

# Ultraviolettisäteily ja biomolekyylien vauriot

LuK-tutkielma  
Turun yliopisto  
Fysiikka  
2025  
Noora Tornikoski  
Tarkastaja:  
Prof. Edwin Kukk

Turun yliopiston laatujärjestelmän mukaisesti tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck-järjestelmällä

TURUN YLIOPISTO

Fysiikan laitos

**Tornikoski, Noora** Ultraviolettisäteily ja biomolekyylien vauriot

LuK-tutkielma, 19 s.

Fysiikka

Helmikuu 2025

---

Ultraviolettisäteily on sähkömagneettista säteilyä ja sen olemassaolosta on tiedetty pitkään. Sillä on sekä myönteisiä että haitallisia vaikutuksia, riippuen siitä, miten ja kuinka kauan sille altistuu. Tässä tutkielmassa käsitellään ultraviolettisäteilyn aiheuttamaa vauriota biomolekyyliin. Ultraviolettisäteily on vain osittain ionisoivaa säteilyä, mutta sillä on kyky virittää molekyylejä, josta voi seurata haitallisia muutoksia elimistölle.

Tutkielmassa on tarkasteltu atomitasolla mitä tapahtuu ionisaatiossa ja virittymisessä, jotta voidaan ymmärtää miksi nämä aiheuttavat haitallisia muutoksia. Tekstin tarkoituksena on tuoda esiin yksityiskohtaisemmin, miten ultraviolettisäteily vaurioittaa ihmisen biomolekyylejä. Ihminen pystyy havaitsemaan ultraviolettisäteilyä tuntemalla lämpöä, mutta yleensä siihen reagoidaan vasta sitten kun iho on palanut, joten tietoisuus siitä sekä säteilyltä suojautuminen on ensisijaisen tärkeää.

Asiasanat: Ultraviolettisäteily, UV-säteily, biomolekyyli

# Sisällys

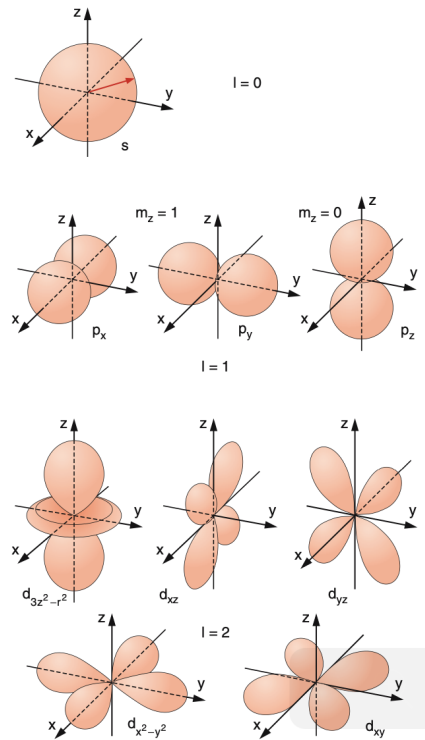
<b>Johdanto</b>	<b>1</b>
<b>1 Säteilyn spektri ja atomin elektroninen rakenne</b>	<b>2</b>
1.1 Atomin elektroninen rakenne . . . . .	2
1.2 Säteilyn spektri . . . . .	4
1.3 Ultraviolettisäteily . . . . .	5
1.4 Ionisoiva säteily . . . . .	6
1.5 UVA . . . . .	9
1.6 UVB . . . . .	9
1.7 UVC . . . . .	10
<b>2 UV-säteilyn vaikutus biomolekyyleihin</b>	<b>10</b>
2.1 Biomolekyylit . . . . .	10
2.2 Antioksidantit . . . . .	12
2.3 Vauriot proteiineihin . . . . .	14
2.4 Vauriot DNA:han . . . . .	15
2.5 Vauriot lipideihin . . . . .	16
<b>3 Yhteenveto</b>	<b>17</b>

## Johdanto

Ultraviolettisäteilyn löysi Johann Ritter vuonna 1801, kun hän tutki auringonvalon käyttäytymistä hopeakloridilla kyllästetyllä paperilla. Ritter havaitsi “näkymättömiä säteitä” violetista valosta pienemmillä aallonpituuksilla ja nämä säteet tummensivat hopeakloridipaperia nopeammin kuin näkyvä valo. Näkymättömät säteet nimitettiin kemialliseksi säteilyksi sen kemiallista reaktiota aiheuttavan ominaisuuden vuoksi, mutta nimi muuttui myöhemmin nykyaikaisempaan muotoonsa, ultraviolettisäteilyyn. Ultraviolettisäteilyä tutkittiin tästä eteenpäin ja sen ominaisuudet tunnettiin hyvin 1920-luvulla. Tuolloin säteilyyn ja sen vaikutukseen ihmisiin suhtauduttiin myönteisesti ja vasta myöhemmin tehtiin havaintoja, jotka totesivat ultraviolettisäteilyllä olevan haitallisiakin puolia. [1]

Tässä tutkielmassa tarkastellaan kirjallisuuskatsauksen avulla ultraviolettisäteilyn hyötyjä sekä haittoja ja keskitytään erityisesti siihen, miten se vaikuttaa biomolekyyleihin. Aiheeseen tutustutaan käymällä läpi atomin elektronista rakennetta sekä sähkömagneettisen säteilyn spektriä. Tämän jälkeen siirrytään tarkemmin aiheeseen kertomalla ultraviolettisäteilystä ja sen eri lajeista sekä määritellään ionisoiva säteily. Kun aiheen teoriaan on tutustuttu, voidaan tarkastella mitä biomolekyylit ovat ja miten ultraviolettisäteily vaurioittaa niitä ja millä tavoin keho yrittää suojautua niiltä. Tutkielmassa käydään läpi, miten ultraviolettisäteily ionisoi ja virittää kehossa olevia biomolekyylejä ja miten nämä aiheuttavat erilaisia tapahtumaketjuja molekyyleissä, jotka voivat olla mahdollisesti terveydelle haitallisia.

Työn tekemisessä ei ole käytetty tekoälyä.



Kuva 1. Visuaalinen esitys atomiorbitaaleista, jossa näkyy niiden avaruudellinen suuntautuminen karteesisessa koordinaatistossa. Kuva otettu lähteestä [2, s. 151].

## 1 Säteilyn spektri ja atomin elektroninen rakenne

### 1.1 Atomin elektroninen rakenne

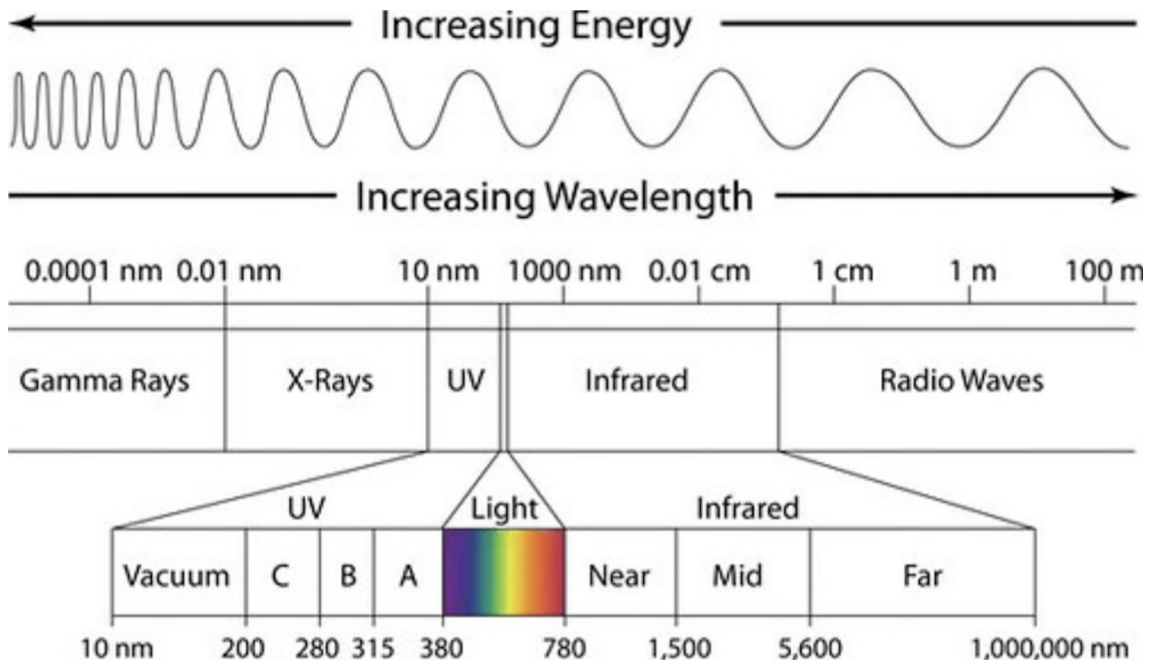
Jotta saamme syvemmän ymmärryksen siitä, miten säteily vaikuttaa molekyyliin, meidän tulee tietää kvanttimekaanista teoriaa. Käsitellään ensin atomeita ja pieniä esimerkkimolekyylejä, jonka jälkeen voidaan edetä monimutkaisempiin biomolekyyleihin. Kvanttimekaanisen teorian mukaan atomin rakennetta voidaan mallintaa atomiorbitaaleilla ja ne kertovat mistä ydintä kiertävä elektroni todennäköisimmin löytyy. Orbitaalin muotoon vaikuttavat kvanttiluvut, joita ovat pääkvanttiluku  $n$ , sivukvanttiluku  $l$  ja magneettinen sivukvanttiluku  $m$ . Kuvassa 1 näemme 3D-mallinnuksia atomiorbitaaleista ja ne ovat esitetty karteesisessa koordinaatistossa. Kuvien alakulmassa näkyvät kirjaimet s, p, ja d, jotka viittaavat sivukvanttilu-

kuun  $l$ . Ne ovat historiallisista syistä nimetty näin ja ne ovat numeroina  $0 = s$ ,  $1 = p$ ,  $2 = d$  ja niin edelleen. Magneettinen sivukvanttiluku  $m$  määräytyy sivukvanttiluvun mukaan säännöllä  $-l \leq m \leq l$  ja se kertoo orbitaalin suuntautumisen karteesisessa koordinaatistossa. [2, s. 113-152]

Edellä esitettyjen kvanttilukujen lisäksi elektroneilla on spinkvanttiluku  $s$  ja yleisesti spin on elektronin sisäinen ominaisuus. Elektroni on fermioni, joten sen spinkvanttiluku on aina  $\frac{1}{2}$ . Spin on vektori, ja sillä on 2 asentoa, joita kuvaa spin-vektorin projektio-kvanttiluku  $m_s$  ja se voi olla  $\pm\frac{1}{2}$  säännön  $-s \leq m_s \leq s$  mukaan. Paulin kieltosäännön mukaan jokaiselle kvanttilukujen  $n$ ,  $l$  ja  $m$  avulla määritellyille orbitaaleille mahtuu kaksi elektronia, jolloin spin-vektoreiden on oltava erisuuntaiset. [2, s. 113-152]

Atomi tai molekyyli voi olla singletti-, dupletti- tai triplettililassa, joista singletti- ja triplettiloja muodostuu myös virityksessä ja siten näillä tiloilla on merkitystä tässä työssä. Puhumme atomin tai molekyylin virittymisestä myöhemmin tutkielmassa. Singlettililassa spinkvanttiluku  $S$  on nolla, eli atomin tai molekyylin kaikkien elektronien spinit summataan ja niillä on tasan sama määrä vastakkaisia spinejä. Helium on perustilallaan singletti ja jos esimerkiksi toinen elektroni virittyisi korkeammalle tilalle, ilman että virittyneen elektronin spin muuttuisi, se olisi silti singletti. Triplettililassa taas spinkvanttiluku on 1, joka voidaan havaita sellaisessa tilanteessa, kun atomilla on virittynyt elektroni korkeammalle tilalle ja sen spinvektori on kääntynyt vastakkaiseen suuntaan. Se miksi näitä kutsutaan singletti- ja triplettiloiksi tulee kaavasta  $2S + 1$ . Triplettiloilla kokonaisspinluku on  $S = 1$ , jolloin spin-vektorilla on 3 projektiota ( $m_s = -1, 0, 1$ ). Singletti tiloilla taas kokonaisspinluku on  $S = 0$ , joten spin vektorilla on vain yksi projektio. [2, s. 201]

Nyt kun orbitaalin muoto ja elektronien sijoittuminen ymmärretään, voidaan tarkastella elektronikuoria. Pääkvanttiluku  $n$  kuvaa elektronikuoria ja kun puhutaan elektronikuorista, sillä tarkoitetaan ytimen ympärille symmetrisesti jakautu-



Kuva 2. Sähkömagneettisen säteilyn spektri, jossa havainnollistetaan energian ja aallonpituuksien suhdetta säteilyn lajiin. Kuva otettu lähteestä [3].

nutta varausta. Varausjakauma tulee siitä, kun alkeisvarauksen omaavat elektronit liikkuvat orbitaaleilla. Kuten sivukvanttiluvulla, myös  $n$ :llä on oma merkintänsä, jota käytetään nimenomaan puhuessa atomin elektronikuorista: 1 = K, 2 = L, 3 = M ja niin edelleen. Pääkvanttiluvun kasvaessa sen etäisyys ytimestä myös kasvaa ja täten myös  $n$  vaikuttaa orbitaalien muotoon. [2, s. 205]

## 1.2 Säteilyn spektri

Säteily käsittää kaikkein yleisimmän määritelmän mukaisesti sähkömagneettisen säteilyn sekä hiukkassäteilyn. [4] Tässä tutkielmassa käsitellään vain sähkömagneettista säteilyä ja kuvassa 2 nähdään sen spektri. Kuten kuvasta nähdään, energia kasvaa (engl. increasing energy) mennessä kuvassa oikealta vasemmalle. Aallonpituus kasvaa (engl. increasing wavelength) juuri vastakkaiseen suuntaan mennessä. Tätä voidaan havainnollistaa laskuilla, sillä aallonpituuden ja energian välillä on kääntäen verrannollinen suhde. Fotonin eli valohiukkasen energia voidaan ilmaista



kaavalla:

$$E = hf,$$

jossa  $h$  on Planckin vakio  $6,626 \cdot 10^{-34}$  Js ja  $f$  on taajuus, jonka yksikkö on  $\frac{1}{s}$ .

Taajuus voidaan ilmaista kaavalla:

$$f = \frac{c}{\lambda},$$

jossa  $c$  on valonnopeus  $299792458 \frac{m}{s}$  ja  $\lambda$  on aallonpituus, jonka yksikkö on m.

Kaavasta nähdään, kun aallonpituus on pienenee, niin taajuus kasvaa ja siten fotonin energia myös kasvaa. [2, s. 91-92]

Kuvan 2 spektrissä vasemmalta oikealle mennessä nähdään gammasäteily (engl. gamma rays), röntgensäteily (engl. x-rays), ultraviolettialue, näkyvän valon alue, infrapuna-alue (engl. infrared) ja radioaallot (engl. radio waves). Näkyvän valon alue on 380–780 nm ja infrapunavalosta on eritelty vielä lähi- (engl. near), keski- (engl. mid) ja kaukoinfrapuna (engl. far). Ultraviolettialueesta on eritelty eri lajit: tyhjiö, C, B sekä A ja näitä käsitellään myöhemmin tutkielmassa.

### 1.3 Ultraviolettisäteily

Osa ultraviolettisäteilystä on ionisoivaa säteilyä ja UV-säteily sijoittuu näkyvän valon ja röntgensäteilyn väliin. Sen aallonpituuden vaihteluväli on 100–400 nm. Ultraviolettisäteilyä tulee auringosta, loisteputkista ja ultraviolettilampuista. [5]

UV-säteilyn päästessä iholle, se laukaisee monta kemiallista reaktiota kehossa. Positiivisiin reaktioihin kuuluu esimerkiksi luonnollisen D-vitamiinin valmistus sekä kipuja vähentävien hormonien, kuten endorfiinien, tuotto [6]. Sitä voidaan hyödyntää lääketieteessä hoitamaan kroonisia tulehduksellisia ihosairauksia sekä autoimmuunisia ihosairauksia [7]. Ultraviolettisäteilyä käytetään myös teollisuudessa sterilisoimaan vettä ja ruokatuotteita erilaisista sairastuttavista organismeista [8].

Vaikka sillä on monia hyödyllisiä käyttökohteita, sillä on myös haittavaikutuksia ihmiselle. UV-säteily aiheuttaa vaurioita ihossa kuten myös ihmisen geeniperimässä, deoksiribonukleinihapossa, eli DNA:ssa. Iho yrittää suojata itseään vaurioilta rusketumalla ja paksuuntumalla. Nämä suojat eivät kuitenkaan aina riitä, sillä iho voi silti arkikielellä ilmaistuna palaa, eli alkaa punoittamaan, joka on seuraus DNA:n vauriosta. [9] DNA:ssa säteily aiheuttaa esimerkiksi vääränlaisia parinmuodostumisia emäksien välillä ja tämä voi johtaa syöpäsolujen syntymiseen [6].

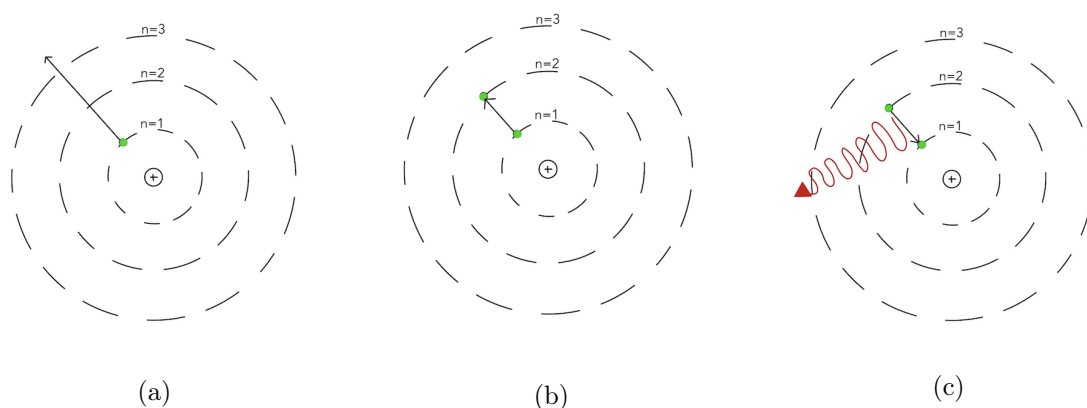
Koska ihminen havaitsee yleensä UV-säteilyn vaikutukset vasta jälkeenpäin, on erityisen tärkeää pystyä ennakoimaan ja suojautumaan etukäteen. Auringosta tulevaa UV-säteilyä tarkastellaan UV-indeksin avulla. UVI on kansainvälinen mittari UV-säteilylle ja Euroopassa UVI vaihtelee yleensä 0–10 välillä, mutta esimerkiksi Australiassa se voi olla jopa 20. [10] UV-indeksin laskeminen on kansainvälisesti määriteltä ja se on yksikötön. Se saadaan lasketuksi kaavalla

$$UVI = k \int S_{ery}(\lambda)E(\lambda)d\lambda,$$

jossa  $k = 40 \text{ m}^2/\text{W}$ ,  $S_{ery}$  on kansainvälisen valaistuskomission (International Commission on Illumination, CIE) eryteemapainotus, joka kuvaa ihon palamisherkkyyttä ja on yksikötön.  $E(\lambda)$  on säteilyn irradianssi eli tehotiehys maan pinnalla ja sen yksikkö on  $\text{W}/\text{m}^2$ . [11]

## 1.4 Ionisoiva säteily

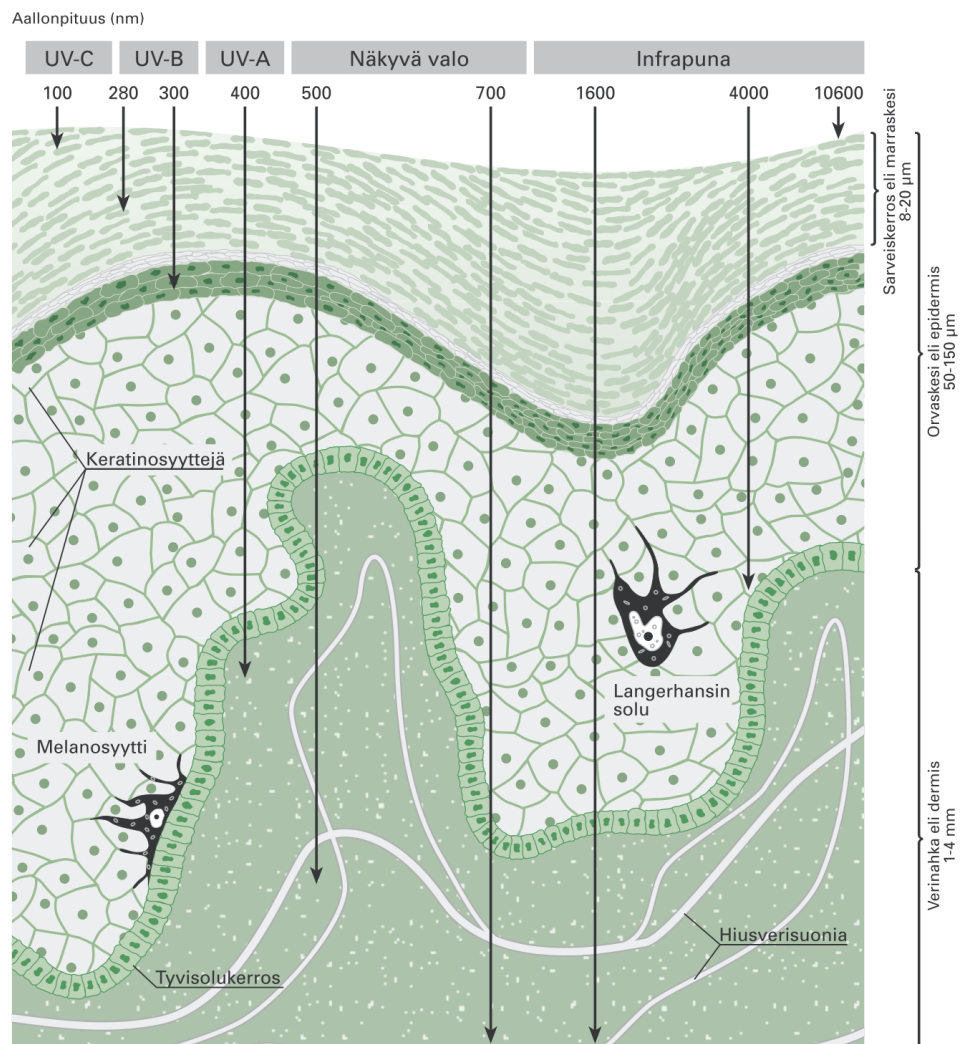
Kuvan 2 sähkömagneettinen spektri voidaan vielä jakaa kahteen eri luokkaan, ionisoimattomaan ja ionisoivaan säteilyyn. Ionisoimattomia säteilyn aallonpituusalueita ovat radioaallot, mikroaallot, näkyvä valo, infrapunavalo sekä UVA- ja UVB-säteily [12]. Ionisoivaan säteilyyn lukeutuu sähkömagneettinen säteily, joita ovat UVC-, röntgen- sekä gammasäteily. Tähän luokkaan kuuluu myös hiukkassäteily, joihin kuuluu alfa-, beeta- ja neutronisäteily, mutta nämä eivät näy kuvassa 2. [4]



Kuva 3. Bohrin mallin tapainen esitys, jossa (a) kohdassa tapahtuu elektronin ionisaatiosta, (b) elektronin virittyminen ja (c) viritystila purkautuu säteilynä ja elektroni palaa perustilalle.

Altistumme joka päivä ionisoivalle säteilylle ja suurin osa siitä tulee luonnosta. Saamme säteilyä esimerkiksi maaperän radonista, ulkoavaruudesta ja rakennusmateriaaleista. [13] Ionisoiva säteily pystyy virittämään tai irrottamaan elektronin atomista tai molekyylistä, kun taas ionisoimattoman säteilyn energia ei riitä tähän. [14] Säteilystä energiat ovat usein energialtaan pieniä, joten yksikkönä käytetään elektronivolttia (eV), jotka saadaan jakamalla energia alkeisvarauksella eli  $1,6 \cdot 10^{-19}$  C [15]. Pienin energia, joka voi ionisoida, on 10 eV. Kun tämän energian muuntaa aikaisempien laskujen avulla aallonpituudeksi, saadaan noin 124 nm aallonpituus, joka on UVC-säteilyn aallonpituudella. [16]

Ionisaatiossa atomin tai molekyylin elektroni absorboi eli vastaanottaa jostain ulkoisesta lähteestä energiaa niin paljon, että se ylittää elektronin ja ytimen välisen Coulombin potentiaalienergian ja täten elektroni irtoaa atomista. Energiaa, jota tähän ilmiöön vaaditaan, kutsutaan ionisaatioenergiaksi. [17] Kuvassa 3 on piirretty yksinkertaisuuden vuoksi Bohrin atomimallin mukainen kuva vetyatomista, vaikka kvanttimekaaninen atomimalli pätee kaikkiin atomeihin ja molekyyliin. Kuvan kohdassa (a) nähdään ionisaatio, jossa vedyn ainoa elektroni on saanut tarpeeksi energiaa irrottautua ytimestä. Virittymisessä elektroni saa sen verran energiaa, että se pystyy ”hyppäämään” toiselle, korkeaan energisemmälle elektronikuorelle.



Kuva 4. Läpileikkaus kuva ihon kerroksista, jossa nähdään kuinka syvälle eri säteilyt pääsevät tunkeutumaan. Kuva otettu lähteestä [9].

Ultraviolettisäteilyn tapauksessa virittyvä elektroni olisi ns. valenssielektroni, joka on perustilalla uloimmalla elektronikuorella oleva elektroni. Virittynyt tila on kuitenkin vain hetkellinen, sillä atomi tahtoo palata omaan energiaminimiin eli perustilaansa, joten se säteilee ylimääräisen energian pois esimerkiksi valona. [2, s. 114] Kuvan 3 kohdassa (b) nähdään, miten elektroni virittyy korkeammalle elektronikuorelle ja kohdassa (c) virityksen purkautuminen sähkömagneettisena säteilyinä.

## 1.5 UVA

UVA-säteilyn aallonpituus on välillä 315-400 nm kuten kuvasta 2 nähdään, ja se ei suodatu pois otsonikerroksessa, joten suurin osa säteilystä (90-95%) pääsee maan pinnalle. Tämä säteily pystyy tunkeutumaan esimerkiksi ihon toiseen kerrokseen, verinahkaan. Kuvassa 4 on kuvitettu ihon kerroksien läpileikkaus. Ihon kerrokset jaetaan karkeasti kahteen eri osaan, orvaskesiin ja verinahkaan. Päällimmäisenä on ohut marraskesikerros, joka koostuu kuolleista soluista. Loppuosa orvaskesistä koostuu keratinosyyteistä, jotka ovat keratiinipitoisia soluja, melanosyyteistä, jotka tuottavat melaniinia, joka edesvaikuttaa esimerkiksi ihon väriin. Orvasketen lukeutuu myös Langerhansin solut, jotka ovat peräisin luuytimestä ja ovat osa immuunijärjestelmää. Verinahka koostuu laajalti sidekudoksesta, joka tukee ihon rakenteita ja tässä kerroksessa on myös paljon hiussuonia, joiden tehtävänä on ravita ihon ylempi kerros. [9] UVA-säteily aiheuttaa ihossa pääosin molekyylien virittymistä, aiheuttaen reaktiivisia happiradikaaleja eli ROS:eja ja tätä kautta vaurioittaa DNA:ta [6].

## 1.6 UVB

UVB-säteilyn aallonpituus on välillä 280-315 nm kuvan 2 mukaan. Suurin osa säteilystä jää otsonikerrokseen, mutta pieni osa (5-10%) jatkaa matkaa maahan asti. UVB-säteily läpäisee ihon päällimmäisen kerroksen, orvaskeden, joka nähdään kuvassa 4. Suurin osa orvaskeden ja yleisesti ihon molekyyleistä sisältää hiiltä ja tällaisten molekyylien UV-säteilyn absorptio riippuu molekyylin ominaisuuksista. Eri-tyisen helposti UV-säteilyä absorboiva rakenne on sellainen, missä on paljon konjugoituneita kaksoissidoksia. [9] Konjugoitunut kaksoissidos tässä tilanteessa tarkoittaa sellaista rakennetta, jossa hiiliatomien väliset sidokset vuorottelevat yksöissidoksien ja kaksoissidoksien välillä [18]. Näitä sidoksia esiintyy esimerkiksi RNA:ssa, proteiineissa ja DNA:ssa ja UVB-säteilyn absorboituminen DNA:han voi aiheuttaa molekyylien uudelleenjärjestelyjä muodostaen spesifisiä fototuotteita esim. syklobu-

taanidimeerejä ja (6—4)-pyrimidiinipyrimidoneja (6—4 PP). [6]

## 1.7 UVC

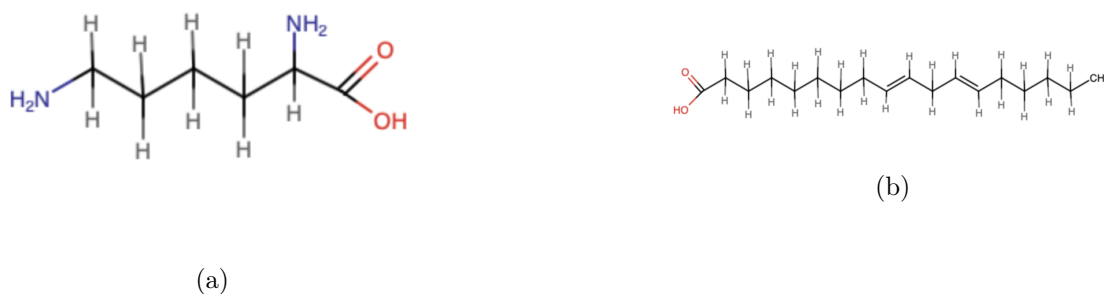
UVC-säteilyn aallonpituus on välillä 100-280 nm. Auringosta tuleva UVC-säteily suodattuu yleensä pois otsonikerroksen kohdalla, eikä pääse maahan asti. [9] UVC-säteilyä käytetään esimerkiksi desinfiointissa, jota käytetään sairaaloissa ja erilaisilla teollisuuden aloilla. Desinfiointissa yleisesti käytetään matalapaineisia UVC-elohopealoistelamppuja. Näiden loistelamppujen toimintaperiaate perustuu siihen, että putken sisäosa on valettu fluoresoivalla loisteaineella ja sen avulla synnytetään UV-säteilyä. [11] Fluoresenssi on ilmiö, jossa molekyyli absorboi itseensä valon fotonin ja tämä emittoituu matalamman energian valona [19]. Putki on muutoin täytetty kaasulla, johon on lisätty nestemäistä elohopeaa. Lampussa kulkeva sähkövirta aiheuttaa sähköpurkauksia, jotka saavat elohopean siirtymään toiseen faasiin, kaasumaiseen muotoon. Tämä elohopeakaasu emittoi lyhyen aallonpituuden UVC-säteilyä, ja se virittää putken sisäpuolella olevan loisteaineen. Fluoresenssiaineen viritystilat purkautuvat näkyvän valon ja UV-säteilyn aallonpituuksina. [11] Ihmisen iholla UVC-säteily pysähtyy marraskesikerrokseen [20]. UVC-säteily muodostaa myös reaktiivisia happiradikaaleja, kuten UVA-säteily ja tämä tuottaa reaktiivista otsonia, jolla on desinfiointissa osaa bakteerien tuhoamisessa [11].

## 2 UV-säteilyn vaikutus biomolekyyleihin

### 2.1 Biomolekyylit

Biomolekyylit ovat elävissä organismeissa, kuten eläimissä ja kasveissa olevia molekyyliä. Pääasiallisesti näitä on neljää eri ryhmää, proteiinit eli valkuaisaineet, lipidit eli rasva-aineet, sokerit sekä nukleiinihapot, joita ovat DNA ja RNA. [21]

Proteiinit ovat kemialliselta rakenteeltaan yleensä polymeerejä eli useiden pienen

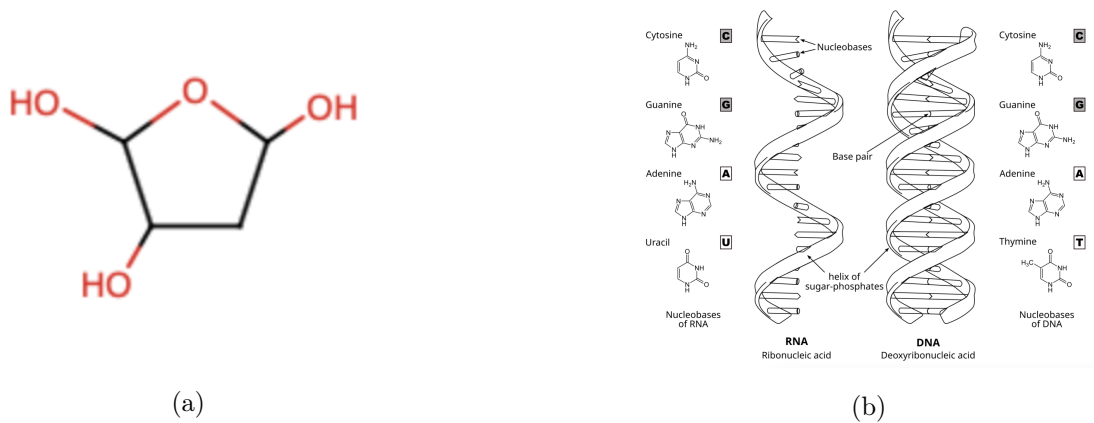


Kuva 5. (a) Lysiinin rakennekaavassa nähdään proteiineille tunnusomaiset toiminnalliset ryhmät. (b) Linolihapon rakennekaava, esimerkki monityydyttymättömästä rasvahaposta.

molekyylien ketju. Tämä ketju koostuu aminohapoista, jonka tunnistaa ketjussa olevista toiminnallisista ryhmistä, aminoryhmästä (-NH<sub>2</sub>) ja karboksyyliiryhmästä (-COOH). Kuvassa 5 nähdään (a) kohta, joka esittää lysiinin rakennekaavaa. Lysiinin oikeassa päädyssä nähdään proteiineille tunnusomaiset toiminnalliset ryhmät. Nämä ryhmät ovat sitoutuneita hiiliatomiin kovalenttisella sidoksella. [22] Ihmiskehossa proteiineilla on monta tehtävää, kuten rakenteellisen tuen antaminen ja entsyymien muodostaminen. Ne ovat myös suuressa osassa solujen toimintaa. [23]

Lipideillä ei ole samanlaista tunnistettavaa toiminnallista ryhmää kuten proteiineilla, vaan niitä on monenlaisia, muutamana esimerkkinä glyserolit, steroidit, rasvahapot ja vahat. Kuvassa 5 (b) kohta esittää linolihapon rakennekaavaa ja linolihappo on yksi esimerkki monityydyttymättömistä rasvahapoista. Lipidit säilyttävät energiaa kehossa ja ne toimivat solukalvojen rakenteissa ja ovat mukana kehon solujen välisessä viestinnässä. [24]

Sokerit kuuluvat hiilihydraatteihin ja sokerilla yleensä viitataan mono- ja disakkarideihin ja ne voivat olla rakenteeltaan avonaisia ketjuja tai renkaita. Disakkaridit muodostuvat kahdesta monosakkaridista. [25] Kuvassa 6 (a) kohdassa nähdään deoksiriboosin rakennekaava, joka on monosakkaridi. Monosakkarideissa on yleensä 5 tai 6 hiiltä ja ne jaetaan aldooseihin ja ketooseihin. Aldooseissa 1-hiileen on liittynyt aldehydiryhmä (-CHO) ja yhdiste sisältää useita hydroksyyliiryhmiä (-OH) muissa



Kuva 6. (a) Deoksiriboosin rakennekaava, välttämätön sokeri DNA:lle. (b) Kuva DNA:n ja RNA:n rakenteesta, kuva otettu lähteestä [27].

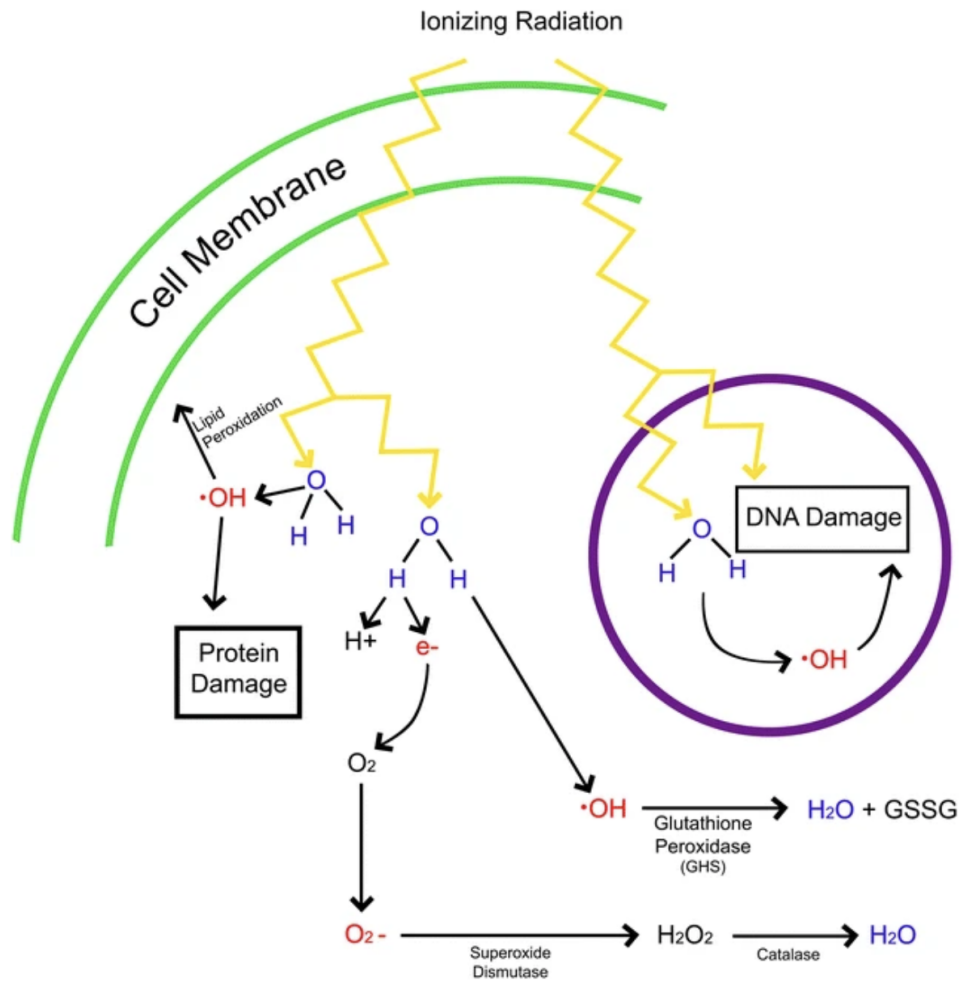
hiilissä, ketooseissa taas 2-hiileen on liittynyt ketoniryhmä ( $C=O$ ) ja jälleen muissa hiilissä on sitoutuneena hydroksyyli ryhmiä. Sokerit ovat tärkein energianlähde ihmisten soluissa. [26]

Nukleiinihapot eli DNA ja RNA (ribonukleiinihappo) sisältävät tiedon geneettisestä perimästä ja ne määrittävät solun tehtävän. Nukleiinihapot ovat myös polymeerejä ja ne rakentuvat nukleotideistä, johon kuuluu kolme osaa: sokeri-, emäs- ja fosfaattiosa. DNA:ssa sokeriosana on deoksiriboosi ja sen emäsosat ovat sytosiini (C), guaniini (G), adeniini (A) ja tymiini (T) ja RNA:lla sokeriosana on riboosi ja emäsosat ovat muuten samat, paitsi tymiinin tilalla on urasiili (U). Kuvassa 6 (b) kohdassa nähdään, miten DNA rakentuu kahdesta juosteesta, jotka kiertyvät toisiinsa ja ovat sitoutuneena vetysidoksen avulla. RNA:lla voi olla sama rakenne kuin DNA:lla, mutta yleensä se rakentuu vain yhdestä kierteisestä juosteesta. [28]

## 2.2 Antioksidantit

Kehomme tuottaa solutasolla koko ajan vapaita radikaaleja ja osa näistä on reaktiivisia happiradikaaleja (ROS). Tunnetuimmat ROS:t ovat esimerkiksi singlettihappi ( $^1O_2$ ), superoksidi ( $O_2^-$ ) sekä hydroksyyli radikaali ( $\cdot HO$ ), ne ovat hyvin reaktiivisia, koska niillä on pariton määrä elektroneja ulkokuorellaan. Ongelmia alkaa syntyä,





Kuva 7. Erilaiset ionisoivan säteilyn laukaisemat happiradikaalit kehossa ja niiden reaktiot. Kuva otettu lähteestä [29].

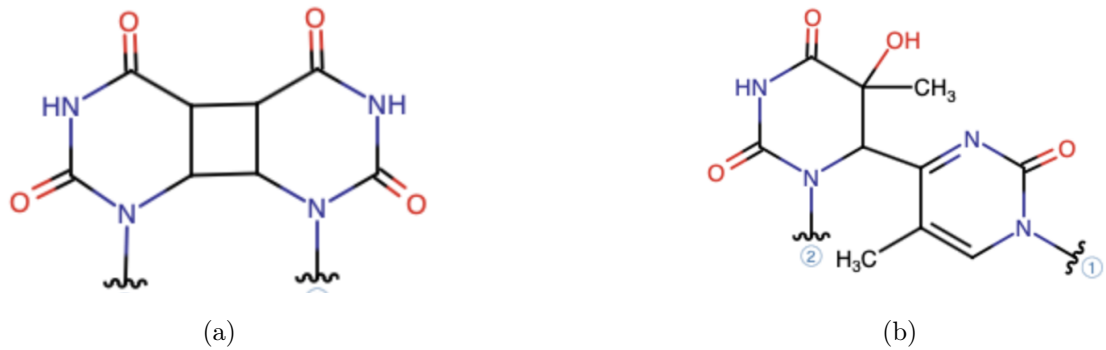
kun ROS: ien määrä kehossa kasvaa yli sen, mitä keho pystyy tuottamaan antioksidantteja. [30, 31]

Antioksidantti nimensä mukaan estää tiettyjen yhdisteiden hapettumista. Ne ovat kehon tuottamia yhdisteitä, jotka voidaan jakaa entsyymeihin ja ei-entsyymeihin. Entsyymi antioksidanteista suurimassa roolissa ovat superoksididismutaasi (engl. superoxide dimutase (SOD)), katalaasi (engl. catalase) ja glutathioniperoksidaasi (engl. glutathione peroxidase (GHS)). [32] Kuvassa 7 nähdään esimerkkejä näiden entsyymien tapahtumaketjuista kehossa. Kun UV-säteily läpäisee solukalvon (engl. cell membrane), säteily pääsee ionisoimaan ja virittämään solun molekyylejä, jotka

ovat yleensä vesimolekyylejä, ja siitä seuraa happiradikaaleja. Esimerkki happiradikaaleista ovat superoksidit ja SOD muuttaa näitä vetyperoksideiksi ja katalaasit taas muuttavat nämä vedeksi ja hapeksi. Toisenlaisessa reaktiossa on voinut syntyä hydroksyyli-radikaali, jonka GHS muuttaa vedeksi ja glutathionidisulfidiksi (engl. glutathione disulfide (GSSG)). Jos GHS ei pysty muuttamaan hydroksyyli-radikaalia, niin siitä seuraa proteiineihin vaurioita tai rasvan hapettumista (engl. lipid peroxidation) tai DNA vaurioita. [29] Ruoasta saatavia antioksidantteja ovat esimerkiksi A-, C- ja E-vitamiinit, joita keho ei pysty tuottamaan itsestään, toisin kuin aikaisemmin mainitut entsyymit. Näistä esimerkkinä E-vitamiini, jonka tehtävänä on suojella solukalvoa, joka rakentuu lipideistä, ja se suojelee esimerkiksi estämällä vapaiden radikaalien muodostumista ja se käynnistää syöpäsoluissa apoptoosia eli solukuolemaa. [32] C-vitamiini on vesipohjainen ja yksi sen tehtävistä on muuttaa E-vitamiinista tulleet radikaalit takaisin harmittomaan muotoon. A-vitamiinin esiaste beetakaroteeni toimii myös antioksidanttina solujen lipideissä ja se niin sanotusti sammuttaa vapaita radikaaleja ja yksittäisiä happimolekyylejä. [33]

## 2.3 Vauriot proteiineihin

Proteiinit muodostavat valtaosan kehon biomolekyyleistä ja UV-säteilyn vaikutus niihin tapahtuu yleensä kahden luokittelun mukaan. Ensimmäinen luokka on niin sanottu suora hapettuminen, jolloin UV-säteilyn fotoni absorboituu proteiiniin sivuketjuihin tai kromoforeihin, jolloin muodostuu singletti- tai triplettitiloja eli virityksiä tai absorboitunut fotoni muodostaa ROS:eja ionisaation avulla. [34] Kromofori on sellainen osa molekyylissä, joka antaa molekyylille ominaisen värin ja proteiinisä se on ketjun sidoksista koostuva osa [35]. Ensimmäisen luokan hapettumisesta esimerkkinä on proteiinien aminohappojäämät, erityisesti lysiinin, arginiinin ja proliinin, jotka voivat hapettua ROS:ien vaikutuksesta ja muodostaa karbonyylijohtannaisia. Kehon on vaikea poistaa karbonyylijohtannaisia, joten ne kertyvät elimistöön



Kuva 8. (a) kohdassa nähdään kahden tymiinin muodostama syklobutaanidimeeri, jossa keskellä neliömäinen syklobutaanirengas ja (b) kohdassa on kahden tymiinin muodostama 6-4 pyrimidiinipyrimidoni. Rakennekaavoissa tyypen sitoutuneet aaltoviivat esittävät sokeria.

ja voivat sekoittaa solun toimintaa esimerkiksi estämällä kemiallisia reaktioita tai häiritä sen viestintää kehon kanssa. Karbonyylijohdannaisten kertymistä soluihin pystytään mittaamaan ja niiden kohonnut lukumäärä viittaa esimerkiksi ikääntymiseen tai sairauksiin kuten diabetekseen, neurologisiin sairauksiin ja liikunta- ja tukieliinsairauksiin. [36] Toisen luokan tapa on epäsuora hapettuminen, jolloin syntyy singlettihappi, joka luovuttaa energiaa proteiiniin sitoutuneelle molekyylliselle hapelle ( $O_2$ , joka on perustilalla tripletti) [34]. Singlettihappi yleensä päättyy reagoimaan proteiinien sivuryhmien kanssa ja se voi muuttaa proteiinin mekaanisia ominaisuuksia kuten sen stressin sietokykyä ja elastisuutta, sekä optisia ominaisuuksia kuten heijastumista ja tehdä molekyyllistä esimerkiksi vettä hylkivän. [37]

## 2.4 Vauriot DNA:han

Kuten aikaisemmin todettu, kun UV-säteilyn fotoni (erityisesti UVB-säteilyn) absorboituu DNA:han, se voi muodostaa syklobutaanidimeerejä ja 6—4 PP:ja. Nämä kaksi tapausta muodostuvat yleensä kahden vierekkäisen emäksen välille, jotka yleisimmin ovat sytosiini ja tymiini. [9] Syklobutaanidimeeri syntyy, kun esimerkiksi kaksi tymiiniä ovat vierekkäin ja ne absorboivat UV-säteilystä tulleen energian, jolloin niiden rengasrakenteessa olevat hiilet, yleensä 5. ja 6. hiilet, sitoutuvat toisiinsa

kovalenttisella sidoksella ja muodostavat samalla neliömäisen syklobutaanirenkaan. Kuvassa 8 (a) kohdassa nähdään esimerkki syklobutaanidimeerin rakenteesta. 6—4 PP muodostuu kahden emäksen välille niin, että ne ovat kovalenttisella sidoksella kiinni toisissaan toisen 6. hiilen ja viereisen 4. hiilen välillä. Kuvassa 8 (b) kohdassa nähdään 6—4 PP ja huomataan, että se ei ole samalla tavalla jaksollinen kuin syklobutaanidimeeri. Molemmat fototuotteet aiheuttavat DNA:ssa rakenteellisia häiriöitä sekä keskeyttävät tärkeitä solun toimintoja kuten DNA:n kahdentumista sekä transkriptiota. Kahdentumisessa DNA-molekyylistä tulee kaksi identtistä kopiota ja transkriptiossa muodostuu DNA-molekyyliä vastaava RNA-molekyyli. Jos näitä toimintoja häiritään, niin solun vitalisuus laskee ja sen geneettinen tieto ei pääse siirtymään eteenpäin, joka johtaa mutaatioihin tai voi saada aikaan syöpään johtavia reaktioita. [38]

## 2.5 Vauriot lipideihin

Solujen kalvot rakentuvat fosfolipidikerroksesta, joka sisältää monityydyttymättömiä rasvahappoja (engl. polyunsaturated fatty acid (PUFA)) [39]. Yksi esimerkki rasvahapon hapettumisessa on, että hydroksyyli-radikaali ( $\cdot\text{HO}$ ) kaappaa vetyatomia PUFA:sta ja tästä reaktiosta muodostuu lipidiradikaali ( $\text{L}\cdot$ ) ja vettä. Reaktio jatkuu niin, että muodostunut lipidiradikaali reagoi hapen kanssa muodostaen lipidiperoksyyli-radikaalin ( $\text{LOO}\cdot$ ) ja tämä reagoi jälleen PUFA:n kanssa muodostaen lipidihydroperoksidin ( $\text{LOOH}$ ) ja jatkaa lipidiradikaalien ketjureaktiota. [40] Lipidihydroperoksidin muodostuminen voi tapahtua kahdella eri tavalla riippuen hapettimesta ja ne jaetaan 1. ja 2. tyyppiin. 1. tyyppin muodostuminen on kuvattu aikaisemmin, jolloin se reagoi hydroksyyli-radikaalin kanssa ja 2. tyyppin muodostumisessa hapettumisen aiheuttaa singlettihappi. [41] Ensisijainen hapettumistuote on lipidiperoksidi ja toissijaiset hapettumistuotteet ovat aldehydit ( $-\text{CHO}$ ), ketonit, hiilivedyt ja alkoholit ( $-\text{OH}$ ). Reaktio muuttaa siis lipidikalvon rakennetta, joka voi aiheuttaa kalvon

paksuutta tai läpäisevyyttä ja tiedetään, että ketoneilla ja aldehydeillä on osansa sydän- ja verisuonisairauksissa sekä syövässä. [39]

### 3 Yhteenveto

Tässä tutkielmassa tutustuttiin perustietoihin sähkömagneettisesta säteilystä ja erityisesti UV-säteilystä. Tekstissä avattiin UV-säteilyn eri lajit sekä mitä biomolekyylit ovat. Tutkielman ydinasiana oli perehtyä miten UV-säteily vaurioittaa biomolekyylejä. Aihetta on tutkittu paljon ja tietoa oli kattavasti saatavilla proteiinien, rasvojen ja DNA:n vaurioista, mutta ei niinkään sokereiden. Tämä johtunee siitä, että sokerit toimivat energianlähteinä soluille, mutta eivät ole osa solun rakennetta.

Joka päivä meidän kehomme tuottaa vapaita happiradikaaleja ja se kuuluu solun normaaliin toimintaan [32]. Tekstissä todettiin, että vapaiden happiradikaalien tuottamat haitat tulevat esiin vasta silloin, kun niitä muodostuu enemmän kuin antioksidantteja. Ultraviolettisäteily vaurioittaa biomolekyylejä ja siitä seuraa suurentunut määrä ROS:eja. Antioksidantit ovat kehomme tapa tehdä ROS:eista harmittomia. Elimistömme tuottaa joitain antioksidantteja itsestään ja osan voi saada ravinnosta. Yksi tapa, jolla voimme välttää vapaiden happiradikaalien ylimäärää, on pitää altistumisaika ultraviolettisäteilylle mahdollisimman lyhyenä.

### Viitteet

- [1] P. E. Hockberger, *Photochemistry and Photobiology* **76**, 561 (2002).
- [2] W. Demtröder, *Atoms, Molecules and Photons - An Introduction to Atomic-, Molecular- and Quantum-Physics*, 1st ed. (Springer-VerlagGermany, 2006).
- [3] Rosenfeld Media, FIO117: Figure 8.1, 2020.
- [4] A. Chaturvedi ja V. Jain, *International Journal of Plant and Environment* **5**, (2019).
- [5] M. Hietanen, *Ultraviolettisäteily, Katsauksia 43* (TyöterveyslaitosHelsinki, 1982).

- [6] J. D’Orazio, S. Jarrett, A. Amaro-Ortiz ja T. Scott, *International Journal of Molecular Sciences* **14**, 12222 (2013).
- [7] R. Vangipuram ja S. Feldman, *Oral Diseases* **22**, 253 (2016).
- [8] H. Singh, S. K. Bhardwaj, M. Khatri, K.-H. Kim ja N. Bhardwaj, *Chemical Engineering Journal* **417**, 128084 (2021).
- [9] J. Laihia, R. Pastila, L. Koulu, A. Auvinen, T. Hasan, E. Snellman, K. Kojo ja K. Jokela, Tutkimus- ja tekniset raportit, STUK, Helsinki (unpublished).
- [10] M. Repacholi (INVITED), *Radiation Protection Dosimetry* **91**, 307 (2000).
- [11] R. Visuri, L. Ylianttila, M. Hietanen ja R. Pastila, Tutkimus- ja tekniset raportit 7, STUK, Helsinki (unpublished).
- [12] U. C. Okonkwo, C. C. Ohagwu, M. E. Aronu, C. E. Okafor, C. I. Idumah, I. P. Okokpujie, N. N. Chukwu ja C. E. Chukwunyele, *Journal of Environmental Radioactivity* **253-254**, 106984 (2022).
- [13] D. Shahbazi-Gahrouei, M. Gholami ja S. Setayandeh, *Advanced Biomedical Research* **2**, 65 (2013).
- [14] R. Guleria, *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology* **7**, 887 (2019).
- [15] J. Salonen, SÄTEILYN KÄYTTÖ JA TURVALLISUUS, 2021.
- [16] E. W. Webster, A. B. Ashare, R. J. Baker, A. B. Brill, C. C. Chamberlain, R. O. Gorson, E. C. Gregg, D. E. Herbert, E. C. Krishnan, L. H. Lanzl, C. C. Ling, A. Norman, C. G. Orton, J. Ovidia, A. J. Schneider, R. J. Schulz, R. J. Shalek ja R. L. Witkofsk, Technical report, AAPM (unpublished).
- [17] Ionization Energy, 2013.
- [18] T. I. U. o. P. a. A. Chemistry (IUPAC), IUPAC - conjugated system (C01267).
- [19] J. C. Croney, D. M. Jameson ja R. P. Learmonth, *Biochemistry and Molecular Biology Education* **29**, 60 (2001).
- [20] D. Welch, M. Aquino de Muro, M. Buonanno ja D. J. Brenner, *Photochemistry and Photobiology* **98**, 1167 (2022).
- [21] Biotekniikka:biomolekyyli – Tieteen termipankki.
- [22] E. J. Stollar ja D. P. Smith, *Essays in Biochemistry* **64**, 649 (2020).
- [23] A. LaPelusa ja R. Kaushik, *StatPearls* (StatPearls PublishingTreasure Island (FL), 2025).
- [24] E. Fahy, D. Cotter, M. Sud ja S. Subramaniam, *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - Molecular and Cell Biology of Lipids* **1811**, 637 (2011).

- [25] *Carbohydrate Chemistry and Biochemistry* (Royal Society of Chemistry Cambridge, 2013), pp. 1–40.
- [26] X. Qi ja R. F. Tester, *Clinical Nutrition ESPEN* **33**, 18 (2019).
- [27] T. W. o. e. w. D. R.-E. s. S. w. R.-c.-D. t. p. U. A. Leyo, Fabiolib, Deutsch: Gegenüberstellung eines RNA-Strangs und eines DNA-Doppelstrangs mit Darstellung der jeweiligen Nukleobasen, 2010.
- [28] S. Minchin ja J. Lodge, *Essays in Biochemistry* **63**, 433 (2019).
- [29] T. A. Smith, D. R. Kirkpatrick, S. Smith, T. K. Smith, T. Pearson, A. Kailasam, K. Z. Herrmann, J. Schubert ja D. K. Agrawal, *Journal of Translational Medicine* **15**, 232 (2017).
- [30] P. D. Ray, B.-W. Huang ja Y. Tsuji, *Cellular Signalling* **24**, 981 (2012).
- [31] R. Edge ja T. G. Truscott, *Oxygen* **1**, 77 (2021).
- [32] E. Birben, U. M. Sahiner, C. Sackesen, S. Erzurum ja O. Kalayci, *World Allergy Organization Journal* **5**, 9 (2012).
- [33] H. Sies ja W. Stahl, *The American Journal of Clinical Nutrition* **62**, 1315S (1995).
- [34] M. J. Davies ja R. J. W. Truscott, *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology* **63**, 114 (2001).
- [35] T. I. U. o. P. a. A. Chemistry (IUPAC), IUPAC - chromophore (C01076).
- [36] E. R. Stadtman ja R. L. Levine, *Annals of the New York Academy of Sciences* **899**, 191 (2000).
- [37] M. J. Davies, *Biochemical and Biophysical Research Communications* **305**, 761 (2003).
- [38] B. Cortat, C. C. M. Garcia, A. Quinet, A. P. Schuch, K. M. de Lima-Bessa ja C. F. M. Menck, *Photochemical & Photobiological Sciences* **12**, 1483 (2013).
- [39] A. Sadžak, J. Mravljak, N. Maltar-Strmečki, Z. Arsov, G. Baranović, I. Erceg, M. Kriechbaum, V. Strasser, J. Příbyl ja S. Šegota, *Antioxidants* **9**, 430 (2020).
- [40] A. Ayala, M. F. Muñoz ja S. Argüelles, *Oxidative Medicine and Cellular Longevity* **2014**, 360438 (2014).
- [41] A. W. Girotti, *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology* **63**, 103 (2001).