Гравитација

Пјер Бенетри

Ово поглавље о гравитацији омогућује вам да пођете на путовање кроз простор и време. Путовање почиње око 1590. године у Пизи, а завршава се хиљаду година касније, када експедиција, коју предводи капетан Мап (2543–2590), продире у центар ЦРНЕ РУПЕ SgrA*, која се налази у центру наше галаксије и остаје у њој заувек.

Галилеј и слободно падање тела

Заједно смо с Галилејем (1564–1642) у катедрали у Пизи. Његову пажњу заокупља лустер окачен у централном делу цркве, који лагано осцилује. Легенда каже да се баш у том тренутку десио слабији земљотрес у Тоскани. На Галилејево изненађење, иако окачени о ланце исте дужине, лустери врло различитих облика и тежина осциловали су истом фреквенцијом. Зашто?

Посматрање тих осцилација навело је Галилеја да приступи пажљивом изучавању слободног пада тела. Пре него што детаљније опишемо Галилејев приступ, корисно би било да наведемо какво је било стање научних сазнања његовог доба. Физика се заснивала на Аристотеловим принципима старим две хиљаде година. На пример, према Аристотелу, предмети су падали брзином која је пропорционална њиховој ТЕЖИНИ, па би, према томе, перо падало мањом брзином од неке кугле. Непосредна посматрања показују да слободно падање тела зависи од средине. Према томе, кугла од олова би различито падала у ваздуху, води и уљу. Аристотел је из тога извео закључак да је постојање средине неопходно да би се тело кретало, па је тиме одбацио идеју о постојању вакуума. У вакууму би тело падало тренутно, што је, признаћете, апсурдно. Нормално, слободно падање тела није и једино могуће кретање. Аристотеловци су разликовали природно кретање (кретање нагоре или надоле у зависности од тога да ли тело садржи више ваздуха или земље), присилно кретање, тј. кретање под дејством неке силе. Кретање звезда, које, изгледа, нити падају, нити се удаљавају, пошто се сваке ноћи поново појављују, открива једну нову врсту кретања, познату као вечно кружно кретање на небеској сфери.

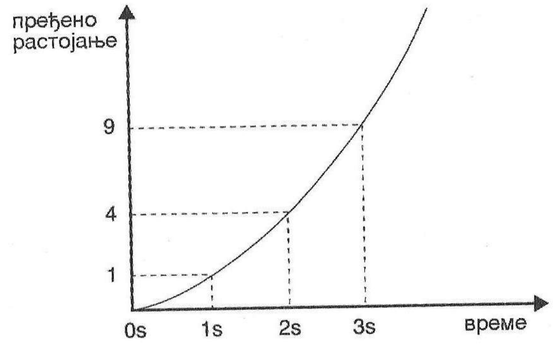
Ако пустимо да слободно падају кугла од челика и кугла од плуте с одређене висине, кретање ће бити сувише брзо да бисмо могли директно да га изучавамо, нарочито уређајима за мерење времена који су постојали у Галилејево време (легенда каже да је понекад употребљавао свој пулс, сећајући се вероватно својих студија медицине). Зато, да би могао да изучава кретање, искористио је стрму раван, која га је знатно успоравала.

Галилејева стрма раван

Материјал: нагнута раван дужине 5 метара; кугле од челика, дрвета, плуте или стиропора, по могућности исте величине; један хронометар. Нагните раван око десет степени у односу на хоризонталну површину; упоредите кретање три кугле дуж те равни. Детаљно испитајте кретање челичне кугле, обележавајући њене позиције после прве, друге и треће секунде (наше искуство показује да смо, пратећи кретање кугле и обележавајући њене положаје одока, уносили и одговарајуће грешке; зато је погодније да се на папирима означе бројеви који одговарају сукцесивним положајима кугле, па да затим понављамо експеримент више пута, при чему сваки пут фиксирамо погледом по један број назначен на папиру).

Експериментом помоћу стрме равни можемо да утврдимо колики је утицај средине на кретање кугле (на пример,

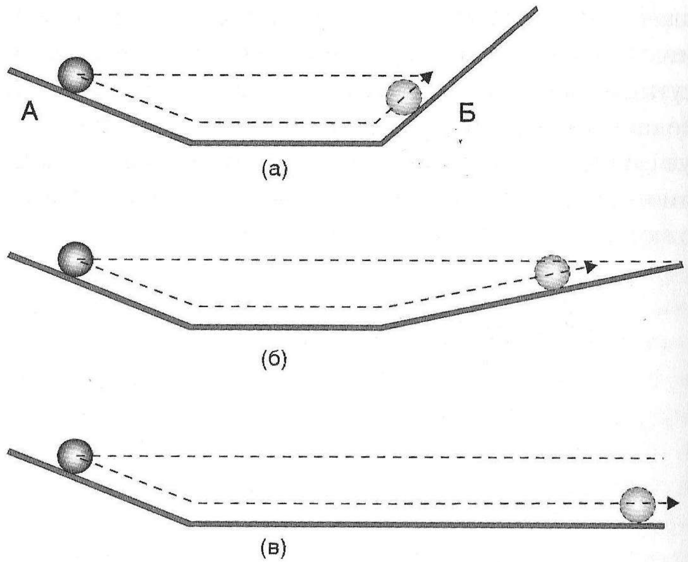
када је површина мање или више храпава, или је мање или више намазана воском). На тај начин утврђујемо и колики је утицај трења на кретање кугле. Уверавамо се да би у претходном експерименту, када је трење приближно једнако нули, однос пређеног растојања требало да се мења с квадратом протеклог времена, тј. као 1/4/9 када се посматрају положаји после 1/2/3 секунде (види слику).



Такво кретање је познато као „једнако убрзано“, тј. повећање брзине, односно убрзање је константно. Другачије речено, када је трење занемарљиво – кажемо да се одвија у вакууму – кретање је идентично за свако тело. Галилеј је на тај начин увео појам вакуума.

Експеримент: лист папира и књига падају на исти начин.
Материјал: лист папира и књига истих димензија
Узмите књигу и лист папира за једну ивицу и затим их пустите да падају. Поновите експеримент стављајући књигу на лист. Шта опажате и како то објашњавате? Проверите ваше објашњење стављајући лист на књигу. Какав резултат сад очекујете? Шта опажате? При оваквим условима лист није више изложен сили трења ваздуха и пада истом брзином као и књига!

Један други начин да схватимо појам вакуума је помоћу стрме равни, уз коришћење направе приказане на следећој



слици. Када не би било трења, кугла, пуштена низ стрму раван А, попела би се до исте висине уз стрму раван Б (а). У то можемо и непосредно да се уверимо променом храпавости нагнутих равни. Што је храпавост мања, кугла ће се пењати све ближе висини с које је пуштена да пада. Вакуум, дакле, одговара неком идеалном случају, тј. средини у којој слободно падање тела има једноставну и универзалну форму. Смањимо сада нагиб равни Б и, што је он мањи, кугла ће прећи веће растојање удесно (б). У граничном случају, када би раван В дошла у хоризонталан положај (в), кугла би требало да се креће бескрајно удесно (то би био идеалан случај вакуума, тј. без постојања силе трења), константном брзином, тј. брзином коју је стекла при спуштању низ раван А. Такво кретање, с константном брзином, омогућује нам да илуструјемо врло важан појам ИНЕРЦИЈЕ.

Према принципу инерције, ако на тело не делује никаква сила, оно ће се кретати константном брзином у инерцијалном референтном систему, једнаком почетној брзини

(или ће остати у стању мировања ако је у њему пре тога било). Тело наставља да се креће дуж своје путање јер поседује инерцију. Ако сад желимо да му променимо путању кретања, потребно је да делујемо силом на њега. Што је тело масивније, то му је и инерција већа. У ствари, МАСА тела је мера његове инерције, тј. отпорности у односу на промену кретања.

Честа је тенденција мешања два, с гледишта физике, различита појма масе и тежине, јер су те величине пропорционалне када се налазимо у земљином ПОЉУ ТЕЖЕ. Тежина неког тела је сила којом на њега делује поље теже. Маса је мера инерције. Прецизирајмо с неколико примера појам инерције.

Замислите да радите у руднику. Сигуран сам да више волите да гурате празна колица него колица пуна руде. Колица пуна руде имају већу масу, дакле и већу инерцију, па им је знатно теже променити кретање. Али ви, можда, мислите да је то зато што су колица тежа, па делују већом силом на шине и зато морате да употребите већу силу да бисте савладали већу силу трења? Поставља се питање: да ли више волите да зауставите пуна или празна колица? Верујем, празна. Треба опет да промените кретање колица (од брзине коју су имала на нулту брзину). Инерција колица се и у овом случају супротставља промени њиховог кретања. Управо се уверавамо да ће пуна колица пружати већу отпорност промени кретања од неке постојеће брзине на нулту брзину.

Експеримент

Материјал: чаша пуна воде, лист папира (сув), груба крпа

Поставимо лист на сто, а затим чашу на њега. Повуците затим лагано лист према себи. Шта опажате? Повуците затим лист нагло према себи (да бисте избегли да направите штету, препоручујемо да удаљите посматраче на одговарајуће растојање од стола...) Шта опажате? Упоредите инерцију листа с инерцијом чаше. Лист има масу знатно мању од чаше воде и могуће га је покренути много лакше. Чаша воде остаје на столу јер има већу масу, па тиме и већу инерцију.

Питања–одговори

Како астронаут у стању бестежинског стања прави разлику између празне и пуне кутије шећера (без отварања)? *Дрмајући их. Тежина је нула, али не и маса, дакле, имају инерцију.*

Да бисте закуцали ексер у сандук, да ли више волите да ударате чекићем по ексеру, или, пак, да притискате сандуком ексер постављен на главу чекића? *Чекић има мању масу од сандука, па тиме и мању инерцију, због чега се он знатно лакше покреће.*

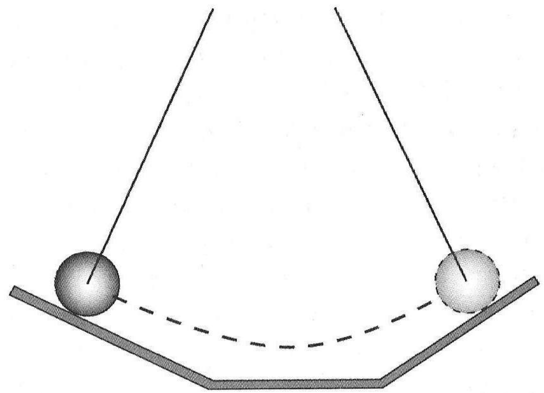
Вратимо се за тренутак на Галилејев експеримент са стрмом равни. Да би се на најефикаснији могући начин елиминисало трење, требало би се ослободити стрме равни, што би био најбољи начин да се „направи вакуум". Зато ћемо окачити куглу (видети следећу слику) и пустити је да осцилује као клатно. Из тог разлога је тога јутра 1590. године и почела прича, коју смо на почетку поменули, о томе зашто се Галилеј заинтересовао за кретање канделабра у цркви. Они „слободно падају", боље рећи, контролисано, у пољу теже, а чињеница да сви осцилују на исти начин даје драгоцену индикацију да сва тела падају на исти начин.

Клатна у цркви Дуомо

Материјал: три кугле коришћене за експеримент са стрмом равни; три конопца од по 2,5 m дужине; три стабилна држача.

Привежимо кугле за крајеве конопаца и направимо три клатна исте дужине. Пустимо их да истовремено осцилују с истом амплитудом. Одредите, односно измерите време за које клатна синхронизовано осцилују.

Током осциловања та три клатна можете да размишљате о лепоти овог експеримента и оном шта је он омогућио да се открије. Чињеница да тако различита тела осцилују с истим ПЕРИОДОМ наговештава да је иза таквог кретања фундаменталан закон физике, који се примењује на сва тела. Налазимо се, на овај начин, у срцу нечега што називамо



физичко резоновање, које је суптилна мешавина емпиријског резоновања (заснованог на реалном и мисаоном експерименту) и математичке формализације.

Укратко, кугле клатна не престају да „падају" у пољу теже (или, тачније, у стању су „контролисаног" слободног падања). Зашто су оне мање осетљиве на трење у ваздуху него када слободно падају? Зато што је трење пропорционално брзини а лукавство с клатном је у томе што се никада не достиже велика брзина (довољно је упоредити брзине осцилација канделабра у цркви Д'уомо с оним које бисмо постигли када би се ланац на ком виси прекинуо), па тиме ни велико трење.

Њутн и слободно падање Месеца

Галилеј је имао част да идентификује појмове масе и убрзања, као и да формулише закон слободног падања тела. Ипак, Њутн (1642–1727) је био тај који је схватио да је тај закон само специјалан случај привлачења које постоји између било која два тела одговарајуће масе. На пример, између кугле која слободно пада и Земље, или између два небеска тела. Такво привлачење је познато као „гравитационо".

Тежина неког тела, дакле, гравитациона је сила којом Земља делује на њега. Мери се, као и све друге силе, у њутнима (скраћеница је N).

Пођимо опет од Галилејевог закључка да сва тела падају с истим убрзањем. Убрзање се повећава с повећањем тежине, али се смањује са смањењем масе, јер је ова последња мера противљења промени кретања. У ствари, два пута већа маса имаће два пута већу тежину, али ће убрзање при томе бити исто, тј.:

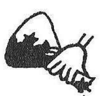
$$\frac{\text{тежина}}{\text{маса}} = \text{убрзање}$$

Тежина је сила. Ова релација, у ствари, јесте само специјалан случај нечега што називамо „Други Њутнов закон":

$$\text{сила} = \text{маса} \cdot \text{убрзање}.$$

Убрзање земљине теже је означено са g и износи око $10\ \mathrm{m/s^2}$ или $10\ \mathrm{N/kg}$. Ако означимо са P тежину а са m масу, можемо да напишемо једначину у следећем облику:

$$P = mg.$$



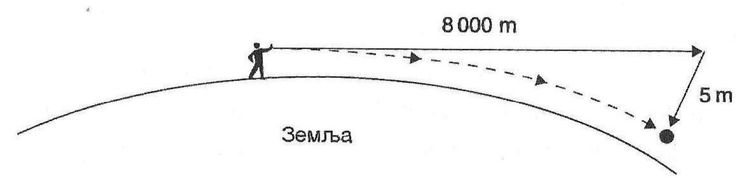
Колико сте тешки?

Мерење наше тежине помоћу ваге је, у ствари, мерење силе. Ако је, на пример, ваша маса 60 kg, ваша тежина износи 60 kg × 10 N/kg, односно 600 N. Вага би, дакле, требало да показује 600 N. Међутим, она директно конвертује пошто је градуисана у килограмима и даће меру ваше инерције, тј. 60 kg! Та вага би била лоше градуисана када би се мерили на Месецу.

Већ сам поменуо да је заслуга Њутна била у томе што је схватио да гравитациона сила исто тако делује између небеских тела као што су планете и звезде. Урадићемо сад неколико експеримената помоћу тениске лоптице (као што је то радио Галилеј), која ће ускоро имати „космичку" улогу (како је то замислио Њутн). Ако бацимо лоптицу увис испред нас, њена путања биће крива која је у математици позната као парабола (запажање Галилеја). Ово још указује на чињеницу да се иза једноставног бацања лоптице крије фундаменталан закон, познат као Закон слободног пада тела (опет Галилеј).

Попнимо се сад на други спрат. Наћи ћемо се на висини од 5 m од тла. Ако одатле пустимо да пада лоптица (без почетне брзине), она ће стићи на тло један секунд касније. Бацимо ли је сад с хоризонталном брзином од 1 m/s, њено кретање дуж вертикале остаће непромењено па ће лоптица стићи на тло за једну секунду. Разлика је једино у томе што ће, због постојања хоризонталне брзине лоптица прећи 1 m дуж хоризонтале и пасти на 1 m од нас. Ако бацимо лоптицу брзином од 10 m/s у хоризонталном правцу, она ће пасти на тло једну секунду касније, али на 10 m од нас. Ако замислимо да смо лоптицу бацили брзином од 8 000 m/s у хоризонталном правцу, она ће прећи тих 8 000 m за једну секунду и истовремено ће се спустити за 5 m.

Изабрао сам 8 000 m из следећих разлога. Пошто је Земља округла, онда ће при повлачењу линије дугачке 8 000 m од неке тачке на њеној површини њен супротан крај бити на висини од 5 m изнад земљине површине. Спустимо се сад у партер и бацимо лоптицу у хоризонталном правцу брзином од 8 000 m/s. После једног секунда она ће се наћи на растојању од 8 000 m од нас, али увек на истој висини у



односу на тло. Ако се њена брзина не смањи, она ће наставити да се креће око Земље. Дакле, послали смо лоптицу у орбиту око Земље!

Овде, очигледно, постоји проблем трења при кретању лоптице кроз ваздух. Оно је врло велико и при таквој брзини лоптица би се истопила услед топлоте која би се развила. Да бисмо избегли трење морали бисмо да изађемо из наше атмосфере и поновимо исти експеримент на висини од неколико стотина километара. Баш на оваквом принципу се остварује ланисрање вештачког сателита у орбиту око Земље. Сателит у орбити не пада на Земљу него се креће стално око ње. Један такав је и Месец, који је највећи природни сателит!

Баш у вези с оваквим разматрањима је и легенда о Њутновој јабуци. Посматрајући јабуку како пада с дрвета, Њутн се запитао да ли би она падала на исти начин ако би дрво имало висину 100 m, 1 000 m... или ако би било чак до Месеца. А шта би се десило када би Месец пао? Месец пада, као и јабука, у пољу Земљине теже, али његова хоризонтална брзина је довољно велика да га одржи у орбити око Земље. Униформно кружно кретање није савршено кретање небеских сфера, како је то замишљао Аристотел. Оно је само једно од могућих кретања у привлачном пољу Земље, описано истим законом као за лоптицу коју смо лансирали.

Кеплер (1571 – 1630) је прецизно поставио законе кретања планета, али је погрешно закључио да силе делују у правцу кретања. Управо смо видели, на примеру с Месецом, да то није тако, јер сила делује дуж осе Земља – Месец. Размотримо ово мало детаљније. Говорили смо о гравитационом привлачењу. Месец привлачи Земљу истом силом коликом Земља привлачи њега. Међутим, Месец је тај који се креће, јер је његова маса (па тиме и инерција) знатно ма-

ња. Овакво реципрочно привлачење је посебан случај ЗАКОНА АКЦИЈЕ И РЕАКЦИЈЕ. Њутн уопштава пример Земља – Месец. Тако, привлачна сила која делује у Сунчевом систему може да буде посматрана као да долази из центра Сунца, па у том случају Земља делује на Сунце привлачном силом која је по величини једнака сили којом Сунце делује на њу. Међутим, сада је Земља та која се креће, јер је њена инерција (маса) мања!

Ако претпоставимо да је Сунце сфера, аргументи симетрије нас убеђују да би гравитациона сила на великом растојању требало да буде идентична ако би његова маса била концентрисана у његовомо центру. Закључујемо (видети следећи експеримент) да се гравитациона сила мења обрнуто сразмерно квадрату растојања од центра. Та карактеристика је последица постојања извора који делује у свим правцима. Значи, на растојању r од извора ефекат се равномерно распоређује на сфери полупречника r, односно на површини која се мења као r^2.

Да бисмо се у ово уверили, замислите да на зид усмерите боју која излази из боце под притиском. Ако то радите у одређеном временском интервалу (рецимо, један минут) и ако се постављате сукцесивно на растојање 1 *m*, 2 *m* а затим 3 *m* од зида, дебљина нанетог слоја боје биће у односу 1, 1/4 и 1/9, респективно. Покривена површина биће, насупрот томе, све већа што сте удаљенији од зида.
На исти начин и ваше око примиће светлост одговарајућег интензитета. Ако сте на растојању од 5 *m*, 10 *m* или 15 *m* од неке свеће, интензитет примљене светлости биће у односу 1, 1/4 и 1/9.

Можемо сад све то укратко да поновимо. Увели смо јединствену силу, која описује интеракцију како између планета, тако и између Земље и неког тела које слободно пада. Назвали смо је гравитациона или сила гравитације. Два тела, маса m и M на међусобном растојању d (замислите да су у питању Земља и Месец), делују једно на друго привлачном силом F, која износи:

$$F = G\frac{mM}{d^2}.$$

где је G универзална грвитациона константа, названа још и Њутнова, која је врло мала (израчунаћемо је). Ову формулу сам написао јер је фундаментална и зато што на неки начин сажето представља сва претходна разматрања. Названа је Њутнов УНИВЕРЗАЛНИ ЗАКОН ГРАВИТАЦИЈЕ.

Поиграјмо се мало овом формулом, или нека то бар учине они који немају одбојност према математичким формулама. На пример, рекли смо да је тежина тела гравитациона сила којом на њега делује Земља. Ако замислимо тело масе m на површини Земље и применимо формулу на случај $M = M_T$, маса Земље, и $d = R_T$, растојање између Земље и тог тела, односно у овом случају је то полупречник Земље (6 000 km):

$$\text{тежина} = \frac{GM_3 m}{R_T^2} = Mx\frac{GM_T}{R_T^2}.$$

Сазнајемо да тежину тела можемо да изразимо у облику mg и да убрзање земљине теже можемо да повежемо с универзалном константом G (они који се не плаше изражавања преко степена за основу 10 могу лако да израчунају G полазећи од вредности за g, R_T и масе Земље $M_T = 6 \times 10^{24}$ kg, требало би да добију да је вредност за G око 6×10^{-11} N m²/kg²).

Питања–одговори

Колика је ваша тежина ако сте на висини од 6 000 *km*?
Колика је ваша маса?
Маса је очигледно непромењива, рецимо 60 kg. Што се тиче тежине, како се удаљавате од Земље, осећате мању гравитациону привлачност. Када се налазите на растојању два земљина полупречника од центра Земље, гравитациона сила се дели са 4 у односу на нулту висину (односно растојање од једног полупречника Земље). На површини Земље она је 600 N, док ће на поменутој висини бити 150 N. Међутим, немојте се нервирати, ваша маса је увек 60 kg.

На пример, сада знате довољно да бисте разумели скоро све суптилности феномена плиме и осеке. Она је резултат интеракције Земље, Месеца и Сунца. Пребацимо се сад у време почетка прошлог века да бисмо пронашли Алберта Ајнштајна (1879 – 1955). Ајнштајн је увођењем своје ОПШТЕ ТЕОРИЈЕ РЕЛАТИВНОСТИ направио револуцију у погледу наших концепција о гравитацији. Као што ћемо видети, он је показао да маса „закривљује простор“.

Међутим, пре него што то објаснимо, морамо да следимо пут Ајнштајнових размишљања у вези с простором и временом, а која су наведена у његовој СПЕЦИЈАЛНОЈ ТЕОРИЈИ РЕЛАТИВНОСТИ, датој 1905.

Ајнштајн и овалан балон

Придружујемо се Ајнштајну у возу. Завесе у вагону су навучене и, пошто се воз креће константном брзином, из вагона није могуће сазнати која му је брзина. Није, чак, могуће ни рећи да ли се креће. Једина индикација је у моменту убрзања (повећање брзине), или успорења (смањење брзине), током којих тело осећа дејство силе уназад или унапред.

Наш референтни простор је вагон, у односу на који „одређујемо положаје“. То се у физици назива РЕФЕРЕНТАН СИСТЕМ. Крава која посматра воз који се креће очигледно има неки други референтан систем (вероватно с другом скалом вредности, али овде већ напуштамо физику). У њеном референтном систему наш воз се креће.

Следећи Галилеја, Ајнштајн подиже то опажање на ниво постулата. Сви закони физике су исти у свим инерцијалним референтним системима. Назива их, у част Галилеја, ГАЛИЛЕЈЕВИМ РЕФЕРЕНТНИМ СИСТЕМИМА.

Овај Ајнштајнов постулат има врло значајне последице, па, чак, доводи у питање и наше схватање времена. Ето зашто је потребно без устручавања путовати с Ајнштајном! Погледајмо, ипак, све ово мало детаљније.

Закони ЕЛЕКТРОМАГНЕТИЗМА, које је на крају XIX века дао Максвел (1831 – 1879), укључују као главну константу брзину светлости, која је означена са c ($c = 300\,000$ km/s). Овде нема ничег изненађујућег, јер електромагнетизам укључује и оптику, а електромагнетни таласи (укључујући и светлост) простиру се брзином c у вакууму. Пошто су сви закони физике исти у свим Галилејевим референтним системима и брзина светлости мора да буде иста.

Ово, на први поглед, безазлено тврђење повлачи за собом релативност времена у односу на посматрача који га мери. Вратимо се сад у вагон, развуцимо завесе и изведимо следећи мисаони експеримент (видети шему на 122. страни). Емитован је врло кратак светлосни сигнал, а хронометром меримо време потребно да он дође до огледала окаченог о плафон, одбије се од њега и поново врати у своју полазну тачку (слика под а на 122. страни). Имамо стандардну релацију:

$$\frac{\text{растојање}}{\text{време}} = \text{c}.$$

Снабдели смо се још једним хронометром, који смо ставили код краве која посматра како се воз креће, а који остварује слично мерење. Слично, али ипак различито! Разложимо кретање воза (слика б, страна 122). Растојање које пређе светлосни импулс од момента емитовања до момента његовог одбијања од огледала знатно је дуже него у

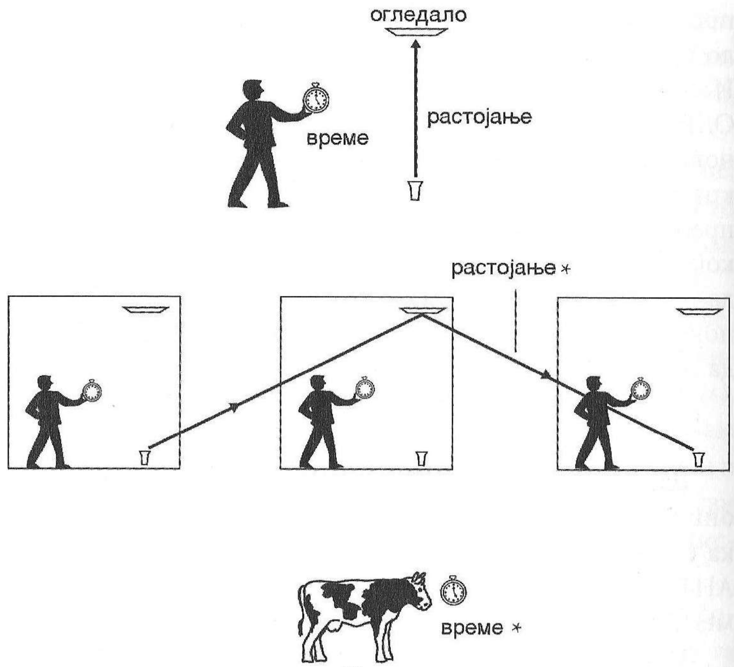
претходном случају. Разлог томе је чињеница да је огледало премештено, услед кретања вагона, у односу на краву. Исто важи и за растојање које прелази сигнал између ОДБИЈАЊА од огледала и повратка у полазну тачку. Ово ново растојање, мерено у референтном систему везаном за краву, биће означено као растојање ∗. Пошто је однос пређеног растојања и времена брзина светлосног сигнала, која може да буде само брзина светлости c, неопходно је и да хронометар у референтном систему везаном за краву показује једно друго време, које означавамо с време ∗, тако да се добија једначина:

$$\frac{\text{растојање}^*}{\text{време}^*} = \text{c}.$$

Дакле, када упоредимо два хронометра, уочићемо да они показују различито време између емитовања и повратка светлосног импулса. Беспредметно је овде веровати у АНТРОПОЦЕНТРИЗАМ, јер крава има исто толико аргумената као и ми, бар у разматраном случају.

Пошто је растојање мерено изван воза највеће (растојање ∗ > растојања), измерено време у систему везаном за краву је највеће (време ∗ > време), иста сукцесија догађаја, изгледа, одузима мање времена у покретном референтном систему (у овом случају је то воз). Часовник у покрету изгледа иде спорије. Тај феномен је у физици познат под називом „дилатација времена у покретном референтном систему“. Дилатација времена је на изванредан начин експериментално измерена. Прво су синхронизована два атомска часовника, а затим је један од њих стављен у авион који је летео двадесет четири часа. Када су после спуштања авиона часовници упоређени, констатовано је да онај часовник који је био непокретан иде брже од оног који је био у авиону.

Разумљиво, наш пример с возом има само педагошки значај. Дилатација времена у возу је потпуно занемарљива. Било би неопходно да брзина воза буде упоредива с брзином светлости да би то било другачије.



(б)

Шта се дешава када брзина покретног референтног система тежи брзини светлости? У том случају се дилатација времена бескрајно повећава, па, на неки начин, можемо да кажемо да је време стало. Из тог разлога брзина светлости представља неку граничну вредност брзина у оквиру теорије релативности.

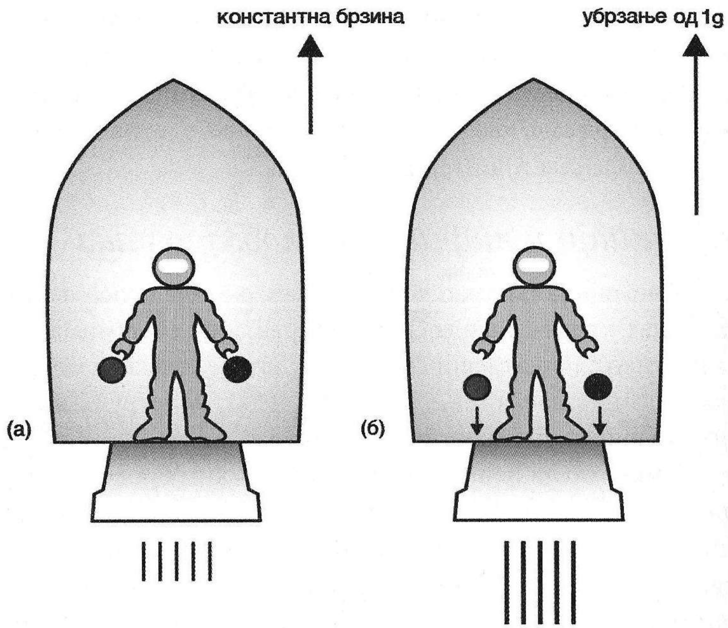
Ако је појам времена постао релативан, то важи и за појам простора. Ако би брзина нашег воза била приближна брзини светлости, онда би фудбалска лопта изгледала непокретном посматрачу (наша крава) издужена, и то у правцу кретања воза. Имали бисмо, дакле, једну овалну фудбалску лопту! Овај феномен је назван „КОНТРАКЦИЈА ДУЖИНА у покретном референтном систему“. Наглашавамо да се

деформација (контракција) остварује само у правцу кретања. У правцу нормалном на кретање дужине остају исте, тј. непромењиве су. Дакле, појмови простора и времена, које ћемо од сада називати простор–време, знатно су измењени увођењем Ајнштајновог постулата.

Ајнштајн и лифт који слободно пада

Ајнштајн је сматрао да је ограничење које уноси његов постулат у вези с Галилејевим референтним системима недопустиво с тачке гледишта физике. Зато је, тражећи могућности за превазилажење тог ограничења, конструисао општу теорију релативности.

Заменимо ли наш воз неким свемирским бродом довољно удаљеним од Земље, тако да на њега не делује њена привлачна сила, наћи ћемо се у бестежинском стању. Ако се свемирски брод креће униформно и ако пустимо из руку лопту од дрвета и лопту од олова, оне ће непокретно лебдети у броду. Имају исту брзину као брод и наставиће да га прате при његовом кретању (a, на следећој слици). Ако брод изложимо неком убрзању, рецимо од 1 g и ако поново пустимо лопте из руку, изгледаће нам као да оне падају (b). У ствари, настављају да се крећу брзином коју су имале када смо их пустили да падају, али, пошто брод убрзава, тј. повећава му се брзина, он ће се померати у односу на кугле. Како се и ми померамо с њим, то ће нам изгледати као да се померају кугле. Једноставно питање у вези с очигледним кретањем. Међутим, Ајнштајн је то поново подигао на ниво постулата! Он нам каже да у физици не постоји начин на који бисмо могли да направимо разлику између кретања кугли услед дејства Земљине гравитације (кажемо: у ГРАВИТАЦИОНОМ ПОЉУ Земље, гравитационо поље постаје за нас једноставно један регион простора у ком су тела изложена дејству гравитационе силе) и кретања кугли у свемирском



броду који се креће убрзано. Два феномена – гравитација и убрзање – еквивалентна су иако су врло различитог порекла.

Ту еквивалентност можемо да покажемо и на следећи начин: вратили смо се на Земљу и затворили у собу са спуштеним ролетнама, тако да немамо никаквог контакта са спољњим светом. Испустимо ли опет две кугле, оне ће овог пута лупити о земљу. Не можемо да уочимо разлику између кретања лопти овде и оног у свемирском броду. Другачије речено, све док не подигнемо ролетне и не погледамо око нас, не можемо да кажемо да ли смо на Земљи или у свемирском броду изложеном дејству убрзања од 1 *g*.

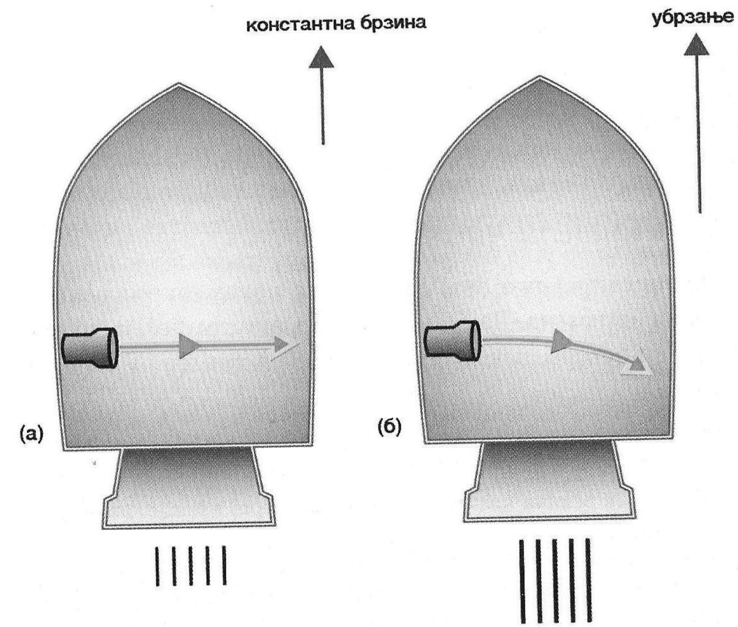
Ако су гравитација и убрзање еквивалентни, требало би да ефекат гравитације поништимо неким одговарајућим убрзањем. Ништа лакше од тога! Довољно је да током спу-

штања лифта пресечемо кабл на ком он виси. Ајнштајн тврди да није могуће разликовати наше кретање унутар лифта од кретања астронаута у свемирском броду који се креће униформно. Изгледа да бисмо лебдели у лифту који слободно пада исто као астронаут у бестежинском стању.

У сваком случају, има свемирских путовања с трагичним крајем.

Ајнштајнов постулат којим је установљена еквивалентност између убрзања и гравитације назван је „ПРИНЦИП ЕКВИВАЛЕНТНОСТИ“. Опажања остварена у неком референтном систему који се креће убрзано није могуће разликовати од опажања остварених у гравитационом пољу.

Применимо ово на светлост. Заузмимо своје место у свемирском броду и емитујмо светлосни зрак у хоризонталном правцу. Ако се свемирски брод креће униформно (а),



према нашим досадашњим сазнањима, светлост ће се простирати по правој линији (то је тако на Земљи, а тиме и у сваком покретном референтном систему који се креће униформно у односу на Земљу). Али, то није тако ако се свемирски брод креће убрзано. Исто као кад се ради о кугли, свемирски брод наставља да се убрзава у односу на емитовану светлост и, посматрачу у свемирском броду изгледа да светлост пада (б). Њена је путања тад крива линија. Али, ако је путања светлости крива линија у свемирском броду који се убрзано креће, она је, према принципу еквивалентности, такође крива линија у неком гравитационом пољу. Светлосни зраци се савијају у јаком гравитацоном пољу. Тај ефекат уочен је у вези са светлосним зрацима који су пролазили поред Сунца (који су били изложени гравитационом пољу Сунца, знатно јачем од гравитационог поља Земље зато што је Сунце знатно веће масе).

Питање–одговор

Како можемо да се ослободимо Сунчеве светлости да бисмо опазили криљење светлосних зрака?

Посматрањима за време помрачења Сунца. Прво такво посматрање било је за време тоталног помрачења Сунца 1919.

Омлитавели часовници

Интерпретираћемо овај ефекат као доказ закривљености простор–времена. Да бисмо боље разумели појам закривљеног простора, извешћемо мали експеримент у спаваћој соби.

На великом кревету за спавање

Материјал: велики кревет који није јако тврд; велики камен; једна кугла

Поставимо мадрац. Котрљајмо куглу по његовој површини дуж неке праве линије. Поставимо камен у центар кревета и поновимо експеримент, али тако да се кугла приближи камену и да га не додирне.

Кугла ће тада ићи по закривљеној линији, која се назива још и ГЕОДЕЗИЈСКА линија. Што је камен тежи, удубљење у мадрацу биће веће а путања кугле закривљенија. На потпуно исти начин Сунце, које је врло масивно, закривљује простор око себе а светлосни зраци иду по геодезијској линији.

Претходни експеримент требало је да нам наговести шта представља појам закривљеног простора. Погледајмо детаљније разлоге који нас наводе на то да уведемо закривљен простор–време.

Наше путовање нас баш из тог разлога води на вашарске свечаности. Атракција која нас необично интересује је један од мањежа у форми широких кружних платоа, који се веома брзо окрећу око себе. На њима можемо врло једноставно да експериментишемо с ефектима центрифугалне силе. На овом вашару је плато у облику старог џепног сата.

Пењемо се на плато и носимо метар и неколико џепних сатова да бисмо направили неколико мерења. Упозорење онима који су осетљиви и могу да имају стомачне проблеме, јер, да бисмо измерили ефекте које тражимо, потребно је да се платформа креће брзином приближном брзини светлости. На пут!

Пошто смо постигли брзину крстарења, почињемо с тестирањем центрифугалне силе. Што је растојање од центра веће, осећаћемо јаче дејство те силе. Центрифугална сила зависи од убрзања, које је својствено сваком кружном кретању. Закључујемо да се центрифугална сила повећава како се ми удаљавамо од центра платформе и достиже свој максимум када смо на периферији.

Настављамо наша истраживања мерећи полупречник платформе, који износи 5 m. Затим меримо спољни обим. Мерење је a priori сувишно, јер је обим једнак 2π пута полупречник, или приближно 31,4 m. Нашим мерењем добијамо да је 28 m. Да ли је то последица непрецизности мерења? Из тог разлога понављамо мерење више пута и налазимо приближно 28 m, с грешком од око 30 cm.

У ствари, ми смо већ доста тога научили, тако да разумемо шта се дешава. Уочимо прво да се при кружном кретању платформе свака тачка платоа креће по кругу. При мерењу полупречника ми, у ствари, обављамо мерење нормално на кретање. У правцу нормалном на кретање нема контракције дужине (ово смо описали у вези са случајем сферног балона, који је због кретања постао овалан). Супротно томе, када смо измерили обим, мерили смо у правцу кретања, чиме смо измерили и контракцију дужине, и зато смо добили 28 m уместо 31,4 m. Што се платформа брже креће, то ће и ефекат контракције бити значајнији. Другачије речено, у нашем покретном референтном систему однос обима и полупречника није једнак 2π. Ово нас удаљава од еуклидског простора, на који смо се навикли, а то је једна карактеристика закривљеног простора (видети објашњења дата ниже). Подсетимо се да наша вашарска платформа има облик џепног сата, али омлитавелог, јер му се обим мења с брзином ротације. То је један нееуклидски сат! Свака сличност са славном Далијевом сликом „*Трајност сећања*“ није сигурно случајна. Дали ју је насликао 1931. као метафору Ајнштајновог закривљеног простор–времена. Према речима самог сликара: „*Далијеви млитави часовници нису ништа друго до нежан, екстравагантан, усамљен камамбер (француски сир) као параноична критика простора и времена*“ (Дали, 1968).

Идеју за ову слику добио је посматрајући, на крају једне вечере, како се разлио по тањиру камамбер (врста француског сира). После јабуке наш космички мени се мало-помало комплетира.

Ми смо очигледно врло далеко од космичких зрака који прате криву геодезијску линију при проласку поред Сунца. Па ипак! Управо смо констатовали да је простор закривљен у убрзаном референтном систему платформе. Разумели смо да се исти ефекат постиже убрзавањем или помоћу гравитационог поља. Неко гравитационо поље, дакле, закривљује простор.

Шта се при свему томе дешава с временом? Ако по платформи која се окреће разместимо будилнике на различитом растојању од њеног центра, констатоваћемо да, што се више удаљавамо од центра, време ће се више успоравати! То је једноставно ефекат дилатације времена у покретном референтном систему. Што се више приближавамо периферији платформе, брзина постаје све већа, а због тога је и ефекат дилатације времена већи. Закључујемо да време тече знатно спорије тамо где је убрзање знатно веће (тј. ближе периферији платформе). Дакле, време тече знатно спорије тамо где је гравитационо поље интензивније.

Завршимо експериментишући са закривљеним простором.

Мало нееуклидске геометрије

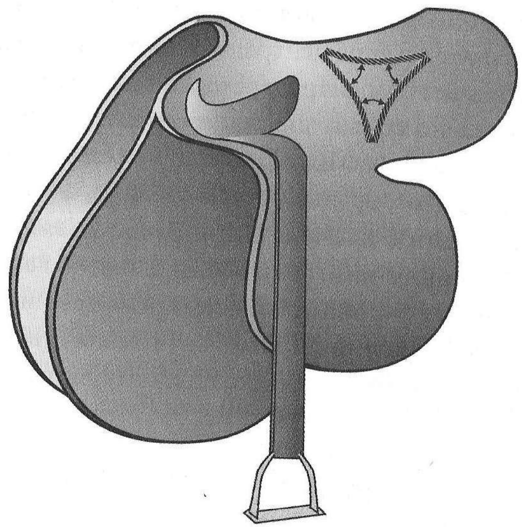
Материјал: глобус (надуван балон може да буде довољан за ову прилику), неколико вунених влакана

Сфера представља нама најблискији закривљен простор. Помоћу ње можемо да верификујемо неколико чињеница поменутих у претходном тексту.

а) Нацртајмо круг на глобусу. Да бисмо то урадили, обележимо једну тачку, причврстимо у њој један крај вуненог конца, а другим крајем опишимо круг на глобусу. Измеримо полупречник круга (одговарајућа дужина конца) и његов обим (другим концем) и упоредимо однос обима и полупречника с вредношћу коју очекујемо према еуклидској геометрији. Запазићемо да је однос обима и полупречника мањи од 2π.

б) У еуклидској геометрији збир углова у троуглу је 180°. Означите три тачке на глобусу и формирајте вуненим концем троугао („сферни"). Измерите три угла троугла (пажња, да би то мерење било тачно, требало би да имате савитљив угломер, јер се мери на сфери) и израчунајте колики је њихов збир. Требало би да добијете број већи од 180°. Ово је карактеристика универзума познатог као затворени (сфера је један „затворени" предмет). Универзум се сматра отвореним ако је збир углова неког троугла у њему мањи од 180°. Да ли можете да замислите неку површину на којој би могао да се нацрта један такав троугао?

Једну једину! Ако до ње случајно дођете, поновите на њој мерење са своја три вунена конца.



У мисији према црној рупи

Када се са Земље лансира свемирски брод, потребно му је саопштити брзину довољну да може да изађе из земљиног гравитационог поља. Брзина мора да буде већа од вредности коју називамо брзина ослобађања.

Ако би Земља била масивнија планета (или звезда), поље њеног привлачења било би знатно јаче, па би и брзина ослобађања била знатно већа.

Замислимо тако масивну звезду да би брзина ослобађања требало да буде већа од 300 000 km/s, тј. већа од брзине светлости *c*. Пошто је брзина светлости *c* највећа могућа брзина, ниједно тело не би било у могућности да напусти ту звезду, чак ни светлост, јер, ако се с површине звезде емитује светлосни зрак вертикално увис, тај зрак (закривљен, као што смо то већ видели, јаким гравитационим пољем) поново би пао на ту звезду. Такав астрофизички објект је познат под називом *црна рупа*.То није у правом смислу речи нека звезда, али се мисли да она може да се појави као последица колапса неке звезде.

Прецизније речено, у некој звезди постоји равнотежа између два ефекта:

– гравитационог привлачења између њених различитих елемената (оно тежи да изврши контракцију звезде),
– нуклеарних процеса при којима се ослобађа енергија (они стварају ефекат дилатације звезде).

Када нестане нуклеарног горива, ефекат дилатације престаје и звезда гравитационо колабира. Ако је звезда довољно масивна, може да се формира црна рупа.

Црну рупу карактерише сферна површина позната као ХОРИЗОНТ ДОГАЂАЈА. Све што продре у тај хоризонт (материја или зрак) или се нађе унутар њега, не може више да изађе ван њега, јер је захваћено гравитационим пољем црне рупе. Било би погрешно веровати да оно што прође хоризонт црне рупе бива одмах здробљено гравитационим ефектима. Често употребљаван сликовит приказ хоризонта црне рупе је река узводно од водопада. Пливач у таквој реци нема потребе да размишља о опасностима водопада ако плива довољно узводно, али, ако се приближи водопаду, проћи ће у неком тренутку замишљену линију, после које више није у могућности да се ишчупа из струје која га је захватила. Чак и када је у питању одличан пливач, он нема довољно времена да доплива до обале пре него што га струја одвуче ка водопаду. Међутим, он није ништа опазио када је прешао ту замишљену линију „хоризонта" водопада.

Исто као што у нашем примеру водопад представља катастрофу, тако и центар црне рупе представља крајње одредиште свега што падне у црну рупу. Називамо га СИНГУЛАРИТЕТОМ зато што геометрија простор – времена има сингуларно понашање. То сингуларно понашање блиско је познатом почетном сингуларитету, названом велики прасак. Разлика је у томе што, када се враћамо у времену, достижемо тај сингуларитет а, све док смо ван хоризонта црне рупе ми смо заштићени од тог сингуларитета, јер никаква информација не долази из унутрашњости хоризонта. Нико није у могућности да направи путовање с друге стране хоризонта да би „видео" сингуларитет, а затим да се врати и каже нам шта је видео.

То нас, сасвим природно, враћа на причу о мисији капетана Мапа, која је имала за циљ спуштање у унутрашњост црне рупе SgrA*. Та врло масивна црна рупа требало би да се налази у центру наше галаксије. Када свемирски брод буде пришао хоризонту црне рупе и затим га прошао, ништа драматично се неће десити с тачке гледишта путника свемирског брода. Слике емитоване на Земљу (помоћу електромагнетних таласа) свакако ће показати нешто сасвим другачије. Пошто се свемирски брод приближи хоризонту, јавиће се закашњење слика које се емитују са свемирског брода у односу на оне које се примају на Земљи. То закашњење биће све веће како се свемирски брод буде приближавао хоризонту. Покрети капетана Мапа на нашим земаљским екранима биће све успоренији, а једног тренутка његов поздравни гест постаће потпуно непокретан. Нешто касније слике које емитује свемирски брод постаће све

слабије видљиве да би затим и потпуно нестале. Емитовани електромагнетни таласи са свемирског брода враћају се у унутрашњост црне рупе. Авантура капетана Мапа се наставља, можда и није пријатна, али ми о томе више ништа не знамо.

Литература

Често се враћамо Галилејевим првим резоновањима у модерној физици, ослоњеним на експерименте (стварне и мисаоне). Препоручујемо вам да прочитате неколико првих страна одељка „Слободно падање тела" из *Дијалога о две нове науке (или два погледа на свет)* (превод Maurice Clavelin, PUF, coll. Epiméthée 1995). Сјајне су.

Увод у класичну и модерну физику без (скоро) формула је дат у изврсној књизи *Концепти физике* (*Conceptual Physics*, P.G. Hewitt, ed. Scott, Foresman and Company). Садржи доста малих експеримената, од којих су неки представљени у овом тексту.

Велики физичар Џорџ Гамов је измислио личност М. Томпкинса, чије авантуре су му омогућиле да на једноставан начин опише модерну физику. Књигу, чији је он херој, управо је завршио Расел Станар (Russell Stannard) и издао под називом *Нови свет господина Томпкинса* (*Le Nouveau Monde de M. Tompkins*, Le Pommier, 2002). Прво поглавље књиге, „Ограничена брзина у граду", за нас је врло интересантно. Гамов замишља град у ком би брзина светлости била ограничена на 36 km/h. Сви релативистички ефекти о којима је било речи (дилатација времена, контракција дужине) постају део свакодневице. У следећем поглављу обајшњени су ти ефекти.

Ако желите да детаљније упознате црне рупе, потражите књигу *Црне рупе* (*Les Trous Noirs*, Jean-Pierre Luminet, ed. du Seuil, col. „Points Sciences", 1992), посебно поглавље 9.

На Интернету

Ако вас интересују прелепе слике црних рупа или других астрофизичких објеката, посетите сајт телескопа Хабл:
http://hublle.esa.int/