

<https://www.youtube.com/watch?v=GKD1vDAPkFQ&t=115s>

## How Does Gravity Warp the Flow of Time?

### Jak gravitace deformuje tok času?



[PBS Space Time](#)

2,73 mil. odběratelů

1 mil. zhlédnutí před 1 rok

0:00

**(01)-** Over the course of your life your feet will age approximately 1 second more than your head due to gravitational time dilation - and that's assuming that your life is long and that you're quite tall. But that tiny difference in flow of time may be what keeps you stuck to this planet at all. Albert Einstein really enjoyed imagining people falling off buildings. He said it himself - he described his happiest thought as the following: "For an observer falling freely from the roof of a house, the gravitational field does not exist." We now know this as the equivalence principle - it states that there's no experiment that you can do to distinguish a frame of reference in freefall within a gravitational field from a frame of reference floating off in space in the absence of gravity. Provided of course you're in a lab with no windows, and there's no air resistance, and you haven't hit the ground yet. But otherwise, as far as the universe is concerned, the sense of floating you feel in both circumstances is exactly the same. Likewise, the sense of weight you feel stationary on the surface of the Earth is identical to the sense of weight you would feel accelerating at 1-g distant from any gravitational field - at least as far as the laws of physics are concerned. Einstein had his happy thought in 1907, a couple of years after he started his scientific revolution with the special theory of relativity. It took him another 8 years and a lot of help to grow this simple idea into his full theory of gravity - the general theory of relativity. General relativity, or "GR" explains the force of gravity as being due to curvature in space and time. Mass and energy change the lengths of rulers and the speeds of clocks - and somehow those changes lead to objects being attracted to each other. John Archibald Wheeler put this notion the most pithily: Spacetime tells matter how to move; matter tells spacetime how to curve. A common way to depict this is with the classic balls-on-rubber-sheet analogy. Balls are constrained to move only on the sheet, and will move in straight lines if the sheet is flat - but if the sheet is curved then there are no straight lines. But the rubber sheet picture is at best a crude analogy. For one thing, it implies that curvature in the fabric of space is the cause of gravitation - but that's only half - actually less than half the picture. Matter tells space AND time how to curve, and it's the curvature of time that's mostly responsible for telling matter how to move. There's a deep connection between gravity and time - gravitational fields seem to slow the pace of time in what we call gravitational time dilation. And today we'll explore the origin of this effect. And ultimately, we'll use what we learn to understand how curvature in time - this gradient of time dilation - can be thought of as the true source of the force of gravity. It would actually be really helpful if you've already seen our recent video on paradoxes in special relativity. You could watch it now if you haven't. I would wait, but you know where the pause button work. We're going to start out by me totally convincing you that time must run slow in a gravitational field - an effect we call gravitational time dilation. But to do that I need to give you a quick refresher on regular old time dilation, which tells us moving clocks must appear to tick slowly. This is from special relativity, rather than general relativity, but even special relativity seems a near miraculous insight. Einstein also had help and built on prior and contemporary wisdom to develop it. But it's fair to say that relativity was discovered in his own imagination - in his brilliant thought- or gedankenexperiments. Einstein's thought laboratory - his gedankenlab - was filled with many incredible imaginary devices, but one of his favorites was the photon clock. This is a simple pair of perfectly reflective, massless mirrors between which bounces a single photon of light. A counter

ticks over every time the photon does a full cycle. The photon clock represents the simplest possible clock, and anything that we conclude for it also applies to any other clock. And, in fact, to any matter - anything that can experience time, which in practice means anything with mass. We've talked about why this is the case previously. The amount of time taken for one tick of the photon clock is the distance the photon travels divided by its speed - so twice separation of the mirrors divided by the speed of light. But let's say the gedankenlab is moving at a constant velocity past a stationary physicist. They see the photon clock ticking, but the photon travels a longer path. How long does it take to execute that one tick? Here we have to invoke the great founding axiom of special relativity - that the speed of light is always measured to be the same for all observers, no matter their personal speed.

.....

**(01)-** V průběhu vašeho života vaše nohy zestárnou přibližně o 1 sekundu více než vaše hlava v důsledku gravitační dilatace času – a to za předpokladu, že váš život je dlouhý a že jste docela vysocí. Ale tento nepatrný rozdíl v toku času může být tím, co vás vůbec drží na této planetě. Albert Einstein si opravdu užíval představy lidí padajících z budov. Sám to řekl – svou nejšťastnější myšlenku popsal takto: „Pro pozorovatele padajícího volně ze střechy domu gravitační pole neexistuje.“ Nyní to známe jako **princip ekvivalence** – říká, že **neexistuje žádný experiment, který byste mohli udělat, abyste odlišili vztažnou soustavu při volném pádu v gravitačním poli od vztažené soustavy vznášející se v prostoru bez gravitace**. Samozřejmě za předpokladu, že jste v laboratoři bez oken a bez odporu vzduchu a ještě jste nenarazili na zem. Ale jinak, pokud jde o vesmír, pocit vznášet se, který cítíte za obou okolností, je úplně stejný. Stejně tak pocit hmotnosti, který pociťujete nehybně na povrchu Země, je totožný s pocitem hmotnosti, kterou byste pociťovali při zrychlení ve vzdálenosti 1 g od jakéhokoli gravitačního pole – alespoň pokud jde o fyzikální zákony. Einstein měl svou šťastnou myšlenku v roce 1907, pár let poté, co zahájil svou vědeckou revoluci se speciální teorií relativity. Trvalo mu dalších 8 let a hodně pomoci, než tuto jednoduchou myšlenku rozvinul do své plné teorie gravitace – obecné teorie relativity. Obecná teorie relativity neboli „GR“ vysvětluje, že **gravitační síla je způsobena zakřivením prostoru a času**. Hmota a energie mění délky pravítek a rychlosti hodin – a tyto změny nějak vedou k tomu, že se objekty k sobě přitahují. John Archibald Wheeler vyjádřil tuto představu nejpříměji: Časoprostor říká hmotě, jak se pohybovat; hmota říká časoprostoru, jak se zakřivit. Obvyklý způsob, jak to znázornit, je klasická analogie koule na gumě. Kuličky jsou omezeny, aby se pohybovaly pouze po listu, a pokud je list plochý, budou se pohybovat v přímých liniích - ale pokud je list zakřivený, pak žádné přímé čáry nejsou. Ale obrázek gumové fólie je přinejlepším hrubá analogie. **Jednak to znamená, že zakřivení dimenzí 3+3 ve struktuře vesmíru je příčinou gravitace** - ale to je jen polovina - ve skutečnosti méně než polovina obrázku. Hmota říká prostoru A času, jak se má zakřivit, a právě zakřivení času je většinou zodpovědné za to, že hmotě říká, jak se má pohybovat. Mezi gravitací a časem existuje hluboké spojení – **zdá se, že gravitační pole zpomalují tempo času v tom, co nazýváme gravitační dilatací času**. A dnes prozkoumáme původ tohoto efektu. A nakonec využijeme to, co se naučíme, abychom pochopili, **jak lze zakřivení v čase – tento gradient dilatace času – považovat za skutečný zdroj gravitační síly**. Bylo by skutečně užitečné, kdybyste již viděli naše nedávné video o paradoxech ve speciální relativitě. Můžete se na to podívat teď, pokud ještě nemáte. Počkal bych, ale víte, kde funguje tlačítko pauzy. **Začneme tím, že vás úplně přesvědčím, že čas musí v gravitačním poli běžet pomalu** – tento efekt nazýváme **gravitační dilatace času**. Abych to mohl udělat, musím vám dát rychlé osvěžení o pravidelné dilataci starého času, která nám říká, **že pohybující se hodiny se musí zdát pomalu tikat**. **Toto je ze speciální teorie relativity**, spíše než obecné teorie relativity, ale i speciální teorie relativity se zdá být téměř zázračným vhladem. Einstein také měl pomoc a stavěl na dřívější a současné moudrosti, aby ji rozvinul. Ale je spravedlivé říci, že relativita byla objevena v jeho vlastní představivosti - v jeho brilantních myšlenkách - nebo gedanken experimentech. Einsteinova myšlenková laboratoř – jeho gedankenlab – byla plná mnoha neuvěřitelných imaginárních zařízení, ale jedním z jeho oblíbených byly **fotonové hodiny**. Jedná se o jednoduchý pár dokonale reflexních, nehmotných zrcadel, mezi kterými se odráží jediný foton světla. **Dotto Morleyho-Michelsonův experiment**  
<http://www.hypothesis-of-universe.com/index.php?nav=d> ;

[universe.com/docs/d/d\\_018.pdf](http://universe.com/docs/d/d_018.pdf) Počítadlo zabliká pokaždé, když foton provede celý cyklus.

Fotonové hodiny představují nejjednodušší možné hodiny a vše, co pro ně vyvodíme, platí také pro jakékoli jiné hodiny. A vlastně do jakékoli hmoty – čehokoli, co může zažít čas, což v praxi znamená cokoliv s hmotností. O tom, proč tomu tak je, jsme hovořili již dříve. Množství času zabereného jedním tiknutím fotonových hodin je vzdálenost, kterou foton urazí, dělená jeho rychlostí – tedy dvojnásobek vzdálenosti zrcadel dělené rychlostí světla. Ale řekněme, že gerdankenlab se pohybuje konstantní rychlostí kolem stacionárního fyzika. Vidí, jak tikají fotonové hodiny, ale foton urazí delší dráhu. Jak dlouho trvá provedení tohoto jednoho zaškrtnutí? Zde se musíme odvolat na velký základní axiom speciální teorie relativity – že rychlost světla je vždy měřena jako stejná pro všechny pozorovatele, bez ohledu na jejich osobní rychlost.

.....

**(02)-** From the stationary perspective, the photon seems to travel further but it has to keep the same speed - so it appears to take longer to complete a single up-down tick. Add an identical but stationary photon clock. It seems to tick more than once for a single tick of the moving clock. And this apparent slowing of time appears for everything in the moving lab. But the whole situation is symmetric. For an observer in the moving lab, it appears that the stationary clock is ticking slow. That's because there's no preferred notion of "stillness" in relativity. They see the world as moving, and themselves stationary. Time dilation due to motion is inevitable if we accept the axiom of the constancy of the speed of light. To get to gravitational time dilation all we need to do is add in the equivalence principle as our second axiom. It tells us that whatever we conclude about the passage of time in an accelerating frame must also be true in a gravitational field. To get an accelerating frame we could strap rockets to our gerdankenlab - and don't worry, we will. But first, let's try this - build our lab into a giant, ring-shaped space station. If we set it rotating at the right speed then centripetal acceleration leads to some nice artificial gravity. Let's also suit up a physicist and have them float in space at one spot as the space station turns. They're in a non-accelerating, or inertial frame of reference. We have a photon clock in the lab and an identical one with the physicist. One tick of either clock is very short, which means that over that interval the lab moves only a tiny arc of the full circle. So we can approximate its motion as a straight line. Over that brief interval we know perfectly well what the time difference is between the two frames of reference. Both observers see the other's time has slowed. But after a full revolution, both observers ask each other how many ticks their clock ticked. And it turns out that the stationary clock did tick more - time slowed for the rotating case. This seems paradoxical, but the solution is the same as it is for the twin paradox from our previous episode. The summary is this: two observers moving in straight lines to each other do perceive the other as time-dilated - slowed. But as soon as one of those observers changes direction, the symmetry is broken. In the twin paradox, the twin traveling to a nearby star and back has aged less even though both could see the other's clock ticking slowly. We can see that when we use a spacetime diagram to show how the traveler tracks the passage of time back on Earth. Her perception of what is "simultaneous" to current moment flips at the turnaround point, so that she misses a bunch of the ticks of her brothers clock. Here's the spacetime diagram for our rotating lab. Now 2 dimensions of space instead of one. The spacetime path or worldline of the lab is a helix, and the lab's perception of "now" is this shifting plane. It's easier to see if we just take a slice out of this - one dimension of space again. Now the worldline is a sine wave. The lines of constant time for the moving clock tilt back and forth, and as that line tilts it fast-forwards over the clock ticks of the stationary clock. The source of acceleration doesn't matter. You get the same result if you do strap rockets to the gerdankenlab. The photon in the accelerating clock has to chase the upper mirror some, increasing the distance it needs to travel. On the way down the lower mirror catches up to it, reducing the down-tick distance. But overall, the distance for a single up-down tick is larger in a linearly accelerating frame compared to the inertial frame. OK, so what does all this have to do with gravity? The equivalence principle demands that there's no experiment that can distinguish between acceleration and gravity. Ergo someone standing in a gravitational field must experience the same sense of weight AND the same time dilation that you would get from being spun in a circle at the right radius and speed, or accelerated with linear acceleration equal to the gravitational acceleration. If both of our axioms are true - the constancy of the speed of light and the

equivalence of acceleration and gravity, then time must run slow in gravitational fields. It kind of blows me away that you can calculate the difference of the flow of time between an inertial and accelerating frame using pure special relativity with its kinematic time dilation plus shifting reference frames, OR you can use general relativity to calculate the gravitational time dilation for the equivalent gravitational acceleration. And you get the same answers. You do have to be careful to choose the right relative distances between observers. In the case of the twin paradox, gravitational time dilation gives the right relative time flows if you consider the traveling twin to be in a gravitational well with a constant acceleration equal to her spaceship's acceleration.

.....

**(02)-** Ze stacionární perspektivy se zdá, že foton cestuje dále, ale musí si udržovat stejnou rychlost - takže se zdá, že trvá déle, než dokončí jeden tick nahoru a dolů. Přidejte stejné, ale stacionární fotonové hodiny. Zdá se, že tiká více než jednou na jediné tiknutí pohyblivých hodin. A toto zjevné zpomalení času se objevuje u všeho v pohyblivé laboratoři. Celá situace je ale symetrická. Pro pozorovatele v pohybu se zdá, že stacionární hodiny tikají pomalu. Je to proto, že v relativitě neexistuje preferovaný pojem „nehybnost“. Vidí svět jako pohybuje se a sebe stojící. Dilatace času v důsledku pohybu je nevyhnutelná, pokud přijmeme axiom stálosti rychlosti světla. **Toto je výklad v dleď-růžovém o STR, podle STR. Abychom se dostali ke gravitační dilataci času,** vše, co musíme udělat, je **přidat princip ekvivalence** jako náš druhý axiom. **Tak to už je výklad OTR  $\rightarrow 1 \neq G \cdot M / c^2 \cdot x = \Delta v / v$**  Říká nám, že cokoli učiníme o plynutí času ve zrychlujícím se rámci, musí platit také v gravitačním poli. Abychom získali urychlovací rám, mohli bychom přivázat rakety k naší gerdankenlab – a nebojte se, uděláme to. Ale nejprve zkusme toto – postavíme naši laboratoř do obří vesmírné stanice ve tvaru prstence. Pokud nastavíme rotaci správnou rychlostí, pak dostředivé zrychlení vede k nějaké pěkné umělé gravitaci. Oblečme také fyziky a nechme je vznášet se vesmírem na jednom místě, jak se vesmírná stanice otáčí. Jsou v nezrychlující se nebo inerciální vztažné soustavě. V laboratoři máme fotonové hodiny a identické s fyzikem. Jedno tiknutí obou hodin je velmi krátké, což znamená, že v tomto intervalu se laboratoř posune pouze o malý oblouk celého kruhu. **Můžeme tedy aproximovat jeho pohyb jako přímkou. Takové aproximace nemám rád. Je to podvod na podstatě.** Během tohoto krátkého intervalu **dobře víme**, jaký je časový rozdíl mezi dvěma referenčními snímkem. Oba pozorovatelé vidí, že čas toho druhého se zpomalil. **Vidí znamená, že dostávají informace a ty jsou pootočené – co tím myslím, jsem už přednášel 30x jinde.** Ale po úplné revoluci se oba pozorovatelé jeden druhého ptají, kolik tiká jejich hodiny. **Pouze si mohou poslat informace, a ty jsou „cinknuté“.** Aby se mohli podívat „osobně“ na „cizí“ hodinky, opět musí „procestovat“ dráhu změnou gravitačního pole. A ukázalo se, že stacionární **hodiny tikaly více** - čas se pro rotující pouzdro zpomalil. **Hodiny netikaly více, ale sám čas tikal jiným tempem v jiné gravitační hladině. Zdá se to paradoxní, ale řešení je stejné jako pro paradox dvojčat z naší předchozí epizody. Není to paradoxní, je to stále o té křivosti dimenzí čp, o pootáčení soustav.** Shrnutí je toto: dva pozorovatelé pohybuje se v přímých liniích vůči sobě **vnímají** toho druhého **jako časově dilatovaného - zpomaleného.** **Dostávají o tom druhém subjektu-objektu informace ...o pootočených, tj. křivých dimenzích.** Ale jakmile jeden z těch pozorovatelů **změní směr, symetrie je narušena. Nastává ono pootáčení soustav.** V paradoxu dvojčete dvojče cestující k blízké hvězdě a zpět zestárlo méně, **nikoliv, už jsem podal přesné vysvětlení 20x za posledních 5-7 let i když oba viděli, neviděli hodinky „in-natura“, ale dostali informace svědčící o pootočení soustav. Výklad mám jinde.** jak pomalu tikají hodiny toho druhého. Můžeme to vidět, když použijeme časoprostorový diagram, abychom ukázali, jak cestovatel sleduje plynutí času zpět na Zemi. Její vnímání toho, co je „současné“ s aktuálním okamžikem, se v bodě obratu obrátí, takže jí unikne spousta tikotů hodin jejich bratrů. Zde je časoprostorový diagram pro naši rotační laboratoř. Nyní 2 rozměry prostoru místo jednoho. Časoprostorová dráha nebo světočára laboratoře je šroubovice a vnímání „ted“ laboratoři je tato posouvající se rovina. Je snazší vidět, když z toho jen ubereme kousek – opět jeden rozměr prostoru. Nyní je světová čára sinusová vlna. Čáry konstantního času pro pohybuje se hodiny se naklánějí tam a zpět, a jak se tato čára naklání rychle vpřed nad tikot hodin stacionárních hodin. Na zdroji zrychlení nezáleží. Stejného výsledku dosáhnete, když uděláte řemenové rakety do gerdankenlabu. Foton v urychlovacích hodinách musí trochu pronásledovat horní zrcadlo, čímž se zvětšuje vzdálenost, kterou potřebuje urazit. Při

sjíždění ho spodní zrcátko zachytí a zkrátí vzdálenost dolů. Celkově je však vzdálenost pro jeden tick nahoru a dolů větší v lineárně se zrychlujícím snímku ve srovnání s inerciálním snímkem. Dobře, tak co to má všechno společného s gravitací? Princip ekvivalence vyžaduje, aby neexistoval žádný experiment, který by dokázal rozlišit mezi zrychlením a gravitací. O.K. Takže někdo, kdo stojí v gravitačním poli, musí zažít stejný pocit hmotnosti a stejnou dilataci času, kterou byste získali, když byste se roztočili v kruhu se správným poloměrem a rychlostí nebo zrychlili s lineárním zrychlením rovným gravitačnímu zrychlení. Pokud platí oba naše axiomy – stálost rychlosti světla a ekvivalence zrychlení a gravitace, pak musí čas v gravitačních polích běžet pomalu. V proměnném gravitačním poli (což je zakřivený 3+3D časoprostor) se bude měnit tempo plynutí času Trochu mě vyvádí z míry, že můžete vypočítat rozdíl toku času mezi inerciálním a zrychlujícím se rámcem pomocí čistě speciální teorie relativity s její kinematickou dilatací času a posunutím referenčních soustav, NEBO můžete použít obecnou relativitu k výpočtu gravitační dilatace času pro ekvivalentní gravitační zrychlení. A dostanete stejné odpovědi. O.K. Musíte být opatrní, abyste zvolili správné relativní vzdálenosti mezi pozorovateli. V případě paradoxu dvojčat poskytuje dilatace gravitačního času správné relativní časové toky, pokud považujete cestující dvojče za gravitační studnu s konstantním zrychlením rovným zrychlení její vesmírné lodi.

.....

**(03)-** But how deep in the well? Well, as deep as the distance back to Earth - which is why the time dilation in this case is so huge, even if the acceleration is mild. Another note of caution: be aware that circular orbital motion in a gravitational field is very different from our rotating space station - then both gravitational time dilation and kinematic time dilation play separate roles. So is it some sort of cosmic coincidence that you get the same number with shifting reference frames as with artificial gravity? Well no, it's telling us that the source of the time dilation is fundamentally the same. OK, this is all fine and good. We've reasoned our way to seeing that gravitational time dilation must be a thing if our axioms are right. But that doesn't feel entirely satisfying - it doesn't seem explanatory. What really is it about the gravitational field that's causing time to tick slow? Perhaps the photon - or whatever light-speed quantum components make up matter - actually do have to travel further - between mirrors or between the forces binding matter. So that photon clocks and matter do evolve more slowly in gravitational fields. Or is it that if you're inside a gravitational field, your sense of "now" is continually sweeping forward compared to regions further outside the gravitational field? Sure, both of these are valid and there are even more ways to think about this - and no one of them is closer to reality - they are, in a sense, just our way to map the math to our intuition. But ultimately, asking "why does gravity slow time" is a bit backwards. A better question may be "why does slowed time cause gravity". The curvature of space by matter isn't nearly enough to give gravity at the strength we feel it. You're held in your chair right now by the curvature in time. In short, you're held down because your butt is ticking faster than your head. And I'll show you exactly why that's true real soon, when we explore the tangled connections between time and gravity in a curved spacetime.

.....

**(03)-** Ale jak hluboko ve studni? No, stejně hluboko, jako je vzdálenost zpět k Zemi – proto je dilatace času v tomto případě tak obrovská, i když je zrychlení mírné. Další upozornění: uvědomte si, že kruhový orbitální pohyb v gravitačním poli je velmi odlišný od naší rotující vesmírné stanice – pak jak gravitační dilatace času, tak kinematická dilatace času hrají oddělenou roli. Je to tedy nějaká kosmická náhoda, že s posunem referenčních soustav získáte stejné číslo jako s umělou gravitací? No ne, říká nám to, že zdroj dilatace času je v zásadě stejný. Dobře, to je všechno v pořádku a dobré. Zdůvodnili jsme svůj způsob, jak vidět, že gravitační dilatace času musí existovat, pokud jsou naše axiomy správné. Ale to není úplně uspokojivé - nezdá se to vysvětlující. Co to vlastně je s gravitačním polem, které způsobuje pomalé tikání času? gravitační pole se pokrivený časoprostor a tedy i tři dimenze času mění svou křivost – dilatace. Možná, že foton - nebo jakákoliv kvantová rychlost světla tvořící hmotu - musí ve skutečnosti cestovat dále - mezi zrcadly nebo mezi silami, které vážou hmotu. Takže fotonové hodiny a hmota se v gravitačních polích vyvíjejí pomaleji. Nebo je to tak, že pokud jste uvnitř gravitačního pole, váš pocit „ted“ se neustále hýbe

vpřed ve srovnání s oblastmi dále mimo gravitační pole? Jistě, obojí platí a existuje ještě více způsobů, jak o tom přemýšlet - a žádný z nich není blíže realitě - jsou v jistém smyslu jen našim způsobem, **jak zmapovat matematiku naší intuici**. **Musíte dokončit úvahy nad pootáčením soustav, nad křivením dimenzí a nad tím, že i čas má své tři dimenze**. Ale nakonec je otázka „proč gravitace zpomaluje čas“ trochu zpět. **Protože ona pootočí soustavu „testovacího bodu“ a v té soustavě pak interval délkový „kontrahuje“ a interval časový „dilatuje, což znamená, že se interval časový natahuje vůči etalonovému intervalu, tedy přesněji obráceně : ze soustavy s etalonovými intervaly když budete spouštět „průměty“ na pootočenou dimenzi, tak se na ní interval etalonový prodlouží – dilatuje. !!!** Lepší otázka může být „proč zpomalený čas způsobuje gravitaci“. **Nikoliv. Budete-li křivit 3+1 časoprostor ( lépe křivit 3+D čp), tak tím „vyrobíte gravitaci“**. Zakřivení prostoru hmotou nestačí na to, aby dodalo gravitaci takovou sílu, jakou ji cítíme. Právě teď vás drží na židli zakřivení v čase. Stručně řečeno, držíte se, protože váš zadek tika rychleji než hlava. A brzy vám přesně ukážu, proč je to pravda, až prozkoumáme spleť souvislosti mezi časem a gravitací v zakřiveném časoprostoru.

.....

**JN, 17.11.2022**