

# Mustad augud\*

Piret Kuusk (Füüsika Instituut, Tartu)

## 1. Newtoni teooria: nähtamatud tähed

Isaac Newton (1642-1727) esitas oma teedrajavas raamatus “Loodusteaduse matemaatilised printsiibid” (1687) gravitatsiooninähtusi kirjeldava teooria, mille kohaselt iga kaks materiaalist keha universumis on omavahel seotud vastastikuse gravitatsioonilise külgetõmbejõu vahendusel. See jõud on võrdeline kehade massidega ja pöördvõrdeline nendevahelise kauguse ruuduga. Teineteisest küllalt kaugel olevate kehade vahel võib gravitatsioonijõud olla kaduvväike. Kuid oma olemuselt on ta universaalne ja mõjub eranditult kõigi kehade vahel. Oma teises raamatus “Optika” (1704) sõnastas Newton valguskiirtega tehtud katsete tulemuste seletamiseks valguse korpuskulaarteooria, mille kohaselt valgus on väikeste osakeste valguskorpusklite voog. Kui nüüd panna kokku Newtoni universaalne gravitatsiooniseadus ja valguse korpuskulaarteooria, siis on üsna loomulik järeldada, et ka valguskorpusklid peaksid alluma gravitatsioonilisele külgetõmbele. Sel juhul aga kerkib kohe järgmine küsimus: kas võib olla niisugust taevakeha, mille raskustungi valguskorpusklid ei suudagi ületada ja jäävad alatiseks taevakeha lähedusse? Teadaolevalt esimesena arvutas jaatava vastuse sellele küsimusele välja inglane reverend John Michell (1724-1793): paakiirus tähelt, mille tihedus on võrdne Päikese tihedusega, kuid läbimõõt 500 korda suurem, ületaks valguse kiiruse ja seega valguskorpusklid ei saaks tähest eemalduda. Taolist nähtamatut tähte oleks võimalik avastada ainult sel juhul, kui tema raskusjõuväljas liiguks mõni nähtav keha. Michelli teate luges 27.novembril 1783.a. Londoni Kuninglikus Seltsis ette tema sõber ja mõttekaaslane Kuningliku Seltsi liige Henry Cavendish (1731-1810). Mõni aeg hiljem, Prantsuse Vabariigi IV aastal (1795/96) publitseeris analoogilise mõttekäigu ka Pierre Simon de Laplace (1749-1827). XIX sajandi algul asendus valguse korpuskulaarteooria valguse laineteooriaga, sest ainult viimane võimaldas seletada inglise teadlase Thomas Youngi (1773-1829) poolt 1801.a. avastatud valguse interferentsinähtusi. Newtoni gravitatsiooniteooria raames aga pole mingit alust arvata, et raskusjõud mõjutab lainetusnähtusi. Seepärast jäi massiivsete, kuid põhimõtteliselt nähtamatute kosmiliste objektide idee poolteiseks sajandiks unustusse. Ta avastati uuesti alles siis, kui Newtoni gravitatsiooniteooria oli asendatud Einsteini omaga.

## 2. Üldrelatiivsusteooria: mustad augud

Vastavalt Albert Einsteini (1879-1955) poolt 1916.a. esitatud üldrelatiivsusteooriale on universumit matemaatiliselt kõige sobivam kirjeldada kui neljamõõtmelist kõverat aegruumi. Kõvera aegruumi erinevust tasasest saab piltlikustada analoogiliste kahemõõtmeliste ruumide ehk pindade abil: tasapind on tasane kahemõõtmeline ruum, kerapind ja sadulpind aga kuuluvad kõverate kahemõõtmeliste ruumide hulka. Kõvera aegruumi geomeetriat seob füüsikanähtustega väide, et osakeste neljamõõtmelised liikumisteed ja valguskiirte trajektoorid etteantud kahe punkti vahel on kõikvõimalike neid punkte ühendavate joonte hulgas lühima pikkusega jooned ehk geodeetilised jooned. Tasases ruumis on lühima pikkusega jooned sirgjooned, kõveras ruumis tuleb nende leidmiseks lahendada geodeetilise joone võrrand. Näiteks

---

\* Toimetatult ja illustreeritult ilmunud kogumikus “Universum”, Tallinn: Horisont 1998.

kahemõõtmelise ühtlaselt kõvera ruumi - kerapinna - geodeetilised jooned on suuringid (jooned kerapinnal, mis tekivad kerapinna lõikamisel kera keskpunkti läbiva tasapinnaga).

Vaatleme lähemalt valguslainete levimist tasases aegruumis (joon.1). Olgu meil mingil kerapinnal  $T$  valguse punktallikad, mis hetkel  $t$  saadavad välja valguslained. Elementaarlainefront iga punktallika ümber on kerapind, mis levib valguse kiirusega. Vastavalt Madalmaade füüsiku, matemaatiku ja astronoomi Christiaan Huygensi (1629-1695) poolt esitatud printsibile tekitavad kõik elementaarlained kokku lainefronnid, mis on elementaarlainefrontide mähispinnad. Mingil järgmisel ajahetkel on meil seega kaks lainefronni  $T_1$  ja  $T_2$ , millest üks levib kerapinna  $T$  keskpunkti suunas ja teine väljaspoole. Jooniselt 1 on näha, et lainefronni  $T_1$  pindala on väiksem ja lainefronni  $T_2$  pindala on suurem kui esialgsel pinnal  $T$ . Kõveras aegruumis on elementaarlainefronnid kõveruse tõttu deformeeritud ja üldjuhul pole enam kerapinnad, mis levivad ühesuguse kiirusega igas suunas. Kui pinna  $T$  sees on piisavalt suure massiga keha, siis võib osutada, et mõlema lainefronni  $T_1$  ja  $T_2$  pindala on väiksem kui esialgsel pinnal  $T$ . Niisuguse omadusega pinna  $T$  olemasolu võimalikkust üldrelatiivsusteooria raames näitas esmakordselt inglise matemaatik ja füüsikateoreetik Roger Penrose. Ta nimetas taolise pinna kinniseks lõkspinnaks. Lõkspinnalt kiiratud valgus saab niisiis liikuda ainult sissepoole ja lõkspinna sees asuv keha on Newtoni teooriast järelduva nähtamatu tähe relativistlik analoog.

Ülaltoodud mõttekäik ja joon.1 pärinevad Cambridge'i teoreetikute Stephen Hawkingi ja John Ellise raamatust "Aegruumi suuremastaabiline struktuur" (1973). Nad jätkavad: "Aja  $t$  kasvades pinna  $T_2$  pindala aina väheneb... Kuna aine pinna  $T$  sees ei saa liikuda valguse kiirusest suurema kiirusega, osutub ta lõksus olevaks piirkonnas, mis tõmbub kokku nulliks lõpliku aja jooksul. See viib mõttele, et meie mudel on kusagil ekslik. Kuid me näitame, et teatud arukate eeltingimuste täidetuse korral tekib sel viisil tõepoolest aegruumi eriline piirkond, singulaarsus. Võib arvata, et singulaarsus on koht, kus praegu teada olevad füüsikaseadused on rikutud."

Viimane väide nõuab seletust. Kui universumis on piirkondi, kus teadaolevad füüsikaseadused on rikutud, siis miks pole kindlaks tehtud, mil viisil neid nimelt rikutakse ja millised on singulaarsetes piirkondades kehtivad seaduspärasused? Vastuse annab R.Penrose'i poolt sõnastatud kosmilise tsensuuri hüpotees: kõik aegruumi singulaarsused on ümbritsetud lõkspindadega, mistõttu me ei saa mingil moel informatsiooni lõkspinna sees asuval singulaarsusel toimuvast. See õigustab ka singulaarsuste nimetamist mustadeks aukudeks - me saame lõkspinna sisse signaale saata, kuid välja ei saa sealt tulla mitte midagi. Matemaatiliselt on võimalik tõestada, et ainukesed parameetrid, mida mustast august kaugel asuv vaatleja mõõta saab, on musta augu mass, elektrilaeng ja pöördimpulss.

Lõkspinda võib vaadelda ka kui vaatlustele kättesaadava universumi äärepinna osa - lõkspinnast väljaspool asuvat aegruumi saab kirjeldada tuntud füüsikateooriate raames, kuid lõkspinna sees toimuvast ei saa me mingit teavet.

### **3. Mustade aukude kvantaurumine ja termodünaamika**

Lõkspinnast väljaspool peaksid kehtima kõik tuntud ja kontrollitud füüsikateooriad, muu hulgas ka kvantväljateooria. Vaatleme lähemalt, milliseid nähtusi võivad põhjustada väga tugevad gravitatsiooniväljad mustade aukude läheduses, kui eeldada kvantväljateooria kehtivust. On teada, et väga tugevates elektriväljades võib väikseima energiaga olekuks ehk vaakumolekuks olla mitte lihtsalt tühi ruum, vaid

osakese-antiosakese paare sisaldav ruum; seda nähtust on ka katseliselt jälgitud. Vastavas teoorias kirjeldatakse osakese-antiosakese paaride teket kvantteooria raames, välist tugevat elektrivälja aga vaadeldakse klassikalise väljana. Kuna teooria seisukohalt ei ole oluline, millist tüüpi see väline väli on, võime klassikalise tugeva elektrivälja asendada klassikalise tugeva gravitatsiooniväljaga. Saadud teooria kohaselt peaks musti auke ümbritsevas tugevas gravitatsiooniväljades tekkima osakese-antiosakese paardid. Oma 1974.a. avaldatud artiklis jõudis S.Hawking järeldusele, et tekkinud antiosakestel on kalduvus langeda musta augu suunas, osakestel aga liikuda mustast august eemale. Ehk teisiti: antiosakesed lähevad läbi lõkspinna meie vaatlustele kättesaadavast universumist välja, osakeste voog aga võib ulatuda mustast august kaugel asuvate vaatljateni. Sel juhul näitavad nende mõõteriistad, et must auk ei olegi päris must, vaid kiirgab kõrvõimalikke osakesi (vt. joon.2). Lõkspinnast väljaspool eeldame kõigi meile tuntud füüsikaseaduste kehtivust, järelikult ei tohi mustade aukude kiirgus rikkuda energia jäävuse seadust. Kuna tekkinud kiirguse voog kannab energiat, peab see olema tekkinud millegi energia vähenemise arvel. Et kiirgust tekitab must auk, peab vähenema musta augu energia ehk mass. Otsesed arvutused näitavad, et mida väiksema massiga on must auk, seda tugevamini ta kiirgab ja seda kiiremini väheneb tema mass. Lõpuks must auk kaob täielikult, kusjuures kogu tema mass, elektrilaeng ja pöördimpulss kantakse laiali tekkinud osakeste poolt. Seda protsessi nimetatakse mustade aukude kvantaurumiseks.

Musta augu kvantkiirguse iseloomu täpsemal uurimisel selgub, et footonite jaotus energiatega järgi on seal täpselt samasugune nagu termodünaamikast hästi tuntud absoluutselt musta keha kiirguses. Üldrelatiivsusteooriast ja kvantteooriast lähtudes saadi seega valem, mis langeb täpselt ühte hoopis kolmanda teooria termodünaamika ühe põhivalemiga. Nii täpne vastavus ei saa olla juhus. Tõesti, edasised arvutused lubasid koostada sõnastiku, mis seob omavahel mustade aukude füüsikat ja termodünaamikat:

musta augu mass - energia,

raskusjõud lõkspinnal - temperatuur,

lõkspinna pindala - entroopia.

Toodud mõistete täpsed definitsioonid viiksid meid liiga kaugemale. Märkime vaid, et kui mustal augul laeng ja pöördimpulss puuduvad, on raskusjõud lõkspinnal pöördvõrdeline augu massiga ja lõkspinna pindala võrdeline massi ruuduga. Kuna termodünaamika ja mustade aukude füüsika põhivalemite vahel saab korraldada üksühese vastavuse, ei ole mõtet pidada harilikku materiat iseloomustavaid termodünaamilisi mõisteid ja neile vastavaid mustade aukude füüsika mõisteid põhimõtteliselt erinevateks suurusteks. Palju loomulikum on oletada, et universum on nii harilikku materiat kui ka musti auke sisaldav termodünaamiline süsteem, mis allub üldistatud termodünaamika seadustele. Oma matemaatiliselt kujult langevad need ühte hariliku termodünaamika seadustega, kuid neis esinevaid suurusi tuleb mõista liitsuurustena: harilikku materiat iseloomustavad termodünaamilised suurused + vastavad musti auke iseloomustavad suurused.

#### **4. Informatsiooni kadumine mustades aukudes**

Termodünaamika üldistamise võimalus pole ainuke üllatus, mida pakub meile musta auku ümbritsevast lõkspinnast väljaspool asuva piirkonna uurimine, kus eeldatavasti ei ole veel vaja väljuda meile tuttavate füüsikateooriate raamest. Nagu eespool

mainitud, järeldub üldrelatiivsusteoriast, et välise vaatleja jaoks on ainukesed musta auku iseloomustavad omadused tema mass, laeng ja pöördimpulss. Sattugu kosmoselaev mustale augule nii lähedale, et tema mootorite energiast enam ei piisa ülitugeva gravitatsioonijõu ületamiseks ning ta langeb läbi lõkspinna musta auku. Kui kaugelasuv vaatleja ei pannud tähele, mis nimelt musta auku kukkus, võib ta hiljem registreerida, et musta augu mass on suurenenud, võib-olla ka laeng ja pöördimpulss muutunud. Kuid tal ei ole mitte mingisugust võimalust taastada selle mateeria detailset struktuuri, mille langemine musta auku nimetatud kolme suuruse muutuse põhjustas. Ta ei suuda näiteks öelda isegi mitte seda, kas see oli aine või antiaine. Niisiis, kui esialgne füüsikaline süsteem must auk+kosmoselaev on iseloomustatud väga suure hulga parameetritega, siis lõppsüsteemiks on must auk, millel ei saa olla rohkem kui kolm mõõdetavat parameetrit. Must auk neelab mitte ainult mateeriat, vaid ka informatsiooni mateeria struktuuri kohta (vt. joon.3). 1976.a. väitis Hawking: põhimõtteline võimatus teada saada, millise struktuuriga mateeriast must auk tekkis, on universumis fundamentaalse tähendusega. Kvantmehaanika tõi alusfüüsikasse sisse juhuslikkuse ja tõenäosuse mõisted - meil on põhimõtteliselt võimatu üksiku kvantosakese jaoks välja arvutada tema täpne liikumistee, saame leida vaid tõenäosuse, millega ta tulevikus võiks mingis ruumpunktis asuda. Einstein, kellele kvantmehaanika põhiprintsiibid tundusid olevat ebaloomulikud, väljendas oma eitavat suhtumist kvantmehaanika tõenäosuslikku olemusse tuntud lausega: "Jumal ei mängi täringut." Hawking on oma arvamuse sõnastanud vastulauses: "Jumal mitte ainult mängib täringut, vaid vahel viskab ta täringu koguni sinna, kus me seda kunagi vaadata ei saa."

Ülaltoodud näites kosmoselaevaga oli tegemist klassikalise füüsika seaduste poolt kirjeldatud mateeria langemisega musta auku. Kui aga uurida analoogilist protsessi kvantmehaanika seadustele alluva mateeria jaoks, tekivad ootamatud raskused. Osutub, et informatsiooni kadumine tähendab kokkuvõttes seda, et tuleks muuta kvantmehaanika mõningaid põhiseisukohti. Kuid kvantmehaanika on katsetega väga heas kooskõlas ja teda ümber teha hüpoteetiliste mustade aukudega seotud nähtuste pärast pole kellelgi soovi. Sellele eelistatakse otsida võimalusi mustadele aukudele täiendavate kvantparameetrite omistamiseks, mille abil must auk võiks salvestada informatsiooni lõkspinnast läbi läinud kvantmateriale struktuuri kohta. Probleemi lahenduse peaks andma gravitatsiooni kvantteooria. Kuid mitmesuguste matemaatiliste ja põhimõtteliste raskuste tõttu sellist teooriat pole veel loodud. Kõige perspektiivikam tundub olevat kvantgravitatsiooni tuletamine superstringiteoriast. Stringiteoriast lähtudes on viimastel aastatel õnnestunud tuletada mustade aukude siseolekute teooria, mis lubab seletada mustade aukude entroopia olemasolu ja suurust niisamasugusel viisil, nagu statistiline füüsika põhjendab termodünaamilise entroopia suurust.

## 5. Lõpetuseks

Mustad augud on seni jäänud hüpoteetilisteks objektideks, mille olemasolu universumis pole õnnestunud otseste vaatlustega kinnitada. Kuid nende eksistentsi on teoreetiliselt võimalik tuletada väga mitmel erineval viisil. Newtoni gravitatsiooniteoriast ja valguse korpuskulaarteoriast järeldub nähtamatute tähtede olemasolu võimalikkus. Üldrelatiivsusteooria põhivõrrandi Einsteini võrrandi lihtsaim lahend on kerasümmeetrilist gravitatsioonivälja kirjeldav Schwarzschildi lahend, mille keskpunktis asuvat singulaarsust ümbritseb lõkspind. Küllalt suure massiga tähtede areng viib praeguste teoreetiliste arusaamade kohaselt vältimatult gravitatsioonilise kollapsini, mille lõppseisundiks on must auk. Mõnede galaktikate

tsentrist tuleva kiirguse spektri seletamise parim viis on oletada, et seal keskel on massiivne must auk. Jääb lugeja otsustada, kas tema jaoks on need kaudsed tõendid piisavad mustade aukude olemaolu uskumiseks või on ta skeptik ja ei usu seda mitte.

Jooniste allkirjad:

Joon.1. Ajahetkel  $t$  kiirgab kerapind  $T$  valgusimpulsi. Mingil hilisemal ajahetkel moodustab punktis  $p$  kiiratud valgus elementaarlainefrondi  $S$ . Mähispinnad  $T_1$  ja  $T_2$  on sissepoole ja väljaspoole levivad lainefrondid. Kui mõlema pinna  $T_1$  ja  $T_2$  pindalad on väiksemad kui pinna  $T$  pindala, on  $T$  kinnine lõkspind.

Joon.2. Ülitugev gravitatsiooniväli musta augu ümber tekitab osakese-antiosakese paari, millest antiosake langeb musta auku, osake aga võib jõuda kauge vaatlejani. Musta augu mass, mis on võrdeline tema raadiusega  $r_0$ , peab seejuures vähenema, et ei rikutaks energia jäävuse seadust.

Joon.3. Igasugune üksikasjalik informatsioon musta auku langeva materia koostise ja struktuuri kohta läheb kaduma, sest juba olemas olevat musta auku iseloomustab ainult kolm parameetrit - mass, pöördimpulss, elektrilaeng.