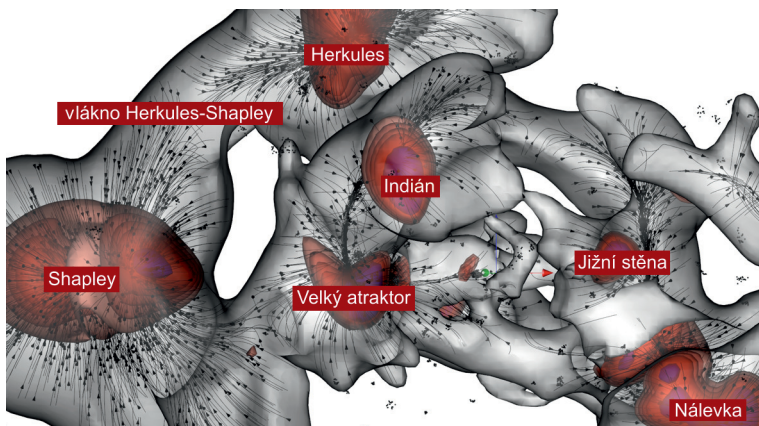
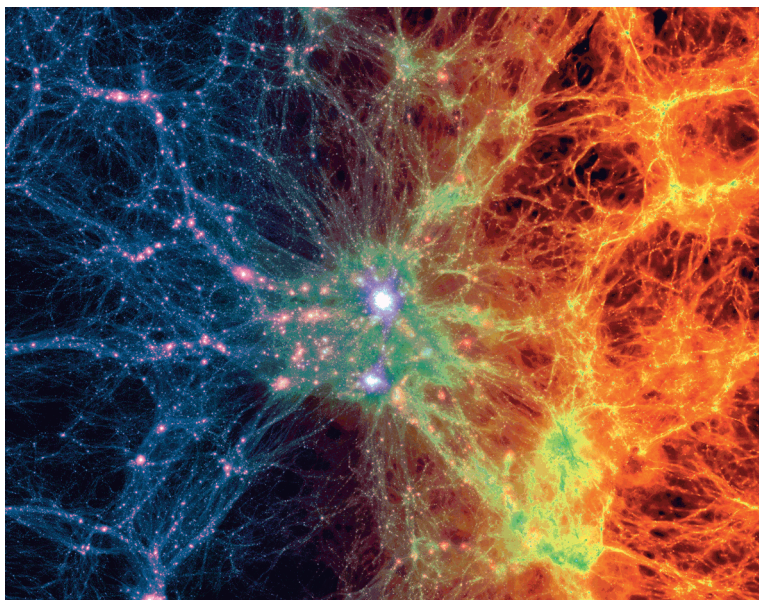




Obr. 17: Výřez části rychlostní sítě velkorozměrových struktur v našem okolí. Dobře patrné jsou Shapleyho koncentrace, Jižní stěna, Velký atraktor a nadkupy Herkules a Indián. Místní skupina galaxií se nachází v počátku modrozelenočervené souřadnicové sítě (šipky) uprostřed zobrazení. Výřez zabírá oblast velikou zhruba $1,2 \times 10^9$ ly na šířku a 700×10^6 ly na výšku. Zdroj: IRFU.



Obr. 18: Illustris. Část struktur vzniklých v numerické simulaci vývoje vesmíru Illustris. Simulace probíhala na superpočítačích Curie (CEA, Francie) a SuperMUC (Leibniztovo výpočetní středisko, Německo). Zdroj: Illustris.

10. Na lovu reliktních gravitačních vln

*„Je mnohem lepší brát vesmír takový, jaký doopravdy je,
než setrvávat v bludu jakkoliv uspokojujícím a uklidňujícím.“*

Carl Sagan, americký astrofyzik

Kdykoli se objeví nová teorie, fyzikové mají ve zvyku testovat, zda dává také řešení v podobě vln. Vlny totiž považujeme za cosi velmi přirozeného. Když James Clerk Maxwell v roce 1873 zformuloval na základě tehdy dostupných experimentálních faktů klasickou elektrodynamiku, samozřejmě zkoumal, zda se elektrická a magnetická pole mohou šířit jako vlnění. Nebylo překvapivé, že ano a že světlo je jen malou částí elektromagnetického vlnění. Ale ostatní předpovědi tehdejší fyzikální svět znepokojily: elektromagnetické vlnění se mohlo podle teorie šířit prázdnotou – tedy vakuem – a jeho rychlost se s ostatními pohyby neskládala. Nakonec vše vedlo ke vzniku Einsteinovy speciální a později také obecné teorie relativity.

Už víme, že obecná relativita popisuje gravitaci pomocí zakřiveného prostoru a času. Hned v roce 1916 Albert Einstein zkoumal, zda se čas a prostor mohou rozvílnit. Závěr byl kladný. Ne každé těleso to ale dokáže. Rotující kulička nikdy čas a prostor nerozvlíní. Dokonce nestačí ani elipsoid rotující kolem hlavní osy. Dvě hvězdy obíhající kolem sebe to už ale dokáží. Vzniknou kolem nich vlny podobné jako po vhození kamene do rybníka. Nevlní se ovšem nějaké materiální prostředí, ale prostor a čas sám. Pokud bychom měli v blízkosti rotující dvojhvězdy hodinky, šly by v pravidelném rytmu chvilku

rychleji a chvílku zase pomaleji. A také by se smršťovaly a natahovaly. Předměty na gravitační vlny reagují zajímavým způsobem, pokud se v jednom směru právě natahují, tak se v kolmém směru naopak smršťují. Představme si gymnastickou obruč, takovou tu, jak s ní baletky krouží kolem boků. Když ji v jednom směru stlačíme, v druhém se natáhne. A přesně tak reagují předměty na průchod gravitační vlny, třeba i hodinky, se kterými právě experimentujeme v blízkosti dvojhvězdy. Změny rozměrů a chodu času jsou velmi malé a jejich detekce je skutečným uměním. První zachycené gravitační vlny (v roce 2015) byly tak slabé, že by metrová tyč při jejich průchodu změnila svůj rozměr jen o 10^{-21} metru, tj. o jedenáct řádů méně, než je rozměr atomu. I proto trvalo celé století, než byly gravitační vlny polapeny. Gravitační vlny se pohybují od svého zdroje rychlostí šíření informace, tedy stejnou rychlostí, jakou se pohybuje světlo ve vakuu.

Musíme si ale dávat pozor, souslovím gravitační vlny se označují ve fyzice dvě různé věci. Jednak je to periodické zakřivení času a prostoru, o kterém bude řeč v této kapitole, a stejně označujeme i vlny kapaliny nacházející se v tíhovém poli, třeba obyčejné vlny na rybníku nebo na moři.

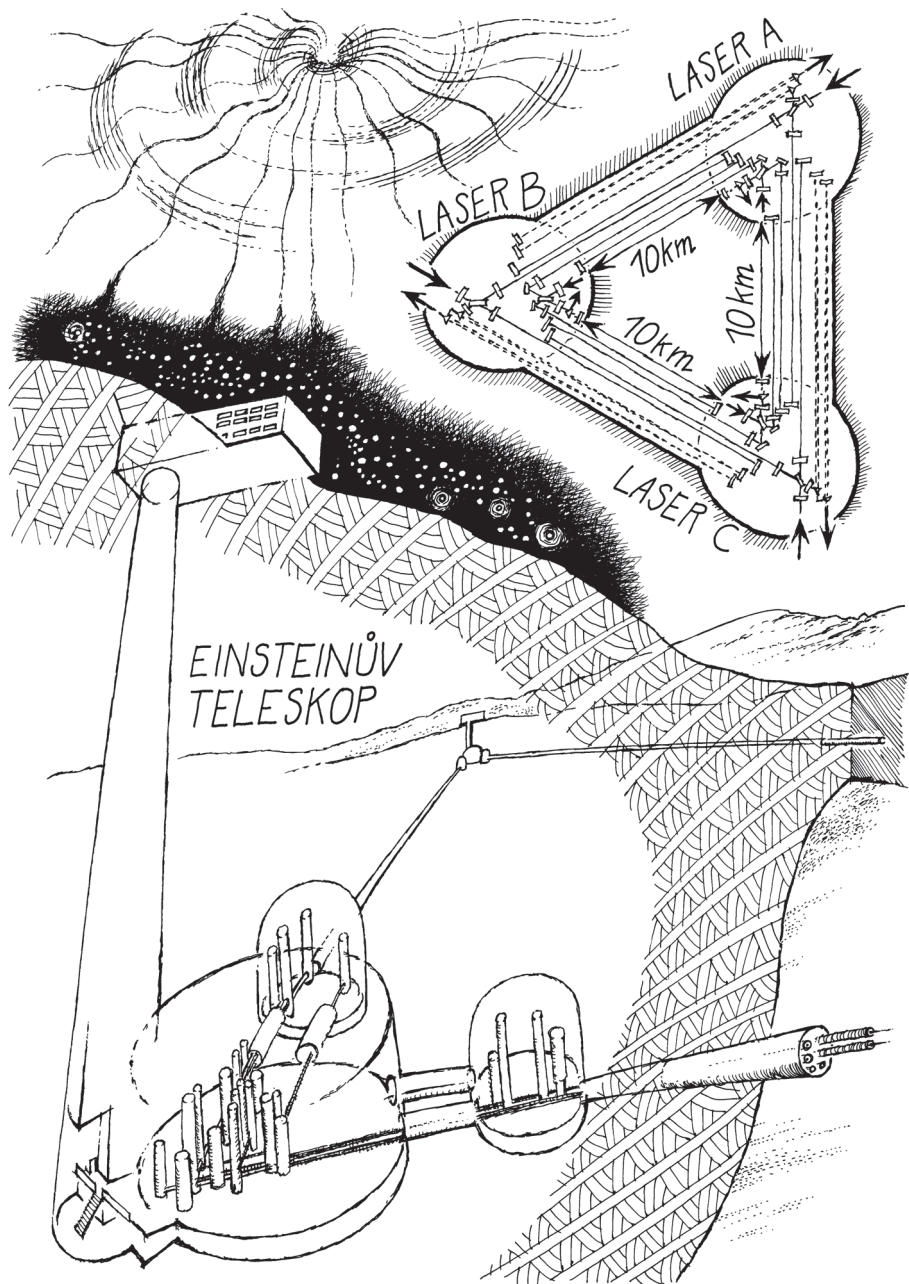
Dlouhá cesta

První snahy o detekci gravitačních vln pocházejí už z 60. let 20. století. Americký fyzik Joseph Weber se je pokoušel zachytit pomocí rezonančních válců, které se měly při průchodu gravitačních vln rozkmitat a piezoelektrické snímače na jejich bocích by v takovém případě signál zachytily. Jeden z válců byl umístěn na Marylandské univerzitě v blízkosti Washingtonu, D. C. a druhý v Argonské národní laboratoři v blízkosti Chicaga. Vzdálenost válců byla asi 1 000 km. To proto, aby byla případná detekce gravitačních vln potvrzena z nezávislého místa a byla vyloučena případná lokální porucha. Válce se chovaly jako oscilátory naladěné na frekvenci 1 660 Hz. Byly vyrobeny z hliníku, jejich hmotnost byla 1,4 tuny, průměr měly 66 cm a délku 153 cm. Každý válec byl zavěšen ve vakuu na kovovém vlákně a mechanicky oddělen od okolí. První

pokusy Weber konal od roku 1966, jeho zařízení bylo ale o pět řádů méně citlivé, než by bylo k detekci gravitačních vln třeba.

Velké naděje byly vkládány od 90. let do interferenčních detektorů. Laserový svazek je v nich rozdělen do dvou kolmých směrů, prochází tubusy ke koncovým zrcadlům zavěšeným na vláknech. Od nich se paprsky odrazí a opět se sejdou v detektoru, v němž vytvoří díky fázovému posunu interferenční obrazec, který se v případě příchodu gravitační vlny bude periodicky měnit. Výhoda takového upořádání je hned dvojí: 1) když se jedno rameno zkracuje, druhé se v ten samý okamžik prodlužuje, což maximalizuje fázový posun obou vln; 2) v každém rameni může být ještě polopropustné zrcadlo, takže se svazek mnohonásobně odráží mezi koncovým a polopropustným zrcadlem, což výrazně zvýší citlivost detekce. Detektory tohoto typu jsou podrobněji popsány v knížce *„Astronomie a fyzika – Souvislosti“*. Úspěch se dostavil 14. září 2015 – téměř přesně sto let od zveřejnění obecné relativity – kdy americký detektor LIGO zachytil gravitační vlny od dvou splývajících černých děr středních hmotností. V současnosti existují tři takto velké detektory gravitačních vln: americký LIGO má dva přístroje s čtyřkilometrovými rameny, vzdálené od sebe 3 000 kilometrů, a v Evropě je ve střední Itálii detektor Virgo s tříkilometrovými rameny. V Japonsku se staví podzemní chlazený detektor KAGRA s tříkilometrovými rameny a v Evropě se uvažuje o podzemním desetikilometrovém Einsteinově teleskopu se třemi rameny (ve tvaru trojúhelníku), který by měl být postaven v nizozemské provincii Limburg někdy kolem roku 2028. Umístění detektorů do podzemí redukuje seismický šum a chlazení redukuje šum tepelný.

Detektory tohoto typu mají maximální citlivost ve stovkách hertzů a mohou detekovat gravitační vlny z různých binárních systémů. Pro detekci reliktních gravitačních vln, které by měly vznikat v průběhu inflační fáze nebo obecně při vzniku vesmíru, bude nutné zkonstruovat detektory pro mnohem delší vlnové délky, tedy s výrazně delšími rameny. Takové detektory je možné stavět jen ve vesmíru. Další možností je využít detekci jiného typu, například sledování změn fází pulzarů pomocí radioteleskopických sítí.



Obří interferometry

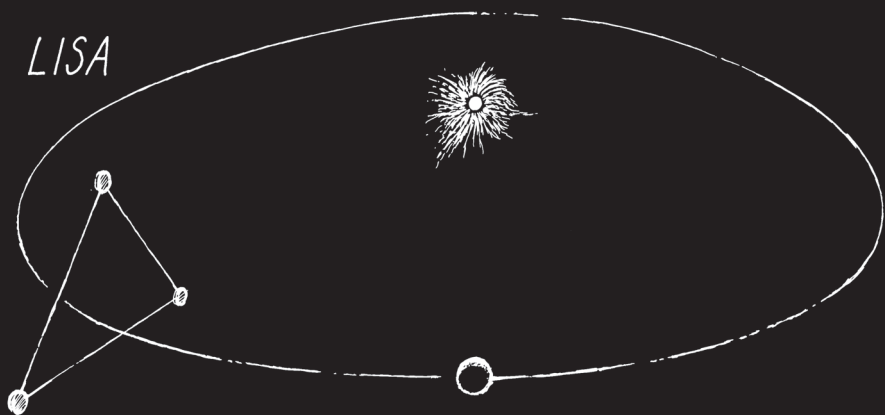
O stavbě obřího interferometru ve vesmíru se uvažuje už od konce 20. století. Projekt tří sond, které na sebe budou svítit laserovým paprskem na vzdálenost milionů kilometrů a zjišťovat aktuální polohu odrazné krychle – srdce sondy pohupující se na gravitačních vlnách – dostal název LISA, což je zkratka z anglického „*Laser Interferometer Space Antenna*“. Původní termín vypuštění byl rok 2016, ale společný projekt americké NASA a evropské vesmírné agentury ESA se potýkal s mnoha problémy, jak finančního, tak technického rázu. Američané z něho v roce 2011 z finančních důvodů odstoupili, projekt měnil jména, délku ramen i termín vypuštění a už se zdálo, že je odsouzen k zániku. Víru v úspěch mu vlila do žil evropská sonda LISA Pathfinder, která startovala v prosinci 2015. LISA Pathfinder je jakýsi předskokan mise, který ověřil, že základní koncepce je správná, že dokážeme nejen dostatečně jemně manévrovat se sondou tohoto typu, ale i detekovat polohu odrazné krychle. Po ohlášení objevu gravitačních vln získaly události docela rychlý spád a v roce 2017 byl projekt obřího interferometru LISA schválen. Termín vypuštění je rok 2034.

Jaká je tedy současná představa obřího interferometru LISA? Tři identické sondy poletí ve formaci trojúhelníku na samostatné dráze kolem Slunce, a to 20° za Zemí. Budou na sebe svítit infračervenými lasery na vzdálenost 2,5 milionů kilometrů. Laserové světlo se bude odrážet od vznášejících se krychlí ze slitiny zlata a platiny o hraně 46 milimetrů a hmotnosti 2 kilogramy. V každé sondě budou dvě takové krychle volně letící prostorem a pohupující se na gravitačních vlnách. Kolem testovací krychle bude klec s elektronikou, která bude sledovat její polohu vůči kleci. V ideálním případě by se krychle pohupovala na dráze spolu se sondou i klecí a stále plula v jejím středu. Jenže na sondu působí z venku mnoho negravitačních sil, například tlak slunečního záření, tlak slunečního větru, síly od nesymetrického tepelného vyzařování sondy i další. Jakmile se krychle přiblíží k měřicí kleci, musí sonda začít manévrovat tak, aby se krychle stále vznášela přesně uprostřed klece. Od jejích stěn budou krychli dělit pouhé dva milimetry.

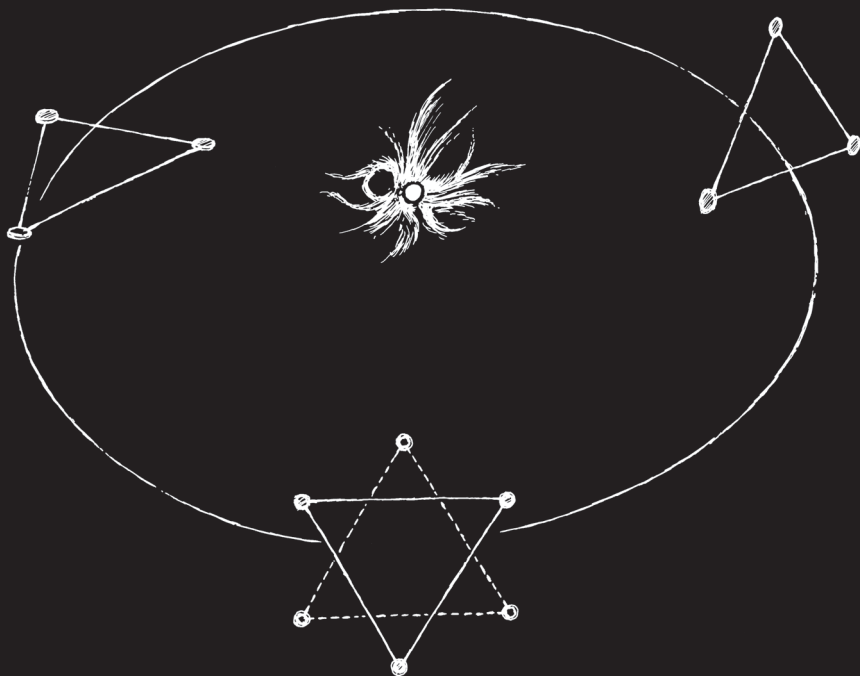
K dalšímu vybavení patří optická lavice zpracovávající signál. Sondy budou mít pro sledování paprsku ze zbývajících sond dva dalekohledy o průměru 30 centimetrů. Z výkonu 2 wattů dodávaného laserem dopadne na krychličku sousední sondy pouhých 700 pikowattů, tj. 35 miliardtin procenta. Manévrování bude zajištěno mikrotřyskami vypouštějícími jen malé množství plynu. Nejjemnější navigaci budou mít na starosti koloidální mikrotřisky, z nichž budou unikat nabitě kapičky ovládané elektrickým polem. Zpětný ráz nepatrně pohne sondou v kýženém směru. Samovolné nabíjení krychlí bude deaktivováno ultrafialovým zářením. Detektor LISA (viz barevná příloha, obr. 4) bude schopen zachytit gravitační vlny vzniklé pádem hvězdy do velké černé díry, gravitační vlny emitované dvojicemi bílých trpaslíků, šum pozadí dvojhvězd v naší Galaxii a samozřejmě gravitační vlny emitované vzájemným oběhem dvojic obřích černých děr. LISA se dostane na hranici parametrů pro detekci reliktních gravitačních vln, při troše štěstí by se to mohlo podařit, ale budme raději skeptičtí, případná detekce nás pak může jen příjemně překvapit.

Pokud bude projekt LISA fungovat jak má, bude na oběžnou dráhu kolem Slunce v následujících letech vypuštěno dokonce 12 identických sond svítících na sebe lasery. Název projektu je BBO (*Big Bang Observer, Pozorovatel Velkého třesku*). Vzdálenosti sond budou tentokrát menší, „pouhých“ 50 000 kilometrů, požadovaná citlivost bude zajištěna větším množstvím sond. Šum detekovaného signálu by měl být pouhé procento šumu detektoru LISA. Detektor BBO bude složen ze čtyř trojúhelníkových formací. Jedna poletí kolem Slunce v rovině ekliptiky (oběžné dráhy Země kolem Slunce), druhá bude na ekliptiku kolmá a zbylé dvě trojúhelníkové formace budou složeny do šestiúhelníku. Budou tak schopny snímat stochastické signály očekávané u reliktních gravitačních vln. Ty budou hlavním cílem detektoru BBO, který by měl mít dostatečné rozlišení, citlivost i rozsah vlnových délek pro jejich zachycení. Budoucnost interferometrických detektorů je tedy naplánována na desetiletí dopředu a máme se na co těšit. Případná detekce reliktních gravitačních vln by poprvé umožnila seriózně uvažovat o procesech při vzniku vesmíru a neopírat se o pouhé vize a fantazie.

LISA



BBO

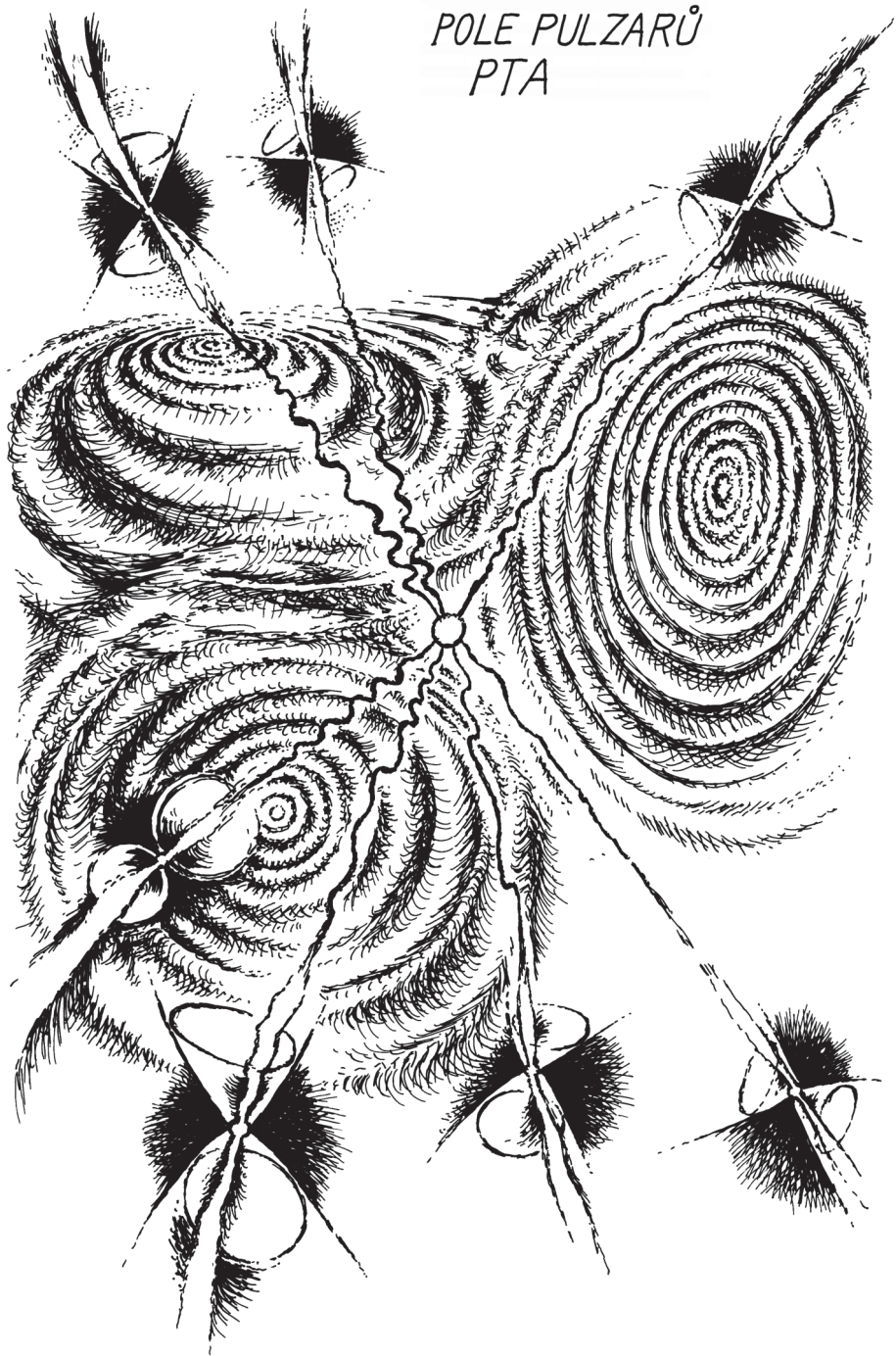


Radioteleskopické sítě

Pokud chceme pozorovat extrémně dlouhé vlnové délky, potřebujeme zařízení s mimořádně velkými rozměry. Naše civilizace ale zatím nedisponuje takovými prostředky, aby postavila detektor velký jako Sluneční soustava nebo dokonce jako celá Galaxie. Přesto se ale jedna možnost naskýtá. V naší Galaxii existuje řada pulzarů – neutronových hvězd, jejichž osa rotace není totožná s osou magnetického pole. V magnetických pólech se hromadí nabitě částice a vytvářejí tam svítící skvrny. Jak objekt rotuje, svítící skvrna pravidelně osvětluje pozorovatele silně polarizovaným elektromagnetickým zářením, které vzniká při krouživém pohybu elektronů a dalších částic v magnetickém poli neutronové hvězdy. K pozorovateli tak přicházejí pravidelné impulzy, které daly pulzarům jejich jméno. Objevila je severoirská astronomka Jocelyn Bellová (dnes Burnellová) v roce 1967. Tehdy byla doktorandkou pod vedením britského radioastronoma Anthony Hewishe. Hewish za objev pulzarů nakonec získal Nobelovu cenu za fyziku pro rok 1974. Šlo o jeden z více případů diskreditace Nobelovy ceny, která není vždy udělována skutečným objevitelům. Jocelyn Bellová-Burnellová ale získala velké množství jiných významných ocenění. A jedna dnes udělovaná medaile je dokonce spojena s jejím jménem: anglický *Institute of Physics* (IOP) uděluje od roku 2016 mladým úspěšným ženám ve fyzice medaili Jocelyny Bellové-Burnellové.

Pulzary vysílají natolik pravidelné pulzy, že představují téměř ideální hodiny rozmístěné napříč celou Galaxií. Signál pulzarů spadá většinou do rádiového oboru, a tak je možné je pozorovat radioteleskopy. Obří radioteleskopické sítě mají vynikající prostorové i časové rozlišení a jsou schopné detekovat i malá fázová posunutí signálu pulzarů přicházejícího z různých koutů Galaxie. Taková fázová posunutí vyvolává i průchod signálu přes gravitační vlnu. Matematickou analýzou signálu většího množství sledovaných pulzarů lze zrekonstruovat informace o gravitačních vlnách, kterými signál procházel. Nemusíme tedy stavět detektor veliký jako Galaxie. Sama příroda nám po celé Galaxii rozmístila ideální zdroje časového signálu. Stačí jen rekonstruovat deformace časoprostoru z fázových posunutí.

POLE PULZARŮ
PTA



Tato metoda detekce gravitačních vln se nazývá PTA (*Pulsar Timing Array, Pole pro měření časového signálu pulzarů*). První testy proběhly na australské síti radioteleskopů Parkes už v roce 2005. Australské radioteleskopy stály u zrodu radioastronomie a zajišťovaly v době programu Apollo spojení s posádkami letícími k Měsíci a zpět. Pozadu není ani evropská radioastronomie, metoda PTA se testuje na síti radioteleskopů, jimž vévodí stometrový Effelsberg na západě Německa, dalšími členy sítě jsou Lovellův radioteleskop v Jodrell Bank (jižně od anglického Manchesteru) s průměrem pohyblivé antény 76 metrů a radioteleskopy v nizozemském Westerborku a francouzském Nançay. Američané ověřují metodu PTA v Severoamerické nanohertzové observatoři, do které patří slavný radioteleskop Arecibo (nepohyblivá mísa o průměru 305 metrů vyplňující údolí na ostrově Portorico) a pohyblivý radioteleskop v Green Banku s rozměrem mísy 100×110 metrů.

Od roku 2018 je ve stavbě unikátní radioteleskopické pole SKA (*Square Kilometer Array*) – pole radioteleskopů, které bude mít celkovou sběrnou plochu jeden kilometr čtvereční. Půjde o tisíce antén tří různých typů – klasických mís, dipólových antén a radiometrů. Pole se staví hned dvě. Jedno v Austrálii a druhé v Jihoafrické republice. Ani v jedné lokalitě se nezačínalo na zelené louce, jak v Austrálii, tak v Africe už malá radioteleskopická pole byla, takže je na co navázat. Centrální část bude mít v průměru deset kilometrů a bude v ní polovina celé sběrné plochy. Z centrální části budou vybíhat další radioteleskopy po pěti spirálách až do vzdálenosti 3 000 kilometrů od centra. Spirály jsou voleny proto, aby se plynule měnily směry mezi různými dvojicemi radioteleskopů. Je jasné, že tak obří stavbu není možné uskutečnit v rámci jedné jediné země. Nejvzdálenější stanice v australské části bude na Novém Zélandu. Nejvzdálenější stanice v jihoafrické části budou v Botswaně, Ghaně, Keni, Namíbii, Zambii, na Madagaskaru a na Mauritiu. Ředitelství celého projektu je v Evropě, v anglickém Jodrell Bank, kde je umístěn Lovellův radioteleskop. Gigantická stavba je plánována na desetiletí, ale do roku 2020 by mělo být postaveno 500 antén v Austrálii a 200 v Jižní Africe. Antény se postupně zapojují do provozu, takže v současnosti jsou části pole SKA už funkční.

Tak nákladná a obrovská radioteleskopická síť umožní vědecký výzkum v oblastech nedosažitelných ostatními současnými přístroji. SKA by mělo přímo pozorovat první vznikající hvězdy a provádět mapování mezihvězdného vodíku v miliardách galaxií – výsledkem by měly být nejen informace o vývoji galaxií, ale i monitorování vzniku velkorozměrových struktur a přesnější popis zrychlené expanze vesmíru. Nebude samozřejmě chybět ani výzkum temné hmoty a její mapování z gravitačního čočkování elektromagnetického signálu velmi vzdálených objektů. Dalším cílem je pokusit se zjistit, za jakých podmínek ve vesmíru vznikají magnetická pole. Z hlediska kosmologie budou ale nejdůležitější pokusy o zachycení signálu reliktních gravitačních vln metodou PTA, tedy sledováním fázového posunu signálu z pulzarů v naší Galaxii. SKA jako jediný přístroj současnosti má parametry zcela dostačující pro tuto detekci a doufáme, že tato unikátní radioteleskopická síť bude úspěšná.

Podpisy reliktních gravitačních vln

Při pozorování neznámých jevů jsou vždy důležitá nezávislá pozorování konaná různými metodami. U reliktních gravitačních vln mají astronomové v hledáčku hned tři metody. První z nich je založena na přímé detekci obřími interferometry (LISA, BBO), druhá využívá fázový posun signálu pulzarů v naší Galaxii (radioteleskopické pole SKA) a třetí se pokusí hledat podpis reliktních gravitačních vln v polarizaci reliktního záření. Pojďme si nyní vysvětlit podstatu této třetí nezávislé metody.

Reliktní gravitační vlny, které vznikly na samém počátku vesmíru, se šíří prostředím Velkého třesku a vytvářejí periodická zhuštění prostoru. Všudypřítomné elektromagnetické vlny budou mít v místech zředění delší vlnovou délku než v místech zhuštění. Na konci Velkého třesku tyto vlny dopadají na poslední volné elektrony a rozkmitají je. Z různých směrů přicházejí elektromagnetické vlny různých vlnových délek, proto začne elektron současně kmitat na několika frekvencích. Je to podobné jako skládání kmitů, které jsme se učili ve škole. Kmitající elektron převezme energii vln a sám vysílá do okolí vlastní elektromagnetické vlnění. Díky kmitům na

více frekvencí dochází k charakteristické polarizaci tohoto elektromagnetického signálu, který není ničím jiným než reliktním zářením. V reliktním záření by proto měl existovat otisk reliktních gravitačních vln v podobě charakteristické polarizace, tj. bude existovat určitá preferovaná rovina kmitů elektrického pole.

Věc není ale tak jednoduchá. Teplejší a chladnější oblasti v okolí elektronu také vysílají elektromagnetický signál různých frekvencí a opět způsobí polarizaci reliktního záření vysílaného elektrony. Naštěstí má polarizace reliktního záření pocházející z teplotních fluktuací zcela jiný charakter než polarizace vzniklá přítomností gravitačních vln. V okolí teplotních či hustotních maxim vytváří postupně se měnící rovina polarizace kružnice, v okolí minim míří radiálně (viz obrázek), hovoříme o tzv. E módu. U gravitačních vln je tomu jinak: v oblastech zředěného i zkomprimovaného prostoru (vlivem vlny) vytvoří rovina polarizace konfiguraci podobnou skloněným bodlinám ježka, hovoříme o tzv. B módu. Současná výpočetní technika dokáže snadno od sebe oba módy oddělit.

Třetí nezávislá metoda tedy spočívá v hledání otisku gravitačních vln v polarizaci reliktního záření. Malou chvíli se zdálo, že data z detektoru reliktního záření BICEP 2 na jižním pólu v sobě kýženy signál mají. Nakonec ale analýza polarizace reliktního záření provedená z dat sondy Planck ukázala, že tuto polarizaci způsobil magnetický prach v naší Galaxii. Vše špatné bylo pro něco dobré. Nebyl sice zachycen podpis reliktních gravitačních vln, ale naměřená data umožnila pořídit mapy magnetického pole v naší Galaxii.

Zachycení reliktních gravitačních vln je jen otázkou času. A je jedno, zda to budou první obří interferometry, radioteleskopická pole nebo detektory sledující polarizaci reliktního záření. Pokud se jednou v budoucnosti podaří udělat spektrum reliktních gravitačních vln (závislost intenzity na vlnové délce), bude to významný krok v naší snaze přijít na kloub tomu, jak vznikl vesmír. Každý z modelů vzniku vesmíru totiž předpovídá jiné spektrum reliktních gravitačních vln. Ty modely, které nebudou ve shodě s naměřeným spektrem, bude možné okamžitě vyloučit z našich představ.

E MÓD
TEPLOTNÍ
A HUSTOTNÍ
FLUKTUACE



B MÓD
GRAVITAČNÍ
VLNY



Víte, že

- Víte, že Argonská národní laboratoř ve státě Illinois byla vůbec první americkou národní laboratoří? Byla založena v roce 1946, kdy vznikala jako součást projektu Manhattan. Je provozována Chicagskou univerzitou, Enrico Fermi zde zprovoznil první jaderný reaktor a Joseph Weber zde jako první hledal gravitační vlny.
- Víte, že Joseph Weber u svých válců jakýsi signál skutečně zaznamenal? Publikovaný článek byl ale podroben zdrcující kritice kolegů, kteří v něm našli zásadní chyby v interpretaci naměřených dat. Velký objev se tak nakonec nekonal.
- Víte, že radioteleskopické sítě také umožňují zobrazit těsně okolí černých děr? V roce 2019 se podařilo síti EHT (*Event Horizon Telescope*) vyfotografovat vnitřní svítící část akrečního disku obří černé díry ve středu galaxie M87 (kupa v Panně), jehož rozměr je 42 miliontin obloukové vteřiny.
- Víte, že se radioteleskopické pole, které se stalo základem SKA v Jižní Africe, jmenuje *MeerKAT*? Název je slovní hříčkou, KAT znamená *Karoo Array Telescope* (podle oblasti Karoo, kde stavba probíhá) a slovo „*meerkat*“ je anglické pojmenování pro malou šelmu, surikatu, žijící hojně v této oblasti.

Poučení na závěr: *Není vlna jako vlna. Elektromagnetické vlny mohou přinášet užitek i zkázu. Gravitační vlny jsou nositeli důležitého poselství o procesech ve vesmíru, zatím s nimi ale jen lehce koketujeme. Módní vlny strhávají emoce, ale pro poznání světa nejsou příliš důležité. Vlnám tsunami, nenávisti a zloby se vyhněte raději obloukem.*

