

$$\frac{d\hat{\rho}(t, \Omega)}{dt} = -i [\hat{H}(\Omega), \hat{\rho}(t, \Omega)] - k\hat{\rho}(t, \Omega)$$

$$\hat{H}(\Omega) = \gamma_e B_0 [\hat{S}_x \sin \theta \cos \phi + \hat{S}_y \sin \theta \sin \phi + \hat{S}_z \cos \theta]$$

$$+ \sum_{i=1}^2 \sum_{k=1}^N [\rho_{ik} A^{(i,k)} \cdot \hat{I}^{(k)}]$$

$$M \sum_{n=1}^{4M} \sum_{m=1}^{4M} \frac{k^2}{k^2 + (\omega_n - \omega_m)^2}$$



Kemiallinen kompassi

tuotuu muuttolinnut Suomeen

■ **Punarinnaalle on evoluution myötä kehittynyt kemiallinen kompassi, jota se hyödyntää muuttomatkoiillaan. Lintu tekee silmänsä reseptorin ja sensorin avulla kvanttimitauksia tavalla, josta kvanttietokoneen kehittäjätkin voivat saada vinkkejä.**

Jarmo Wallenius

Muuttolinnuilla on pitänyt tänä keväänä entistä kiireempää. Muun muassa punarinta saapui pesimään Suomeen talvehtimisalueiltaan Välimeren rannoilta jo maaliskuun puolella. Tämä on pari viikkoa aikaisemmin kuin vielä runsaat kolme vuosikymmentä sitten.

Eurooppalainen punarinta (*Erithacus rubecula*) ei ole maailman 10 000 lintulajin joukossa mikä tahansa siivekäs, vaikkei sen kodinvaihtomatka liki navalta navalle ulotukaan, kuten lapintiirilla.

Parintuhannen lentävän muuttajan joukossa punarinnaalla on nykyisin samanlainen asema kuin lituruoholla kasvikkunnassa tai banaanikärpäsellä hyönteismaailmassa.

Paitsi että kaikkia mainittuja on tutkittu ja tutkitaan edelleen paljon, niillä on yksi yhteinen eksoottinen ominaisuus: magneettiaisti.

◀ **Punarinna kemiallinen kompassi on linnun oikeassa silmässä. Verkkokalvon kryptokromiproteiiniin osuva sininen valo synnyttää vapaita radikaalipareja, joiden elektroneihin Maan magneettikenttä vaikuttaa.**

Kiehtova aisti

Magneettiaistin omistaa noin 50 eläinluokkaa. Aisti antaa eläimelle kyvyn tunnistaa Maan magneettikentän kuvitteellisten kenttäviivojen ja horisontaalitasoin välisiä paikallisia suuntakulmia ja kentän voimakkuudessa ilmeneviä paikallisia eroja.

Magneettikentän kenttäviivat ovat magneettisilla navoilla kohtisuorassa horisontaalitasoa vastaan, mutta viivojen ja vaakatasoin välinen kulma pienenee magneettista päiväntasaajaa lähestyttäessä ja kutistuu lopulta nolnaan.

Magneettikentän voimakkuus taas vähenee vastaavassa suunnassa: navoilla sen voimakkuus on 68 mikroteslaa ja päiväntasaajalla 23 mikroteslaa.

Vertailukohdan tarjoaa jääkaapin oven magneettikentän voimakkuus, joka on sata kertaa suurempi kuin Maan magneettikenttä. Magneettikuvauslaitteissa taas käytetään noin 100 000 kertaa maapallon magneettikenttää voimakkaampia magneetteja.

Magneettiaistia hyödyntävät muuttolintujen ja banaanikärpästen lisäksi muun muassa monet perhoslajit, mehiläiset, sammakkoeläimet, merikilpikonnat, langustit, lohet, lepakot ja kaljurotat.

Isoista nisäkkäistä koirilla, peuroilla ja jopa lehmillä on havaittu magneettiaistimukseen viittaavaa käyttäytymistä ja toimintaa.

Vanhin tunnettu magneettiaisti on kuitenkin tavattu nilviäisillä. Aisti näyttää kehittyneen niille jo kambriakaudella 400 miljoonaa vuotta sitten. Toisaalta myös jotkin bakteerilajit suunnistavat ja orientoituvat niissä olevien nanokokoisten magneettisten rautaoksidikiteiden eli magnetiitin avulla.

Hait ja rauskut puolestaan kykenevät Maan magneettikentän muutosten

avulla indusoimaan aistinelimeensä sähkövirtaa, jota ne hyödyntävät saaliinsa lamauttamisessa.

Tätä nykyä kiistellään siitä, onko myös ihmisellä piilevä magneettiaisti ja olemmeko yleisemminkin sähköherkkä eläinlaji. Sähkön käyttöön perustuvassa informaatioyhteiskunnassamme asia on myös aktiivisen tutkimuksen kohteena.

Magneettikentän mestarit

Linnut ovat maapallon magneettikentän mestareita, jotka ottavat ainakin muuttomatkoiillaan kyvystään irti täyden hyödyn.

Tätä nykyä kiistellään siitä, onko myös ihmisellä piilevä magneettiaisti ja olemmeko sähköherkkä eläinlaji.

Ensimmäisenä viisaita arvauksia pitkiä muuttomatkoi tekevien siivekkäiden sisäisestä kompassista esitti baltiansaksalainen tiedemies **Alexander von Middendorff** Venäjällä vuonna 1859.

Pesimä- ja talvehtimisalueille suunnistaessaan linnut hyödyntävät tämän ”kuudennen aistinsa” lisäksi tietenkin myös Auringon, Kuun ja tähtien valoa ja sen polarisaatiota, ääniä – joita synnyttävät muun muassa valtamerien aallot – sekä erilaisia tuoksujia.

Muuttoa tekeville linnuille ovat tärkeitä myös maamerkit. Siivekkäällä on kognitiiviset kyvyt tunnistaa asuinalueitaan ja muodostaa aivoissaan mentaalisia karttoja.

Linnut voivat – lajista riippuen – hyödyntää suunnistuksessaan joko pääosin yhtä tiettyä aistia tai vaihtoehtoisesti käyttää usean aistin yhdistelmiä.

Magneettiaistiin alettiin suhtautua aiempaa vakavammin 1950-luvulla, kun tutkijat ryhtyivät selvittämään punarinna käyttäytymistä. >>>



Alan pioneerit, Frankfurтин yliopiston tutkijat **Roswitha** ja **Wolfgang Wiltshko** todensivat magneettiaistin olemassaolon aukottomasti 1960- ja 1970-luvuilla tekemissään punarinta- ja kyyhkyskokeissa.

Tiedeyhteisö kiistelee silti yhä siitä, kuinka lintu pohjimmiltaan aistii maapallon magneettikentän. Katseleeko, kuunteleeko vai haisteleeko siivekäs kenttää – vai tekeekö se niitä kaikkia?

Radikaalit parina

Magneettikompassinsa eli nanokokoisten, rautaa sisältävien magnetiittikiteiden ohella punarinnalla näyttää olevan käytössään myös kemiallinen kompassi.

Kemiallisen kompassin perusta on niin sanottu radikaaliparien mekanismi, jossa lintu hyödyntää silmänsä verkkokalvon kryptokromiproteiinia. Vuonna 1998 löydetty reseptorimolekyyli on herkkä näkyvän valon sinisen ja vihreän värin aallonpituuksille.

Fotonit voivat irrottaa proteiinimolekyylin nukleotidin elektroneja, jolloin syntyy vapaaradikaalipareja. Vapaa radikaali on yhdiste tai molekyyli, jossa on pariton elektroni tai vapaa valenssi.

Syntyneet radikaaliparit ovat herkkiä Maan magneettikentän suunnalle, minkä ajatellaan vaikuttavan linnussa tapahtuviin kemiallisiin reaktioihin.

Ihmisillä ja kasveilla kryptokromiproteiini puolestaan jaksottaa vuorokausirytmiiä. Tietokoneiden, televisioiden ja tablettien sinertävän valon on jo todettu sekoittavan unirytmiamme.

Toisaalta otaksutaan, että proteiinin vähäinen superoksidipitoisuus eli sen negatiivisesti varautuneiden happimolekyylien pieni pitoisuus evää meiltä magneettiaistimisen kyvyn – mutta auttaa samalla meitä elämään pitempään.

Näin uskoo ainakin Illinoisin yliopiston kemisti ja biofyysiikan professori **Klaus Schulten**, joka esitti ajatuksen eläinten ja erityisesti lintujen vapaaradikaaliperusteisesta magneettiaistimuksesta jo 1970-luvulla.

Neljä vuosikymmentä sitten vapaiden radikaaliparien teoria ja koko spinkemia, jossa magneettikentän



Derek Ramsey

Myös monarkkiperhoset suunnistavat samanlaisen kemiallisen kompassin avulla kuin muuttolinnut.

avulla kyetään vaikuttamaan kemiallisiin reaktioihin ja sidoksiin, teki vasta tuloaan.

Schultenin magneettiaistia ja vapaita radikaalipareja käsitellyt käytäytymisbiologinen tutkimuspapier ei siksi vuonna 1978 kelvannut arvovaltaiselle *Science*-lehdelle, vaan se palautettiin tutkijalle pilkkakirjeen saattamana.

Tuolloin ajateltiin vielä, että elektronien spinien vuorovaikutus geomagneettisen kentän kanssa oli niin pientä, että sillä ei voisi olla merkitystä molekyylien lämpöliikkeen ja kemiallisiin sidoksiin liittyvien energioiden kannalta.

Saksankieliseen julkaisuun Schultenin uudet näkemykset ja tulkinnat kuitenkin hyväksyttiin heti. Nykyisin lintujen magneettiaistia koskeva tutkimus on parhaiden tiedejulkaisujen vakiomateriaalia.

Luonnon kvanttikone

Atac Imamoglun ja **Birgitta Whaley**n sveitsiläisessä ETH-korkeakoulussa tekemä tuore tutkimus paljastaa, että punarinta suorittaa ihka aidon kvanttimittauksen, kun sen kryptokromiproteiini absorboi valoa.

Proteiinin flaviiniadeniiniidinnukleotidissa (FAD) syntyy miljardiosasekunneissa vapaa radikaalipari, jossa yksi elektroni siirtyy 1,5 nanometrin päässä sijaitsevaan aminohap-

poon toisen pysyessä paikallaan.

Radikaalin parin elektronit muodostavat lomittuneine elektroneineen pitkäikäisen, yli 10 nanosekuntia kestävän, koherentin kvanttitalan. Sen aikana lintu tekee kvanttimittauksensa, jossa se havainnoi ja vertaa vapaan radikaaliparin elektronien välistä suuntaa Maan magneettikentän kenttäviivojen suunnan kanssa.

Tämä suuntakulma taas vaikuttaa siihen, kuinka nopeasti vapaa radikaalipari palaa takaisin neutraaliksi kryptokromiproteiiniksi ja lähettää signaalin linnun hermojärjestelmään.

Näin punarinta pystyy määrittämään, millä leveysasteella se kulloinkin on, joskaan ei varsinaisesti pohjois-etelä-suuntaa eikä napojen polaarisuutta. Magneettikentän voimakkuuden määrittämisessä se hyödyntää ylänokassaan ja korvissaan olevia nanokokoisia magnetiittipaloja ja -liuskeita.

Oxfordin yliopiston kemian professorin **Peter Horen** mukaan punarinnan silmänsä FAD:iin synnyttämä elektroninen kvanttitala voi säilyä jopa mikrosekunteja vetisessä, huoneenlämpötilaisessa ja normaalipaineisessa kammiossaan.

Tämä antaakin pohdittavaa kvanttietokoneen kehittelijöille. □

Kirjoittaja on fyysikko ja tiedetoimittaja. jarmowallenius@hotmail.com