

SATEENKAARI

Pro gradu
Kristina Heikkinen
Oulun yliopisto
Fysikaalisten tieteiden laitos
Oulu 2008

Sisällysluettelo

Johdanto	4
1. Valon kulku.....	5
1.1 Heijastuslaki.....	5
1.2 Taittumislaki	5
1.3 Sironta.....	6
2. Yleistä	7
2.1 Sateenkaaren synty	7
2.2 Havainnointi.....	8
3. Pää- ja sivusateenkaari	10
3.1 Sateenkaaren kuvaus.....	10
3.2 Sateenkaaren polarisaatio	12
3.3 Sateenkaaren värit.....	13
3.4 Interferenssikaaret.....	16
3.5 Sateenkaaren sisäosa ja Aleksanterin tumma vyö	18
3.6 Vesipisaran koon vaikutus sateenkaareen.....	19
4. Useamman kertaluvun sateenkaaret	25
5. Erikoisempia sateenkaaria	27
5.1 Sumusateenkaari	27
5.2 Punainen sateenkaari.....	28
5.3 Kuusateenkaari.....	29
5.4 Kasteenkaari.....	29
5.5 Heijastuneet sateenkaaret.....	30
5.5.1 Heijastuneen auringonvalon synnyttämä sateenkaari	30
5.5.2 Peilautuva sateenkaari.....	31
5.6 Sateenkaari valonheittämissä.....	33
5.7 Kuvitteellinen sateenkaari.....	33
5.8 Poikkeavat sateenkaaret.....	34

6. Tutkimushistoriaa	35
6.1 Aristoteles (384–322 eKr.)	35
6.2 Albertus Magnus (1206-1280) ja Roger Bacon (1214-1292).....	37
6.3 Dietrich Friburgiläinen (1250–1311).....	38
6.4 Rene Descartes (1596–1650).....	39
6.5 Isaac Newton (1643–1727) ja Edmund Halley (1656–1742).....	40
6.6 Thomas Young (1773-1829).....	41
6.7 George Biddle Airy (1801-1892) ja Gustav Mie (1868-1957).....	42
Yhteenveto.....	44
Viitteet	46

Johdanto

Ihmiset ovat nähneet sateenkaaria taivaalla aikojen alusta asti. Ne ovat näkyneet taivaalla samanlaisina vuosisatojen ajan. Sateenkaaret ovatkin herättäneet kysymyksiä, kunnioitusta, mutta myös pelkoa ihmisten keskuudessa. Sateenkaarten on uskottu tuovan myös ihmisille epäonnea, mutta myös ikuista onnea ja rikkautta. Salaperäisyytensä takia sateenkaaret ovat innoittaneet myös monia runoilijoita sekä taiteilijoita.

Sateenkaaren tutkimus kuuluu osana fysiikan perustutkimukseen ja sen arvoitus on selvitetty jo melko tarkkaan. Silti löytyy vielä joitakin poikkeamia kaarissa, joita ei ole vielä pystytty täysin selittämään. Tässä tutkimuksessa on tarkoitus selvittää miten sateenkaaret syntyvät ja miten niitä voidaan havainnoida. Tarkoituksena on myös käydä läpi erikoisempia sateenkaaria ja selvittää miten sateenkaarten tutkimus on edennyt vuosien saatossa.

1. Valon kulku

Valolla on kaksi luonnetta, hiukkasluonne sekä aaltoluonne. Tutkittaessa valon kulkua käytetään valon aaltoluonnetta, jos taas kyseessä on valon vuorovaikutus aineen kanssa käytetään valon hiukkasluonnetta (Alanko, 2005). Aaltoluonteen avulla voidaan selittää sateenkaaren synty, sillä muun muassa sateenkaaren värit sekä niiden järjestys selitetään valon aaltoluonteen avulla.

1.1 Heijastuslaki

Valon heijastuessa sen tulokulma on yhtä suuri kuin heijastuskulma. Tätä kutsutaan heijastuslaiksi ja tällöin tuleva ja heijastunut säde sekä pinnan normaali ovat samassa tasossa. Jos heijastava pinta on epätasainen valoa heijastuu kaikkiin suuntiin. (Lehto ja Luoma, 1998)

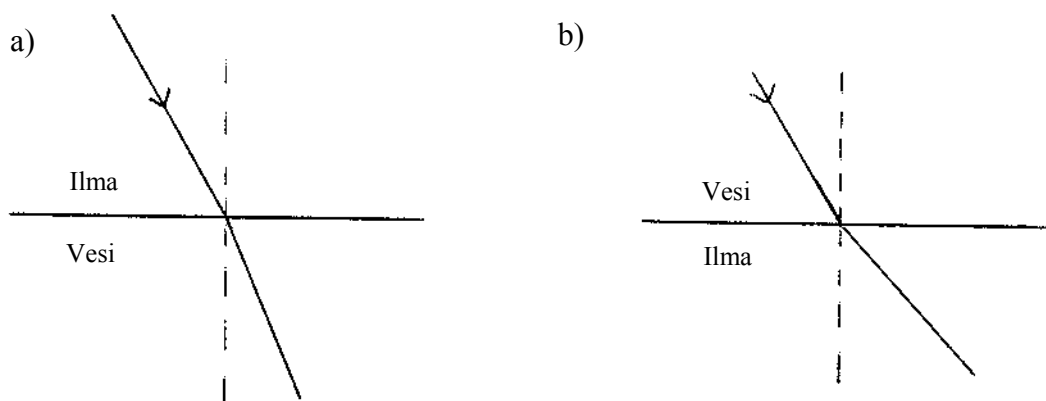
1.2 Taittumislaki

Valo kulkee aina suoraviivaisesti optisesti homogeenisessa väliaineessa, mutta kahden aineen rajapinnalla se taittuu. Yleisesti voidaan sanoa, että valonsäde taittuu normaalista pois päin, kun se tulee optisesti tiheämmästä aineesta optisesti harvempaan aineeseen. Sitä vastoin valonsäde taittuu normaaliin päin kulkiessaan optisesti harvemmasta aineesta optisesti tiheämpään aineeseen. Tätä kutsutaan Snelliuksen laiksi tai taittumislajiksi, joka on esitetty kaavassa 1. Tässä tuleva ja taittunut säde sekä pinnan normaali ovat samassa tasossa. (Lehto ja Luoma, 1998)

$$\frac{\sin \theta_i}{\sin \theta_t} = \frac{n_t}{n_i} = \text{vakio} \quad \theta_i = \text{tulokulma} \quad n_i = \text{aineen 1 taitekerroin} \quad (1)$$

$$\theta_t = \text{taitekulma} \quad n_t = \text{aineen 2 taitekerroin}$$

Valon säteen kulkiessa ilmasta veteen sen nopeus hidastuu ja se taittuu normaaliin päin (kuva 1a). Valon säteen kulkiessa vedestä ilmaan sen nopeus sitävastoin kasvaa ja säde taittuu normaalista poispäin (kuva 1b). Tämän aiheuttaa aineelle ominainen taitekerroin. Taitekertoimella kuvataan väliaineelle ominaista valon nopeudenmuutosta (Lehto ja Luoma, 1998). Veden taitekerroin on 1,33 ja ilman 1,00. Vesi on siis optisesti tiheämpää kuin ilma (Kervinen et al., 1998).

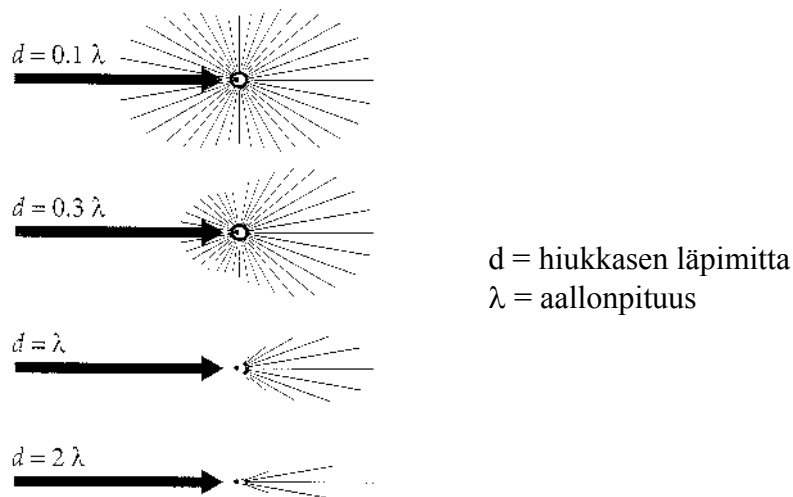


Kuva 1. Valon taittuminen a) ilma-vesi ja b) vesi-ilma rajapinnassa.

1.3 Sironta

Valon sironnassa fotonin osuu hiukkaseen tuhoutuen ja samalla muodostaen toisen fotonin, jolla on yleensä eri kulkusuunta. Valon aallonpituus pysyy silti muuttumattomana, mutta osa säteilystä poistuu muihin suuntiin. Tästä johtuen suoraan kohteesta saapuva säteily heikkenee. Hiukkasen koon suhde aallonpituuteen vaikuttaa sironnan suuntaan ja siten myös sen voimakkuuteen. Hiukkasten ollessa pieniä, eli noin aallonpituuden kymmenesosan luokkaa tai

pienempiä, sirontaa tapahtuu joka suuntaan. Hiukkasten kasvaessa sironta suuntautuu yhä enemmän eteenpäin säteilyn kulkusuuntaan päin (kuva 2). Tällöin myös hiukkasen muoto alkaa vaikuttaa sirontaan. (Karttunen et al., 1997)



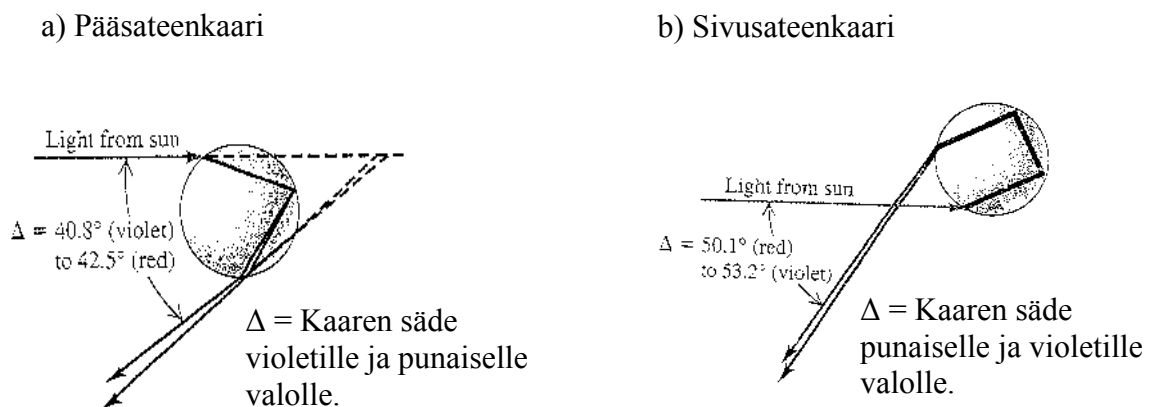
Kuva 2. Mie-teorian sirontakuviot erikokoisille pallonmuotoisille hiukkasille, kun valon aallonpituus pidetään vakiona. (Karttunen et al., 1997)

2. Yleistä

2.1 Sateenkaaren synty

Sateenkaari syntyy, kun valonsäteet taittuvat ja heijastuvat vesipisarassa. Kuvassa 3 a) on esitetty, miten valonsäde käyttäytyy osuessaan vesipisaraan. Valonsäde taittuu ensin kohdatessaan vesipisaran pinnan ja heijastuu sen jälkeen pisaran takaosasta. Tämän jälkeen valon säde taittuu vielä kerran tullessaan uudestaan pisaran pinnalle. Sivusateenkaari syntyy

pääsateenkaaren ulkopuolelle vastaavalla tavalla, mutta silloin valonsäde heijastuu kaksi kertaa pisaran sisällä ennen uudestaan taittumista (kuva 3 b) (Grimvall, 1993). Toinen heijastuminen johtuu siitä, että valonsäde osuu heijastuessaan aivan vesipisaran reunaan (Karttunen et al., 1997). Suurin osa vesipisaraan tulevasta valosta menee kuitenkin heijastumatta läpi pisarasta. Tämä johtuu siitä, että vesi on läpikuultava väliaine. Tästä syystä sateenkaari on aika heikko ja sitä voidaan katsoa suoraan ilman mitään suojalaseja. (Naylor, 2002)



Kuva 3. Valon taittuminen ja heijastuminen vesipisaroissa sekä sateenkaaren kaarevuussäteen muutos eri aallonpituuksilla. (Freeman and Young, 2004)

2.2 Havainnointi

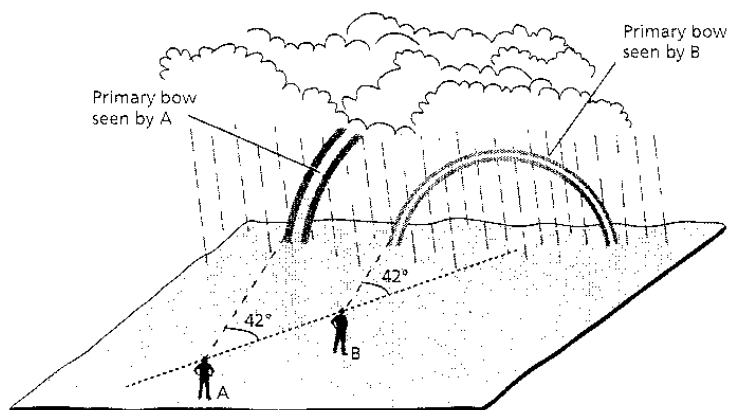
Sateenkaaria syntyy taivaalle paljon useammin kuin luullaan, vaikkakin ne ovat aika harvinaisia. Niiden havaitseminen on aika haasteellista, koska pitää tietää mihin päin ja millaisella ilmalla niitä kannattaa tarkkailla. Sateenkaaren syntymisen ennustaminen ei olekaan koskaan täysin varmaa, koska sääolot voivat vaihdella nopeasti. (Naylor, 2002)

Sateenkaaria nähdään yleensä kesäisin sateen jälkeen, mutta niiden näkeminen talvellakaan ei ole mahdotonta. Sateenkaaren syntymiseen tarvitaan kuitenkin vesipisaroita, jotka ovat tavallisesti kilometrin tai kahden päässä katsojasta. Auringon tulee myös paistaa havaitsijan takaa, jotta sateenkaaren voi havaita (Minneart, 1987). Sateenkaaren havaitsemisen mahdollisuus paranee, kun aurinko on lähellä horisonttia ja sadealue taivaalla on riittävän laaja kaaren syntymiselle. Myös havaitsijan ollessa noin parin sadan metrin päässä sateesta kaaren näkemisen mahdollisuus kasvaa. Sadealueen täytyy olla vähintään sateenkaaren levyinen, jotta koko kaari pystyisi syntymään (Naylor, 2002). Sateenkaari näyttää aina olevan havaitsijasta äärettömän kaukana riippumatta vesipisaroiden paikasta. Tämä johtuu siitä, että sateenkaari käyttäytyy kuten äärettömän kaukana oleva kohde, vaikka sateenkaari syntyisikin ihan havaitsijan viereen. Kaari on siis optisesti äärettömyydessä eli voidaan myös sanoa, että sateenkaarella on pysyvä kulmakoko. Sateenkaaren kokokin on aina yhtä suuri, on se sitten muodostunut vesisuihkuun tai taivaalle. Se vain vaikuttaa pienemmältä vesisuihkussa kuin taivaalla näkyvä ``suuri`` kaari. Tämä johtuu siitä, että sateenkaari vaikuttaa olevan lähempänä vieressä olevassa vesisuihkussa ja se vääristää myös kaaren kokoa (Fraser and Lee, 2001). Pääsateenkaaren vierellä voidaan taivaalla havaita myös sivusateenkaari ja interferenssikaaria (Minneart, 1987).

Sateenkaari on itse asiassa suljettu ympyrä, mutta emme voi nähdä sen toista puolta horisontin alapuolelta. Koko ympyrän voi havaita lentokoneesta, jos koneen varjo on ympyrän keskipisteessä (Minneart, 1987). Myös esimerkiksi korkealta vuorelta voi nähdä koko sateenkaaren, mutta tällöin sadealueen täytyy olla lähellä havaitsijaa. Mitä korkeammalle aurinko nousee, sitä lähemmäksi sadetta havaitsijan täytyy mennä. Auringon ollessa lähellä horisonttia havaitsijan täytyy myös olla matalammalla maanpinnasta kuin on hänen etäisyytensä sateeseen. Sateenkaari ei myöskään ole littana vaan se on kolmiulotteinen kartio, jota emme pysty kuitenkaan havaitsemaan (Naylor, 2002). Emme myöskään pysty ikinä näkemään sateenkaarta sivusuunnassa (Fraser and Lee, 2001).

Sateenkaarenpäättä ei voida löytää, koska se ei ole missään tietyssä paikassa vaan se on tietystä suunnasta tulevaa valoa. Lisäksi havaitsijan siirtyessä myös sateenkaari siirtyy. Tästä johtuen kaksi vierekkäin seisovaa ihmistä näkevät eri sateenkaaren, vaikka ero onkin hyvin pieni (Grimvall, 1993). Jos havaitsijat ovat kauempana toisistaan heidän näkemänsä sateenkaaret voivat poiketa toisistaan huomattavastikin. Esimerkiksi kuvasta 4 nähdään, että

henkilö A näkee kauempana ollessaan leveämmän ja isomman kaaren kuin henkilö B. Voimme nähdä myös joskus yhtä aikaa kaksi sateenkaarta. Näin voi käydä, jos seisoo alle metrin päästä vesisuihkusta. Tällöin silmät näkevät eri pisaroista muodostuvat kaaret ja jos sulkee toisen silmänsä, toinen sateenkaari katoaa kokonaan näkyvistä (Naylor, 2002). Sateenkaari siis seuraa havaitsijaa, kuten hänen varjonsa. Ehkäpä juuri tästä syystä useissa kulttuureissa sateenkaarta onkin pelätty. Sateenkaaren päässä mahdollisesti olevaa kultaarrettakaan ei voi näin ollen saavuttaa. (Fraser and Lee, 2001)



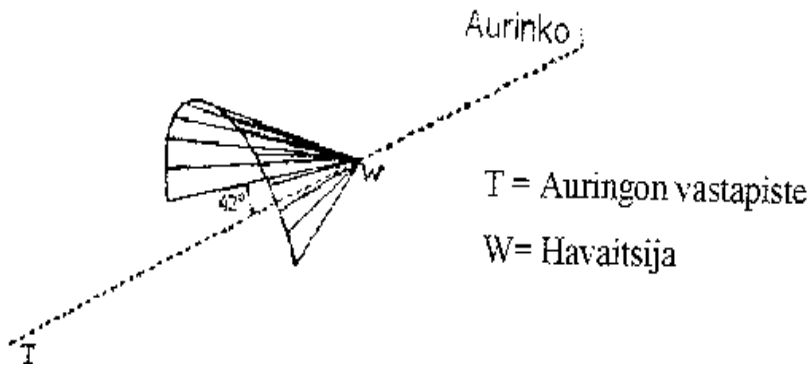
Kuva 4. Jokainen havaitsija näkee omanlaisensa sateenkaaren. (Naylor, 2002)

3. Pää- ja sivusateenkaari

3.1 Sateenkaaren kuvaus

Sateenkaaren keskipiste on akselilla, joka kulkee auringosta havaitsijan pään läpi horisonttiin auringon vastapisteeseen (kuva 5). Havaitsijan silmään tulevat valonsäteet muodostavat kartiopinnan akselille ja kukin niistä muodostaa akselin kanssa noin 42° kulman. Tätä kutsutaan sateenkaaren säteeksi (Minneart, 1987). Kulma vaihtelee hieman eri aallonpituuksilla (kuva 3a) (Freedman and Young, 2004). Valonsäteiden sirontakulma on tällöin

noin 138° (Adam, 2002). Veden taitekertoimen kasvaessa sateenkaaren säde pienenee. Esimerkiksi suolaisen veden synnyttämän sateenkaaren säde on normaalia sädettä 1° pienempi. (Minneart, 1987)



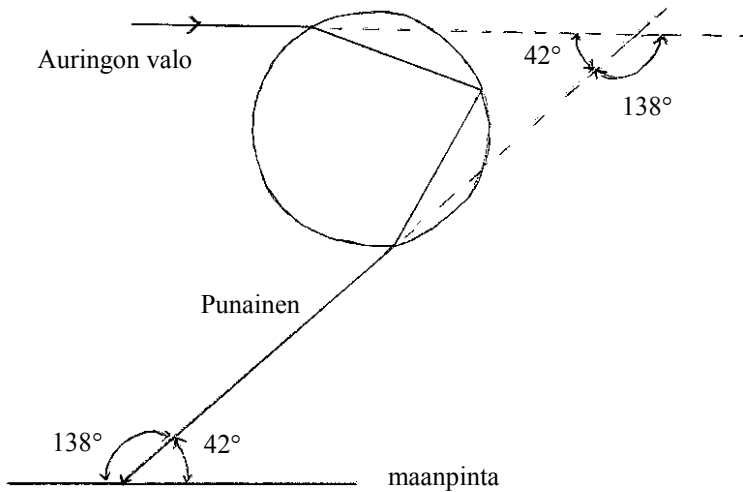
Kuva 5. Suunta, jossa havaitsemme sateenkaaren, verrattuna auringon suuntaan. (Minneart, 1987)

Sivusateenkaari näkyy melkein aina pääsateenkaaren esiintyessä vaikkakin paljon heikompana. Sivusateenkaaren keskipiste on sama kuin pääsateenkaarellakin, mutta sen säde on noin 51° (kuva 3b) (Minneart, 1987). Tällöin valonsäteiden sirontakulma on 129° (Adam, 2002).

Auringon korkeus vaikuttaa sateenkaaren paikkaan. Auringon noustessa sen vastapiste ja samoin koko sateenkaari laskee alaspäin. Näin ollen, auringon korkeuden ollessa yli 42° katoaa sateenkaari näkyvistä horisontin alapuolelle. Tästä johtuen sateenkaarta ei Suomessa havaita keskellä kesäpäivää (Minneart, 1987). Auringon korkeuden voi hyvin arvioida oman varjon avulla. Auringon ollessa yli 45° horisontin yläpuolella, havaittajan varjon pituus on tällöin yhtä pitkä kuin hänen pituutensa. Sateenkaaria voi siis havaita, kun varjon pituus on pitempi kuin havaittaja itse. Pilvien korkeuskin vaikuttaa siihen kuinka kaukaa voidaan havaita kokonainen sateenkaari. Esimerkiksi, jos pilvet ovat 300 m maanpinnan yläpuolella ja aurinko 15° horisontin yläpuolella niin havaittaja ei saa olla 600 m kauempana saderintamasta nähdäkseen koko kaaren. (Naylor, 2002)

3.2 Sateenkaaren polarisaatio

Sateenkaaren valo on polarisoitunutta vaikkakaan auringon valo ei ole. Tämä johtuu siitä, että sateenkaari on muodostunut heijastuneesta valosta (Naylor, 2002). Polarisoitumisella tarkoitetaan sitä, että sateenkaaren valolla on etenemissuuntaan vastaan kohtisuorassa tasossa erilaisia ominaisuuksia eri suunnissa (Minneart, 1987). Valo koostuu siis sähkö- ja magneettikentästä, jotka värähtelevät kohtisuorassa toisiaan vastaan. Sähkökenttä värähtelee polarisaatiotasossa ja magneettikenttä sitä vastaan kohtisuorassa. Sähkökentän suunta määrää valon polarisaatiosuunnan. Magneettikenttä ei sitä vastoin vaikuta valon polarisaatioon (Lehto ja Luoma, 1998). Valon polaarisuuden voi havaita katsomalla sateenkaarta polarisoivien lasien läpi. Kun lasia kiertää, sateenkaaren kirkkaudessa voidaan huomata muutoksia (Minneart, 1987). Sateenkaari on polarisoitunut tangentialisesti kaareen nähden, joten polarisaatio taso seuraa sateenkaaren kaarta (Naylor, 2002). Pääsateenkaaren valo voi olla jopa 90 % polarisoitunutta ja sivusateenkaaren 50 %. Vaikka sateenkaarta ei enää voi havaita taivaalla, kaaren polarisaatio voi silti olla vielä merkittävää. Tämä pätee varsinkin sivusateenkaarelle (Lynch and Schwartz, 1991). Sateenkaaren huomattava polarisoituminen johtuu siitä, että vähiten poikkeava säteen heijastuskulma on lähellä veden Brewster kulmaa (Naylor, 2002). Brewsterin kulmalla tarkoitetaan sitä, että heijastunut ja taittunut säde muodostavat 90° kulman toistensa suhteen. Tosin sanoen sirontakulma ja sateenkaaren säde muodostavat yhdessä noin 180° kulman (kuva 6). (Alanko, 2005)



Kuva 6. Vähiten poikkeava säde muodostaa sirontakulman kanssa lähes Brewsterin kulman. (Fraser and Lee:n mukainen, 2001)

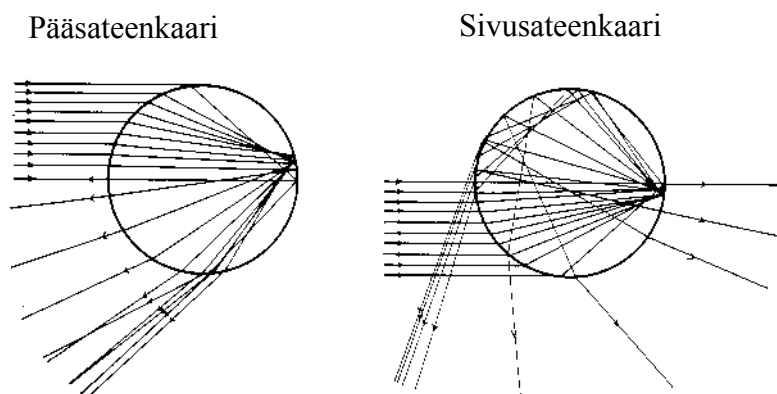
3.3 Sateenkaaren värit

Sateenkaaren värit syntyvät valosäteiden taittuessa vesipisarassa. Valon taittuminen riippuu vesipisaran taitekertoimesta sekä valon aallonpituudesta. Taitekertoimen aallonpituusriippuvuus eli dispersio aiheuttaa sen, että eri aallonpituudet taittuvat väliaineessa eri tavoin. Mitä pienempi on aallonpituus, sitä enemmän valosäteet taittuvat (Karttunen et al., 1997). Tämä johtuu siitä, että valoallon taajuus on sitä suurempi, mitä pienempi on sen aallonpituus. Kun valoalto kohtaa ilma-vesi rajapinnan, elektronit eivät voi enää värähdellä yhtä nopeasti kuin aalto. Tämän seurauksena aallon nopeus hidastuu, mutta sen taajuus pysyy muuttumattomana (Fraser and Lee, 2001). Taulukossa 1 on esitetty näkyvän valon värien aallonpituudet, jotka määräävät värien järjestyksen sateenkaareissa. Pääsateenkaaren värit ovat siis aina järjestäytyneet niin, että punainen on kaaren ulkoreunalla ja violetti sisäreunalla. Auringon pinnan eri pisteistä tulevat valonsäteet aiheuttavat kaikki oman sateenkaarensa. Sateenkaari syntyy siis erivärisistä sisäkkäisistä kaarista, koska aurinko ei ole pistemäinen valon lähde. Tällöin kaaret menevät osittain päällekkäin ja näin ollen värit sekoittuvat rajapinnoilla. Tästä syystä voimme havaita yhtenäisen kaaren. (Karttunen et al., 1997)

Taulukko 1. Näkyvän valon aallonpituudet. (Kervinen et al., 1998)

Väri	Aallonpituus nm (nm=10 ⁻⁹ m)
violetti	380...450
sininen	450...490
vihreä	490...560
keltainen	560...590
oranssi	590...630
punainen	630...760

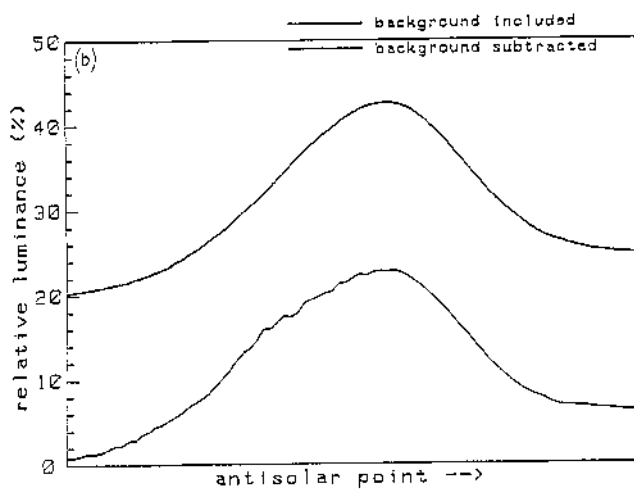
Sivusateenkaaren värit ovat kuitenkin päinvastaiset kuin pääsateenkaarella. Tämä on osaksi seurausta siitä, että valonsäteet heijastuvat kaksi kertaa vesipisaran sisällä. Silloin myös osa valonsäteistä pääsee taittumaan ulos pisarasta aikaisemmin ja tästä syystä sivusateenkaari on selvästi himmeämpi kuin pääsateenkaari (Karttunen et al., 1997). Himmeys johtuu kuitenkin suurimmalta osin siitä, että sivusateenkaari on leveämpi kuin pääsateenkaari. Sivusateenkaarella säteet heijastuvat 0°-130° kulmavälille, kun taas pääsateenkaaren säteet heijastuvat vain 138°-180° kulmavälille (kuva 7) (Kaila et al., 1982). Pääsateenkaari on teoriassa noin 1.8 kertaa kirkkaampi kuin sivusateenkaari (Fraser and Lee, 2001).



Kuva 7. Sivusateenkaari on leveämpi kuin pääsateenkaari, suuremman kulmavälän takia. (Kaila et al., 1982)

Sateenkaaren väreihin aiheuttaa muutosta useammat tekijät. Sadekuuron horisontaalinen syvyys vaikuttaa värien kirkkauteen. Mitä paksumpi on sadealue, sitä kirkkaammat ovat sateenkaaren värit. Myös sadepisaroiden koko vaikuttaa sateenkaaren väreihin sekä pisaroiden poikkeaminen pallonmuodostaan pudotessaan. Ilmakehän erilaiset hiukkaset voivat myös värjätä sateenkaarta punaisemmaksi, koska ne punertavat auringon valoa. (Fraser and Lee, 2001)

Luonnossa esiintyvien sateenkaarien värit ovat aina heikentyneitä ja sisältävät paljon valkoista valoa. Aina kun sateenkaarta katsoo taivaalta, ei näe pelkästään sateenkaaren värejä, vaan myös sen takana olevan taivaan värit (Lee, 1991). Kuvassa 8 on esitetty kuinka paljon taivaan valo vaikuttaa erään sateenkaaren valotiheyteen. Ero valontiheyksissä on noin 20 % luokkaa eli aika suuri. Tämä värien sekoittuminen johtuu siitä, että sateenkaaren valo ei voi interferoida takana olevan taivaan valon kanssa (Fraser and Lee, 2001). Luonnon sateenkaarien alhainen valotiheys tuottaa pastellin värejä, jotka kuitenkin sekoittuvat taustalla olevaan taivaan valoon (Lee, 1991).

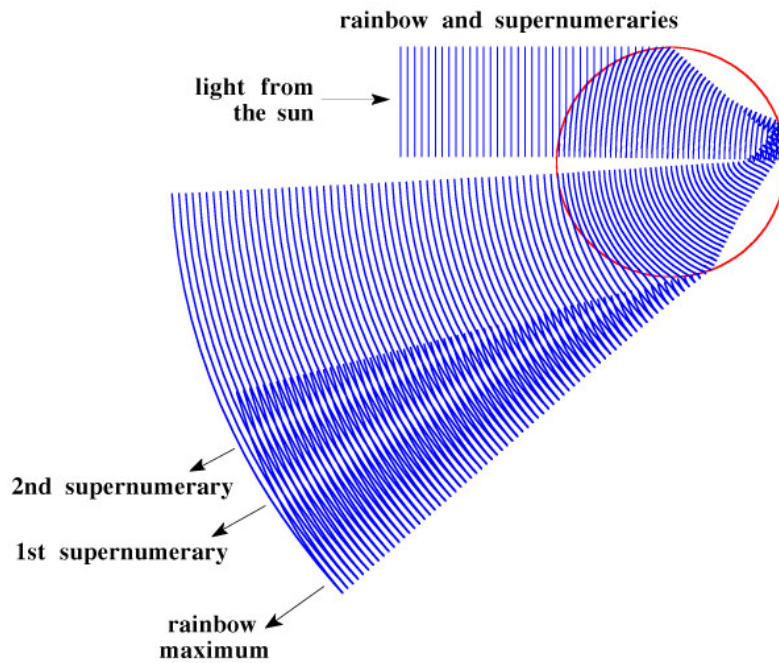


Kuva 8. Erään sateenkaaren valotiheys, kun taivaan valo on otettu mukaan (ylempi) ja kun se on poistettu (alempi). (Fraser and Lee, 2001)

Sateenkaarissa havaitaan joskus myös valkeita juovia. Nämä juovat muodostuvat, kun auringon ja sadekuuron väliin jää yksittäisiä pilviä. Pisarat, jotka jäävät pilven taakse, eivät enää säteile valoa havaitsijaa kohti. Näin ollen havaitsijan näkemästä pää- ja sivusateenkaaresta puuttuu pisaroita ja näin syntyy säteen kaltaisia varjoja (Minneart, 1987). Varjot osoittavat aina kohti sateenkaaren keskipistettä. Tämä johtuu siitä, että auringon valo on yhdensuuntaista ja sen kulmahalkaisija on vain puoli astetta. (Fraser and Lee, 2001)

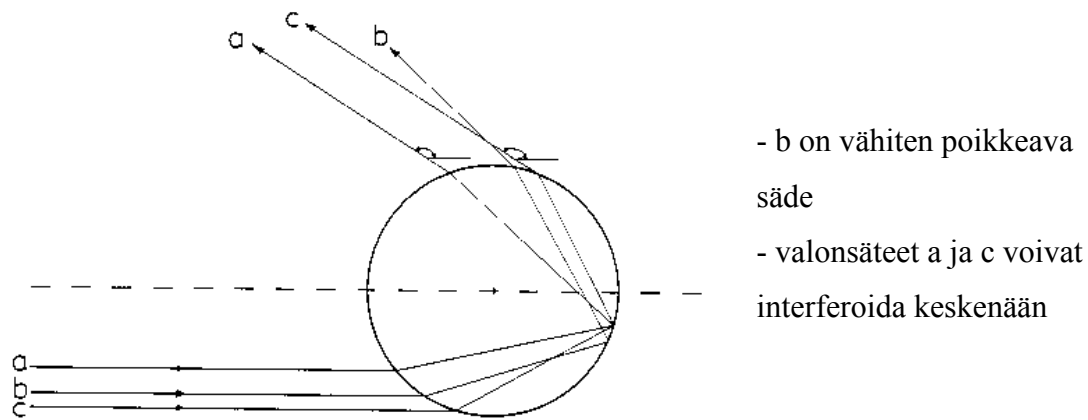
3.4 Interferenssikaaret

Interferenssikaaret johtuvat, nimensäkin mukaan, interferenssi-ilmiöstä. Interferenssillä tarkoitetaan sitä, että samassa vaiheessa olevat aallot vahvistavat toisiaan ja vastakkaisissa vaiheessa olevat aallot heikentävät toisiaan (Lehto ja Luoma, 1994). Interferenssikuviota sateenkaarelle havainnollistetaan moiren mallilla, joka on esitetty kuvassa 9 (Fraser and Lee, 2001). Interferenssikaaria havaitaan sekä pääsateenkaaren sisäpuolella että sivusateenkaaren ulkopuolella. Sivusateenkaaren interferenssikaaret ovat kuitenkin paljon heikompia ja vaikeammin havaittavia (Mäkelä, 1990). Niitä ei ole tietävästi havaittu sadekuuroissa, mutta keinotekoisissa vesisuihkuissa niitä on nähty ulkonakin. Näissä sivusateenkaaren interferenssikaarissa punainen väri on hallitsevin ja sen takia niiden havaitsemista helpottaa, jos niitä katsoo punaisten lasien läpi. (Fraser and Lee, 2001)



Kuva 9. Moiren malli interferenssikuvioille. (Fraser and Lee, 2001)

Valonsäteiden kulkua tarkasteltaessa aaltoliikkeenä vesipisarassa nähdään kuvasta 10, että vähiten poikkeavan säteen eri puolilla olevat säteet tulevat pisaraan samansuuntaisina, mutta kulkevat pisaran sisällä erimittaisen matkan (Mäkelä ja Suvanto, 1988). Vahvistumista tapahtuu, kun säteiden matkaero on kokonaisia aallonpituuksia ja heikennystä tapahtuu, kun matkaero on vastaavasti puoli aallonpituutta. Eri aallonpituuksilla maksimit sattuvat eri kohtiin, joten interferenssikaaret ovat erivärisiä (Mäkelä, 1990). Interferenssikaaret syntyvät siis yhden ainoan valoallon eri osuuksien interferoidessa. Valoaallot voivat interferoida vain paikallisesti kohdatessaan, koska ne eivät voi estää toisiaan eikä interferenssikuvio voi myöskään synnyttää varjoa. (Fraser and Lee, 2001)



Kuva 10. Vähiten poikkeavan säteen b viereen taittavat valonsäteet a ja b voivat vahvistaa tai heikentää toisiaan tietyillä matkaeroilla. (Kaila et al., 1982)

Interferenssikaarien näkyvyyteen vaikuttaa vesipisaran koko, muoto ja levittäytyminen sekä valon koherentisuus (Lynch and Schwartz, 1991). Interferenssikaaret näkyvätkin selvimmin lakipisteissään. Tämä johtuneen siitä, että vesipisarat pudotessaan poikkeavat pallonmuodostaan tai ne alkavat värähdellä ja silloin sateenkaari himmenee (Minneart, 1987). Interferenssikaaret ovat aika harvinainen näky ja yleensä näkyvissä onkin vain pääsateenkaaren ensimmäinen interferenssikaari (Fraser and Lee, 2001).

3.5 Sateenkaaren sisäosa ja Aleksanterin tumma vyö

Sateenkaaren sisäosa on muuta taivasta vaaleampi (kuva 11). Tämä johtuu siitä, että kaaren sisäpuolelta siroaa vesipisaroista jonkin verran valoa havaitsijan silmään toisin kuin kaaren ulkopuolelta (Karttunen et al. , 1997). Tämä valo ei kuitenkaan ole yhtä voimakasta kuin sateenkaaren valo ja se koostuu usean värin sekoituksesta. Sama ilmiö voidaan havaita sivusateenkaaren ulkopuolella, mutta se ei ole yhtä selvästi havaittavissa (Adam, 2002). Tämä taivaan vaaleus ei aina ole kuitenkaan selvästi nähtävissä. Tämä voi johtua useammasta syystä: sadealueella on rajoitettu syvyys, takana olevan taivaan valotiheys ei ole aina homogeeninen tai sumu voi vaimentaa valonsäteitä. Nämä aiheuttavat sen, että havaitsija ei näe sateenkaaren luontaista kirkkautta vaan sateenkaaren ja taivaan kirkkauden eron. (Lee, 1991)



Kuva 11. Sateenkaaren sisäosa on vaaleampi kuin muu taivas. Pää- ja sivusateenkaaren väliin jäävä alue on tummempi kuin muu taivas. (Leponiemi, 1999)

Pääsateenkaaren ja sivusateenkaaren väliin jäävä taivas on muuta taivasta tummempi (kuva 11). Tätä aluetta kutsutaan Aleksanterin tummaksi vyöksi, joka on nimetty Alexander Afrodisiaslaisen mukaan (Mäkelä ja Suvanto, 1988). Tumman vyön leveys on aina noin $9,5^\circ$ (Lynch and Schwartz, 1991). Vyön tummuus on seurausta siitä, että pisaroista silmään heijastuva valo tulee pääsateenkaaren sisäpuolelta ja sivusateenkaaren ulkopuolelta. Näin ollen väliin jäävän alueen pisaroista ei heijastu havaitsijan silmään juuri ollenkaan valoa (Grimvall, 1993). Vain vesipisaroiden pinnasta heijastuu valoa havaitsijaan päin (Adam, 2002). Alueella näkyy kuitenkin takana olevan taivaan valoa. Aleksanterin tumma vyö ei aina näy kovin selvästi, koska sivusateenkaari on usein hyvin vaatimaton ja siitä syystä eroa taivaan kirkkauteen ei juuri huomaa. (Grimvall, 1993)

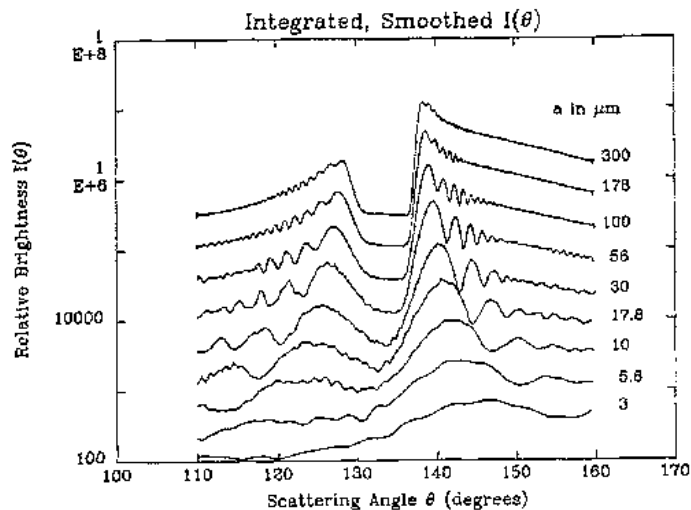
3.6 Vesipisaran koon vaikutus sateenkaareen

Vesipisaran koko vaikuttaa sateenkaaren väreihin ja kirkkauteen, kuten taulukosta 2 nähdään. Tämä johtuu siitä, että valon sironta suuntautuu sitä enemmän suoraan eteenpäin mitä isompi pisara on (Karttunen et al., 1997). Mitä suurempi vesipisaran halkaisija on, sitä kirkkaampi sateenkaari (kuva 12). Sateenkaaren alaosa onkin usein kirkkaampi kuin muu osa kaaresta, koska vesipisarot kasvavat pudotessaan (Mäkelä ja Suvanto, 1988). Vesipisaroiden ollessa

suuria punainen näkyy parhaiten ja sinistä ei näy juuri ollenkaan (Karttunen et al., 1997). Silloin sateenkaaren värit eivät mene juuri ollenkaan päällekkäin ja tästä syystä kaaren värit ovatkin puhtaimmillaan (Fraser and Lee, 2001). Vesipisaroiden kasvaessa myös Aleksanterin tumman vyön muoto muuttuu tasapohjaisesta u-muotoiseksi (kuva 12) (Lynch and Schwartz, 1991).

Taulukko 2. Vesipisaran koon vaikutus sateenkaaren pääpiirteisiin. (Minneart, 1987)

Pisaran halkaisija	Sateenkaaren pääpiirteet
1-2 mm	Hyvin kirkas violetinpunainen ja heleän vihreä. Kaarella on puhtaan punaista, mutta tuskin ollenkaan sinistä. Interferenssikaaria on runsaasti, ne ovat vuoroin violetinpunaisia ja vihreitä, ja ne liittyvät ilman rajaa pääsateenkaareen.
0,50 mm	Punainen on jo paljon himmeämpi. Vähemmän interferenssikaaria, joissa vuorottelee edelleen violetinpunainen ja vihreä.
0,20–0,30 mm	Punaista ei enää ole; muutoin kaari leveä ja hyvin kehittynyt. Interferenssikaaret muuttuvat keltaisemmiksi. Jos interferenssikaarten välissä on aukko, pisaroiden läpimitta on 0,20 mm. Jos pääsateenkaaren ja ensimmäisen interferenssikaaren välissä on aukko, pisarat ovat läpimitaltaan alle 0,20 mm.
0,08–0,1 mm	Kaari on yhä leveämpi ja vaaleampi, vain violetti on kirkas. Ensimmäinen interferenssikaari on huomattavasti erossa pääsateenkaaresta ja interferenssikaarella on selviä valkeita sävyjä.
0,06 mm	Pääsateenkaarella on selvä valkea nauha.
alle 0,05 mm	Valkea sateenkaari.



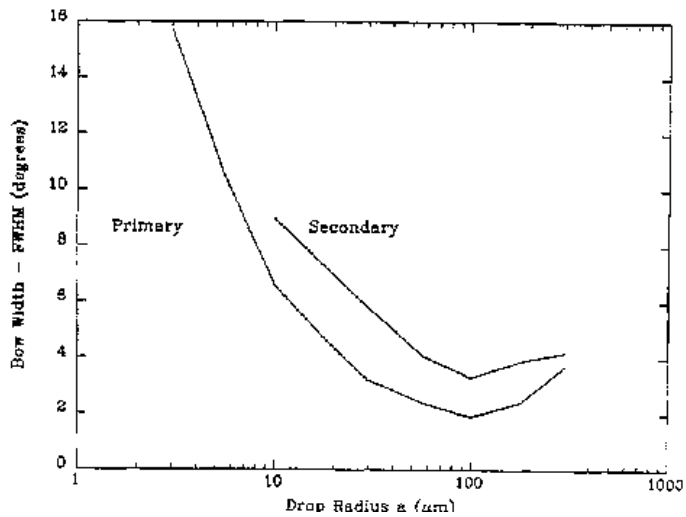
a = Vesipisaran halkaisija (μm)

θ = Sirontakulma (asteina)

$I(\theta)$ = Kirkkaus ($\text{W}/(\text{cm}^2\text{sr}^{-1})$)

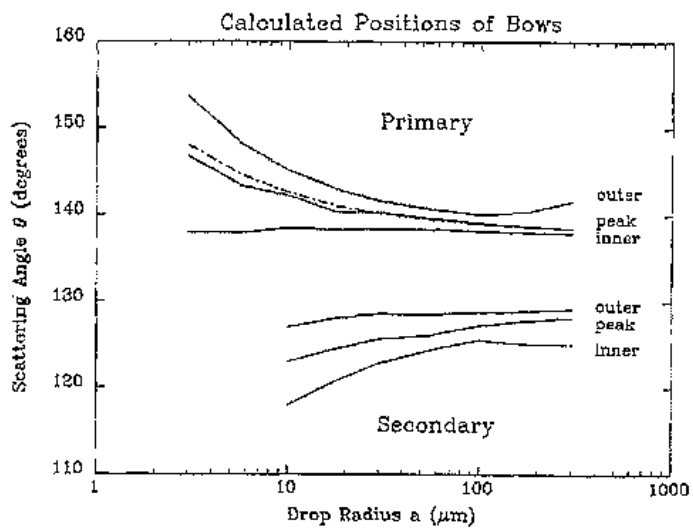
Kuva 12. Pää- ja sivusateenkaaren sekä Aleksanterin tumman vyön ominaisuuksien riippuvuus vesipisaran koosta. (Lynch and Schwartz, 1991)

Sateenkaaren leveys sitä vastoin kasvaa, kun pisaran koko pienenee (kuva 13). Tämä johtuu siitä, että sirontaa tapahtuu tällöin suuremmalle alueelle (Karttunen et al., 1997). Aleksanterin tumman vyön leveys sitä vastoin pysyy lähes vakiona (kuva 14). Tästä voidaankin päätellä, että pää- ja sivusateenkaari levenee poispäin tummasta vyöstä. Pää- ja sivusateenkaari on kapeimmillaan kun pisaran halkaisija on $100 \mu\text{m}$ (kuva 13). Kapein kohta on seurausta siitä, että suuremmilla pisaroilla interferenssikaarien valo sekoittuu sateenkaaren valoon ja sateenkaari vaikuttaa leveämmältä. Pienemmillä vesipisaroilla sitä vastoin sateenkaari levenee, koska se voi saada energiaa myös nollannen kertaluvun interferenssikaarelta (Lynch and Schwartz, 1991). Sateenkaaria tarkkailemalla voidaankin päätellä minkä kokoisia vesipisaroita sadekuuroissa on ja näin ollen arvioida kuinka paljon alueella sataa (Grimvall, 1993).



a = Vesipisaran halkaisija (μm)
 FWHM = Sateenkaaren leveys
 (asteina)

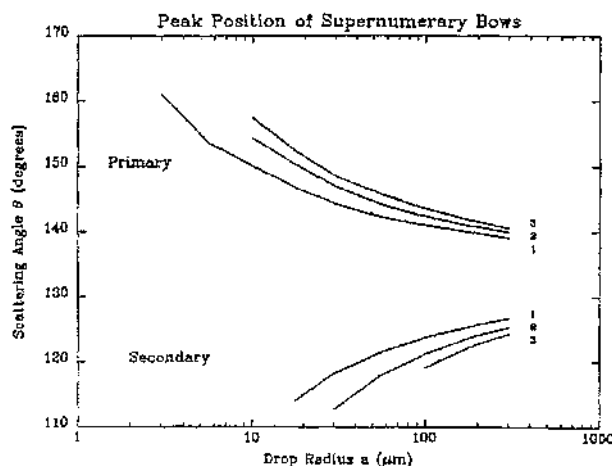
Kuva 13. Pää- ja sivusateenkaaren leveys verrattuna vesipisaran kokoon. (Lynch and Schwartz, 1991)



a = Vesipisaran halkaisija (μm)
 θ = Sirontakulma (asteina)

Kuva 14. Aleksanterin tumman vyön leveys pysyy lähes vakiona, vaikka sadepisaran koko kasvaa. Pää- ja sivusateenkaari levenee siis pois päin tummasta vyöstä. (Lynch and Schwartz, 1991)

Pisarakoon ollessa suurimmillaan myös interferenssikaaria on eniten (kuva 12). Ne ovat liittyneet pääkaareen ilman rajaa ja ovat väriltään violetinpunaisia sekä vihreitä. Kuvassa 15 on esitetty kolmen ensimmäisen interferenssikaaren paikat vesipisaroiden koon pienentyessä. Pisarakoon pienentyessä interferenssikaaret siirtyvät kauemmaksi pääsateenkaaresta ja niiden määrä vähenee. Niiden väri muuttuu myös ensin keltaisemmiksi ja lopulta niissä on selviä valkeita sävyjä. Nämä muutokset johtuvat siitä, että vesipisaran koko vaikuttaa sen läpi kulkevien valonsäteiden matkaeroon sekä vaihe-eroon (Mäkelä ja Suvanto, 1988). Pääsateenkaaren interferenssikaaret saavuttavat maksiminäkyvyytensä pisaran halkaisijan ollessa 30–56 μm . Tämä on seurausta siitä, että pisarakoon ollessa suurempi interferenssikaarien etäisyys toisistaan on huomattavasti pienempi kuin auringon $0,5^\circ$ halkaisija ja kaarien amplitudi on pienentynyt todella paljon. Pienemmillä pisaroilla sitä vastoin kaaret levenevät jo niin paljon, että niiden näkyvyys huononee (Lynch and Schwartz, 1991).



a = Vesipisaran halkaisija (μm)

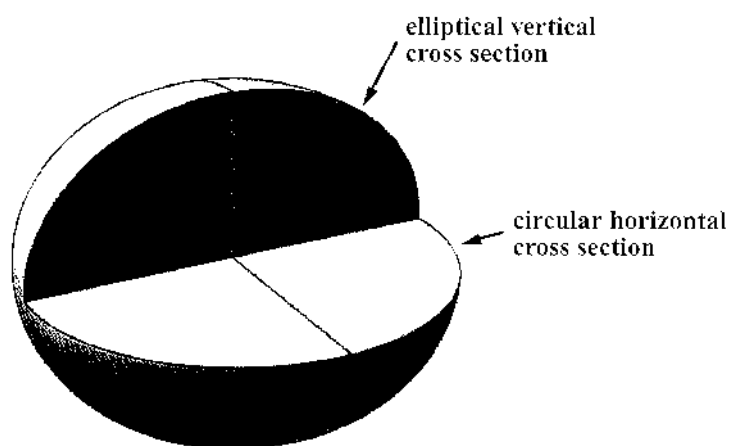
θ = Sirontakulma (asteina)

1,2,3 = Interferenssikaaria

Kuva 15. Interferenssikaarien paikat vesipisaroiden koon kasvaessa. (Lynch and Schwartz, 1991)

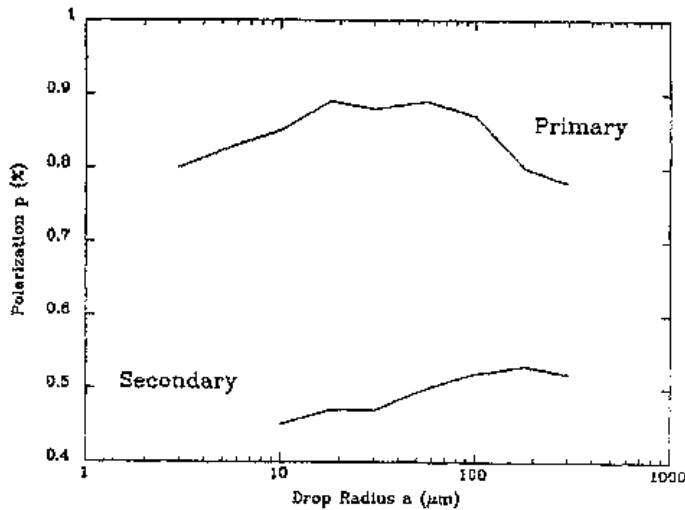
Sadekuuroissa voi vesipisaroiden koko vaihdella. Kun pienet vesipisarat pysyvät pudotessaan pallonmuotoisina, alkavat isot pisarat litistyä. Tällöin isojen pisaroiden muoto pystysuoraan ei ole enää pallonmuotoinen vaikkakin horisontin suuntaisesti se voi edelleen olla (kuva 16). Litistyneestä kohdasta menevä valonsäde poikkeaa enemmän kuin pallonmuotoisesta ja tästä johtuen sateenkaaren kaarevuuden pitäisi vaihdella. Näin ei kuitenkaan käy, koska pienemmät pisarat nostavat sateenkaaren kaarevuuden vakioksi. Erikokoisten vesipisaroiden pitäisi

vaikuttaa myös interferenssikaariin. Tällöin erikokoisista pisaroista syntyvien interferenssikaarien pitäisi peittää toisensa ja näin ollen niitä ei pitäisi näkyä ollenkaan. Interferenssikaaria syntyy vain silloin, kun vesipisarot ovat samaa kokoa. Näin ei kuitenkaan ole ja yksi selitys tälle voisi olla se, että interferenssikaaret syntyvät pienistä vesipisaroista. Tästä johtuen interferenssikaaria ei useinkaan nähdä sateenkaaren alaosissa. Myös, jos vesipisaroiden koko vaihtelee sadekuurossa, interferenssikaarien leveys voi vaihdella ja ne näkyvät vain aika ajoin pääsateenkaaren eliniän aikana. (Naylor, 2002)



Kuva 16. Litistyneen vesipisaran muoto voi olla ympyrä horisontin suunnassa ja pystysuorassa ellipsin muotoinen. (Fraser and Lee, 2001)

Vesipisaran koko vaikuttaa myös sateenkaaren valon polarisaatioon. Kuvassa 17 on esitetty sateenkaaren valon polarisaation muutos vesipisaran koon kasvaessa. Pää- ja sivusateenkaari saavuttavat maksimi polarisaationsa, kun pisaran halkaisija on 20 μm ja 100 μm välillä. (Lynch and Schwartz, 1991)



a = Vesipisaran halkaisija (μm)
 p = Polarisaatio (%)

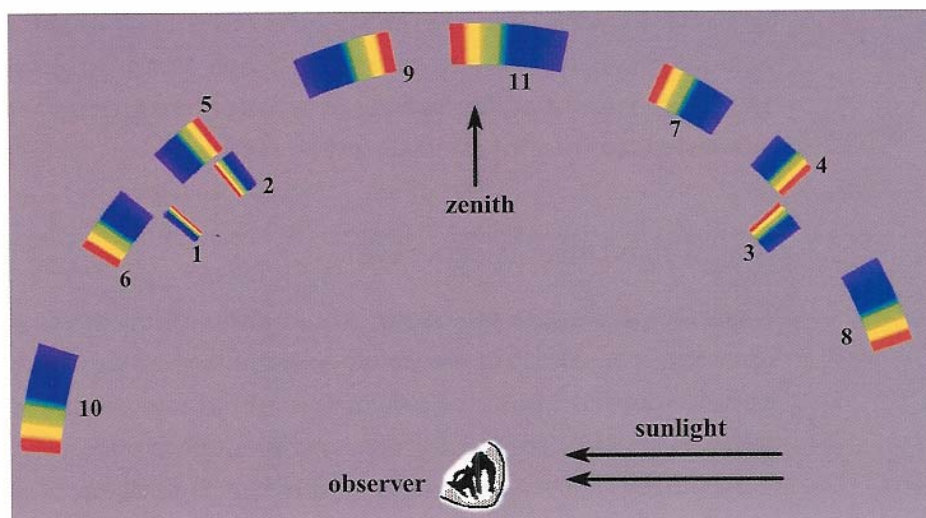
Kuva 17. Pää- ja sivusateenkaaren maksimi polarisaation muutos vesipisaran koon suurenessa. (Lynch and Schwartz, 1991)

4. Useamman kertaluvun sateenkaaret

Kolmannen ja sitä useammankin kertaluvun sateenkaaren muodostuminen on mahdollista. Kolmas ja neljäs sateenkaari muodostuvatkin yllättäen auringon puolelle. Kolmas sateenkaari muodostuu, kun valo taittuu kahdesti ja heijastuu kolmesti vesipisarassa. Neljäs sateenkaari muodostuu samoin, mutta tällöin heijastuminen tapahtuu neljästi. Kolmannen kaaren värit ovat järjestäytyneet niin, että violetti on sisäreunalla ja neljännen kaaren värit ovat päinvastoin (Mäkelä ja Suvanto, 1988). Teoreettisesti on laskettu, että kolmannen sateenkaaren säde olisi noin 40° (Naylor, 2002). Sen kirkkauden on laskettu olevan jopa 3,5 kertaa pienempi kuin pääsateenkaaren ja noin puolet pienempi kuin sivusateenkaaren (Fraser and Lee, 2001). Näitä sateenkaaria on kuitenkin todella vaikea havaita auringon kirkkauden takia (Mäkelä ja Suvanto, 1988).

Kolmannelta sateenkaaresta on tullut ilmoituksia, että niitä olisi havaittu, mutta virallisesti niiden näkemistä luonnossa ei ole vielä pystytty todistamaan. Uskottavimmat havainnot ovat parilta viime vuosisadalta. Neljännestä kaarestakin on havaintoja, mutta ne ovat erittäin harvinaisia ja ne eivät myöskään ole luotettavia. Usein kolmanneksi sateenkaareksi luullaan haloja ja auringon gloorioita, jotka syntyvät jääkiteistä auringon ympärille. (Fraser and Lee, 2001)

Laboratorioissa on pystytty synnyttämään useampiakin sateenkaaria. Jearl Walker sai syntymään laboratoriossa laserilla jopa 13 kertaluvun sateenkaaren yhdessä vesipisarassa. Samantapaisella kokeella on onnistuttu myöhemmin luomaan jopa 19 sateenkaarta (Adam, 2002). Kuvassa 18 on esitetty useamman kertaluvun sateenkaarten väritykset, leveydet ja niiden paikat taivaalla. Sateenkaaren väritys on aina päinvastainen edelliseen kaareen verrattuna. Korkeamman kertaluvun sateenkaari on aina myös leveämpi kuin edeltäjänsä. Tämä on seurausta siitä, että vähiten poikkeava säde siirtyy koko ajan lähemmäksi 90° kulmaa. Tällöin sateenkaaren spektri hajaantuu aina vain leveämmälle kulmien vaihteluvälille (Fraser and Lee, 2001). Teoriassa sateenkaaria voi siis muodostua ääretön määrä (Mäkelä ja Suvanto, 1988).



Kuva 18. Useamman kertaluvun sateenkaarten väritykset, leveydet ja niiden paikat taivaalla. (Fraser and Lee, 2001)

Sateenkaari voi muodostua vain, jos vesipisaran sisällä tapahtuu vähintään yksi heijastuminen. Tästä johtuen nollannen kertaluvun sateenkaaren syntyminen on mahdotonta. Valon taittuessa vesipisarassa kahdesti ilman heijastumista synnyttää kyllä spektrin, mutta eri pisaroiden spektrit menevät tällöin päällekkäin. Silloin syntyy pelkästään spektrien värien sekoitusta ja siitähän muodostuukin pelkästään valkoista valoa. Tämä johtuu siitä, ettei heijastuksen puuttuessa ole vähiten poikkeavaa sädetä ja tällöin taivas on täynnä auringon valaisemia pisaroita. (Fraser and Lee, 2001)

5. Erikoisempia sateenkaaria

5.1 Sumusateenkaari

Sumusateenkaari eli valkea sateenkaari syntyy, kun vesipisaran halkaisija on alle 35 μm (Lynch and Schwartz, 1991). Tällöin auringonvalo ei heijastu eikä taitu pisarassa vaan siroaa takaisin kohti havaitsijaa (Dunlop, 2004). Kaari on silloin kaksi kertaa tavallisen sateenkaaren levyinen. Se on valkea nauha, jossa on tavallisesti ulompana oranssia ja sisempänä sinertävää (Minneart, 1987). Sumusateenkaaren valon sirontakulma on myös pari astetta suurempi kuin normaalilla pääsateenkaarella (Lynch and Schwartz, 1991).

Sumusateenkaaren ulkopuolella voidaan havaita sivusateenkaari vain, jos vesipisaran halkaisija on suurempi kuin 10 μm (Lynch and Schwartz, 1991). Sumusateenkaaresta pienen matkan päässä voidaan havaita myös yksi tai kaksi interferenssikaarta, mutta näiden värien järjestys on päinvastainen tavalliseen sateenkaareen verrattuna. Tämä johtuu siitä, että sumusateenkaaren säde ei ole enää 42° vaan se alkaa pienetä, kun vesipisaroiden säteet ovat korkeintaan 0,025 mm. Tämä säteen pieneneminen vaikuttaa voimakkaammin suurimpiin aallonpituuksiin eli enemmän punaisiin kuin sinisiin säteisiin. Silloin interferenssikaarissa punaisen kaaren halkaisija on pienempi kuin sinisen ja järjestys on näin ollen käänteinen. (Minneart, 1987)

Sumusateenkaari voi muodostua myös tavallisista katulamppujen valosta. Tällöin kuitenkin ne ovat himmeitä ja vaativat tumman taustan erottuakseen. Sumusateenkaaria on havaittu myös jopa kovilla pakkasilla. Tämä johtuu siitä, että ilmakehän vesipisarat saattavat olla hyvinkin voimakkaasti alijäähtyneitä. Alijäähtyneellä tarkoitetaan vettä/sumua, joka ei ole jäänytynyt vaikka jäätymispiste on alitettu. (Minneart, 1987)

5.2 Punainen sateenkaari

Punainen sateenkaari syntyy juuri auringon noustessa ja laskiessa, kun kaikki muut sateenkaaren värit ovat häipyneet paitsi punainen (Karttunen et al. , 1997). Tämä johtuu siitä, että auringonlaskun ja nousun aikoihin auringon valo on lähinnä pitkäaaltoista lyhytaaltoisemman valon sirotessa ilmakehään (Dunlop, 2004). Se voi olla hyvinkin kirkas ja jäädä näkyviin jopa kymmeneksi minuutiksi auringon laskettua. Luonnollisesti kaaren alaosa joutuu kuitenkin varjoon ja kaari näkyykin vasta jonkin matkaa horisontin yläpuolelta. (Minneart, 1987)

5.3 Kuusateenkaari

Kuun valo voi synnyttää myös sateenkaaren, mutta yleensä se on hyvin himmeä ja lähes väritön. Kuusateenkaari on kuitenkin heijastuneen auringonvalon synnyttämä, joten siitä löytyy kaikki sateenkaaren värit (Dunlop, 2004). Värejä ei kuitenkaan havaita juuri ollenkaan, koska kuunvalo on kirkkaimmillaankin puoli miljoonaa kertaa heikompi kuin auringon valo. Ihmisen silmät eivät voi havaita värejä valosta, joka on näin heikkoa. (Naylor, 2002)

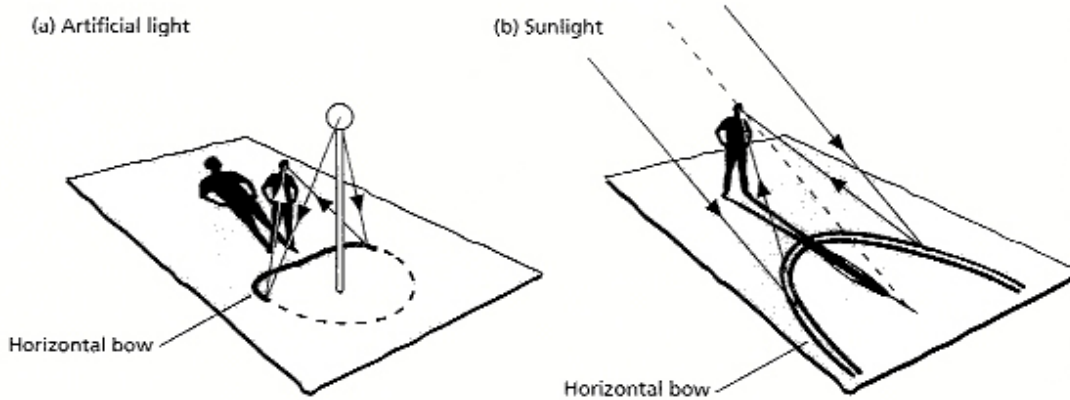
Kuusateenkaari muodostuu miltei yksinomaan täydenkuun aikana ja se syntyy kuun vastakkaiselle puolelle (Minneart, 1987). Kuusateenkaaret ovat hyvin harvinaisia, koska kuunkierron aikana on vain muutama päivä, jolloin kuun kirkkaus on riittävä näkyvän sateenkaaren syntymiseen. Sen lisäksi myös paikalliset sadekuurot lakkaavat usein auringon laskettua. (Naylor, 2002)

5.4 Kasteenkaari

Kasteenkaaria eli vaakasuoria sateenkaaria näkyy eniten syksyisin. Kasteenkaaren on nähty muodostuvan hämähäkinverkkojen sadepisaroihin, nurmikolle, limaskan peittämään lammikkoon, öljyisten lampien pintoihin, joissa kastepisarat ovat öljyn pinnalla koskematta veteen ja aikaisin aamulla järvellä tai merellä, kun veden päällä ajelehtii ohut usvakerros. Kasteenkaaren on jopa nähty muodostuvan jäätyneelle pinnalle, jonka sopivan muotoiset kastepisarat peittävät. Ei kyllä tiedetä, miten tämä on mahdollista. (Minneart, 1987)

Kasteenkaari on samanvärisen kuin tavallinenkin sateenkaari, mutta se muodostuu maanpinnalle ja on ellipsin-, hyperbelin- tai paraabelinmuotoinen. Kaaren ulkomuoto riippuu auringon korkeudesta ja maaston muodoista (Dunlop, 2004). Auringon noustessa yli 42° horisontista kasteenkaari näkyy ellipsinä, mutta tämä on erittäin harvinainen näky. Joskus kasteenkaareissa on nähty myös sivusateenkaari sekä interferenssikaaria. (Minneart, 1987)

Kasteenkaaret voivat muodostua myös yöllä lähelle katulamppuja, joiden alla on ruohoa. Näiden kasteenkaarien muoto poikkeaa auringon valossa syntyneistä kaarista, koska lampun valo ei ole samansuuntaista vaan se leviää joka suuntaan. Muoto muistuttaa tällöin hieman munuaista (kuva 19). (Naylor, 2002)



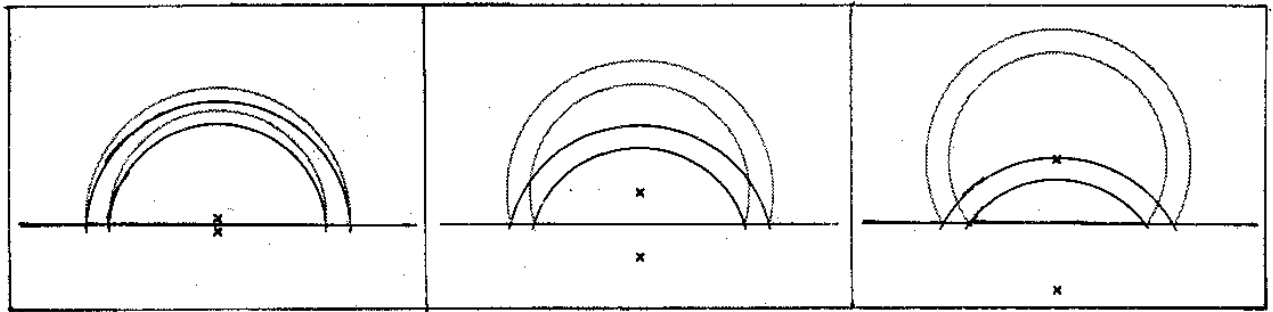
Kuva 19. Kasteenkaaren muoto katulampun valossa (a) ja auringon valossa (b). (Naylor, 2002)

5.5 Heijastuneet sateenkaaret

5.5.1 Heijastuneen auringonvalon synnyttämä sateenkaari

Heijastuneita sateenkaaria voi olla sekä pää- että sivusateenkaarella. Heijastunut sateenkaari syntyy, kun valonsäde osuu heijastavaan pintaan. Heijastavaksi pinnaksi käy esimerkiksi suhteellisen tyyni järven tai meren pinta. Valonsäteen heijastuessa myös auringon vastapistekin peilautuu taivaalle. Heijastunut vastapiste sijaitsee normaalista pisteestä ylöspäin, mutta yhtä korkealle horisontin yläpuolelle kuin normaali auringon vastapiste on horisontin alapuolella (kuva 20). Usein näemme heijastuskaaresta vain osan horisontin tuntumassa (Mäkelä, 1991). Kokonaisen heijastussateenkaaren voi nähdä vain, jos vesialue on

vähintään yhtä suuri kuin siitä nouseva kaari. Pienissä lammissa ei voida havaita ollenkaan heijastussateenkaaria. (Naylor, 2002)



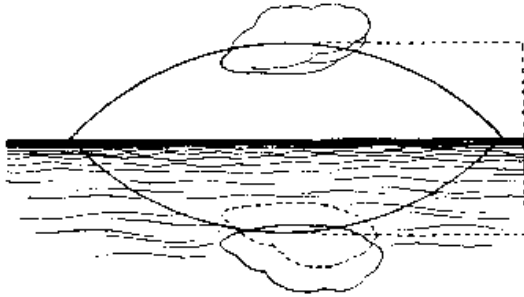
Kuva 20. Sateenkaarten (tummemmat kaaret) ja heijastuskaarten (vaaleammat kaaret) geometria auringon ollessa korkeuksilla 5, 12 ja 26 astetta. Sateenkaarten ja niiden heijastusvastineiden keskipisteet on merkitty rasteilla. (Mäkelä, 1991)

Heijastuskaari on samanvärisen kuin pääsateenkaarikin, mutta heikompi. Tämä johtuu siitä, että vesi ei ole hyvä valon heijastaja muulloin kuin auringon ollessa lähellä veden pintaa (Naylor, 2002). Kuvassa 20 on esitetty, miten heijastuskaaren muoto ja paikka muuttuu auringon korkeuden muuttuessa. Auringon ollessa aivan horisontissa heijastuskaari on päällekkäin sateenkaaren kanssa. Kun aurinko nousee yli 42 asteen, häviää sateenkaari näkyvistä ja heijastuskaari näkyy ympyränä, jonka alin kohta koskettaa horisonttia. Tämä on harvinainen näky ja yleensä heijastuskaari nähdäänkin pää- ja sivusateenkaaren välissä. (Mäkelä, 1991)

5.5.2 Peilautuva sateenkaari

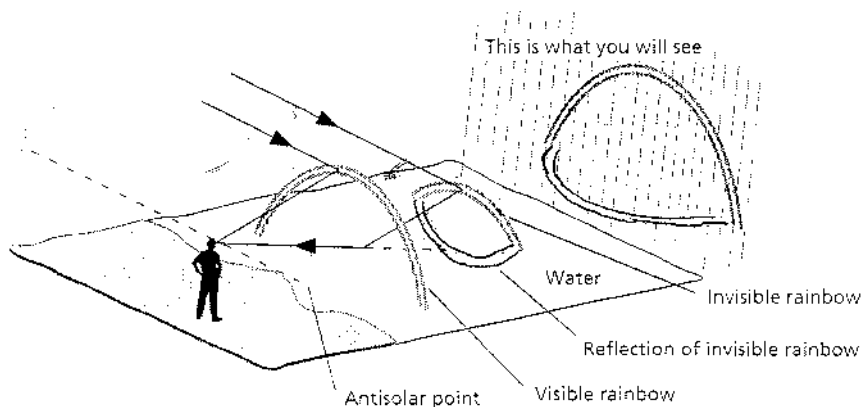
Heijastuneen sateenkaaren voi myös nähdä kuvajaisena tyynessä vedenpinnassa (kuva 21). Sateenkaari peilautuu veden pintaan täysin symmetrisesti horisontin suhteen, koska sateenkaari ei ole todellinen esine vaan se on tavallaan äärettömän kaukainen kohde. Heijastunut sateenkaari voi kuitenkin näyttää siltä, että se olisi heijastuessaan siirtynyt. Tämä johtuu siitä, että taivaalla olevat pilvet eivät peilaudu symmetrisesti vaan ne siirtyvät (kuva

21). Mitä korkeammalla veden pinnasta havaitsija on, sitä selvemmin pilven siirtyminen näkyy. (Minneart, 1987)



Kuva 21. Peilautunut sateenkaari veden pinnalla. (Minneart, 1987)

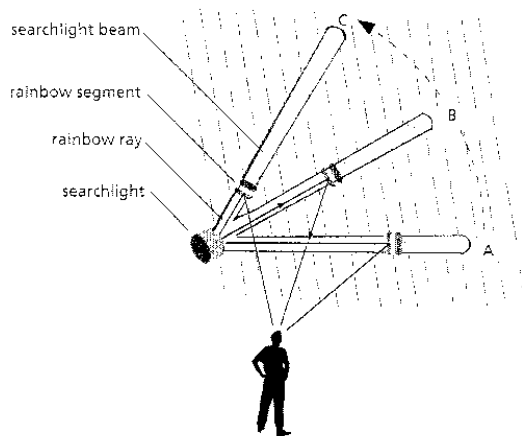
Vaikka heijastunut kaari näyttää alkavan suoraan sateenkaaren juuresta, tämä ei ole totta, koska itse sateenkaari on äärettömyydessä (Fraser and Lee, 2001). Sateenkaaren ja peilautuneen kaaren päät eivät ole täysin samassa kohdassa. Itseasiassa tämä heijastunut sateenkaari syntyy sadepisaroista, jotka ovat kauempana kuin pääsateenkaaren muodostavat pisarat. Näistä pisaroista syntyy pääsateenkaari, joka ei näy havaitsijalle. Vain näkymättömän kaaren heijastussateenkaari tulee näkyviin pääsateenkaaren alapuolelle veteen (kuva 22). (Naylor, 2002)



Kuva 22. Peilautuneen sateenkaaren synty vedenpintaan näkymättömästä sateenkaaresta. (Naylor, 2002)

5.6 Sateenkaari valonheittimessä

Sateisena iltana katsottaessa valonheittimen säteen poikki voidaan havaita pää- ja sivusateenkaari. Säteessä voidaan nähdä heikko väritön kohta, joka on osa sateenkaarta. Värejä ei voida nähdä, koska sateenkaari ei ole tarpeeksi kirkas, jotta ihmissilmä voisi erottaa siitä värejä. Havaittavan sateenkaaren paikka riippuu havaitsijan ja säteen paikasta. Valonheittimen liikkuessa myös sateenkaaren osa liikkuu (kuva 23). Erikoisin piirre valonheittimen muodostamassa sateenkaaressa on se, että sivusateenkaari muodostuu lähemmäksi valonlähdettä kuin pääsateenkaari. Tämä johtuu siitä, että pääkaaren punainen reuna on lähempänä valonheitintä kuin sininen reuna. Sivusateenkaari muodostuu aina pääsateenkaaren punaisen reunan puolelle. (Naylor, 2002)



Kuva 23. Sateenkaari valonheittimen valokeilassa. Sateenkaaren paikka liikkuu säteen liikkuessa paikasta A paikkaan C. (Naylor, 2002)

5.7 Kuvitteellinen sateenkaari

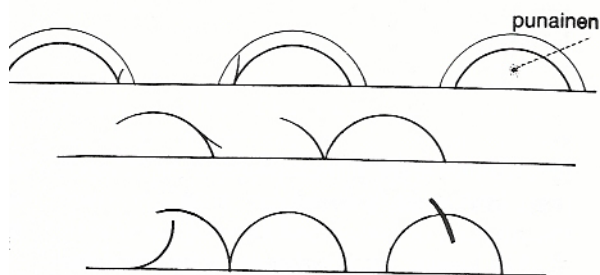
Pää- ja sivusateenkaaren välissä voidaan joskus havaita sateenkaari, joka ei näy kuin muutaman sekunnin ajan ennen katoamistaan. Kaaren värit ovat pääsateenkaaren värien vastavärit. Näkyvä kaari onkin vain pääsateenkaaren negatiivinen jälkikuva. (Clark, 2002)

Jälkikuvat muodostuvat, kun ihminen katsoo kirkasta valoa muutaman sekunnin ajan. Tämä valo ärsyttää silmän verkkokalvoa ja tämä osa silmästä menettää herkkyyttään uusille valoärsykkeille. Negatiivinen jälkikuva on himmeämpi kuin alkuperäinen kuva. (Minneart, 1987)

Jälkikuvan sateenkaaresta saa näkyviin, kun tuijottaa pääsateenkaaresta jotain tiettyä kohtaa herkeämättä. Kaari alkaa kadota tuijotetusta kohdasta, mutta leviää hitaasti melkein koko kaaren levyiseksi. Kun havaitsija kääntää katseen tummempaan kohtaan taivaalla kaari tulee taas näkyviin ja sen lisäksi voi myös havaita jälkikuvana vastakkaisvärisen sateenkaaren (Clark, 2002). Kuvitteellisen kaaren saa näkyviin myös tuijottamalla kirjan kuvaa sateenkaaresta. Mitä tummempi taivas on pää- ja sivusateenkaaren välissä sitä selvemmin kuvitteellinen kaari tulee näkyviin (Ling, 1999). Koetta ei kannata toistaa peräkkäin yli kahta kertaa, etteivät silmät rasitu liikaa (Minneart, 1987).

5.8 Poikkeavat sateenkaaret

Poikkeaviksi sateenkaariksi kutsutaan kaaria, joiden ulkomuotoa ei voida ainakaan vielä täysin selittää. Kuvassa 24 on esitetty joitakin näistä sateenkaarista. Näihin kuuluu ainakin kaaret, joiden kaarevuus vaihtelee kaaren sisällä. Kaarevuus on kyllä sidonnainen vesipisaroiden kokoon, joten se voisi olla yksi selitys. Mutta kuinka pystytään selittämään täysin erisuuruiset vesipisarot kaaren toisella puolella kuin toisella? (Naylor, 2002)



Kuva 24. Epätavallisia sateenkaari-ilmioitä. (Minneart, 1987)

Toinen selittämätön ilmiö on sateenkaaren värien värähtely. Yhdeksi selitykseksi on annettu ukkonen. Ukkosen aikana sateenkaaren värien rajat hämärtyvät. Muutos on erityisen selvä interferenssikaarilla. Ilmiö ei tapahdu salaman aikana, vaan vasta yhdessä jyrynän kanssa. Tästä voisi päätellä, että rajojen hämärtyminen on seurausta räjähdysaaltojen johdosta tapahtuvasta pisaroiden pyrkimyksestä sulautua toisiinsa tai sitten pisaroiden mahdollisesta värähtelemisestä. (Minneart, 1987)

6. Tutkimushistoriaa

Alkuaikoina uskottiin, että taivaalliset voimat synnyttivät sateenkaaren. Ensimmäiset teoriat sateenkaaren muodostumiselle muotoili tiettävästi Anaksimedes noin 575 eKr. Hän selitti sateenkaarien värien synnyn auringon valon sekoittumisella pilvien tummuuteen. (Mäkelä ja Suvanto, 1988)

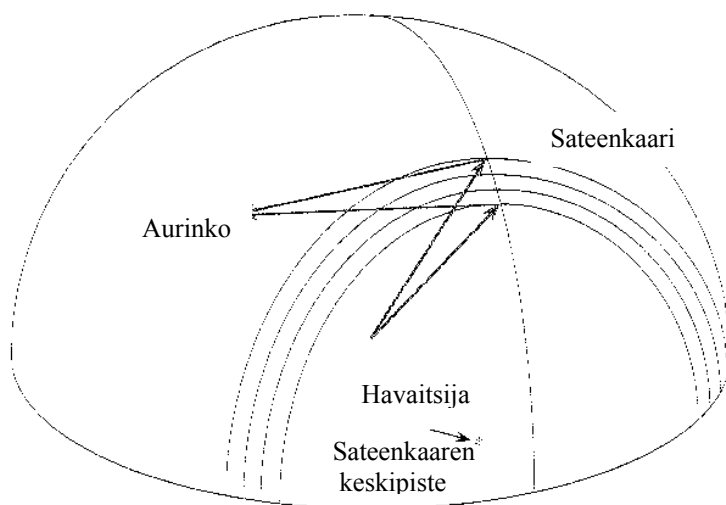
6.1 Aristoteles (384–322 eKr.)

Aristoteles oli ensimmäinen, joka tarkasteli sateenkaaren selitystä teoreettisesti. Hän jakoi sateenkaaren selityksen fysikaalisiin periaatteisiin, kaaren muotoon, kaaren kokoon sekä värien alkuperään. (Mäkelä ja Suvanto, 1988)

Fysikaalisiin perusteita tarkastellessaan Aristoteles määritteli, että kaaren syntyyn vaikuttavat valonlähde, tumma pilvi ja havaitsijan silmät. Hän uskoi, että sateenkaari syntyy valon heijastuessa pilvestä silmään tai näkösäteiden heijastuessa silmästä aurinkoon. Näkösäteillä Aristoteles tarkoitti silmistä lähteviä säteitä, joilla havaitsija pystyi ikään kuin tunnustelemaan kohteita. Tämä näkösädeoppi oli kiistanalainen eikä Aristoteles halunnut ottaa siihen kantaa, joten hän jätti ratkaisematta kumpaan suuntaan heijastus tapahtuu. Geometriahan pätee, tapahtui heijastus kumminpäin tahansa. Tämä selitys ei ollut mitenkään uusi, vaan monet

selittivätkin sateenkaaren synnyn juuri samalla tavalla (Mäkelä ja Suvanto, 1988). Aristoteles hylkäsi täten ajatuksen, että sateenkaari olisi todellinen kohde (Fraser and Lee, 2001).

Kaaren muotoon Aristoteleella oli sitä vastoin aivan uusi selitys. Lähtökohtana hänellä oli auringon, pilven ja havaitsijan paikkojen välinen riippuvuus. Aristoteles määritteli näkyvien kohteiden olevan puolipallolla, joka on esitetty kuvassa 25. Sen keskipisteessä on havaitsijan silmä ja pohjana horisontti. Tätä kutsuttiin taivaanpalloksi ja siinä oletettiin, että pilvet ja aurinko ovat samalla etäisyydellä katsojasta (Mäkelä ja Suvanto, 1988). Hän totesi myös, että aurinko, havaitsijan silmä ja kaaren keskipiste ovat samalla suoralla. Siinä hän oli aivan oikeassa ja paljon edellä muita sen ajan tutkijoita. Aristoteles tiesi myös, miten auringon korkeus vaikutti sateenkaaren korkeuteen. Hän harhautui kumminkin olettamaan, että sateenkaaren säde on suurempi silloin kun aurinko on korkeammalla. Nämä Aristoteleksen geometriset selitykset ovat osittain voimassa nykypäivänäkin. (Fraser and Lee, 2001)



Kuva 25. Taivaanpallolle muodostuva sateenkaari. (Fraser and Lee, 2001)

Sateenkaaren koon selitystä varten Aristoteles teki oletuksen, että valo heijastuu vain tietyistä kohdista taivaanpallolla. Hänen mielestään heijastukseen vaikuttivat heijastavan kohdan etäisyys auringosta ja havaitsijasta. Heijastavat kohdat voitiin siis määrittää, kun etäisyyksien suhde on tunnettu. Näistä pisteistä muodostui ympyrä taivaanpallolle. (Mäkelä ja Suvanto, 1988)

Aristoteles uskoi valon värillisyyden johtuvan sen heikentymisellä tai sekoittumisella pimeyden kanssa. Tämä oli sama perustelu, jonka Anaksimedeskin oli esittänyt. Eri värit ovat näin ollen seurausta erilaisten pimeyden ja valon tai mustan ja valkean seossuhteista. Aristoteleksen mukaan päävärejä oli sininen, vihreä ja punainen. Tämä saattoi juontaa juurensa siitä, että kolme oli pyhä luku. Aristoteles kuitenkin huomautti, että muitakin värejä voidaan nähdä sateenkaareissa värien sekoittuessa. Hän perusteli värien järjestyksen sillä, että heijastus ei tapahdu vain yhdessä pisteessä vaan kahden puolen kohtaa, jonka määritteli tehollinen välimatkojen suhde. Kohdan yläpuolella välimatkojen suhde on vähän pienempi ja alapuolella suurempi kuin tehollinen suhde. Siis yläpuolelta heijastunut valo on vahvempaa ja alapuolelta heikompaa kuin keskeltä tuleva valo. Näin saatiin väreille järjestys, jossa punainen on ylimpänä ja sininen alimpana. Sivusateenkaaren värien selityksen vaikeus muutti Aristoteleen käsityksen pääsateenkaaren värityksestä. Uusi perustelu oli, että heijastuneen valon vahvuus riippuu valaistusta pinta-alasta. Sivusateenkaaren hän perusteli sillä, että tehollisilla suhteilla olikin kaksi arvoa. Värien päinvastaisen järjestyksen hän selitti sillä, että kaukaisimmista kaaren osasta lähteneet valonsäteet ovat kulkeneet pisimmän matkan ja näin ollen ne heikentyneet enemmän kuin kaaren alaosasta tulevat säteet. (Mäkelä ja Suvanto, 1988)

Aristoteleksen selitys sateenkaaren synnystä oli lähestulkoon edistyksellisin tarkastelu parintuhannen vuoden ajan. Tänä päivänä kuitenkin tiedetään, etteivät Aristoteleksen teoriat olleet läheskään oikeita, mutta ne antoivat hyvän lähtökohdan tuleville tutkijoille. (Mäkelä ja Suvanto, 1988)

6.2 Albertus Magnus (1206-1280) ja Roger Bacon (1214-1292)

Albertus Magnuksen käsitys sateenkaaren synnylle pohjautui Robert Grossetesten teoriaan. Teoria perustui pilvistä valuvaan kosteuteen, joka leviää alaspäin jonkinlaisen kartion muotoisena. Valon taittuminen tapahtuisi kolmen aineen rajapinnalla; ilman, pilven, kosteuden harvemmassa yläosassa ja tiheämmässä alaosassa (Mäkelä ja Suvanto, 1988). Albertus muokkasi tätä selitystä niin, että se koski taittumista yksittäisestä vesipisarasta. Hän

myös huomautti, että sateenkaari syntyy yksittäisten pisaroiden valonsäteiden yhdistymisestä (Fraser and Lee, 2001). Albertus olikin ensimmäinen, joka perusteli sateenkaaren synnyn yksittäisissä pisaroissa tapahtuvalla taittumisella. Valon heijastumista pisaroissa hän ei kuitenkaan huomannut ottaa mukaan perusteluihin. (Mäkelä ja Suvanto, 1988)

Värien synnystä herrat olivat suurin piirtein samaa mieltä. Vihreä syntyi kosteudesta, punainen auringosta ja sininen näiden yhdistymisestä. Heillä oli myös mukana mahdollinen neljäs väri, joka syntyi valon ja pimeyden yhtymisestä. Albertus päätteli myös, että sateenkaaria saattoi syntyä useitakin. Näiden synnyn hän perusteli toisella tiheämmällä kosteuskoostumuksella, joka sijaitsi ensimmäisen takana. Albertus oli myös ensimmäisiä tutkijoita, joka mainitsi, että sateenkaarta voitaisiin tutkia kokeellisesti laboratoriossa. Hän tutki muun muassa valon taittumista musteella täytetyssä puolipallon muotoisessa astiassa, johon saatiin näkymään kaaren muotoinen valoalue. Nämä olivat alkeellisia tutkimuksia, mutta innoittivat tulevia tutkijoita kokeellisuuteen. (Mäkelä ja Suvanto, 1988)

Roger Bacon oli täsmällinen matemaatikko. Hän olikin ensimmäinen, joka mittasi sateenkaaren koon ja määrittä sen kulmasäteeksi 42° . Tämä tarkkuus säilyi melkein kolme vuosisataa. Bacon hylkäsi myös kokonaan ajatuksen kosteuskartioista ja totesikin sateenkaaren syntyvän myös keinotekoisiiin vesisuihkuihin (Mäkelä ja Suvanto, 1988). Hän huomasi myös sateenkaaren liikkuvan havaitsijan mukana ja täten myös sen, että jokainen havaitsija näkee omanlaisensa sateenkaaren. (Fraser and Lee, 2001)

6.3 Dietrich Friburgiläinen (1250–1311)

Dietrich Friburgiläinen perusti tutkimuksensa kokeellisuuteen. Hän tutki valon kulkua ja värien syntymistä valon taittuessa pallomaisessa lasiastiassa. Dietrich esittikin tutkimustensa perusteella oikean perustelun valonsäteiden kulusta vesipisarassa. Hän huomasi myös kunkin värin heijastuvan tiettyyn suuntaan ja näin ollen kunkin pisaran aiheuttavan vain yhden värin. Dietrichin mielestä auringon säteet tulevat pisaraan hajaantuvina ja lähtevät niistä

yhdensuuntaisina. Tämä päätelmä oli kuitenkin täysin päinvastainen kuin todellisuudessa. Dietrich onnistui myös selittämään sivusateenkaaren synnyn, kun hän ymmärsi, että valo voi heijastua kahteen kertaan pisarassa. Sivusateenkaaren värien synnyssä hän kuitenkin oli Aristoteleksen kanssa samaa mieltä. Dietrichin suurimmaksi saavutukseksi sateenkaaren tutkimisessa luetaankin tutkittavan ilmiön korvaaminen keinotekoisella mallilla. (Mäkelä ja Suvanto, 1988)

6.4 Rene Descartes (1596–1650)

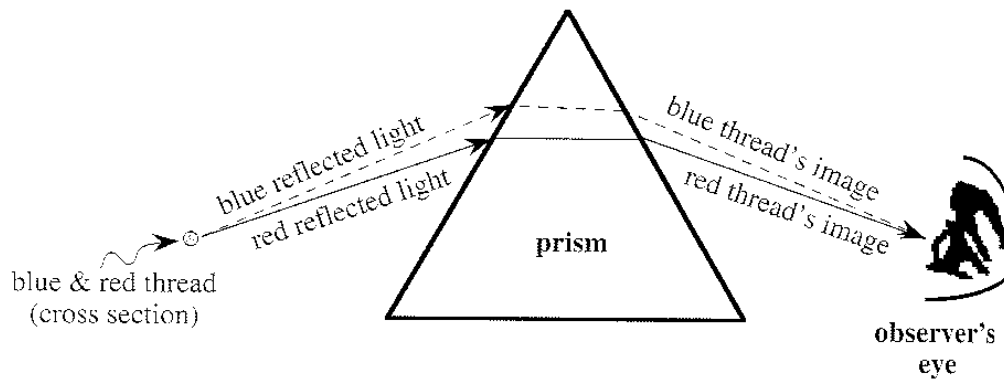
Keskiajalle tultaessa sateenkaaren tutkimus ei tuonut paljoakaan uutta ja tutkimuksissa mentiin jopa taaksepäin. 1600-luvulla alkoi kuitenkin tieteen nousu ja Rene Descartes oli ensimmäinen, joka vein sateenkaarentutkimusta kunnolla eteenpäin (Mäkelä ja Suvanto, 1988). Hänen etunaan olivat todella hyvät tiedot geometrisestä optiikasta (Fraser and Lee, 2001).

Descartes tutki sateenkaarta lasipullolla muiden tapaan, mutta huomasi kuitenkin ettei kokeellisesti voitu enää päästä pidemmälle. Hän alkoi tutkia sateenkaarta matemaattisin keinoin (Mäkelä ja Suvanto, 1988). Descartes käytti sateenkaaren synnyn tutkimiseen heijastuslakia, jossa hän oletti valon nopeuden kasvavan siirryttäessä harvemmasta aineesta tiheämpään. Tämä on täysin päinvastainen todellisuuden kanssa (Fraser and Lee, 2001). Descartes onnistuikin laskemaan, että kaikki pisaroista lähtevät valonsäteet poikkesivat korkeintaan 42° valonlähteen suunnasta. Descartes selitti myös sivusateenkaaren synnyn yhtä tarkasti kuin pääsateenkaarenkin. Laskuissa piti vain ottaa huomioon toinen heijastus pisaran sisällä (Mäkelä ja Suvanto, 1988). Descartes onnistui ensimmäisenä selittämään keskinkertaisesti Aleksanterin tummanvyön synnyn. Hän oli myös ensimmäinen, joka erotti sateenkaaren geometrian pilvien muodoista ja sadekuuroista. Värien järjestystä Descartes ei onnistunut selittämään oikein. Hän perusteli värien järjestyksen olevan lähtöisin ainoastaan vain siitä, mistä kohtaan valo tulee vesipisaran sisälle. Hän myös luuli, ettei sadepisaroiden koko vaikuta sateenkaaren väreihin. (Fraser and Lee, 2001)

Descartesin tutkimuksia varjostivat epäilyt toisten tutkimusten plagioinnista. Asiaa ei auttanut se, että hän ei suostunut myöntämään tunteneensa aikaisempia tutkimuksia. Joka tapauksessa Descartesin teoria sateenkaaresta oli aikansa parhaita (Mäkelä ja Suvanto, 1988). Hänen kunniaksi voidaankin laittaa siis sateenkaaren muodon ja koon selittäminen (Naylor, 2002). Descartes jopa uskoi selittäneensä koko sateenkaaren mysteerin, vaikkakin taittumisen perusteet ja värien synty kaipasivat vielä selityksiä (Mäkelä ja Suvanto, 1988).

6.5 Isaac Newton (1643–1727) ja Edmund Halley (1656–1742)

Isaac Newton tarkasteli muiden tutkijoiden tapaan kolmikulmaisen prisman synnyttämää spektriä, kuten kuvassa 26 esitetään. Hän käytti tutkimuksessaan punaista ja sinistä valoa (Fraser and Lee, 2001). Newton oli tunnetusti erittäin tarkka ja huolellinen mittauksissaan. Ehkä tästä syystä hän olikin ensimmäinen, joka selitti eriväristen valonsäteiden taittuvan hiukan eri tavoin (Mäkelä ja Suvanto, 1988). Hän ei kuitenkaan huomioinut, että erivärisillä valoilla on hiukan eri suuret taitekulmat (Fraser and Lee, 2001). Hän pystyi silti perustelemaan sekä pää- että sivusateenkaaren värien järjestyksen. Newton myös kumosi luulon, että valkoinen valo on puhdasta ja tasa-aineista. Hän osoitti värillisen valon puhtauden sillä, että värilliset komponentit pystyttiin uudestaan yhdistämään valkoiseksi valoksi. Newton ei kuitenkaan missään kohtaan todennut, että valolla olisi aaltoluonne. Newtonin tiedetään myös tutkineen kolmannen sateenkaaren mahdollisuutta, mutta hän ei julkaissut siitä mitään. (Mäkelä ja Suvanto, 1988)

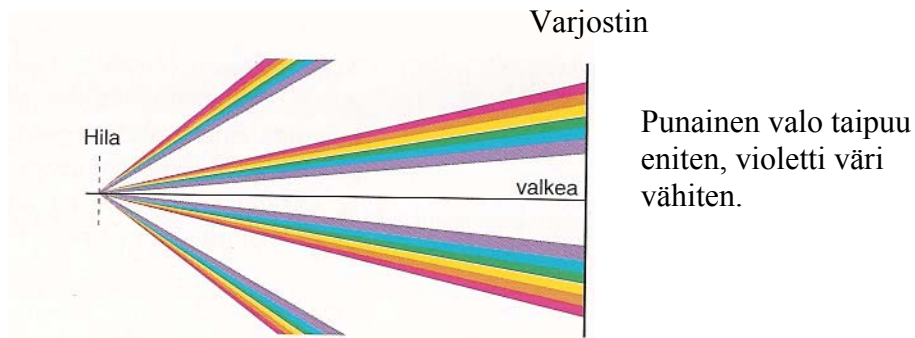


Kuva 26. Newtonin koejärjestely, jolla hän selvitti erivärien taittuvan hiukan eritavoin. (Fraser and Lee, 2001)

Edmund Halley oli ensimmäinen, joka laski kolmannen ja neljännen sateenkaaren paikan. Hän myös totesi kaarien värien järjestyksen. Newton sen sijaan laski sateenkaaren paikan, joka syntyy kun valo kulkee vesipisaran läpi heijastumatta (Mäkelä ja Suvanto, 1988). Tämän syntyminen ei kuitenkaan ole mahdollista eikä olla aivan varmoja tiesikö Newton sen (Fraser and Lee, 2001). Halley julkaisi myös ensimmäisenä heijastussateenkaaren kuvauksen (Naylor, 2002).

6.6 Thomas Young (1773-1829)

Thomas Young totesi ensimmäisenä valon aaltoluonteen. Hän myös muotoili interferenssilain kaksoisrakokokeidensa perusteella. Kokeessa tuleva aaltorintama jakaantuu mennessään läpi kahdesta raosta muodostaen kaksi palloaaltorintamaa. Nämä aallot interferoivat keskenään muodostaen interferenssikuvion, joka on esitetty kuvassa 27. Aikaisemmin oli jo osoitettu, että sateenkaaria voi olla määrätön määrä, mutta Young totesi tämän koskevan myös sivusateenkaaria. Young onnistui selittämään melkoisesti sateenkaareissa havaittavia muutoksia, mutta hänen matemaattiset taidot eivät riittäneet selittämään sateenkaaren säteen vaihtelua (Mäkelä ja Suvanto, 1988). Youngin merkittävin saavutus sateenkaaren tutkimuksessa oli interferenssikaarien synnyn selittäminen (Fraser and Lee, 2001).



Kuva 27. Valkoisen valon hilaspektri, jolla osoitettiin valon aaltoluonne. Kuvassa on kokonaan vain ensimmäisen kertaluvun spektri. (Lehto ja Luoma, 1994)

6.7 George Biddle Airy (1801-1892) ja Gustav Mie (1868-1957)

George Biddle Airy tutki sateenkaarta vain sivutoimisesti, mutta onnistui siitä huolimatta selittämään valkoisen sateenkaaren säteen muutokset. Hän myös kehitti integraalin, jolla pystyttiin laskemaan valon intensiteetit valaistusmaksimien kohdalla. Airy tosin ei jaksanut laskea intensiteettejä kuin kahdelle ensimmäiselle valomaksimille (Mäkelä ja Suvanto, 1988). Hän myös kehitti teorian, joka selitti miten vesipisaran koko vaikuttaa sateenkaaren sekä interferenssikaarien säteeseen ja leveyteen. Hän ei kuitenkaan itse osoittanut kokeellisesti teorian toimivuutta. Myöhemmin osoitettiinkin kokeellisesti, ettei Airyn teoria ennusta kaikille interferenssikaarille oikeaa paikkaa. Silti Airyn teoriaa on näinäkin päivinä käytetty luonnon sateenkaaren ominaisuuksien syvempään tutkimiseen. (Fraser and Lee, 2001)

Airy'n teoriaa tarkemman version kehitti Gustav Mie ja sitä kutsutaankin Mie-teoriaksi. Teoria antaa tietoa vesipisaroista sironneen valonintensiteetistä minuuttien tarkkuudella. Luonnon sateenkaaria tarkasteltaessa Mie-teoria on ehkä liiankin tarkka, mutta laboratorioissa se on korvaamaton. Ennen elektronisten tietokoneiden keksimistä Mien teorian ratkaisun laskemiseen kului jopa 10 000 kertaa pitempi aika kuin Airyn teorian laskemiseen (Fraser and Lee, 2001). Tästä eteenpäin sateenkaaren tutkimus on ollut pääasiassa matemaattisten laskelmien parantamista ja jo olemassa olevien teorioiden tarkentamista sekä laajentamista (Mäkelä ja Suvanto, 1988).

Yhteenveto

Sateenkaari syntyy siis valon heijastuessa ja taittuessa kahdesti vesipisarassa. Kaaren keskipiste sijaitsee akselilla, joka kulkee auringosta havaitsijan pään läpi horisonttiin auringon vastapisteeseen. Sivusateenkaari syntyy vastaavalla tavalla, mutta valo heijastuu kaksi kertaa vesipisaran sisällä. Pääsateenkaaren sisäpuolella ja sivusateenkaaren ulkopuolella voidaan myös havaita interferenssikaaria.

Sateenkaaria voidaan siis havaita oikeastaan mihin vuodenaikaan vain ja mihin kellonaikaan tahansa, kunhan olosuhteet ovat oikeat. Alueella pitää sataa ja auringon paistaa havaitsijan takaa. Auringon korkeus ei kuitenkaan saa olla yli 42° . Jos halutaan nähdä koko sateenkaari, pitää havaitsijan olla tarpeeksi korkealla maanpinnasta.

Sateenkaaren värien järjestys on muuttumaton. Punainen on aina kaaren sisäpuolella ja violetti ulkopuolella. Sivusateenkaarella värien järjestys on päinvastainen toisen heijastumisen takia. Sateenkaaren värit sekoittuvat aina taivaan kirkkauteen ja tästä syystä vain laboratoriossa voidaan nähdä mustaa taustaa vasten sateenkaaren oikeat värit. Sadepisaroiden koko vaikuttaa sateenkaaren ja interferenssikaarien kirkkauteen, värien näkyvyyteen sekä kaaren leveyteen. Pisaroiden koko vaikuttaa myös interferenssikaarien etäisyyteen sateenkaaresta.

Sateenkaari on polarisoitunut tangentialisesti kaareen nähden, joten polarisaatiotaso seuraa sateenkaaren kaarta. Pääsateenkaaren valo voi olla jopa 90 % polarisoitunutta ja sivusateenkaaren 50 %. Huomattava polarisoituminen johtuu siitä, että vähiten poikkeavan säteen heijastuskulma on lähellä veden Brewster kulmaa.

Sateenkaaren sisäosa on muuta taivasta vaaleampi. Tämä johtuu siitä, että kaaren sisäpuolelta siroaa jonkin verran valoa havaitsijan silmään toisin kuin kaaren ulkopuolelta. Pää- ja sivusateenkaaren väliin jäävä alue on sitä vastoin tummempi kuin muu taivas. Tältä alueelta ei heijastu valoa havaitsijan silmään ja aluetta kutsutaan Aleksanterin tummaksi vyöksi.

Useamman kertaluvun sateenkaarien synnyttäminen laboratorioissa on mahdollista. Luonnossa ei ole tietävästi ole nähty kuin kolme ensimmäistä kaarta. Sateenkaari levenee ja himmenee sen kertaluvun kasvaessa ja tästä syystä niiden näkeminen luonnossa vaikeutuu.

Erikoisempia sateenkaaria syntyy kuunvalosta, sumupisaroista, kastepisaroista, veden pinnasta heijastumalla sekä peilautumalla veteen. Näiden sateenkaarien muoto tai väritys poikkeaa jonkin verran normaalista sateenkaaresta. Vielä ei kaikkia poikkeamia sateenkaarissa pystytä selittämään.

Alussa sateenkaarta tutkittiin siis vain havainnoimalla ja melko alkeellisilla laskuilla. Myöhemmin mukaan tuli myös kokeellisuus ja sen myötä matemaattiset laskelmatkin muuttuivat huomattavasti vaikeammiksi. Sateenkaaren synnyn ymmärrys ja tutkimus on edennyt vuosien saatossa sitä mukaa, kun valon kulkua ja sen luonnetta on osattu selittää paremmin. Tarkkaan ei voida sanoa kuka ratkaisi sateenkaaren arvoituksen. Descartes ja Newton olivat ehkä kuitenkin ne, jotka selittivät ratkaisevimmat osiot sateenkaaren synnystä. Eurooppalaisille filosofeille, fyysikoille ja matemaatikoille kuuluu suurin kunnia sateenkaaren arvoituksen ratkaisemisesta.

Viitteet

Adam John A. 2002. The mathematical physics of rainbows and glories. Physics Reports 356. department of mathematics and statistics, Old Dominion university. Norfolk, USA: Elsevier Science B.V. p. 229-365.

Alanko Seppo. 2005. Yleinen aaltoliikeoppi. Fysikaalisten tieteiden laitos, Oulun yliopisto. luentomoniste. s.174.

Clark T. Alan. 2002. Disappearing rainbows and the ``THIRD`` rainbow. JRASC. Calgary centre. p. 28.

Dunlop Storm. 2004. Sää. Helsinki: Werner Söderström Oy. Luonto tutuksi. 256 s. ISBN 951-0-31580-X.

Fraser Alistair B, Lee Raymond L. 2001. The rainbow bridge: Rainbows in art, myth, and science. Pennsylvania: The Pennsylvania State University Press, University Park. 393 p. ISBN 0-271-01977-8.

Freedman Roger A, Young Hugh D. 2004. Sears and Zemansky's university physics with modern physics. International 11. San Francisco: Pearson Addison-Wesley. 1714 p. ISBN 0-321-20469-7.

Grimvall Göran. 1993. Miksi taivas on sininen? Porvoo: Werner Söderström Oy. 190 s. ISBN 951-0-19834-X.

Kaila Kari, Lindqvist Markku ja Määttänen Hannu. 1982. Tähtitieteen harrastajan käsikirja 1. Tähtitieteellinen yhdistys Ursa. Helsinki: Meder offset graafiset laitokset. 96 s. ISBN 951-9269-15-0.

Karttunen Hannu, Koistinen Jarmo, Manner Olli ja Saltikoff Elena. 1997. Ilmakehä ja sää. Tähtitieteellinen yhdistys Ursa. Vaasa: Ykkös-Offiset Oy. 365 s. ISBN 951-9269-87-8.

Kervinen Martti, Korpela Reino ja Mustonen Lassi. 1998. fysiikka. MAOL ry. MAOL-taulukot. Helsinki: Kustannusosakeyhtiö Otava. 64-121 s. ISBN 951-1-12112-X.

Lee Raymond L. Jr. 1991. What are ``all the colours of the rainbow``? Applied optics. Vol. 30, No.24. p. 3401-3407.

Lehto Heikki ja Luoma Tapani. 1994. Fysiikka 2. 5. uudistettu painos. Jyväskylä: Gummerus kirjapaino Oy. 248 s. ISBN 951-26-4318-9.

Leponiemi Timo. 1998. Päivitetty 1.10.2001. Sateenkaaret ja sumukaaret. [Verkkosivu]. [Viitattu 21.3.2008]. <<http://www.sci.fi/~fmdb/astro/sateenkaaret.htm>>.

Ling Allister. 1999. The third Rainbow. JRASC. Edmonton centre. The royal astronomical society of Canada. NASA astrophysics data system. p. 70.

Lynch David K. And Schwartz Ptolemy. 1991. Rainbows and fogbows. Applied optics. Vol. 30, No.24. p. 3415-3420.

Minneart Marcel. 1987. Maiseman valot ja värit. Tähtitieteellinen yhdistys Ursa. 2. painos. Jyväskylä: Gummerus Oy kirjapaino. 304 s. ISBN 951-9269-39-8.

Mäkelä Sakari. 1990. Sateenkaaren kummallisuuksia. Tähdet ja avaruus. Tähtitieteellinen yhdistys Ursa. Vol. 20, No 3. 126-127 s.

Mäkelä Sakari ja Suvanto Timo. 1988. Sateenkaari. Keuruu: Kustannusosakeyhtiö Otava. Visio. 175 s. ISBN 951-1-09972-8.

Mäkelä Vesa. 1991. Kolmas sateenkaari? Tähdet ja avaruus. Tähtitieteellinen yhdistys Ursa. Vol. 21, No 4. 176-177 s.

Naylor John. 2002. Out of the blue: A 24 hour skywatcher's guide. West Nyack, NY, USA: Cambridge University Press.