

Gravitatsioonilained gravitatsiooniläätstes

Laur Järv

Nii aegruumis edasi kanduvaid võbelusi kirjeldavad gravitatsioonilained kui gravitatsiooniläätse efekt, kus samast objektist hakkab paistma mitu kõrvuti asetsevat kujutist, olid mõlemad Einsteini üldrelatiivsusteooria ühed varasemad ennustused. Samas vaatluslikult õnnestus kosmoses esimest gravitatsiooniläätse näha pool sajandit ning esimesi gravitatsioonilaineid detekteerida sada aastat pärast nende algset matemaatilist tuletamist. Gravitatsioonilainete käitumisest gravitatsiooniläätse läbimisel räägivad hetkelgi vaid üksnes teoreetikute arvutused. Kuid vaatlusvõimsuste arenenedes peaks seegi nähtus loodetavasti varsti märgatud saama ning paarikümne aasta pärast võiks sellest kujuneda oluline täppisinfo allikaks Universumi koostise ja aluseaduste kohta.

Gravitatsioonilained

Tähetorni Kalendri tähelepanelikule lugejale on gravitatsioonilained tuttavad Piret Kuuse vastavast ülevaatest 2019. aasta Kalendris (Kuusk, 2018). Gravitatsioonilainete esmase registreerimise lugu Ameerika LIGO detektorite paari poolt on kaasaja teaduse vaieldamatu suursaavutus. Käsilähes LIGO-ga püüavad täna gravitatsioonilaineid ka eurooplaste Virgo ja jaapanlaste KAGRA ning mõne aasta pärast võiks seltskonnaga liituda lisaks ka LIGO-India. Käesoleva loo kirjutamise hetkeks on avaldatud kolme mõõtmisperioodi andmed kokku ligi saja gravitatsioonilainete sündmuse kohta ning teadlased ootavad põnevusega selle nimekirja peatset pikenemist.

Kui tavaliselt mõtleme lainetest kui millegi ruumis edasi kanduvatest võngetest, näiteks helilained on õhu molekulide tiheduse perioodilised muutumised ja valguslained elektri- ja magnetvälja vastastikku teineteist genereerivad võnked, siis gravitatsioonilainete puhul on võnkumas tegelikult ruum ise. Üldrelatiivsusteoorias kirjeldab aegruumi struktuuri, täpsemalt aegruumi punktide vahelisi kauguseid diferentsiaalgeomeetria suurus nimega meetrika. Kui jagame meetrika väärtuse üldiseks taustaks (näiteks tühi tasane ruum või ühtlaselt paisuv kosmos) ning sellele lisanduvateks väikesteks häiritusteks, siis pannes antud lähendi Einsteini võrranditesse, saame häirituste jaoks tavalise lainevõrrandi, mis on üsna sarnane elektromagnetlainete omale. Seepärast on üsna sarnased ka tolle võrrandi lahendid, mida võime tõlgendada kui ruumis edasi kanduvaid võnkumisi, mis toimuvad laine leviku suunaga risti olevas tasandis. Kuivõrd meetrika mõõdab punktide kaugusi ruumis, siis näiteks z -telje suunas leviva gravitatsioonilaine korral tähendab see, et perioodiliselt venitatakse välja ja surutakse kokku kauguseid $x - y$ -tasandis. Kui sellise laine teele jääb mingi materiaalne objekt, siis ka tolle kõrgus ja laius muutuvad vastavalt. Gravitatsioonilainet võiks ette kujutada nii, et ruum teatud suunas natukene paisub, tõmbub kokku, paisub uuesti jne. Gravitatsioonilaine tekitatud suhtelist kauguste muutust $\frac{\Delta l}{l}$ nimetatakse venituseks ning enamasti jääb

see sedavõrd tillukeseks, et mingit tuntavat mõju ainele ei oma. LIGO poolt mõõdetud venitus on suurusjärgus 10^{-18} m ehk sajandik prootoni efektiivsest läbimõõdust ja seda interferomeetri 4 km pikkuse õla kohta. Mõõtmine õnnestub vaid seetõttu, et valgusel lastakse tuhandeid kordi piki õlga edasi-tagasi pendeldada, nii et sedasi akumulierenud teepikkuse muutus osutub lõpuks täppisriistadega tabatavaks.

Gravitatsioonilaine signaali eristamiseks juhuslikest keskkonna vibratsioonidest (näiteks rongiliikluse, ehitustööde või ka maavärinate tekitatuist) ongi vaja mitut üksteisest kaugel asuvat interferomeetrit, sest kohalikud mürad tõenäoliselt kokku ei lange. On veel teine põhjus, miks gravitatsioonilainete detektoreid on parem töös hoida mitu ja üksteisest kaugel. See on analoogiline sellega, miks loomadel on kaks kõrva, tihti teine teisel pool pead. Asi on signaali suuna määramises. Kui on teada signaali jõudmise täpne aeg erinevatesse detektoritesse, siis on võimalik ka välja raalida, kust poolt see saabus. Üks detektor tunneb ära ainult selle, et signaal oli, kuid suuna kohta info puudub. Kaks detektorit suudavad fikseerida signaali suuna omavahelise telje sihis, aga mitte omavahelise teljega risti tasandis. Kolm detektorit saavad põhimõtteliselt juba suuna kätte, aga täpsus paraneb, kui detektoreid on veel.

Gravitatsioonilained teeb astronoomidele huvitavaks see, et Universumis pole praktiliselt midagi, mis nende levikut takistaks. Valgus või elektromagnetlained üldiselt kipuvad teele jäänud aineosakestel hajuma või neil lausa neelduma, nii et igasugused kosmilised tolmutpilved varjavad ja moonutavad selget vaadet kaugetele objektidele ning vahetult tähe selja tagant ei paista välja enam midagi. Aga gravitatsioonilained põrutavad tolmutpilvedest, tähtedest ja ka galaktikatest suurema mure ja häbita läbi, märkimisväärset kahju kandmata ja jälgi jätmata. Natuke segane on ainult see, kas lained saavad minna ka läbi musta augu, sest must auk pole lihtsalt ainek koosnev materiaalne keha ruumis vaid omamoodi ruumi anomaalia, st samasugune aegruumi kõvera geomeetria nähtus nagu gravitatsioonilainedki.

Kui elektromagnetlainete kiirgamiseks on vaja panna eletrilaengud kiirendu-sega liikuma, näiteks jooksutada neid piki antenni edasi-tagasi, siis gravitatsioonilaine tekitab igasugune kiirendusega liikuv mass. Erandiks on ainult teatud väga sümmeetrilised konfiguratsioonid nagu ümber oma telje pöörlev või tsentraalselt pulseeruv ühtlane keha, mille puhul gravitatsioonikiirguse välistab impulsi jäävuse seadus. Kuna ebahühtlase ehk seega kiirendusega liikumisi on maailmas igal pool, sh mistahes võnkumised, siis on maailm risti-põiki täis ka gravitatsioonilaineid. Ainult nende lainete amplituud (ehk ülal mainitud venitus) on sedavõrd väike, et säärase „salasinate” registreerimine tundub ulmeline mõte. Märkatava laine saamiseks on vaja astronoomilisi masse ja tohutut kiirendust, mida niisama naljalt ei kohta.

Piisavalt võimsaid gravitatsioonilaineid lubava konfiguratsiooni pakub teadagi teineteise ümber tiirlev mustade aukude paar. Must auk tekib jäänukina massiivse tähe plahvatusest supernoovana. Tema mass on võrdne vähemalt mitme Päikese massiga, aga raadius on vaid paar kilomeetrit. Vahel juhtub, et kaksiktähe mõlemad komponendid lõpetavad oma tähe-elu musta auguna, mis nõndaks teineteise ümber tiirlema jäävad. Iga sellise tiiruga genereeritakse kaks gravitatsioonilaine võnget, mis süsteemist energiat ära viivad ja aegamööda vähendavad mustade aukude omavahelist kaugust. Peale sadu miljoneid või lausa miljardeid aastaid tiirlemist on mustade aukude omavaheline kaugus langenud paarikümnele kilomeetrile, tiirle-

mise sagedus on kasvanud mitmekümne korrani sekundis ning joonkiirus ligineb juba kümnendikule valguse kiirusest. Niisugust röögatut olukorda ette kujutades võiksime ka juba intuiitiivselt tunda, kuidas ruum lihtsalt peab sellega kaasa laine-tama. Kokkutiirlemise viimane faas ja aukude ühinemine võtab lõpuks vaid murd-osa sekundist, ent selle jooksul kiirgub gravitatsioonilainetena energiahulk, mis on ületab kogu nähtavas Universumis paistvate tähtede tavapärase kiirguse energia. Kuigi lainete amplituud allikast kaugenedes järjest väheneb, on need meieni jõu-des siiski registreeritavad.

Mustade aukude paari ühinemine on kosmoses haruldane sündmus, aga aeg-ajalt seda siiski juhtub, kui võtta piisavalt ulatuslik ruumala. Seni mõõdetud gravitat-sioonilainete allikad on olnud hinnanguliselt sadade miljonite kuni üle miljardi valgusaasta kaugusel. Mastaapide hoomamiseks võime seda võrrelda Linnutee ga-laktika läbimõõduga 100 000 valgusaastat, kohaliku galaktikate grupi läbimõõduga 10 miljonit va, Virgo galaktikate parve ulatusega 100 miljonit va ning 100 000 galak-tikat koondava Laniakea superparve mõõtmega 500 miljonit va. Praeguste detek-torite tundlikkus võiks lubada tabada 5 miljardi valgusaasta tagant lähtuvat kahe musta augu ühinemise signaali, kaugemad jäävad hetkel liiga nõrgaks.

Gravitatsioonilaine tekitamiseks ei pea tiirlevat paari kindlasti moodustama mustad augud. Üheks või ka mõlemaks paariliseks võib samuti olla neutrontäht, mille mass jääb musta augu omale natuke alla, aga oma kilomeetrites mõõdetava raadiu-sega on ta samuti väga kompaktne objekt. Kahe neutrontähe kokkutiirlemise lõpus vallandub lisaks gravitatsioonilainetele ka elektromagnetlainete sähvatus, mille tek-itab suurel kiirusel kokku põrkav neutronitest täheaine. 2017. a mõõdetud gravi-tatsioonilainega käis sekundipealt kaasas samast suunast tulev gamma-kiirte pur-se, mis kinnitas Einsteini üldrelatiivusteooria matemaatilist ennustust, et gravitat-sioonilained levivad sama kiirusega nagu valgus. Kui valguse ja gravitatsioonilaine kiirused teineteisest kergeltki erineksid, siis sajatuhande valgusaasta teekonna lä-bimise järel pidanuks kiirem laine juba märkimisväärselt ette jõudma ning tunta-valt varem meile kohale jõudma.

Gravitatsiooniläätсед

Valguskiire paindumist massiivse keha poolt kõverdatud aegruumis ennustas Eins-tein ette kohe üldrelatiivsusteooriat luues ning kui Arthur Eddington selle efekti 1919. a päikesevarjutuse ajal ära mõõtis, siis oli see uue teooria esimene uhke kat-seline kinnitus. Tegelikult mõtiskles Einstein ka selle üle, et kui massiivne keha jääb valguskiirguse allika ning vaatleja vahepeale samale teljele, siis peaksid võrdselt vaatleja poole painduma nii kehast paremalt kui vasakult, ülevalt ja alt, ehk igast küljest mööduvad kiired. Otsesihis allikat näha ei ole, sest seda varjab tee peal ees olev massiivne keha, aga vaatlejani jõuavad ruumi kõveruse tõttu suunda muut-nud kiired, nii et vaatleja jaoks peaks nõnda allikast paistma ringikujuline kujutis. Einstein ei avaldanud oma arvutusi trükis enne kui 1936. a ning seepärast loetakse gravitatsiooniläätse teoreetiliseks esmakirjeldajaks vene füüsikut Orest Hvolsonit (1924), selle nähtuse vaatluslikeks avastajateks on aga ameerika Kitt Peaki observa-tooriumi astronoomid 1979. a.

Natuke meenutab gravitatsiooniläätse efekt valguskiirte koondamist optilise läätse poolt, ent siin on ka mõned olulised erinevused. Kui optilises läätses paindub kiir aine (klaasi) pinnal murdumise tõttu ja kujutis tekib vastavalt läätse pinna kujule, siis gravitatsiooniläätstes on painutajaks ruumi kõverus, mis on küll aine (massiiv-

se keha) gravitatsiooni poolt tekitatud, kuid paindumise kohas endas aine rolli ei mängi. Optilise läätse saab konstrueerida nii, et sellel on fookus, kuhu kõik läätse läbinud kiired koonduvad. Samas gravitatsiooniläätisel on ühe fookuspunkti asemel fookustelg, sest kuivõrd painutav kõverus sõltub objektist möödumise kaugusest, siis lähemalt mööduvad kiired painduvad rohkem ja piki telge on nende fookus läätsele lähemal. Siiski, tänu kiirte koondumisele toimib ka gravitatsiooniläätse signaali võimendajana, ehk kui otse oleks meieeni jõudnud vaid üks kiir, siis paindumise geomeetria tõttu saabub erinevaid teid pidi kohale kiirte kimp.

Gravitatsiooniläätse tekitajaks võib olla mistahes mass, olgu selleks täht, must auk, galaktika või galaktikate parv. Mida suurem mass, seda suurem on mõju ruumi kõverusele ja seda võimsam lääts. Täpsemalt on läätse efekt võrdeline keha Schwarzschildi raadiusega, st mõttelise piiriga, milleni keha kokku surudes tekiks juba must auk. Seega tinglikult suure ruumalaga hõreda ning väikese ruumalaga tiheda objekti puhul saame sarnase võimsusega läätse.

Põnev, et see tekitav mass võib vahel olla muul moel „nähtamatu”, st selline, mis ise elektromagnetkiirgust ei neela ega kiirga. Näiteks üks meetod galaktikaid ümbritsevate tumeaine halode uurimiseks ongi vaadata, kuidas mingi galaktika aine otse kaugel enda taga olevate muude galaktikate valgust painutab. Väga harva juhtub, et läätse tekitav keha asub täiusliku täpsusega allika ja vaatluspunkti vaheliselt teljel ning on ideaalselt sümmeetrilise kujuga. Seepärast ei moodustu gravitatsiooniläätstes enamasti perfektse ringi kujutist, vaid ainult poolkaar või mõned kaarekesed või pigem on kujutis lihtsalt originaaliga võrreldes natuke välja venitatud.

Küllaltki omapärase etenduse saame, kui signaali allikaks on kauge supernoova, mille heleduse maksimaalne periood on mõõdetav mõne nädalaga. Kui sellise allika ja meie vahele jääb mingi galaktika või galaktikate parv, siis toimib gravitatsiooniläätse efekt ja valguskiired muidugi painduvad. Aga galaktika või nende parve massi ebaühtlasest jaotusest tulenevalt võivad meieeni jõudvate kiirte teepikkused ühelt poolt ja teiselt poolt läätse keset olla märkimisväärselt erinevad. Seetõttu pole erinevaid radu pidi kohale saabuvad signaalid enam sünkroonis vaid ilmuvad meile erinevatel aegadel. Teoreetiliselt ennustas selliste kosmiliste „kordussaadete” võimalust esimesena norra astronoom Sjur Refsdal 1964. a. Seepärast nimetati tema auks ka esimene seda tüüpi vaadeldud objekt, mille kuma ilmus Hubble teleskoobi vaatevälja 2014. a novembris ja siis uuesti pisut teise nurga alt 2015. a novembris, kusjuures arvutused näitavad, et sama supernoova võis tõenäoliselt korral kolmandast suunast paista ka veel 40 aastat varem. Kõnealune SN Refsdal loitis 9 miljardit aastat tagasi ning sellest lähtuvate kiirtega tembutas läätse galaktikate parv MACS J1149+2223, mis asub meist pisut enam kui 5 miljardi valgusaasta kaugusel.

Gravitatsioonilained gravitatsiooniläätstes

Seda, mis juhtub gravitatsioonilainetega, kui nende allika ja vaatluspunkti vahele jääb gravitatsioonilääts, proovisid esimestena teoreetiliselt kirjeldada J. K. Lawrence (1961) ja Hans Ohanian (1974). Võrreldes elektromagnetlainetega tuleb mängu mitu huvitavat erinevust.

Kõigepealt peame arutlema, millal saab lainet võtta kui kiirte kimpu. Nähtava valguse lainepikkus on sadades nanomeetrites ja ka madala sagedusega raadiolainete korral jääb see mõõdetavaks pigem meetrites, mis astronoomiliste objektide mõõtetega võrreldes on väga väike. Nagu eelpool öeldud, oleks gravitatsiooniläätse

kontekstis täpsem lainepikkust võrrelda läätse Schwarzschildi raadiusega, mis tähe puhul on tüüpiliselt mõned kilomeetrid, Linnutee galaktikal kaks triljonit kilomeetrit ehk u 0,2 valgusaastat, Virgo galaktikate parvel u 35 valgusaastat. Igal juhul saame elektromagnetlainetega gravitatsiooniläätstes toimuvat praktiliselt alati probleemideta kirjeldada nn geomeetrilise optika lähendis, ehk käsitleda lainet kiirte kimbuna, mis läätstes murdub. Kuna lääts on võrreldes lainepikkusega suur, siis kiirguse lainelised omadused võib jätta arvestamata.

LIGO poolt mõõdetavate gravitatsioonilainete sagedus on kümnetes hertsides, mis tuleneb mustade aukude paari kokkutiirlemise orbiidil liikumise sagedusest. Nii-sugusele sagedusele vastav lainepikkus algab kusagilt poolesajast kilomeetrist ja ulatub kümne tuhande kilomeetrini. See tähendab, et kui läätseks on galaktika või galaktikate parv, siis võime ka gravitatsioonilaineid võtta kiirte – gravitatsioonikiirte – kimbuna nagu geomeetrilises optikas. Aga tähe tüüpi läätse puhul see lähendus enam ei kehti, sest tähtede Schwarzschildi raadius on samas suurusjärgus või isegi väiksem vaadeldavate gravitatsioonilainete enda tüüpilisest lainepikkusest. Sellisel juhul tuleb gravitatsiooniläätse arvutus algusest peale täiesti ümber teha ning kasutada hoopis laineoptika valemeid, mistõttu ilmub difraktsioon jms lainetele omased nähtused. Kui aga kujutame ette, et gravitatsioonilainete allikaks on kauge galaktika keskmes tantsu keerutav supermassiivsete mustade aukude paar, siis nende genereeritud gravitatsioonilaine sagedus peab olema veel oluliselt madalam, nanohertsides. Eks ole, kaks paksu elukat peavad teineteise ümber tegema märksa suuremaid ringe kui miljon korda kõhnemate elukate paar, seega täisringi peale tegemise tempo on ka vastavalt väiksem. Sel juhul on gravitatsioonilainete lainepikkus sadades triljonites kilomeetrites, ehk suurem kui galaktika Schwarzschildi raadius. Nõnda saab supermassiivsete mustade aukude poolt üles aetud laine korral geomeetrilise optikaga läätse kirjeldada alles galaktikaparvede korral.

Teine aspekt on see, et mustade aukude paari tekitatud laine saavutab detekteerimiseks piisava intensiivsuse (amplituudi) enamasti alles kokkutiirlemise lõppstaadiumis, mis on suhteliselt lühike ja kestab alla sekundi. Selle kosmilise sirsatsuse sisse mahub suhteliselt tagasihoidlik arv laineharju. Nagu SN Refsdali puhul nägime, võib kiirte teekond läbi gravitatsiooniläätse olla küllaltki erineva pikkusega sõltuvalt materia tiheduse jaotusest läätstes. Ebasümmeetrilise läätse korral erinevad teekondade pikkused võrreldes sirsatsuse kestvusega palju ja seepärast saab sündmuse gravitatsioonilist kaja detektoris „kuulda” mitu korda. Seega tuleb tähelepanelik olla, et varem kõlanu korduseid mitte segi ajada uute sirsatsude „esmaettekannetega”.

Kui suur lääts on vaid kergelt ebasümmeetriline, siis võib ette kujutada, kuidas naabertrajektoori mööda tulnud teine kiir peab läbima pisut pikema maa ning jääb seetõttu ainult tibakese maha. Seega sirsatsud võivad detektoris osaliselt ka kattuda. Kui sedasi saavad kokku samasuunaliste võngete harjad, siis signaal võimendub, aga kui vastasuunaliste võngete harjad (ehk faasi nihe on pool perioodi), siis võivad need teineteist ka maha taandada. Kuna sirsatsu kestel sagedus kasvab, siis ideaalne sünkroonsus on võimatu, ning tulemuseks on keerulise kujuga moonutatud signaal, mille mõned osad võimenduvad, mõned surutakse maha. Lõpusirsatsule eelnevad võnkumised on samas suhteliselt stabiilsema sagedusega ning nende puhul võib hea lääts laineharjade liitumisel anda korraliku võimenduse. Kuna gravitatsioonilaine allikaks olev süsteem on astronoomilises mõttes väga kompaktne, ehk gravitatsioonikiired lähtuvad sisuliselt ühest punktist (paljudest punktidest koos-

neva allika nagu galaktika puhul kipuksid kiired üksteist keeruliselt võimendama ja taandama), siis mõnede uurijate hinnanguliste arvutuste järgi võiks ideaalne läätts anda lausa kuni tuhandekordse võimenduse. See nihutaks märkimisväärselt kättesaadavate allikate piiri ja muudaks tabatavaks oluliselt varajasemas Universumis toimunud sündmused.

Arvestus, kui suure suure tõenäosusega mõnd gravitatsiooniläätsest läbi käinud gravitatsioonilainet registreerida õnnestub, sõltub allikate ja võimalike läätsete tihedusest ning detektori tundlikkuse ulatusest. Kui võtta aluseks seniste mõõtmistega saadud hinnangud mustadest aukudest või ka neutrontähtedest koosnevate kompaksete astrofüüsikaliste kaksiksüsteemide kohta ning lugeda läätsete tihedust teadaoleva galaktikate jaotuse kohaselt, siis oma tehniliste võimete piirile viidud LIGO-Virgo-KAGRA detektorite komplekt võiks lähiaastatel olla võimeline märkama keskmiselt üht läätse poolt võimendatud või modifitseeritud lainesündmust aastas. Detektorite poolt seni kogutud gravitatsioonilainete andmetes kahjuks ühtegi läätse mõju tunnustega sündmust välja ei paista. Samas pole detektorid veel oma tippvõimekust päris saavutanud ka, seega jääme rahulikult ootele.

Läätsega gravitatsioonilainete esialgne mitteregistreerimine pakub siiski juba täna teatud positiivse teadmise killukesi. Näiteks võimaldab see seada piirangu hüpoteetiliste alternatiivsete läätsete leidumise tihedusele. Mõned tumeaine mudelid pakuvad välja tavaliste ja supermassiivsete mustade aukude vahepealse massiga mustade aukude olemasolu. Hästi tuntud täheprotsessides sääraseid elukaid väga palju tekkida ei saa, sest selleks peaksid sajad tavalised mustad augud või tähed kuidagi omavahel kokku saama ja ühinema, mis pole üldse tõenäoline. Aga niisugused mustad augud võisid vahest tekkida ülivarase Universumi tihedas ainesupis ning seejärel oleksid neil mitmed sobivad omadused, et hiljem toimida tumeainena. Kui tumeaine koosneks valdavalt sellistest mustadest aukudest, siis peaks neid kosmoses päris tihedasti leiduma ning mõni neist oleks võinud juba läätsetena gravitatsioonilainete teele jääda ja laine signatuurile mõju avaldada. Kuna seda pole juhtunud, siis järelikult ei saa selliseid musti auke ikka nii rohkelt olemas olla, kui mudel välja pakkus. Sama järeldus kehtib ka tumeaine kompaktselt tihedate minihalode või muude läätseks sobivate konfiguratsioonide kohta. Tulevikus detektorite arenedes lähevad sarnased piiranguid muidugi konkreetsemaks ja täpsemaks, või vastupidi viivad äkki just vahepealsete mustade aukude või minihalode avastamiseni.

Kaugemasse tulevikku kavandatud kolmanda generatsiooni gravitatsioonilainete detektorid nagu Cosmic Explorer ja Einstein Telescope peaksid olema võimelised registreerima tohutul hulgal mustade aukude kokkutiirlemise gravitatsioonilainete sündmusi, vahest isegi kuni miljon aastas. Nende hulgas võiks omakorda esineda kümneid või sadu läätsest mõjutatud laineid, mis lisaks erakordsete üksiksündmuste analüüsile võimaldab hakata tegema ka statistikat. Seega lisaks infole ekstreemsete astrofüüsikaliste protsesside kohta, milleks mustade aukude (ja neutrontähtede) kokkutiirlemine kahtlemata on, hakkavad gravitatsioonilained „läbi valgustama” või, kui soovite, „läbi kuulama” seda osa Universumist, mis jääb allikate ja meie vahele. Saame elektromagnetlainest sõltumatut infot massi jaotuse kohta galaktikates ja nende parvedes ning koos elektromagnetlainetega täpsustada Universumi kui terviku paisumise dünaamikat allikast meieni kulgemise aja jooksul. Astronoomia areneb järjest enam multikanalilisuse suunas, kus lisaks elektromagnetlainete täielikule diapasonile (gamma, röntgen, nähtav valgus, infrapuna, raa-

dio), saame kosmosest infot ka kosmilisi kiiri, neutriinosid ja gravitatsioonilaineid püüdes. Teatud mõttes on see analoogiline sellega, kuidas erinevad meeled nagu nägemine, kuulmine, haistmine jne üheskoos võimaldavad maailmast kokku panna terviklikuma pildi.

Veel enam, nii gravitatsioonilained ise kui nende käitumine läätses on väga heaks kontrolliks ka üldrelatiivsusteooria paikapidavusele. Seni rahuldava lahenduseta tumeaine ja tumeenergia probleemid ajendavad mõtlema, et vahest kuulub ka Einsteini üldrelatiivsusteooria mingil moel laiendamisele, nii nagu Einstein omal ajal asetas Newtoni gravitatsiooniteooria oma üldisema teooria raami. Teoreetikud on selliseid üldrelatiivsusteooriast kaugemale pürgivaid mudeleid välja pakkunud hulgin, kuid vähegi süstemaatilisem analüüs, mida need ennustavad gravitatsioonilaine kohta gravitatsiooniläätses, on täna alles algamas (Harikumar jt, 2024).

Kasutatud kirjandus

- P. Kuusk, Gravitatsioonilainete lugu jätkub, Tartu Tähetorni Kalender 2019. aastaks (2018) 95, 74–82.
- S. Harikumar, L. Järv, M. Saal, A. Wojnar, M. Biesiada, Propagation and lensing of gravitational waves in Palatini $f(\hat{R})$ gravity, Phys. Rev. D **109** (2024) 12, 124014 [doi: 10.1103/PhysRevD.109.124014].