Пространство-времето: само математическо пространство или реален четиримерен свят?

Защо отговорът е от решаващо значение за фундаменталната физика

Веселин Петков
Минковски институт
Монреал, Канада

MINKOWSKI INSTITUTE

Ситуацията във фундаменталната физика е безпрецедентна

От една страна, повечето физици разглеждат пространство-времето само като математическо пространство, което не представя реален четиримерен свят.

От друга страна обаче, експериментите, които потвърдиха и продължават всекидневно да потвърждават кинематичните релативистични ефекти (като релативистичното удължаването на времето в СТО и релативистичното гравитационно скъсяване на времето в ОТО), биха били невъзможни, ако светът не беше четиримерен. Например GPS (глобалната система за позициониране) не би функционирала в тримерен свят.

В този смисъл, **реалността на пространство-времето, т.е. четиримерността на света, е експериментален факт.**

Ясното осъзнаване, че реалността на пространство-времето е **експериментален факт** е от решаващо значение за фундаменталната физика, защото физиката на един тримерен свят се различава радикално от физиката на един четиримерен свят:

- В тримерен свят физиката разглежда *движения* и *взаимодействия* на тримерни частици и тела.

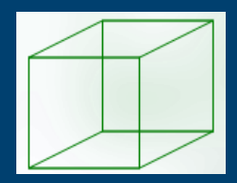
- В четиримерен свят физиката се занимава с взаимовръзките между световните линии на тримерни частици и тела и със „статичните“ деформации на криви (негеодезични) световни линии.

Най-често даваните отговори от физици на въпроса за реалността на пространство-времето са:

- Тримерно или четиримерно представяне е въпрос на описание
- Това е въпрос с който се занимава философията

Част от изкуството да се занимаваш с фундаментална физика е да определиш дали някои теории са наистина „просто описания“ – като Нютоновата, Лагранжовата и Хамилтоновата формулировки на класическата механика – или пък представят характеристики на света. Размерността (3D или 4D) на света е негова фундаментална характеристика и затова не е въпрос на описание.





Твърдението на физици, че с въпроса за **реалността на пространство-времето,** т.е. за **четиримерността на света,** се занимава философията е повече от удивително. Размерността на света се определя от експерименталната физика.

MINKOWSKI INSTITUTE

Много вероятно е неадекватните възгледи за природата на пространство-времето през последните сто години да стоят зад липсата на революционни открития сравними с теорията на относителността и квантовата механика.

Това се случва въпреки:

- Усилията на много брилянтни физици.
- Невиждания напредък в приложната физика и технологиите.
- Огромното повишаване на прецизността при експерименталното тестване на нови хипотези.

За да обсъждат значението и последиците от откритието на пространствено-времевата структура на света от Херман Минковски, всяка година Институтът „Минковски“ организира по едно събитие от две двугодишни поредици конференции:

- Международни конференции за природата и онтологията на пространство-времето (International Conferences on the Nature and Ontology of Spacetime)
- Срещи „Херман Минковски“ върху основите на физиката на пространство-времето (Hermann Minkowski Meetings on the Foundations of Spacetime Physics)

Тези конференции събират изследователи от цял свят.

Първите три конференции за пространство-времето — през 2004, 2006 и 2008 г. — се проведоха в Университета „Конкордия“ в Монреал, Канада.

След основаването на Института „Минковски“ конференциите за пространство-времето започнаха да се провеждат в курорта Албена, България. Срещите „Херман Минковски“ започнаха през 2017 г.

Няколко думи за Института - основан преди 15 години на 12 октомври 2011 г.

MINKOWSKI INSTITUTE

За да могат физиците със сигурност да разберат защо реалността на пространството-времето е експериментален факт, бих предложил да следват, дори и временно, два ръководни принципа (които са част от изследователската стратегия на Minkowski Institute, извлечена от методите, довели до най-големите открития във физиката):

1. Джон Уилър нарече първия принцип *the „first moral principle“* [1]:

“*Never make a calculation until you know the answer*”

което е точно обратното на (злополучния) девиз *„shut up and calculate“*.

В действителност този принцип е бил използван още от Галилео Галилей, както и от Исак Нютон, Алберт Айнщайн, Херман Минковски и много физици от последните две столетия, сред които бих искал специално да спомена Ричард Файнман.

1. E. F. Taylor, J. A. Wheeler, *Spacetime Physics*, 2nd ed. (W. H. Freeman, New York 1992), p. 20

2. Прилагане на програмата на Херман Минковски за геометризиране на физиката, т.е. разглеждането на физиката на реалното пространство-време (физиката на четиримерния свят) като ***геометрия*** на пространство-времето.

Както ще видим, Минковски успя да разшифрова дълбокия физически смисъл на експерименталната невъзможност да се открие равномерното движение на тела в абсолютното пространство - всички експерименти дадоха отрицателен резултат, защото … абсолютно пространство не съществува в Природата; това, което съществува е четиримерен свят, чието четвърто измерение се състои от всички моменти на времето дадени наведнъж (като на кинолента). Непрекъснатото движение на тела, което всекидневно наблюдаваме, е всъщност завинаги дадена мрежа от световните линии на тези тела в четиримерния свят. След като обясни това, Минковски формулира програмата си за геометризиране на физиката [1]:

"The whole world presents itself as resolved into such worldlines, and I want to say in advance, that in my understanding the laws of physics can find their most complete expression as interrelations between these worldlines."

„Целият свят се представя като разложен на такива световни линии и искам предварително да кажа, че, според моето разбиране, законите на физиката могат да намерят най-пълния си израз като взаимовръзки между тези световни линии."

1. Hermann Minkowski, "Space and Time," in: *Spacetime: Minkowski's Papers on Spacetime Physics*. Translated by Gregorie Dupuis-Mc Donald, Fritz Lewertoff and Vesselin Petkov. Edited by V. Petkov (Minkowski Institute Press, Montreal 2020), pp. 57-76, p. 59.

Двата принципа водят до осъзнаването, че експериментите, които потвърдиха кинематичните релативистични ефекти нямаше да се възможни, ако пространство-времето не беше реално, т.е., ако светът не беше четиримерен.

Първият принцип помага да се осъзнае какво точно се пресмята. А това се постига ***само*** след подробен концептуален анализ на разглежданите физически явления.

Вторият принцип - как (по какъв начин) експериментите, които потвърждават каквото е пресметнато, биха били невъзможни в тримерен свят.

Това, което ще обсъждаме тази вечер, е резюме на предстоящ учебник *Въведение във физиката на пространството-времето*.

MINKOWSKI INSTITUTE



Подходът на Минковски обяснява:

- движение по инерция - безпричинно движение; дълбок физически смисъл на кинетичната енергия: инерциална енергия
- ускорено движение - абсолютно: ускорение = кривина
- инерцията като съпротивление срещу ускорение - проява на четиримерността на света (деформация на световна линия)
- еквивалентност на инертната и (пасивната) гравитационна маса
- принцип на относителността на Айнщайн: проява на четиримерността на света
- принцип на Айнщайн за c=const: проява на четиримерността на света
- релативистично скъсяване не дължината: проява на четиримерността на света
- релативистични времеви ефекти: проява на четиримерността на света; НУЛА експерименти показващи че времето “тече”
- принцип на еквивалентността на Айнщайн
- гравитацията не е нищо повече от изкривяване на пространството-време (колебанието на Айнщайн) => гравитацията не е физическо взаимодействие
- експериментален факт - няма гравитационна сила в Природата

=> гравитационна енергия не съществува

=> гравитационните вълни не пренасят гравитационна енергия

- квантова гравитация – задънена улица?

MINKOWSKI INSTITUTE

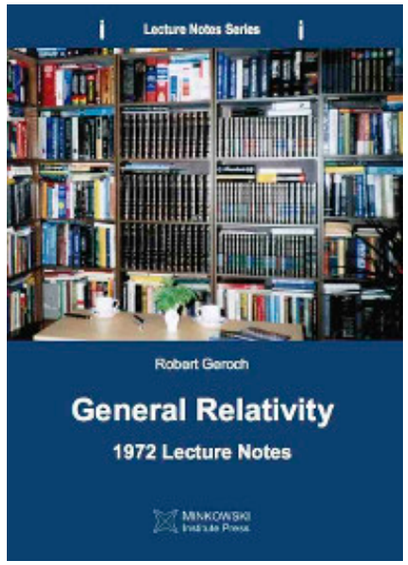
Lecture Notes Series

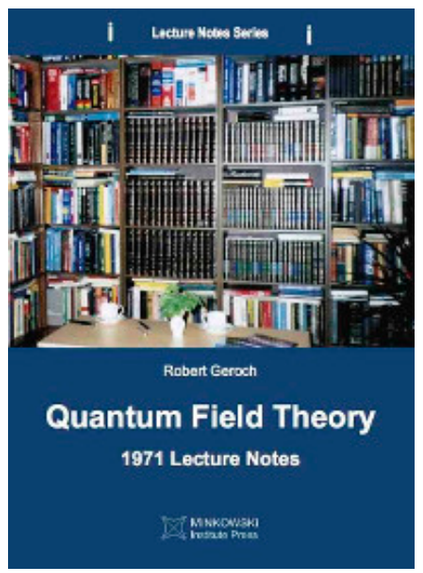


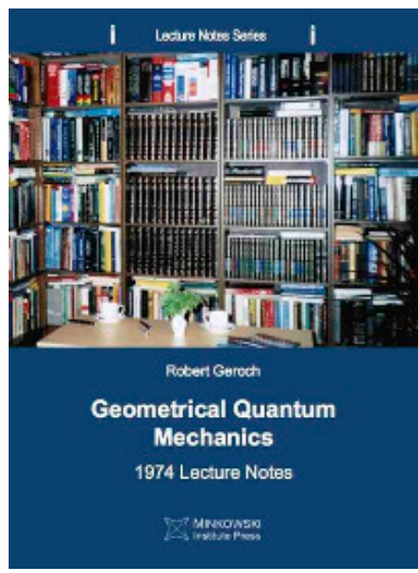
Vesselin Petkov

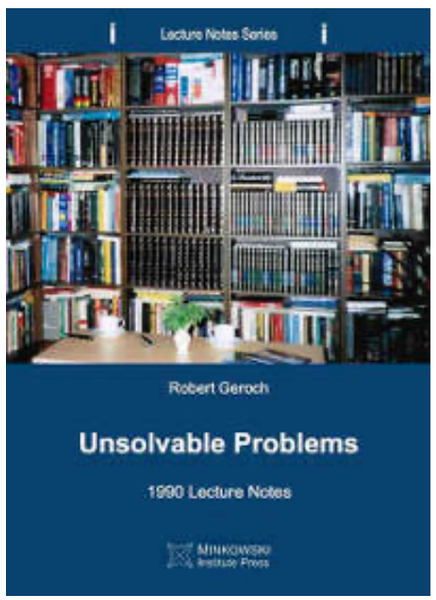
INTRODUCTION TO SPACETIME PHYSICS

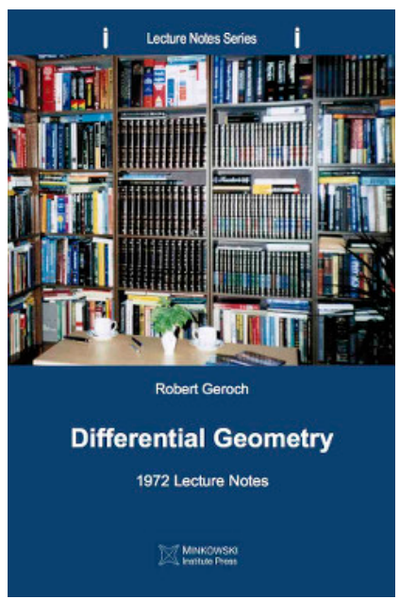
MINKOWSKI Institute Press

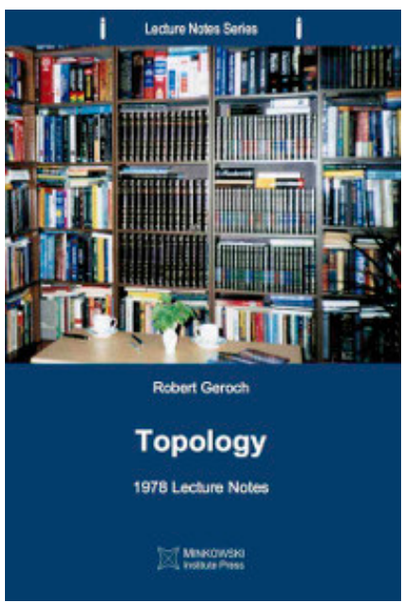


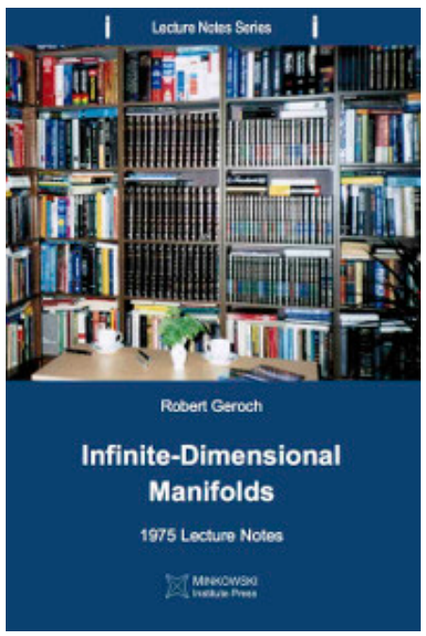












Първите седем тома от поредицата от лекционни записки са на световно известния математически физик Robert Geroch. Той е един от основателите на Minkowski Institute.

MINKOWSKI INSTITUTE

Как Херман Минковски откри пространствено-времевата структура на света

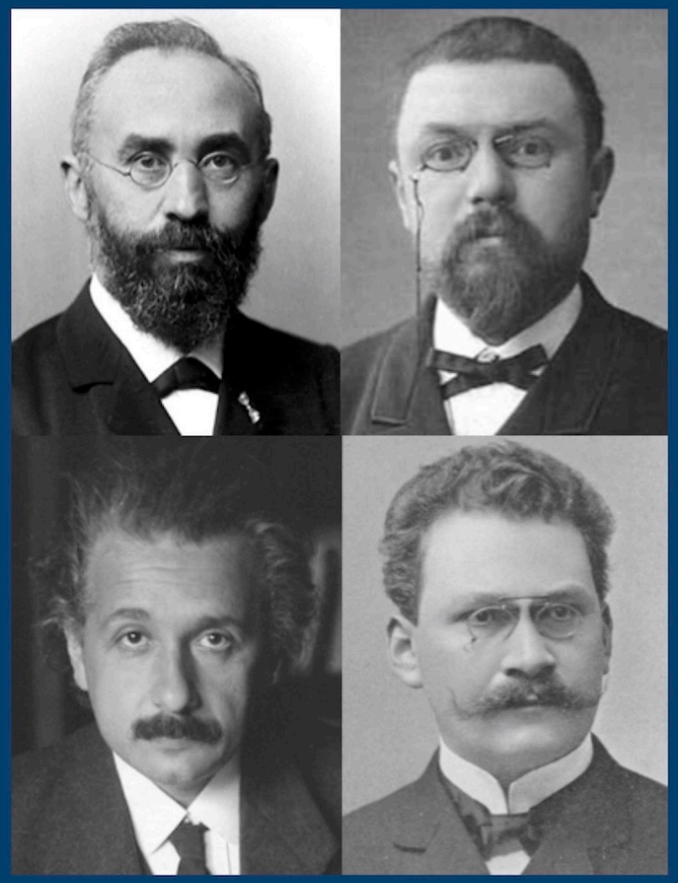
Вероятно Галилей е бил първият, който е анализирал необичайно дълбоки въпроси за онова време:

- Тяло, което се движи равномерно, се движи само (принцип на инерцията на Галилей)
- Състояние на покой и състояние на равномерно движение са експериментално неразличими (принцип на относителността на Галилей)
- Защо ускореното движение на тяло се открива експериментално, а равномерното движение на тяло не може - нали и двете тела се движат в пространството?

Опитите да се открие равномерно движение в абсолютното пространство (което, в края ма 19-ти век, често е било отъждествявано с въображаема субстанция наречена луминофорен етер) кулминират с експеримента на Майкълсън и Морли (1887 г.), които с помощта на светлинни лъчи се опитват да определят скоростта на движение на Земята спрямо абсолютното пространство (етера).

И този експеримент не успява да открие привидно очевидното - че Земята се движи **в** пространството. Резултатът от експеримента е парадоксален, защото показва, че Земята изглежда да е в ***покой*** спрямо абсолютното пространство (запомнете това!).

MINKOWSKI INSTITUTE



В началото на 20-ти век основно четирима учени работят усилено за да осмислят отрицателния резултат от експеримента на Майкълсън и Морли. Това са Hendrik Lorentz, Henri Poincaré, Albert Einstein and Hermann Minkowski.

За съжаление, появата на физиката на пространство-времето бе постигната на цената на четири различни научни трагедии, засягащи тези учени, чиято работа по същество поставя основите на физиката на пространство-времето.

Научната трагедия на Минковски е от различен характер — той достига самостоятелно до това, което Айнщайн нарича специална теория на относителността, и до понятието за пространство-време, но Айнщайн и Пуанкаре публикуват първи, докато Минковски е развивал пълния четиримерен формализъм на физиката на пространство-времето (който използваме и днес). Той не публикува резултатите си по-рано, “защото е искал първо да разработи математическата структура в целия ѝ блясък” (М. Борн).

Ето как Минковски разшифрова изключително дълбокия физически смисъл на всички експерименти (от времето на Галилей до Майкълсън и Морли) да открият равномерно движение спрямо абсолютното пространство (успешният метод използван от Минковски сега е част от научната стратегия прилагана от Minkowski Institute).

1. Строг анализ на тези експерименти с цел да се открият логически възможни обяснения на техния парадоксален резултат.
2. Строг анализ на логическата структура на математическия апарат на класическата механика.

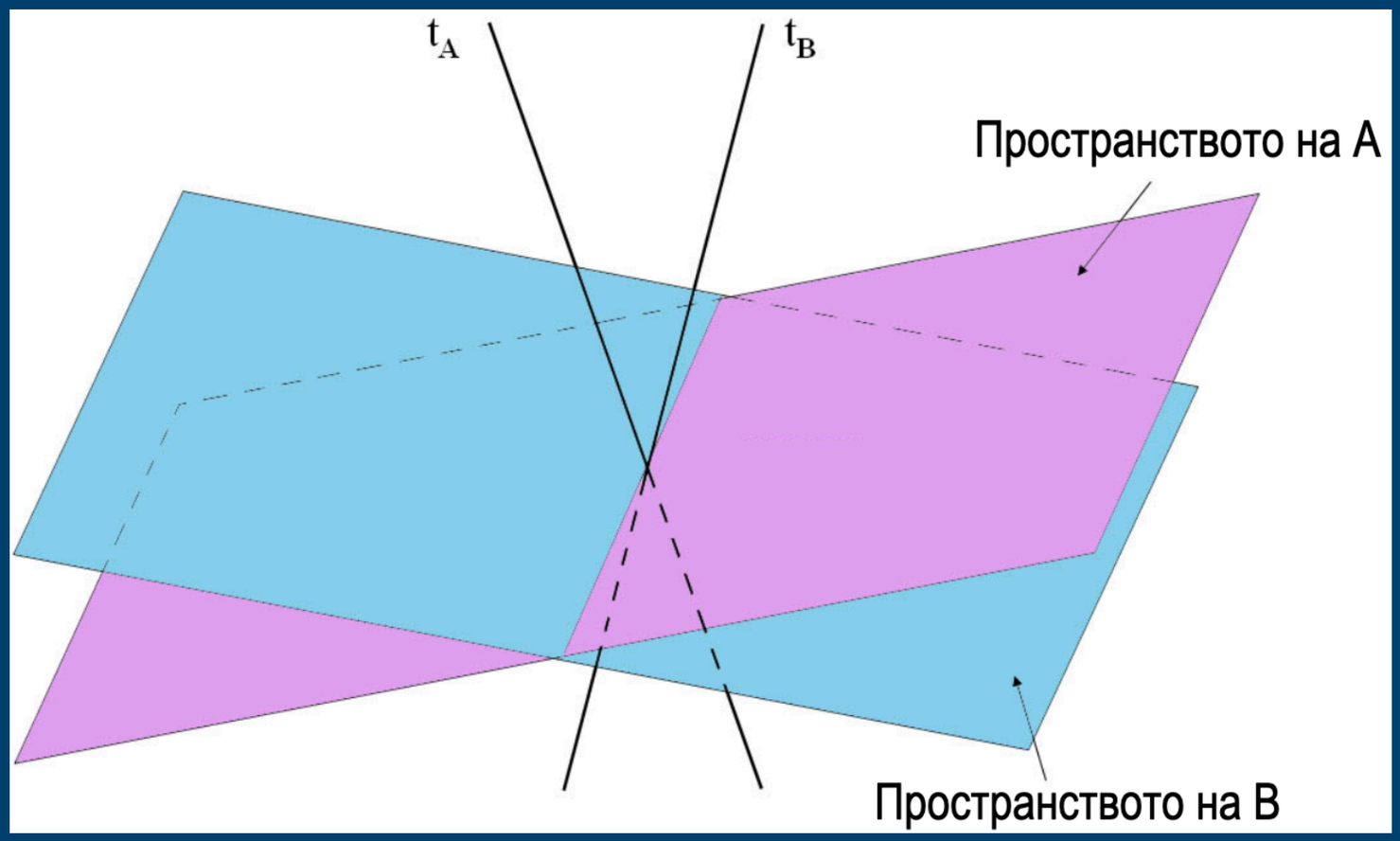
Ето как Минковски започва анализа на математическия формализъм на класическата механика:

“Първо бих искал да покажа как от възприетата в момента механика, чрез чисто математическо разсъждение бихме могли да стигнем до променени представи за пространството и времето. Уравненията на Нютоновата механика показват двойна инвариантност. Първо, формата им се запазва, ако избраната за основа пространствена координатна система се подложи на произволна *промяна на положението*. Второ, формата им се запазва и ако се промени нейното състояние на движение, а именно ако ѝ се придаде някаква *равномерна транслация*. Освен това нулевата точка на времето не играе никаква роля.

Свикнали сме да считаме аксиомите на геометрията за вече установени, щом се чувстваме подготвени за аксиомите на механиката, и затова тези две инвариантности вероятно рядко се споменават заедно. Всяка от тях сама по себе си означава определена група трансформации за диференциалните уравнения на механиката. Съществуването на първата група се разглежда като фундаментална характеристика на пространството. Втората група най-често се пренебрегва, за да се подмине лекомислено факта, че въз основа на физическите явления никога не можем да решим дали пространството, за което приемаме, че е в покой, не се намира в крайна сметка в равномерно транслационно движение. Така тези две групи водят напълно отделно съществуване една до друга. Техният изцяло разнороден характер може да е възпрепятствал обединяването им. Но именно обединената пълна група като цяло ни дава повод за размисъл.”

MINKOWSKI INSTITUTE

Резултатът от размисъла за смисъла на обединената пълна група трансформации е, че Минковски, като математик, осъзнава, че трансформациите на Лоренц между две отправни системи в равномерно движение една спрямо друга са всъщност ротация на времевите оси на тези системи една спрямо друга както се вижда на фигурата.



И той веднага вижда, че това е възможно в четиримерно пространство с времето като четвърто измерение.

Въпреки че е математик, Минковски си задава въпроса дали това четиримерно математическо пространство има нещо общо с физическия свят.

MINKOWSKI INSTITUTE

Допускайки, че това математично пространство е математически модел на реален четиримерен свят, Минковски вероятно е изживял най-щастливия момент от своя научен живот — мигновено става ясно защо никакъв експеримент не може да открие равномерно движение в абсолютното пространство: просто няма такова абсолютно (т.е. ***едно*** тримерно) пространство в Природата; наблюдатели в равномерно относително движение имат свои тримерни пространства и свои времена. А това е резултат от описанието на реален монолитен четиримерен свят на всекидневния тримерен език.

Всеки от наблюдателите се опитва да открие своето равномерно движение в абсолютното пространство, вярвайки че има такова (= единствено) пространство, но в действителност всеки от тях извършва измерванията в своето пространство, използвайки своето време, и естествено винаги открива, че е в покой в собственото си пространство (както експеримента на Майкълсън и Морли показва, че Земята е в покой).

MINKOWSKI INSTITUTE

След като Минковски успява да разшифрова дълбокия физически смисъл на неуспешните експерименти да открият равномерно движение спрямо абсолютното пространство, ето как започва лекцията си “Пространство и време” на 80-то събрание на германските естествоизпитатели и лекари в Кьолн на 21 септември 1908 г. [1]:

“Възгледите за пространството и времето, които бих искал да ви представя, са израснали върху експериментално-физична почва. В това е тяхната сила. Тенденцията им е радикална. Отсега нататък пространството само по себе си и времето само по себе си трябва напълно да се превърнат в сенки и само един вид съюз на двете трябва да запази самостоятелност.”

Минковски ясно обяснява резултата от анализа на неговото първоначално наблюдение — “именно обединената пълна група като цяло ни дава повод за размисъл”. Тази група действа в четиримерно пространство с времето като четвърто измерение, което Минковски нарича *die Welt* (светът):

„Оттук нататък няма повече да имаме в света пространство**то**, а безкраен брой пространства, аналогично на това как в тримерното пространство има безкраен брой равнини. Тримерната геометрия става глава от четиримерната физика. Ето защо в началото казах, че пространството и времето трябва напълно да се оттеглят и да станат просто сенки, и че ще съществува само един свят сам по себе си.“

Изглежда, че онези, които разглеждат пространството-времето само като математическо пространство, никога не са си задавали дори и очевидния въпрос:

“Защо един математик би бил толкова вдъхновен при въвеждането на още едно абстрактно математическо пространство?”

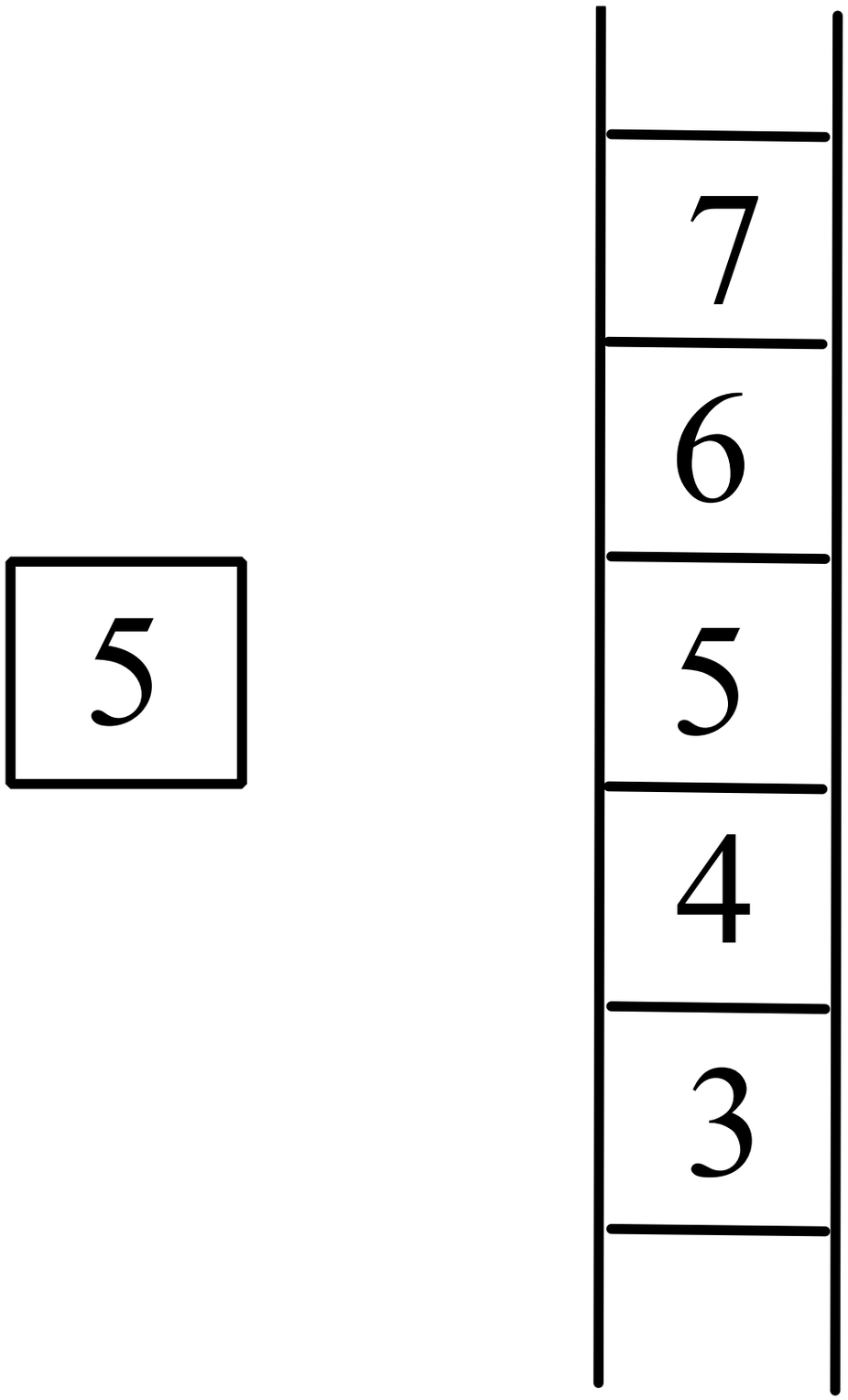
Че в революционната си лекция “Пространство и време” Минковски всъщност обявява не четиримерно математическо пространство, а реален четириизмерен свят, се доказва най-добре в черновата на лекцията, където той първоначално е написал, че същността на новите възгледи за пространството и времето

„е мощно революционна, до такава степен, че когато те бъдат напълно приети, каквито очаквам да бъдат, ще бъде презряно все още да се говори за начините, по които сме се опитвали да разберем пространството и времето.“

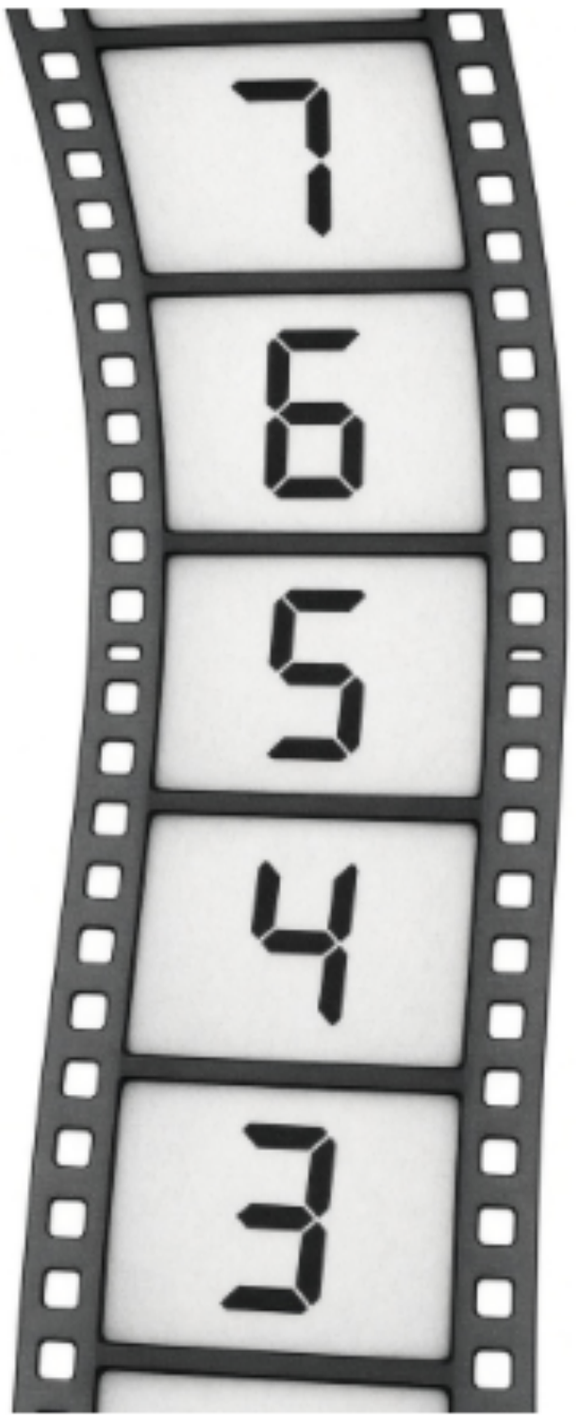
Интересно, ако беше жив, какво би казал за състоянието на фундаменталната физика…

Въпреки че вдъхновението на Минковски от осъзнаването, че е открил една „висша реалност, неизменна и независима от наблюдателя“, която лежи „отвъд разделенията на времето и пространството, които са наложени на нашия опит“, е било смекчено във окончателната версия на лекцията от 1908 г. (“Тенденцията им е радикална”), внимателният прочит на нейния текст (публикуван през 1909 г.) не оставя никакво съмнение, че той е обсъждал и давал математическо описание на един ***реален*** четириизмерен свят.

Цифров часовник в тримерен свят и в пространство-времето

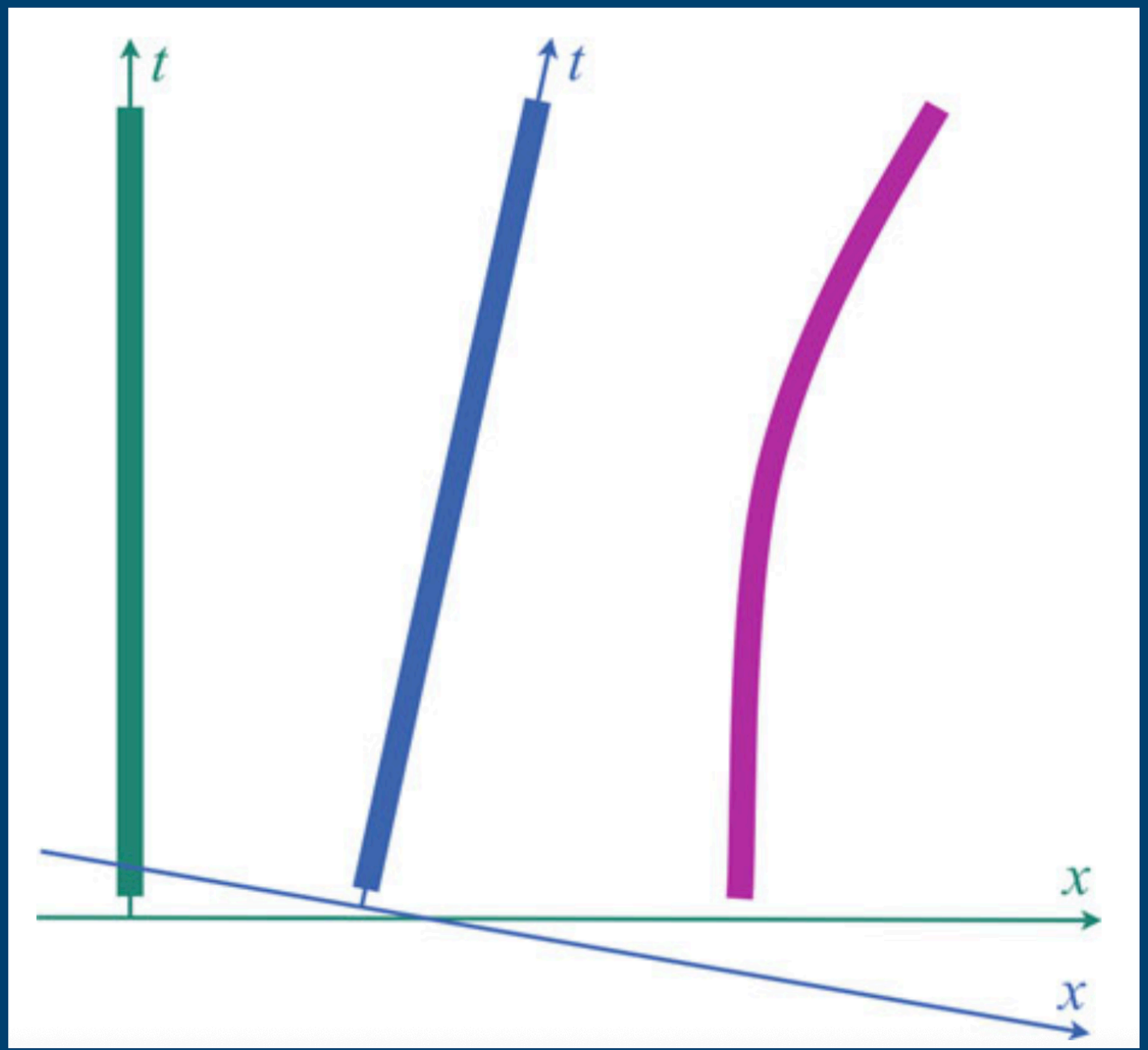






Това е визуализация на световната линия на цифровия часовник като филмова лента — поредица от последователни „кадри“ (тримерният часовник в различни моменти от времето), подредени по оста на времето.

Такава филмова лента е може би най-добрата аналогия за световна линия: всеки кадър е тримерният обект (часовникът) в даден момент, а цялата лента е четиримерният обект в пространство-времето. Херман Минковски показа, че всеки тримерен обект (като часовника, който виждаме да сменя цифрите) всъщност е точно такава непрекъсната световна линия.



“A straight worldline parallel to the *t*-axis corresponds to a stationary substantial point, a straight line inclined to the *t*-axis corresponds to a uniformly moving substantial point, a somewhat curved worldline corresponds to a non-uniformly moving substantial point.”

"With appropriate setting of space and time the substance existing at any worldpoint can always be regarded as being at rest.”

Защо дълбокият физически смисъл на кинетичната енергия е, че тя всъщност е инерциална енергия. Това не е въпрос на наименование, а на РАЗБИРАНЕ!

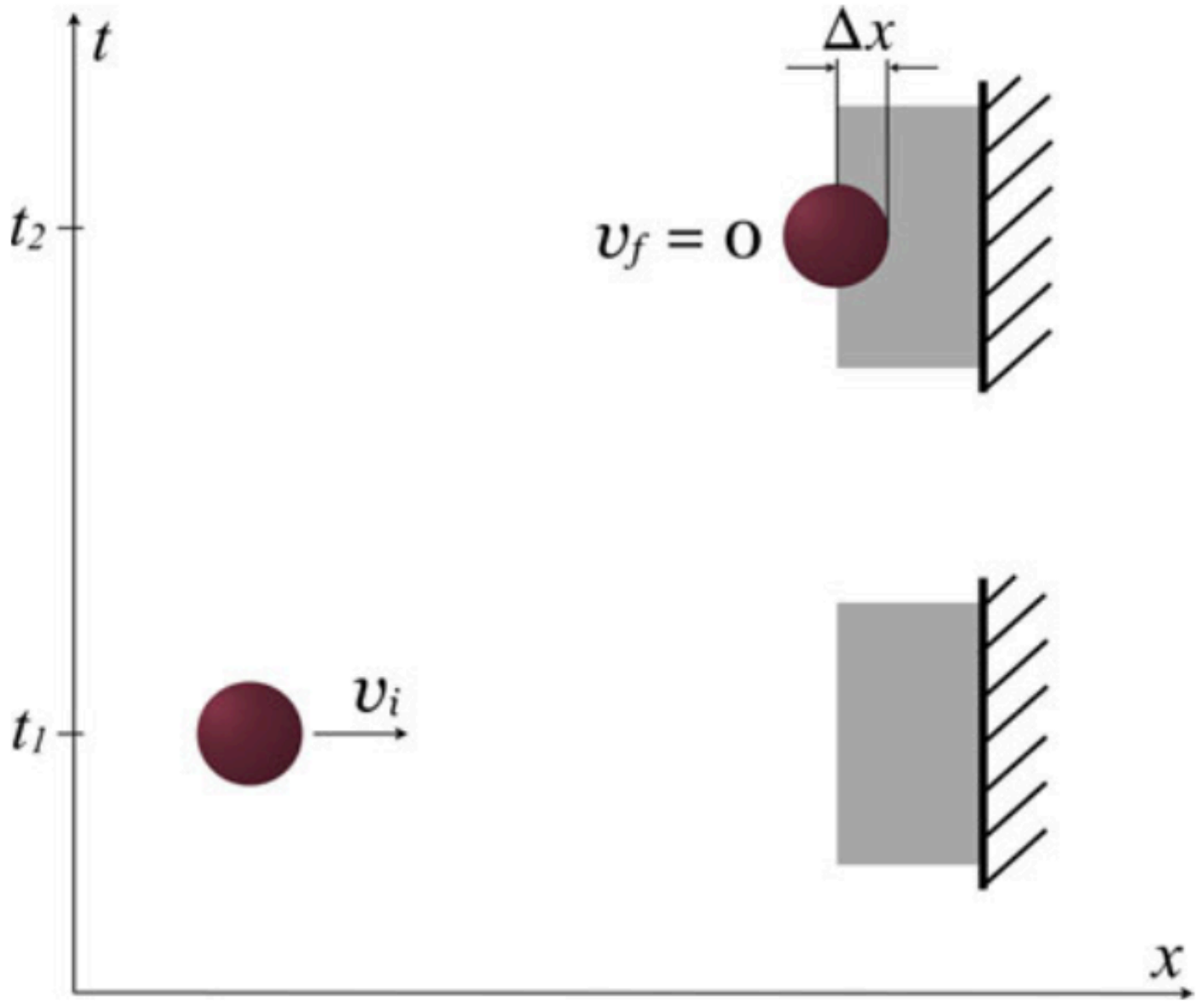


Fig. 3.5 A massive plastic block is deformed when hit by a ball moving by inertia. Traditionally, it is stated that the ball's kinetic energy converts into a deformation energy. However, the deep physical explanation is that the ball's energy is inertial energy since the deformation is caused by the work done by the real inertial force with which the ball resists its deceleration (i.e., its being prevented from moving by inertia); as we saw above that inertial force is a manifestation of the static resistance with which the ball's worldtube opposes its deformation by the worldtube of the plastic block

According to the standard explanation it is the ball's kinetic energy $E_k = (1/2)mv_i^2$ which transforms into deformation energy. But a proper physical explanation demonstrates that the energy of the ball, which is transformed into deformation energy, is its inertial energy E_i, because the ball resists its deceleration a_x^* and it is the work $W = F_{in}\Delta x$ (equal to E_i) done by the *inertial* force $F_{in} = ma_x^*$ that is responsible for the deformation of the plastic material.

Using the relation between v_i, v_f, a_x^* and the distance Δx in the case of deceleration

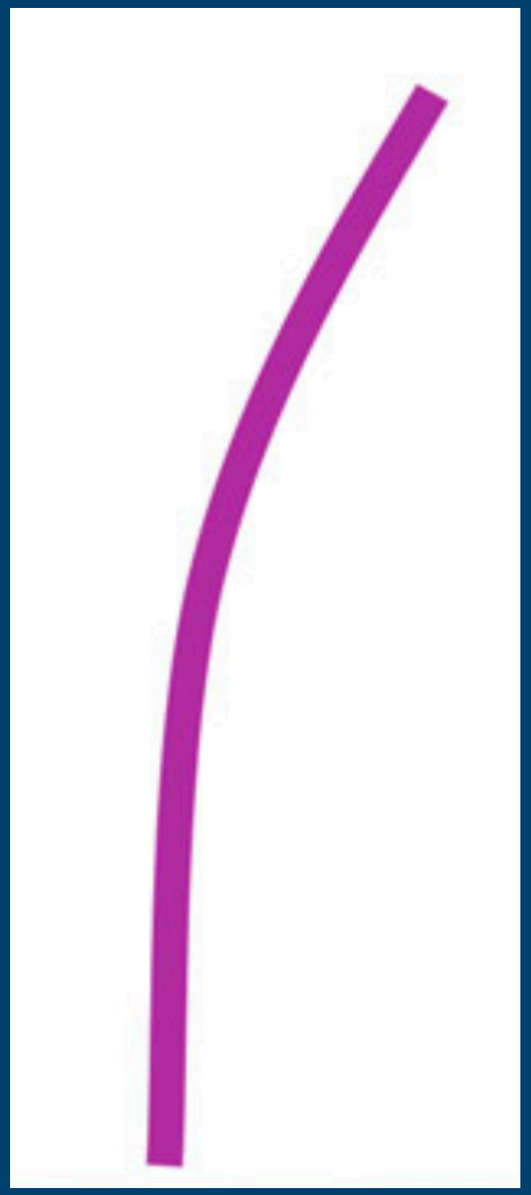
$$v_f^2 = v_i^2 - 2a_x^*\Delta x$$

and taking into account that $v_f = 0$ we find

$$a_x^* = \frac{v_i^2}{2\Delta x}.$$

Then for the ball's inertial energy E_i we have

$$E_i = W = F_{in}\Delta x = ma_x^*\Delta x = \frac{1}{2}mv_i^2.$$



Това, което прави равномерното (инерциално) и ускореното движение рязко различими във физическо отношение (за разлика от инерциалното движение, ускореното движение е експериментално установимо), е рязкото геометрично различие между техните световни линии – световната линия на равномерно движещо се тяло е права, докато световната линия на ускоряващо се тяло е крива (деформирана). Минковски специално подчерта, че „***Особено понятието за ускорение придобива рязко изразен характер***“.

Няма причина за праволинейността на световната линия на равномерно движещо се тяло (така че може да се каже „Ето защо няма движеща сила [причина за движение] при възприеманото инерциално движение на тялото“), но има причина за деформацията на световната линия на ускоряващото се тяло (така че може да се каже „Ето защо има движеща сила [причина за движение] при възприеманото ускорено движение на тялото“) – нещо причинява статично деформацията на световната линия, т.е., на тримерен език, нещо (движеща сила) причинява ускорението на тялото.

Абсолютността на ускорението *предвид факта, че няма абсолютно пространство*

Видяхме, че физически абсолютното ускорение на дадено тяло (поради това, че е експериментално установимо) е представено в пространство-времето чрез едно абсолютна геометрична характеристика – кривината (т.е. деформацията) на световната линия на ускореното тяло. Така програмата на Минковски да разглежда физиката като геометрия на пространство-времето доведе до още един важен и впечатляващ резултат – неочаквано разрешаване на дебата относно статута на ускорението:

Ускорението е абсолютно не защото е спрямо едно абсолютно пространство, а защото е проява на една абсолютна геометрична характеристика на времеподобна световна линия – нейната кривина или по-скоро нейната деформация.

Acceleration is absolute not because it is with respect to an absolute space, but because it is a manifestation of an absolute geometrical feature of a timelike worldline—its curvature or rather its deformation.

In flat spacetime curvature means deformation, but in curved spacetime it is the *deformation* of a timelike geodesic worldline that manifests itself as an absolute (curved-spacetime) acceleration $a^\mu = d^2x^\mu/d\tau^2 + \Gamma^\mu_{\alpha\beta}(dx^\alpha/d\tau)(dx^\beta/d\tau)$.

Произход и природа на инерцията

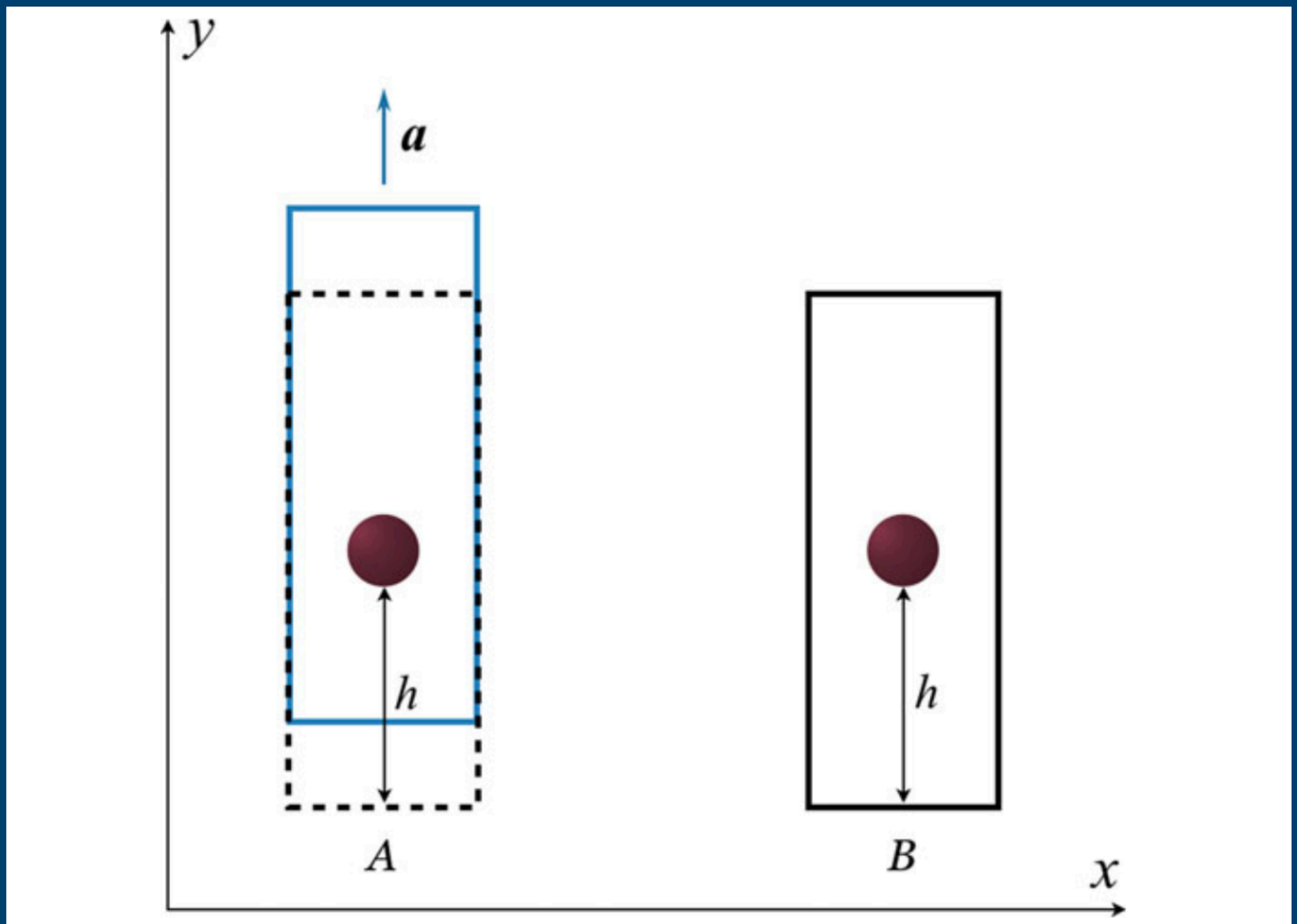


Fig. 3.1 Two lifts A and B, with a floating ball in each of them, are initially at rest relative to each other. When A starts to accelerate an observer inside it can say that a *fictitious* inertial force accelerates the ball toward the floor (however, an observer in B sees that the ball in A have not changed its state and remains at the same place relative to B). But when the ball hits the floor, the floor starts to accelerate the ball and it resists its acceleration by exerting a *real* inertial force on the floor

За да обясним произхода и същността на инерцията, първо трябва да обясним кога инерционните сили са фиктивни и кога са реални.

MINKOWSKI INSTITUTE

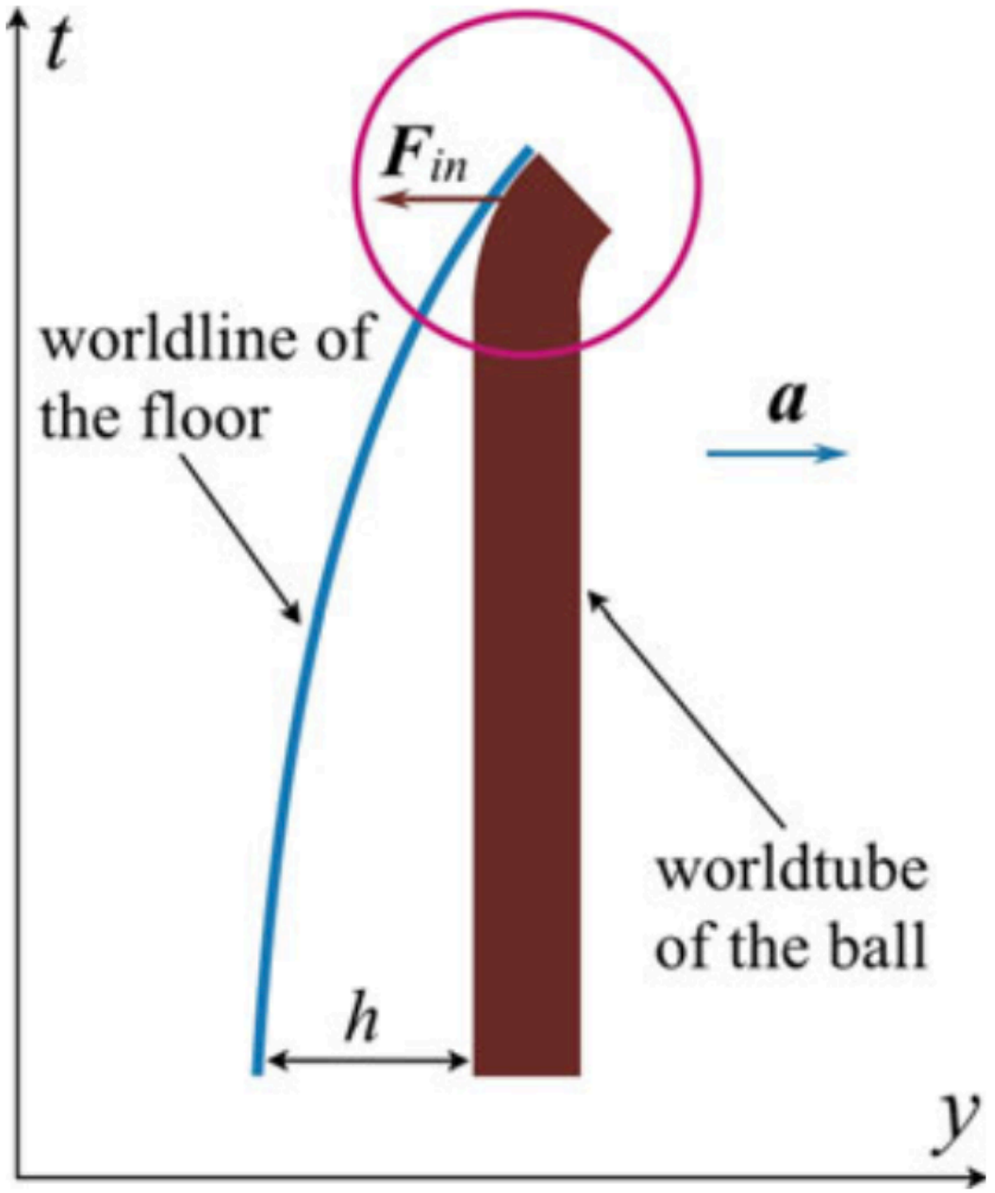


Fig. 3.2 The floor of the accelerating lift *A* shown in Fig. 3.1 is represented by the curved blue worldline, whereas the ball in *A* apparently falling toward the floor is represented by the brown worldtube. It is clearly seen here that *in reality*, i.e., in spacetime, it is the floor's *curved* worldline that approaches (converges to) the ball's *straight* worldtube. "When" the floor's worldline reaches the ball's worldtube, it "starts" (in a static sense) to curve (i.e., to deform) it (what you see is all there *at once* in spacetime like on a film strip). The *real* inertial force $\mathbf{F}_{in}$ which the ball exerts on the floor appears to originate from the *deformation* of the ball's worldtube

MINKOWSKI INSTITUTE

Още един резултат от програмата на Минковски

Minkowski made a gigantic step toward revealing the origin and nature of inertia by showing that a curved (deformed) timelike worldline in spacetime represents an accelerated particle and explained why "Especially the concept of *acceleration* acquires a sharply prominent character" [5, p. 66]—because the acceleration of a particle is proportional to the curvature of its worldline [5, p. 69].

Linking the acceleration of a particle with the curvature (*deformation*) of its worldline (rather worldtube) leads to an almost self-evident conjecture [1, Chap. 9] as seen in Fig. 3.2 (in the red circle)—the *deformation* of the ball's worldtube does appear to give rise to a static restoring force (statically resisting the worldtube's deformation), which we interpret as the inertial force $\mathbf{F}_{in}$.

It should be stressed that it is the *deformation* of a worldline (not its curvature) that seems to be responsible for an inertial force, because, as explained in the previous chapter, it is the *deformation* of a worldline that manifests itself as an absolute acceleration in both flat and curved spacetime; a curved worldline in flat spacetime is always deformed, but in curved spacetime a geodesic worldline is naturally curved due to the curvature of spacetime and is not deformed. The worldline of an absolutely accelerated particle in curved spacetime is not geodesic since it is additionally curved, i.e., it is deformed.

Ако Минковски беше живял по-дълго, той вероятно би бил в истински възторг, осъзнавайки, че инерцията е поредното проявление на реалността на пространство-времето, т.е. на четиримерността на света (подобно на скъсяването на дължината, познато още по негово време, и подобно на удължаването на времето и на т.нар. парадокс на близнаците).

MINKOWSKI INSTITUTE

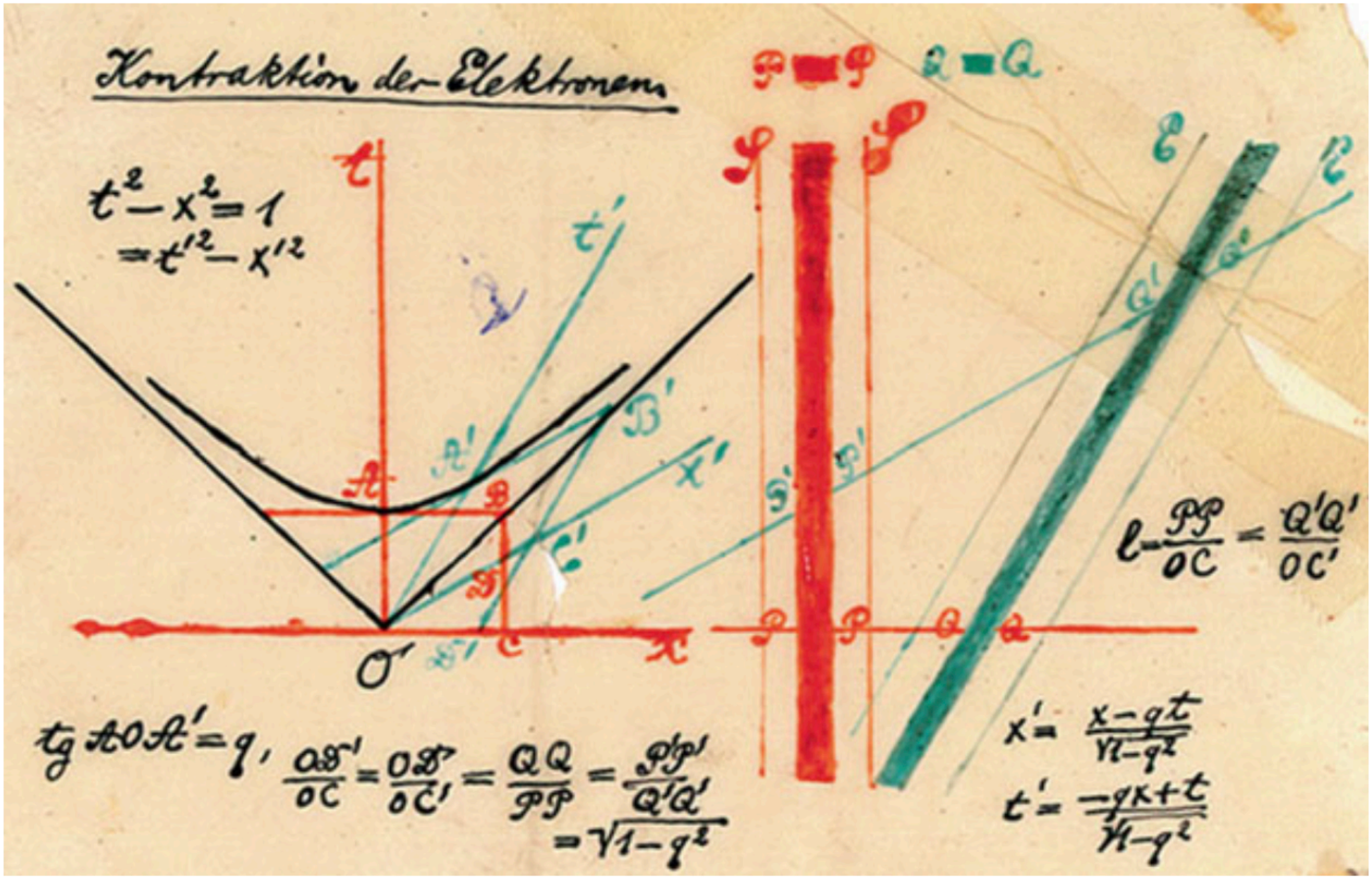


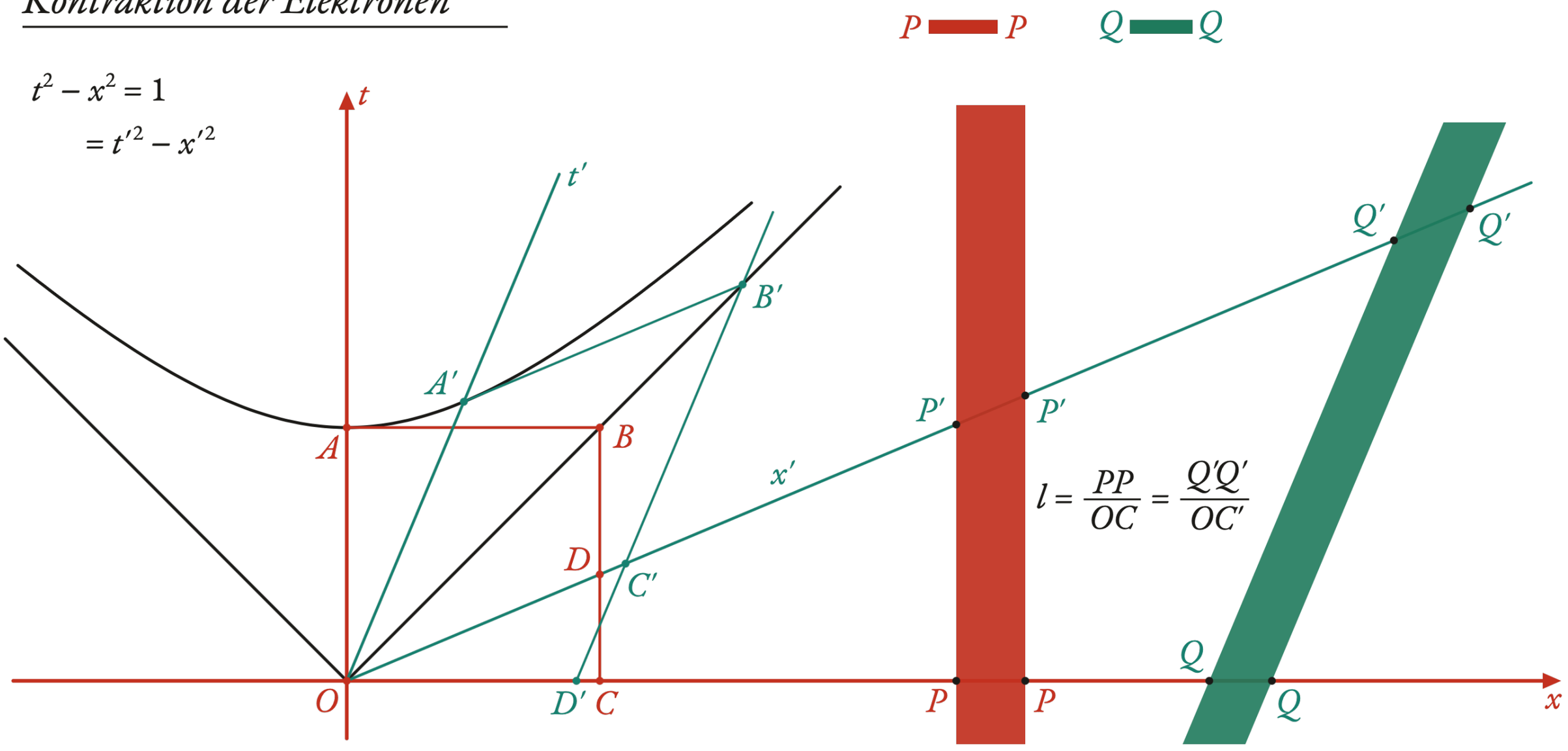
Fig. 1.1 The transparency which Minkowski used at his lecture in Cologne on September 21, 1908. It shows Fig. 1 in his paper "Space and Time." *Source* (with permission): Cover of *The Mathematical Intelligencer*, Volume 31, Number 2 (2009)

V. Petkov, *Seven Fundamental Concepts in Spacetime Physics*, SpringerBriefs in Physics, 2nd ed. (Springer, Heidelberg 2024), Ch. 1

MINKOWSKI INSTITUTE

Kontraktion der Elektronen

$$t^2 - x^2 = 1$$
$$= t'^2 - x'^2$$



$$l = \frac{PP}{OC} = \frac{Q'Q'}{OC'}$$

$$\text{tg}\, AOA' = q, \quad \frac{OD'}{OC} = \frac{OD}{OC'} = \frac{QQ}{PP} = \frac{P'P'}{Q'Q'} = \sqrt{1-q^2}$$

$$x' = \frac{x - qt}{\sqrt{1-q^2}}$$
$$t' = \frac{-qx + t}{\sqrt{1-q^2}}$$

MINKOWSKI INSTITUTE



Fig. 1.2 An ordinary meter stick which we believe we see; in fact, what we see is a bit more complex because we see the past light cone

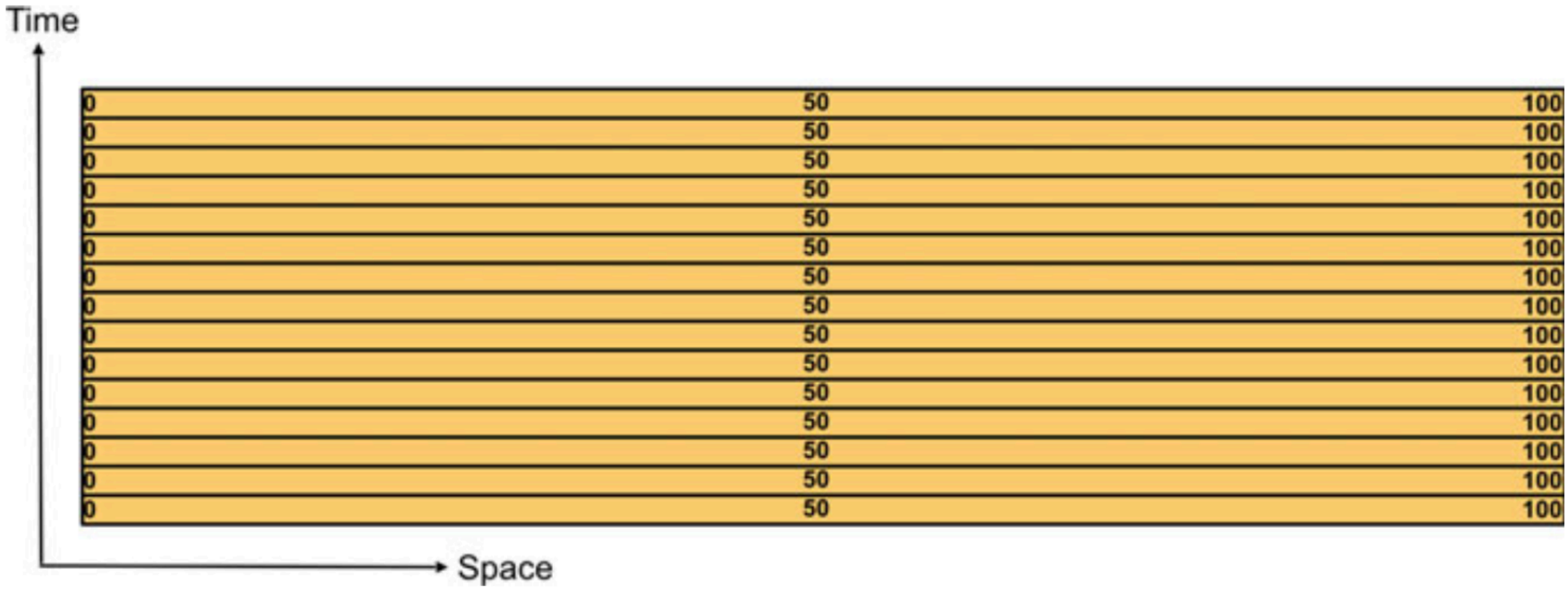


Fig. 1.3 The worldtube of the meter stick; in fact, this is a simplification of its worldtube, but it conveys the main idea—that the meter stick exits *en bloc* at all moments of its "life."

V. Petkov, *Seven Fundamental Concepts in Spacetime*, SpringerBriefs in Physics, 2nd ed. (Springer, Heidelberg 2024), Ch. 1



Fig. 1.5 The worldtube of *A*'s meter stick when its color changes. Again, this is a simplification of its worldtube, but it conveys the main idea—that *A*'s meter stick exits *en bloc* at all moments of its proper time

MINKOWSKI INSTITUTE

So,



Fig. 1.6 At event M the middle points of B's meter stick is instantaneously above the middle point of A's meter sticks



Fig. 1.7 Relativistically contracted meter stick measured by observer B at event M—its most striking feature is not that it is shorter, but the fact that it contains *at once as present for* B the green part (comprised of parts of the meter stick which existed at different moments in A's past), the red part (common present for A and B) and the blue part comprised of parts of the meter stick which will exist at different moments in A's future

aaa

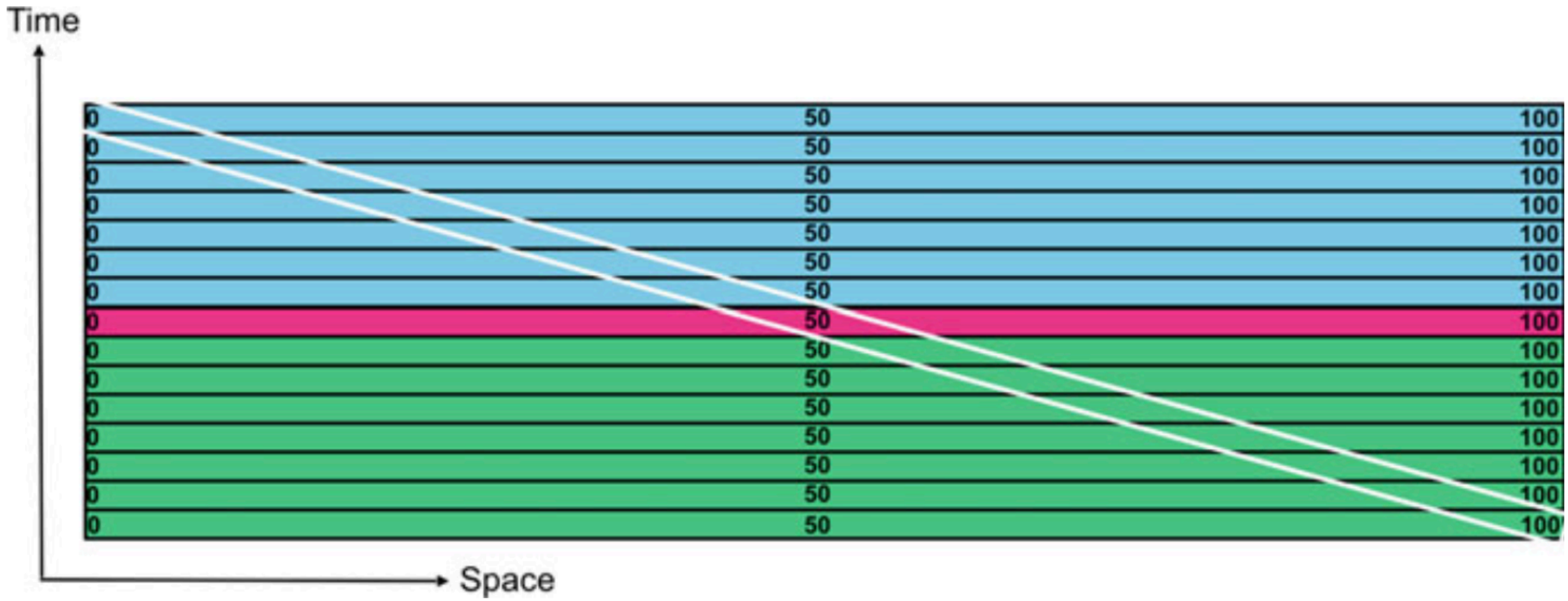
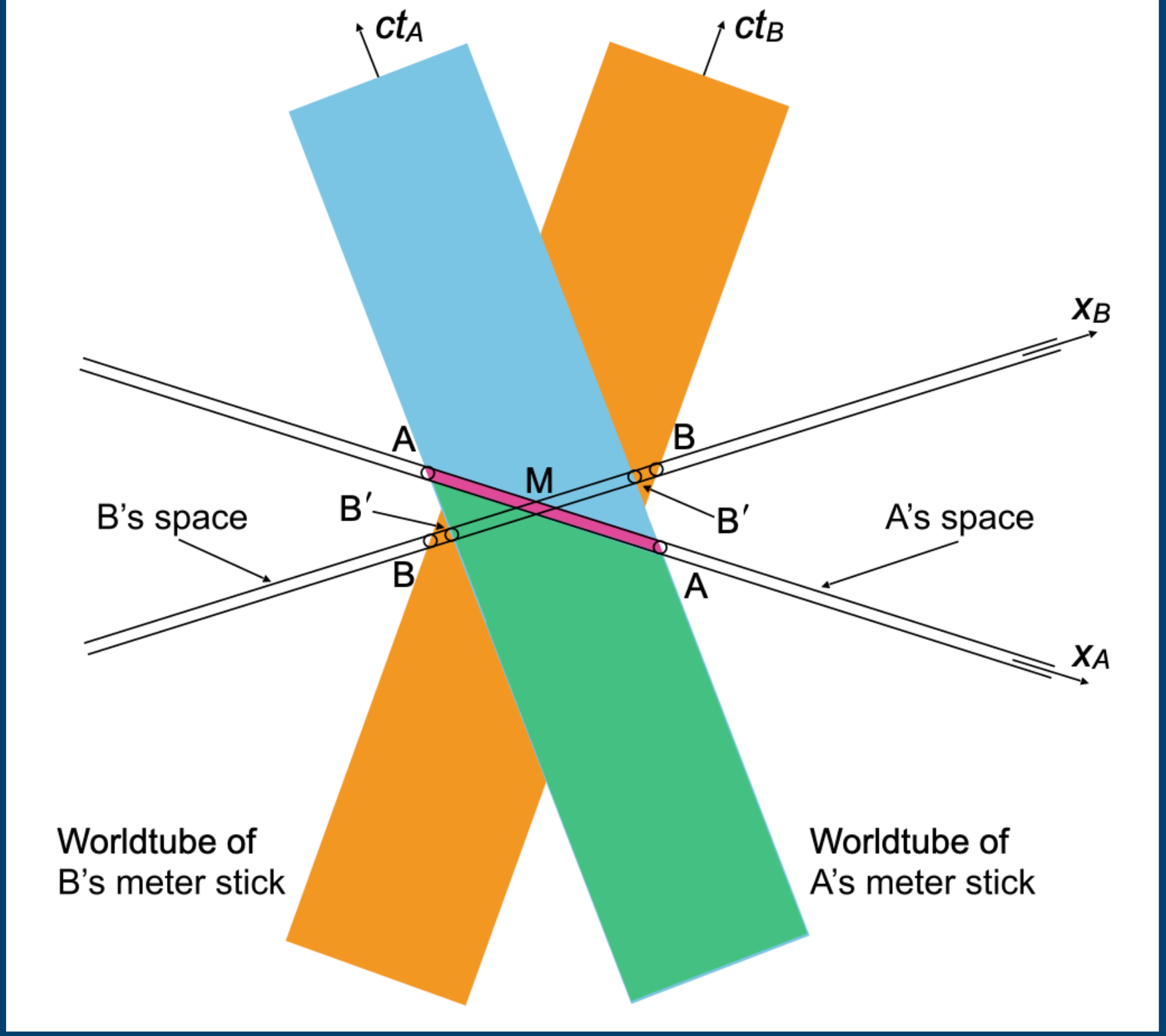


Fig. 1.8 The worldtube of *A*'s meter stick with different colors must be a *real* four-dimensional object in order that *B*'s three-dimensional space intersects it at a different angle—in the three-color cross section outlined with the white line. At event *M*, when the middle points (the mark 50 cm) of *A*'s and *B*'s meter sticks instantaneously coincide, *A*'s three-dimensional space intersects the worldtube of *A*'s meter stick in the red cross sections, whereas *B*'s three-dimensional space intersects it in the three-color cross section

MINKOWSKI INSTITUTE



V. Petkov, *Seven Fundamental Concepts in Spacetime*, SpringerBriefs in Physics, 2nd ed. (Springer, Heidelberg 2024), Ch. 1

MINKOWSKI INSTITUTE

Observers A and B have identical digital clocks, which display their 10th second in red. A's clock measures 10 second (A's proper time), but B measures 11 seconds (coordinate time) - a longer time period - and vice versa: B's clock measures 10 second (B's proper time), but A measures 11 seconds (coordinate time). There is no slowing down of time - it is just geometry. If the worldlines of the clocks were not real, time dilation would be impossible.

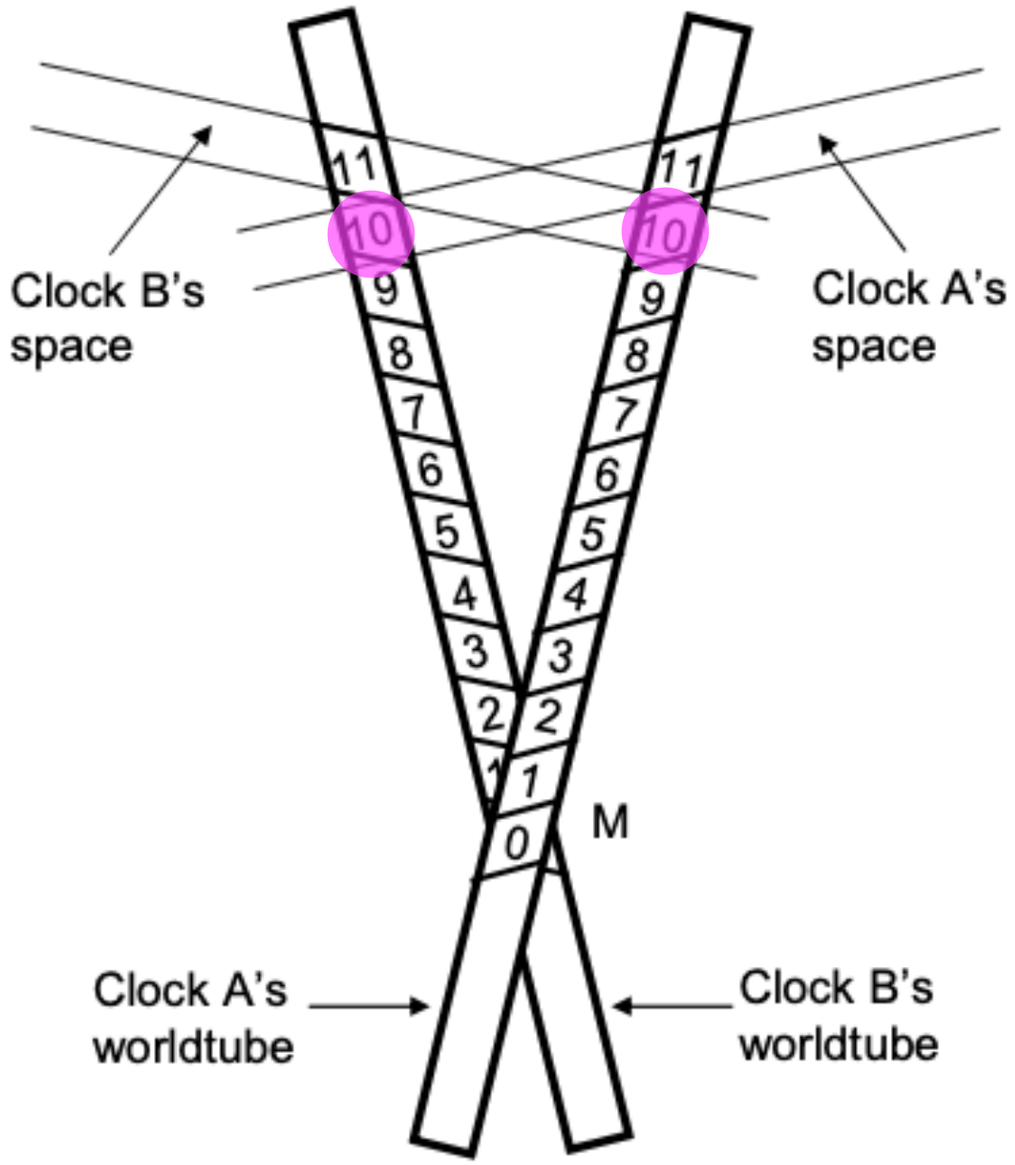


Figure 5.10: Reciprocal time dilation of two digital clocks

V. Petkov, *From Illusions to Reality: Time, Spacetime and the Nature of Reality* (Minkowski Institute Press, Montreal 2013)

MINKOWSKI INSTITUTE

Ако световните линии на часовниците на земята и на спътник не бяха реални, GPS нямаше да функционира правилно – нямаше да има корекция от 38 микросекунди на ден.

Позволете ми да го кажа възможно най-ясно: GPS, който използва (и следователно постоянно проверява) както зависещото от скоростта (специално-релативистично) удължаване на времето, така и гравитационното (общо-релативистично) скъсяване на времето, не би работила в тримерен свят. Това означава, че ежедневната й работа непрекъснато доказва, че реалността на пространство-времето е експериментален факт.

MINKOWSKI INSTITUTE

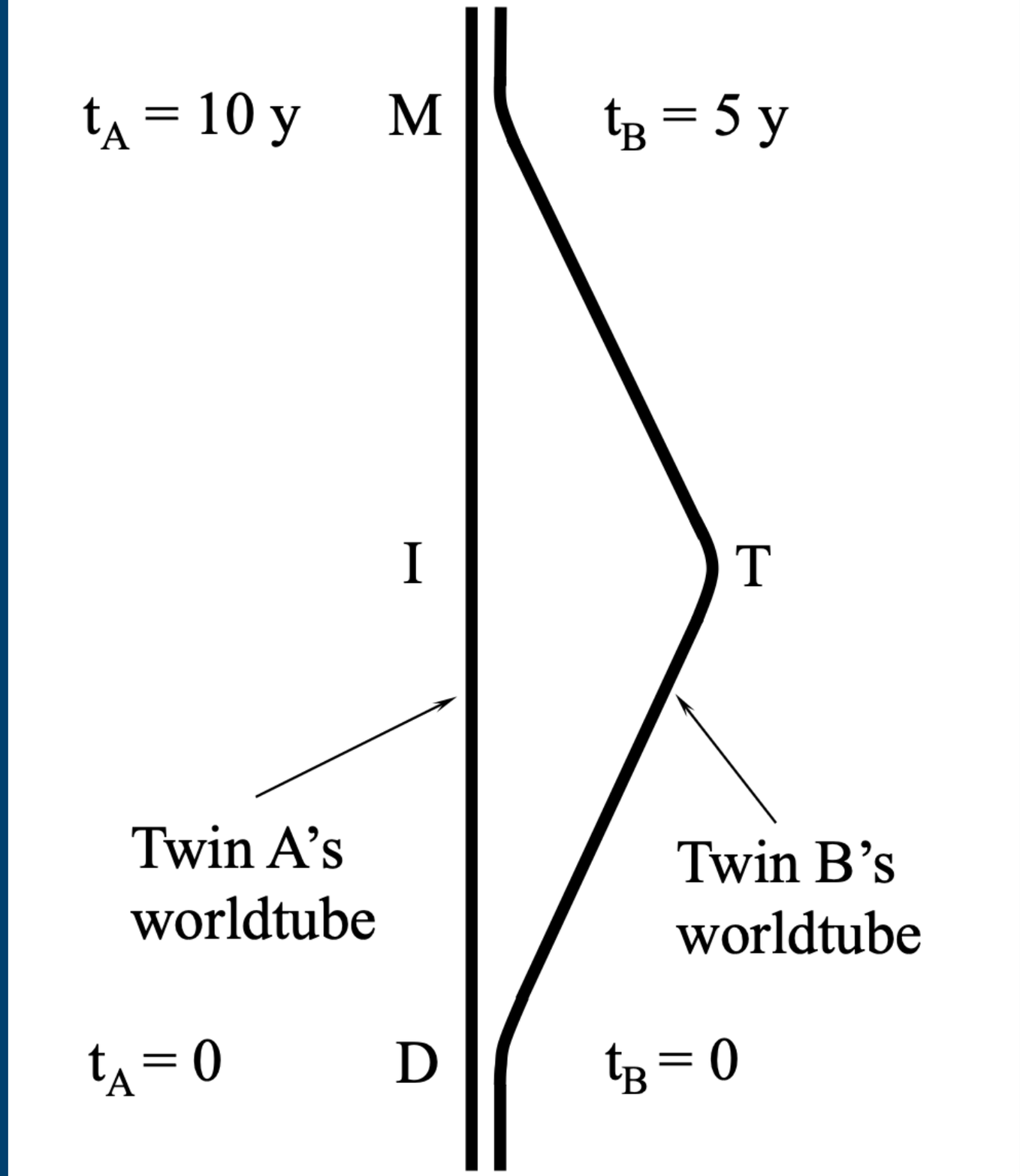


Figure 5.11: The twin paradox effect

MINKOWSKI INSTITUTE

Следвайки програмата на Минковски, става ясно, че гравитационните явления не са нищо повече от проява на неевклидовата геометрия (кривината) на пространство-времето. Това означава че гравитацията не е физическо взаимодействие.

Това заключение е базирано на експерименталния факт, че няма гравитационна сила в Природата и неговите последствия:

- гравитационна енергия не съществува
- гравитационните вълни не пренасят гравитационна енергия

Принципът на еквивалентността на Айнщайн получава естествено обяснение

Колебанието на Айнщайн, че гравитацията не е нищо повече от изкривяване на пространството-време

Квантова гравитация – възможна ли е?

MINKOWSKI INSTITUTE

Explains gravitational attraction

Only *geodesic* worldlines are involved

Explains weight

Only a single non-*geodesic* *(=deformed)* worldline is involved

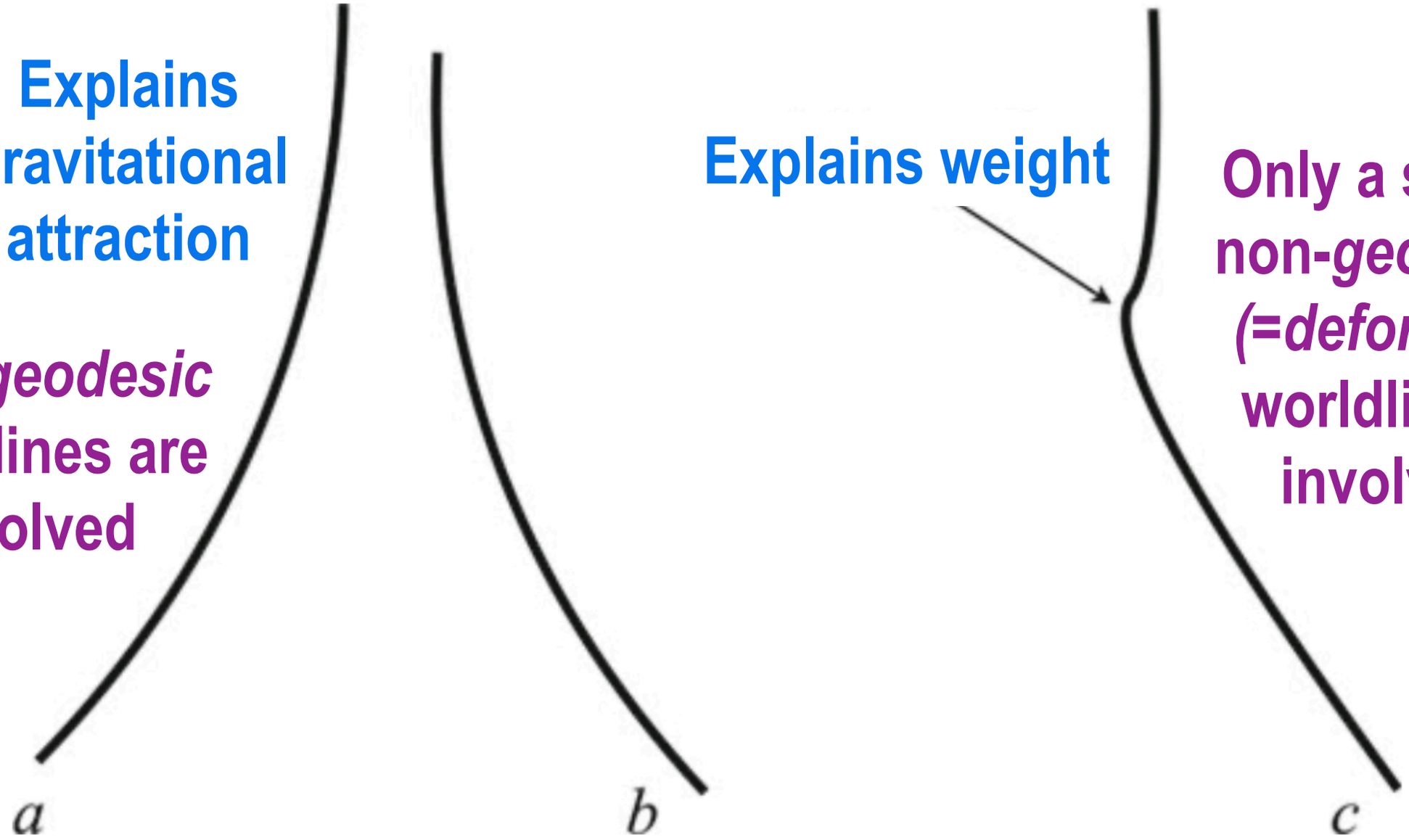


Fig. 2.4 The worldlines *a* and *b* represent relative acceleration in curved spacetime, which involves *two* worldlines (i.e., two bodies which move relative to each other without resisting their motion). The deformed worldline *c* represents absolute acceleration in spacetime, which involves a *single* worldline (i.e., a single body which accelerates absolutely and resists its acceleration)

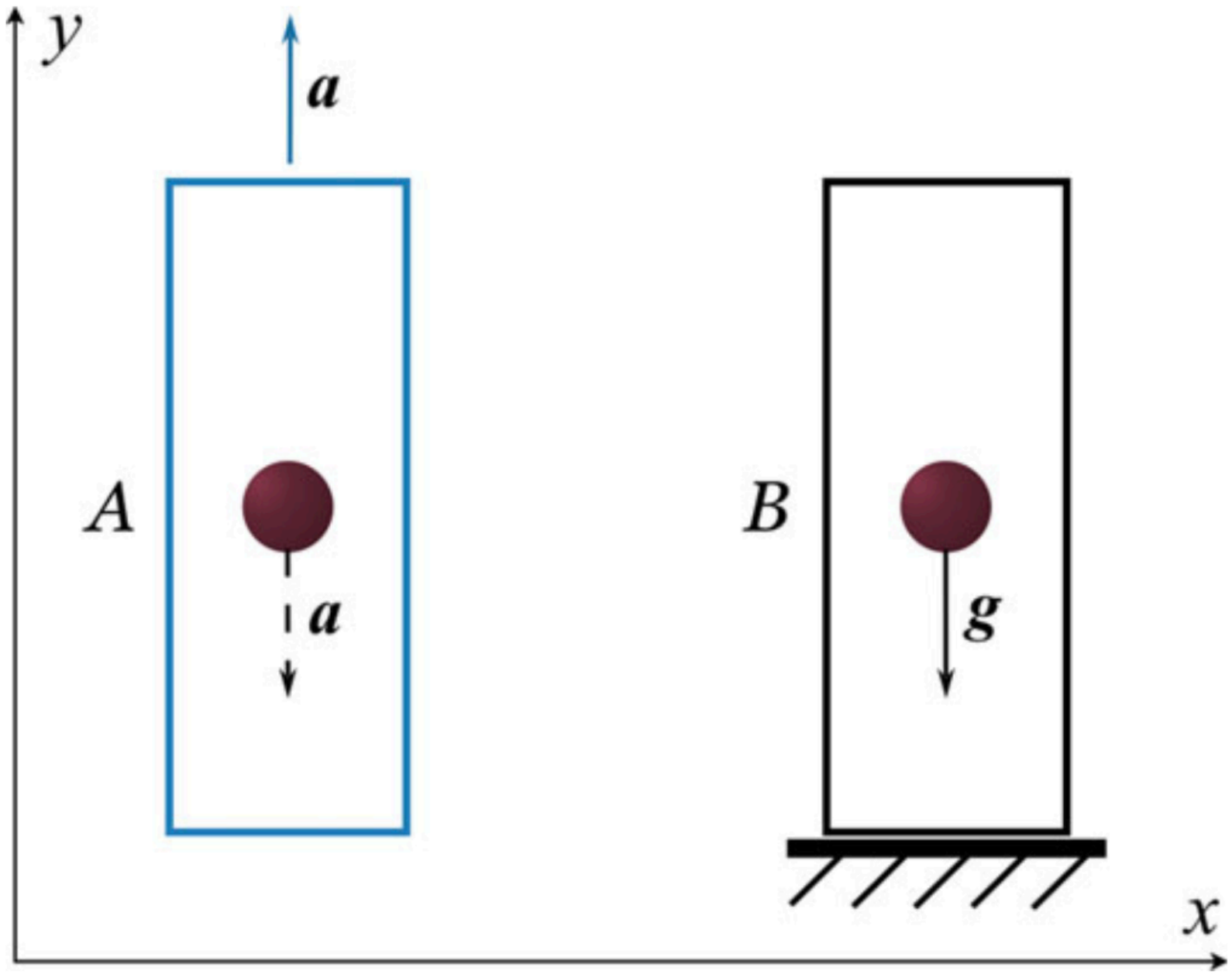
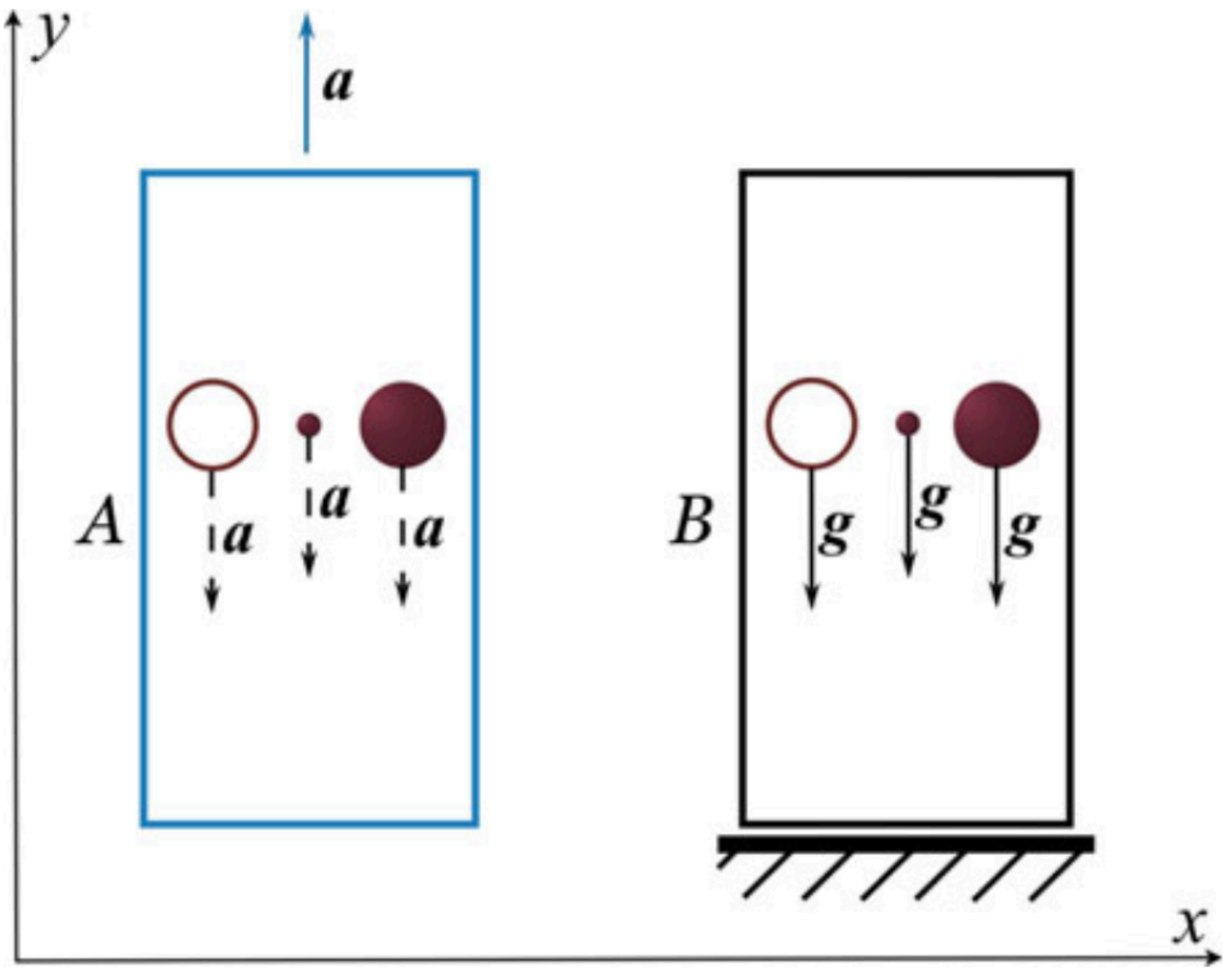


Fig. 3.3 Lift A accelerates with an acceleration $a = g$. Lift B is on the Earth's surface. Observers in A and B appear to be unable to determine experimentally whether they are accelerating or at rest on the Earth's surface from inside of their lifts, without looking outside. Two identical balls are dropped in the lifts. The ball in A falls with an acceleration $a = g$ in A. The second ball falls with an acceleration g in B. The mass of the ball m_{in} measured in A is equal to the mass of the ball m_g measured in B. Einstein *postulated* these experimental facts as his equivalence principle

MINKOWSKI INSTITUTE

The experimental fact that falling bodies move by inertia (non-resistantly) explains why all bodies fall with the same apparent acceleration

Fig. 5.1 Lift A is accelerating with an acceleration $a = g$, whereas lift B is at rest on the Earth's surface. There are two identical sets of three balls in each lift—a small ball and two larger balls one of which is hollow



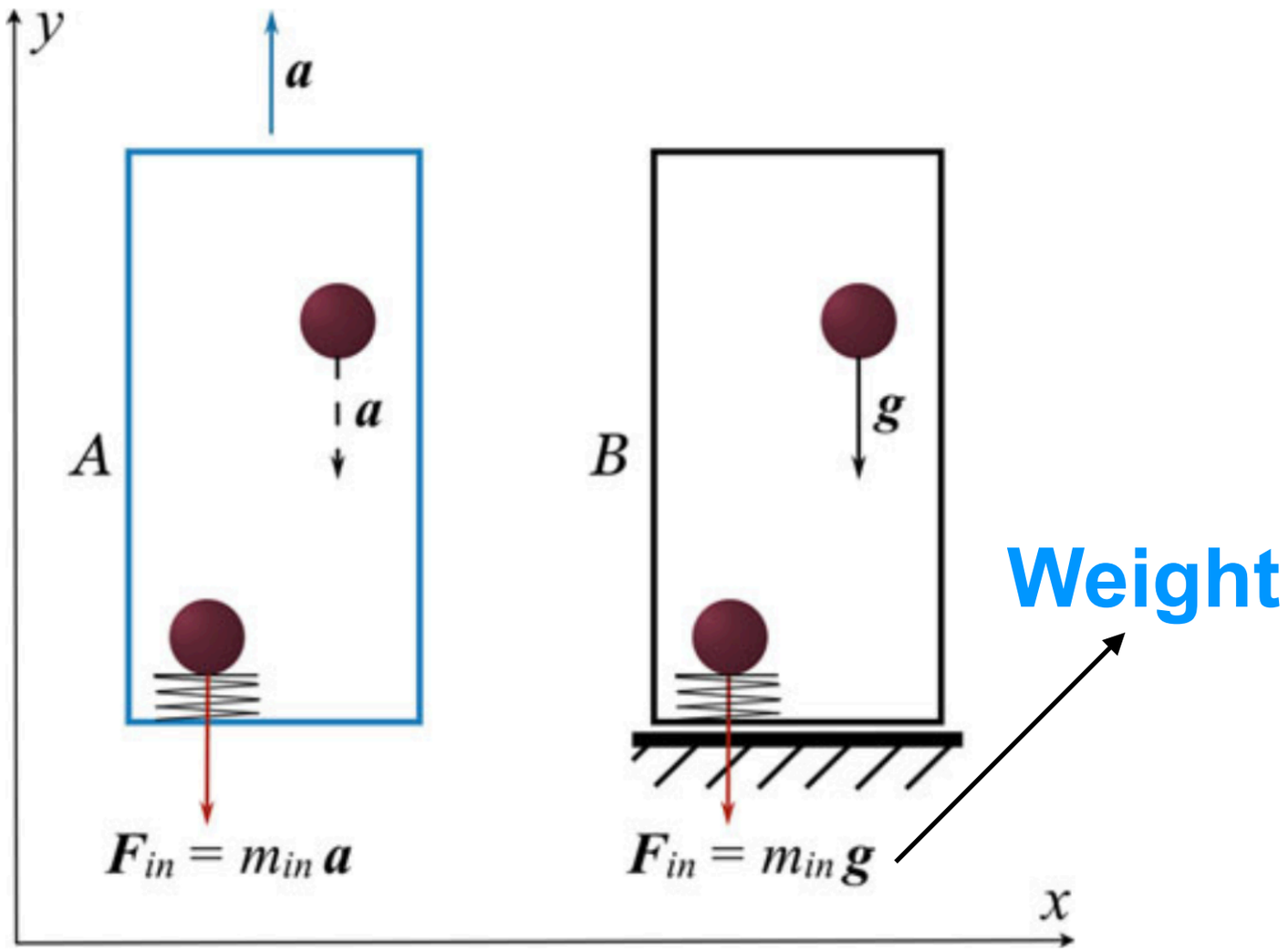


Fig. 5.2 Minkowski's program of regarding physics as geometry of the real spacetime provides a full (100%) *explanation* of Einstein's equivalence principle. The balls in A and B only appear to accelerate—in reality they move by inertia (non-resistantly), because their worldtubes are geodesic (not-deformed). The forces measured by the scales in A and B are the same because they are both inertial—they arise when the scales in A and B prevent the balls from moving by inertia; in reality (in spacetime) the worldlines of the scales in A and B statically deform the worldtubes of the balls and the worldtubes resist their static deformation by exerting the inertial forces $\mathbf{F}_{in} = m_{in}\mathbf{a}$ and $\mathbf{F}_{in} = m_{in}\mathbf{g}$ on the worldlines of the scales (and, in turn, deforming the scales' springs). The inertial mass of the ball in A is equal to the passive gravitational mass of the ball in B because they are both *inertial*—the measure of the resistance the balls offer when they are prevented by the scales from moving by inertia

Weight

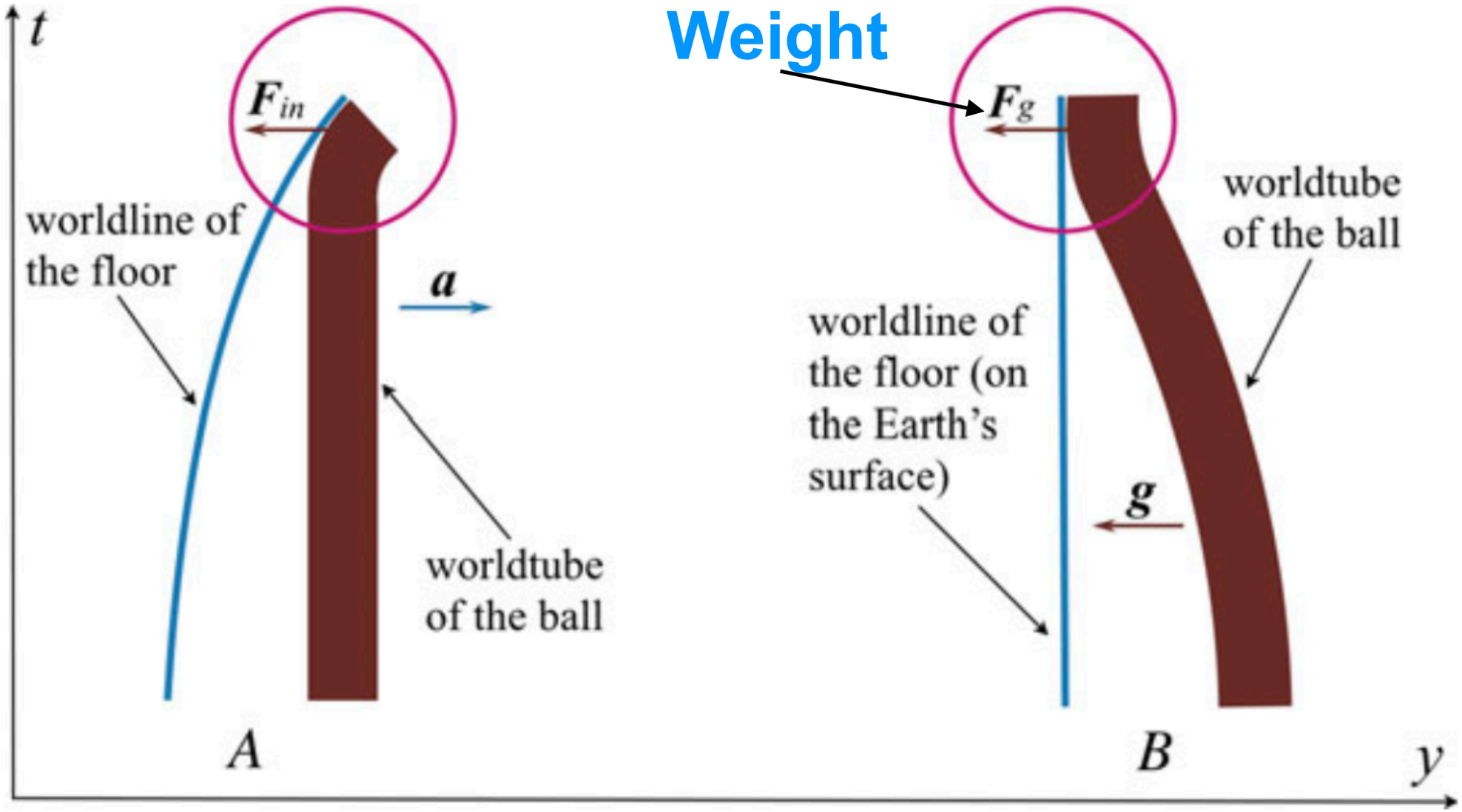


Fig. 3.4 What is happening in *A* is given in the left-hand part of the figure—it was already depicted in Fig. 3.2. The right-hand part of the figure shows what is happening in *B*—the worldtube of the ball is *not* deformed (it is geodesic) before it hits the floor (in ordinary three-dimensional language, the falling ball moves *by inertia*), which explains why the ball does not resist its fall; when the ball hits the floor (the red circle) it is prevented from moving by inertia and it exerts an *inertial* force $\mathbf{F}_g$ on the floor, which (*after* the moment of the collision) has been traditionally called gravitational force (the weight of the ball). Like in *A* this *real* inertial force appears to originate from the *deformation* of the ball's worldtube

Заключение

В търсенето на фундаментални физични закони притежаването на правилните уравнения и провеждането на решаващите експерименти е едва половината от битката; другата половина е ***способността за еднозначно осъзнаване на техния физически смисъл и куража да се приеме реалността, която те описват***.

In the quest for fundamental physical laws, possessing the correct equations and performing the crucial experiments is only half the battle; the other half is ***the ability to unequivocally realize their physical meaning and the courage to accept the reality they describe.***

MINKOWSKI INSTITUTE

Why there is no free will in spacetime, i.e., in the physical world



MINKOWSKI INSTITUTE

And, finally, here are two elements of the "art" of ignoring the irrefutable arguments for the reality of spacetime that are apparently shared by most members of the general public when asked whether spacetime physics implies the non-existence of free will

