип релативитета и принцип констанције брзине светлости, Ајнштајн је имао смелости да каже: принцип релативитета и принцип констанције брзине светлости су тачни, јер су потврђени искуством и доказани експериментално; зато се мора подврћи радикалној ревизији традиционално схватање простора и времена: наше представе о времену и простору морају се тако модифицирати да брзина светлости буде увек једнака c , па ма у коме систему, који се према основном

Галилејевом креће једнаком брзином и у правој линији, била мерена.

На тај начин, принцип констанције брзине светлости не изражава само једну чињеницу искуства, једну особину светлости: он принципијелно дефинише везу између простора и времена. И та веза мора бити управо таква да нестане сукоба између принципа релативитета и принципа констанције брзине светлости. То је основна мисао Специјалне Теорије Релативитета, која је поникла из горњег сукоба и саграђена на темељу горња два принципа. Јер оно чиме се Специјална Теорија Релативитета битно разликује од Класичне Механике, то није специјални принцип релативитета (јер он подједнако важи и у Класичној Механици као и у Специјалној Теорији Релативитета), него је то улога коју у Специјалној Теорији Релативитета игра принцип констанције брзине светлости.

Узевши за основу својега испитивања коегзистенцију принципа релативитета и принципа констанције брзине светлости, Ајнштајн је нашао једначине у којима је, квантитативно, изражена веза између простора и времена. У част холндског физичара Лоренца, Ајнштајн је те једначине назвао Лоренцове једначине. До Ајнштајна, у науци се сматрало да су просторни и временски подаци потпуно самостални и једни од других независни. И епохални значај Лоренцових једначина лежи управо у томе што оне јасно истичу на видик узјамну зависност просторних и временских података. Лоренцове једначине су математичка подлога Теорије Релативитета: оне су камен темељац Нове Механике и извор Нове Физике. Њихов ужи смисао је, међутим, овај: кад нам је познато место и време једног догађаја у координатном систему K , онда нам Лоренцове једначине непосредно дају могућности да тај исти догађај фиксирамо и у односу на координатни систем K_1 који се према оном првом креће праволијски константном брзином¹⁾

¹⁾ Математичким језиком рекли бисмо: ако x, y, z и t означавају координате места и времена у коме се десило један догађај у односу на систем K , а x_1, y_1, z_1 и t_1 одговарајуће координате тог истог догађаја у односу на систем K_1 који се према оном првом креће једнаком брзином v у правој линији, онда Лоренцове једначине гласе:

Из Лоренцових једначина проистичу непосредно ови резултати, у пуној сагласности са квалитативним испитивањима из прошлог одељка.

Један штап дужине l , који се налази у миру у односу на систем K , креће се у правцу своје дужине са читавим системом K_1 брзином v у односу на систем K . Тада се дужина штапа, посматрана из система K , скраћује и износи $l \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$. Покретни штап се, дакле, утолико више скраћује уколико је већа брзина којом се креће. Ако би се штап кретао брзином светлости, ако би, дакле, било $v = c$, онда би се његова дужина свела на нулу, јер би у том случају било $\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} = 0$. А ако би брзина штапа била већа од брзине светлости, онда бисмо за дужину штапа добили имагинарну вредност, т. ј. једну физикалну бесмислицу. Отуда закључујемо да Специјална Теорија Релативитета искључује брзине које би биле веће од брзине светлости. Ниједно тело не може ни достићи а камо ли превазићи брзину светлости. Брзина светлости игра, према томе, у Специјалној Теорији Релативитета улогу граничне, недостижне, „бескрајно велике“ брзине.¹⁾

Како се, међутим, према принципу релативитета, може с правом сматрати да систем K_1 „мирује“ а да се систем K „креће“ брзином v у односу на K_1 , то из Лоренцових једначина излази да се штап и у систему K , посматран из система K_1 , такође скраћује и износи управо $l \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$. Тако

$$x_1 = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, \quad y_1 = y, \quad z_1 = z, \quad t_1 = \frac{t - \frac{v}{c^2}x}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

где c означава константну брзину светлости.

Лоренцове једначине су аналогон т. зв. Галилејевих једначина Класичне Механике које гласе

$$x_1 = x - vt, \quad y_1 = y, \quad z_1 = z, \quad t_1 = t$$

и које се добијају као специјалан случај Лоренцових једначина, ако се стави да је c бескрајно велико.

¹⁾ И одиста, у Физици се не зна за брзине које би биле веће од брзине светлости.

бисмо могли рећи да се и штап који се „не креће“ посматран из покретног система, скраћује. Овај резултат није ни у каквој контрадикцији са малопређашњим, ма како то на први поглед изгледало, јер су, према принципу релативитета, координатни системи K и K_1 потпуно равноправни: ниједан од њих не може имати никакво преимућство над оним другим, нити се може ма у чему разликовати од оног другог у погледу описивања физикалних појава.

Ако бисмо сад хтели да поредимо сатове система K_1 са сатовима система K , онда бисмо, према Лоренцовим једначинама дошли до ових резултата. Ако дужина трајања једног догађаја у систему K_1 (који се са свима својим сатовима креће праволинијски брзином v у односу на систем K) износи, на пример t_1 , Лоренцове једначине показују да ће дужина трајања тог истог догађаја, посматрана из система K , бити већи и износиће $\frac{t_1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$. Покретни сатови, дакле, иду

утолико спорије уколико је већа брзина којом се крећу. Како се, међутим, према принципу релативитета, систем K_1 са свима својим сатовима може сматрати да „мирује“ а да се систем K са својим сатовима „креће“, то из Лоренцових једначина излази такође да и сатови који „мирују“, у поређењу са покретним сатовима иду спорије. Ма како на први поглед изгледало да се ови последњи резултати узајамно искључују, они нису у ствари ни у каквој контрадикцији, јер се, као што смо у једној сличној прилици још у прошлом одељку приметили, искази о времену у оба случаја односе на разне сатове, на сатове који су различити дотерани (на основу дефиниције истовремености која је, као што смо видели, у разним системима различита). Кад се то има у виду, овда ће бити схватљивија и она одиста парадоксална конзеквенција Лоренцових једначина, по којој се и ток догађаја може изврнути, тако да догађаји за једног посматрача теку једним редом а за другога посматрача сасвим обрнутим редом. Тако би могла дејства претходити узроцима!

Лоренцове једначине дају нам могућности да добијемо јасну представу и о величини диференције које проистичу кад се просторне и времене дистанције мере у разним системима.

Као што ће се видети, те диференције су за све појаве обичне Механике немерљиво мале. Нека се наш воз, који смо већ толико пута узимали за пример, креће брзином од 103 километара на сат, то значи: 30 метара у секунди; и нека његова дужина, измерена у њему самом, буде 150 метара. Видели смо раније да ће лампе у местима **A** и **B** за посматрача на насипу засветлети истовремено (кад почетак односно крај воза прође поред њих), а да то неће бити случај за посматрача у возу који ће пре опазити светлост у **A** него у **B**. Та разлика у времену између појаве у **A** и појаве светлости у **B** износи 0,000 000 000 000 05 секунде, а то је величина која се, средствима данашње технике мерења, ни на који начин не може констатовати. Исто тако смо раније видели да је дистанција између **A** и **B** управо једнака дужини воза за посматрача на насипу, док је она за посматрача у возу мања од дужине воза. Прост рачун нам тада показује да дужина воза за посматрача на насипу неће више бити 150 метара него $149,999\,999\,999\,999\,75$ метара. Воз би се у том случају скратио од прилике за један двестотинити део пречника једнога атома! Да је брзина воза мања, онда би ове диференције биле још мање. Као што се види, за све брзине које могу уопште доћи у обзир кад је реч о нашем непосредном искуству, диференције које проистичу услед мерења просторних и временских дистанција у разним системима толико су мале да се не би могле констатовати ни кад би наци инструменти за мерење били милијарду пута тачнији но што су и најфинији којима данас располажемо. Отуда долази да се просторни и временски подаци могу одиста у свакодневној пракси сматрати као да имају апсолутну вредност. Сад нам може бити јасно и то, зашто резултати Класичне Механике показују онако импозантно слагање са искуством, и ако је њено схватање основних појмова нашега сазнања, као што смо видели, принципијелно нетачно. Теорија Релативитета је срушила идеолошку основу Класичне Механике, али је потврдила све њене позитивне резултате. И то је за научну афирмацију Теорије Релативитета од капиталног значаја.

Да илуструјемо цифрама још само један интересантан резултат. За два догађаја који се дешавају на земљи у разним местима и у разним временима, извесан посматрач који се креће у односу на земљу може констатовати да се дешавају истовремено, што логички проистиче из става релативитета

времена. Али то не треба схватити у том смислу као да се увек може замислити један посматрач који ће се тако кретати у односу на земљу да за њега свака два догађаја на земљи, без обзира на њихову просторну и времену дистанцију, могу бити истовремени. Ако се један догађај деси, на пример, данас у Београду а сутра у Москви, могло би се помислити да би и та два догађаја за неког посматрача, који би се кретао у односу на земљу, могли бити истовремени. То је, међутим, немогуће. Јер два догађаја на земљи, који се један за другим дешавају у местима чија је раздаљина, на пример, 1000 километара, могу, према теорији, за једног посматрача који се врло великом брзином креће у односу на земљу бити само онда истовремени, ако је размак времена у коме се они дешавају на земљи мањи или највише једнак ономе времену које је потребно да светлост стигне од једног места до другог. То значи: ако би просторна раздаљина та два догађаја износила у правој линији (апстрахујући кривину земљину) 1000 километара, онда би се ти догађаји морали десити највише у размаку од $\frac{1}{300}$ секунде да би их посматрач који се креће брзином светлости (300.000 километара у секунди) видео истовремено. Ако би, међутим, временски размак између оба догађаја био у пола мањи, т. ј. $\frac{1}{600}$ секунде, онда би ти догађаји били истовремени за посматрача који би се кретао са упола мањом брзином од брзине светлости, док би посматрач који се креће брзином светлости видео те догађаје обрнутим редом.

Као што се види из свих наведених примера, бројни подаци су такви да се практично не могу контролисати. И кад бисмо ми били упућени само на Механику малих брзина, не бисмо уопште били у стању да проверимо горње интересантне конзеквенције које са математичком нужношћу и тачношћу проистичу из Лоренцових једначина. На тај начин, фундаментално питање Теорије Релативитета: питање о релативитету просторних и временских раздаљина не би у опште могло изаћи изван оквира хипотеза у пространој области Теорије Сазнања. Али се у природи налазе мала тела што се крећу огромним брзинама које се приближују брзини светлости. И проучавање кретања тих малих тела, која се крећу тако великим брзинама, у потпуности је потврдило све резултате Теорије

Релативитета. Тако су, на пример, проучени такозвани α — зраци радиумови за које је доказано да нису ништа друго него наелектризирани атоми хелниумови; исто тако и β — зраци радиоактивних супстанца који се састоје из електрона што их огромном брзином избацију поједини атоми ових супстанца. Наука је била у стању да измери брзине ових малих тела и нашла је да се и највеће међу њима истина приближују брзини светлости, али стално остају испод ове, што је у пуној сагласности са Теоријом Релативитета, по којој у природи не може бити већих брзина од брзине светлости.

Закони Класичне Механике, које је искуство тако сјајно потврдило, издају кад су у питању тако велике брзине које се приближују брзини светлости. Специјална Теорија Релативитета, међутим, која је проистекла из Оптике и Електродинамике, даје могућности и да се проуче и да се предвиде многе појаве у којима долазе до израза тако велике брзине. У случају малих брзина, закони Специјалне Теорије Релативитета своде се у пракси на законе Класичне Механике тако да се Класична Механика може сматрати као специјалан случај Теорије Релативитета.

Као најважнију физикалну консеквенцију Специјалне Теорије Релативитета Ајнштајн истиче ону што се односи на појам масе. По Њутну је маса, као што је познато, једнака количнику између силе и убрзања; она је за једно дато тело потпуно одређена, константна величина која не зависи од стања кретања дотичног тела. Да бисмо једном телу, на пример, дали убрзање од 10 метара, т. ј. да бисмо повећали његову брзину за 10 метара, ми бисмо морали, у духу Класичне Механике, употребити исту силу било да хоћемо ту брзину да повећамо од 100 метара на 110 мет. у секунди или, рецимо, од 100.000.000 метара на 100.000.010 метара у секунди. То је логична последица старог схватања по коме је маса једног тела непроменљива, константна количина. Специјална Теорија Релативитета раскрстила је, међутим, и са овим апсолутистичким схватањем појма масе. У духу новог схватања, никако није свеједно да ли се брзина једног тела повећава од 100 на 110 метара или од 100.000.000 на 100.000.010 метара. У овом другом случају, као што нам донекле и сам осећај каже, мораће се употребити већа сила него у оном првом. Другим речима: у духу Специјалне Теорије Релативитета маса једног тела није

константна него зависи од стања кретања тога тела: она расте са брзином тела. Класична Механика није могла да открије ову зависност већ и због тога, што је промена масе, при брзинама којима обично оперише Класична Механика, немерљиво мала: маса једног воза, на пример, од 200 тона тежине у миру, повећава се једва за један стотилјадити део грама кад се воз креће брзином од 100 километара на сат. Али су те промене у толико веће у колико се брзина тела повећава, тако да би маса сваког тела постала, према теорији, бескрајно велика, чим би његова брзина достигла брзину светлости. И ту управо и лежи физикални разлог недостижности брзине светлости. Најновија експериментална испитивања (нарочито са β — зрацима радиумових препарата) потпуно су потврдила горња теориска предвиђања.

Из Специјалне Теорије Релативитета излази даље да је прираштај масе пропорционалан прираштају кинетичке енергије (енергије кретања). Али је Ајнштајн показао да свако повећање енергије (не само кинетичке) изазива прираштај масе. Тако, на пример, ако топлотну енергију једног тела повећамо, сразмерно ће се повећати и његова маса.¹⁾ Маса једног тела може се, према томе, сматрати као мера за његову енергију, тако да се, при погодно изабраним јединицама, може рећи да сваком повећању енергије одговара исто толико повећање масе. На основу тога може се закључити — и то би била једна од највећих тековина Специјалне Теорије Релативитета — да је маса једног тела управо једнака енергији која је у њему садржана. Маса би се на тај начин идентификовала са енергијом, постала би нека врста концентрисане енергије. У томе смислу може се говорити, на пример, не само о инерцији него и о тежини енергије. И док су раније у Физички постојала два сасвим одвојена и независна општа природна закона: закон одржања масе и закон одржања енергије, Ајнштајн је ова два закона спојио у једно. Пошто је маса у Специјалној Теорији Релативитета изгубила своју самосталност, престао је и закон одржања масе

¹⁾ Ако прираштај енергије износи E , одговарајући прираштај масе биће $\frac{E}{c^2}$, где c означава брзину светлости. Како c^2 , у обичним физикалним јединицама, износи 900 трилиона, јасно је зашто је прираштај масе у обичним приликама немерљиво мали.

да важи као засебан закон. Модерна Физика зна само за један општи природни закон одржања: то је закон одржања енергије, у коме је већ садржан ранији закон одржања масе. Закон одржања масе нема, према томе, карактер једног општег природног закона, него карактер једног апроксимативног закона, закона који само приближно важи. Али се закон одржања масе при свем том могао тако дуго држати у науци као самосталан закон поглавито зато, што су сва повећања енергије, која се могу експерименталним путем извести, немерљиво мала према огромном резервоару енергије која је у сваком телу у виду његове масе садржана, тако да се промене масе нису могле експериментално констатовати.

Енергија (E) која је садржана у телу масе m једнака је, у духу нове теорије, производу из масе (m) и квадрата брзине светлости (c^2): $E = mc^2$. Како c^2 износи, у уобичајеним физикалним јединицама, 900 трилиона, то унутарња енергија сваког тела представља једну огромну вредност. И тај резултат је сасвим у складу са најновијим испитивањима која су открила неизмерно богатство енергије нагомилане у унутрашњости атома.¹⁾ Али, као што радиоактивне појаве показују, та огромна енергија ослобађа се сама по себи врло споро, а науци до сад још није пошло за руком да тај процес убрза и искористи.

У току целокупног досадашњег излагања ми смо већ имали прилике да истакнемо пуну сагласност Специјалне Теорије Релативитета са искуством. Томе бисмо, на овом месту, могли додати још само неколико напомена. Како је Специјална Теорија Релативитета искристалисала из Мексвел-Лоренцове теорије електромагнетских појава, то све чињенице које су у науци обезбедиле триумф Мексвел-Лоренцове теорије, говоре и у прилог Специјалне Теорије Релативитета. Ослободивши Мексвел-Лоренцову теорију извесних вештачких хипотеза, које нису имале никаквог електродинамичког оправдања, Ајнштајн је упросто и усавршио и саму теорију електромагнетских појава.

Као и свима осталим општим законима Класичне Механике, Специјална Теорија Релативитета одузела је и класичном ставу о слагању брзина апсолутну вредност. Ајнштајн је извео

¹⁾ Један саксонски професор израчунао је да се у једној обичној цигли налази толико нагомилане унутрашње енергије да би она, кад би се могла у виду какве експлозије ослободити, била довољна да целу Саксонску са земљиним слојем од метра дебљине — дигне у ваздух на читав километар висине!

нову општију формулу за слагање брзина, која стару Галилејеву формулу обухвата као специјални случај. Искуство, које је у крајњој линији имало да одлучи између Галилејеве и Ајнштајнове формуле, одлучило је у корист Ајнштајнову. Од пресудног значаја у овом погледу био је чувени експеримент француског физичара Физо-а који је 1851. године, испитујући брзину светлости кроз течности које се крећу, дошао до резултата које стара теорија није била у стању да објасни. Међутим, овај експеримент, иако изведен више од пола века пре појаве првог фундаменталног Ајнштајновог дела, у пуној је сагласности са Специјалном Теоријом Релативитета и данас се сматра као један од најјачих аргумената у корист Ајнштајнове теорије.

Специјална Теорија Релативитета потпуно објашњава и познату појаву аберације (привидно годишње кретање звезда стајачица услед земљиног кретања око сунца), као и Доплеров принцип, по коме боја светлости зависи од релативног кретања светлосног извора према посматрачу.

Напомињемо да су за све ове појаве постојала и раније разна објашњења, али су та објашњења махом заснивана на сасвим произвољним хипотезама (каткад постављаним *ad hoc*), које су често биле и у контрадикцији једна с другом. Специјална Теорија Релативитета, међутим, у стању је да објасни све те појаве са једног гледишта, не уводећи никакве нове хипотезе — и у томе лежи њена велика научна вредност и несумњиво филозофско преимућство над ранијим посматрањем ствари.

Најзад, да при крају овог одељка учинимо још једну напомену. Математичар Минковски дао је 1908. године Специјалној Теорији Релативитета једну интересантну и значајну математичку форму која је управо и омогућила њен даљи развитак и њену победу. Његова основна идеја била је ова. Како је за фиксирање једног догађаја, који се у извесно време догодило на извесном месту у једном одређеном координатном систему, потребно четири податка: три просторне координате x , y и z тачке у којој се догађај збио и време t кад се догађај збио — то је свет физикалног збивања уопште четвородимензионалан у просторно-временом смислу. Кад кажемо да је свет физикалног збивања, који је Минковски назвао просто свет, четвородимензионалан, ми тиме хоћемо да истакнемо само то, да се тај свет састоји из појединачних догађаја

за чије је фиксирање потребно четири податка: три просторне и једна времена координата. Специјална Теорија Релативитета одузела је времену, као што смо видели, ранију самосталност и независност од положаја и стања кретања координатног система. Минковски је у једном значајном предавању на конгресу природњака (1908. године) изрекао ову интересантну фигуру: „Од сада, простор као такав и време као такво постају управо сенке и само једна врста њихове уније задржава самосталност.“ И Минковски-ев свет није управо ништа друго него та унија између простора и времена. Четири координате, које фиксирају један догађај у свету, немају самосталан, апсолутни карактер: оне су само четири равноправне димензије, четири равноправне компоненте горе поменуте уније, т.ј. једног појма који обухвата уједно и простор и време. И управо на основу те формалне равноправности просторних координата са временом, Минковски-у је и пошло за руком да Специјалној Теорији Релативитета да једну тако елегантну и савршено хармоничну математичку форму, какву пре тога скоро ни једна физикална теорија није имала. У једначинама које изражавају опште природне законе, време игра потпуно исту улогу као и остале три просторне координате, тако да се Минковски-ев свет може сматрати као четвородимензионални аналогон обичног тродимензионалног Еуклидовога простора с којим једино има посла класична Физика и класична Геометрија.

Суштина Специјалне Теорије Релативитета могла би се сада, математичким језиком овако формулисати: једначине свих општих природних закона морају имати такву форму која се неће променити при прелазу из координатног система K у координатни систем K_1 , ако су координате система $K(x, y, z, t)$ и координате система $K_1(x_1, y_1, z_1, t_1)$ везане Лоренцовим једначинама.¹⁾ Другим речима: општи природни закони су инвариантни (непроменљиви) према Лоренцовим једначинама.

Као што се види Специјална Теорија Релативитета поставља извесне математичке услове општим природним зако-

¹⁾ Лоренцове једначине, као што смо видели, управо казују како се из система K прелази у систем K_1 и обрнуто. Оне решавају, како се то у Математици каже, проблем трансформације координата посматраних система, па се зато најчешће и зову Лоренцове трансформације.

нима, она формулише један математички критеријум за опште природне законе. Закони Класичне Механике, на пример, не одговарају постављеним условима: они нису инвариантни према Лоренцовим једначинама.¹⁾ То значи, у духу Специјалне Теорије Релативитета, да закони Класичне Механике не представљају опште природне законе. Пошавши, међутим, од математичких услова које Специјална Теорија Релативитета поставља општим природним законима, Минковски је поставио основе Нове Релативистичке Механике, која је Стару, Апсолутистичку Класичну Механику деградирала на један специјални случај, и која је Ајнштајну послужила као база за нове научне подвиге који ће још више задивити свет него сви досадашњи.

¹⁾ Закони Класичне Механике инвариантни су према Галилејевим једначинама, које се могу сматрати као специјалан случај Лоренцових једначина, као што смо једном приликом већ напоменули.

ДРУГИ ДЕО

Општа Теорија Релативитета

V

Рестрикција Специјалне Теорије Релативитета. — Абсоlutни карактер неједнаког кретања? — Ротационо кретање. — Потреба генерализације специјалног принципа релативитета. — Став једнакости инертне и тешке масе. — Принцип еквиваленције. — Општи принцип релативитета. — Општи проблем гравитације.

За разумевање даљег излагања потребно је да се никако не губе из вида ове две ствари. Прво: Специјална Теорија Релативитета утврдила је потпуну физикалну равноправност свих Галилејевих координатних система, који се налазе у релативном праволиниском и једнаком кретању; другим речима: у Специјалној Теорији Релативитета важи само специјални принцип релативитета. И друго: Специјална Теорија Релативитета предпоставља да у области њеног важења нема гравитације (теже); она потпуно апстрахује дејства гравитације. Специјална Теорија Релативитета важи, дакле, само под тим двама рестрикцијама.

Док се једнако праволиниско кретање једног система не може, као што смо видели, ни на који начин, никаквим експериментима у томе самом систему констатовати, то није више случај са неједнаким кретањем. Док путници у возу који би се кретао праволиниски једнаком брзином не би никако били у стању да констатују кретање воза, дотле се свака промена кретања воза рефлектује на однос свих материјалних тела у возу па и путника према возу, тако да се свака промена кретања може лако констатовати. Кад се воз, на пример, зауставља — то је случај неједнаког кретања — путници осећају, услед инерције, један потисак у правцу кре-

тања воза, и већ по томе могу констатовати неједнако кретање. Неједнако кретање система може се, дакле, констатовати у самом систему (независно од спољњег света) по силама инерције које се манифестују при таквом кретању. Отуда би се, и у духу Класичне Механике и у духу Специјалне Теорије Релативитета, могло закључити да неједнака кретања имају апсолутни карактер, т. ј. да се у случају неједнаког кретања има посла не са релативним убрзањима (убрзањима једног тела према другом) него са апсолутним убрзањима. То значи ово: и кад на свету не би постојало ништа више сем нашега воза, и онда би се свака промена кретања воза могла констатовати; другим речима: за констатовање неједнаког кретања воза није потребно да постоји у свету ништа на што би се то кретање односило, јер се то кретање само по себи може констатовати по силама инерције које га прате и које се сматрају као његова битна, иманетна карактеристика.

Да бисмо што боље расветлили ову важну ствар, узмемо још један пример. Као што је познато, Њутн је чврсто веровао у апсолутни карактер ротационог кретања, које се може сматрати као један специјалан случај неједнаког кретања. При ротационом кретању јављају се специфичне силе инерције, познате под именом центрифугалних сила, и појава тих сила била је за Њутна главни доказ да ротационо кретање има апсолутни карактер. Центрифугалне силе које прате, на пример, земљину ротацију, Њутн је сматрао као доказ за апсолутну егзистенцију земљине ротације. Те центрифугалне силе могу се и експериментално констатовати, а њихово дејство се огледа, поред осталог, и у спљоштености земље. И та факта су била за Њутна довољна да закључи да се земља „стварно“ окреће око сунца и да је свака друга интерпретација нетачна. Као што смо већ раније поменули, Мах је био први који је Њутнову аргументацију обеснажио. Мах вели: „Уочимо сну тачку на коју се Њутн, изгледа, с пуним правом ослања приликом разликовања релативног и апсолутног кретања. Ако земља изводи око своје осовине апсолутну ротацију, онда се појављују на њој центрифугалне силе, наступа спљоштеност, гравитационо убрзање на екватору се смањује, раван Фукол-овог клатна се обрће, и т. д. Све ове појаве ишчезавају ако земља мирује а остала небеска тела се апсолутно око ње окрећу, тако да настаје иста релативна ротација. И тако је, на сваки начин, кад се унапред пође од представе апсолутног простора. Али, ако се остане на терену чињеница, онда се зна само за

релативне просторе и кретања. Кретања у светском систему релативна су и по Птолемејевом и по Коперниковом схватању. Оба схватања су подједнако исправна, само је последње простије и практичније. Светски систем није нам дат два пута: једном са мирујућом а други пут са ротирајућом земљом, него само једнапут са својим релативним кретањима која се једно могу опазити. Ми, дакле, не можемо казати како би било кад земља не би ротирала. Али се механички закони могу тако схватити да се и при релативним ротацијама јављају центрифугалне силе“.

Тако је Мах пољуљао из основа веру у апсолутни карактер ротационог кретања, али његови аргументи нису још имали пуну доказну снагу, јер им је недостајала емпирска подлога. Да би се остварио програм који је Мах поставио последњом реченицом горњег цитата, требало је, као што ћемо видети, раскрстити и са Њутновим појмом апсолутног убрзања и са Њутновом теоријом гравитације; другим речима: ваљало је извести још један преврат у науци: и њега је одиста извео још једном, Ајнштајн.

Ајнштајн се није задовољио тековинама Специјалне Теорије Релативитета. Његов филозофски дух морила је мисао: Зашто баш Галилејеви системи да имају преимућство над свима осталима? И зашто само једнака праволинска кретања да имају релативни карактер? Ајнштајнов револуционарни дух бунео се и против тих привилегија које су још остале у пуној снази и у Специјалној Теорији Релативитета. Тежећи за проширењем, за генерализацијом резултата Специјалне Теорије Релативитета, Ајнштајн је покушао најпре да општи принцип релативитета овако формулише: сви координатни системи без разлике ма у каквом се стању кретања налазили, потпуно су равноправни за описивање природних појава, т. ј. за формулисање општих природних закона. Показало се, међутим као што ће се доцније видети, да се општи принцип релативитета у овом облику не може одржати.

Али није само овај филозофски аргуменат говорио у прилог проширења специјалног принципа релативитета. Јер, ма како аргуменат те врсте био јак, он никад није довољан за постављање једне физикалне теорије, која увек мора имати емпирску базу. И Ајнштајн је ускоро нашао ту материјалну базу. Још је Галилеј на основу посматрања поставио закон да сва тела падају, у безваздушном простору, на земљу подјед-

нако брзо. И ова већ тако давно позната емпирска чињеница била је од фундаменталног значаја за Општу Теорију Релативитета. Познато је да се маса једног тела обично мери вагом: констаује се сила којом земља привлачи ту масу. Резултат оваквог мерења назива се тешка маса тела, за разлику од инертне масе тела која представља отпор што га тело даје свзком убрзању, и која је, по Њутну, једнака количнику између силе и убрзања. Из искуства се, међутим, зна да је за сва тела без разлике инертна маса увек пропорционална тешкој маси: ако је једно тело двапут инертније од другог тела, онда је оно и двапут теже од овог другог. Како тела, која се крећу под искључивим дејством гравитације, добијају убрзање које ниуколико не зависи ни од материјала ни од стања кретања тела, то однос тешке према инертној маси мора бити за сва тела исти¹⁾. А како се тај однос, при погодном изабраним јединицама, може свести на јединицу, то се може рећи: тешка и инертна маса једног тела једнаке су међу собом. Овај изказ Ајнштајн је назвао став једнакости интерне и тешке масе, и тај став је послужио као материјална база за проширење специјалног принципа релативитета. Физикални смисао овог значајног става Ајнштајн је истакао на видик врло успешно на овај начин.

Замислимо у празном простору без гравитације („Галилејев простор“) једну собу у којој се са свима потребним апаратима налази један физичар. Пошто у соби нема гравитације, то би свако тело, кад се пусти из руке, остало, услед инерције стално лебдећи на истом месту. На средини крова налази се међутим, једна кука са привезаним ужетом. Ако би сад неко почео константном силом вући за уже навише, онда би се соба са физичаром, по законима Механике, почела кретати једнакоубрзаним кретањем у правцу дејства силе. Брзина собе би стално и безгранично расла са временом — ако би се то кретање посматрало из какве друге собе која би се од оне прве разликовала по томе што је нико неби вукао навише. Ако се сад запитамо: како ће се цела ова појава рефлектовати на нашег физичара у соби, како ће он ту појаву моћи протумачити? — долазимо до ових резултата. Пре свега, убрзање собе преноси се очевидно са пода собе и на физичара, тако

¹⁾ Овај резултат је потврђен и низом експеримената које је са импозантном тачношћу од 0,000 01% навео мађарски физичар Eötvös.

да се он томе потиску мора ногама одупрети, да не би пао. Наш физичар би се тада осећао у соби управо онако као и у ма којој соби у каквој кући на земљи. Ако би сад пустио, на пример, из руке какво тело, оно ће се, пошто се на њега не преноси убрзање собе, једнако убрзаним кретањем приближавати полу. И то убрзање ће увек бити исто па ма с каквим телом се вршили експерименти. На основу тога искуства, физичар ће закључити да је у соби завладало поље гравитације и да сва тела у соби падају несумњиво под утицајем гравитације, само ће се зачудити како је могуће да и цела његова соба под утицајем гравитације не пада. Али кад опази куку на крову са затегнутим ужетом, онда ће му ствар бити потпуно јасна: његова соба је обешена у пољу гравитације, и зато не пада. Ми знамо, међутим, да се соба са физичаром креће „у ствари“ једнако-убрзаним кретањем „навише“ у простору без гравитације. И сва тела, која он пусти из руке, лебде „у ствари“ на месту на коме су пуштена, као што то захтева принцип инерције. „Падање“ тела само је „привидно“ и објашњава се управо њиховом инерцијом. Али је при свем том физичар несумњиво у стању да све појаве у соби потпуно објасни и на тај начин ако претпостави да се његова соба уопште не креће него се мирно налази у пољу гравитације, под чијим би се утицајем тела у соби кретала једнако убрзаним кретањем „даниже“. На основу искуства у соби физичар не може, дакле, закључити да се његова соба „стварно“ креће јер се сви експерименти у соби могу с истим правом протумачити и на други начин: да се соба не креће него се налази у пољу гравитације.

Да би се смисао целе све значајне ствари што боље схватио, навешћемо још један Ајнштајнов пример. Нека наш физичар обеси о плафон собе једно уже за чији је доњи слободни крај привезано једно тело. Уже ће се тада налазити у затегнутом стању и заузеће „вертикални“ положај. Шта је узрок тој затегнутости? Физичар ће овако резоновати: на обешено тело, које је изложено утицају гравитације, делује „даниже“ једна сила и затегнутост ужета је управо противсила која са оном првом одржава равнотежу; као мера затегнутости ужета служи тешка маса обешеног тела. С друге стране, међутим, посматрач који би се налазио ван собе у сло-

бодном Галилејевом простору резоноват би овако: пошто је уже привезано за плафон, то и оно учествује у убрзаном кретању „навише“ целе собе, па то кретање преноси и на тело, које је о доњи крај обешено; затегнутост ужета је управо толика да може изазвати одговарајуће убрзање обешеног тела. Као мера затегнутости ужета служи у овом случају инертна маса обешеног тела. Као што се из овог примера види, став једнакости инертне и тешке масе проистиче нужним начином из проширеног принципа релативитета чији смисао је довољно јасно изражен у самом последњем примеру. Став једнакости инертне и тешке масе добија, на горњи начин, јасну физикалну интерпретацију.

Из целокупног последњег посматрања излази да се између инерцијалних и гравитационих сила не може правити никаква принципијелна разлика. Физичар у соби може све појаве тумачити и дејством инерције и дејством гравитације; он може с подједнаким правом рећи: „соба се креће једнако-убрзаним кретањем навише“ или: „соба се налази у миру у пољу гравитације“. И равноправност оваквог схватања Ајнштајн је назвао принцип еквиваленције. Принцип еквиваленције, који логички проистиче из става једнакости инертне и тешке масе, у нашем конкретном случају значи: да се ни на који начин, принципијелно, не може одлучити да ли се соба налази у миру у пољу гравитације или се креће у простору без гравитације. Било би, међутим, погрешно ако би неко на основу горњег посматрања закључио да гравитација уопште само привидно постоји и да се у сваком гравитационем пољу увек може замислити такав каоординатни систем у коме гравитација више неће постојати, т.ј. у коме се све појаве могу објаснити под предпоставком да гравитација не постоји. Јер ће то бити могуће само у гравитационим пољима специјалне врсте, у тако званим хомогеним гравитационим пољима у којима је убрзање константно по величини и правцу, док је то, на пример, за гравитационо поље наше земље у целини уопште немогуће. Али, ако није могуће у целини, могуће је у извесним димензијама. Јер, ма какво било гравитационо поље, оно се увек у довољно малим размерама може сматрати као хомогено, т.ј. да му у тим размерама убрзање буде константно по величини и правцу. У простору са димензијама једне куће на земљи, на пример, гравитационо поље наше земље може се сматрати у пракси као хомогено. Принцип еквиваленције важи за сва хомогена гравитациона поља, али се његова

важност, као што ћемо одмах видети, може проширити и на произвољна гравитациона поља.

Ако под пољем инерције за разлику од поља гравитације разумемо простор у коме нема гравитације, у коме се јављају само инерцијалне силе (у соби, на пример, која се убрзано креће постоји поље инерције), онда би се принцип еквиваленције могао овако формулисати: хомогено поље гравитације је у погледу свих физикалних појава еквивалентно са пољем инерције које је изазвано праволинијским константним убрзањем. Како се, међутим, свако убрзано кретање, па и криволиниско, у довољно малом размаку времена и простора може сматрати као праволиниско и једвако с једне стране, и како се свако произвољно гравитационо поље може у извесним димензијама сматрати као хомогено — то општи принцип еквиваленције, под тим рестрикцијама, можемо овако исказати: сва кретања у пољу гравитације могу се увођењем погодних координатних система протумачити као кретања у пољу инерције, и обрнуто: сва кретања у пољу инерције могу се протумачити као кретања у пољу гравитације.

Принцип еквиваленције негира могућност да се констатује апсолутно убрзано кретање: од два система који се крећу релативним убрзаним кретањем ми можемо с подједнаким правом сматрати било један било други да мирује. И то би био смисао проширеног принципа релативитета.

Сад ће нам бити јасно зашто се гледиште, изнето у почетку овог одељка, по коме је изгледало као да неједнака кретања имају апсолутни карактер, не може одржати. Јер, и ако се промена кретања воза, на пример приликом заустављања, може, као што смо видели, констатовати у самом возу, та промена се не мора схватити као „стварна“ промена брзине воза него се може с истим правом протумачити и овако: воз се „у ствари“ не креће, него постоји у односу на воз (за време заустављања воза) једно променљиво поље гравитације, под чијим се дејством насип заједно са земљом креће у супротном правцу тако да се његова брзина постепено смањује. И ово специфично поље гравитације изазива и потисак који путници у возу за време заустављања воза осећају.

У духу овог резонувања Ајнштајн је објаснио и центрифугалне силе, које је Њутн, као што смо већ поменули, сма-

трао као доказ за апсолутну егзистенцију ротационог кретања. Како је ротационо кретање само специјалан случај неједнаког кретања, а центрифугалне силе специјалан случај инерцијалних сила — то се, у духу принципа еквиваленције, центрифугалне силе, које се манифестују приликом земљине ротације, могу протумачити као гравитационе силе што потичу од небеских тела која се окрећу око земље док би она мировала. Али Њутнова теорија гравитације то није у стању да објасни: зато се она мора изменити. Нова релативистичка теорија гравитације мора бити тако изграђена да буде у стању да и центрифугалне силе на земљи објасни дејством гравитације небеских тела. И одиста, Општа Теорија Релативитета успела је, као што ћемо још видети, да нађе један такав општи закон гравитације који обухвата и инерцијалне силе и представља, на тај начин, круну Теорије Релативитета.

По Њутну, гравитационе силе зависе само од маса и узajамних раздаљина тела између којих делују¹⁾. По Ајнштајну, оне зависе и од стања кретања тих тела. Општи закон кретања нове релативистичке Динамике мора бити такав да се инерцијалне силе манифестују само при релативним убрзањима, ротацијама, и т. д. Инерција није више иманентна особина сваког тела као таквог, него је манифестација узajамног дејства између тог тела и свих осталих у свету. Само кад тело добије убрзање према осталим телима, онда се јављају инерцијалне силе: кад би на свету било само једно једино тело, оно не би имало никакву инерцију. Свако тело има инертну масу и може манифестовати инерцијалне силе само захваљујући осталим телима у свету која условљавају и проузрокују и инерцију и инерцијалне силе. То су све значајни резултати који потичу из општег принципа еквиваленције, који је послужио као основа за проширење принципа релативитета.

До Ајнштајна, инерција и гравитација постојале су као самосталне, независне категорије, које нико није ни покушавао да доведе у тешњу везу, и ако се то само од себе, по природи саме ствари, наметало. У Класичној Механици, инерцијалне и гравитационе појаве третиране су потпуно засебно, и за Њутна је то била проста случајност да у тим појавама фигурише један исти фактор: маса.

¹⁾ Њутнов закон гравитације, као што је познато, гласи: гравитациона сила између два тела пропорционална је производу њихових маса а обрнуто пропорционална квадрату њихове раздаљине.

Једнакост инертне и тешке масе била је добро-дошла емпириска чињеница која је Ајнштајну дала могућности да и сва инерцијална дејства, која се на једном телу опажају, сведе на утицај других тела. И управо овај корак Ајнштајнов отворио је нову епоху у Физичи: он је значи постављање камена темеља Опште Теорије Релативитета која је проширила и улубила револуцију коју је извршила Специјална Теорија Релативитета. Јер овај Ајнштајнов корак садржи у себи захтев за релативитетом свих кретања: пошто све појаве зависе искључиво од узајамног положаја и кретања тела, то сви координатни системи, који у опште служе само за што простије описивање појава, губе све раније привилегије. Општи природни закони у односу ма на који координатни систем који би био чврсто привезан за једно произвољно тело, на пример сунце, морају бити исти као и у односу ма на који други координатни систем који би био привезан ма за које друго произвољно тело, на пример воз на земљи: ми можемо с подједнаким правом сваки од тих система сматрати да се налази у миру у одговарајућем пољу гравитације. То значи, другим речима: да једначине, које изражавају опште природне законе, морају у свима координатним системима без разлике задржати исту форму. И то је суштина општег принципа релативитета.

Принцип еквиваленције доводи нас сазвим логички до општег принципа релативитета. Као што се воз који се креће праволинијски једнаком брзином може, према специјалном принципу релативитета, сматрати да се налази у миру, исто тако се и тело које се креће једнако-убрзаним кретањем може, према принципу еквиваленције, сматрати да се налази у миру у хомогеном пољу гравитације.

И убрзано кретање је, дакле, релативно. Како је, међутим, сила, т.ј. узрок промене кретања, једнака — по Њутну — производу из масе и убрзања, то ћемо ми бити у стању да свако произвољно кретање једног тела пратумачимо као „мировање“ у одговарајућем пољу гравитације, које, наравно, неће више бити хомогено него ће се уопште мењати са местом и временом. Тек свих природних појава зависи само од природе одговарајућег поља гравитације: координатни системи, који су служили једино као помоћна средства за описивање природних појава, губе на тај начин сваки специфични значај. Тако долазимо до општег принципа релати-

витета, по коме општи закони свих природних појава морају подједнако важити у свима могућим произвољним координатним системима.

Класична Механика је морала све своје законе формулисати само у односу на специјалне координатне системе, такване Галилејеве или инерцијалне системе, који се одликују од осталих координатних система тиме што једино у њима важи закон инерције. У духу Опште Теорије Релативитета, међутим, која инерцијална и гравитациона дејства схвата као манифестације једног основног закона, све појаве, и инерцијалне и гравитационе, зависе искључиво од релативног положаја и релативног кретања тела. Зато тај основни закон мора бити такав да он не повлашћује никакве координатне системе: он, непромењен, мора важити у свима могућим координатним системима без разлике. И Ајнштајну је одиста пошло за руком, као што ћемо доцније још видети, да на основу општег принципа релативитета постави један такав основни закон који, обухватајући уједно и инерцијалне и гравитационе појаве, решава општи проблем гравитације. Њутнова Динамика према Новој Динамици задржава само приближну вредност. У духу Нове Динамике, насупрот Њутну, на сваком телу морају се појавити центрифугалне силе кад велике масе ротирају око њега, али су те силе, и при највећим масама које могу добити у обзир приликом експеримената, тако мале да се не могу констатовати. Зато се тако дуго и веровало у апсолутну тачност Њутнових закона кретања.

VI

Практични значај Опште Теорије Релативитета. — Проучавање гравитационих поља. — Криволинијско кретање светлосних зракова. — Први триумф Опште Теорије Релативитета. — Сукоб са Специјалном Теоријом Релативитета? — Снисао генерализације принципа релативитета. — Општи постулат релативитета. — Кинематички и динамички појам кретања. — Механика релативних кретања као основа Нове Физике

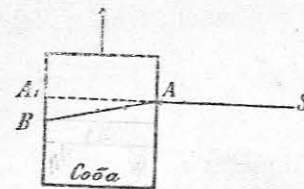
Ми смо у прошлом одељку изложили у главном и начини постанка и суштину Опште Теорије Релативитета. Али ћемо се на овој важној ствари, чије разумевање несумњиво захтева

извесних napora, задржати još malo и на овом месту. Општа Теорија Релативитета даје нам могућности да чисто теориским путем проучавамо особине гравитационих поља. Ако нам је, на пример, познат ток једне природне појаве у односу на Галилејев координатни систем \mathbb{N} (који се налази у „Галилејевом простору“, т. ј. у простору без гравитације), онда се може увек чисто теориским путем, т. ј. само помоћу рачунских операција наћи како ће посматрана појава изгледати у односу на координатни систем \mathbb{N}_1 који се према \mathbb{N} налази у произвољном убрзаном кретању. Како се, међутим, према ономе што смо у прошлог одељку рекли, може увек сматрати да уместо произвољног кретања система \mathbb{N}_1 постоји у односу на тај систем одговарајуће поље гравитације, то смо ми на горњи начин, т. ј. само помоћу рачунских операција, у стању да сазнамо како дотично поље гравитације утиче на ток посматране појаве. И у томе је велики практични значај Опште Теорије Релативитета.

Ако бисмо хтели, на пример, да нађемо закон извесне појаве у једном хомогеном пољу гравитације, треба само да израчунамо како тај закон изгледа у координатном систему који се налази у одговарајућем једнако-убрзаном кретању, јер ток појаве у оба случаја, као што знамо, мора бити исти. Тако, на пример, сазнајемо да ће се једно тело, које се у Галилејевом координатном систему \mathbb{N} креће једнаком брзином и праволиниски, у другом неком координатном систему \mathbb{N}_1 који се креће произвољним неједнаким кретањем, кретати уопште неједнаком брзином и криволиниски. Како је, међутим, кретање овог другог координатног система еквивалентно са egzистенцијом одговарајућег поља гравитације, то се кретање посматраног тела може објаснити и утицајем тога поља гравитације. Да гравитација одиста утиче у томе смислу на кретање тела, познато је из искуства: треба се само сетити случаја „косог хитца у вис“ (на пример, пугање пушчаног зрна, и т. д.).

Ако сад ово просто резонување применимо на случај кретања светлосних зракова, долазимо до једног врло значајног резултата. Према принципу констанције брзине светлости, светлост се у „Галилејевом простору“ креће праволиниски једнаком брзином c . Посматрајмо сад кретање светлосних зракова у соби која се креће једнаким праволиниским кретањем

„навише“. Светлосни зрак \mathbb{S} (сл. 5.) продире у собу кроз рупицу \mathbb{A} , па би, кад се соба неби кретала, пао на супротни зид управо у тачку \mathbb{A}_1 .

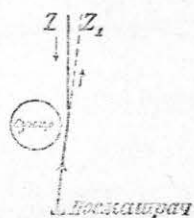


Сл. 5.

Али, пошто се соба креће навише, то ће се она и за оно, иако врло кратко, време за које светлост треба да стигне из \mathbb{A} до супротног зида, ипак померити, иако врло мало, навише, тако да посматрани светлосни зрак неће пасти у тачку \mathbb{A}_1 , него у тачку \mathbb{B} која се налази нешто испод тачке \mathbb{A}_1 . И уколико је брзина собе већа, утолико ће тачка \mathbb{B} лежати дубље према тачки \mathbb{A}_1 , т. ј. утолико ће нагибни угао $\mathbb{A}_1 \mathbb{A} \mathbb{B}$ бити већи.

Ако сад замислимо да се соба не креће једнаким него произвољним убрзаним кретањем, то путања $\mathbb{A} \mathbb{B}$ светлосног зрака у соби неће бити праволиниска него криволиниска, јер се брзина собе, док светлосни зрак пролази кроз њу, мења, па се према томе мења и нагибни угао, т. ј. правац кретања светлости. Тако долазимо до закључка да се светлосни зраци у координатном систему који се креће произвољним убрзаним кретањем (у нашем примеру соба) крећу криволиниски. А како је, као што знамо, произвољно убрзано кретање једног система еквивалентно са egzистенцијом одговарајућег поља гравитације, то можемо рећи: да се светлосни зраци у пољу гравитације крећу криволиниски. Светлосни зраци крећу се у пољу гравитације од прилике онако као и пушчано зрно. Само је кривина путање светлосних зракова, услед огромне брзине светлости, тако мала, да је ми у гравитационом пољу наше земље нисмо у опште у стању констатовати. Али се у јачем гравитационом пољу, као што је, на пример, сунчево поље гравитације, та кривина може констатовати. Ајнштајн је израчунао да светлосни зрак који пролази непосредно поред сунца мора скренути према сунцу за $1,7$ лучних секунда. И то Ајнштајново предвиђање је одиста, на један бриљантан начин, експериментално потврђено.

Кад светлосни зраци са једне звезде на путу ка земљи пролазе поред сунца, морају услед сунчеве гравитације скренути према сунцу. То скретање манифестује се у привидном померању положаја посматране звезде, као што показује сл. 6. (звезда Z изгледа да се налази на месту Z_1)



Сл. 6.

Како се, међутим, звезде у близини сунца могу посматрати само у случају помрачења сунца (јер се иначе, због јаке сунчеве светлости, не могу опазити ни слободним оком ни фотографском плочом), то је енглеска Академија Наука организовала две астрономске експедиције које су имале на дан тоталног помрачења сунца, 29. маја 1919. године, да провере овај резултат Ајнштајнове теорије. И обе експедиције, од којих је једна вршила посматрање из Бразилије а друга са једног острва на западној обали Африке, у потпуности су потврдиле Ајнштајново предвиђање. И то је био први триумф Опште Теорије Релативитета. Кад је председнику Академије Наука у Енглеској Ц. Томсону саопштен овај успех, он је с правом рекао: „Од Њутна, ово је највећи напредак у Физичи“.

Како се, међутим, овај резултат слаже са принципом констанције брзине светлости? По принципу констанције брзине светлости, који је, као што знамо, један од стубова Специјалне Теорије Релативитета, светлост се стално креће праволинијски и једнаком брзином c , док Општа Теорија Релативитета предвиђа и искуство потврђује да се светлост у пољима гравитације креће криволинијски. Значи ли то да је Општа Теорија Релативитета срушила један од стубова Специјалне Теорије Релативитета, на самим тим подрила темељ Теорије Релативитета уопште, као што мисле извесни противници Теорије Релативитета? Јер, ако је Општа Теорија Релативитета израсла из Специјалне Теорије Релативитета, па је у своме

развитку дошла у контрадикцију са једним од темељних принципа Специјалне Теорије Релативитета — зар то одиста не значи да је темељ читаве Теорије Релативитета срушен, да је Теорија Релативитета била само зграда на песку? Тако су противници Теорије Релативитета покушали да горњи триумф Опште Теорије Релативитета представе као крах Теорије Релативитета уопште. У ствари, у свему томе нема, као што је лако увидети, никакве контрадикције. Јер Специјална Теорија Релативитета важи, као што смо у своје време нарочито истакли, само у „Галилејевом простору“, т. ј. у простору без гравитације: и принципи и резултати Специјалне Теорије Релативитета важе само под претпоставком да се гравитациона дејства апстрахују. И ништа није природније и разумљивије него факт да се ти резултати морају изменити кад претпоставка њиховог важења отпадне, т. ј. кад се узму у обзир дејства гравитације. Практични значај Опште Теорије Релативитета и састоји се у томе, као што смо у почетку овог одељка нагласили, што нам она даје могућности да нађемо закон једне појаве у пољу гравитације кад нам је познат закон те појаве у случају кад се гравитациона дејства апстрахују. Пример распростирања светлости може нам послужити као најбоља илустрација тога практичног значаја Опште Теорије Релативитета. На тај начин увиђамо да Општа Теорија Релативитета не само није у контрадикцији са Специјалном Теоријом Релативитета, него се управо јавља као природна и нужна генерализација Специјалне Теорије Релативитета. Општа Теорија Релативитета обухвата Специјалну Теорију Релативитета као специјални, гранични случај: резултати Опште Теорије Релативитета своде се на резултате Специјалне Теорије Релативитета кад се апстрахују гравитациона дејства.

У тежњи да све појаве кретања у гравитационим пољима подведе под један општи закон, Ајнштајн је поставио себи задатак да нађе општи закон гравитације који би према општем принципу релативитета, важио у свима гравитационим пољима. И Ајнштајн је успео, као што смо већ у прошлом одељку поменули и као што ћемо још видети, да одиста нађе такв закон и тако крунише своје велико дело.

Према специјалном принципу релативитета, како смо га формулисали још у другом одељку првога дела ове књиге, сви општи природни закони остају исти у свима Галилеје-

в им координатним системима који се налазе у релативном једнаком праволинијском кретању. При крају првога дела, ми смо могли то исто математичким језиком исказати и овако: општи природни закони су непроменљиви према Лоренцовим трансформацијама, т. ј. једначине, које изражавају опште природне законе, задржавају исту форму и кад се на њих примене Лоренцове трансформације. Према ономе, међутим, што смо у прошлости одељку рекли, општи принцип релативитета захтева да се општи природни закони изразе таквим једначинама које ће у истој форми важити у свима могућим произвољним координатним системима (или, математички речено: које ће бити непроменљиве према произвољним трансформацијама координата). Овај задатак иде, по својој природи, у област чисте Математике и Математика га је, средствима која су јој већ стајала на расположењу, потпуно решила.¹⁾

Специјална Теорија Релативитета утврдила је равноправност, у погледу описивања природних појава, свих Галилејевих система који се налазе у релативном једнаком праволинијском кретању. У свима тим системима природне појаве дешавају се на исти начин: њихове једначине се не мењају, остају исте. У Општој Теорији Релативитета, међутим, принцип релативитета није се могао генерализовати у томе смислу: да се утврди равноправност свих могућих координатних система, па ма у каквој се стању кретања они налазили, јер се природне појаве, као што је лако увидети, не дешавају на исти начин у разним координатним системима који се налазе у произвољном кретању један према другом. Довољно је, примера ради, подсетити само на то да основни закон Класичне Механике, закон инерције, по коме се тело, на које не делују никакве силе, налази у миру или у стању једнаког праволинијског кретања — да тај закон очевидно не важи у координатном систему који би се према основном Галилејевом систему кретао убрзаним кретањем. Али, захваљујући чињеници да сва кретања уопште имају само релативан карактер, законима кретања могао се дати такав облик који се неће променити, па ма у коме произвољном координатном систему ми та кретања посматрали. Математичка форма општих

¹⁾ То су поглавито средства диференцијалне геометрије не-Еуклидових мултиплицитета и опште теорије коваријаната у облику рачуна тензора.

природних закона мора бити иста у свима могућим координатним системима: то је срж општег принципа релативитета, то је смисао општег постулата релативитета. Њутнови закони кретања не одговарају захтеву општег принципа релативитета: зато се они не могу сматрати као општи природни закони. Закон инерције, на пример, у класичном облику важи само у координатним системима специјалне врсте, у такозваним Галилејевим системима. Ајнштајн је међутим, нашао форму у којој се општи природни закони у свима координатним системима без разлике манифестују на један исти начин. И у томе је сва величина Ајнштајновог дела у области Опште Теорије Релативитета.

Из Опште Теорије Релативитета излази да се не мора правити никаква разлика између кинематичког и динамичког²⁾ појма кретања: оба та појма поклапају се; за проучавање једног кретања довољна су чисто кинематичка посматрања, док су се у Њутновој Механици морале узимати у обзир и инерцијалне силе. Чисто кинематички, било је од увек исто речење, на пример: „земља се окреће око звезданог неба“, или: „звездано небо се окреће око земље“ — али отуда није проистицало да се између једног и другог случаја није могла ни динамички правити никаква разлика. Тај дуализам је тек Општа Теорија Релативитета стклонила, изградивши Механику чисто релативних кретања, у којој се кинематички и динамички појам кретања поклапају, и која је у знатној мери упростила нашу слику света. Класична Механика показала се као уска база за описивање свих физикалних појава. На широј и чвршћој бази Нове Механике изграђена је зато и Нова Физика, која у целини задовољава општи принцип релативитета и представља потпунији, савршенији и хармоничнији систем него Стара Физика.

²⁾ Динамика проучава, као што је познато, реална кретања маса око Кинематика (или Форнономија) апстрахује масе и проучава кретања математичких тачака.

VII

Тешкоће на путу развита Опште Теорије Релативитета. — Сукоб са Еуклидовом геометријом. — Појам координата у Општој Теорији Релативитета. — Даље релативирање појмова простора и времена. — Не-Еуклидова геометрија. — Кривина простора. — Појам простора и времена у Општој Теорији Релативитета. — Унија простора, времена и материје. —

На који начин је Ајнштајн развио Општу Теорију Релативитета, којим путем је дошао до општег закона гравитације, како је из њега извео читав низ значајних конзеквенција — о свему томе врло је тешко говорити без Математике. Јер нема језика на свету којим би се макар приближно могло рећи шта је све Математика урадила у Општој Теорији Релативитета. Али, ако се без Математике и не може схватити сва величина Теорије Релативитета, може се бар наслутити сва величина тешкоћа које је она имала да савлада на путу свога развита. Јер ништа речитије не говори о научној величини Теорије Релативитета него баш те велике тешкоће које је она победоносно савладала. Ми ћемо укратко изложити природу тих тешкоћа.

Да би могла што тачније да опише природне појаве, снаго како су нам дате у искуству, Специјална Теорија Релативитета морала је, као што смо видели, да раскине са традиционалним схватањем времена и простора: и тек на тај начин Специјална Теорија Релативитета била је у стању да реши једну тешку кризу у коју је Физика била запала. Али ма како биле дубоке промене које су у Специјалној Теорији Релативитета претрпели појмови времена и простора, Општа Теорија Релативитета није могла изаћи на крај с њима. Јер, и поред свих тих дубоких промена, једно је остало нетакнуто: и у старој Физики и у Специјалној Теорији Релативитета раздаљина између двеју одређених тачака једног чврстог тела које се налази у миру има у одговарајућем координатном систему увек једну сасвим одређену вредност, која не зависи ни од места и оријентације тела нити пак од времена; исто тако: размак времена, што одговара двама одређеним положајима казаљке на једном сату који се налази у одговарајућем координатном систему у миру, има увек једну сасвим одређену вредност, која не зависи ни од места ни од времена. Другим

речима: и стара Физика и Специјална Теорија Релативитета претпостављају да су простор и време хомогени, т.ј. да ниједна тачка у простору и времену нема никакво физикално преимућство над осталим¹⁾. То значи: исти експеримент на разним местима, или у разним временима на једном истом месту, има увек исти ток. Простор и време имали су у Специјалној Теорији Релативитета једну просту, јасну и одређену физикалну интерпретацију. Али та интерпретација није била више у стању да задовољи потребе Опште Теорије Релативитета. Сем тога, и стара Физика и Специјална Теорија Релативитета служе се искључиво Еуклидовом геометријом,²⁾ у чијој основи лежи идеја чврстог (крутог, нееластичног) тела која је од увек била полазна тачка за сва мерења уопште. Општа Теорија Релативитета, међутим, није могла изаћи на крај са Еуклидовом геометријом: она је морала прибећи Не-Еуклидовој геометрији, јер је наишла на „просторе“ у којима закони Еуклидове геометрије не важе. Шта то управо значи, моћи ће се видети из следећег примера.

Замислимо у простору без гравитације једну велику кружну плочу K и одмах изнад ње још једну другу исту толику концентричну плочу K_1 која ће у односу на ону прву једнаком брзином ротирати. Треба замислити да су средишта обе плоче везана једном осовином око које ће се горња плоча окретати. На горњој плочи појавиће се сад, услед ротације, центрифугалне силе, али се оне, у духу Опште Теорије Релативитета, могу, као што знамо, протумачити и као гравитационе силе. Само, гравитационо поље, које се може замислити да влада на горњој плочи, не може бити константно, хомогено него променљиво: његово дејство се у средишту плоче своди на нулу а расте пропорционално раздаљини од средишта (јер се и центрифугална сила у средишту своди на нулу а расте пропорционално раздаљини од средишта). Ако посматрач на горњој плочи постави себи задатак да измери обим своје плоче, онда ће узети један штапић као јединицу, па ће моћи, ако је

¹⁾ Под хомогеношћу простора, у ширем смислу, разумемо и изотропнију простора, т.ј. физикалну равноправност оријентације, праваца у простору.

²⁾ Еуклидова геометрија је обична геометрија која се једино у учи у нижим и средњим школама; по њој је, на пример, збир углова у сваком троуглу једнак 180° ; однос периферије круга према пречнику једнак Лудолфовом броју $\pi = 3,14159$ и т. д.

штапић мали према полупречнику плоче, простим преношењем штапића по обиму плоче наћи тражени обим. Али, кад он свој штапић, у циљу мерења, постави на обим плоче тангенцијално, т.ј. у правцу кретања, онда ће тај штапић, са доње плоче посматран, бити краћи, мањи од јединице, јер се, као што знамо из Специјалне Теорије Релативитета — за коју можемо претпоставити да важи у довољно малом размаку и у посматраном случају — покретна тела скраћују у правцу кретања. Зато ће посматрач на покретној плочи морати више пута постављати свој штапић дуж обима горње плоче да би измерио тај обим, него што је то случај са посматрачем на доњој плочи који би мерио обим доње плоче. То значи да би, са доње плоче посматрајући, обим горње плоче био већи од обима доње плоче. Како се, међутим, штапић у радијалном правцу (управном на правац кретања) уопште не скраћује, то би резултат мерења пречника и горње и доње плоче био исти. На тај начин долазимо до парадоксалног закључка: да кругови чија су пречници једнаки имају различите обиме! То је, наравно, у Еуклидовој геометрији немогуће, јер је у Еуклидовој геометрији однос обима круга према пречнику увек једнак константном броју $\pi = 3,14$. У нашем примеру би, међутим, однос обима горње плоче према пречнику био већи од π , док би тај однос у случају доње плоче био управо једнак π . Шта значи то? То значи да на горњој плочи не важе закони Еуклидове геометрије. И што је најинтересантније, однос обима према пречнику био би за разне кругове на горњој плочи различит: за кругове са врло малим полупречником, на пример, тај однос би се једва разликовао од π , јер би се штапић приликом мерења обима тако малог круга, услед врло мале брзине којом би се кретао, неприметно мало скраћивао; за круг, међутим, чији би полупречник био једнак половини полупречника плоче, тај однос би био већи, док би он био највећи у случају мерења обима читаве плоче, јер се у овом последњем случају штапић, услед релативно највеће брзине, највише скраћује. И тако, док би за посматрача на доњој плочи однос обима сваког произвољног круга (без обзира на његову величину) на доњој плочи према пречнику био увек константно једнак π , дотле би посматрач на горњој плочи на основу свога искуства закључио да однос обима круга према пречнику није сталан него се мења, растући, са величином круга. За посматрача на горњој плочи не важи, дакле, Еуклидова геометрија.

Како је, међутим, ротационо кретање, у духу Опште Теорије Релативитета, еквивалентно одговарајућем гравитационом пољу, то можемо рећи: у пољу гравитације не важи Еуклидова геометрија. То је први значајни резултат до којег нас горњи замишљени експеримент доводи. Али нас он доводи и до једног значајног резултата у погледу мерења времена.

Уочимо на горњој плочи два потпуно једнака сата: један нека буде тачно на средини плоче (на осовини), а други на периферији, и нека се оба налазе у миру према плочи. Ако бисмо ове сатове посматрали са доње плоче, опазивамо да они не иду подједнако: јер, док се сат на средини горње плоче налази у миру и према доњој плочи, дотле се сат на периферији креће, услед ротације горње плоче према доњој, па ће зато, кад се са доње плоче посматра, сат на периферији, као што знамо из Специјалне Теорије Релативитета, ићи спорије него сат на средини плоче, чији се подаци иначе слажу са подацима свих сатова доње плоче. То исто би морао констатовати и посматрач који би се налазио на горњој плочи, на пример посред сата на средини плоче, јер се његови временни подаци слажу са онима на доњој плочи, па се не би могли слагати са подацима сата на периферији који према онима доле, као што знамо, мора стално заостајати. На тај начин ће наш посматрач морати доћи до закључка: да време, т.ј. брзина кретања казаљке једног сата, на горњој плочи зависи од места на коме се сат налази. А како се, у духу Опште Теорије Релативитета, ротационо кретање горње плоче може увек заменити одговарајућим гравитационим пољем, то можемо рећи: у пољу гравитације један сат ићи ће брже или спорије према месту на коме се налази. И то је други значајни резултат до којег нас горњи пример доводи.

Из ових последњих резултата изводимо непосредно ове закључке: прво, пошто у пољу гравитације не важи Еуклидова геометрија, то значи да је у пољу гравитације немогуће појам просторних координата дефинисати онако како је то био случај и у Класичној Механици и у Специјалној Теорији Релативитета, јер тај појам претпоставља Еуклидову геометрију;¹⁾

¹⁾ Просторне координате једне тачке налазе се по правилима Еуклидове геометрије као одговарајуће пројекције посматране тачке у датом координатном систему; њихове величине одређују се простим преношењем штапића који је узет као јединица за мерење дужина.

и друго: у пољу гравитације се исто тако не може ни време дефинисати просто помоћу обичних сатова на начин како је то раније чињено.¹⁾ А шта све то скупа значи? То значи ни мање ни више него сво: пошто се у пољу гравитације координате једног догађаја (три просторне и једна времена) не могу егзактно дефинисати, онда ни природни закони, у којима те координате фигуришу, не могу имати никакав одређен значај! Тако изгледа да је Општа Теорија Релативитета наишла управо на несавладљиве тешкоће, које доводе у сумњу и саму њену полазну тачку: општи постулат релативитета. Али је Ајнштајнов геније, захваљујући средствима која му је ставила на расположење Математика, пребродило све те тешкоће. Да би могао општи принцип релативитета доследно спровести до краја, Ајнштајн је учинио још један револуционарни корак напуштајући, и оно схватање простора и времена како га је формулисала Специјална Теорија Релативитета, и замењујући га једним много општијим.

Како се показало да је немогуће један догађај фиксирати на досадашњи начин, т. ј. помоћу координата које би имале непосредни физички значај и при чијој би се употреби природни закони могли најпростије формулисати — то је Ајнштајн, удубљујући се у суштину природних појава, дошао на мисао да сви могући координатни системи морају бити принципијелно равноправни за описивање природних појава. И тако је поставио себи задатак: да природним законима да такву математичку форму која у свима могућим координатним системима остаје иста. И Ајнштајн је тај задатак који иде у област чисте Математике, као што смо једном већ поменули, потпуно решио. Али, да би решио тај задатак, Ајнштајн је морао напустити и старо схватање простора и времена и Еуклидову геометрију. Као што се види, тешкоће које је ваљало савладати биле су неизмерне. Али их је Ајнштајн савладао употребљавајући координате које више немају никакав непосредни физикални значај („Гаусове координате“) и служећи се Не-Еуклидовом геометријом.²⁾

¹⁾ Време једног догађаја добија се кад се просто погледа на један претходно дотерани сат који се налази на месту догађаја.

²⁾ Док смо раније један догађај (тачку у „свету“) фиксирали увек помоћу три просторне и једне времене координате (x, y, z, t) дотле се под Гаусовим координатама једног догађаја разумеју четири броја $(x_1, x_2,$

У Класичној Механици и Физици просторни и временски подаци имали су апсолутни карактер. У Специјалној Теорији Релативитета ти су подаци релативирани утолико што је утврђена њихова зависност од стања кретања одговарајућег координатног система. Али су се једначине Специјалне Теорије Релативитета, у случају малих брзина, увек сводиле на једначине Класичне Механике и обичне Физике. На тај начин је одржан континуитет са старом Физиком.

У Општој Теорији Релативитета отишло се, међутим, са релативирањем просторних и временских података још много даље, управо дотле да се може рећи да су они као такви, по Ајнштајновим речима, изгубили сваку физикалну предметност. У Општој Теорији Релативитета не важи више постулат хомогености простора и времена: величина једне дужи, на пример, зависиће и од места и од оријентације у простору. Општа Теорија Релативитета не зна уопште за чврста (крута) тела са еуклидовским особинама. Док су се раније координатни системи увек замишљали као чврста тела, Општа Теорија Релативитета напушта ту апстракцију и претпоставља системе који се не само као целина произвољно крећу него за време кретања сасвим произвољно мењају и свој облик. С друге стране опет, пошто гравитациона поља утичу на сатове тако да онемогућавају ранију дефиницију времена, то се Општа Теорија Релативитета за дефиницију времена служи сатовима који се замишљају, као и раније, у свакој тачки, али се њихове казаљке иначе крећу по сасвим произвољном закону; од њих се тражи само то: да се подаци које истовремено показују два суседна сата бескрајно мало разликују један од другог. И за овако чудно произвољне координатне системе („Гаусови координатни системи“), који наравно обухватају као специјалне случајеве све раније којима се уопште Физика служила, Ајнштајн је доказао — да су сви они принципијелно равноправни за формулисање општих

x_3, x_4) који немају никакав физикални значај (нема ни „просторних“ ни „временских“ координате) и који служе само за то да на изврстан одређен, иако сасвим произвољан, начин нумеришу тачке у свету. Ајнштајн је сад показао да се природне појаве могу потпуно описати помоћу Гаусових координата, тако да употреба Гаусових координата чини излишним сваки нарочити координатни систем. Наравно да се то описивање врши језиком Не-Еуклидове геометрије.

природних закона;¹⁾ другим речима: математичка форма општих природних закона не зависи од избора координатног система.

Како се једначине Опште Теорије Релативитета у специјалном случају, када апстражујемо гравитациона поља, морају свести на једначине Специјалне Теорије Релативитета, то ће, очевидно, Специјална Теорија Релативитета важити у бескрајно малим областима и у координатним системима у којима посматрања тела немају никакво убрзање („бескрајно мале области“ у сравњењу са димензијама са којима се ича посла у Физички могу бити још увек велике). То значи да једну дуж, на пример, можемо сматрати као константну и кад она своје место, свој правац и своју брзину бескрајно мало промени. Како се Специјална Теорија Релативитета, као што је познато, служи Еуклидовом геометријом, то излази да у бескрајно малим областима и у одговарајућим координатним системима важи Еуклидова геометрија. Тако је воспостављен континуитет између Специјалне и Опште Теорије Релативитета. И ова идеја континуитета била је управо полазна тачка и идеја водила за квантитативно формулисање једначина Опште Теорије Релативитета, које се могу сматрати као генерализација одговарајућих једначина Специјалне Теорије Релативитета, односно старе Физике.

Да би читаоци добили бар приближну слику о смислу Не-Еуклидове геометрије у Општој Теорији Релативитета, учинићемо неколико општих напомена и истаћи неке карактеристичне појединости.

Ако у извесном простору важе закони Еуклидове геометрије, онда се за такав простор каже да је „Еуклидов простор“ или „раван“ простор. Ако би се, пак, у извесном простору констатовала одступања од Еуклидове геометрије (на пример: да однос обима круга према пречнику не буде једнак π ; да збир углова у троуглу не буде 180° , и т. д.), онда се за такав простор каже да је „Не-Еуклидов простор“ и да има извесну „кривину“. „Кривина простора“ је, према томе, један технички термин који означаје с а м о то да се приликом мерења

¹⁾ Математички речено: једначине које изражавају опште природне законе задржавају исту форму и кад се на њих примене сасвим произвољне трансформације Гаусових координата, јер свака трансформација без разлике одговара прелазу из једног Гаусовог координатног система у други.

у дотичном простору констатују одступања од Еуклидове геометрије.¹⁾

За математичаре је још у првој половини прошлог века било јасно да Еуклидова геометрија није никаква догма која би имала апсолутну вредност. Јер су већ тада биле познате и такве две геометрије која имају апсолутно исту логичну вредност као и Еуклидова, али се од ње битно разликују по томе, на пример, што је у једној збир углова у троуглу мањи од 180° (Лобачевски-ева геометрија), а у другој већи од 180° (Риман-ова геометрија). Убрзо се, међутим, увидело да се логички може конструисати колико се хоће разних геометрија, па се зато још онда дошло на мисао: да тек искуство има да одлучи о томе која ће од свих тих геометрија, које су формално потпуно равноправне, бити најподеснија за описивање геометријских односа у простору. Тако је, на пример, још Гаус покушао да експерименталним путем провери еуклидитет нашега простора: он је хтео да се увери да ли је збир углова и у једном врло великом троуглу (чије стране износе километрима) такође једнак 180° . Експеримент није могао констатовати никакво одступање од Еуклидове геометрије: зато се наш простор сматрао као „раван“. Међутим, то још није значило да се при савршенијој техници мерења или при још већим објектима мерења — не би опште могла констатовати извесна кривина нашега простора. Али би, у сваком случају, она морала бити врло мала.

Вратимо се, после ових општих напомена, на већ раније цитирани пример кружне плоче која ротира. Видели смо да посматрач на тој плочи, вршећи разна мерења, долази до резултата који су у супротности са Еуклидовом геометријом. То значи, према ономе што смо мало час рекли, да простор у коме он врши мерења није Еуклидов, раван, него Не-Еуклидов, т. ј. има извесну кривину. Имајући у виду да за посматрача на доњој плочи, према којој она горња ротира, важе у потпуности закони Еуклидове геометрије, запитајмо се: зашто се на горњој плочи јављају одступања од Еуклидове геометрије? Очевидно зато, што горња плоча ротира према доњој, јер је

¹⁾ Сам назив има оправдања у томе што је аналитички израз „кривине простора“ управо аналоган аналитичког израза за кривину површина. Ваљ тога, појам „кривине простора“ не садржи ништа више: зато покушај да се „кривина простора“ замисли, т. ј. очигледно представи — иду у област метафизичких спекулација које са науком немају никакве везе.

то уопште једина разлика која постоји између доње и горње плоче, па се само њоме и морају објаснити све појаве које се манифестују на горњој плочи (центрифугалне силе, кривина простора), а којих на доњој уопште нема. Како су, међутим, дејства ротационог кретања, као што знамо, еквивалентна са дејствима одговарајућег гравитационог поља, то можемо рећи: да је и кривина простора на горњој плочи проузрокована дејством поља гравитације (које можемо замислити да је изазвано ротацијом звезданог неба). Уопштивши математичким путем овај резултат, Ајнштајн је дошао до закључка: да свако поље гравитације изазива кривину простора. И гравитационо поље нашег сунца, и земље и [сваког другог тела на свету проузрокује одређену, за дотично поље карактеристичну, кривину простора. Али су ове кривине тако мале, да их ми мерењем нисмо могли констатовати.

Тако је Општа Теорија Релативитета дала појму простора нову интерпретацију. Особине простора зависе од гравитационог поља које у томе простору влада. Гравитациона поља, међутим, потичу од маса које се налазе у простору. Отуда закључујемо: особине простора зависе од расподела материје у простору. У духу Опште Теорије Релативитета можемо, према томе, рећи: на великој раздаљини од свих маса простор се може сматрати као раван, Еуклидов, али у близини маса он добија кривину која је у толико већа у колико је јаче гравитационо поље које потиче од дотичне масе.

Као и особине простора, тако и мерење времена, као што смо видели, зависи од гравитационог поља у коме се то мерење врши. И у духу Минковски-еве метафоре, по којој су, као резултат Специјалне Теорије Релативитета, простор и време постали „сенке“ а само једна њихова нераздвојна унија задржала самосталност — могли бисмо сад рећи: да је, као резултат Опште Теорије Релативитета, и ова Минковски-ева унија постала „сенка“ да начини места стварној унији простора, времена и материје која је још једино задржала пуну самосталност.

VIII

Задатак једне теорије гравитације. — Суштина Њутнове теорије гравитације. — Којам светске линије. — Геодезиске линије. — Ајнштајнов основни закон кретања. — Једначине поља гравитације. — Суштина Ајнштајнове теорије гравитације. — Њутнова теорија има само приближну вредност. — Конзеквенције Опште Теорије Релативитета и искуство. — Хипотеза коначности света. —

Принцип еквиваленције, који је послужио као мост између Специјалне и Опште Теорије Релативитета, довео је у најинтимнију везу Теорију Релативитета са теоријом Гравитације. И у току развитка, теорија гравитације постала је управо срж Опште Теорије Релативитета. Доследно спровођење општег принципа релативитета довело је до општег закона гравитације који обухвата сва гравитациона поља и који, и по начину постанка и по конзеквенцијама које из њега проистичу, представља једну од највећих тековина у историји природних наука уопште.

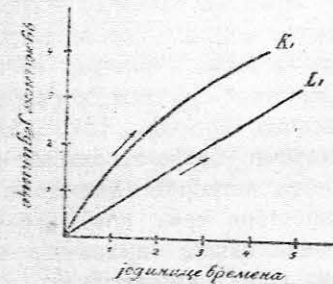
Ми смо, наравно, и свога пута принуђени да се задржимо у главном само на регистровању чињеница, да би читаоци могли брз наслутити о чему је реч. Можда ће неко од читалаца помислити да Ајнштајнова теорија гравитације даје одговор на питање: зашто се тела привлаче? Јер је Њутнова теорија остала дужна одговора на то питање. Али ни Ајнштајнова теорија није у том погледу ништа могла изменити, из простог разлога што горње питање уопште није предмет научног испитивања. Задатак једне теорије гравитације састоји се у томе да нам да могућности да тачно опишемо појаве у пољу гравитације; да нам да могућности да тачно израчунамо све податке који одређују кретање једног тела у пољу гравитације. И Њутн и Ајнштајн су тако, и сасвим исправно, схватили задатак теорије гравитације, па су нам већ Њутнови закони са импозантном тачношћу не само описивали кретања свих познатих планета, него дали и могућности, као што знамо, да се пронађе и једна раније непозната планета Нептун. И да принцип општег релативитета није подрио сам идејни темељ Класичне Механике и Физике, никоме не би ни на памет пало да одступа од Њутнове теорије која је, на тако широкој основи омогућила егзактно, математички описивање природних појава и која се тако сјајно афирмирала у Небеској Механици.

Основу Њутнове теорије гравитације чини Њутнов закон гравитације, који нам даје могућности да при датом распореду маса израчунамо у свакој произвољној тачци дејство гравитације. За описивање кретања једног тела под утицајем дате силе, т. ј. за одредбу путање и брзине тела у сваком моменту — служе два основна Њутнова закона кретања: 1^о кад на тело не делују никакве силе, оно се налази у стању мира или једнаког праволиниског кретања (принцип инерције); и 2^о кад на тело делује једна сила, оно добија у правцу дејства силе убрзање чија је величина једнака количнику између силе и масе тела. И захваљујући овим законима, ми смо у стању да израчунамо све потребне елементе кретања једног тела под утицајем датих сила, и обрнуто: да израчунамо силе под чијим се утицајем тело налази у датом стању кретања. На овим законима је заснована читава Класична Механика. Колико је велика њихова тачност и практична вредност, најбоље је показао познати случај проналаска планете Нептуна. Па ипак, Ајнштајн је деградирало Њутнову теорију, која је тако дуго носила ореол апсолутности, на степен једне приближне, апроксимативне теорије. Али та теориска деградација — да одмах нагласимо — није ниуколико смањила њену практичну вредност: Њутнова теорија остаје, и после Ајнштајна, готово искључиви инструмент у рукама физичара и астронома за све практичне потребе.

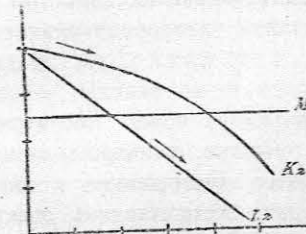
За разумевање Ајнштајнове теорије гравитације потребно је да учинимо још неколике напомене. Кретање једног тела биће нам познато кад у сваком моменту знамо његов положај. И математички закон кретања једног тела управо нам даје могућности да у сваком моменту израчунамо положај тела. Ако се тело креће у равни, његов положај је, као што знамо, одређен уопште двама координатама (апсцисом и ординатом); ако се тело креће у простору, за одредбу његовог положаја у сваком моменту потребна су три податка, три координате. У овом последњем случају, математички закон кретања мора нам дати могућности да у сваком моменту израчунамо све три координате које потпуно одређују положај мобилног тела у простору. Али се закон кретања не мора дати увек у рачунском облику: он се може и графички представити. То је, на пример, случај са познатим графичким возним плановима који жељезничким службеницима дају могућности да простим погледом на један такав план сазнаду моментани положај свих возова једне одре-

ђене линије. Јер свака линија на цртежу, која одговара једном одређеном закону кретања, представља управо читаву историју кретања дотичног тела: из те линије се може у сваком моменту сазнати стање кретања једног тела, т. ј. његов положај и брзина. Такве линије које представљају историју кретања једног тела зову се светске линије, а тачке из којих су оне састављене светске тачке. Свака светска тачка може се, према томе, сматрати као графички представник једног догађаја који се у извесно време десио на извесном месту.

Ако се једно тело креће праволиниски константном брзином у једној равни, онда ће његова светска линија бити права линија, на пример L_1 или L_2 (сл. 7. и сл. 8.), према томе да ли се тело креће на више или на ниже, при чему је нагиб линије одређен брзином тела.



Сл. 7.



Сл. 8.

Ако се пак, тело креће праволиниски али неједнаком брзином, његова светска линија биће крива, на пример K_1 или K_2 (сл. 7. и сл. 8.), према томе да ли се тело креће успорено навише или убрзано наниже, и т. д. Линија M (сл. 8) биће на пример, светска линија тела које се налази у миру, и т. д.

Знати светску линију једног тела, значи познавати стање кретања тога тела. И зато се сваки задатак из Небеске Механике, на пример, може сматрати као решен, кад се зна светска линија дотичног небеског објекта (планете, комете, и т. д.).

Светске линије могу се нацртати у равни само онда, кад се има посла са кретањем у једној димензији, т. ј. у правој линији. Ако се тело креће у два димензијама, ако, на пример, описује круг у једној равни, онда се његова светска линија не може више представити равним цртежом него просторним мо-

делом. Замислимо да се тело креће по кругу једнаком брзином. Ако из сваке тачке круга подигнемо нормалу на раван круга у величини чија је бројна вредност једнака времену у коме се мобилно тело налази на дотичној тачци круга (ако се тело у извесној тачци круга налази у времену 1 секунда, величина нормале у тој тачци биће 1 сантиметар; у тачци у којој се тело налази у времену 5 секунда, нормала ће бити 5 сантиметара, и т. д.), па крајње тачке свих тих нормала међусобно повежемо — добићемо у облику једне спиралне линије управо светску линију посматраног мобилног тела.

Ако би се тело, међутим, кретало у трима димензијама, ако би се, на пример, кретало произвољном брзином по једној спиралној линији у простору, онда, по аналогiji, кажемо да ће светска линија мобилног тела бити извесна крива у четвородимензионалном „простору“. Светска линија се у овом случају не може представити никаквим моделом, јер се четвородимензионални „простор“ уопште не може очигледно представити: четвородимензионални „простор“ је, као аналитички аналог он тродимензионалног простора, само једна математичка фикција, једно математичко оруђе за описивање природних појава. Математички појам четвородимензионалног и, уопште, вишедимензионалног простора нема, према томе, ничега мистериозног у себи: он нема ничега заједничког са разним метафизичким спекулацијама које се надовезују на „егзистенцију“ вишедимензионалног простора. У четвородимензионалном „простору“ ми се задовољавамо само са аналитичким изразима светских линија: ми их описујемо рачунски, сматрајући при том три просторне и једну времену координату као четири координате једне светске тачке на одговарајућој светској линији.

Имајући у виду горње напомене, могли бисмо сад рећи да се задатак једне теорије гравитације састоји у томе, да нам да могућности да израчунамо светске линије тела које се налазе у датом пољу гравитације. И Ајнштајнова теорија гравитације потпуно решава тај задатак. У томе циљу, Ајнштајн је најпре генералисао класични закон инерције на овај начин: светска линија једног тела на које не делују никакве силе јесте права линија. Али како свако тело у пољу гравитације подлежи утицају гравитације, то светске линије у овом случају не могу уопште бити праве. Овај резултат је, уосталом, у потпуној сагласности са ранијим Ајнштајновим тврђењем да простор у

гравитационом пољу добија увек извесну кривину. Зато на горњи начин генералисани закон инерције није у стању да послужи као основа за проучавање кретања у гравитационим пољима. Али је Ајнштајн пошао и даље.

На свакој површини, ма како она била крива, постоје извесне линије које у једној битној особини показују велику аналогiju са обичним правим линијама. Ако се као битна карактеристика праве линије узме њена особина: да је она најкраћи пут између двеју тачака, онда ће очевидно и на свакој произвољној површини међу многобројним линијама, којима се могу везати две ма које тачке на површини, бити увек и једна таква линија која ће представљати најкраћи пут између тих тачака (идући, наравно, увек по површини). Те линије које представљају најкраћи пут између двеју тачака на произвољној површини познате су под именом геодезиске линије. На лопти ће, на пример, геодезиске линије бити највећи кругови, т.ј. кругови чији је пречник једнак лоптином пречнику; у равни су геодезиске линије обичне праве линије, и т. д. Геодезиске линије се могу, према томе, сматрати као нека врста генерализације обичних правих линија. Њихов аналитички израз може се генералисати и у произвољном вишедимензионалном простору. Пошавши са тога гледишта, Ајнштајн је основни закон кретања у гравитационом пољу формулисао овако: светска линија једног тела које се налази у пољу гравитације јесте геодезиска линија. Лако је увидети да овај закон садржи класични закон инерције као специјалан случај. Јер ако на тело не делују никакве силе, т.ј. ако апстрахујемо гравитацију, онда простор неће бити „крив“ него „раван“, па ће зато геодезиске линије у њему бити обичне праве линије. Али овај закон, сам за себе, није још довољан за проучавање појава у гравитационим пољима. Зато је потребно знати још и кривину одговарајућег простора, т.ј. начин како распоред материје утиче на кривину простора, јер према разним кривинама биће и геодезиске линије различите. И Ајнштајну је пошло за руком да нађе једначине поља гравитације које нам дају могућност да за сваки дати распоред маса израчунамо одговарајућу кривину простора. Тиме је зграда нове теорије гравитације била довршена. Њена суштина је, дакле, у овоме: распоред материје даје нам могућности да израчунамо кривину простора, а кад нам је позната кривина простора, онда можемо наћи и геодезиске линије које представљају светске

линије тела у посматраном простору. На тај начин је решен општи проблем гравитације. Као што се види, Ајнштајнове једначине поља играју у новој теорији гравитације улогу Њутновог закона гравитације, док основни закон кретања у гравитационим пољима (став о геодезиским линијама) одговара закону инерције који је у Класичној Механици познат и под именом првог Њутновог закона кретања (*lex prima*).

Како је нова теорија гравитације изведена доследним математичким спровођењем идеје општег релативитета, није никакво чудо што она у потпуности одговара захтеву општег принципа релативитета, што није био случај, као што знамо, са Њутновом теоријом гравитације. Ајнштајнов основни закон кретања важи универзално: за све могуће координатне системе, јер једначине геодезиских линија, по дефиницији, не зависе уопште од координатног система. Исти је случај и са Ајнштајновим једначинама поља, које одређују кривину простора: и оне задржавају исти облик у свима могућим координатним системима; јер кривина простора зависи искључиво од распореда материје, па се зато једначинама које одређују ту кривину може дати такав облик који неће зависити од избора координатног система. Ајнштајнова теорија гравитације довела је одговарајуће законе одиста на такав облик који у свима могућим координатним системима остаје исти: тиме је потпуно испунила захтев општег принципа релативитета. То је прво велико преимућство нове теорије над старом, са математичко-филозофског гледишта посматрајући. Али оно није и једино.

Ајнштајнова теорија гравитације, у којој Општа Теорија Релативитета достиже своју кулминацију, изграђена је, као што се види, на основама које немају, принципијелно, ничег заједничког са Њутновом теоријом. На место старих појмова једнаког или убрзаног кретања, у новој теорији фигуришу геодезиске линије; на место сила из старе теорије, у новој теорији се има посла са кривином простора: као што се види, нова теорија оперише сасвим новим елементима.

Иако по форми знатно компликованија од старе, нова теорија је однела победу над старом, јер је успела да објасни и оне појаве које стара теорија није била у стању да објасни. Ајнштајнова теорија гравитације обухвата Њутнову као специјалан случај. У slabим гравитационим пољима и под претпоставком да се масе крећу брзинама које су мале према брзини светлости, једначине нове

теорије гравитације своде се на Њутнове једначине које се могу сматрати као прва апроксимација једначина нове теорије. Тек са повећавањем тачности рачуна појављују се одступања од Њутнове теорије, али су та одступања, под горњим претпоставкама, тако мала да се у пракси у опште не могу констатовати. Ако бисмо нову теорију применили, на пример, на кретање пушчаног зрна у нашем пољу гравитације, дошли бисмо до резултата који се тако мало разликују од Њутнових да се те разлике ни најфинијим инструментима не могу констатовати. Само у јаким гравитационим пољима настају између старе и нове теорије такве диференције које се могу констатовати.

Два су феномена који су прославили Ајнштајнову Општу Теорију Релативитета. Први је већ раније поменуто скретање светлосних зракова у јаким гравитационим пољима. Астрономска посматрања и 1919. и 1921. и 1922. године сагласно су потврдила да светлосни зраци при пролазу поред сунчеве ивице скрећу према сунцу и то управо за онолико колико то захтева Ајнштајнова теорија. То је, као што смо већ поменули, био први триумф Опште Теорије Релативитета.

Други је феномен кретање Меркуровог перихела. Познато је да се, према првом Кеплеровом закону, планете крећу по елипсама у чијој се једној жижи налази сунце.¹⁾ Али Кеплеров закон важи само онда тачно кад се претпостави да на дотичну планету утиче само гравитациона сила сунца. У ствари, на сваку планету утичу, поред сунца, и све остале планете сунчаног система. Па се зато, кад се узму у рачун и ти утицаји, добијају звесна одступања од чисто елиптичних путања која се обично зову пертурбације путање. Једна таква пертурбација јесте и кретање перихела планета, које потиче отуда што елиптична путања једне планете не задржава стално један исти положај према звезданом небу него се лагано окреће у својој сопственој равни. Ова перихелна кретања наступају код свих планета и објашњавају се, у духу Њутнове теорије, пертурбационим утицајима осталих планета. Али Њутнова теорија није била у стању да објасни кретање Меркуровог перихела које износи 43 лучне секунде на 100 година. Међутим, по Ајнштајновој теорији, све елиптичне путање планета око сунца већ под утицајем саме сунчеве гравитације морају ротирати у својој сопственој равни, и рачуни показују да та ротација, у случају

¹⁾ Оно теме елипсе које је ближе сунцу зове се перихел.

Меркуровом, износи управо око 43 лучне секунде на 100 година, дакле управо онолико колико је и астрономским посматрањима констатовано, док је она код свих осталих планета тако мала да се данашњим средствима мерења не може констатовати. Разлог зашто се ово осетно одступање појавило баш у Меркуровом случају лежи у томе што је Меркур од свих планета најближи сунцу: тамо је сунчева гравитација врло јака, а ми већ знамо да су одступања Ајнштајнове теорије према Њутновој утолико већа уколико је поље гравитације јаче. Тако је објашњење кретања Меркуровог перихела било други триумф Опште Теорије Релативитета.

Трећи феномен који је још увек предмет испитивања јесте померање сунчевих спектралних линија према одговарајућим спектралним линијама што потичу од земаљских светлосних извора. Ово померање у правцу црвеног дела спектра јесте такође једна нужна конзеквенција Опште Теорије Релативитета и износи од прилике два милионита дела светлосне таласне дужине. Иако се данас оптичким методама могу и тако сићушна померања констатовати, јасно је да су таква мерења скопчана са највећим тешкоћама. Зато ова трећа значајна конзеквенција Опште Теорије Релативитета до сада још није одлучно потврђена, али, после свих успеха Опште Теорије Релативитета, не може бити никакве сумње да ће се и она обистинити и обележити још један триумф Ајнштајнове теорије.

Да поменемо најзад још једну конзеквенцију која са математичком нужношћу проистиче из Опште Теорије Релативитета и која је произвела читаву револуцију у схватању природе васионе, структуре космоса. Обично се мисли да је васиона бесконачна: на све стране налазе се звезде чија густина распореда очевидно варира, али се при свем том, у целини узевши, просечно може сматрати као свуда иста. Ма колико се путовало кроз васиону, увек ће се наилазити на звездане ројеве од прилике исте врсте и исте густине у погледу распореда. Један прост рачун, међутим, показује да је ово просто и тако распрострањено схватање у супротности са Њутновом теоријом. По Њутновој теорији, васиона мора имати неку врсту центра у коме густина распореда звезда достиже свој максимум: та густина би са раздаљином од тог центра опадала да се најзад потпуно изгуби у бесконачној празнини. Звездани свет би, по Њутну, био нека врста коначног острва у бесконачном океану празног простора. Али се ово Њутново

схватање не може одржати. Јер би по њему звездана светлост и поједине звезде одлазиле у бесконачност да се више никад не врате и не дођу у везу са осталим васионским објектима — што би значило да наше звездано острво непрекидно губи и енергију и материју: постаје све сиромашније, претвара се све више у пустињу. А са таквим схватањем научни, филозофски дух тешко се може помирити.

Општа Теорија Релативитета извршила је и на овом пољу преврат. Ајнштајн је математичким путем дошао, на први поглед, до чудног закључка: васиона је коначна али безгранична. Још много пре Ајнштајна у Математици се оперисало са такозваним сферним простором који би био тродимензионални аналогон сферних површина (Риман, Хелмхолц). Сферне површине (на пример лопта) немају нигде граница: ма у ком правцу се кретали колико хоћете по лопти, никад нећете наићи ни на какву границу, па ипак лопта није бесконачна: она је коначна али безгранична. Такве површине које су безграничне али не и бесконачне називају се затворене површине. Светски простор би, по Ајнштајну, био, попут сферних површина, затворен: коначан али безграничан. Сферна структура васионе била би тродимензионални аналогон сферних површина. Али то никако не значи да се васиона може представити као нека велика сфера (лопта), јер ма колико била велика та сфера, она је увек само један део простора, док се под сферним простором замишља једна целина без граница. Сферни простор се уопште не може очигледно представити: он се може само математички описати. У светлости Опште Теорије Релативитета слика васионе би изгледала, према томе, овако: васиона нема граница, али она представља једну хармоничну затворену целину. У њој је материја распоређена просечно једнаком густином¹⁾, и нема опасности да се може ма шта изгубити од ма-

¹⁾ „Полупречник“ васионе (R) везан је са, иначе врло малом, просечном густином материје (ρ) формулом

$$R^2 = \frac{1,08 \cdot 10^{27}}{\rho},$$

док је „запремина“ васионе дата јединачном

$$V = \frac{7 \cdot 10^{41}}{\sqrt{\rho^3}} \text{ cm}^3$$

терије и енергије: јер ни материја ни енергија не могу отићи у бесконачност пошто је васиона коначна.

И том хармоничном сликом света, чија се величина и лепота без Математике једва може наслутити, Ајнштајн је довршио величанствену зграду Опште Теорије Релативитета. —

САДРЖАЈ:

Предговор	Страна 3
---------------------	-------------

ПРВИ ДЕО

СПЕЦИЈАЛНА ТЕОРИЈА РЕЛАТИВИТЕТА

I. Један поглед на Класичну Механику. — Принцип инерције. — Релативитет кретања. — Апсолутни простор и апсолутно време. — Принципи релативитета	6
II. Је ли принцип релативитета општи природни закон? — Миклсонов експеримент. — Специјални принципи релативитета. — Сукоб између теорије и праксе. — Принцип констанције брзине светлости. — Сукоб између принципа релативитета и принципа констанције брзине светлости. — Ајнштајнова идеја за решење сукоба. —	14
III. Релативитет времена и простора. — Специјална Теорија Релативитета. — Појам истовремености и дефиниција времена. — Релативитет истовремености. — Релативитет просторних дужина. — Решење сукоба између принципа релативитета и принципа констанције брзине светлости. —	23
IV. Веза између простора и времена. — Лоренцове једначине. — Конзеквенције Лоренц вих једначина. — Бројни подаци. — Најважније физикалне конзеквенције. Специјалне Теорије Релативитета. — Специјална Теорија Релативитета и искуство. — Минковски-ев „свет“. — Унија простора и времена. — Суштина Специјалне Теорије Релативитета. —	34

ДРУГИ ДЕО

ОПШТА ТЕОРИЈА РЕЛАТИВИТЕТА

- V. Рестрикције Специјалне Теорије Релативитета. — Абсоlutни карактер неједнаког кретања? — Ротационо кретање. — Потреба генерализације специјалног принципа релативитета. — Став једнакости инертне и тешке масе: — Принцип еквиваленције. — Општи принцип релативитета. — Општи проблем гравитације. — 46
- VI. Практични значај Опште Теорије Релативитета. — Проучавање гравитационих поља — Криволиниско кретање светлосних зракова. — Први триумф Опште Теорије Релативитета. — Сукоб са Специјалном Теоријом Релативитета? — Смисао генерализације принципа релативитета. — Општи постулат релативитета. — Кинематички и динамички појам кретања. — Механика релативних кретања као основа Нове Физике. — 55
- VII. Тешкоће на путу развјетка Опште Теорије Релативитета. — Сукоб са Еуклидовом геометријом. — Појам координата у Општој Теорији Релативитета. — Даље релативирање појмова простора и времена — Не-Еуклидова геометрија. — Кривина простора. — Појам простора и времена у Општој Теорији Релативитета. — Унија простора, времена и материје. — 62
- VIII. Задатак једне теорије гравитације. — Суштина Њутнове теорије гравитације. — Појам светске линије. — Геодезиске линије. — Ајнштајнов основни закон кретања. — Једначине поља гравитације. — Суштина Ајнштајнове теорије гравитације. — Њутнова теорија има само приближну вредност. — Конзеквенције Опште Теорије Релативитета и искуство. — Хипотеза коначности света. — 71

ИСПРАВКЕ

— — —

На страни 16., на слици 1. треба да дође десно од тачке О (у правцу тачке А) + 30 а лево од тачке О (у правцу тачке В) — 30.

На страни 43. петнаести ред одозго треба кретање у место сретање.

