

(00)- What Is Spacetime Really Made Of?

Spacetime may emerge from a more fundamental reality. Figuring out how could unlock the most urgent goal in physics—a quantum theory of gravity

AUTHOR

Adam Becker is a science writer at Lawrence Berkeley National Laboratory and author of *What Is Real?*, about the sordid untold history of quantum physics. His writing has appeared in the *New York Times*, the BBC, and elsewhere. He earned a Ph.D. in cosmology from the University of Michigan. *Credit: Nick Higgins*

.....

(00)- Z čeho se časoprostor skutečně skládá?

Časoprostor se může vynořit ze zásadnější reality. Zjistit, jak by bylo možné odemknout nejnaléhavější cíl ve fyzice – kvantovou teorii gravitace.

AUTOR Adam Becker je vědeckým spisovatelem z Lawrence Berkeley National Laboratory a autorem knihy *Co je skutečné?* o špinavé, nevyřčené historii kvantové fyziky. Jeho spisy se objevily v *New York Times*, BBC a jinde. Získal titul Ph.D. v kosmologii z University of Michigan. Kredit: Nick Higgins

(01)- Natalie Paquette spends her time thinking about how to grow an extra dimension. Start with little circles, scattered across every point in space and time—a curlicue dimension, looped back onto itself. Then shrink those circles down, smaller and smaller, tightening the loop, until a curious transformation occurs: the dimension stops seeming tiny and instead becomes enormous, like when you realize something that looks small and nearby is actually huge and distant. “We’re shrinking a spatial direction,” Paquette says. “But when we try to shrink it past a certain point, a new, large spatial direction emerges instead.”

Paquette, a theoretical physicist at the University of Washington, is not alone in thinking about this strange kind of dimensional transmutation. A growing number of physicists, working in different areas of the discipline with different approaches, are increasingly converging on a profound idea: space—and perhaps even time—is not fundamental. Instead space and time may be *emergent*: they could arise from the structure and behavior of more basic components of nature. At the deepest level of reality, questions like “Where?” and “When?” simply may not have answers at all. “We have a lot of hints from physics that spacetime as we understand it isn’t the fundamental thing,” Paquette says.

These radical notions come from the latest twists in the century-long hunt for a theory of quantum gravity. Physicists’ best theory of gravity is general relativity, Albert Einstein’s famous conception of how matter warps space and time. Their best theory of everything else is quantum physics, which is astonishingly accurate when it comes to the properties of matter, energy and subatomic particles. Both theories have easily passed all the tests physicists have been able to devise for the past century. Put them together, one might think, and you would have a “theory of everything.”

But the two theories don’t play nicely. Ask general relativity what happens in the context of quantum physics, and you’ll get contradictory answers, with untamed infinities breaking loose across your calculations. Nature knows how to apply gravity in quantum contexts—it

happened in the first moments of the big bang, and it still happens in the hearts of black holes—but we humans are still struggling to understand how the trick is done. Part of the problem lies in the ways the two theories deal with space and time. While quantum physics treats space and time as immutable, general relativity warps them for breakfast.

Somehow a theory of quantum gravity would need to reconcile these ideas about space and time. One way to do that would be to eliminate the problem at its source, spacetime itself, by making space and time emerge from something more fundamental. In recent years several different lines of inquiry have all suggested that, at the deepest level of reality, space and time do not exist in the same way that they do in our everyday world. Over the past decade these ideas have radically changed how physicists think about black holes. Now researchers are using these concepts to elucidate the workings of something even more exotic: wormholes—hypothetical tunnel-like connections between distant points in spacetime. These successes have kept alive the hope of an even deeper breakthrough. If spacetime is emergent, then figuring out where it comes from—and how it could arise from anything else—may just be the missing key that finally unlocks the door to a theory of everything.

.....

(01)- Natalie Paquette tráví čas přemýšlením o tom, jak získat další dimenzi. Začněte s malými kruhy, rozptýlenými napříč každým bodem v prostoru a čase – dimenzí kudrlinky, která se vrací sama do sebe. Pak tyto kruhy zmenšujte, zmenšujte a zmenšujte, utahujte smyčku, dokud nenastane podivná transformace : dimenze se přestane zdát malinká a místo toho se stane obrovskou, jako když si uvědomíte, že něco, co vypadá malé a poblíž, je ve skutečnosti obrovské a vzdálené. "Zmenšujeme prostorový směr," říká Paquette. "Ale když se to pokusíme zmenšit za určitý bod, místo toho se objeví nový, velký prostorový směr." Paquette, teoretický fyzik z Washingtonské univerzity, není sám, kdo přemýšlí o tomto podivném druhu dimenzionální transmuce. Rostoucí počet fyziků, kteří pracují v různých oblastech disciplíny s různými přístupy, se stále více přibližuje k hluboké myšlence : prostor – a možná ani čas – nejsou zásadní. Místo toho se může objevit prostor a čas : mohly by vzniknout ze struktury a chování více základních složek přírody. Na nejhlubší úrovni reality jsou otázky jako „Kde?“ a „kdy?“ prostě nemusí mít vůbec odpovědi. "Máme mnoho náznaků z fyziky, že časoprostor, jak jej chápeme, není základní věcí," říká Paquette. Tyto radikální názory pocházejí z nejnovějších zvrátů ve stoleté honbě za teorií kvantové gravitace. Nejlepší teorií gravitace fyziků je obecná teorie relativity, slavná koncepce Alberta Einsteina o tom, jak hmota deformuje prostor a čas. Jejich nejlepší teorií všeho ostatního je kvantová fyzika, která je překvapivě přesná, pokud jde o vlastnosti hmoty, energie a subatomárních částic. Obě teorie snadno prošly všemi testy, které byli fyzici schopni vymyslet za minulá století. Dalo by se dohromady, mohl by si myslet, a měli byste „teorii všeho“. Ale tyto dvě teorie nehrají dobře. Zeptejte se obecné teorie relativity, co se děje v kontextu kvantové fyziky, a dostanete protichůdné odpovědi, přičemž ve vašich výpočtech se uvolňují nezkrotná nekonečna. Příroda ví, jak aplikovat gravitaci v kvantových kontextech – stalo se to v prvních okamžicích velkého třesku a stále se to děje v srdcích černých děr – ale my lidé se stále snažíme pochopit, jak se ten trik dělá. Část problému spočívá ve způsobech, jak tyto dvě teorie nakládají s prostorem a časem. Zatímco kvantová fyzika zachází s prostorem a časem jako s neměnnými, obecná teorie relativity je u snídaně zkriví. Nějakým způsobem by teorie kvantové gravitace potřebovala uvést tyto představy o prostoru a čase do souladu. Jedním ze způsobů, jak toho dosáhnout, by bylo odstranit problém u jeho zdroje, samotného časoprostoru, tím, že prostor a čas vzniknou z něčeho zásadnějšího. V posledních letech několik různých směrů zkoumání všechny naznačovalo, že na nejhlubší úrovni reality prostor a čas neexistují stejným způsobem jako v našem každodenním světě. Za posledních deset let tyto myšlenky radikálně změnil způsob, jakým fyzici přemýšlejí o černých dírách. Nyní výzkumníci používají tyto

koncepty k objasnění fungování něčeho ještě exotičtějšího: červích děr - hypotetických tunelových spojení mezi vzdálenými body v časoprostoru. Tyto úspěchy udržely při životě naději na ještě hlubší průlom. Pokud se časoprostor vynoří, pak zjištění, odkud pochází – a jak by mohl vzniknout z čehokoli jiného – může být jen chybějícím klíčem, který konečně odemkne dveře k teorii všeho.

.....

(02)- The World in a String Duet

Today the most popular candidate theory of quantum gravity among physicists is string theory. According to this idea, its eponymous strings are the fundamental constituents of matter and energy, giving rise to the myriad fundamental subatomic particles seen at particle accelerators around the world. They are even responsible for gravity—a hypothetical particle that carries the gravitational force, a “graviton,” is an inevitable consequence of the theory. But string theory is difficult to understand—it lives in mathematical territory that has taken physicists and mathematicians decades to explore. Much of the theory’s structure is still uncharted, expeditions still planned and maps left to be made. Within this new realm, the main technique for navigation is through mathematical dualities—correspondences between one kind of system and another.

One example is the duality from the beginning of this article, between tiny dimensions and big ones. Try to cram a dimension down into a little space, and string theory tells you that you will end up with something mathematically identical to a world where that dimension is huge instead. The two situations are the same, according to string theory—you can go back and forth from one to the other freely and use techniques from one situation to understand how the other one works. “If you carefully keep track of the fundamental building blocks of the theory,” Paquette says, “you can naturally find sometimes that ... you might grow a new spatial dimension.”

Credit: Elena Hartley

A similar duality suggests to many string theorists that space itself is emergent. The idea began in 1997, when Juan Maldacena, a physicist at the Institute for Advanced Study, uncovered a duality between a kind of well-understood quantum theory known as a conformal field theory (CFT) and a special kind of spacetime from general relativity known as anti-de Sitter space (AdS). The two seem to be wildly different theories—the CFT has no gravity in it whatsoever, and the AdS space has all of Einstein’s theory of gravity thrown in. Yet the same mathematics can describe both worlds. When it was discovered, this AdS/CFT correspondence provided a tangible mathematical link between a quantum theory and a full universe with gravity in it.

Curiously, the AdS space in the AdS/CFT correspondence had one more dimension in it than the quantum CFT had. But physicists relished this mismatch because it was a fully worked-out example of another kind of correspondence conceived a few years earlier, from physicists Gerard ’t Hooft of Utrecht University in the Netherlands and Leonard Susskind of Stanford University, known as the holographic principle. Based on some of the peculiar characteristics of black holes, ’t Hooft and Susskind suspected that the properties of a region of space might be fully “encoded” by its boundary. In other words, the two-dimensional surface of a black hole would contain all the information needed to know what was in its three-dimensional interior—like a hologram. “I think a lot of people thought we were nuts,” Susskind says. “Two good physicists gone bad.”

Similarly, in the AdS/CFT correspondence, the four-dimensional CFT encodes everything about the five-dimensional AdS space it is associated with. In this system, the entire region of spacetime is built out of interactions between the components of the quantum system in the

conformal field theory. Maldacena likens this process to reading a novel. "If you are telling a story in a book, there are the characters in the book that are doing something," he says. "But all there is is a line of text, right? What the characters are doing is inferred from this line of text. The characters in the book would be like the bulk [AdS] theory. And the line of text is the [CFT]."

But where does the space in the AdS space come from? If this space is emergent, what is it emerging from? The answer is a special and strangely quantum kind of interaction in the CFT: entanglement, a long-distance connection between objects, instantaneously correlating their behavior in statistically improbable ways. Entanglement famously troubled Einstein, who called it "spooky action at a distance."

.....

(02)- Svět ve smyčcovém duetu.

Dnes **nejpopulárnější kandidátskou teorií** kvantové gravitace mezi fyziky je teorie strun. Podle této **myšlenky jsou jeho stejnojmenné struny základními složkami hmoty** a energie, které vedly ke vzniku nesčetných základních subatomárních částic, které lze vidět na urychlovačích částic po celém světě. Jsou dokonce zodpovědné za gravitaci – hypotetická částice, která přenáší gravitační sílu, „graviton“, je nevyhnutelným důsledkem této teorie. Teorii strun je ale těžké porozumět – **žije na matematickém území**, které fyzikům a matematikům trvalo desetiletí, než je prozkoumali. Velká část struktury teorie je stále nezmapovaná, expedice jsou stále plánované a zbývá vytvořit mapy. V této nové oblasti je hlavní technika navigace prostřednictvím matematických dualit – shody mezi jedním druhem systému a druhým. Jedním z příkladů je dualita ze začátku tohoto článku, mezi malými a velkými rozměry. Zkuste nacpat dimenzi do malého prostoru a teorie strun vám řekne, že skončíte s něčím matematicky identickým se světem, kde je tato dimenze místo toho obrovská. Tyto dvě situace jsou podle teorie strun stejné – můžete se volně pohybovat tam a zpět z jedné do druhé a používat techniky z jedné situace, abyste pochopili, jak ta druhá funguje. „Pokud budete pečlivě sledovat základní stavební kameny teorie,“ říká Paquette, „někdy přirozeně zjistíte, že... můžete vyrůst nový prostorový rozměr.“ Kredit: Elena Hartley Podobná dualita naznačuje mnoha teoretikům strun, že **prostor sám o sobě vzniká. Moje myšlenka je, že se „rozbalují“ křivosti dimenzí, které byly po Třesku „zmuchlané“ do pěny** Myšlenka začala v roce 1997, kdy **Juan Maldacena**, fyzik z Institutu pro pokročilá studia, odhalil dualitu mezi jakousi dobře chápanou kvantovou teorií známou jako konformní teorie pole (CFT) a **zvláštním druhem časoprostoru ???** z obecné teorie relativity. jako anti-de Sitterův prostor (AdS). **Zdá se**, že tyto dvě teorie jsou naprosto odlišné teorie – CFT v sobě nemá žádnou gravitaci a prostor AdS obsahuje veškerou Einsteinovu teorii gravitace. Přesto stejná matematika může popsat oba světy. Když to bylo objeveno, tato korespondence AdS/CFT poskytla hmatatelné matematické spojení mezi kvantovou teorií a úplným vesmírem s gravitací. Je zvláštní, že prostor AdS v korespondenci AdS/CFT měl v sobě ještě jeden rozměr, než měl kvantový CFT. Fyzikové si však tento nesoulad libovali, protože to byl plně propracovaný příklad jiného druhu korespondence vytvořené o několik let dříve, od fyziků **Gerarda 't Hoofta** z Utrechtské univerzity v Nizozemsku a **Leonarda Susskinda** ze Stanfordské univerzity, známé jako holografický princip. Na základě některých zvláštních charakteristik černých děr měli 't Hooft a Susskind podezření, že vlastnosti oblasti vesmíru mohou být plně „zakódovány“ jejich hranicemi. Jinými slovy, dvourozměrný povrch černé díry by obsahoval všechny informace potřebné k tomu, abychom věděli, co je v jejím trojrozměrném nitru – jako hologram. **"Myslím, že mnoho lidí si myslelo, že jsme blázní," říká Susskind.** "Dva dobří fyzici se pokazili." Podobně v korespondenci AdS/CFT čtyřrozměrný CFT kóduje vše o pětirozměrném prostoru AdS, se kterým je spojen. V tomto systému je celá oblast časoprostoru postavena z interakcí mezi složkami kvantového systému

v konformní teorii pole. Maldacena tento proces přirovnává ke čtení románu. „Pokud v knize vyprávíte příběh, jsou v knize postavy, které něco dělají,“ říká. "Ale je tam jen řádek textu, že?" Co postavy dělají, je odvozeno z tohoto řádku textu. Postavy v knize by byly jako teorie hromadné [AdS]. A řádek textu je [CFT].“ Ale odkud pochází prostor v prostoru AdS? Pokud se tento prostor vynořuje, z čeho se vynořuje? Odpovědí je zvláštní a podivně kvantový druh interakce v CFT: zapletení, spojení mezi objekty na velké vzdálenosti, okamžitě korelující jejich chování statisticky nepravděpodobným způsobem. Zapletení skvěle znepokojovalo Einsteina, který to nazval „strašidelnou akcí na dálku“.

.....
(03)- Will we ever know the real nature of space and time?

Yet despite its spookiness, entanglement is a core feature of quantum physics. When any two objects interact in quantum mechanics, they generally become entangled and will stay entangled so long as they remain isolated from the rest of the world—no matter how far apart they may travel. In experiments, physicists have maintained entanglement between particles more than 1,000 kilometers apart and even between particles on the ground and others sent to orbiting satellites. In principle, two entangled particles could sustain their connection on opposite sides of the galaxy or the universe. Distance simply does not seem to matter for entanglement, a puzzle that has troubled many physicists for decades.

But if space is emergent, entanglement’s ability to persist over large distances might not be terribly mysterious—after all, distance is a construct. According to studies of the AdS/CFT correspondence by physicists Shinsei Ryu of Princeton University and Tadashi Takayanagi of Kyoto University, entanglement is what produces distances in the AdS space in the first place. Any two nearby regions of space on the AdS side of the duality correspond to two highly entangled quantum components of the CFT. The more entangled they are, the closer together the regions of space are.

In recent years physicists have come to suspect that this relation might apply to our universe as well. “What is it that holds the space together and keeps it from falling apart into separate subregions? The answer is the entanglement between two parts of space,” Susskind says. “The continuity and the connectivity of space owes its existence to quantum-mechanical entanglement.” Entanglement, then, may undergird the structure of space itself, forming the warp and weft that give rise to the geometry of the world. “If you could somehow destroy the entanglement between two parts [of space], the space would fall apart,” Susskind says. “It would do the opposite of emerging. It would dis-emerge.”

If space is made of entanglement, then the puzzle of quantum gravity seems much easier to solve: instead of trying to account for the warping of space in a quantum way, space itself emerges out of a fundamentally quantum phenomenon. Susskind suspects this is why a theory of quantum gravity has been so difficult to find in the first place. “I think the reason it never worked very well is because it started with a picture of two different things, [general relativity] and quantum mechanics, and put them together,” he says. “And I think the point is really that they’re much too closely related to pull apart and then put back together again. There’s no such thing as gravity without quantum mechanics.”

Yet accounting for emergent space is only half the job. With space and time so intimately linked in relativity, any account of how space emerges must also explain time. “Time must also emerge somehow,” says Mark van Raamsdonk, a physicist at the University of British Columbia and a pioneer in the connection between entanglement and spacetime. “But this is not well understood and is an active area of research.”

Another active area, he says, is using models of emergent spacetime to understand wormholes. Previously many physicists had believed that sending objects through a wormhole was impossible, even in theory. But in the past few years physicists working on the AdS/CFT

correspondence and similar models have found new ways to construct wormholes. “We don’t know if we could do that in our universe,” van Raamsdonk says. “But what we now know is that certain kinds of traversable wormholes are theoretically possible.” Two papers—one in 2016 and one in 2018—led to an ongoing flurry of work in the area. But even if traversable wormholes could be built, they would not be much use for space travel. As Susskind points out, “you can’t go through that wormhole faster than it would take for [light] to go the long way around.”

.....

(03)- Poznáme někdy skutečnou povahu prostoru a času?

Navzdory své strašidelnosti je zapletení základním rysem kvantové fyziky. Když jakékoli dva objekty interagují v kvantové mechanice, obvykle se zapletou a zůstanou zapletené tak dlouho, dokud zůstanou izolované od zbytku světa – bez ohledu na to, jak daleko od sebe mohou cestovat. V experimentech fyzici udržovali propletení mezi částicemi vzdálenými od sebe více než 1000 kilometrů a dokonce i mezi částicemi na zemi a ostatními částicemi vysílanými na obíhající satelity. V zásadě by dvě propletené částice mohly udržet své spojení na opačných stranách galaxie nebo vesmíru. Zdá se, že vzdálenost prostě nehraje roli pro zapletení, hádanku, která trápí mnoho fyziků po celá desetiletí. Ale pokud se objeví prostor, schopnost zapletení přetrvávat na velké vzdálenosti nemusí být příliš záhadná – koneckonců vzdálenost je konstrukt. Podle studií korespondence AdS/CFT fyziků **Shinsei Ryu z Princetonské univerzity** a **Tadashi Takayanagiho z Kjótské univerzity** takayana@yukawa.kyoto-u.ac.jp je zapletení to, co v první řadě vytváří vzdálenosti v prostoru AdS. Jakékoli dvě blízké oblasti prostoru na straně AdS duality odpovídají dvěma vysoce provázaným kvantovým složkám CFT. Čím více jsou propletené, tím blíže k sobě jsou oblasti vesmíru. V posledních letech fyzici přišli k podezření, že tento vztah by mohl platit i pro náš vesmír. „Co drží prostor pohromadě a brání tomu, aby se rozpadl na samostatné podoblasti? Odpovědí je propletenec mezi dvěma částmi vesmíru,“ říká Susskind. "Kontinuita a konektivita vesmíru vděčí za svou existenci kvantově-mechanickému zapletení." Zapletení tedy může podepřít strukturu samotného prostoru a vytvořit osnovu a útek, které dávají vzniknout geometrii světa. „Pokud byste mohli nějakým způsobem zničit propletenec mezi dvěma částmi [vesmíru], prostor by se rozpadl,“ říká Susskind. "Udělaloby to opak vynoření." Vynořilo by se to." Pokud se prostor skládá ze zapletení, pak se zdá, že je mnohem snazší vyřešit hádanku kvantové gravitace: místo toho, abychom se snažili vysvětlit deformaci prostoru kvantovým způsobem, prostor samotný se vynoří z principiálně kvantového jevu. Susskind se domnívá, že právě to je důvod, proč bylo tak obtížné najít teorii kvantové gravitace. "Myslím, že důvod, proč to nikdy nefungovalo dobře, je ten, že to začalo obrazem dvou různých věcí, [obecná teorie relativity] a kvantové mechaniky, a dal je dohromady," říká. "A myslím, že jde o to, že jsou opravdu příliš příbuzní na to, aby se roztrhli a pak zase dali dohromady." Neexistuje nic takového jako gravitace bez kvantové mechaniky." Účtování o naléhavém prostoru je však jen polovinou práce. Vzhledem k tomu, že prostor a čas jsou tak úzce spjaty v relativitě, jakýkoli popis toho, jak prostor vzniká, musí také vysvětlovat čas. „Čas se také musí nějak objevit,“ říká **Mark van Raamsdonk**, mav@phas.ubc.ca fyzik z University of British Columbia a průkopník ve spojení mezi propletením a časoprostorem. "Ale toto není dobře pochopeno a je to aktivní oblast výzkumu." Další aktivní oblastí, říká, je používání modelů vznikajícího časoprostoru k pochopení červích děr. Dříve mnoho fyziků věřilo, že posílání objektů červí dírou je nemožné, dokonce i teoreticky. Ale v posledních několika letech fyzici pracující na korespondenci AdS/CFT a podobných modelech našli nové způsoby, jak konstruovat červí díry. "Nevíme, jestli bychom to dokázali v našem vesmíru," říká van Raamsdonk. "Nyní však víme, že určité druhy průchodných červích děr jsou teoreticky možné." Dva dokumenty – jeden v roce 2016 a jeden v roce 2018 – vedly k

pokračujícímu přívalu práce v této oblasti. Ale i kdyby se daly vybudovat průchodné červí díry, nebyly by pro cestování vesmírem příliš použitelné. Jak zdůrazňuje Susskind, „nemůžete projít tou červí dírou rychleji, než by bylo zapotřebí, aby [světlo] obešlo dlouhou cestu kolem.“

.....

(04)- Space to Think

If the string theorists are correct, then space is built from quantum entanglement, and time might be as well. But what would that really mean? How can space be “made of” entanglement between objects unless those objects are themselves somewhere? How can those objects become entangled unless they experience time and change? And what kind of existence could things have without inhabiting a true space and time?

These are questions verging on philosophy—and indeed, philosophers of physics are taking them seriously. “How the hell could spacetime be the kind of thing that could be emergent?” asks Eleanor Knox, a philosopher of physics at King’s College London. Intuitively, she says, that seems impossible. But Knox doesn’t think that is a problem. “Our intuitions are terrible sometimes,” she says. They “evolved on the African savanna interacting with macro objects and macro fluids and biological animals” and tend not to transfer to the world of quantum mechanics. When it comes to quantum gravity, “‘Where’s the stuff?’ and ‘Where does it live?’ aren’t the right questions to be asking,” Knox concludes.

It is certainly true that objects live in places in everyday life. But as Knox and many others point out, that does not mean that space and time have to be fundamental—just that they have to reliably emerge from whatever is fundamental. Consider a liquid, says Christian Wüthrich, a philosopher of physics at the University of Geneva. “Ultimately it’s elementary particles, like electrons and protons and neutrons or, even more fundamental, quarks and leptons. Do quarks and leptons have liquid properties? That just doesn’t make sense, right?...

Nevertheless, when these fundamental particles come together in sufficient numbers and show a certain behavior together, collective behavior, then they will act in a way that is like a liquid.”

Space and time, Wüthrich says, could work the same way in string theory and other theories of quantum gravity. Specifically, spacetime might emerge from the materials we usually think of as living in the universe—matter and energy itself. “It’s not [that] we first have space and time and then we add in some matter,” Wüthrich says. “Rather something material may be a necessary condition for there to be space and time. That’s still a very close connection, but it’s just the other way from what you might have thought originally.”

But there are other ways to interpret the latest findings. The AdS/CFT correspondence is often seen as an example of how spacetime might emerge from a quantum system, but that might not actually be what it shows, according to Alyssa Ney, a philosopher of physics at the University of California, Davis. “AdS/CFT gives you this ability to provide a translation manual between facts about the spacetime and facts of the quantum theory,” Ney says.

“That’s compatible with the claim that spacetime is emergent, and some quantum theory is fundamental.” But the reverse is also true, she says. The correspondence could mean that quantum theory is emergent and spacetime is fundamental—or that neither is fundamental and that there is some even deeper fundamental theory out there. Emergence is a strong claim to make, Ney says, and she is open to the possibility that it is true. “But at least just looking at AdS/CFT, I’m still not seeing a clear argument for emergence.”

An arguably bigger challenge to the string theory picture of emergent spacetime is hidden in plain sight, right in the name of the AdS/CFT correspondence itself. “We don’t live in anti-de Sitter space,” Susskind says. “We live in something much closer to de Sitter space.” De Sitter space describes an accelerating and expanding universe much like our own. “We haven’t got

the vaguest idea how [holography] applies there,” Susskind concludes. Figuring out how to set up this kind of correspondence for a space that more closely resembles the actual universe is one of the most pressing problems for string theorists. “I think we’re going to be able to understand better how to get into a cosmological version of this,” van Raamsdonk says. Finally, there is the news—or lack thereof—from the latest particle accelerators, which have not found any evidence for the extra particles predicted by supersymmetry, an idea that string theory relies on. Supersymmetry dictates that all known particles would have their own “superpartners,” doubling the number of fundamental particles. But CERN’s Large Hadron Collider near Geneva, designed in part to search for superpartners, has seen no sign of them. “All of the really precise versions of [emergent spacetime] that we have are in supersymmetric theories,” Susskind says. “Once you don’t have supersymmetry, the ability to mathematically follow the equations just evaporates out of your hands.”

.....

(04)- Prostor k zamyšlení

Pokud mají teoretici strun pravdu, pak je prostor vytvořen z kvantového zapletení **čeho s čím ?** a čas může být také. **Zapleten ?** Ale co by to ve skutečnosti znamenalo? Jak lze prostor „vytvořit“ ze zapletení mezi objekty, pokud tyto objekty samy někde nejsou? **Ha-ha** Jak se mohou tyto objekty zamotat, pokud nezažijí čas a změnu? **Ha-ha** **A jaký druh existence by věci mohly mít, aniž by obývaly skutečný prostor a čas?** To jsou otázky hraničící s filozofií – a filozofové fyziky je skutečně berou vážně. **To chce studovat HDV** "Jak sakra mohl být časoprostor tím druhem věcí, které se mohou vynořit?" ptá se **Eleanor Knoxová**, eleanor.knox@kcl.ac.uk filozofka fyziky z King’s College London. Intuitivně se to podle ní zdá nemožné. Ale Knox si nemyslí, že to je problém. "Naše intuice jsou někdy hrozná," říká. „Vyvinuli se na africké savaně při interakci s makro objekty a makro tekutinami a biologickými zvířaty“ a nemají tendenci se přenášet do světa kvantové mechaniky. Pokud jde o kvantovou gravitaci, „Kde jsou ty věci?“ a „Kde to žije?“ nejsou ty správné otázky,“ uzavírá Knox. Určitě platí, že předměty žijí na místech v každodenním životě. Ale jak zdůrazňuje Knox a mnoho dalších, **neznamená to, že prostor a čas musí být základní – jen musí spolehlivě vycházet z čehokoli, co je základní.** **Omyl, zásadní omyl.** Vezměme si kapalinu, říká **Christian Wüthrich**, filozof fyziky na univerzitě v Ženevě. „V konečném důsledku jsou to elementární částice, jako jsou elektrony a protony a neutrony nebo ještě zásadnější kvarky a leptony. Mají kvarky a leptony kapalně vlastnosti? To prostě nedává smysl, že?... Nicméně když se tyto základní částice sejdou v dostatečném počtu a projeví společné chování, kolektivní chování, budou se chovat způsobem, který je jako kapalina.“ Prostor a čas, říká Wüthrich, by mohly fungovat stejným způsobem v teorii strun a dalších teoriích kvantové gravitace. **Konkrétně se časoprostor může objevit z materiálů, o kterých si obvykle myslíme, že žijí ve vesmíru – hmoty a energie samotné.** **Zásadní omyl. Hmota je konstruována z časoprostoru, nikoliv naopak.** "Není to tak, že nejprve máme prostor a čas a pak přidáme nějakou hmotu," říká Wüthrich. **Ne, nejprve máme časoprostor a z něj pak vyrobíme hmotu.** „Něco hmotného může být spíše nezbytnou podmínkou pro existenci prostoru a času. To je stále velmi úzké spojení, ale je to jen jiná cesta, než jste si původně mysleli.“ Ale existují i jiné způsoby, jak interpretovat nejnovější poznatky. Korespondence AdS/CFT je často považována za příklad toho, jak by se časoprostor mohl vynořit z kvantového systému, ale podle **Alyssy Ney**, aney@ucdavis.edu filozofky fyziky na University of California, Davis, to ve skutečnosti nemusí být to, co ukazuje. „AdS/CFT vám dává možnost poskytnout překladový manuál mezi fakty o časoprostoru a fakty kvantové teorie,“ říká Ney. "To je v souladu s tvrzením, že časoprostor vzniká a nějaká kvantová teorie je zásadní." Ale opak je pravdou, říká. **Tato korespondence by mohla znamenat, že kvantová teorie vzniká a prostoročas je fundamentální – nebo že ani jedno není fundamentální a že existuje ještě hlubší**

fundamentální teorie. HDV Emergence je silné tvrzení, říká Ney, a je otevřená možnosti, že je to pravda. "Ale alespoň při pohledu na AdS/CFT stále nevidím jasný argument pro vznik." Pravděpodobně větší výzva pro obraz teorie strun vznikajícího časoprostoru je skryta na očích, přímo ve jménu samotné korespondence AdS/CFT. "Nežijeme v anti-de Sitterově prostoru," říká Susskind. "Žijeme v něčem mnohem bližším de Sitterově prostoru." De Sitterův prostor popisuje zrychlující se a rozpínající se vesmír podobně jako ten náš. „Nemáme ani tu nejmlhavější představu, jak tam [holografie] platí,“ uzavírá Susskind. Zjistit, jak nastavit tento druh korespondence pro prostor, který se více podobá skutečnému vesmíru, je jedním z nejnaléhavějších problémů pro teoretiky strun. „Myslím, že budeme schopni lépe porozumět tomu, jak se dostat do kosmologické verze tohoto,“ říká van Raamsdonk. Konečně jsou tu zprávy – nebo jejich nedostatek – z nejnovějších urychlovačů částic, které nenašly žádné důkazy pro další částice předpovídané supersymetrií, což je myšlenka, o kterou se opírá teorie strun. Supersymetrie diktuje, že všechny známé částice budou mít své vlastní „superpartnery“, čímž se zdvojnásobí počet základních částic. Ale velký hadronový urychlovač CERNu poblíž Ženevy, zčásti určený k hledání superpartnerů, po nich nezaznamenal žádnou stopu. „Všechny skutečně přesné verze [vznikajícího časoprostoru], které máme, jsou v supersymetrických teoriích,“ říká Susskind. "Jakmile nemáte supersymetrii, schopnost matematicky sledovat rovnice se vám prostě vypaří z rukou."

(05)- Atoms of Spacetime

String theory is not the only idea that suggests spacetime is emergent. String theory has “failed to live up to [its] promise as a way to unite gravity and quantum mechanics,” says Abhay Ashtekar, a physicist at Pennsylvania State University. “The power of string theory now is in providing an extremely rich set of tools, which has been used widely across the whole spectrum of physics.” Ashtekar is one of the original pioneers of the most popular alternative to string theory, known as loop quantum gravity. In loop quantum gravity, space and time are not smooth and continuous the way they are in general relativity—instead they are made of discrete components, what Ashtekar calls “chunks or atoms of spacetime.” These atoms of spacetime are connected in a network, with one- and two-dimensional surfaces joining them together into what practitioners of loop quantum gravity call a spin foam. And despite that foam being limited to two dimensions, it gives rise to our four-dimensional world, with three dimensions of space and one of time. Ashtekar likens it to a piece of clothing. “If you look at your shirt, it looks like a two-dimensional surface,” he says. “If you just take a magnifying glass, you will immediately see that it’s all one-dimensional threads. It’s just that those threads are so densely packed that for all practical purposes, you can think of the shirt as being a two-dimensional surface. So, similarly, the space around us looks like a three-dimensional continuum. But there is really a crisscross by these [atoms of spacetime].”

Although string theory and loop quantum gravity both suggest that spacetime is emergent, the kind of emergence is different in the two theories. String theory suggests that spacetime (or at least space) emerges from the behavior of a seemingly unrelated system, in the form of entanglement. Think of how traffic jams emerge from the collective decisions of individual drivers. The cars are not made of traffic—the cars *make* the traffic. In loop quantum gravity, on the other hand, the emergence of spacetime is more like a sloping sand dune emerging from the collective motion of sand grains in wind. The smooth familiar spacetime comes from the collective behavior of tiny “grains” of spacetime; like the dunes, the grains are still sand, even though the chunky crystalline grains do not look or act like the undulating dunes. Despite these differences, both loop quantum gravity and string theory suggest spacetime emerges from some underlying reality. Nor are they the only proposed theories of quantum gravity that point in this direction. Causal set theory, another contender for a theory of

quantum gravity, posits that space and time are made of more fundamental components as well. "It's really striking that for most of the plausible theories of quantum gravity that we have, in some sense their message is, yeah, general relativistic spacetime isn't in there at the fundamental level," Knox says. "People get very excited when different theories of quantum gravity agree on at least something."

The Future of Space at the Edge of Time

Modern physics is a victim of its own success. Because quantum physics and general relativity are both so phenomenally accurate, quantum gravity is needed only to describe extreme situations, when enormous masses are stuffed into unfathomably tiny spaces. Those conditions exist in only a few places in nature, such as the center of a black hole—and notably not in physics laboratories, not even the largest and most powerful ones. It would take a particle accelerator the size of a galaxy to directly test the behavior of nature under conditions where quantum gravity reigns. This lack of direct experimental data is a large part of the reason why scientists' search for a theory of quantum gravity has been so long.

(05)- Atomy časoprostoru

Teorie strun není jedinou myšlenkou, která naznačuje, že se objevuje časoprostor. Teorie strun „nedostála svému slibu, jak sjednotit gravitaci a kvantovou mechaniku,“ říká **Abhay Ashtekar**, fyzik z Pennsylvania State University. "Síla teorie strun je nyní v poskytování extrémně bohaté sady nástrojů, které byly široce používány v celém spektru fyziky." Ashtekar je jedním z původních průkopníků nejjednodušší alternativy k teorii strun, známé jako **smyčková kvantová gravitace**. Ve smyčkové kvantové gravitaci **nejsou prostor a čas plynulé a spojitě**, jako je tomu v obecné relativitě – místo toho **jsou vyrobeny z diskrétních komponent, a ty „komponenty“ jsou co ? z čeho ?** které **Ashtekar nazývá „kousky nebo atomy časoprostoru“**. Tyto atomy časoprostoru jsou propojeny v síti, s jedno- a dvourozměrnými povrchy, které je spojují do toho, co praktikující smyčkové kvantové gravitace nazývají **spinovou pěnou**. **Balíčkování dimenzí délek a času** A přestože je tato pěna omezena na dva rozměry, **dává vzniknout našemu čtyřrozměrnému světu se třemi rozměry prostoru a jedním rozměrem času**. **Pěna čp bude 3+3dimenzionální a ony projevy „kvantování“ jsou svou podstatou právě těmi „balíčky“ co se budou prezentovat svými vlastnostmi a chováním jako elementární částice hmoty**. Ashtekar to přirovnává ke kusu oblečení. „Když se podíváte na svou košili, vypadá jako dvourozměrný povrch,“ říká. „Když si vezmete lupu, okamžitě uvidíte, že jsou to všechno jednorozměrné vlákna. Jde jen o to, že tyto nitě jsou tak hustě nacpané, že pro všechny praktické účely si můžete košili představit jako dvourozměrný povrch. Podobně prostor kolem nás vypadá jako trojrozměrné kontinuum. Ale tyto [atomy časoprostoru] jsou skutečně křížovány.“ Ačkoli teorie strun a smyčková kvantová gravitace naznačují, že časoprostor **vzniká**, druh vynoření se u těchto dvou teorií liší. Teorie strun **naznačuje, každá teorie něco naznačuje, to není výsada strunové teorie, a rozhodně už né ten výmysl se strunami z Ničeho**. že **časoprostor** (nebo alespoň prostor) **vzniká z chování** zdánlivě nesouvisejícího systému ve formě zapletení. **Nesmysl**. Přemýšlejte o tom, jak dopravní zácpy **vznikají** z kolektivních rozhodnutí jednotlivých řidičů. **Auta nejsou vyrobena z provozu – auta vytvářejí provoz**. **A proto časoprostor není vytvořen-vyroběn z nějakého „zapetení“ (částic hmotových), ale naopak : hmota je vyrobena „zapletením“ dimenzí čp**. Na druhé straně ve smyčkové kvantové gravitaci je **vznik** časoprostoru spíše jako svažující se písečná duna vynořující se z kolektivního pohybu zrněk písku ve větru. **Nesmysl**. Hladký známý časoprostor **pochází** z kolektivního chování drobných „zrněk“ časoprostoru **to jsou chybně formulované koncepce**. Samozřejmě, že **hladká hladina moře viděná z letadla jako hladká je silně zvlněná vidění z blízkosti hladiny**. Hladkost „nevzniká“ ze zrněk ...!! Proč by měla ? **co je to za blbost ?!** http://www.hypothesis-of-universe.com/docs/c/c_425.jpg ; http://www.hypothesis-of-universe.com/docs/c/c_418.jpg ; http://www.hypothesis-of-universe.com/docs/c/c_418.jpg ;

universe.com/docs/c/c_411.jpg ; http://www.hypothesis-of-universe.com/docs/c/c_171.jpg
stejně jako duny jsou zrna stále pískem, i když mohutná krystalická zrna nevypadají ani se nechovají jako zvláště duny. Navzdory těmto rozdílům, jak smyčková kvantová gravitace, tak teorie strun naznačují, že **prostorčas se vynořuje z nějaké základní reality. To je chybná úvaha, spíš nesmysl. Naopak časoprostor je ona základní realita a z ní se následně realizuje-vzniká hmota.** Nejsou to ani jediné navrhané teorie kvantové gravitace, které ukazují tímto směrem. Teorie kauzálních množin, další uchazeč o teorii kvantové gravitace, předpokládá, **že prostor a čas se také skládají ze základních složek. Jakých, podle vás ?** "Je opravdu zarážející, že pro většinu věrohodných teorií kvantové gravitace, které máme, v určitém smyslu jejich poselství zní, ano, obecný relativistický prostorčas tam na základní úrovni není," říká Knox. "Lidé jsou velmi nadšení, když se různé teorie kvantové gravitace shodnou alespoň na něčem." Budoucnost vesmíru na hranici času **Moderní fyzika je obětí vlastního úspěchu.** Protože kvantová fyzika a obecná teorie relativity jsou tak fenomenálně přesné, je kvantová gravitace potřebná pouze k popisu extrémních situací, kdy jsou obrovské masy nacpané do neuvěřitelně malých prostorů. Tyto podmínky existují jen na několika místech v přírodě, jako je centrum černé díry – a zvláště ne ve fyzikálních laboratořích, dokonce ani v těch největších a nejvýkonnějších. K přímému testování chování přírody v podmínkách, kde vládne kvantová gravitace, by byl zapotřebí urychlovač částic velikosti galaxie. Tento nedostatek přímých experimentálních dat je velkou částí důvodu, proč vědci hledali teorii kvantové gravitace tak dlouho.

.....

(06)- Faced with the lack of evidence, most physicists have pinned their hopes on the sky. In the earliest moments of the big bang, the entire universe was phenomenally small and dense—a situation that calls for quantum gravity to describe it. And echoes of that era may remain in the sky today. "I think our best bet [for testing quantum gravity] is through cosmology," Maldacena says. "Maybe something in cosmology that we now think is unpredictable, that maybe can be predicted once we understand the full theory, or some new thing that we didn't even think about."

Laboratory experiments may come in handy, however, for testing string theory, at least indirectly. Scientists hope to study the AdS/CFT correspondence not by probing spacetime but by building highly entangled systems of atoms and seeing whether an analogue to spacetime and gravity shows up in their behavior. Such experiments might "have some features of gravity, though, perhaps not all the features," Maldacena says. "It also depends on exactly what you call gravity."

Will we ever know the real nature of space and time? The observational data from the skies may not be forthcoming any time soon. The lab experiments could be a bust. And as philosophers know well, questions about the true nature of space and time are very old indeed. What exists "is now all together, one, continuous," said the philosopher Parmenides 2,500 years ago. "All is full of what is." Parmenides insisted that time and change were illusions, that everything everywhere was one and the same. His pupil Zeno created famous paradoxes to prove his teacher's point, purporting to show that motion over any distance was impossible. Their work raised the question of whether time and space are somehow illusory, an unsettling prospect that has haunted Western philosophy for over two millennia.

"The fact that the ancient Greeks asked things like, 'What is space?' 'What is time?' 'What is change?' and that we still ask versions of these questions today means that they were the right questions to ask," Wüthrich says. "It's by thinking about these kinds of questions that we have learned a lot about physics."

.....

(06)- Tváří v tvář nedostatku důkazů většina fyziků upíná své naděje k nebi. V nejrannějších okamžicích velkého třesku byl celý vesmír fenomenálně malý a hustý – situace, která vyžaduje kvantovou gravitaci, aby to popsala. A ozvěny té doby mohou na obloze zůstat i dnes. "Myslím, že naše nejlepší řešení [pro testování kvantové gravitace] je prostřednictvím kosmologie," říká Maldacena. "Možná něco v kosmologii, o čem si nyní myslíme, že je nepředvídatelné, co možná lze předpovědět, jakmile pochopíme celou teorii, nebo nějakou novou věc, o které jsme ani nepřemýšleli." Laboratorní experimenty se však mohou hodit pro testování teorie strun, alespoň nepřímo. Vědci doufají, že prostudují korespondenci AdS/CFT nikoli sondováním časoprostoru, ale budováním vysoce propletených systémů atomů a sledováním, zda se v jejich chování projeví analogie časoprostoru a gravitace. Takové experimenty mohou mít „některé rysy gravitace, ale možná ne všechny,“ říká Maldacena. "Záleží také na tom, čemu přesně říkáte gravitace." **Poznáme někdy skutečnou povahu prostoru a času?** Údaje z pozorování z oblohy nemusí být v dohledné době k dispozici. Laboratorní experimenty by mohly zkrachovat. A jak filozofové dobře vědí, otázky o skutečné povaze prostoru a času jsou skutečně velmi staré. To, co existuje, „je nyní vše pohromadě, jedno, spojitě“, řekl filozof Parmenides před 2500 lety. "Všechno je plné toho, co je." Parmenides trval na tom, že čas a změna jsou iluze, že všechno všude je jedno a totéž. Jeho žák Zeno vytvořil slavné paradoxy, aby dokázal názor svého učitele a chtěl ukázat, že pohyb na jakoukoli vzdálenost je nemožný. Jejich práce nastolila otázku, zda jsou čas a prostor nějak iluzorní, znepokojující vyhlídka, která pronásleduje západní filozofii již více než dvě tisíciletí. „Skutečnost, že se staří Řekové ptali na věci jako: ‚Co je prostor?‘ ‚Co je čas?‘ ‚Co je to změna?‘ a že si dnes stále klademe verze těchto otázek, znamená, že to byly správné otázky,“ říká Wüthrich. "Přemýšlením o těchto typech otázek jsme se toho o fyzice hodně naučili."

JN, kom 21.01.2022