

Přátelské soutěžení mezi čtyřmi interakcemi

Hmota a síly, které jí hýbou

Než začneme vyprávět příběh o gravitačních vlnách, podnikněme krátký výlet do vesmíru. Hmota se skládá z molekul a molekuly jsou útvary složené z atomů. Atom se skládá z elektronů, které víří kolem jádra; to je zase tvořeno protony a neutrony, jimž se říká nukleony. Nukleony jsou vystavěny z kvarků. To je všechno, co v tomto směru víme.*

Ve vesmíru se také nachází temná hmota a temná energie. (O těch více v kapitole 18.) Přesně vzato je celkové složení vesmíru následující: 27 % tvoří temná hmota, 68 % temná energie a pouze 5 % je obyčejná hmota. Zhruba lze říci, že ve vesmíru probíhá impozantní kosmický zápas mezi temnou hmotou a temnou energií.¹ Hmota, již známe a milujeme a z níž jsme sami stvořeni, hraje jen podřadnou roli. Bohužel, o temné straně vesmíru pořád ještě víme velice málo.

Rozeznáváme čtyři fundamentální síly působící mezi částicemi. Když jsou částice blízko u sebe, dochází k jejich interakci**, jinými slovy, navzájem se ovlivňují. Tady máte

* Představa, že kvarky a elektrony jsou titěrné struny, je sice velmi zajímavá, ale v této chvíli to je jen pouhá spekulace.

** „Interakce“ či „interagovat“ je odborný termín používaný fyziky podobně jako termíny „energie“, „hybnost“ nebo „hmotnost“.

šikovné shrnutí těchto čtyř sil, jimiž jsou: gravitace, elektromagnetismus, silná interakce a slabá interakce.

G: Gravitace brání tomu, abychom se vznesli vzhůru a praštili se hlavou o strop.*

E: Elektromagnetické působení brání tomu, abychom propadli podlahou k sousedům pod námi – pokud nebydlíme v přízemí.**

S1: Silná interakce má zásluhu o to, že nám Slunce zdarma dodává světlo a energii.

S2: Slabá interakce zabraňuje Slunci, aby nám vybuchlo nad hlavou.

Nepamatuju se na to, ale předpokládám, že když jsme pobývali v matčině lůnu, díky vztlaku*** jsme si gravitaci neuvědomovali. Ale jakmile jsme byli venku, gravitaci jsme si uvědomili. Zvláště když nás porodník vzal za kotníky a držel nás hlavou dolů. Načež nás zlehka plácl na zadeček, takže jsme začali křičet, otevřeli oči a objevili elektromagnetismus.

Jenom čtyři síly!

Člověk má pocit, že svět je plný záhadných sil a interakcí. Že by byly jen čtyři?

Už jako batole jsme se při lezení kolikrát praštili do hlavy o nějaký tvrdý předmět. Jak to vysvětluje teorie? Po

* Víte přece, že Země se rychle otáčí, aby urazila 24 000 mil za 24 hodin. Každý, kdo absolvoval pár kurzů fyziky, by dovedl vypočítat, jak velké je odstředivé zrychlení.

** Elektromagnetická interakce koná spoustu dalšího dobra. Drží pohromadě atomy, řídí šíření světla a rádiových vln, způsobuje chemické reakce a v neposlední řadě nám brání, abychom mohli procházet zdí.

*** I vztlak je ve skutečnosti gravitační síla, protože kapalina kolem nás se snaží udělat si pohodlí tím, že se cpe pod nás.

pravdě řečeno, teorie pevných látek je hodně složitá, což je pochopitelné, když existuje tolik různých pevných látek. Ale stačí nám udělat si jednoduchou představu: jádra atomů, z nichž se pevná látka skládá, leží v pevně daných uzlech pravidelné mřížky a elektrony se mezi nimi pohybují jako kvantový oblak. Je to kolektivní společnost, v níž je veškerá individualita ztracena. Atomy už neexistují jako jednotlivé entity. Takové uspořádání je energeticky velice výhodné – což je způsob, jak fyzici říkají, že potřebujete vynaložit hodně energie, abyste takové uspořádání narušili. Revoluce je nákladná. Chce to pořádné svaly, když chcete rozbít kámen na dvě půlky.

Takže miliardy interakcí, s nimiž se v životě setkáváme, jako když se praštíme o něco pevného, mohou být všechny redukovány na elektromagnetickou interakci. To, s čím se setkáváme v běžném životě, je z velké části jen reziduální efekt elektromagnetické síly. Jelikož věci kolem nás jsou zpravidla elektricky neutrální (obsahují stejný počet elektronů jako protonů), všechny elektromagnetické interakce se vzájemně prakticky zcela vyruší. I síla ocelového břitu sbíječky bušící do skály je jenom pouhým odleskem skutečné velikosti elektromagnetické síly.

Vlastně existuje jen jedna situace, kdy se zachvějeme při pohledu na běsnící elektromagnetickou sílu – a sice když blesky a dunění hromu zaplňují nebe. My, moderní lidé, jsme si elektromagnetické síly zcela podrobili, ale naši prapředkové připisovali jejich občasné výbuchy hněvu bohů.²

Když jsme začali brát rozum, připadalo nám, že ve světě existují tisíce, ne-li miliony různých sil. Je tedy úžasné, že jsme si dokázali uvědomit, že existují jen čtyři fundamentální síly, a došli jsme k tomu po staletích pečlivého zkoumání

přírody. Kupříkladu objev, že za světlo vděčíme elektromagnetismu, byl obrovský krok vpřed.

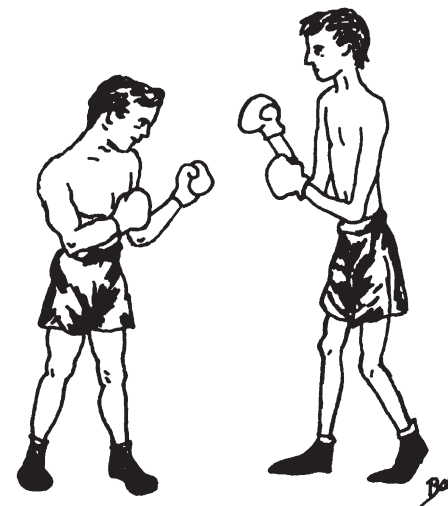
Vesmír jako pečlivě secvičený tanec

Zatímco gravitačního a elektromagnetického působení si je každý člověk dobře vědom, s existencí silné a slabé interakce se nikdy přímo nesetkal. Ve skutečnosti je ale fyzikální vesmír dokonale sladěným tancem všech čtyř interakcí.

Vezměme si typickou hvězdu, která svou existenci začíná jako oblak protonů a elektronů. Gravitace postupně zformuje tuto mlhavou hmotu do sférického chuchvalce, v němž spolu začnou soupeřit silné a elektromagnetické síly.

Elektrická síla se snaží oddálit stejnojmenné náboje. Takže působením odpudivé elektromagnetické síly se protony drží daleko od sebe. Naproti tomu silná interakce přitahuje protony k sobě. V tomto souboji mají elektrické síly mírně navrch, což má dalekosáhlé důsledky. Kdyby přitažlivost mezi protony byla jen o málo silnější, dva protony by se k sobě dostaly tak blízko, že by došlo k uvolnění energie. Jinými slovy, došlo by velice rychle k jaderné reakci a jaderné palivo hvězd by rychle vyhořelo, takže by nemohlo dojít k pozvolnému vývoji hvězd, natož ke vzniku civilizace.

Ve skutečnosti je přitažlivá síla mezi nukleony sotva dost silná na to, aby mohla spojit dohromady proton a neutron, ale není schopna vázat dohromady dva protony. Zhruba řečeno, než může proton interagovat s jiným protonem, musí se nejdřív transformovat na neutron. Tato transformace je dílem slabé interakce a probíhá nesmírně pomalu, jak už název „slabá“ interakce naznačuje. Výsledkem je, že nukleony se v jádru hvězdy, jako je naše Slunce, spalují pomalu a rovnoměrně, takže se můžeme těšit z její ustálené teplé záře.



Boxer s krátkýma rukama, ale silnou ránou versus boxer s dlouhýma rukama, ale slabou ránou.

Převzato z A. Zee: *Fearful Symmetry: The Search for Beauty in Modern Physics*. Copyright © 1986 A. Zee, Princeton University Press.

Dosah síly versus její velikost

V běžném životě silnou a slabou interakci nevnímáme, protože mají extrémně malý dosah. Jakmile se od sebe protony jen trochu vzdálí, přitažlivá síla mezi nimi klesne náhle k nule. A slabá interakce působí na ještě menší vzdálenost. Z tohoto důvodu silná a slabá interakce nevedou ke vzniku vln. V této knize se těmito dvěma krátkodosahovými interakcemi příliš zabývat nebudeme.

Naproti tomu gravitační síla mezi dvěma hmotnými objekty a elektrická síla mezi dvěma náboji klesají se vzdáleností R mezi nimi jako $1/R^2$ čili nepřímo úměrně druhé mocnině vzdálenosti. Více na toto téma v kapitole 2. Gravitace

a elektromagnetická síla jsou dalekodosahové a díky tomu mohou vést ke vzniku vln.

Pro velká R tyto síly sice vymizí, ale dost pomalu na to, abychom cítili přitažlivost Slunce, i když je doslova astronomicky vzdálené. Ze stejného důvodu se naše galaxie Mléčná dráha přibližuje k sousední galaxii v Andromedě.

Takže v souboji mezi čtyřmi interakcemi není hrubá síla to jediné, na čem záleží: mnoho jevů závisí na vzájemném poměru mezi dosahem síly a její velikostí. Vidíme to například při srovnání jaderné fúze a štěpné reakce. Když se dostatečně přiblíží dvě malá jádra, každé složené z pár protonů a neutronů, silná interakce snadno přemůže elektrickou odpudivou sílu a dojde k jaderné fúzi. Naproti tomu v případě velkých jader (nejznámějším případem jsou jádra uranu), elektrická odpudivá síla přemůže silnou interakci. Každý proton vnímá přitažlivou sílu silné interakce protonů nebo neutronů jen v blízkém okolí, ale pocituje elektrické odpuzování všech ostatních protonů v jádře. Jádro má tendenci se rozštěpit na dvě menší části a zároveň dochází k uvolnění energie.

Gravitace je absurdně slabá

Gravitace a elektrická síla

Ve srovnání s elektromagnetickou silou je gravitace absurdně slabá. Jak lze porovnat na fundamentální úrovni vzájemnou velikost dvou sil? Ze všeho nejdřív připomeneme pár základních faktů.

O Newtonovi (1642–1726/27)¹ a jeho univerzálním zákonu gravitace jsme se učili ve škole. Tvrdí, že síla F , kterou se přitahují objekt o hmotnosti M (řekněme Země), a objekt o hmotnosti m (řekněme Měsíc) je rovna konstantě G (známé jako Newtonova gravitační konstanta) násobené součinem těchto hmotností (tj. Mm) a dělené druhou mocninou vzdálenosti R mezi oběma tělesy. Převáděno do jazyka matematiky, $F = GMm/R^2$.

Ve škole nám také vykládali o Coulombově zákonu. Říká, že síla F , kterou se odpuzují (přitahují) dva náboje q_1 a q_2 , je rovna součinu těchto nábojů (čili q_1q_2) dělenému druhou mocninou jejich vzdálenosti R . Převáděno do jazyka matematiky, $F = q_1q_2/R^2$.*

* Tvar fyzikálních zákonů samozřejmě závisí na použitých jednotkách. Uvedený tvar Coulombova zákona odpovídá tzv. CGS-ESU jednotkám. V mezinárodní soustavě SI (dnes v učebnicích běžně používané) vystupuje na pravé straně Coulombova zákona ještě faktor $1/4\pi\epsilon_0$, kde ϵ_0 je tzv. permitivita vakua. Pozn. překl.

Evidentní záhada: klesání síly se čtvercem (druhou mocninou) rostoucí vzdálenosti – zákonitost $1/R^2$ – platí u síly gravitační i elektrické. K modernímu pochopení této shody se vrátíme později.

Není třeba počítat nuly, uděláme to za vás

Dáme si pauzu, protože teď je vhodná chvíle pro zavedení vědeckého zápisu čísel – pro případ, že ho neznáte. Smysl této notace lze vyjádřit následovně: Vážený pane nebo paní, nemusíte počítat nuly za číslem, uděláme to za vás. Takže 100 zapíšeme jako 10^2 , 1000 jako 10^3 , 1 000 000 jako 10^6 atd. Exponent (číslo vpravo nahoře) jako třeba 6 v čísle 10^6 , udává počet nul, když vypisujeme číslo 10^6 jako 1 000 000. Z toho také plyne, že číslo jako třeba 149 můžeme zapsat ve tvaru $1,49 \times 10^2$. Násobení velkých čísel je pak neobyčejně jednoduché: prostě se sečte počet nul. Tak třeba $100 \times 1000 = 100\,000$ můžeme získat následovně: $10^2 \times 10^3 = 10^{2+3} = 10^5$. V této notaci je $10 = 10^1$ a $1 = 10^0$ (jelikož je to 1 a za ní žádné nuly).

Teď už víme, jak psát velká čísla. Malá čísla můžeme zapsat se znaménkem minus v exponentu. To lze snadno dokázat. Jelikož, jak už víme, platí $10^a \times 10^b = 10^{a+b}$, dělením obou stran této rovnice číslem 10^a dostáváme $10^b = 10^{a+b}/10^a$. Když položíme $b = -a$, dostaneme $10^{-a} = 10^{a-a}/10^a = 10^0/10^a = 1/10^a$. Pro ilustraci položme $a = 2$, takže jsme dokázali, že $10^{-2} = 1/10^2$. Jinými slovy 1/100 (což zapíšeme v běžné notaci jako 0,01) můžeme ve vědecké notaci zapsat jako 10^{-2} . Když položíme $a = 17$, máme $10^{-17} = 1/10^{17}$, což je velice malé číslo, jelikož 10^{17} je hodně velké číslo.

Srovnání gravitace s elektromagnetickou silou

Po tomto notačním intermezzu jsme připraveni porovnat gravitaci s elektrickou silou. Aby bylo srovnání férové, uvažujme silové působení mezi dvěma protony. Gravitační přitažlivost mezi nimi je rovna $F_{\text{gravitační}} = Gm_p^2 / R^2$, kde m_p je hmotnost protonu. Naproti tomu odpovídá elektrická síla mezi nimi je $F_{\text{elektrická}} = e^2 / R^2$, kde e je náboj protonu a rovněž fundamentální jednotka elektrického náboje.

Takže poměr obou sil $F_{\text{elektrická}} / F_{\text{gravitační}} = e^2 / (Gm_p^2)$. Všimněme si, že faktor R^2 se vykrátí, takže poměr je číslo, a sice zhruba 10^{36} , což je 1 následovaná 36 nulami. Toto nesmírně velké číslo dává přesný význam tvrzení, že ve srovnání s elektrickou silou je gravitace neuvěřitelně slabá.* Elektromagnetická interakce je 10^{36} krát silnější než gravitační.

Všimněme si také, že než byly objeveny elementární částice jako protony a elektrony, jakékoliv srovnávání síly gravitace a elektromagnetismu by nemělo smysl. Na čem bychom srovnání prováděli?

Gravitace nerozlišuje jin a jang

Kdo měl tu smůlu a zažil ošklivý pád na zem, je možná překvapený tvrzením, že gravitace je ve srovnání s elektrickou silou tak slabá. Musíme si ovšem uvědomit, že každý atom v nešťastníkově těle byl přitahován každým atomem celé Země. Obrovský počet atomů ve hře více než kompenzuje faktor 10^{-36} .

* Všimněme si, že použitím dvou protonů ke srovnání je pro gravitaci ještě výhodné. Jelikož elektron je asi 2000krát lehčí než proton, je poměr mezi elektrickou a gravitační silou působící mezi dvěma elektrony ještě větší: $10^{36} \times 2000^2 = 4 \times 10^{42}$.

Další obrovský rozdíl mezi oběma interakcemi – a je opravdu obrovský, jak uvidíme dál – je dán tím, že hmotnosti jsou vždycky kladné, kdežto náboje mohou být kladné i záporné. Elektrická síla mezi kladným a záporným nábojem je tudíž záporná, jinými slovy je přitažlivá. Stejně náboje se odpuzují, opačné se přitahují.

Elektromagnetismus tudíž vnímá rozdíl mezi jin a jang. Zatímco jin a jang se přitahují, elektrická síla mezi jin a jin nebo mezi jang a jang je odpudivá.

Naproti tomu gravitace nic takového nezná: každý je přitahován ke komukoliv jinému.

Jak jsem se už zmínil, běžné objekty kolem nás obsahují stejný počet kladných i záporných nábojů, takže jsou elektricky neutrální. Pokud na sebe silově působí, jde jen o reziduální působení, které zůstane, když se nejvýznamnější příspěvky mezi nabitými částicemi uvnitř objektů – přitažlivá síla mezi elektrony a protony, odpuzování mezi protony a mezi elektrony – navzájem vyruší. Je to jako když se provede finanční transakce miliard položek, výsledek zaokrouhlíme na nejbližší dolar a nakonec z toho všeho zůstane jen zaokrouhlovací chyba 23 centů.

To, co z působení elektrických a magnetických sil pozorujeme kolem nás, je jenom nepatrná „zaokrouhlovací chyba“.

Věčné soutěžení dvou sil

Zajímavým příkladem z každodenního života, jenž demonstruje ohromnou převahu elektrické síly nad gravitací, je magnet pro přichycení poznámek na dveřích ledničky. Kousíček dveří ledničky, který je v kontaktu s přichyceným magnetem, vzdoruje gravitaci celé Země. A to je magnetická

síla vyvolaná kruhovým pohybem nabitých částic uvnitř magnetu mnohem slabší než elektrická síla.

Jakmile začnete o této soutěži mezi elektromagnetismem a gravitací uvažovat, zjistíte, že je přítomna všude a neustále. Vezměme si třeba skleničku vody. Molekuly vody slyší nepřetržitě volání gravitace, které je nabádá, aby utíkaly dolů a přitiskly se na nadra matky Země. Ale elektromagnetismus způsobí, že se molekuly skla chytí za ruce a vytvoří vězení, z něhož molekuly vody nemohou uniknout. Elektrické síly snadno překonají gravitační přitažlivost celé Země.

Jediná úniková cesta vede přes horní okraj sklenice. Když molekuly vody absorbují ze svého okolí infračervené fotony a když využijí nárazů molekul vzduchu, začnou se pohybovat rychleji a zběsile na sebe narážejí. Jednou za čas získá některá molekula vody tak vysokou rychlost – díky mnoha srážkám s okolím –, že překoná gravitaci táhnoucí ji dolů a vyskočí na svobodu. Tento proces nazýváme vypařování, a nakonec povede k tomu, že se sklenice vyprázdní, jen na dně možná zůstane škrálop – molekuly minerálů jsou příliš obézní, než aby mohly uniknout.

Anebo si vezměme strom. Usilovně pumpuje vzhůru proti síle gravitace živiny. Určitě si dokážete sami vymyslet mnoho dalších příkladů tohoto neustávajícího zápolení mezi elektromagnetismem a gravitací, které probíhá všude kolem nás.²

Newtonova odpověď na vaši námitku

Vraťme se ještě na chvíli k magnetu na dveřích ledničky. Mohli jste namítnout, že s tím srovnáním to není tak jednoduché. Země sice je obrovská, ale její hodně velká část je také od magnetu hodně vzdálená.

Newton si byl tohoto problému dobře vědom a strávil téměř 20 let dokazováním dvou – jak to sám nazval – „skvělých teorémů“. Magnet je přitahován kouskem Země pod našima nohama; ten je sice blízko magnetu, ale tvoří jen nepatrný zlomek celé Země. Zbytek Země, včetně obrovské části na protější straně zeměkoule, je velmi daleko. Takže chceme-li použít zákon $F = GMm/R^2$ na výpočet přitažlivé gravitační síly mezi magnetem a zeměkoulí, měli bychom si představit, že Země je rozřezaná na spoustu maličkých kousíčků, z nichž každý je v nějaké vzdálenosti R od magnetu, a přitažlivé síly všech kousíčků, působící na magnet, posčítat.

Jak to provést, byl oříšek, a aby to svedl, musel Newton vynalézt integrální počet (dneska by to mohli dostat studenti za domácí úkol).^{*} Když Newton všechny příspěvky posčítal, dospěl k pozoruhodnému výsledku: síla F , kterou Země působí na objekt o hmotnosti m , ať už jde třeba o jablko nebo magnet, je táž, jako kdyby se Země s celou svou hmotností M smrškla do jediného bodu ležícího ve středu zeměkoule. Jinými slovy v Newtonově vzorci $F = GMm/R^2$ je třeba za R dosadit poloměr Země.

Jelikož se Newton tak zdržel vymyšlením oněch dvou skvělých teorémů, došlo k jednomu z nejostřejších soubojů o prvenství v historii fyziky. Zatím co Newton měl plné ruce práce s počítáním, jeho soupeř Robert Hooke (1635–1703) rovněž uveřejnil gravitační zákon. Newton, zpochybňující jeho prvenství, Hookea obvinil, že nemohl znát jeho první skvělý teorém, a tudíž je vyloučeno, že by dokázal vypočítat sílu působící na pověstné jablko.

^{*} Tato procedura – rozřezání objektu na infinitezimální (v limitě nekonečně malé) kousičky a posčítání sil od všech těchto kousíčků se nazývá integrace.



První Newtonův skvělý teorém: Jablko ležícímu na pólu je sice nejbližší severní polární čepička, ale rovníkové části jsou mnohem hmotnější. Výsledné působení všech částí zeměkoule na jablko je stejné, jako kdyby se veškerá hmotnost zeměkoule nacházela v jejím středu.

Převzato z knihy A. Zee: *Einstein's Universe: Gravity at Work and Play*, Oxford University Press, 1989.

Newtonův slavný výrok, zhruba ve smyslu: „Viděl jsem dále než ostatní, protože jsem mohl stát na ramenou obrů,“ často citovaný jako výraz jeho skromnosti, byl zřejmě posměšnou narážkou na Hookea, který byl pomenší postavy. Možná že je ten výrok smyšlený, ale každopádně Sidney Coleman, vedoucí mé doktorské práce, skvělý, ale mimořádně arogantní fyzik, s oblibou vtipkoval: „Viděl jsem dále než ostatní, protože jsem se mohl dívat přes ramena trpaslíků.“

Kde je peklo?

Než skončíme tuhle kapitolu, nemohu odolat, abych se nevrátil k otázce, která ve vás možná hlodá: který je ten druhý z Newtonových „skvělých teorémů“. Uvedl jsem, že dokázal dva, ale zatím jsme mluvili jen o tom takzvaném prvním.

Newtonův druhý teorém se týká velké záhady jeho doby: kde je peklo? Sice to už není právě palčivý problém současné fyziky, ale dokážeme si představit, že za dávých časů si s tím fyzikové lámali hlavu. Země je kulatá a představovat si, že by se nebe nacházelo na konkrétním místě nad našimi hlavami, už nebylo přijatelné; nebesa musí tvořit sférickou slupku kolem zeměkoule. Takže peklo se muselo nacházet ve středu duté Země. Myslím, že většina mých kolegů se mnou bude souhlasit, že takové umístění představuje nejjednodušší rozšíření existující teorie. Částečné pochopení vulkanické činnosti (plus pozorované čtení Bible) posloužilo jako dobré experimentální potvrzení této teorie.

Kromě toho se Newton dopustil chybného výpočtu hustoty Země, která mu vyšla mnohem menší než hustota Měsíce. Tento výpočet pak vedl Newtonova přítele Edmonda Halleyho (1654–1742) – jenž mimochodem vydal na vlastní náklady Newtonova *Principia* – k vypracování teorie duté zeměkoule.^{3, 4} Dnes nám to připadá absurdní, ale tenkrát se to fyzikům absurdní nezdálo. Umístění pekla bylo nutno nalézt. Každá fyzikální epocha má svoje klíčové problémy. Je klidně možné, že příštím generacím bude připadat stejně absurdní naše úporná snaha kvantovat gravitaci.

Takže onen Newtonův druhý skvělý teorém tvrdí, že uvnitř sférické slupky je gravitační síla nulová.⁵ Teď už

chápete, proč se Newton vůbec namáhal zabývat se takovou podivnou úlohou.*

Bud' velkánské, nebo nepatrné

Kdybych byl laik čtoucí populární knížky o fyzice, byl bych zmaten ze všech těch čísel, která jsou buď absurdně velká, nebo absurdně mrňavá. Hvězdy jsou miliardy miliardkrát větší než my a kvarky jsou miliardy miliardkrát menší než my.

Za to všechno může absurdní slabost gravitace.

Vstupme do filmu o vývoji raného vesmíru. Začal se rozpínat, čímž se ochlazoval. V určité chvíli už byl natolik chladný, že začaly vznikat vodíkové atomy složené z jednoho protonu svázaného přitažlivou elektrickou silou s jedním elektronem. Vesmír vypadal jako řídký mrak vodíkových atomů, které se v něm náhodně pohybovaly sem a tam. Mrak bez jakékoliv struktury.

Zakrátko se mrak začal strukturovat, objevovaly se zárodky budoucích galaxií, hvězd, planet atd.

Vznik struktur, epochální událost v historii vesmíru, je založen na často pozorovaném a snadno pochopitelném jevu: bohatí jsou stále bohatší.

V důsledku náhodných fluktuací se v tom primordiálním plynu vodíkových atomů objevily hustší a řídkší oblasti. Díky gravitaci pak začaly oblasti s větší hustotou vodíku přitahovat vodíkové atomy ze sousedních oblastí, kde byla hustota vodíku menší. Hustší oblasti se stávaly ještě hustšími a řídkší stále rychleji dále řídly. Už Newton pochopil tuto vlastnost

* Mimochodem, jelikož v pekle je nulová gravitace, obvyklá vyobrazení se šlehajícími plameny nemohou být správná! Plameny šlehají vzhůru, protože gravitace stahuje dolů hustší vzduch obklopující horké plyny.

univerzální gravitace a tento proces postuloval jako základ vzniku hvězd.

Uvažujme takový sférický mrak, který prodělává gravitační kolaps a jehož osudem je stát se hvězdou. Dneska si představujeme, že nakonec jsou atomy vodíku tak stlačeny, že při vzájemných srážkách ztrácejí elektrony a mrak je tvořen protonovým a elektronovým plynem. Nakonec, jak se plyn dále stlačuje, dostanou se protony tak blízko k sobě, že se zažehne jaderná reakce, jinými slovy ke slovu se dostane silná interakce. Zrodila se hvězda!

Co by dokázalo vzdorovat gravitaci? Jinými slovy: co musí gravitace překonat, aby v prapůvodním plynu vodíkových atomů zformovala strukturu? Vodíkové atomy létají všemi směry a některé z nich nutně zamíří i z hustší oblasti do řidší. Úkolem gravitace je přitáhnout je zase zpátky. Gravitace to zřejmě svede, pokud je hustá oblast dostatečně hmotná. Kolik hmoty je k tomu třeba? Spousta, protože gravitace je tak slabá.⁶

V předchozím odstavci jsme slabost gravitace demonstrovali jejím srovnáním s elektrickou silou a zjistili jsme, že $F_{\text{elektrická}} / F_{\text{gravitační}} = e^2 / (Gm_p^2) \approx 10^{36}$. V tomto případě není elektrická síla ve hře, takže e^2 můžeme vynechat. Takže slabost gravitace bychom mohli charakterizovat faktorem $1 / (Gm_p^2) \approx 10^{38} = (10^{19})^2$.^{*} Toto obrovské číslo 10^{19} , kterému bychom mohli říkat Planckovo číslo⁷, naznačuje slabost gravitace a hraje významnou roli v současné fyzice, například v teorii strun.

V současném kontextu rozhoduje toto číslo o vzniku struktur v primordiálním vesmíru a jeho pomocí lze pochopit

* Faktor $1 / (Gm_p^2)$ není bezrozměrný a jeho velikost závisí na použitých jednotkách. Uvedená hodnota odpovídá tzv. Planckovým jednotkám, v nichž jsou rychlost světla c , gravitační konstanta G a Planckova konstanta \hbar rovny jedné. Pozn. překl.

řadu astrofyzikálních jevů. Tak například uvažme, že naše Slunce má hmotnost asi 2×10^{30} kg a hmotnost protonu je zhruba $1,6 \times 10^{-27}$ kg. Takže typická hvězda velikosti našeho Slunce obsahuje asi $10^{30} / 10^{-27} \approx 10^{57}$ protonů.

Odkud se vzalo toto velikánské číslo, přesahující naši každodenní zkušenost?

Řešení úlohy na úrovni bakalářského studia (které tu provádět nebudeme⁸) ukazuje, že vzniklo jako třetí mocnina Planckova čísla: $(10^{19})^3 = 10^{19} \times 10^{19} \times 10^{19} = 10^{19+19+19} = 10^{57}$.