

MUSTAT AUKOT, AVARUUSTUTKIMUSASEMAT,
AVARUUDEN MITTASUHTEET SEKÄ
HAVAINNOINTIMENETELMÄT



Itä-Suomen yliopiston
LUMA-KESKUS

Sisällysluettelo

YHTEENVETO	3
TEORIA MUSTISTA AUKOISTA	4
SANANSELITYSPELI – MUSTAT AUKOT	7
KYSYMYKSET	7
VÄITTÄMÄKORTIT JA OHJEET	8
TIEDONHAKUTEHTÄVÄT – AVARUUDEN MITTASUHTEET JA HAVAINNOINTIMENETELMÄT	11
AVARUUSTUTKIMUSASEMAT.....	13
VÄITTÄMÄKORTTIEN SELITYKSET	14

Yhteenveto

Kosmologia on tieteen haara, joka tutkii maailmankaikkeutta ja sen rakennetta, että sen historiaa. Kosmologit tutkivat muun muassa galakseja, mustia aukkoja, tähtisumuja sekä tähtien elinkaaria erilaisin mittausmenetelmin. Tässä materiaalissa syvennytään mustiin aukkoihin, avaruuden mittasuhteisiin sekä miten avaruutta on tutkittu. Mustiin aukkoihin liittyen on koostettu teoriaosuus, jonka avulla voidaan vastata liitteistä löytyviin kysymyksiin sekä väittämäkortteihin. Kysymykset sisältävät laskuja teoriaan liittyen ja väittämäkortit painottuvat luonnontieteelliseen argumentointiin. Avaruuden mittasuhteisiin sekä tutkimusmenetelmiin liittyen löytyy erilaisia tiedonhakutehtäviä. Aihepiirien tärkeimmät käsitteet on koostettu alias-tyyppiseksi sananselityspeliksi, joka on hyvä pelata läpi ennen kuin perehtyy materiaaleihin, jolloin saadaan tietynlainen käsitys siitä, minkälaisien käsitteiden ympärillä materiaaleissa pyöritään. Jotta oppiminen tehostuu, on hyvä käydä sananselityspeli tehtävien tekemisen jälkeen uudestaan läpi, jolloin voi testata omaa osaamistaan, kuinka hyvin oleellisimmat käsitteet ovat jääneet mieleen. Sananselityspeli on rakennettu Google Forms pohjalle ja siihen löytyy linkki liitteistä.

Teoria mustista aukoista

Musta aukko voi syntyä tähden tai tähtijoukon luhistuessa, mikäli niiden massa on riittävän suuri. 1930-luvulla tutkijat Robert Oppenheimer ja George Volkoff määrittivät tämän massan M_{OV} alarajan olevan noin 1,5–2-kertainen Auringon massaan verrattuna. 1960-luvulla avaruudesta löydettiin voimakas sähkömagneettisen säteilyn lähde, joka sijaitsi Joutsenen tähdistössä noin 6000 valovuoden päässä Aurinkokunnasta. Havaittu säteily oli röntgensäteilyä ja sen lähteenä oli Cygnus X-1, jonka uskotaan olevan musta aukko. Cygnus X-1 on osa kaksoistähteä HDE226868 (kuva 1) ja tämän kaksoistähden näkyvänä osana on ylijättiläistähti, jonka massa on noin 10–15 kertainen Auringon massaan verrattuna. Cygnus X-1 massa on noin kuusi Auringon massaa, mikä tukee myös sitä, että Cygnus X-1 olisi musta aukko, sillä sen massa ylittää Oppenheimerin ja Volkoffin rajamassan M_{OV} . Mustan aukon ominaisuuksiin kuuluu, että se imee viereisestä tähdestä ainetta, joka muodostuu spiraalimaiseksi kertymäkiekoksi sen ympärille kuvan 1 mukaisesti. Tämä mustaan aukkoon syöksyvä aine kiihtyy sekä kuumentuu ja lähettää röntgensäteilyä Wienin siirtymälain mukaan.

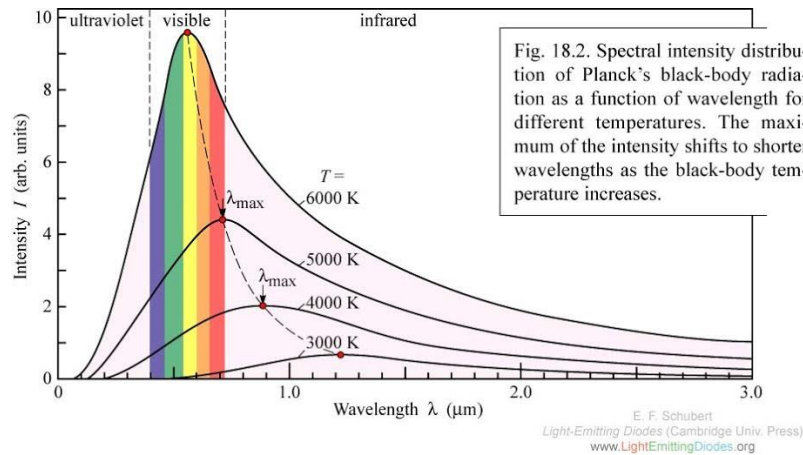


Kuva 1. Taiteilijan näkemys kaksoistähdessä HDE226868

Tähtien pintalämpötiloja tarkasteltaessa, voidaan niitä mallintaa mustina kappaleina, jolloin niiden emittoima säteily noudattaa Planckin säteilyjakaumaa (kuva 2). Tätä säteilyjakaumaa voi hyödyntää siten, että siitä voidaan lukea tähden lähettämän säteilyn aallonpituuden huippukohta ja Wienin siirtymälain (kaava 1) avulla laskea tähden pintalämpötila. Wienin siirtymälain mukaan mustat kappaleet säteilevät sitä lyhyemmällä aallonpituuksilla, mitä kuumempi kappale on, ja kaavassa $b=0,002898$ mK on luonnonvakio,

λ spektrin huippua vastaava aallonpituus ja T on kappaleen lämpötila kelvineinä. Kuvassa 2 ylin säteilykäyrä kuvaa Auringon säteilyjakaumaa ja tästä käyrästä voidaan lukea aallonpituuden huippukohdan olevan noin 500 nm, jolloin kaavan 1 avulla voidaan laskea Auringon pintalämpötilan olevan noin 6000 K.

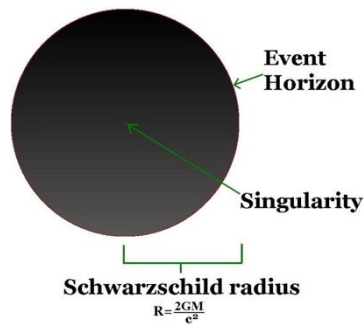
$$\lambda = \frac{b}{T} \quad (1)$$



Kuva 2. Planckin lain mukaisia säteilyjakaumia

Koko musta aukko ei kuitenkaan säteile röntgensäteilyä, sillä mustalle aukolle on olemassa teoreettinen raja, jonka takaa ei saada mitään informaatiota. Tätä rajaa kutsutaan tapahtumahorisontiksi, eikä edes näkyvä valo pääse poistumaan sen takaa. 1916 tutkija Karl Swarzschild määrittä yleisen suhteellisuusteorian avulla kriittisen säteen R (kaava 2), jonka etäisyydellä mustan aukon keskustasta tämä tapahtumahorisontti sijaitsee. Tapahtumahorisontti ympäröi mustan aukon keskustaa, jonka ajatellaan olevan singulariteetti, jossa tiheys on ääretön ja tilavuus äärettömän pieni. Kaavassa 2 G on gravitaatiovakio, M kappaleen massa ja c valonnopeus.

$$R = \frac{2GM}{c^2} \quad (2)$$



Kuva 3. Mustan aukon tapahtumahorisontti

Koska tapahtumahorisontin takaa ei saada mitään tietoa, on jonkin voiman estettävä tämä tiedon ulospääsy. Tämä voima on mustan aukon voimakas painovoima. Jotta kappale pääsisi toisen kappaleen vetovoimakentästä ulos, on sillä oltava tietty lähtönopeus, jota kutsutaan pakonopeudeksi v_e . Pakonopeus riippuu poistuvan kappaleen massasta m , sekä sen kappaleen massasta M ja säteestä r , jonka painovoimakentästä ollaan poistumassa kaavan 3 mukaan. Esimerkiksi jos Maan painovoimakentästä halutaan poistaa kappale, on kappaleen lähdettävä nopeudella $v_{e, \text{Maa}} = 11,9 \text{ km/s}$.

$$v_e = \sqrt{\frac{2G(M - m)}{r}} \quad (3)$$

Ongelmaksi fyysikoille on muodostunut mustien aukkojen lämpötila, koska jos kappaleella on jokin lämpötila, säteilee se silloin lämpösäteilyä ja mustista aukoista ei voi saada mitään informaatiota tapahtumahorisontin sisältä. Tutkija Stephen Hawking tutki mustia aukkoja ja löysi hypoteettista säteilyä tapahtumahorisontin läheisyydestä. Hawking johti Hawkingin säteilylle kaavan yleisen suhteellisuusteorian avulla ja sillä voidaan laskea mustille aukoille niiden lämpötila ja esimerkiksi Auringon massaisen mustan aukon lämpötila olisi noin 0,0000001 K eli vain hieman absoluuttisen nolapisteen yläpuolella. Maailmankaikkeuden kosmisen taustasäteilyn lämpötila on noin 2,7 K, joten se peittää mittauksissa taakseen mustien aukkojen säteilyn.

Sananselityspeli – Mustat aukot

Tässä on [linkki](#) sananselityspeliin, joka tulisi pelata ennen sekä jälkeen materiaalin läpikäymisen. Sananselityspelissä on 12 mustiin aukkoihin liittyvää käsitettä.

Kysymykset

1. Astronautti pelaa tennistä Kuun pinnalla ja hän vahingossa lyö palloa niin lujaa, ettei se enää juuri ja juuri palaakaan astronautin luo vaan poistuu Kuun painovoimakentästä. Kuinka suuren nopeuden tennispallo ($m=57,0 \text{ g}$) sai astronautin lyönnistä? Onko tennispallon massalla suurta merkitystä laskettaessa sen pakonopeutta?

Vastaus: $v_e=2,3 \text{ km/s}$

2. Jos i) 75 kiloinen ihminen, ii) Maa tai iii) jättiläistähti Pollux ($m=1,7-4 \times M_{\text{Aurinko}}$) luhistuisi mustaksi aukoksi, mitkä olisi näiden tapahtumahorisonttien säteet?

Pohdi, onko tilanteiden i-iii kohdalla mahdollista, että syntyisi tällaisia mustia aukkoja. Perustele.

Vastaus: i) $1,1 * 10^{-25} \text{ m}$ ii) 8,9 mm iii) 5,9 km

Väittämäkortit ja ohjeet

Seuraavat väittämäkorttitehtävät painottuvat luonnontieteelliseen argumentointiin, jossa pääsee ryhmässä tai vaihtoehtoisesti itsenäisesti pohtia väittämien yhtäläisyyksiä. Väittämäkortit pohjautuvat mustiin aukkoihin ja niihin pystyy vastaamaan materiaaleissa olevan ”teoriaa mustista aukoista” olevan tekstin perusteella.

Alla on esitetty pääväittämät A ja B, sekä molempien pääväittämien alla on alaväittämiä 1–6 kappaletta. Tarkoitus on miettiä ryhmissä, tukeeko alaväittäjä pääväittäjää. Esimerkiksi A väittämän kohdalla tulee miettiä, tukeeko alaväittäjä 2. ”Auringon massaisen mustan aukon lämpötila olisi noin 0,0000001K.” pääväittäjää ”Mustan aukon lähistö on kuuma”. Päätelmät laitetaan taulukkoon, joka löytyy väittämien alapuolelta, eli laitetaan rasti **tukee** tai **ei tue** kohtaan ja kirjoitetaan lyhyt **perustelu**, miksi tähän tulokseen päädyttiin. Jos ryhmän kanssa ei päädytä kumpaankaan vaihtoehtoon, tukee tai ei tue, voi rastin laittaa näiden vaihtoehtojen väliin, jolloin kyseessä on **saattaa tukea**-vaihtoehto. Tällöin tulee myös perustella, miksi tähän lopputulokseen ollaan päädytty.

A. Mustan aukon lähistö on kuuma

1. Kuuma kappale lähettää lämpösäteilyä.	4. Cygnus X-1:en vieressä oleva ylijättiläistähdhen pintalämpötila on noin 31 000 Kelviniä.
2. Auringon massaisen mustan aukon lämpötila olisi noin 0,0000001K.	5. Mustan aukon ympäristön lämpötilaa ei voida mitata suoraan lämpötilamittareiden avulla.
3. Mustan aukon ympärille on muodostunut röntgensäteilyä säteilevä kiertymäkiekko. (röntgensäteilyn aallonpituus on 0,01-10 nm)	6. Wienin siirtymälain mukaan kappale voi säteillä lyhyilläkin aallonpituuksilla, mikäli kappale on tarpeeksi kuuma.

B. Mikäli Aurinko luhistuisi, ei siitä tulisi mustaa aukkoa

1. Auringon kriittinen säde on noin 3 km.	4. Aurinko säteilee röntgensäteilyä.
2. Mustat aukot syntyvät tähden tai tähtijoukon luhistuessa.	5. Aurinko on tähti.
3. Tähden massan on oltava suurempi kuin M_{ov} , jotta siitä syntyisi musta aukko.	

TUKEE EI TUE PERUSTELUT

Tiedonhakutehtävät – Avaruuden mittasuhteet ja havainnointimenetelmät

Vastaa alla oleviin kysymyksiin valitsemasi materiaalin perusteella.

1. Avaruus sisältää eri kokoluokkia suurimmista nopeuksista pienimpiin pituuksiin. Etsi alla olevaan taulukkoon arvot halutuille suureille.

SUURE	ARVO
Alhaisin lämpötila (Kelvineinä ja celsiusina)	
Kuinka monta metriä on 3,5 Å	
Suurin nopeus	
Lyhin matka, jota voidaan fysiikassa käyttää	
Lyhin aika	
Pienin massa, jolloin tähestä voi tulla musta aukko	
Valovuosi	
Maailmankaikkeuden yleisin alkuaine	

2. Kokoluokkien vertailua. Muista perustella vastauksesi.

Kuinka monta kertaa suurempi Maan massa on Kuun massa verrattuna	
Kumpia on enemmän, soluja ihmisessä vai tähtiä Linnunradan galaksissa?	
Kuinka monta kertaa valo ehtisi kulkea vuoden aikana Maan ympäri päiväntasaajan kohdalta	
Kumpia on enemmän, atomeja maailmankaikkeudessa vai mahdollisia pelitilanteita shakissa.	

Jos ajaisit nopeudella 100 km/h Maan pinnalta suorinta reittiä Kuuhun, kauan sinulla kestäisi päästä i) avaruuteen ii) Kuun pinnalle?

3. Yhdistä parit (esim. 1-B)

1. Alkeishiukkaset

A. valovuosi

2. Protoni

B. Paikallaan olevan sekä liikkuvan kohteen ajan kokeminen eroaa toisistaan

3. Käytetään atomien sidosten pituuksien ilmoittamiseen

C. Kappaleiden massat kaareuttavat aika-avaruutta, josta johtuu niiden välinen painovoima

4. Sähkömagneettinen säteily

D. pimeä aine

5. Aikadilaatio

E. udd

6. Yleinen suhteellisuusteoria

F. Kvarkit, leptonit, mittabosonit

7. Pituuden mitta, jota käytetään tähtitieteessä

G. Ångström

8. Uskotaan muodostavan noin 85 % universumin aineesta

H. Toiseksi lähin tähti Maasta katsottuna

9. Neutroni

I. uud

10. α Centauri

J. Näkyvä valo

Avaruustutkimusasemat

Miten Suomi on mukana avaruustutkimuksessa? Mainitse ainakin kaksi avaruustutkimuksen kohdetta.

Suomesta löytyy avaruusalan yhdistyksiä sekä järjestöjä. Mainitse ainakin yksi tällainen järjestö ja kerro, mitä tämän järjestön toimintaan kuuluu.

Vinkki: Hyvä lähde tähän tehtävään on esimerkiksi [Space Finlandin](#)-sivusto.

Väittämäkorttien selitykset

Alle on listattu väittämäkorttien suuntaa antavat vastukset.

A. Mustan aukon lähistö on kuuma

1. Tukee, mustien aukkojen ympäriltä on löydetty röntgensäteilyä ja Wienin siirtymälain mukaan voidaan olettaa lähistön olevan kuuma.
2. Ei tue, lämpötila $0,00001\text{K}$ on hyvin lähellä absoluuttista nolapistettä sekä alaväittämässä puhutaan mustan aukon lämpötilasta, joka ei kerro mustan aukon ympäristöstä mitään.
3. Tukee, Wienin siirtymälain mukaan lyhyillä aallonpituuksilla säteilevällä kappaleella on korkea lämpötila.
4. Ei tue, ylijättiläistähdhen pintalämpötila ei vaikuta mustan aukon ympäristön kuumuuteen.
5. Tukee, ympäristössä on hyvin korkea lämpötila, joten sitä ei voida suoraan lämpömittareilla mitata.
6. Tukee, ensimmäiset havainnot mustista aukoista on tehty, kun on löydetty tätä röntgensäteilyä ja Wienin siirtymälain mukaan lyhyillä aallonpituuksilla säteilevät ovat lämpötilaltaan korkeita.

B. Mikäli Aurinko luhistuisi, ei siitä tulisi mustaa aukkoa

1. Tukee, jotta tähdessä tulisi musta aukko, tulee sen massan olla suurempi kuin M_{OV} ($1,5-2 \times M_{\text{Aurinko}}$), joten pienin kriittinen säde mustalle aukolle on noin 4,5 km.
2. Ei tue, koska kaikista tähdistä tai tähtijoukoista ei tule mustia aukkoja, koska tämä riippuu niiden massasta.
3. Tukee, Auringon massa on liian pieni ($M_{\text{Aurinko}} < M_{\text{OV}}$).
4. Ei tue, vaikka Aurinko säteilee röntgensäteilyä, ei se silti tarkoita, että siitä tulisi mustaa aukkoa. (Auringon röntgensäteilyä syntyy sen roihupurkauksissa)
5. Ei tue, vaikka Aurinko on tähti, ei tämä riitä ehdoksi, että siitä tulisi musta aukko.