

LAURI NUMMENMAA

FT, professori

Aalto-yliopisto, neurotieteen ja
lääketieteellisen tekniikan laitos
Turun yliopisto, psykologian
laitos ja Turun PET-keskus
lauri.nummenmaa@aalto.fi

Tunteiden neurobiologia

- Tunteet ohjaavat käyttäytymistämme säätelemällä keskus- ja ääreishermoston tilaa.
- Tunneilmaisujen avulla saamme jatkuvasti tietoa toistemme aikeista ja tavoitteista.
- Pelkojärjestelmä reagoi ympäristön havaittuihin ja koettuihin uhkiin ja säätelee niiden oppimista.
- Palkkiojärjestelmä säätelee motivoitua toimintaa, mielihyvää ja palkkioista oppimista.
- Tunteisiin liittyvät keholiset muutokset ovat tietoisten tunnekokemusten perustana.
- Tunnekokemukset auttavat meitä hienosäätämään automaattisia tunnereaktioita tietoisten toiminnanohjausmekanismien avulla.

On lähes mahdotonta kuvitella elämää ilman tunteita. Erilaiset tunteet, aina arkipäivän pienistä iloista lähiomaisten kuoleman aiheuttamaan musertavaan suruun, ovat osa jokapäiväistä elämäämme. Vaikka tunteeton elämä saattaisi arkipäivän vastoinikäymisten keskellä tuntua houkuttelevalta, elämä ilman tunteita kävisi hyvin pian mahdottomaksi: Saisiko esimerkiksi pelkkä järkeily meidät kavahtamaan kimppeumme hyökkäävää vihaista koiraa? Entäpä osaisimmeko varoa pilaantunutta ruokaa, jos sen pelkkä haju ei aiheuttaisi meissä voimakkaita inhon värityksiä? Tai olisiko meillä minkäänlaisia pitkäkestoisia ihmissuhteita, jos yhdessäolo ystävien kanssa ei aiheuttaisi voimakasta mielihyvää?

Nykytutkijat ovat yksimielisiä tunteiden hyödyllisyydestä sekä ihmisille että eläimille. Tunnereaktiot (kuva 1) säätelevät sekä keskus- ja

alueet kykenevät erottelamaan tunteisiin liittyvät kasvonilmeet neutraaleista kasvoista noin 150 millisekunnissa (2). Tunteisiin liittyvät motoriset vasteet, kuten kasvonilmeet, viriävät puolestaan noin puolessa sekunnissa (3). Vaikka tunteet ovatkin automaattisia, ne eivät ole refleksien kaltaisia muuttumattomia toimintaohjelmia. Ihmisillä on huomattava kyky säädellä omia tunteitaan.

Tunteiden merkitystä toiminnanohjaukselle kuvaa hyvin se, että tunnejärjestelmän häiriöitä liittyy useisiin vakaviin psykiatriisiin häiriötiloihin, kuten masennukseen, skitsofreniaan ja yleistyneeseen ahdistushäiriöön. Mutta myös normaalivaihtelun piiriin kuuluvalla tunne-elämällä on merkittävä vaikutus hyvinvointiimme. Siinä missä myönteisten tunteiden toistuva kokeminen johtaa parempaan terveyteen, laajempiin sosiaalisiin verkostoihin, sosiaaliseen asemaan ja koettuun terveyteen (4), kielteisten tunteiden toistuva kokeminen on merkittävä riskitekijä somaattiselle ja psyykkiselle terveydelle (5).

Tunnejärjestelmät kykenevät säätelemään käyttäytymistämme salamannopeasti.

ääreishermoston tilaa että käyttäytymistä. Niiden tavoitteena on tehostaa automaattisesti toimintaamme tilanteissa, joihin sisältyy erilaisia uhkia ja mahdollisuuksia (1). Tunteiden kesto on yleensä rajallinen, muutamista sekunneista tunteihin, ja tämä erottaa tunteet pidempikestoisista mielialoista. Tunteiden voimakkuus myös vaihtelee melko huomaamattomista mielihyvän kokemuksista täysin lamaannuttaviin paniikki-reaktioihin.

Tunnejärjestelmät kykenevät säätelemään käyttäytymistämme salamannopeasti. Esimerkiksi kasvonilmeitä käsittelevät ohimolohkon

Mistä tunteet tulevat?

Nykyaikainen tunnetutkimus perustuu Charles Darwinin tekemiin havaintoihin ihmisten ja muiden eläinlajien järjestelmällisesti käyttämisestä tunneilmauksista (6). Darwinin esittämä ja lukuisten tutkijoiden myöhemmin vahvistama havainto oli, että keskeiset tunneilmaukset ja ennen kaikkea niiden taustalla olevat hermostolliset mekanismit ovat pysyneet hämmästyttävän samankaltaisina lajinkehityksen aikana (kuva 2). Emme voikaan esimerkiksi yrittää kokea sellaisia tunteita, joiden tuottamiselle lajinkehitys ei ole muokannut vaadittavaa hermostollista mekanismia.

KIRJALLISUUTTA

- 1 Nesse RM. Evolutionary explanations of emotions. *Hum Nat* 1990;1:261–89.
- 2 Sugase Y, Yamane S, Ueno S, Kawano K. Global and fine information coded by single neurons in the temporal visual cortex. *Nature* 1999;400:869–73.
- 3 Dimberg U. Facial reactions to facial expressions. *Psychophysiology* 1982;19:643–7.
- 4 Lyubomirsky S, King L, Diener E. The benefits of frequent positive affect: Does happiness lead to success? *Psychol Bull* 2005;131:803–55.
- 5 Suinn RM. The terrible twos - Anger and anxiety - Hazardous to your health. *Am Psychol* 2001;56:27–36.
- 6 Darwin C. Expression of the emotions in man and animals. Lontoo: John Murray 1872.
- 7 Ekman P. An argument for basic emotions. *Cogn Emot* 1992;6:169–200.
- 8 Ekman P, Levenson RW, Friesen WV. Autonomic nervous-system activity distinguishes among emotions. *Science* 1983;221:1208–10.
- 9 Jack RE, Garrod OGB, Yu H, Caldara R, Schyns PG. Facial expressions of emotion are not culturally universal. *Proc Natl Acad Sci U S A* 2012;109:7241–4.
- 10 Shaw P ym. Differential effects of lesions of the amygdala and prefrontal cortex on recognizing facial expressions of complex emotions. *J Cogn Neurosci* 2005;17:1410–9.
- 11 Nummenmaa L, Glerean E, Hari R, Hietanen JK. Bodily maps of emotions. *Proc Natl Acad Sci U S A* 2014;111:646–51.

Ihmisen perustunteita ovat viha, pelko, inho, ilo (tai mielihyvä), suru ja hämmästys. Koska tunteita aiheuttavat tapahtumat sekä eri tunteisiin liittyvät kokemukset ja keholliset reaktiot ovat samanlaisia kaikkialla maailmassa, tunteiden taustalla täytyy olla biologisesti määritynyt, lajinkehityksessä muovautunut järjestelmä, joka on ainakin osittain samanlainen taksonomisesti meille läheisimpien nisäkkäiden kanssa (7,8). Lukuisat tutkimukset ovat osoittaneet perustunteiden olevan yleismaailmallisia, vaikka niihin liittyvissä ilmauksissa onkin oppimisesta johtuvia, kulttuurikohtaisia eroja (9). Ihmisten tunne-elämä on kuitenkin monimutkaisempaa kuin esimerkiksi rotan, ja tunnejärjestelmien plastisiteetin ansiosta voimme oppia kokemaan ja ilmaisemaan myös kateuden ja halveksunnan kaltaisia monimutkaisempia tunteita (10,11). Nämä tunteet pohjautuvat todennäköisesti perustunteita tuottavien radastojen mukautuneeseen toimintaan, mutta nämä hermostolliset mekanismit tunnetaan vielä huonosti.

Tunteet näkyvät usein ulospäin, halusimme sitä tai emme. Lähes kaikkialla maailmassa kuhunkin tunteeseen liittyy tyypillinen yhdistelmä kasvonilmeitä, kehon asentoja ja äänenpainoja (12,13). Tällainen yleismaailmallinen tunteiden kieli auttaa toisten käyttäytymisen ennakoimisesta ja helpottaa ryhmässä toimimista: toisten tunneilmauksien avulla osaamme kiertää vihaiset henkilöt kaukaa ja toisaalta tiedämme, että

hymyilevien ystävien lähestyminen on yleensä turvallista ja palkitsevaa.

Tunteet myös tarttuvat herkästi ihmisestä toiseen. Kun näemme ystävämme nyrpistävän nenäänsä pilaantunutta ruoka-annosta haistaessaan, aivoissamme aktivoituu sama järjestelmä kuin jos kokisimme inhon itse (14). Tällainen tunteiden automaattinen simuloiminen tai peilaaminen auttaa meitä asettumaan ”samalle aallonpituudelle” toisten ihmisten kanssa, ja aivojen tasolla näin myös kirjaimellisesti tapahtuu – ainakin hitailla taajuuksilla (15). Meidän ei siis tarvitse ponnistella päätelläksemme, miltä toisista tuntuu, vaan kasvonilmeet ja muut tunneilmaisut tarjoavat suoran väylän toisten sisäisen maailman ymmärtämiseen.

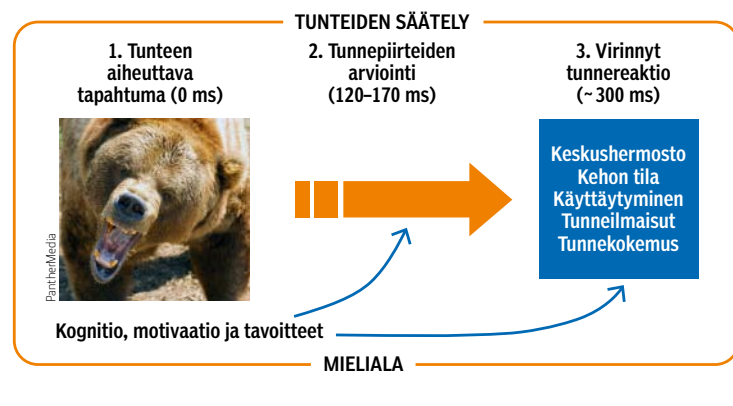
Tunteet ja aivot

Varhaisissa eläintutkimuksissa havaittiin, että tunteet perustuvat aivojen homeostaattisesta säätelystä vastaaviin radastoihin. Walter Hessin lääketieteen Nobel-palkintoon johtaneet tutkimukset osoittivat, että hypotalamuksen eri alueiden sähköinen stimulaatio laukaisi kissoissa erilaisia tunnereaktiota vihasta pelkoon. Aivojen kuorikerroksen merkitys näiden automaattisten vasteiden ohjaamisessa on tunnettu myös pitkään. Erityisesti otsalohkon vaurioittaminen saa koe-eläimet osoittamaan ”tekoraivoa” (sham rage) esimerkiksi elottomia esineitä kohtaan (16). Kuorikerroksen säätelyn hävittäminen siis vapautti hypotalaamiset järjestelmät reagoimaan ympäristöön hallitsemattomasti.

Ihmisten tunteiden aivoperustan tutkimus eteni merkittävästi 1990-luvun alussa, kun toiminnalliset kuvantamismenetelmät mahdollistivat terveiden vapaaehtoisten aivojen toiminnan tutkimisen in vivo. Ensimmäiset kuvantamistutkimukset vahvistivat, että ihmisten tunteet perustuvat homeostaattiseen säätelyyn (keskiaivot, hypotalamus) sekä kehosta tulevien somaattisten ja interoseptiivisten (tuntoaivo-kuori, insula, cingulum-poimun etuosa) signaalien käsittelyyn erikoistuneiden alueiden toimintaan (17). Tunteiden voimakas edustus ”kehollisilla” aivojen alueilla selittää todennäköisesti sen, miksi eri tunteet kirjaimellisesti tunnetaan kehossa erilaisilta (11). Vaikka homeostaattiset säätelymekanismit ovat tärkeä osa kaikkia tunteita, jokaisen perustunteen taustalla on oma kemiallisesti, anatomisesti ja toiminnallisesti eriytynyt radastonsa (18). Kuhunkin

KUVA 1.

Skemaattinen esitys tunnereaktiosta.



- 12 Sauter DA, Eisner F, Ekman P, Scott SK. Cross-cultural recognition of basic emotions through nonverbal emotional vocalizations. *Proc Natl Acad Sci U S A* 2010;107:2408–12.
- 13 Ekman P, Friesen WV. Constants across cultures in face and emotion. *J Pers Soc Psychol* 1971;17:124–9.
- 14 Wicker B ym. Both of us disgusted in My Insula: The common neural basis of seeing and feeling disgust. *Neuron* 2003;40:655–64.
- 15 Nummenmaa L ym. Emotions promote social interaction by synchronizing brain activity across individuals. *Proc Natl Acad Sci U S A* 2012;109:9599–604.
- 16 Cannon WB, Britton SW. Studies on the conditions of activity in endocrine glands XV. Pseudofunctional secretion. *Am J Physiol* 1925;72:283–94.
- 17 Damasio AR ym. Subcortical and cortical brain activity during the feeling of self-generated emotions. *Nat Neurosci* 2000;3:1049–56.
- 18 Panksepp J. *Affective neuroscience: The foundations of human and animal emotions*. Oxford: Oxford University Press 1998.
- 19 Saarimäki H, Gotsopoulos A, Jääskeläinen IP ym. Discrete neural signatures of basic emotions. *Cereb Cortex* 2015, verkkosiv. ensin 29.4.2015, pii: bhv086
- 20 Adolphs R, Tranel D, Damasio H, Damasio A. Impaired recognition of emotion in facial expressions following bilateral damage to the human amygdala. *Nature* 1994;372:669–72.
- 21 Calder AJ, Keane J, Manes F, Antoun N, Young AW. Impaired recognition and experience of disgust following brain injury. *Nat Neurosci* 2000;3:1077–8.
- 22 LeDoux JE. Emotion circuits in the brain. *Annu Rev Neurosci* 2000;23:155–84.
- 23 Klüver H, Bucy PC. Preliminary analysis of functions of the temporal lobes in monkeys. *Arch Neurol Psychiatry* 1939;42:979–1000.
- 24 Feinstein JS ym. Fear and panic in humans with bilateral amygdala damage. *Nat Neurosci* 2013;16:270–2.
- 25 Salimpoor VN, Benovoy M, Larcher K, Dagher A, Zatorre RJ. Anatomically distinct dopamine release during anticipation and experience of peak emotion to music. *Nat Neurosci* 2011;14:257–62.
- 26 Siebert M, Markowitsch HJ, Bartel P. Amygdala, affect and cognition: evidence from 10 patients with Urbach-Wiethe disease. *Brain* 2003;126:2627–37.
- 27 Vuilleumier P. How brains beware: neural mechanisms of emotional attention. *Trends Cogn Sci* 2005;9:585–94.

perustunteeseen liittyy keskenään erilainen hermostollinen ”sormenjälki”, joita mittaamalla on myös mahdollista luotettavasti sanoa, miltä henkilöstä kulloinkin tuntuu (19).

Tunteiden taustalla on laajoja hajautettuja hermoverkkoja, jotka kattavat sekä sensorisia, assosiativisia että motorisia alueita (kuva 3). Yhtä tunnetta ei voida paikantaa ainoastaan tiettyyn paikkaan aivoissa, mutta tiettyjen alueiden vaurioituminen voi vaikeuttaa valikoidusti yksittäisten tunteiden tunnistamista ja kokemista. Esimerkiksi amygdalaan eli manteliumakkeen kohdistuneiden vaurioiden tiedetään vaikeuttavan pelon (20) ja insulan vaurioitumisen inhon (21) tunnistamista ja kokemista. Kumpikaan alueista ei kuitenkaan yksinään riitä kumman tunteen käsittelemiseen.

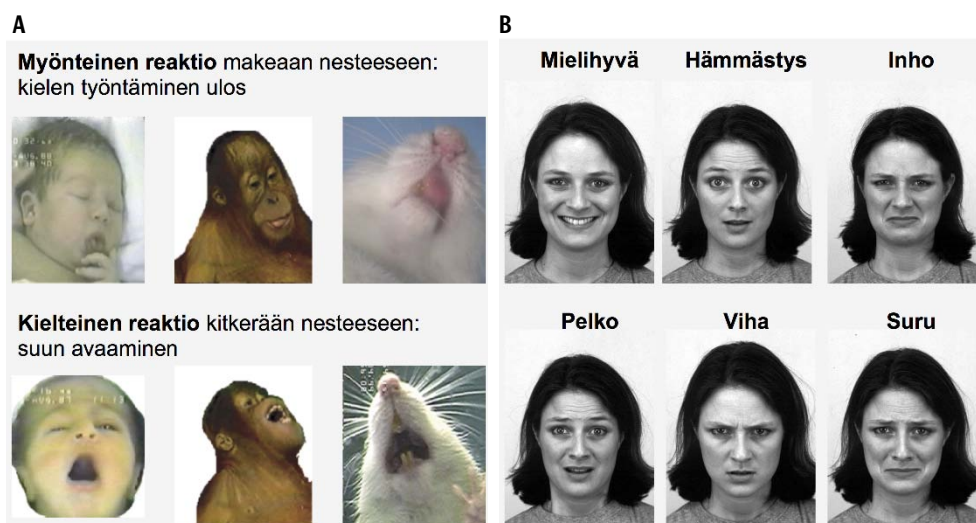
Pelkojärjestelmä

Ihmisen ja eläintutkimuksen perusteella tunnejärjestelmistä tunnetaan parhaiten pelko- ja palkkiojärjestelmä. Pelkojärjestelmä edistää hyvinvointia tehostamalla ympäristön nykyisten ja tulevien fyysisten tai psyykkisten haittojen havaitsemista ja käynnistämällä tarvittaessa automaattisia pako- ja puolustautumisreaktioita

(22). Jo 1900-luvun alun apinatutkimuksissa havaittiin, että ohimolohkon etuosan (jossa amygdala sijaitsee) vaurioittaminen muutti apinoiden sosiaalista käyttäytymistä tehden niistä myös lähes pelottomia (23). Ihmisillä tehty potilastutkimukset ovat vahvistaneet, että amygdala on keskeinen ympäristöstä havaittujen uhkien tunnistamiselle ja myös pelon subjektiivisen kokemuksen syntymiselle. Potilaat, joilla on molemminpuolinen amygdalavaurio, eivät koe pelkoa (24) eivätkä myöskään tunnista toisten ihmisten pelon ilmeitä (20). Löydös on sikäli hämmästyttävä, että amygdala ei varsinaisesti ole aivojen sensorinen alue: pelkkä aisti-informaatio tai kognitiivinen päättely ei selvästikään riitä tunteiden tunnistamiseen ympäristöstä. Amygdala ei kuitenkaan ole ainoastaan ”pelokeskus”, vaan se käsittelee myös esimerkiksi myönteisiä tunteita (19,25), ja monilla amygdalavauriopotilailla kaikkien tunteiden tunnistaminen on vaikeutunut (26). Kaikenlaisen pelkoon ei myöskään tarvita amygdalaa. Elimistön sisäisen tilan äkillisten muutoksien, esimerkiksi veren happipitoisuuden putoamisen, aiheuttama paniikkireaktio ei edellytä amygdalan toimintaa (24). Aivoissa onkin todennäköisesti

KUVA 2.

A. Yksinkertaiset miellyttävän (makea) ja epämiellyttävän (kitkerä) nesteen maistamisesta seuraavat kasvonilmeet ovat huomattavan samanlaisia vastasyntyneillä ihmislapsilla, orangeilla ja rotilla (muokattu lähteestä 69). B. Aikuisilla ihmisillä kuuteen perustunteeseen liittyy kuhunkin omanlaisensa kasvonilme. Ilmeet ovat hyvin samanlaisia eri kulttuureissa (muokattu lähteestä 70).



julkaistaan Elsevier Ltd:n luvalla

julkaistaan Karoliinisen Instituutin luvalla

- 28 Schupp HT ym. Selective visual attention to emotion. *J Neurosci* 2007;27:1082–9.
- 29 Nummenmaa L, Hyytiäinen J, Calvo MG. Eye movement assessment of selective attentional capture by emotional pictures. *Emotion* 2006;6:257–68.
- 30 Rosen JB, Schulkin J. From normal fear to pathological anxiety. *Psychol Rev* 1998;105:325–50.
- 31 Etkin A, Wager TD. Functional neuroimaging of anxiety: A meta-analysis of emotional processing in PTSD, social anxiety disorder, and specific phobia. *Am J Psychiatr* 2007;164:1476–88.
- 32 Bayer HM, Glimcher PW. Midbrain dopamine neurons encode a quantitative reward prediction error signal. *Neuron* 2005;47:129–41.
- 33 Schultz W. Predictive reward signal of dopamine neurons. *J Neurophysiol* 1998;80:1–27.
- 34 Small DM, Jones-Gotman M, Dagher A. Feeding-induced dopamine release in dorsal striatum correlates with meal pleasantness ratings in healthy human volunteers. *Neuroimage* 2003;19:1709–15.
- 35 Koeppe MJ ym. Evidence for striatal dopamine release during a video game. *Nature* 1998;393:266–8.
- 36 Gosnell BA, Levine AS. Reward systems and food intake: role of opioids. *Int J Obes* 2009;33:S54–8.
- 37 Nathan PJ, Bullmore ET. From taste hedonics to motivational drive: central mu-opioid receptors and binge-eating behaviour. *Int J Neuropsychopharmacol* 2009;12:995–1008.
- 38 Noonan MP, Mars RB, Rushworth MFS. Distinct roles of three frontal cortical areas in reward-guided behavior. *J Neurosci* 2011;31:14399–412.
- 39 Bechara A, Tranel D, Damasio H, Damasio AR. Failure to respond autonomically to anticipated future outcomes following damage to prefrontal cortex. *Cereb Cortex* 1996;6:215–25.
- 40 Volkow ND ym. Decreases in dopamine receptors but not in dopamine transporters in alcoholics. *Alcohol Clin Exp Res* 1996;20:1594–8.
- 41 Volkow ND ym. Low level of brain dopamine D2 receptors in methamphetamine abusers: association with metabolism in the orbitofrontal cortex. *Am J Psychiatry* 2001;158:2015–21.
- 42 Martinez D ym. Deficits in dopamine D(2) receptors and presynaptic dopamine in heroin dependence: commonalities and differences with other types of addiction. *Biol Psychiatry* 2012;71:192–8.
- 43 Joutsa J ym. Mesolimbic dopamine release is linked to symptom severity in pathological gambling. *Neuroimage* 2012;60:1992–9.

useita erilaisia toisiinsa limittyneitä pelkojärjestelmiä, jotka ovat erikoistuneet erilaisten uhkatilanteiden hallitsemiseen.

Afferenttien ja efferenttien kytkentöjensä avulla amygdala saa tietoa eri aistipiireistä, ja palautekytkentöjensä avulla se pystyy vaikuttamaan sekä tunnereaktioiden tuottamiseen hypotalamuksen ja talamuksen tasolla, mutta toisaalta myös aistitiedon käsittelemiseen (27). Esimerkiksi amygdalan yhteydet näköaivokuorelle mahdollistavat nopean uhkien tunnistamisen ja näihin liittyvän aistitiedon käsittelyn vahvistamisen aisti- ja tarkkaavaisuuspiireissä (28). Siksi tarkkaavaisuutemme poimiiikin voimakkaasti tunteita herättävät – eli hyvinvoinnin kannalta merkitykselliset – ympäristön tapahtumat helpommin kuin neutraalit, ja tämä tehostaa suojautumista ympäristön uhkia vastaan (29).

Muuttuvissa ympäristöissä eläville lajeille on tärkeää, että pelkojärjestelmä sekä reagoi uhkiin että auttaa organismia oppimaan ympäristön tyypilliset uhkatilanteet, jotta niitä voidaan tulevaisuudessa välttää. Amygdala ja sen yhteydet hippokampukseen ovat keskeisiä pelkoehdollistumiselle ja yleisesti pelkojen oppimiselle (22).

Pelkojen oppiminen on poikkeuksellisen tehostettua verrattuna mihin tahansa muuhun

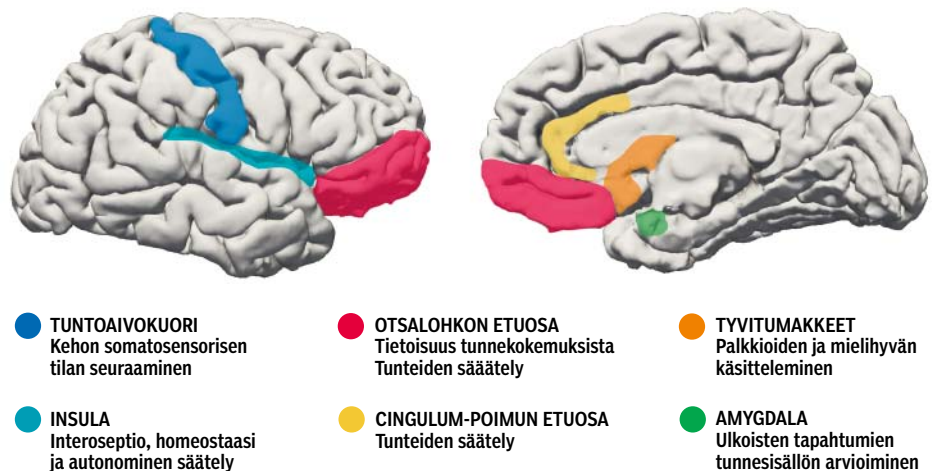
oppimiseen. Tällä muovautuvuudella on myös kääntöpuolensa: koska pelkojärjestelmä on niin sensitiivinen, tarpeettomien pelkojen yliherkkä oppiminen saattaa altistaa esimerkiksi ahdistusperäisille häiriöille (30). Pelkojärjestelmän ja ennen kaikkea sitä säätelevien otsalohkon alueiden toiminnan muutokset ovatkin keskeisiä monissa psykiatrisissa häiriöissä, erityisesti yleistyneessä ahdistuneisuushäiriössä, paniikkihäiriössä ja fobioissa (31).

Palkkiojärjestelmä

Palkkiojärjestelmä säätelee motivaatiota ja ympäristön hedonisten ominaisuuksien arvioimista. Tämän lisäksi se on keskeinen oppimista säätelevä järjestelmä. Sen keskeiset radastot ovat keskiaivot ja accumbens-tumakkeen yhdistävä mesolimbinen dopamiiniradasto sekä keskiaivot otsalohkoon yhdistävä mesokortikaalinen dopamiiniradasto. Tyvitumakkeiden dopamiinivaste heijastaa ihmisen tai eläimen odottaman ja tosiasiallisesti saaman palkkion välistä suhdetta. Jos palkkio on odotusta suurempi, dopamiinin erityys lisääntyy. Täsmälleen odotetun suuruisen palkkio puolestaan ei aiheuta lainkaan dopamiinin eritystä, ja odotettua pienempi palkkio vähentää dopamiinin eritystä perus-

KUVA 3.

Tunteiden taustalla olevat keskeiset aivojen alueet. Insula sijaitsee todellisuudessa Sylviusen uurteen sisällä, samoin tyvitumakkeiden sijainti on summittainen, koska ne eivät sijaitse täsmälleen keskilinjassa.



Yhtä tunnetta ei voida paikantaa ainoastaan tiettyyn paikkaan aivoissa.

- 44 Volkow ND, Wang GJ, Fowler JS, Tomasi D, Baler R. Food and drug reward: overlapping circuits in human obesity and addiction. *Curr Top Behav Neurosci* 2012;11:1–24.
- 45 Bozarth MA, Wise RA. Intracranial self-administration of morphine into the ventral tegmental area in rats. *Life Sci* 1981;28:551–5.
- 46 Pecina S, Berridge KC. Opioid site in nucleus accumbens shell mediates eating and hedonic 'liking' for food: map based on microinjection Fos plumes. *Brain Res* 2000;863:71–86.
- 47 Heinz A ym. Correlation of stable elevations in striatal mu-opioid receptor availability in detoxified alcoholic patients with alcohol craving - A positron emission tomography study using carbon 11-labeled carfentanil. *Arch Gen Psychiatry* 2005;62:57–64.
- 48 Karlsson HK, Tuuluri JJ, Tuominen L ym. Weight loss after bariatric surgery normalizes brain opioid receptors in morbid obesity. *Mol Psychiatry* 2015, verkossa ensin 13.10.2015. doi: 10.1038/mp.2015.153
- 49 Trezza V, Damsteegt R, Achterberg EJM, Vanderschuren L. Nucleus accumbens mu-opioid receptors mediate social reward. *J Neurosci* 2011;31:6362–70.
- 50 Fabre-Nys C, Meller RE, Keverne EB. Opiate antagonists stimulate affiliative behaviour in monkeys. *Pharmacol Biochem Behav* 1982;16:653–9.
- 51 Nummenmaa L ym. Adult attachment style is associated with cerebral μ -opioid receptor availability in humans. *Human Brain Mapping* 2015;36:3621–8.
- 52 Ross J ym. The characteristics of heroin users entering treatment: findings from the Australian Treatment Outcome Study (ATOS). *Drug Alcohol Rev* 2005;24:411–8.
- 53 Bechara A, Damasio H, Tranel D, Damasio AR. Deciding advantageously before knowing the advantageous strategy. *Science* 1997;275:1293–5.
- 54 Adolphs R, Damasio H, Tranel D, Cooper G, Damasio AR. A role for somatosensory cortices in the visual recognition of emotion as revealed by three-dimensional lesion mapping. *J Neurosci* 2000;20:2683–90.
- 55 Pourtois G ym. Dissociable roles of the human somatosensory and superior temporal cortices for processing social face signals. *Eur J Neurosci* 2004;20:3507–15.

tason alapuolelle (32,33). Tällainen mekanismi todennäköisesti tehostaa oppimista ja säätelee motivaatiota.

Dopamiinijärjestelmä reagoi biologisesti merkityksellisiin palkkioihin, kuten syömiseen (34), mutta myös abstrakteihin palkkioihin, kuten musiikkiin (25) tai videopelien pelaamiseen (35). Järjestelmä siis seuraa ympäristön tapahtumien hedonista merkitystä niiden fyysisistä ominaisuuksista riippumatta, ja muuttaa motivaatiotilaa suhteessa saavutettuihin palkkioihin. Dopaminergiseen järjestelmään vaikuttavat huumausaineet, kuten metamfetamiini ja kokaiini, lisäävätkin erityisesti ympäristön tutkimista ja yleistä motivaatiotilaa (36,37). Tyvitumakkeet ovat myös yhteydessä otsalohkoon mesokortikaalisen dopamiiniradaston kautta. Otsalohkon lateraaliset orbitaaliset alueet ovat keskeisiä palkkioihin liittyvän oppimisen kannalta, kun taas mediaaliset prefrontaaliset alueet osallistuvat palkkioiden suuruuden ja esiintyvyyden arvioimiseen (38). Otsalohkon ja erityisesti sen etuosan vauriot johtavatkin usein heikentyneeseen kykyyn oppia, mitkä asiat ovat palkitsevia ja mitkä eivät (39).

Palkkiojärjestelmän dopaminerginen radasto on useiden riippuvuushäiriöiden taustalla. Alkoholi- ja monet huumeriippuvuudet ovat yhteydessä tyypin 2 dopamiinireseptorien määrän vähenemiseen tyvitumakkeissa (40,41,42). Muutokset eivät välttämättä aiheudu pelkästään päihitteiden farmakologista vaikutuksista, sillä esimerkiksi peliriippuvuusoireiden voimakkuus on yhteydessä dopamiinijärjestelmän toiminnan muutoksiin (43). Huumausaineiden käytön aiheuttama jatkuva ”ylistimulaatio” voi siis johtaa neuroreseptoritasojen laskuun, mikä puolestaan lisää entisestään motivaatiota huumausaineen käyttöön (44) tai yleisesti riippuvuuskäyttäytymiseen.

Siinä missä palkkiojärjestelmän dopaminerginen osa säätelee motivaatiota ja erilaisten palkkioiden haluamista, järjestelmän opioiderginen osa liittyy keskeisesti mielihyvän tuottamiseen. Opioidien annostelu suoraan palkkiojärjestelmään on sinällään palkitsevaa (45), ja

accumbens-tumakkeessa on tarkasti määräytynyt ”mielihyväkartta”: opioidien injisointi tiettyille alueille aiheuttaa voimakkaita mielihyväreaktioita, kun taas toisten alueiden stimuloiminen heikentää mielihyvää (46).

Opioidijärjestelmään vaikuttavat huumausaineet ja lääkkeet, kuten heroini ja morfiini, lisäävät mielihyvän kokemuksia, mutta eivät juurikaan muuta tavoitteellista motivaatiotilaa (36,37). Opioidijärjestelmän toiminnan muutokset ovat keskeisiä alkoholiriippuvuudessa (47) ja liikalihavuudessa (48). Pienentyneiden opioiditasojen vuoksi esimerkiksi liikalihavat henkilöt eivät kenties koe syömisestä odotta- maansa mielihyvää, ja tämä voi johtaa ylensyö- tiin toivotun mielihyvätason saavuttamiseksi.

Palkkiojärjestelmän opioiderginen osa on todennäköisesti myös sosiaalisen yhteenkuulu- vuuden ja sosiaalisen käyttäytymisen taustalla. Sosiaalinen kanssakäyminen on itsessään pal- kitsevaa – todennäköisesti juuri siksi, että yh- teistyö ja ryhmässä toimiminen on lajillemme niin tärkeää (49). Opioidijärjestelmän toiminta säätelee myös esimerkiksi sosiaalisten suhteiden muodostamista kädellisillä (50), ja yksilölliset erot opioidijärjestelmän toiminnassa ovat yhteydessä esimerkiksi siihen, kuinka läheisiä ihmissuhteita meillä on tapana muodostaa (51). Tämän vuoksi ei olekaan yllättävää, että opiaat- tien väärinkäyttö johtaa usein antisosiaaliseen käyttäytymiseen (52).

Keholliset tunteet ja tietoiset tunnekokemukset

Tietoiset tunnekokemukset tuovat kognition tunteiden avuksi: kun tiedämme olevamme ahdistuneita, voimme koettaa etsiä syitä ahdistukseen, yrittää poistaa ahdistuksen laukaissut- ta tekijää tai vaikkapa hankkia ulkopuolista apua ahdistuneisuuden lievittämiseen. Kielteiset tunteet todennäköisesti tuntuvat pahalta juuri siksi, että motivaatio hankkiutua niistä eroon ratkaisemalle kielteisen tunteen aiheutta- ma uhkatilanne on voimakas.

Tunteet voivat myös auttaa meitä päätöksen- teossa silloin, kun emme pysty vielä rationaa- liseen (tai kognitiiviseen) päätöksentekoon. Iowan uhkapelitehtävissä koehenkilöiden teh- tävänä on nostaa neljästä pakasta kortteja, joi- den kääntöpuoli määrittelee koehenkilön saa- man palkkion. Tehtävän alussa koehenkilö ei tiedä, että kortteja kannattaa nostaa aina järjes-

- 56 Critchley HD, Wiens S, Rotshtein P, Ohman A, Dolan RJ. Neural systems supporting interoceptive awareness. *Nat Neurosci* 2004;7:189–95.
- 57 Contreras M, Ceric F, Torrealba F. Inactivation of the interoceptive insula disrupts drug craving and malaise induced by lithium. *Science* 2007;318:655–8.
- 58 Heims HC, Critchley HD, Dolan R, Mathias CJ, Cipolotti L. Social and motivational functioning is not critically dependent on feedback of autonomic responses: neuropsychological evidence from patients with pure autonomic failure. *Neuropsychologia* 2004;42:1979–88.
- 59 Damasio A, Damasio H, Tranel D. Persistence of feelings and sentience after bilateral damage of the insula. *Cereb Cortex* 2013;23:833–46.
- 60 Gross JJ. Antecedent- and response-focused emotion regulation: Divergent consequences for experience, expression, and physiology. *J Pers Soc Psychol* 1998;74:224–37.

Tunteiden säätely ei siis ole haitallista vaan ennen kaikkea hyödyllistä.

- 61 Cole PM, Martin SE, Dennis TA. Emotion regulation as a scientific construct: Methodological challenges and directions for child development research. *Child Dev* 2004;75:317–33.
- 62 Davidson RJ. Affective style and affective disorders: Perspectives from affective neuroscience. *Cogn Emot* 1998;12:307–30.
- 63 Davidson RJ, Putnam KM, Larson CL. Dysfunction in the neural circuitry of emotion regulation – A possible prelude to violence. *Science* 2000;289:591–4.
- 64 Buhle JT ym. Cognitive reappraisal of emotion: A meta-analysis of human neuroimaging studies. *Cereb Cortex* 2014;24:2981–90.
- 65 Bechara A, Tranel D, Damasio H. Characterization of the decision-making deficit of patients with ventromedial prefrontal cortex lesions. *Brain* 2000;123:2189–202.
- 66 Berkowitz RL, Coplan JD, Reddy DP, Gorman JM. The human dimension: How the prefrontal cortex modulates the subcortical fear response. *Rev Neurosci* 2007;18:191–207.
- 67 Volkow ND ym. Low dopamine striatal D2 receptors are associated with prefrontal metabolism in obese subjects: possible contributing factors. *Neuroimage* 2008;42:1537–43.

telmällisesti tietyistä pakasta; useimmat koehenkilöt kuitenkin huomaavat tämän ennemmin tai myöhemmin. Ihon sähkönjohtokyky (joka heijastelee tunteiden aiheuttamia fysiologisia muutoksia kehossa) kasvaa yleensä koehenkilön nostettua kortteja ”huonoista” pakoista. Terveillä verrokeilla ihon sähkönjohtokyvyn vasteet alkavat näkyä jo ennen huonosta pakasta nostamista, ja nämä ennakoivat vasteet näkyvät paljon ennen kuin koehenkilöt oppivat, mikä pakka on heidän kannaltaan edullinen (53). Tiedostamattomat, tunteiden tarjoamat vihjeet voivat siis ohjata päätöksentekoa ennen tietoista ajattelua ja päättelyä.

Otsalohkovauriopotilaiden ihon sähkönjohtokyky muuttuu myös, kun he nostavat kortteja huonoista pakoista. Heillä on kuitenkin tästä huolimatta suuria vaikeuksia oppia, miten tehtävässä tulee toimia, ja heidän ihon sähkönjohtokäyrässään ei havaita huonoja valintoja enna-

koivia vasteita (39). Heidän aivonsa eivät siis kykene yhdistelemään huonoista valinnoista seuraavia kielteisiä, kehollisia tunnekokemuksia valintaprosessiin, eivätkä heidän tunteensa näin voi tehostaa päätöksentekoa.

Otsalohko ja aivojen keskikiljan alueet ovat keskeisiä tietoisten tunnekokemusten synnylle, koska ne voivat yhdistellä tietoa esimerkiksi tunteiden aiheuttamista somatosensorisista muutoksista (17,19). Kaikkiin perustunteisiin liittyy omanlaisensa kehon toimintojen muutoksista koostuva ”sormenjälki”, ja näiden kehon muutosten havaitseminen voi olla ainakin osittain tietoisten tunnekokemusten taustalla (11,19). Tuntoaistimuksia koodaavan tuntoaivo-kuoren vauriot (54) sekä tuntoaivo-kuoren deaktivoiminen transkraniaalisen magneettistimulaation avulla heikentävätkin kykyämme toisten tunneilmausten havaitsemiseen (55).

Somatosensorisen järjestelmän lisäksi myös kehon sisäistä tilaa – esimerkiksi sydämen syketasoa – seuraava interoseptiivinen järjestelmä on tärkeä tunteiden somaattisen kokemuksen tuottamiselle (56). Tällainen interoseptio on keskeistä tunteiden kokemiselle, mutta toden-

näköisesti myös riippuvuuskäyttäytymisen muodostumiselle. Interoseptiiviseen järjestelmään keskeisesti kuuluvan insulan vaurioituminen tai kemiallinen deaktivoituminen vähentää merkittävästi jo olemassa olevaa riippuvuuskäyttäytymistä, kuten amfetamiinin käyttöä (57). Kun päihteiden käyttöön liittyvät miellyttävät tunnekokemukset häviävät insulavaurion myötä, ne eivät myöskään ylläpidä riippuvuuskäyttäytymistä. Tunnekokemukset eivät kuitenkaan synny pelkästään kehon toimintojen perusteella. Jopa potilaat, joilla on vakava autonomisten hermojen rappeuma, kokevat tunteita lähes normaalisti (58), eikä täydellinen interoseptiivisten insulan alueiden tuhoutuminenkaan poista kokonaan tunnekokemuksia (59). Todennäköisesti tunnekokemusta varten yhdistellään sekä aistitietoa, muistijälkiä että interoseptiivista ja somatosensorista tietoa.

Tunteiden sääteleminen

Automaattisesti viriävät tunteet voivat usein olla ristiriidassa tavoitteidemme kanssa. Työhaastattelua edeltävä jännitys tai toisten kuljettajien piittaamattomuuden aiheuttama ”tieräivo” eivät varmastikaan edistä senhetkisiä tavoitteitamme työpaikan saamisesta tai turvallisesta perille pääsemisestä. Kun tulemme tietoiseksi omista tunteistamme, voimme onneksi myös säädellä niitä tahdonalaisesti (60). Säätelyjärjestelmien ansioista emme ole tunteiden automatiikan armoilla: pelästymme kyllä eläintarhan lasiseiniä vastaan hyökkäävää käärmettä, mutta tietoisien tunteiden säätelyn avulla voimme järkeillä olavamme turvassa ja vaimentaa pelon tunteen. Kyky tunteiden säätelyyn kuitenkin opitaan vasta yksilönkehityksen myötä. Vastasyntyneen käyttäytyminen perustuu pitkälti tunteiden automatiikkaan, minkä vuoksi hänen toimintansa on usein ”tässä ja nyt” -tyyppistä reagoimista ympäristöön (61). Vastoin yleistä arkiuskomusta tunteiden säätely ei siis ole haitallista vaan ennen kaikkea hyödyllistä: tunteiden säätely mahdollistaa huomattavasti joustavamman, tulevaisuuteen suuntautuvan käyttäytymisen.

Ihmisten välillä on merkittäviä eroja siinä, kuinka herkästi he kokevat erilaisia tunteita, kuinka voimakkaita tunteet ovat ja millainen heidän tyyppillinen mielialansa on (62). Tietyt tällaiset ”tunnetyyli” voivat altistaa mielenterveyden häiriöille, jolloin tunteiden säätelyn merkitys korostuu entisestään. Samoin häiriöt

- 68 Houben K, Wiers RW, Jansen A. Getting a grip on drinking behavior: training working memory to reduce alcohol abuse. *Psychol Sci* 2011;22:968–75.
- 69 Berridge KC, Robinson TE. Parsing reward. *Trends Neurosci* 2003;26:507–13.
- 70 Lundqvist D, Flykt A, Öhman A. The Karolinska Directed Emotional Faces – KDEF. CD-ROM from Department of Clinical Neuroscience. Stockholm: Psychology section, Karolinska Institutet 1988.

SIDONNAISUUDET

Ei sidonnaisuuksia.

English summary

www.laakarilehti.fi
in english
The neurobiology of emotions

tunteiden säätelyjärjestelmissä voivat altistaa esimerkiksi väkivaltaiselle käyttäytymiselle (63). Toiminnalliseen magneettikuvaukseen perustuvat tutkimukset ovat paikantaneet ihmisen aivojen tunteiden säätelyradastot erityisesti otsalohkon etu- ja orbitaalisiin osiin (64). Näiden alueiden vaurioituminen myös heikentää tunteisiin liittyvää päätöksentekoa (65). Tunteiden säätely on tehokkainta silloin, kun se tapahtuu ennakkoon, jolloin esimerkiksi kielteisen tunteen syntyminen pyritään estämään vaikkapa järkeistämällä tai ”neutraloimalla” tietoisesti mahdollinen uhkatilanne. Jo syntyneiden tunteiden säätteleminen on puolestaan kognitiivisesti ja fysiologisesti kuormittavampaa eikä läheskään yhtä tehokasta (60).

Tunteiden säätelyjärjestelmien ja limbisten järjestelmien tasapaino liittyy myös keskeisesti erilaisiin tunne-elämän häiriöihin. Otsalohkon etuosan heikentynyttä toimintaa esiintyy erityisesti paniikkihäiriön ja traumaperäisen stressin kaltaisissa häiriöissä, joissa voimakkaat kielteiset tunnekokemukset ovat keskeisiä. Otsalohkon etuosan voimistunut toiminta taas liittyy tyypillisesti ahdistuksen kaltaisiin häiriöihin, joihin liittyy taipumusta murehtimiseen ja huolehtimiseen (66). Vastaavanlainen epätasapaino tunteita säätelevien otsalohkon alueiden ja motivoitua käyttäytymistä säätelevien tyvitumakkeiden alueiden välillä voi olla myös esimerkik-

si ylensyömisen ja liikalihavuuden taustalla (67). Tutkimuksissa onkin havaittu, että tunteiden säätelyyn keskeisesti liittyvien eksekutiivisten eli toiminnanohjaukseen liittyvien toimintojen kehittäminen voi auttaa hillitsemään esimerkiksi alkoholinkäyttöön liittyviä impulsseja ja siten vähentää alkoholiriippuvuutta (68). Tunteiden toimintahäiriöitä voi siis muokata vaikuttamalla tunnejärjestelmiin, mutta myös vaikuttamalla tunteita kontrolloiviin järjestelmiin.

Lopuksi

Tunteet ovat läsnä ihmiselämässä kaiken aikaa. Niiden tehtävänä on suojella meitä ja parantaa suorituskäytämme. Vaikka tunteet syntyvätkin automaattisesti aivoissa, sekä tilannetekijät, kehön toiminta että yksilölliset temperamentin ja persoonallisuuden erot vaikuttavat tunteiden viriämiseen. Tunne-elämämme voi usein olla ristiriidassa tavoitteidemme kanssa. Kyky tunteistaa omia ja toisten tunteita ja niiden aiheuttajia, sekä ennakoita ja säädellä tunteita joustavasti ovatkin tärkeitä arkipäivän mielenterveyden taustatekijöitä. ●

Tämän tutkimuksen tekemistä ovat rahoittaneet Euroopan tiedeneuvosto (ERC Starting Grant #313000) ja Suomen Akatemia (MIND-ohjelma-apuraha #265917).



Lisää liikettä elämään!

Suomen ainoa vain tekonivelleikkauksiin erikoistunut sairaala tekee vuosittain yli 3 000 leikkausta. Tarjoamme lisää liikettä ja toimintakykyä noin 200 erikoisasiantuntijan voimin.

Onnistunut hoito, nopea kotiutuminen tai paluu työelämään ovat Coxassa askeleen lähempänä potilasta. Yksilöllinen huolenpito ja ystävällinen palvelu ovat osa hyvää hoitoamme.

**Tekonivelsairaala
Coxa**

Coxa Tampere Biokatu 6 B, PL 652, 33101 Tampere, p. 03 3117 8023
Coxa Helsinki (poliklinikka) Saukonpaadenranta 2, Helsinki, p. 050 408 2200

www.coxa.fi
Tervetuloa!

LAURI NUMMENMAA
Ph.D., Assistant Professor
Department of Neuroscience and
Biomedical Engineering, Aalto
University
E-mail: lauri.nummenmaa@aalto.fi

The neurobiology of emotions

Emotion circuits promote well-being in survival-salient situations. These systems have evolved throughout phylogenesis, and human emotions still bear remarkable resemblance to their ancestral origins in other animals. Emotional responses involve changes in the organism's neural, physiological, behavioural and subjective state. They are based on a widespread set of cortical and subcortical systems governing homeostatic, somatosensory and interoceptive functions. Because different emotions (such as fear and disgust) optimise behaviours in different situations, they also have partially independent neural bases. The fear circuit promotes apt detection of physical and psychological harms in the environment, and responds by appropriate escape and defence responses. This system is based on interactions between hypothalamic, amygdalar and ventral tegmental circuits. Disorders of the fear circuit are critical for the psychopathology of anxiety, phobias and panic disorder. The mesolimbic reward system governs motivational and appetitive behaviour via its dopaminergic and opiodergic circuits. Dysfunctions of this system are hallmarks of addictive disorders such as substance abuse. Via their cortical connections, activity of the emotion systems may trigger conscious feelings associated with the current emotional state. This allows cognitive control of emotions, as well as prediction and planning of future actions to decrease the likelihood of negative impact of emotions.