

# Klusteritutkimus ja klusterit Enceladuksessa

Emmi-Sofia Jurva  
LuK-tutkielma,  
Fysiikan tutkinto-ohjelma,  
Luonnontieteellinen tiedekunta,  
Oulun yliopisto

2018

# Sisältö

<b>1</b>	<b>Johdanto</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Atomi</b>	<b>2</b>
<b>3</b>	<b>Klusterit</b>	<b>3</b>
3.1	Atomien väliset sidokset . . . . .	4
3.2	Klusterien muodostus . . . . .	4
3.3	Klusterien tutkimus fotoelektronispektroskopialla . . . . .	6
<b>4</b>	<b>Klusteritutkimusta tähtitieteessä</b>	<b>9</b>
4.1	Saturnuksen E-rengas ja Enceladus . . . . .	9
4.2	Cassini-luotain . . . . .	11
4.3	Tutkimustulokset . . . . .	13
<b>5</b>	<b>Yhteenveto</b>	<b>15</b>
<b>6</b>	<b>Viitteet</b>	<b>16</b>

# 1 Johdanto

Tämän tutkielman aiheena on klusterimuodostus ja klusterit planetaarisessa ympäristössä. Aiheessa yhdistyy kaksi eri fysiikan osa-aluetta; tähtitiede sekä molekyyli- ja materiaalfysiikka. Tähtitieteessä tutkimusta tehdään esimerkiksi havainnoimalla kaukoputkilla ja tekemällä suuremman kokoluokan mallinnusta. Molekyyli- ja materiaalfysiikassa taas tehdään esimerkiksi pienemmän kokoluokan mallinnusta sekä voidaan luoda ja tutkia klustereita laboratoriossa.

Cassini-avaruusluotain on tutkinut klustereita Saturnuksen kuussa Enceladuksessa. Laboratoriossa tutkimusta voidaan puolestaan tehdä valmistamalla ja tutkimalla vastaavia klustereita. Tutkimustuloksien perusteella arvellaan, että Enceladuksessa voisi olla elämää.

Tutkielman kappaleissa 2 ja 3 käydään läpi atomeihin ja klustereihin liittyvää teoriaa. Kappaleessa 3 tutustutaan lisäksi klusterien tutkimukseen materiaali- ja molekyyelifysiikassa. Kappaleessa 4 tutustutaan Saturnukseen ja sen E-renkaaseen sekä Enceladukseen ja sieltä löytyviin klustereihin. Kappaleessa 4 käydään läpi myös miten aihetta tutkitaan tähtitieteessä ja millaisia tutkimustuloksia on saatu. Lopussa on vielä lyhyt yhteenveto tutkimuksesta ja saaduista tuloksista.

## 2 Atomi

Atomi on aineen rakenneosa. Kaikki aine koostuu atomeista. Atomi koostuu positiivisesti varatusta ytimestä ja negatiivisesti varatusta elektronipilvestä. Ydin koostuu positiivisista protoneista ja varauksettomista neutroneista. Elektronipilvessä negatiiviset elektronit kiertävät ydintä. Protonit ja neutronit ovat nukleoneita. Yli 99.94 % atomin massasta on ytimestä, koska nukleonit ovat paljon isompia kuin elektronit. Tavallisesti atomeissa on yhtä paljon protoneita ja elektroneita, jolloin atomilla ei ole kokonaisvarausta. Jos atomilla ei ole yhtä paljon protoneita ja elektroneita, sillä on silloin joko positiivinen tai negatiivinen varaus riippuen kumpia on enemmän. Varauksellista atomia sanotaan ioniksi. Neutroneita on ytimestä yleensä noin saman verran kuin protoneita. Protonien määrä on atomin järjestysluku  $Z$ , joka kertoo minkä alkuaineen atomi on kyseessä. Neutronien määrä määrittää alkuaineen isotoopin. Nukleonien määrä atomissa on massaluku  $A$ . [1]

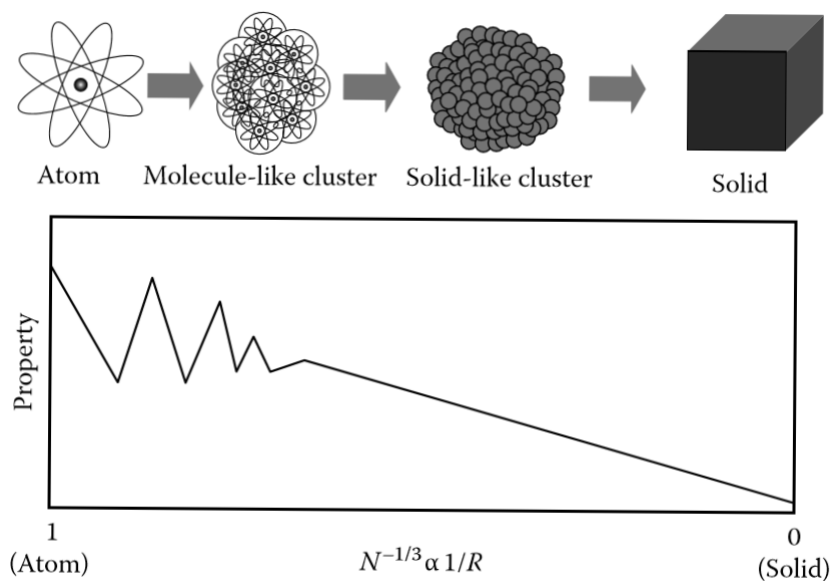
Elektronipilvessä elektronit jakautuvat elektronikuorille, joita merkitään numeroilla 1,2,3,... tai kirjaimilla K,L,M,... Kuoret jakautuvat edelleen atomiorbitaaleiksi, joita merkitään kirjaimilla s,p,d,f. Jokaiselle orbitaalille mahtuu kaksi elektronia. S-orbitaaleja on yksi kappale, joten sinne mahtuu 2 elektronia, p-orbitaaleille (3 kpl) mahtuu kuusi elektronia, d-orbitaaleille (5 kpl) 10 elektronia ja f-orbitaaleille (7 kpl) 14 elektronia. Ensimmäisellä kuorella on vain s-orbitaali, toisella kuorella s- ja p-orbitaalit, kolmannella s-, p- ja d-orbitaalit ja niin edelleen. [1]

Atomin orbitaalit eli energiatasot voivat s-orbitaalia lukuunottamatta jakautua kahdeksi erilliseksi energiatasoksi spin-ratavuorovaikutuksen vuoksi. Siinä elektronin spin- ja rataliikemäärämomenti vuorovaikuttavat keskenään, jolloin atomin energiatasot jakautuvat kahteen osaan, joka näkyy atomin spektrissä piikkien jakautumisena. Spin-ratavuorovaikutuksen vuoksi elektronin energia voi olla hieman pienempi tai suurempi kuin ilman spin-ratavuorovaikutusta. Yksittäisen elektronin kokonaisliikemäärämomenti  $j$  on rataliikemäärämomentin ja spinin summa. Spin-ratavuorovaikutuksen vuoksi elektronin kokonaisliikemäärämomenti on hieman suurempi tai pienempi kuin ilman spin-ratavuorovaikutusta. [1]

### 3 Klusterit

Klusterit ovat atomien yhteenliittymiä eli atomiryppäitä. Niissä voi olla atomeja muutamista miljooniin, ja ne ovat nanometrien kokoluokkaa. Klustereita, joissa on vain muutamia atomeita, voidaan pitää molekyyleinä. Atomin kokonaisenergia riippuu elektroniverhon ominaisuuksista ja on tyypillisesti pienempi, jos sillä on enemmän naapureita. Jos klusterissa on enemmän kuin muutama atomi, se muovautuu usein sellaiseksi, että siinä on mahdollisimman vähän pinnassa olevia atomeita suhteessa klusterin sisällä oleviin atomeihin. Tällöin klusterin energia minimoituu, koska klusterin pinnalla olevilla atomeilla on vähemmän naapureita, kuin sisällä olevilla atomeilla. [2]

Kuvassa 1 on esitetty klusterin ominaisuudet koon funktiona. Pienen koon ja vuorovaikuttavien elektroniverhojen rakenteiden vuoksi pienillä klustereilla voi olla hyvin uniikkeja fysikaalisia ominaisuuksia. Jo yhden atomin lisäys tai poisto voi muuttaa klusterin ominaisuuksia huomattavasti. Klusterin koon kasvaessa sen ominaisuudet lähestyvät kyseisen kiinteän aineen ominaisuuksia. Isojen klusterien ominaisuudet eivät riipu enää yksittäisistä atomeista. [2]



Kuva 1: Klusterin ominaisuudet koon funktiona. [3]

### 3.1 Atomien väliset sidokset

Klustereissa, kuten aineissa yleensä, atomit voivat olla sitoutuneina toisiinsa erilaisilla sidosmekanismeilla. Sidosmekanismeja on neljää eri tyyppiä: kovalenttinen, ioni-, metalli- ja van der Waals sidokset. Sidovoimien voimakkuus vaihtelee sidostyypistä riippuen; van der Waals voima on näistä neljästä heikoin ja ionisidos vahvin. Sidostyyppi määräytyy atomien uloimman kuoren elektronien eli valenssielektronien perusteella. [4]

Van der Waals voima on tyypillisin voima esimerkiksi jalokaasuatomien välillä. Se syntyy, kun atomin elektronit ovat hetkellisesti sijoittuneet toispuoleisesti, jolloin atomin toiselle puolelle syntyy negatiivinen osittaisvaraus ja toiselle puolelle positiivinen osittaisvaraus. Tällöin atomien erimerkkiset osittaisvaraukset vetävät toisiaan puoleensa. [4]

Metallisidoksessa ja kovalenttisessä sidoksessa atomit jakavat sidoselektronit yhteiseen käyttöön. Kovalenttisessä sidoksessa sidoselektronit ovat molempien sitoutuneiden atomien yhteisiä. Metallisidoksessa sidoselektronit ovat delokalisoituneita, eli ne eivät ole sitoutuneena millekään yksittäiselle atomille vaan pääsevät liikkumaan aineessa vapaasti. Kovalenttinen sidos muodostuu yleensä epämetallien ja metallisidos metallien välille. [4]

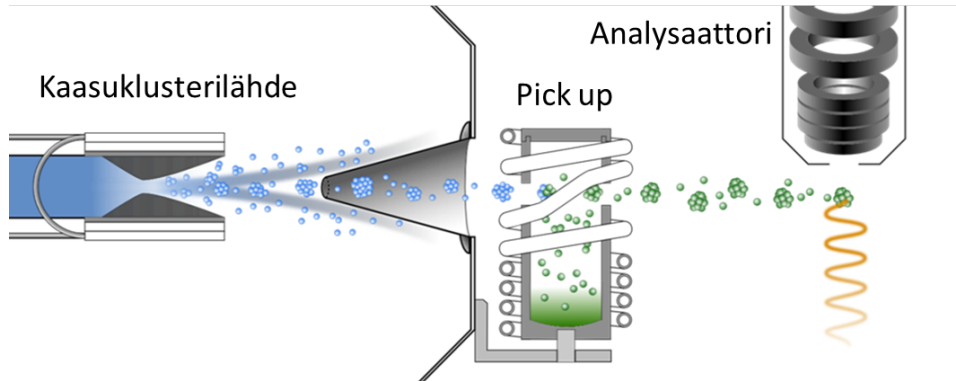
Ionisidoksessa atomi luovuttaa yhden elektronin toiselle atomille, jolloin muodostuu positiivinen ja negatiivinen ioni, jotka vetävät toisiaan puoleensa. Coulombin lain mukaan samanmerkkiset varaukset hylkivät toisiaan ja vastakkaismerkkiset varaukset vetävät toisiaan puoleensa. Ionisidos muodostuu yleensä metallin ja epämetallin välille. [4]

Klusterin hilarakenne, eli atomien järjestäytyminen voi poiketa kyseisen kiinteän aineen rakenteesta. Klustereilla esiintyykin hilarakenteita, joita ei kiinteillä aineilla esiinny. Erityisesti pienillä klustereilla esiintyy monia erilaisia hilarakenteita, jotka voivat olla riippuvia klusterin koosta. Isommilla klustereilla hilarakenne lähestyy kiinteän aineen rakennetta. [4]

### 3.2 Klusterien muodostus

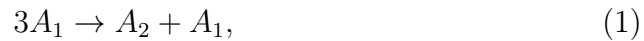
Klustereita voi muodostua ja niitä voidaan muodostaa monilla eri tavoilla. Oulun yliopiston Nano- ja molekyyliysteemien tutkimusryhmän laboratoriossa käytettävässä EXMEC -klusterilähteessä (Exchange Metal Cluster Source) klusterit muodostuvat kaasun adiabaattisessa laajenemisessa. Laitteistoa hyödynnetään klusterien fundamentaalien ominaisuuksien tutkimisessa. EXMEC koostuu pääosin kahdesta osasta: kaasuklusterilähteestä, joka perustuu adiabaattiseen laajenemiseen ja pick-up säiliöstä, jossa klusteriin voidaan liittää muita aineita. [4]

EXMECin toimintaperiaate on esitetty kuvassa 2. Korkeassa paineessa



Kuva 2: EXMECin toimintaperiaate. [3]

oleva kaasu päästetään kaasuklusterilähteen suuttimen kautta laajenemaan adiabaattisesti tyhjiöön, jolloin muodostuu klustereita. Klusterimuodostuksen alkuvaiheessa syntyy dimeerejä kolmen kappaleen törmäyksissä:



jossa  $A_1$  on yksittäinen atomi ja  $A_2$  on dimeeri. Sidoksen syntyessä vapautuva energia muuttuu yksittäisen atomin liike-energiaksi. [4]

Myöhemmin, kun klustereita on suihkussa enemmän, klusterit voivat kasvaa kahden kappaleen törmäyksellä:



Prosessissa 2 klusteri, jossa on  $N$  kappaletta atomeja, törmää klusteriin, jossa on  $M$  kappaletta atomeja, ja syntyy  $N+M$  kappaaleen klusteri. Sidoksen muodostuessa vapautuva energia lämmittää syntynyttä klusteria. Syntynyt lämpö voi hävitä erilaisilla klusterin sisäisillä jäähtymismekanismeilla. [4]

Suuttimen lähellä klusterit ovat vuorovaikutuksessa suuttimesta tulevan kaasusuihkun kanssa. Jos törmäyksiä tapahtuu tarpeeksi, klusterit voivat saavuttaa termisen tasapainon kaasun kanssa ja jäähtyä:



jossa klusteri  $A_N$  törmää kaasuatomiin  $A_1$  ja luovuttaa sille osan energiasaatan. [4]

Klusteri voi myös jäähtyä höyrystymällä:



jossa klusterista höyrystyy yksi atomi pois. Klusteri voi jäähtyä myös emittoimalla fotonin:

$$A_N \rightarrow A_N + h\nu. \quad (5)$$

Höyrystyminen ja fotonin emissio ovat mahdollisia myös kauempana suuttimesta, jossa muut jäähdytysmekanismit eivät ole enää mahdollisia. [4]

Klusterimuodostusta tapahtuu vain hyvin lähellä suutinta, koska siellä kaasu on tarpeeksi tiheää, että törmäyksiä voi tapahtua. Suuttimesta kauemmaksi mentäessä klusterimuodostus vähenee ja lopulta loppuu kokonaan. Klusterit ovat suihkun keskiosassa, kun taas muu kaasu leviää tyhjiöön tasaisesti, jolloin klusterit voidaan aika hyvin erottaa muusta kaasusta erottimella, joka on suihkun keskiosassa. Seuraavaksi klusterisuihku menee pickup säiliöön, jossa klusteriin voidaan lisätä jotain toista ainetta. Säiliössä on höyrystettynä klusteriin lisättävää ainetta, joka tarttuu klusteriin höyrystäen samalla alkuperäisiä atomeita pois. Viimeiseksi klusterit menevät analysaattorille, jossa tutkitaan niiden rakennetta fotoelektronispektroskopialla. [4]

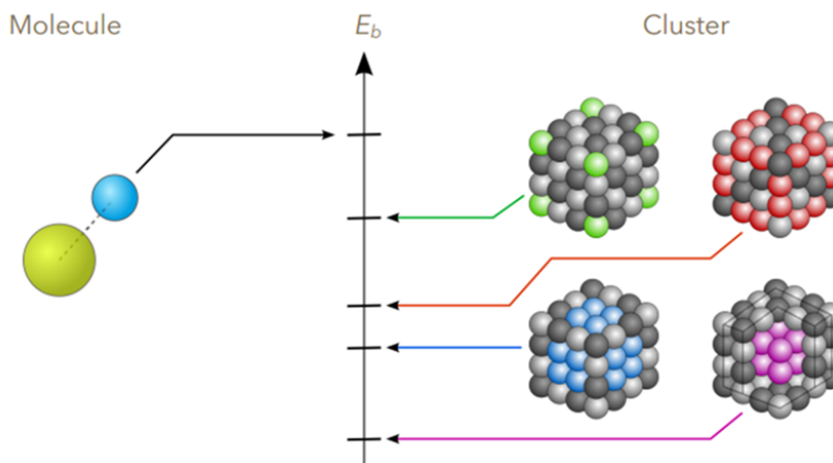
### 3.3 Klusterien tutkimus fotoelektronispektroskopialla

Fotoelektronispektroskopia on tutkimusmenetelmä, jolla saadaan tarkkaa tietoa klustereiden koosta ja rakenteesta. EXMECistä saadut klusterit tuodaan ionisoivaan säteilyyn, joka voi olla esimerkiksi synkrotronista saatua röntgensäteilyä. Tällöin klusterit ionisoituvat säteilyn vaikutuksesta:

$$A_N \rightarrow A_N^+ + e^-. \quad (6)$$

Prosessissa 6 klusterista, jossa on  $N$  kappaletta atomeita, irtoaa niin sanottu fotoelektroni ja jäljelle jää klusteri, jolla on varaus  $+1$ . Emittoituvan elektronin liike-energia riippuu klusteriin törmäävän fotonin energiasta sekä elektroniorbitaalien energiatilasta. Esimerkiksi atomin kokema lähinaapuriympäristö vaikuttaa energiatilaan. Mittaamalla fotoelektronien lukumäärä ja energiat saadaan fotoelektronispektri. [5]

Kuvassa 3 on havainnollistettu miten eri atomien elektronien sidosenergia klusterissa määräytyy. Pystyakselilla on negatiivinen sidosenergia, joka kasvaa ylöspäin. Koska sidosenergiat ovat negatiivisia, niin mitä alempana sidosenergia on kuvassa, niin sitä vaikeampi on irroittaa elektroni. Fotoelektronin kineettinen energia on sama kuin sen irroittavan fotonin energia, josta on vähennetty elektronin irroittamiseen vaadittu energia eli sidosenergia. Energia-akselin vasemmalla puolella on vertailun vuoksi molekyyli, jonka atomin elektronin sidosenergia on kuvassa ylimpänä. Energia-akselin oikealla puolella klusteria on mallinnettu kuutiolla. Klusteriin on eri väreillä merkitty eri kohdassa klusteria olevia atomeita. Kustakin atomista emittoituneen fotoelektronin sidosenergia on merkitty energia-akselille.

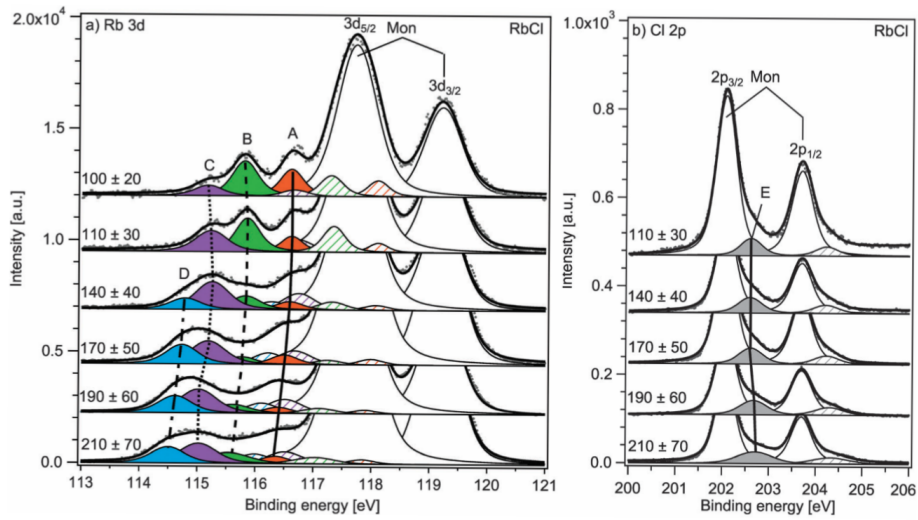


Kuva 3: Atomien sidosenergioita. [3]

Kuvassa 4 on RbCl klusterin fotoelektronispektri. Kuvassa a) on rubidiumin 3d-orbitaalien spektri ja b) kloorin 2p-orbitaalien spektri. Vaaka-akselilla on fotoelektronin sidosenergia ja pystyakselilla intensiteetti. Kuvassa alekkain on esitetty spektrit, jotka on mitattu pick-up säiliön eri lämpötiloilla, jotka kasvavat kuvassa alaspäin. ”Mon”-merkinnällä merkityt huiput kuuluvat alkalihalidi monomeereille, eli tässä tapauksessa molekyyleiksi yhteenliittyneille rubidium- ja klooriatomeille. Loput huiput, jotka on merkattu kirjaimilla A-E, kuuluvat alkalihalidi klusterille. Huiput A-D ovat peräisin klusterin eri osista kuvan 3 mukaisesti: A nurkasta, B särmästä, C tahkosta ja D klusterin sisältä. [5]

Monomeerien huippuja on kaksi, koska orbitaali jakaantuu kahteen osaan spin-rata vuorovaikutuksen vuoksi. Rb atomin 3d orbitaali jakautuu  $j = 5/2$  ja  $j = 3/2$  komponentteihin ja Cl atomin 2p orbitaali jakautuu  $j = 3/2$  ja  $j = 1/2$  komponentteihin. Huiput A-D ovat alemman sidosenergian komponentteja. Spin-rata komponentit, joilla  $j = 3/2$ , eivät näy monomeerin  $3d_{5/2}$  huipun alta, joten ne eivät anna mitään lisätietoa, mutta ovat kuitenkin kuvassa viivoitettuna. [5]

Kuvan 4a Rb 3d alueen ylimmissä spektreissä on näkyvissä kolme klusterin huippua (A-C). Kun lämpötila nousee, tulee näkyviin myös neljäs huippu (D). Yksittäiset huiput myös siirtyvät hieman pienempään sidosenergiaan päin, kun lämpötila nousee. Tämä siirtymä voidaan selittää klusterin koon muuttumisella. Kun pick-up säiliön lämpötila nousee, kaasuklusteriin liittyy enemmän alkalihalidia, jolloin saadaan myös isompia alkalihalidiklustereita.



Kuva 4: RbCl klusterin fotoelektronispektri. [5]

[5]

Vertailemalla spektrin piikkejä sidosenergiaan ja toisiinsa saadaan tietoa klusterin koosta ja rakenteesta. Piikkien intensiteettejä vertailemalla saadaan tietoa esimerkiksi paljoko klusterin pinnassa olevia atomeita on suhteessa klusterin sisällä oleviin atomeihin.

Enceladuksen suihkuissa olevia hiukkasia voidaan mallintaa tekemällä EXMECillä vesiklustereita ja lisäämällä niihin natriumsuoloja tai muita aineita. Näin saatuja hiukkasia voidaan tutkia samaan tapaan fotoelektronispektroskopialla.

## 4 Klusteritutkimusta tähtitieteessä

### 4.1 Saturnuksen E-rengas ja Enceladus

Saturnus on kuudes planeetta Auringosta ja aurinkokunnan toiseksi suurin planeetta. Se on jättiläisplaneetta ja sen säde on noin yhdeksän kertaa Maan säde. [6]

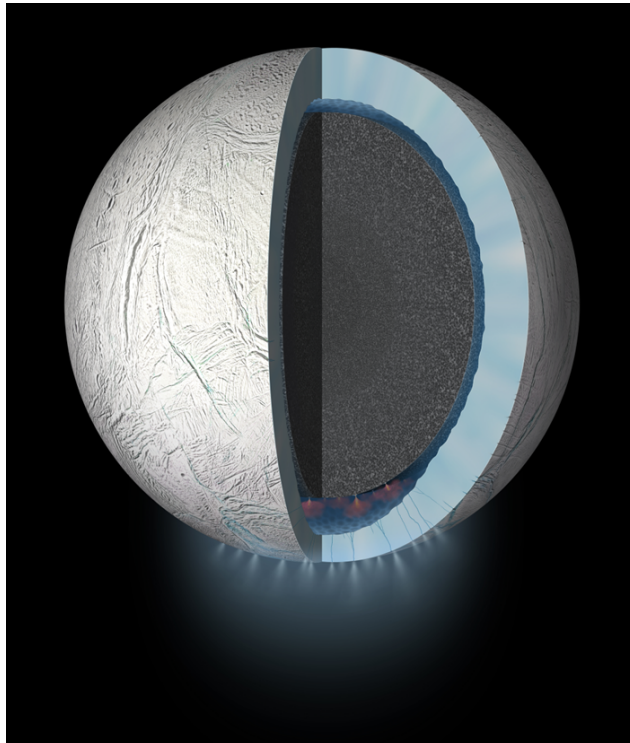
Saturnuksen renkaat ovat aurinkokunnan merkittävin rengasrakennelma. Ne koostuvat lukemattomasta määrästä erikokoisia kappaleita, jotka ovat melkein kokonaan vesijäätä. Hiukkasissa on myös hieman kivisiä aineita. Saturnuksen renkaiden syntymekanismia ei tiedetä. Jotkin merkit renkaissa viittaavat siihen, että renkaat voisivat olla suhteellisen nuoria, vaikka teoreettiset mallit viittavaat niiden olevan hyvinkin vanhoja. [7]

E-rengas on Saturnuksen toiseksi uloin, erittäin leveä rengas. Se eroaa muista renkaista siten, että se koostuu enimmäkseen mikroskooppisista hiukkasista, kun muut renkaat koostuvat enimmäkseen makroskooppisista hiukkasista. E-renkaan hiukkaset ovat enimmäkseen vesijäätä, mutta niistä on löydetty myös silikaatteja, hiilidioksidia ja ammoniakkaa. [7]

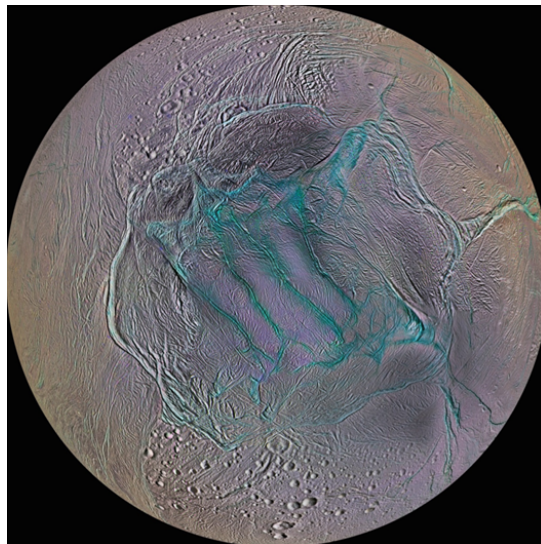
Enceladus on Saturnuksen kuudenneksi suurin kuu. Sen halkaisija on noin 500 km. Enceladus on yksi aurinkokuntamme heijastavimmista kappaleista, koska sitä peittää puhdas jääkerros. Sen pintalämpötila on erittäin alhainen, koska se ei juurikaan absorboi siihen tulevaa säteilyä. Kuvassa 5 on kuvattuna Enceladuksen rakenne: sen pinnalla on 30-40 km paksu jääkerros, jonka alla on noin 10 km syvä suolainen meri. Meren alla on kivinen sisus. [8]

Enceladuksen etelänavalla on tiikerin raidoiksi kutsuttuja vuorijonoja. Ne ovat havainnollistettuna kuvassa 6 turkooseina alueina. Vuorijonojen välisissä laaksoissa on rakoja jääkerroksen läpi pinnanalaiseen mereen asti. Näistä raoista suihkuua avaruuteen vesihöyryä ja jäisiä hiukkasia eli klustereita, hyvin samaan tapaan kuin EXMEC klusterilähteessä. Saturnuksen E-rengas koostuu näistä hiukkasista eli E-rengas on peräisin Enceladuksesta. [8]

Enceladuksen suihkuista on löydetty kivensiruja, jotka ovat syntyneet kun Enceladuksen sisuksista noussut kuuma, mineraalipitoinen vesi on joutunut kosketuksiin kylmän veden kanssa. Samanlaisia kivensiruja syntyy maapallolla merenpohjassa hydrotermisen toiminnan seurauksena. Hydrotermiseen toimintaan Enceladuksessa viittaa myös suihkuista purkautuva metaani. Elämä maapallolla saattaa olla peräisin merenpohjan hydrotermisestä toiminnasta, joten on periaatteessa mahdollista, että Enceladuksestakin löydetäisiin elämää. [9]



Kuva 5: Enceladuksen rakenne. [10]



Kuva 6: Tiikerin raidat. [11]

## 4.2 Cassini-luotain

Cassini-Huygens on miehittämätön avaruusalus, joka lähetettiin tutkimaan Saturnusta, sen renkaita ja kiertolaisia. Cassini-Huygens koostuu Cassini-avaruusluotaimesta ja Huygens-laskeutujasta. Cassini kiertää Saturnuksen kiertoradalla ja Huygens on laskeutunut Titanin, Saturnuksen toisen kuun, pinnalle. [12]

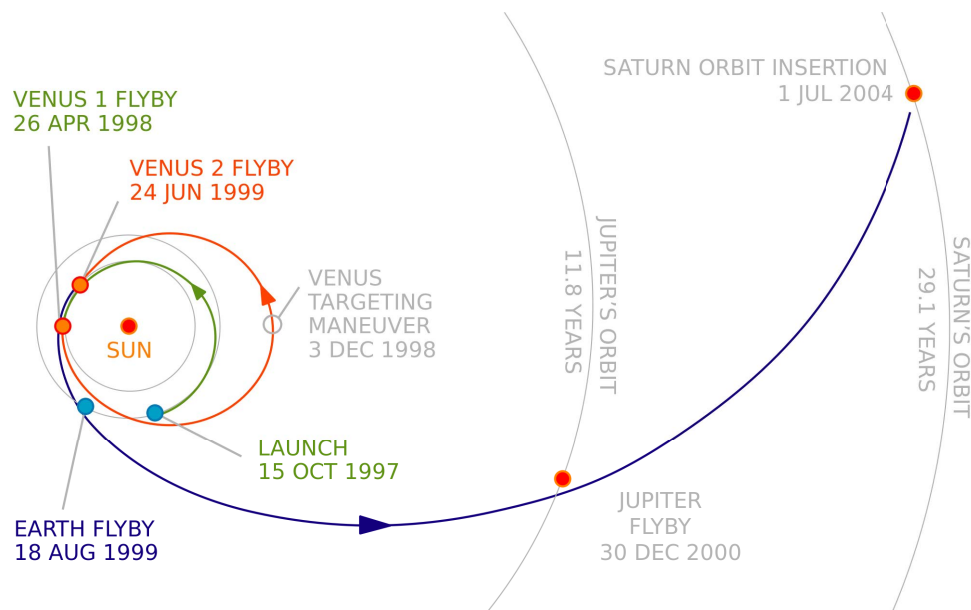
Cassinissa on 12 instrumenttia, joilla se voi tutkia Saturnuksen kaikkia kinnostavia ominaisuuksia. Monilla instrumenteilla on useita ominaisuuksia. Infrapunaspektrometri CIRS, näkyvää valoa sekä infrapuna- ja ultraviolettisäteilyä tutkiva ISS, ultraviolettisäteilyä tutkiva UVIS ja näkyvää valoa ja infrapunasäteilyä tutkiva VIMS tutkivat Saturnuksen ja sen ympäristön sähkömagneettisia spektrejä. Plasmaspektrometri CAPS, kosmisen pölyn analysaattori CDA, massaspektrometri INMS, magnetometri MAG, magnetosfäärin kuvantamislaitte MIMI ja radio- ja plasma-aaltoja havaitseva RPWS tutkivat pölyä, plasmaa ja magneettikenttiä. Tutka ja radioaaltoja käyttävä RSS kartoittavat ilmakehiä, määrittävät kuiden massoja, keräävät tietoa Saturnuksen renkaiden hiukkaskoosta ja tutkivat Titanin pintaa käyttäen radioaaltoja. [13]

Cassini-Huygens lähetettiin matkaan vuonna 1997 ja se saapui Saturnuksen kiertoradalle vuonna 2004. Cassinin lentorataa Maasta Saturnuksen kiertoradalle on havainnollistettu kuvassa 7. Kuvassa näkyvät myös planeettojen ohitukset ja niiden ajankohdat. Myöhemmin samana vuonna Huygens irrottautui Cassinista. Cassini jatkoi toimintaansa syyskuuhun 2017. [12]

Matkallaan Saturnuksen kiertoradalle Cassini ohitti Venuksen ensimmäisen kerran vuonna 1998 ja toisen kerran vuonna 1999. Samana vuonna Cassini ohitti myös Maan ottaen kuvia Maasta ja Kuusta. Vuonna 2000 Cassini ohitti Jupiterin tehden sille monia mittauksia. Se myös kuvasi Jupiterista tähän asti tarkimman ja yksityiskohtaisimman kuvan. [14]

Saavuttuaan Saturnuksen kiertoradalle vuonna 2004 Cassini kuvasi ja tutki Saturnuksen renkaita sekä sai tarkkoja kuvia Titanista. Cassini ohitti Phoeben ja sai siitä paljon tietoa. Cassini läpäisi renkaat F- ja G-renkaiden välistä samalla kuvaten niitä. Cassini ohitti Titanin sen etelänavan läheltä. Saturnukselta löydettiin kaksi uutta kuuta (Methone ja Pallene), jotka ovat hyvin pieniä verrattuna muihin kuuhiin ja kiertävät Saturnusta Mimaksen ja Enceladuksen välissä. Cassini ohitti Titanin toisen kerran, tällä kertaa lähempää kuin mikään muu avaruusalus. Se otti Titanin pinnalta tarkimpia kuvia, joita siitä on koskaan saatu. Cassini havaitsi Titanin pinnalta ja ilmakehästä myös infrapunaspektrin. Cassini ohitti Titanin vielä kolmannen kerran keräten tietoa. Joulukuussa 2004 Huygens irtautui Cassinista. [14]

Tammikuussa 2005 Huygens laskeutui Titanin pinnalle. Samana vuonna

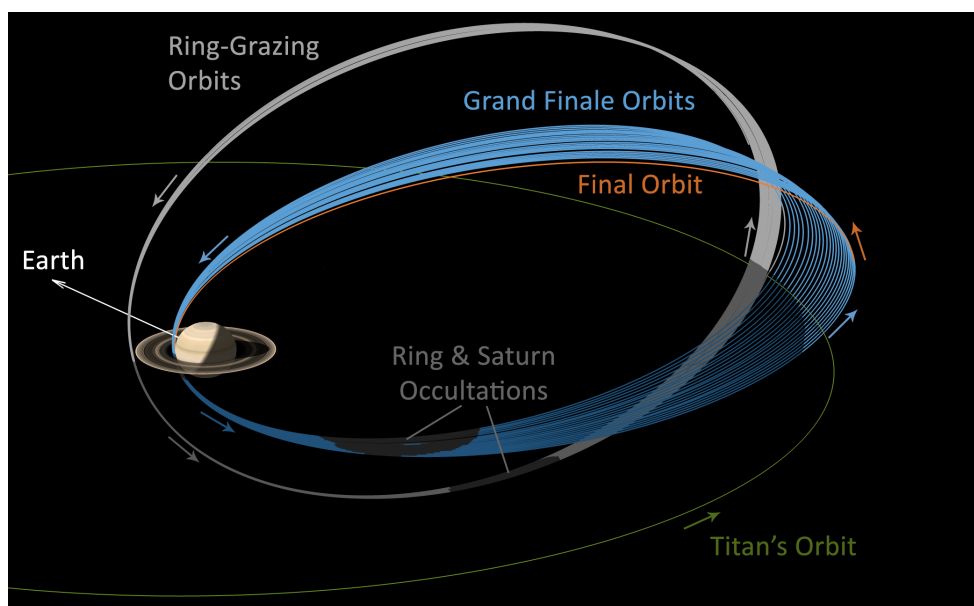


Kuva 7: Cassinin lentorata Maasta Saturnuksen kiertoradalle. [15]

Cassini ohitti jälleen Titanin löytäen suuren kraatterin sen pinnalta. Cassini ohitti Enceladuksen toisella kerralla vain 500 kilometrin etäisyydeltä. Enceladukselta löydettiin ilmakehä ja suihkut etelänavalta. Cassini tutki Saturnuksen renkaiden hiukkasten kokojakaumaa. Saturnukselta löydettiin uusi kuu (Daphnis). Cassini ohitti Enceladuksen kolmannella kerralla vain 175 kilometrin etäisyydeltä. Cassini tutki Enceladuksen jäävulkaanisia suihkuja CDA:n avulla. [14]

Cassinin polttoaine läheni loppuaan vuonna 2017. Polttoaineen loppumisen jälkeen sitä ei pystytäkään enää ohjaamaan. NASA ei halunnut, että Cassini törmää Enceladukseen tai Titaniin, jotta se ei sotke niissä mahdollisesti olevaa elämää eikä myöskään vaikuta tuleviin tutkimuksiin. Tämän takia NASA päätti ohjata Cassinin törmäämään Saturnukseen. Cassini paloi Saturnuksen ilmakehässä 15.9.2017. [16]

Cassinin loppuajan kiertorata näkyy kuvassa 8. Harmaalla on renkaiden läheltä menevä kierto, sinisellä loppuajan kierto ja oranssilla viimeinen kierros. Matkallaan kohti Saturnusta Cassinin kierto oli Saturnuksen ja sen renkaiden välissä. Cassinin viimeisiltä hetkiltä saatiin todella tärkeää tietoa jättiläisplaneetoista. Se tutki Saturnuksen painovoimaa ja magneettikenttiä. Se myös tutki, kuinka paljon materiaalia Saturnuksen renkaissa on. Lisäksi Cassini tutki renkaiden hiukkasia sekä pääsi ottamaan valokuvia erityisesti läheltä Saturnusta ja sen renkaita. Syöksyessään Saturnukseen Cassini



Kuva 8: Cassinin loppuajan lentorata. [17]

tutki sen ilmakehän koostumusta. [16]

### 4.3 Tutkimustulokset

Cassinin CDA instrumentti mittasi tuhansia massaspektrejä E-renkaan hiukkasista. CDA:n mittaustulokset osoittavat, että E-renkaan hiukkasista suurin osa on vesijäätä. Hiukkasissa on myös huomattavia määriä orgaanisia ja pii-pitoisia yhdisteitä. Nämä yhdisteet osoittavat, että nestemäinen vesi on tai on ollut yhteydessä Enceladuksen kiviseen ytimeen. [18]

Natrium on hyvä merkki nestemäisen veden olemassaolosta Enceladuksessa. Natriumia on löydetty Enceladuksen suihkuista. Jos vesi jäätyisi hiljalleen Enceladuksen pinnalta ytimeen päin, kuten olisi odotettavissa, kivistä veteen liuenneet natriumsuolat pysyisivät nestemäisessä osassa, joten jääkuoressa ei oletettavasti olisi suoloja. Tämän takia mitatut natriumpitoisuudet eivät voi olla peräisin jääkuoresta. Natrium Enceladuksen suihkuissa voi siis olla peräisin vain nestemäisestä lähteestä. [18]

Hiukkasissa olevat natriumsuolat ovat  $\text{NaCl}$ ,  $\text{NaHCO}_3$  ja  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ . Hiukkasissa on myös pienempiä määriä kaliumsuoloja. [18]

Yksittäiset suihkut pysyvät vuosia aktiivisina, joka viittaa ulosvirtauksen tulevan suuresta säiliöstä. Ottaen huomioon havaitun kaasun tuottomäärän, voidaan osoittaa, että nesteen ja kaasun rajapinnan täytyy olla vähintään

neliökilometrejä. Tämä vaatii nesteen yläpuolelle suuren höyrykammion, joka kapenee ylöspäin mentäessä kapeaksi raoksi. Paikallinen lisäys nesteen suolaisuuteen sekoittuu nopeasti nesteeseen. Säiliön suolarikastus on hidas prosessi, joten se ei riko raon dynamiikan vakaata tilaa. Esimerkiksi aika-kaala höyrystymiselle ja suolaisuuden lisääntymiselle jopa vastaavan 10 km säteiselle eristetylle nestesäiliölle olisi 300 000 vuotta. [18]

Atomisia natriumia tai kaliumia ei ole havaittu Enceladuksen ympäristössä. Pienissä määrissä liuenneet alkalisuolat, kuten NaCl ja KCl, höyrystyvät vain molekyyleinä, ei atomeina. Lisäksi kaikki vapaat alkaliatomit reagoivat nopeasti vesihöyryssä. Kuitenkin vuosikymmenien aikana alkaliyhdisteet vapautuvat hitaasti suihkuissa olevista klustereista. Suurin osa Enceladuksen suihkuista lentäneestä hiukkasmassasta putoaa takaisin kuun pinnalle, joten E-renkaaseen lentävien hiukkasten massa on paljon pienempi kuin vesihöyryn massa. [18]

## 5 Yhteenveto

Tässä tutkielmassa tutustuttiin klustereiden syntyyn Enceladuksessa ja niiden tutkimiseen. Cassini-luotain on tutkinut Enceladusta ja sen suihkuja esimerkiksi keräämällä hiukkasia ja tutkimalla niitä. Tutkimuksissa on saatu selville, että Enceladuksessa on oltava nestemäistä vettä, joka on tai on ollut yhteydessä sen kiviseen ytimeen. On myös saatu selville, että Enceladuksen jääkuoren alla, vedenpinnan yläpuolella on valtavia höyrykammioita, joista suihkut ovat peräisin.

Tutkimusta voidaan tehdä myös laboratoriossa valmistamalla vastaavia klustereita ja tutkimalla niitä esimerkiksi fotoelektronispektroskopialla. Klustereita voidaan valmistaa esimerkiksi EXMEC-klusterilähteellä, jossa korkeassa paineessa oleva kaasu laajenee adiabaattisesti tyhjiöön, jolloin kaasumolekyylit törmäilevät toisiinsa ja muodostavat klustereita. Fotoelektronispektroskopiassa klusterit ionisoidaan esimerkiksi sykrotronista saadulla röntgensäteilyllä. Irronneen fotoelektronin liike-energia mitataan, jolloin voidaan laskea elektronin sidosenergia. Sidosenergioista saadaan tietoa klusterin koosta ja rakenteesta.

Aihe on tutkimuksen kannalta merkittävä, koska on mahdollista, että Enceladuksessa on elämää. Aihetta ei ole vielä tutkittu paljon, joten on vielä paljon mitä emme tiedä.

## 6 Viitteet

- [1] Beiser A. Concepts of Modern Physics. 2003.
- [2] Jänkälä K. Klusterifysiikka-kurssin kurssimateriaali. Oulun yliopisto. 2018
- [3] Prof. M. Huttula. Seminaarimateriaali. Syksy 2017.
- [4] Mikkela M.-H. Experimental study of nanoscale metal clusters using synchrotron radiation excited photoelectron spectroscopy. Fysikaalisten tieteiden laitos. Väitöskirja. Oulu: Oulun yliopisto; 2013.
- [5] Hautala L., Jänkälä K., Mikkela M.-H., Tchapyguine M., Huttula M. Surface site coordination dependent responses resolved in free clusters: applications for neutral sub-nanometer cluster studies. Phys. Chem. Chem. Phys. 2015;17:7012-22.
- [6] <https://en.wikipedia.org/wiki/Saturn>. 14.8.2017
- [7] [https://en.wikipedia.org/wiki/Rings\\_of\\_Saturn](https://en.wikipedia.org/wiki/Rings_of_Saturn). 14.8.2017
- [8] <https://en.wikipedia.org/wiki/Enceladus>. 14.8.2017
- [9] <http://www.tiedetuubi.fi/avaruus/elaman-edellytyksia-enceladuksessa>. 22.8.2017
- [10] <https://www.nasa.gov/sites/default/files/thumbnails/image/pia20013niebur-1.jpg>. 28.1.2018
- [11] <http://aasnova.org/wp-content/uploads/2015/10/fig1.jpg>. 28.1.2018
- [12] <https://en.wikipedia.org/wiki/Cassini-Huygens>. 14.8.2017
- [13] <https://saturn.jpl.nasa.gov/mission/spacecraft/cassini-orbiter/>. 9.8.2017.
- [14] <https://saturn.jpl.nasa.gov/the-journey/timeline/>. 9.8.2017.
- [15] <https://saturn.jpl.nasa.gov/resources/1776/>. 28.1.2018
- [16] <https://saturn.jpl.nasa.gov/mission/grand-finale/overview/>. 14.8.2017
- [17] <https://saturn.jpl.nasa.gov/resources/7580/>. 28.1.2018
- [18] Postberg F., Kempf S., Schmidt J., Brilliantov N., Beinsen A., Abel B., et al. Sodium salts in E-ring ice grains from an ocean below the surface of Enceladus. Nature. 2009;459:1098-101.