

Pauli E. Laine

**KOGNITION PRODUKTIIVISTEN
KYKYJEN YHTEINEN NEURAALINEN PERUSTA**

Kognitiotieteen
pro gradu -tutkielma
2.3.2014

Jyväskylän yliopisto
Tietojenkäsittelytieteiden laitos
Jyväskylä

TIIVISTELMÄ

Laine, Pauli Erik

Kognition produktiivisten kykyjen yhteinen neuraalinen perusta

Jyväskylä: Jyväskylän yliopisto, 2014.

72 s.

Pro gradu -tutkielma

Tutkielman ohjaajat: Tuomo Kujala, Johanna Maksimainen ja Pauli Brattico

Ihminen pystyy luomaan rajattomasti uutta rajatusta aineistosta. Esimerkiksi rajatulla sanavarastolla voidaan luoda periaatteessa mielivaltaisen pitkiä ja monimutkaisia lauseita joita emme ole koskaan ennen kuulleet tai lukeneet. Sama luovuus pätee moniin muihinkin ihmisen kykyihin musiikista, matematiikkaan, taiteesta työkaluihin. Millään muulla eläinlajilla ei ole tavattu vastaavanlaisia kykyjä. Onko tämä ihmisen rajaton luovuus peräisin yhdestä ainoasta lähteestä?

Tämän esityksen tarkoituksena on selventää käsitteitä ja periaatteita, joiden avulla voisimme muotoilla tutkimusohjelman, jolla voimme sitten lähestyä kysymystä mielen mahdollisesti yhteisen tuottavan kyvyn luonteesta. Modernit aivokuvantamismenetelmät (erityisesti fMRI) ovat antaneet viitteitä siitä, että monet ihmisen luovat ja tuottavat kyvyt aktivoivat tiettyjä vasemman aivopuoliskon otsalohkon alueita. Erityisesti kielen neuraalit vastineet sijoittuvat normaalisti sinne. Tuottaville kyvyille tunnetaan kuitenkin muitakin yhteisiä alueita. Tässä esityksessä olen löytänyt kirjallisuuslähteistä tukea ajatukselle, että neuroanatomisesti rajattavan yhden erottavan tekijän sijaan voidaan puhua kielen ja tiettyjen muiden kykyjen rakenteiden muodostaman verkoston mahdollistamasta valmiudesta ihmiselle ominaiseen produktiivisuuteen, joka aktivoituu vain tietyssä kulttuurillisessa aktivaatiossa.

AVAINSANAT: kognitio, produktiivisuus, modulaarisuus, kieli, aivot

ABSTRACT

Laine, Pauli Erik

Common neural correlates of cognitive productivity

Jyväskylä: University of Jyväskylä, 2014.

72 p.

Master of Science Thesis

Examiners: Tuomo Kujala, Johanna Maksimainen and Pauli Brattico

Humans can create new things limitlessly from limited set of things, or can make “infinite use of finite means” (Chomsky 1966). For example we have only limited set of words, but we can still everyday produce new sentences that nobody has ever said before. This same productivity is common to many human abilities, e.g. music, mathematics, art and use of tools. No other animal show such capabilities. Is this limitless productivity derived from one, single source in human cognition and brain?

The purpose of this thesis is to clarify the notions and principles that can help us to build a research program for approach the question about the nature of productive mind. Modern brain imaging techniques (e.g. fMRI) have identified that many productive abilities activate certain areas in the left frontal lobe. Especially neural correlates for language are located there. However, there are many other common areas for human productivity (e.g. correlates for memory). In this thesis I have found support from scientific literature, that rather than single neural source, it is better to describe network of these areas as a potential source for productivity. This potentiality can only realize under certain cultural activation.

Keywords: cognition, productivity, modularity, language, brain

SISÄLLYSLUETTELO

1 JOHDANTO.....	5
2 KÄSITTEISTÄ JA ONGELMAN TAUSTASTA.....	7
2.1 Kognitiiviset kyvyt.....	7
2.2 Produktiivisuus ja luovuus.....	7
2.3 Rekursio.....	9
2.4 Modulaarisuus.....	11
2.5 Hermoston anatomia.....	14
2.6 Ihmisen evoluutiosta.....	16
2.7 Kielen evoluutiosta.....	21
3 PRODUKTIIVISUUS JA KOGNITIIVINEN ARKKITEHTUURI.....	23
3.1 Produktiivisuuden mahdolliset arkkitehtuurit.....	23
3.1.1 Hypoteesi 1: Jokaisella tuottavalla kognitiivisella kyvyllä on oma tuottava komponenttinsa.....	26
3.1.2 Hypoteesi 2: Kieli ja sen neuraaliset vastineet toimivat tuottavuuden yleisenä lähteenä.....	28
3.1.3 Hypoteesi 3: Kognitiivisten kykyjen tuottavuus syntyy eri kognitiivisten kykyjen ja siten eri aivoalueiden muodostamassa verkostossa.....	33
3.2 Integraatiohypoteesin hyötyjä.....	38
4 PRODUKTIIVISUUDEN NEURAALINEN PERUSTA.....	40
4.1 Aivojen koon vaikutus.....	40
4.2 Eri alueiden vaikutus.....	44
4.2.1 Otsalohko.....	44
4.2.2 Kielen neuraalisia alueita.....	45
4.2.3 Muistin neuraalisia alueita.....	50
4.3 Tuottavuuden verkosto.....	53
4.4 Aivot ja kulttuuri.....	55
5 TULOS.....	59
6 YHTEENVETO.....	61
LÄHDELUETTELO.....	62

1 JOHDANTO

For millions of years mankind lived just like animals. Then something happened which unleashed the power of our imagination. We learned to talk.

Keep talking. The division bell. Pink Floyd.

Ihmiset pystyvät muista eläimistä poiketen tuottamaan jatkuvasti uutta monella eri alueella. Luomme joka päivä aivan uusia lauseita, ideoita, ratkaisuja ja ajatuksia. Eläinmaailmassa tällaista käyttäytymistä ei juuri ole. Eläimiltä puuttuu ihmisen rajattoman ilmaisuvoimainen kieli ja niiden näennäisen luova toiminta perustuu enimmäkseen geneettisesti periytyvään vaistoon (esimerkiksi hämähäkkien verkot ja majavien padot).

Mikä sitten on se erottava tekijä, mikä antaa juuri ihmiselle ominaiset tuottavat kyvyt? Onko kullakin kognitiivisella kyvyllä oma tuottava komponenttinsa vai kumpuaako ihmisen käytännössä rajaton produktiivisuus yhdestä lähteestä, kenties kielestä ja sen hermostollisesta perustasta?

Tämän esityksen tarkoituksena on selvittää eri kirjallisuuslähteistä, onko produktiivisten kognitiivisten kykyjen yhteisestä neuraalisesta perustasta olemassa perusteluja ja mahdollisia todisteita, sekä selvittää millainen tämä mahdollinen neuraalinen perusta on. Tarkoituksena on pyrkiä selvittämään, onko perusteita sille oletukselle, että tämä tuottava, luova ihmismielen ominaisuus on kaikille tuottaville kyvyille yhteinen.

Kysymyksiä ihmisen erikoisista kyvyistä on pohdittu vuosikymmeniä, jollei jopa tuhansia vuosia. En oleta tutkielmassani löytäväni näihin kysymyksiin mitään lopullista vastausta tai edes ratkaisevia todisteita jonkin näkökannan puolesta. Työn tarkoituksena on selventää käsitteitä ja periaatteita, joiden avulla voisimme muotoilla tutkimusohjelman, jolla voimme sitten lähestyä kysymystä

mielen mahdollisesti yhteisen tuottavan kyvyn luonteesta. Tutkielma yhdistää kognitiotieteelle tyypillisesti monien erillistieteiden näkökulmia ja tutkimustuloksia aiheesta. Näkökulmia tarjoavat ainakin filosofia, psykologia, aivotutkimus, neurotiede, evoluutiotutkimus, antropologia ja kielitiede.

Esitys muodostuu pääpiirteissään kolmesta osasta: Tutkimuksen teoriaosassa selvitetään taustalla olevia käsitteitä ja erilaisia asiaan liittyviä näkökohtia. Tämän jälkeen muodostetaan tutkimuksen hypoteesi erilaisista kognitiivisista malleista lähtien. Selvitysosaan etsitään lähteistä erilaisia argumentteja hypoteesin puolesta ja sitä vastaan. Tulososassa esitetään selvityksen tulos ja sekä hahmotellaan tutkimusohjelmaa hypoteesin testaamiseksi, eli millaisilla empiirisillä kokeilla olisi mahdollista tutkia onko produktiivisilla kyvyillä yhteistä neuraalista perustaa.

2 KÄSITTEISTÄ JA ONGELMAN TAUSTASTA

2.1 Kognitiiviset kyvyt

Ihmisen kognitiivisia kykyjä ovat esimerkiksi havaitseminen, muisti, päättely ja kieli. Kognitiiviset kyvyt voidaan lisäksi jakaa alempiin ja korkeampiin tai perifeerisiin ja keskeisiin kykyihin (Barrett & Kurzban 2006). Yleisesti kognitiivisilla kyvyillä tarkoitetaan kuitenkin ihmisen tiedon prosessointia. Alempien ja korkeampien kykyjen erona voidaan pitää sitä, että alemmat järjestelmät prosessoivat vain tiettyä informaatiota, esimerkiksi jotain aistitiedon osa-alueita kun taas korkeammat kyvyt yhdistävät informaatiota monesta eri lähteestä (vrt. luku 2.4) (Fodor 1983, Barret & Kurzban 2006). Esimerkiksi päättely käyttää hyväkseen reaaliaikaista aisti-informaatiota sekä muistia.

Ihmiset ovat tyypillisesti "sarjasuorittajia", eli kahta keskittymistä vaativaa asiaa ei voida suorittaa yhtäaikaisesti. Kaikki luovuutta käyttävät korkeammat kognitiiviset kyvyt näyttäisivät rajoittavan jossain määrin toistensa toimintaa. Tässä mielessä ne ovat seriaalisiä, eli niiden toiminta on perättäistä ja eivätkä ne pysty toimimaan samanaikaisesti. Tämä näyttäisi viittaavaan näiden kykyjen käyttämän tuottavuuden yhteiseen perustaan. Aisti- ja kommunikaatiokanavat voivat tietysti rajoittavaa omalta osaltaan tehtävien samanaikaista suorittamista.

2.2 Produktiivisuus ja luovuus

Ihmisten tiettyjä toimintoja luonnehtii produktiivisuus eli tuottavuus ja luovuus. Ihminen pystyy luomaan lähes rajatta uutta rajatusta joukosta alkeistapauksia. Luovan toiminnan merkkejä ovat mm. kieli, matematiikka, käsitteellinen ajattelu, rationaalinen ongelmanratkaisukyky, työkalujen tekeminen, koristelu ja muu taiteellinen toiminta. Luovien kykyjensä avulla ihminen on nykyään maapallon tuotteliain (ja monien mielestä vaarallisin)

eläinlaji. Mikään muu laji ei pysty vaikuttamaan ympäristöönsä niin tehokkaasti ja järjestelmällisesti kuin ihminen.

Selvin esimerkki ihmisen produktiivisuudesta on kieli. Ihmisellä on rajallinen sanavarasto, mutta silti siitä luotavien erilaisten lauserakenteiden määrä on käytännössä rajoittamaton. Juuri tämä kyky erottaa Descartesin mukaan ihmisen eläimistä (Descartes 1637, Chomsky 1957, 1966).

Produktiivisuuden määrittely on hypoteesin muodostamisen kannalta tärkeää. Esityksessä käytetyistä käsitteistä produktiivisuus, tuottavuus ja luovuus vastaavat toisiaan. Eräissä lähteissä käytetään lisäksi käsitettä generatiivisuus (vrt. generatiivinen kielitiede), minkä vastaa tässä esityksessä käytettyjä käsitteitä produktiivisuus tai tuottavuus. Tässä esityksessä käytämme produktiivisuuden ja luovuuden käsitteitä yleisinä kuvauksina tiettyihin kognitioon liittyviin kykyihin. Tällainen kyky pystyy luomaan kielen tavoin rajattomasti kombinaatioita rajatusta määrästä alkeistapauksia. Esimerkiksi ongelmanratkaisu pystyy yhdistämään aiemmin eri tavoilla opittuja asioita ja tuottamaan niistä toimintamallin uuteen tilanteeseen.

Tuottavalle systeemille voidaan lineaarisesti syötteeseen reagoivasta automaatista (esimerkiksi termostaatti) poiketen määritellä seuraavat kognitiivisessa psykologiassa käytetyt kriteerit (Young 2001):

Rinnakkainen ja sarjallinen prosessointi: Tuottava systeemi yhdistää sarjallista ja rinnakkaista prosessointia joustavamman ja tehokkaamman käyttäytymisen aikaansaamiseksi. Esimerkiksi ehtojen testaaminen mahdollisiin sääntöihin tehdään rinnakkaisesti, mutta sääntöjä sovelletaan sarjallisesti.

Sääntöriippumattomuus: Tuottavan systeemin sisältämät säännöt ovat toisistaan riippumattomia, itsenäisiä olioita, joita voidaan soveltaa kyseessä olevan tarpeen mukaan.

Keskeytettävää ja joustava ohjaus: Tuottavaa systeemiä ei ohjaa kiinteä ohjausrakenne, vaan toiminta on joustavaa ja itse toiminnan sekä ympäristön ohjaamaa. Toiminta voidaan keskeyttää jos siihen vaikuttavaa tietoa saadaan kesken prosessoinnin (vrt. Bayesilainen päättely).

2.3 Rekursio

Kielen rajoittamattoman produktiivisen kyvyn mahdollistajaksi on ehdotettu rekursiota (Hauser, Chomsky & Fitch 2002). Rekursiolla tarkoitetaan kielen tapauksessa kykyä tuottaa rajattomasti uusia lauseita liittämällä eri lauseita yhteen, kuten esimerkiksi:

Jos Pekka on nälkäinen, niin hän menee kauppaan.

Jos Pekka on nälkäinen ja ruoka on loppu, niin hän menee kauppaan.

Jos Pekka on nälkäinen tai jos saippua on loppu, niin hän menee kauppaan.

Jne.

Ei ole periaatteessa mitään ylärajaa, miten monimutkaisia lauseita tällä tavalla voidaan luoda. Mikään järjestyksessä tilasta toiseen siirtyvä, sanoja peräkkäin laittava äärellinen kieli (finite state language) tai kielen assosiatiivinen malli ei voisi tuottaa ihmiselle ominaisia rajoittamattomia lauserakenteita (ks. esim. Chomsky 1957, Brattico 2008a). Ihmisellä on tieto tuotettavan lauseen kokonaisrakenteesta joten itse lauseen muodostavalla syntaksilla täytyy olla jonkinlainen rekursiivinen rakenne rajoittamattomien sisäkkäisten lauseiden rakentamista varten.

Rekursio voidaan määritellä eri yhteyksissä ja eri tavoin. Niin sanotut Peanon aksioomat muodostavat matemaattisen induktion ja siten rekursion perustan (Gilkey et al. 2000):

1) *1 on luonnollinen luku.*

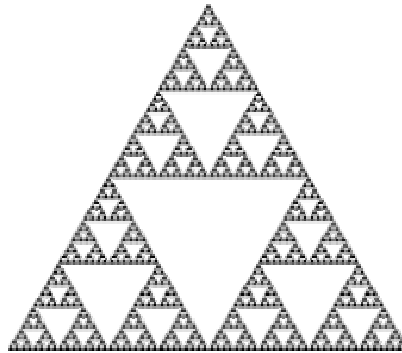
2) *Jos n on luonnollinen luku, niin sen seuraaja $n+1$ on luonnollinen luku.*

3) *1 ei ole minkään luonnollisen luvun seuraaja, eli 0 ei ole luonnollinen luku.*

4) Jos n ja m ovat luonnollisia lukuja joilla on sama seuraaja, niin $n = m$.

5) Osajoukko luonnollisia lukuja jotka sisältävät luvut 1 ja $n+1$ on luonnollisten lukujen joukko jos se sisältää luvun n .

Esimerkkinä rekursiivisella säännöllä luodusta geometrisesta kuviosta on kuvassa 1 oleva ns. Sierpinskiin kolmio. Kolmio muodostetaan poistamalla (tässä tapauksessa alkujaan täysin mustasta) tasasivuisesta kolmiosta sivujen keskikohdan muodostava keskuskolmio. Toistamalla tätä sääntö rekursiivisesti muodostuville osakolmioille syntyy Sierpinskiin kolmio.



Kuva 1. Sierpinskiin kolmio.

Matematiikassa ja tietojenkäsittelytieteessä rekursio tarkoittaa sitä, että tietyn funktion arvo tietyssä pisteessä riippuu funktion arvosta suorituksen edellisessä pisteessä. Esimerkiksi yksinkertainen kertomafunktiota ($n!$) laskeva ohjelma voidaan toteuttaa rekursiivisesti näin:

```

Kertoma(n){
  if n <=1 then
    Kertoma = 1
  else
    Kertoma = n x Kertoma(n-1)
}

```

Steven Pinker ja Ray Jackendoff määrittelevät rekursion proseduuriksi joka kutsuu itseään, tai konstituentiksi joka sisältää samanlaisen konstituentin (Pinker & Jackendoff 2005). Näin rekursio voi olla sekä toiminnallista että rakenteellista.

Kielen perusteella näyttäisi siltä, että rekursio on ainakin yksi ihmisen tuottavien kykyjen mahdollistava ominaisuus tai toiminto.

2.4 Modulaarisuus

Jotta jokin kognitiivinen kyky voitaisiin jollakin tavalla rajata tietylle hermoston rakenteelliselle tai toiminnalliselle tasolle, täytyy rajauksen tekevän käsitteen olla tarkasti määritelty. Muun muassa kognitiotieteessä ja kognitiivisessa neurotieteessä käytetään modulaarisuuden käsitettä rajamaan kognition eri kykyjä tai järjestelmiä. Modulaarisuuden käsite on ollut myös keskeinen evoluutiopsykologian teorianmuodostukselle. Voidaanko produktiivisuus määritellä modulaarisuuden avulla?

Kognitiotieteessä modulaarisuudella tarkoitetaan alapidonnaisia ja tiedollisesti kapseloituja kognition alijärjestelmiä Jerry Fodorin kirjan *The modularity of the mind* määritelmän mukaisesti (Fodor 1983). Itse asiassa Fodor määrittelee yhdeksän eri ominaisuutta modulaariselle kognitiiviselle systeemille: alapidonnaisuus (domain specificity), tiedollinen kapseloituminen (informational encapsulation), automaattinen prosessointi (obligatory firing), nopea prosessointi (fast speed), pintatason representaatiot ja prosessointi (shallow outputs), prosessoinnin implisiittisyys (limited accessibility), universaali neuraalinen arkkitehtuuri (fixed neural architecture), universaali kehityskaava (characteristic ontogeny) sekä universaalit vauriotyypit (characteristic breakdowns). Alapidonnaisuus tarkoittaa, että kyseinen järjestelmä pystyy prosessoimaan vain jonkin tietyn, rajatun alan tietoa. Tämä on keskeinen modulaarisuuden kriteeri. Kapseloitumisella tarkoitetaan, että kyseinen alijärjestelmä käsittelee ”putkimaisesti” vain samaansa tietoa, eikä pääse käsiksi muiden moduuleiden tietoihin. Kapseloituminen on tämän tutkimuksen kannalta mielenkiintoinen käsite. Jos ainakin tietyillä (korkeammilla) kognitiivisilla kyvyillä on jokin yhteinen tuottava moduuli, miten kapseloitunut moduuli voisi käyttää sen prosessointikykyä hyväkseen?

Fodorin määrittelemistä modulaarisuuden ominaisuuksista tässä esityksessä erityisen kiinnostavia ovat myös universaali neuraalinen arkkitehtuuri (jota tässä produktiivisuudelle haetaan), universaali kehityskaava sekä universaalit vauriotyypit.

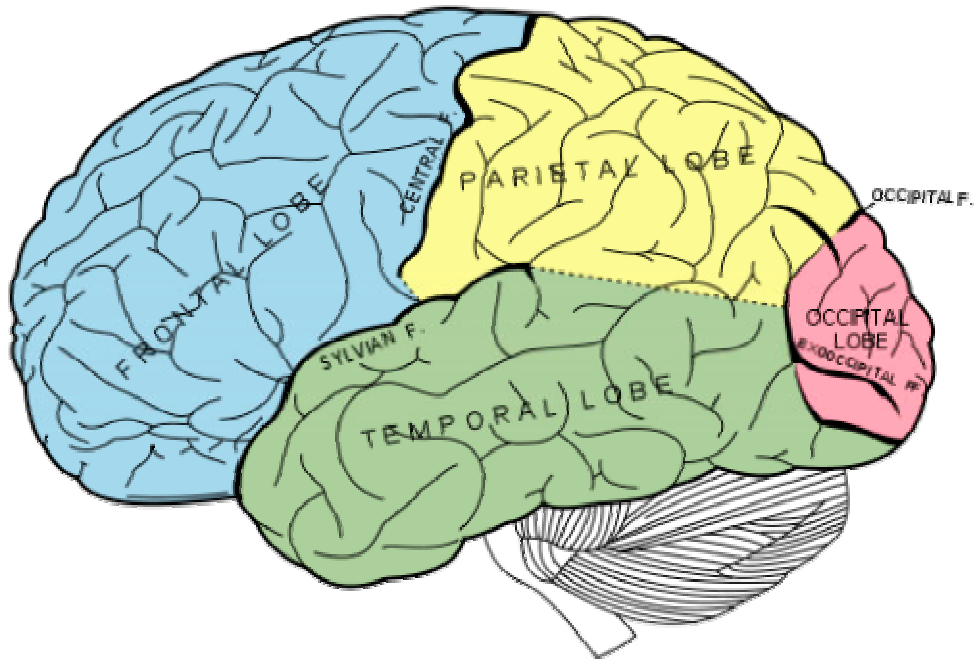
Fodorin mukaan vain perifeeraaliset järjestelmät, kuten esimerkiksi havaitsemiseen liittyvät, ovat modulaarisia (Fodor 1983). Toisaalta evoluutiopsykologien mukaan kognitio on luonnonvalinnan kautta muodostunut kokoelma erilaisia moduuleita, eli kognitio on niin sanotusti massiivisesti modulaarinen (Barret & Kurzban 2006, Cosmides & Tooby 1994). Fodor erottaa moduuleista keskuskognition, mitä läpensä modulaarisen kognition malli ei sisällä.

Erityisesti massiivista modulaarisuutta vastaan on käsitys aivojen holistisesta toiminnasta (esim. Anderson 2007). Neurologisesti paikallisen toiminnan lisäksi aivoissa on luonnollisesti jonkin verran alueiden välistä toimintaa. Näköhavainto on selvä esimerkiksi tällaisesta eri alueiden muodostamasta funktionaalisesta kokonaisuudesta. Verkkokalvon sauvat ja tapit ovat näköhavainnon kosketuspinta ulkoiseen maailmaan. Silmistä lähtevät näköhermot menevät optisen kiasman ja näköjuosteen (optic tract) kautta ulompaan polvitumakkeeseen (lateral geniculate nucleus). Silmien nenäpuoleiset näköhermot risteävät optisessa kiasmassa. Verkkokalvolla alkanut optisen informaation prosessointi jatkuu visuaalisessa polussa. Polvitumakkeesta tulevat visuaaliset signaalit jatkavat näköaivokuorelle optista radiaatiota (optic radiation) pitkin (Churchland & Sejnowski 1992). Mikään näistä alueista ei ole yksistään riittävä näköhavainnon syntymisellä, jotkut ovat välttämättömiä (ainakin toinen verkkokalvo ja siihen liitettyt näköhermot jne.) ja erikoituminen lisääntyy prosessin pidemmälle mennessä.

Korkeammat kognitiiviset kyvyt, kuten produktiivisuus ovat todennäköisesti myös funktionaalisesti modulaarisia useiden eri aivoalueiden muodostamia kokonaisuuksia.

2.5 Hermoston anatomiaa

Keskushermoston muodostavat isot aivot, pikkuaivot, aivorunko ja selkäydin. Isot aivot muodostuvat lähes identtisestä vasemmasta ja oikeasta aivopuoliskosta joita yhdistää paksu hermosyiden joukko nimeltään aivokurkiainen (*corpus callosum*). Isot aivot jaotellaan neljään lohkoon: otsa- eli frontaalilohkoon, päälaen- eli parietaalilohkoon, ohimo-, eli temporaalilohkoon sekä takaraivo- eli oksipitaalilohkoon (kts. kuva 2).



Kuva 2. Aivolohkot (Wikimedia Commons).

Aivolohkojen toiminnan on aivovaurioiden perusteella havaittu selkeästi jakautuneen. Pääpiirteittään otsalohkoon lokalisoituu toiminnan ohjaus ja motoriikka, ohimolohkoon kuuloaisti, päälaenlohkoihin somatosensoriikka (eli kehon aistitiedon käsittely) ja tilan hahmottaminen sekä takaraivolohkoihin näköaisti (esim. Kolb & Whishaw 1990).

Aivojen rakenne jaotellaan vielä pidemmälle erilaisen solurakenteen ja toiminnallisuuden perusteella. Yleisesti käytetty viittausjärjestelmä on Brodmannin 52 eri aluetta. Aivot muodostuvat kuoren harmaasta ja sisäosien valkeasta aineesta. Valkean aineen niin sanottu myeliintuppi mahdollistaa nopean viestiyhteyden eri kuorikerrosten välillä. Aivokuoren soluarkkitehtuuri poikkeaa aivokuoren eri osissa. Lajikehityksellisesti juuri aivokuori on ihmisellä muihin lajeihin verrattuna eniten kehittynyt aivojen osa, erityisesti sen poimuttuneisuuden osalta.

Tiettyjen kognitiivisten kykyjen tiedetään ainakin keskimäärin sijoittuvan eri aivojen alueille erilaisten aivokuvantamismenetelmien lisäksi myös aivovauriotapausten ja aivokirurgian perusteella. Kuvantaminen paljastaa samojen aivoalueiden aktivoitumisen samassa tehtävässä eri ihmisillä. Aivovauriotapauksista tiedetään, että tietyn aivoalueen vaurio aiheuttaa yleensä tietynlaisen vaurion tiettyyn kognitiiviseen kykyyn. Aivokirurgiassa pyritään esimerkiksi poistamaan kasvain varoen vaurioittamatta tärkeitä aivoalueita. Aivoalueiden vastaavuutta eri kykyihin kartoitetaan ärsyttämällä niitä sähköisesti, jolloin ne aiheuttavat motorista käyttäytymistä tai subjektiivisia kokemuksia.

Tietystä lokalisaatiosta huolimatta näyttäisi siltä, että ainakin osa kognitiivisista toiminnoista syntyisi erikoistuneiden aivoalueiden välisen verkostomaisen vuorovaikutuksen seurauksena. Erityisesti korkeampia toimintoja voi olla tämän seurauksena vaikea paikallistaa mihinkään tiettyyn osaan aivoja. Aivot kehittyvät lisäksi yksilöllisesti, jolloin tietyn anatomisen vastineen löytäminen tietylle toiminnolle on lähinnä tilastollista. Aivojen rakenteissa tapahtuu muutoksia läpi eliniän. Yleisesti aivojen plastisiteetti tarkoittaa niiden toiminnallisen organisaation erilaisiin ulkoisiin tai sisäisiin muutoksiin (mm. kehitys, aivovauriot) liittyviin uudelleensopeutumisiin liittyviä hermostollisia muutoksia.

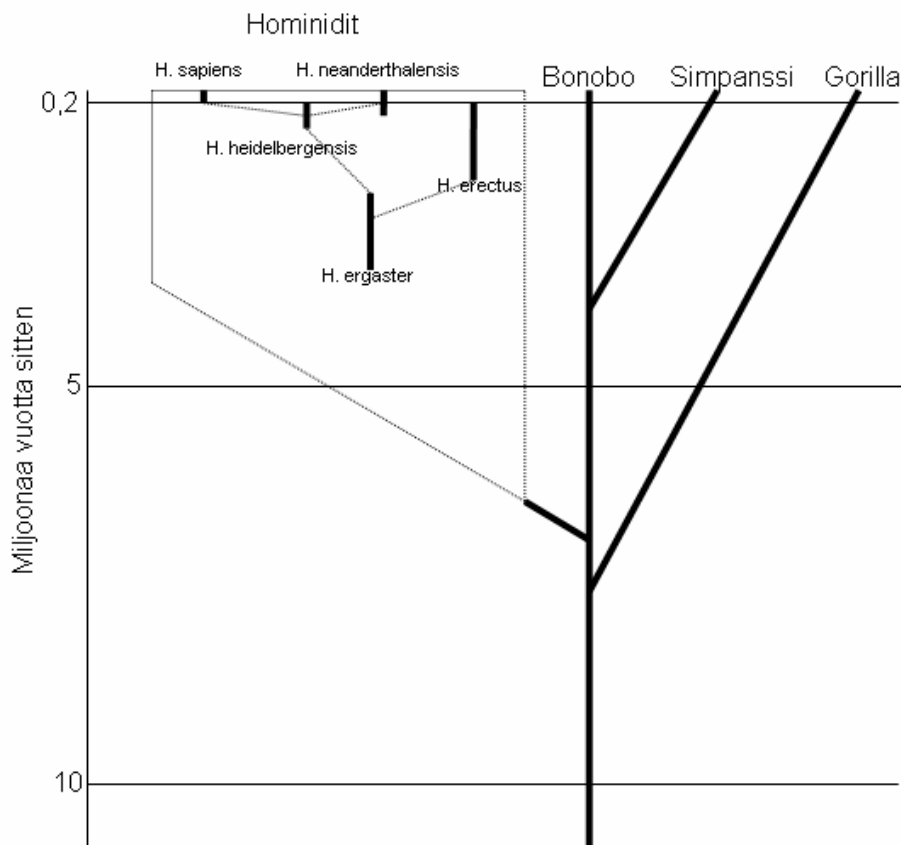
Käytössä olevat aivojen kuvantamismenetelmät (PET, EEG, MEG, fMRI, yksittäissolumittaukset) näyttävät vain summittaisesti aktivoituneen alueen tai sitten rajoittuvat yhden tai korkeintaan muutaman hermosolun mittaamiseen. Puhutaan menetelmien paikallisesta ja ajallisesta tarkkuudesta. Yleensä jollakin menetelmällä on hyvä paikallistamistarkkuus mutta ajallinen epätarkkuus tai sitten toisinpäin. Ongelman selvittämiseksi tarvittaisiin tietoa sekä siitä mitä aivojen alueita tuottavat kyvyt aktivoivat että siitä, miten näiden alueiden hermosolut prosessoivat tietoa. Tämä on aivojen rakenteen ja monimutkaisuuden takia hyvin vaikea tehtävä. Toistaiseksi on osattava hyödyntää monista eri lähteistä saatavaa, yksilötason eroista ja aivojen plastisuudesta johtuvaa ristiriitaistakin tietoa.

2.6 Ihmisen evoluutiosta

Käsiteltäessä vain ihmiselle tyypillisiä kognitiivisia kykyjä, on välttämätöntä käsitellä myös eroja ihmisen ja muiden kädellisten välillä ja niihin johtaneita evolutiivisia vaiheita. Kysymys ihmisen ja muiden eläinten välisestä erosta on edelleen ajankohtainen. Vielä 1900-luvulla etsittiin turhaan laadullista ero ihmisen ja simpanssin aivojen väliltä (Ridley 2000). Mitään yhtä selkeää erottavaa tekijää ei ihmisen aivoista ole löydetty, vaikka pieniä eroja on etenkin solurakenteen tasolla (ks. esim. Gazzaniga 2009). Aivojen vertaileva tutkimus on haastavaa, huomioiden eettiset kysymykset ja kädellisten tutkimisen vaikeus. Ihmisen ja simpanssin geneistä samoja on noin 98 % (Corballis & Lea 1999, Ridley 2000). Ihmisen ja simpanssin ero ei neuroanatomisesti tai geneettisesti ole iso, mutta vain ihmisellä on rajattomaan ilmaisuun pystyvä kieli ja ainutlaatuinen kyky hallita ja muokata ympäristöään.

Nykyihmisen ja muiden kädellisten kantamuotojen erottuminen tapahtui noin 5-7 miljoonaa vuotta sitten (kuva 3). Varmuudella ei vielä tiedetä, missä vaiheessa hominidien kehitystä ja minkälainen geneettinen muutos johti anatomisesti modernin ihmisen (AMH) erottumiseen muista homo-suvun

linjoista ja ihmisen tuottavuuden kehittymiseen ja miksi näin tapahtui. Nykyään kuitenkin tunnetaan useita mahdollisia muutoksia genotyypissä, jotka mahdollisesti olivat osallisena nykyihmisen syntyyn. Tällaisia muutoksia on paikallistettu esimerkiksi FOX2P- (esim. Corballis 2004), ASPM- (Gazzaniga 2009), MEF2A- (Lie et al. 2012) ja miR-941 -geneissä (Hu et al. 2012). Muutosten geneettisenä tunnisteena on eniten käytetty mitokondrio-DNA:ta (mtDNA) (Björklund 2009). mtDNA:n perusteella on mahdollista, että kaikki nykyihmiset ovat pienen, mahdollisesti vain parin tuhannen yksilön evolutiivisen pullonkaulan läpi selvinneen ryhmän jälkeläisiä (Bickerton 1990, Brattico 2008). Sattumanvaraisten muutosten merkitys nimittäin korostuu pienissä populaatioissa (Björklund 2009).



Kuva 3. Ihmisen osin spekulatiivinen evolutionaarinen puu. Kuva perustuu lähteisiin Carroll (2003), Klein (2009) ja Rightmire (1998).

Ihmistä edeltäneiden hominidien kognitiivisten kykyjen arviointi fossiilien perusteella on vaikeaa. Kaikista lajeista ei ole jäänyt tai löydetty edes jäänteitä (Leakey 1995). Lisäksi löydetyt fossiilit ovat yleensä sitä huonokuntoisempia mitä vanhempia ne ovat. Löydettyjen kallojen muodon ja tilavuuden mittausta on käytetty aivojen ja erityisesti ohimolohkon koon arviointiin (Beran et al. 1999, Brattico 2008). Kuvassa 4 on erilaisia hominidien kalloja, ylärivin oikeanpuoleisin: *Paranthropus robustus*, tilavuus n. 530 cm³ (1,9–1,5 miljoonaa vuotta vanha, myr), alarivi vasemmalta oikealle *Homo habilis* 612 cm³ (1,9–1,6 myr), *Homo erectus* 988 cm³ (1,7–0,04 myr), *Homo neanderthalis* 1520 cm³ (0,2–0,027 myr) ja *Homo sapiens* 1409 cm³. Pelkän kallon koon tai sen muodon perusteella on kuitenkin vaikea tehdä päätelmiä itse kognitiivisista kyvyistä.



Kuva 4. Hominidien kalloja Helsingin Luonnontieteellisessä museossa (tekijä).

Fossiileja selkeämpi todiste tuottavien kykyjen ilmaantumiselle ovat erilaiset arkeologiset työkalut, luolamaalaukset, taide-esineet jne. (mm. Klein 2009, Leakey 1993 & 1995). Varhaisimmat kivityökalut ovat noin 2,5 miljoonaa vuotta

vanhoja. Niiden rakenne pysyi ilmeisesti hyvin samanlaisena noin miljoonan vuoden ajan (ns. Olduvain kulttuuri). Myös seuraavan, Acheulin eli varhaisen kivikauden kulttuurin kehittyneempien työkalujen jakso kesti yli miljoona vuotta (mm. Klein 2009). Ensimmäiset arkeologiset todisteet ihmisen luovista tai taiteellisista kyvyistä ovat 70000 - 200000 vuotta vanhoja (Leakey 1995/1993, Bickerton 1990, Corballis & Lea 1999). Kuvassa 5 nähdään esimerkki luovasta taiteellisesta kyvystä, Les Trois Frèresin luolamaalaus (noin 15000 v.) (esim. Leakey 1995).



Kuva 5. Les Trois Frèresin luolan "Tietäjä" (Wikimedia Commons).

Näiden löydösten perusteella ihmiselle tyypillinen tuottava tai luova toiminta on kehittynyt evolutionaarisesti suhteellisen myöhään. Tästä herää kysymys geneettisten muutosten nopeuden riittävydestä. Oliko anatomisesti moderni

ihminen jo täysin kehittynyt ennen varhaisimpia luovuutta osoittavia löytöjä noin 200 000 vuotta sitten, mutta ei jostain syystä jättänyt mitään merkkejä?

Tämä kysymys liittyy suoraan nykyisin kiistanalaiseen kysymykseen nykyihmisellä olevien, mutta muilta eläimiltä puuttuvien kognitiivisten kykyjen (erityisesti kielen) kehittymisestä. Yksi kysymys koskee sitä, tapahtuiko muutos kompetenssissa vai performanssissa? Eli tapahtuiko olemassa olevien kompetenssien uudelleenorganisoidumista vai muuttuiko "vain" tapa, joilla kykyjä käytetään? Toinen kysymys koskee kykyjen ajallista kehitystä. Tapahtuiko tuottavien kykyjen synty äkillisesti (punktualismi, saltationismi) esimerkiksi tietyn fysiologisen rajan ylityksen jälkeen vai vähitellen (gradualismi) luonnonvalinnan kautta (esim. Leakey 1995). "Äkillinen" tarkoittaa kuitenkin evoluutiossa satojatuhansia tai jopa miljoonia vuosia. Kaikki biologiset muutokset tapahtuvat vähitellen mutta geologisiin ajanjaksoihin verrattuna hyvinkin nopeasti (Björklund 2009). Eli jos ero äkillisen ja vähittäisen kehittymisen välillä on vain näennäinen, voidaan sanoa nykyihminen muodostuneen mikroevoluution ja adaptaation kautta, eli nykyihmisen ja yhteisen kantamuodon välillä on jatkumo. Näin ei ole mitään tiettyä "maagista" hetkeä jolloin nykyihminen on ilmestynyt maapallolle.

Ihmiselle tyypillisiä tuottavia kykyjä ovat muun muassa kieli, abstraktinen ajattelu, ongelmanratkaisukyky, suunnitelmallisuus, työkalujen valmistus, kulttuuri ja taiteellisuus. Muilla eläimillä (erityisesti kädellisillä) on ainakin sosiaalista kognitiota, merkkikieltä ja alkeellista työkalujen käyttöä. Voidaanko vetää selvää rajaa ihmisen ja muiden eläinten kognitiivisille kyvyille?

Varhaisimmat merkit abstrakteista symboleista ovat siis 7000-200000 vuoden takaa. Vanhin tunnettu kirjoitettu kieli on noin 5000 vuotta vanhaa Sumerin kieltä.

2.7 Kielen evoluutiosta

Kieli on selvän esimerkki ihmisen tuottavista kyvyistä. Kielen evoluutiota on myös tutkittu eniten ihmisen kaikista tuottavista kyvyistä.

Kieli saattaa olla ihmisen kaikkien korkeampien produktiivisten kykyjen perusta (ks. luku 3.1.2) tai ainakin niiden vahvistaja. Tämän vuoksi on tärkeää käydä läpi kielen kehittymiseen ja sen genetiikkaan liittyviä kysymyksiä.

Kielen synnystä ja kehityksestä on olemassa edelleen perustavanlaatuisia kysymyksiä (ks. esim. Corballis & Lea, 1999, Leakey 1995). Erilaisten käsitysten mukaan kieli on kehittynyt suhteellisen äkillisesti mutaationa (Chomsky 1988), hitaasti adaptaationa (Pinker 1994, 2003), eleistä (Gentilucci & Corballis 2006, Corballis 2009) tai ääntelyistä (Lieberman 2000). Kielen syntyyn on saattanut vaikuttaa monia eri tekijöitä, esimerkiksi sukupuolivalinta (Cazzaniga 2009), lisääntynyt sosiaalisen vuorovaikutuksen tarve, esimerkiksi saalistajien välttäminen tai saalistaminen (Bickerton 2007). Ääntöväylän kehittyminen on ollut avain ihmiselle ominaisen monipuolisen puhekielen kehittymiselle (Lieberman 2000). Tätä on edeltänyt eleitä ja ääntämistä säätevien motoristen kykyjen kehittyminen.

Myös kielen olemuksesta ja sen suhteesta ajatteluun on olemassa avoimia kysymyksiä. Voidaan puhua jopa eräänlaisesta kielisodasta (Corballis & Lea 1999), jonka tärkeitä kysymyksiä ovat muun muassa erottaako juuri kieli ihmisen muista eläimistä, mikä on kielen ja ajattelun suhde ja onko ajattelua ilman kieltä?

Lisäksi kielen genotyypin ja fenotyypin välillä on vallinnut kuilu (Berwick 2011). Kielen häiriöt saattavat kuitenkin kertoa jotain itse kielen geneettisestä perustasta. Erityisesti on tutkittu niin sanottuja kielikyvyn selektiivisiä häiriöitä (SLI, specific language impairment) jotka näyttäisivät rajoittuvan useimmissa tapauksissa vain kielellisiin kykyihin (Brattico 2008a). Tämän perusteella

näiden häiriöiden avulla on pyritty etsimään kielen geneettistä perustaa, mahdollista kielen säätelygeeniä. Erään perheen suvussa olevat kielen häiriöt pystyttiin yhdistämään seitsemännessä kromosomissa olevan niin sanotun FOXP2 geenin mutaatioon. (Corballis 2004, Brattico 2008a). On huomioitava, että tässä geenissä on eroa ihmisen ja simpanssin välillä vain kahden aminohapon verran. FOXP2-geenin ja kielikyvyn välille ei kuitenkaan voida vetää yhtäläisyysmerkkiä. Yksittäisen geenin vaikutus yksilön fenotyyppiin on ymmärrettävä muiden geenien pleiotropian (yksi geeni voi vaikuttaa useampaan fenotyyppiseen ominaisuuteen) ja polygenian (fenotyyppinen ominaisuus on usean geenin vuorovaikutuksen tuotosta) sekä ympäristön funktiona (Hanski et al. 1998). Lisäksi ympäristö (myös muut geenit) vaikuttaa aina geenien toimintaa (Björklund 2009).

Tämän esityksen pääpaino ei kuitenkaan ole selvittää miten tuottavien kognitiivisten kykyjen neuraalinen perusta on kehittynyt. Kysymys onkin vaikea, sillä ei ole olemassa mitään selkeää kuvaa miten jokin yhteinen kognitiivinen kyky muodostuu adaptaationa ympäristön paineeseen ja evolutiivisen valintaan (ks. esim. Pinker 2003)

3 PRODUKTIIVISUUS JA KOGNITIIVINEN ARKKITEHTUURI

Tämän esityksen tutkimusongelmaksi voidaan tiivistää seuraava: Voidaanko saatavilla olevan lähdemateriaalin perusteella muodostaa kokeellisesti testattava hypoteesi ihmisen produktiivisten kykyjen yhdestä yhteisestä neuraalisesta perustasta? Yhteinen perusta pitäisi siten löytyä aivojen rakenteesta selkeästi rajattavasta alueesta tai eri alueiden muodostamasta systeemistä. Yhteisen perustan rajallisuus voi olla ajallista ja paikallista. Ajallinen rajallisuus ilmenee tuottavan kyvyn sarjallisena toimintana, joka suorittaa toiminnot peräkkäin. Tällöin mukana voi olla useita erillisiä aivoalueita, jotka muodostavat jonkinlaisen verkoston. Tällainen rajallisuus voidaan mahdollisesti paikallistaa olemassa olevilla aivokuvantamismenetelmillä, lähinnä funktionaalisella magneettiresonanssikuvantamisella (fMRI) tai magnetoenkefalografialla (MEG). Paikallinen neuraalinen rajallisuus voi puolestaan ilmetä aivotutkimuksessa (neuroanatomisesti tai solutasolla) tai esimerkiksi aivovauriopotilailla.

Vain ihmiselle tyypillistä, luovuuden yhden perustan hypoteesia kutsutaan myös nimellä *single source hypothesis* (Brattico & Liikanen 2009). Tämän hypoteesin lähtökohdat löytyvät mielenfilosofiasta, kielitieteestä, kognitiotieteestä sekä biolingvistiikasta. Seuraavassa pyritään määrittämään vaihtoehdot produktiivisuuden arkkitehtuurille kognitiotieteen käsitteillä.

3.1 Produktiivisuuden mahdolliset arkkitehtuurit

Hermosto voidaan jakaa eri tasoihin kuten systeemit, topografiset kartat, kerrokset ja sarakkeet, lokaalit verkot, neuronit, synapsit ja molekyylit (Churchland & Sejnowski 1992). Voidaan kysyä, mikä näiden tasojen suhde on kognitiotieteessä käytettyyn moduuleiden käsitteeseen (vrt. luku 2.4). Hermostollisten tasojen lisäksi voidaan erottaa selitysten tasoja. Klassisen

kognitiotieteen näkökulman mukaan ihmisen kognitio on symboleja prosessoiva systeemi. Yhtenä oletuksena on ollut, että kognitiiviset kyvyt ovat ns. laitteistoriippumattomia, eli biologiset aivot eivät olisi välttämätön ehto näille kyvyille. Jos kognitiiviset kyvyt jotenkin emergoituvat aivojen toiminnasta (eli ovat jotain enemmän) tai toimivat eräänlaisessa mielen virtuaalikoneessa ei näiden kykyjen neuraalista perustaa voida ainakaan tarkasti määritellä (Dennett 1991, 1995). Hermoston eri tasoilla voidaan havaita erilaisia syötteitä, vaiheittaisia tiloja ja tuloksia. Tällaisina toimivat erilaiset välittäjäainekonsentraatiot tai jännitepotentiaalit eivät kuitenkaan kerro, mitä ne esittävät.

Jos käytämme modulaarisuuden käsitettä apuna tuottavien kykyjen neuraalisen perustan rajaamisessa, täytyy valita sopiva modulaarisuuden konteksti. Fodorin kriteereistä (ks. luku 2.4) mahdollisia ovat alapidonnaisuus, automaattinen ja nopea prosessointi, prosessoinnin implisiittisyys, universaali neuraalinen arkkitehtuuri, universaali kehityskaava sekä universaalit vauriotyypit. Näin produktiivisten kykyjen yhteinen neuraalinen perusta voitaisiin rajata tiettyjä rajattuja alapidonnaisia komputaatioita automaattisesti ja nopeasti prosessoivaksi kaikille ihmisille yhteiseksi hermostolliseksi järjestelmäksi tai järjestelmiksi, jotka kehittyvät normaalin ontogeneesin aikana ja joiden vauriot aiheuttavat samanlaisia kykyjen muutoksia eri ihmisillä.

Klassisen kognitiotieteen näkemyksen mukaan mieli voi olla produktiivinen, jos se on symbolisysteemi, joka kykenee rekursiivisesti upottamaan (embed) symbolijonoja symbolijonojen sisään (ks. esim. Fodor & Pylyshyn 1988, Fodor 1975). Kognitiotieteessä ja yleensä informaatioteoriassa käytetään nykyään sanaa komputaatio kuvaamaan mitä erilaisimpia informaationkäsittelyn muotoja (Churchland & Sejnowski 1992). Emme löydä esimerkiksi eläimen aivoista fysiikan lakeihin perustuvia formaaleja laskutoimituksia vaikkapa saaliin oletetusta liikkeestä. Laskenta on pikemminkin hermoston eri tasojen tilamuutoksia. Voimme määritellä laskennan tai komputaation hyvin karkealla

tasolla seuraavasti: fyysinen systeemi on laskennallinen, jos sen fyysiset tilat esittävät jonkin toisen systeemin tiloja ja tilamuutokset voidaan selittää näille representaatioille tehtävinä operaatioina. Yhdistämällä tämä edelliseen modulaariseen määritelmään, voimme korvata abstraktimman komputaation käsitteen havaittavilla neuraalisilla tilamuutoksilla.

Analogiana voidaan käyttää tietokoneen arkkitehtuuria (Fodor 1975). Tietokoneen laitteistossa tapahtuvista jännitetason muutoksista ei voida suoraan tulkita, mitä representaatioita ne esittävät. Tietokoneen tietty muistiavaruus muodostaa tietyn representaation, joka voi muuttua kun se ja toinen representaatio lasketaan tiettyjen formaalien sääntöjen mukaan. Jännitetasojen (loogiset ykköset ja nollat) muodostamat representaatiot muodostavat sanoja, jotka puolestaan muodostavat omia representaatioita, niin sanotun symbolisen konekielen, jossa on omat formaalit sääntönsä. Näin voidaan puhua eri representaatiotasosta. On huomattava, että jo tietokoneen konekielen käyttämä binäärijärjestelmä on rajoittamattoman ilmaisuvoimainen.

Kysymys kielen roolista ihmisen tuottavien kykyjen synnyssä on edellä esitetyn valossa mielenkiintoinen. Oliko esi-ihmisen aivoissa jo valmiina tuottavien kykyjen mahdollistava järjestelmä (tai paremminkin jo itsessään tuottava, eräänlainen ajattelun "konekieli"), jota kielen kehittyminen käytti hyväkseen ja joka mahdollisti tuottavan kielen sekä muut tuottavat kyvyt? Vai syntyikö kielen mahdollistava järjestelmä ensin (kenties osana kielen kehitystä, ks. luku 2.7), joka sitten mahdollisti muut tuottavat kyvyt? Oli tämän produktiivisen järjestelmän tai komponentin synty millainen tahansa, tulisi sen neuraaliset perustat löytyä tutkimalla tunnetuimman ja eniten tutkitun tuottavan kyvyn, eli kielen neuraalisia rakenteita ja vertailla niiden aktivoitumista muita tuottavia kykyjä aktivoitaessa.

Käytännössä produktiivisuuden perustalle voidaan muodostaa seuraavat vaihtoehdot:

1) kullakin kyvyllä on oma erillinen, kognitiivisesti modulaarinen produktiivinen komponenttinsa tai

2) perusta on kaikille tuottaville kyvyille yhteinen, jolloin

a) kielen kehittyminen on jotenkin synnyttänyt tuottavuuden ja myöhemmin se on mahdollistanut myös muiden kykyjen tuottavat ominaisuudet tai

b) jokin aiemmin kehittynyt tuottava rakenne mahdollisti *sekä* rekursiivisen kielen *että* muut produktiiviset kyvyt.

Näissä vaihtoehdoissa produktiivisen kyvyn neuraalinen perusta sijaitisi joko:

- jokaisen produktiivisen kyvyn yhteydessä erikseen tai
- kielen rekursiivisen rakenteen tuottavalla alueella (mm. Brocan alue) tai
- useita eri aivoalueita käsittävässä systeemissä, joka muodostaa kognition kannalta yhden kokonaisuuden tai moduulin.

3.1.1 Hypoteesi 1: Jokaisella tuottavalla kognitiivisella kyvyllä on oma tuottava komponenttinsa.

Oletusta, jonka mukaan jokaisella kognitiivisella kyvyllä on oma erillinen tuottava komponenttinsa, puoltaa erilaiset patologiset todisteet kielellisten ja muiden tuottavien kykyjen dissosiaatioista (Bloom 1994). Tällaisissa tapauksissa joko kielellinen tai jokin muu tuottava kyky on vaikeasti heikentynyt, toisen kyvyn ollessa normaali. Tämä viittaisi siihen, että eri kognitiivisten kykyjen tuottavat ominaisuudet perustuvat erillisiin neuraalisiin rakenteisiin. On tietysti mahdollista, että eri kyvyt käyttävät samoja rakenteita itse tuottavuuteen, mutta dissosiaatio johtuu näitä kykyjä yhdistävien verkkojen vaurioista eli heikentyneen kyvyn pääsy tuottavaan komponenttiin olisi estynyt. Aivoalueiden väliset verkostot ovat monimutkaisia eikä niitä

täysin tunnetta. Eniten on tutkittu aivopuoliskoja yhdistävän aivokurkiaisien katkoksen vaikutuksia niin sanotuissa split-brain tapauksissa. (esim. Kolb & Whishaw 1990).

Jos kognitiiviset kyvyt ovat modularisoituneet omiksi tuottaviksi yksiköikseen, tulisi näiden kykyjen neuraaliset korrelaatit löytyä jostain. Käytännössä eri kykyjä aktivoitaessa pitäisi kyseinen alue näkyä eri kuvantamismenetelmillä. Tällaisia tapauksia toki tiedetään olevan, kuten kieli (ks. edempänä), matematiikka (Varley et. al. 2005, Brannon 2005), musiikki (Peretz & Coltheart 2003) ja työkalujen käyttö (Greenfield 1991), mutta jossain vaiheessa eri kykyjen rajat alkavat hämärtyä ja etenkin kielen rooli korkeammassa kyvyssä tulee epämääräiseksi. Näiden kykyjen käyttö aktivoi kyvyille tavanomaisen alueen lisäksi myös muita alueita (mm. Brocan alue, ks. esim. Friederici 2011).

Jokainen on jossain vaiheessa huomannut, että kahden erillisen, tuottavaa kykyä vaativan tehtävän samanaikainen tekeminen heikentää toisen tai molempien tehtävien suoritusta. Esimerkiksi sanallisen ja matemaattisen tehtävän samanaikainen suorittaminen voi olla joissain tapauksissa mahdotonta. Tämä viittaisi siihen, että kyseessä olevilla kyvyillä ei ole omaa tuottavaa systeemiä vaan käyttävät yhteistä, tässä tapauksessa kieltä sanalliseen tehtävään ja sanallisessa muodossa olevaa matemaattiseen tehtävään. On myös mahdollista, että tällaiset rajoitukset johtuvat kykyjen käyttämien sensoris-motoristen kykyjen rajallisuudesta.

Ihmisen luovuuden kaltaista kykyä ei ole tavattu millään muulla eläinlajilla. Jos jokaisella tuottavalla kognitiivisella kyvyllä olisi oma tuottavuuden lähteensä, niin miksi muille eläinlajeille ei ole kehittynyt edes jotain produktiivista kykyä, esimerkiksi työkalujen suunnittelu- ja käyttökykyä? Vastaus ei kuitenkaan ole täysin selvä, sillä esimerkiksi simpanssien (ja muiden kädellisten) on havaittu käyttävän toisinaan työkaluja, kuten puisia keppejä ruoan kaivamiseen koloista ja jopa muokkaavan olemassa olevia materiaaleja työkaluiksi (ks. esim.

Lieberman 2000). Muitakin tapauksia on, esimerkiksi saukot hajottavat simpukoita kivillä.

On epätodennäköistä, että jokaiseen tuottavaan kykyyn olisi itsenäisesti kehittynyt oma produktiivinen komponenttinsa, olivat ne sitten evoluutiopsykologian mukaisesti evoluutiossa kehittyneitä modulaarisia adaptaatioita tai äkillisesti makromutaation kautta ilmestyneitä kykyjä (Brattico 2009). Voidaan lisäksi kysyä, olisiko tällainen redundantti rakenne evoluution kannalta ”mielekästä”. Nämä näkökohdat liittyvät myös edelliseen kohtaan muiden eläinten vastaavista kyvyistä.

Selvin todiste erillisiä tuottavia komponentteja vastaan on eri aivojen kuvantamismenetelmillä saadut havainnot aivoalueiden aktivoitumisesta eri tehtäviä suoritettaessa. Aktivoituminen ei tuota selkeitä merkkejä kykyjen lokalisoitumisesta yhteen paikkaan. Näiden seikkojen perusteella tuottava komponentti jokaisessa kognitiivisessa kyvyssä tuntuu epätodennäköiseltä.

3.1.2 Hypoteesi 2: Kieli ja sen neuraaliset vastineet toimivat tuottavuuden yleisenä lähteenä.

Jos mielen produktiivisuus perustuisi pelkästään kieleen, sen neuraaliset korrelaatit tiedettäisiin ainakin kohtalaisen hyvin (ks. luku 4.1 ja esim. Brattico 2008a, Friederici 2006, Kolb & Whishaw 1990, Pulvermüller 2003). Erityisesti tiedetään, että vasemman aivolohkon Brocan alueen (BA 44/45) vaurioituminen voi johtaa potilaan kielen tuottamisen vaikeutumiseen tai kielelliseen kyvyttömyyteen. Kielikyvyn lokalisoinnissa eri yksilöillä on kuitenkin tiettyä epämääräisyyttä ja poikkeustapauksia (ks. luku 4.1).

Kaikilla ihmisillä on jonkinlainen kieli. Sen ei välttämättä tarvitse perustua puheeseen, vaan esimerkiksi kuuroilla on viittomakieli ja kuurosokeilla taktiiliviittominen eli kädestä käteen viittominen. On myös huomattu, että yhteisen kielen puuttuessa (esimerkiksi siirtolaisten keskuudessa) lapset

kehittävät spontaanisti ns. pidgin-kielen (Pinker 1994). Kielten taustalla oleva rakenne on samanlainen, ja myös primitiivisten kulttuurien kielet ovat yhtä ilmaisuvoimaisia kuin kaikki muutkin (Pinker 1994). Tosin on viitteitä, että näin ei aina ole (vrt. Everett 2005). Voidaan tietysti kysyä, onko lapsilla syntyessään nimenomaan kielikyky, vai jokin yleisempi kyky oppia säännönmukaisuuksia ympäristöstä. Emme voi testata tätä pitämällä vastasyntynyttä poissa ympäristön vaikutteista tai manipuloimalla syötteitä, mutta on olemassa tiettyjä tapauksia (kuurot, kuurosokeat, "susilapset"), jotka antavat joitain viitteitä siitä, mitä synnynnäisiä valmiuksia lapsella on. Yksi mahdollisuus on tutkia luvussa 2.7 mainitun FOXP2-geenin merkitystä kieleen. On tietysti mahdollista, että kyseisen geenin mutaatio saattaa kuitenkin liittyä enemmän Brocan alueen käyttämiseen puheenmuodostuksessa kuin itse kieleen (Corballis 2004).

Lapsi oppii kielen varhaisessa iässä itsenäisesti. Muut korkeammat kognitiiviset kyvyt, kuten esimerkiksi päättely, ongelmanratkaisu ja sosiaalinen kognitio kehittyvät vasta myöhemmällä iällä (Greenfield 1991). Tämä voisi olla merkki muun tuottavan toiminnan kielellisestä perustasta.

Kieli on tuottavaa luonnostaan, ilman suurempaa tietoista suunnittelua. Muiden tuottavien kykyjen osalta (esimerkiksi matematiikka tai esineiden valmistus) tuottavuus vaatii enemmän tietoisia ponnisteluja. Tosin esimerkiksi eräät tiedemiehet ovat väittäneet saaneensa suurimmat oivalluksensa "välähdyksenomaisesti", ilman sen suurempia tietoisia ponnisteluja (Pinker 1994). Myös tämän perusteella on mahdollista, että kieli kehittyi ennen muita tuottavia, korkeampia kognitiivisia kykyjä (Corballis 1994).

Paul Bloom määrittelee kieleen perustuvan produktiivisuuden hypoteesin seuraavasti (Bloom 1994, s. 179): "symbolien sääntömääräinen manipulointi kehittyi ensin kielessä. Evoluutiossa tuottavan kielen käyttämiä neuraalisia rakenteita pääsivät hyödyntämään myös muut kognitiiviset kyvyt, kuten työkalujen valmistus ja sosiaalinen kognitio."

Kieli on saattanut aloittaa eräänlaisen lumivyöryefektin ihmisen evoluutiossa. Kun kommunikaatio (ja sen kautta abstrakti ajattelu) on kehittynyt tarpeeksi, ihminen on saanut ylivoimaisen kollektiivisen kyvyn hallita ympäristöään. Adaptaation kautta kieltä tukevat ominaisuudet olisivat valikoituneet ja vakiinnuttaneet itsensä geneettiseen perimään. Yksilötasolla ihmisen tuottavuus tai luovuus on vähäistä, tehokkaimmillaan se on sosiaalisessa vuorovaikutuksessa, jolloin yksilöt jakavat kollektiivista tietoutta ja taitoja.

Derek Bickerton (Bickerton 1990, s. 4) puolustaa näkemystä kielen roolista ihmisen erottavien kykyjen selittäjänä: ”kieli ei ole ainoastaan voima, joka laukaisi meidät muiden lajien rajojen yli, vaan se on välttämätön (ja ehkä jopa riittävä) ehto sekä tietoisuudelle, että meidän ainutlaatuisille kyvyillemme.”

Kieli ei kuitenkaan ole mikään yksittäinen ja autonominen moduuli, vaan se tarvitsee tiettyjä ulkoisia järjestelmiä, kuten sensoris-motoriset ja käsitteellis-intentionaaliset systeemit sekä näiden väliset yhteydet (Hauser, Chomsky & Fitch 2002). Kognitio voi olla läpikotaisin kielen ”kylästä” siinä mielessä, että kaikista kognitiivisista kyvyistä on hermostollinen yhteys kieleen. Lisäksi kielen syntaksin prosessointi näyttäisi tapahtuva tietyillä vasemman aivopuoliskon alueilla riippumatta käytetystä kielen modaliteetista (puhe, luku kirjoitus, viittoma, jne.) (Emmorey 2001).

Voiko sitten kieli biologisena ilmiönä, populaation laajennetun fenotyypin ominaisuutena (Nowak et al. 2002, Gilkey et al. 2009) olla kaikkien muiden tuottavien kykyjen perusta? Kieltä on ehdotettu kognitiivisten kykyjen tehostajaksi ja jopa mahdollistajaksi (mm. Gilkey et al. 2009, Clark 1998 & 1997). Kieli voisi siten mahdollistaa muuten ”ei-käsiteltävissä” olevien ongelmien formuloinnin ja käsittelyn kielellisessä muodossa. Tämän hypoteesin vahvistamiseksi olisi selvitettävä se, voidaanko kaikki tuottavat produktiiviset kyvyt muotoilla kielellisesti ja voisivatko ne siten käyttää kielen produktiivisuutta hyväkseen (Clark 1998 & 1997). Voidaan heti kysyä, miten

esimerkiksi musikaalinen tai taiteellinen tuottavuus ylipäänsä voisi perustua kielelliseen käsittelyyn? Musiikin tuottaminen perustuu kielen kaltaisten diskreettien elementtien yhdistelyyn eikä näyttäisi vaativan kielellistä prosessointia (Patel 2003). Näin kieli ei olisi varsinainen tuottavuuden ehto tai perusta vaan sen laajentaja ja tehostaja.

Christiansen ja Chater (2008) esittävät, että kieli on mukautunut olemassa oleviin kognitiivisiin rakenteisiin. Tämän mukaan ihmisellä oli jo ennen kielen kehittymistä rakenteita ja järjestelmiä tuottavuuden synnyttämiseksi. Evoluution ja aivojen plastisuuden huomioiden prosessin on täytynyt olla molemminpuolinen. Kielen kehittyminen on asettanut paineita myös keskushermoston kehitykselle.

Kielen ja ajattelun suhde on ongelmallinen. Kaikki ajattelu ei voi olla kielellistä, sisäistä puhetta. On myös ei-kielellistä ajattelua, päättelyä ja ongelmanratkaisua (ks. esim. Bermúdes 2003). Esimerkiksi Antonio Damasion malli ajattelusta perustuu kuviin (Damasio 2001). Fodorin (1975) mukaan elävien organismien joustava ja mukautuva käyttäytyminen voidaan selittää mallilla jossa eräänlaisella ajattelun kielellä (language of thought, LOT) arvioidaan eri käyttäytymisvaihtoehtojen seuraamuksia ja niistä valitaan tietty vaihtoehto tilanteen mukaan. Ajattelun kielen täytyy olla yhtä tuottavaa kuin ulkoisen kielenkin (Pinker 1994). Sen on kyettävä tekemään erilaisten merkitysrakenteiden koodaus kommunikaatioon sopivaksi ja toisaalta kääntämään rajoittamaton määrä erilaisia saapuvia viestejä takaisin ajattelun kielelle. Fodorin mukaan tehokkaampaa järjestelmää ei voisi oppia, mutta ontogeeninen hermoston kehittyminen voisi laajentaa ehkä tehokkaammalla käsitejärjestelmällä ajattelun kieltä. Jos myös muilla eläimillä on Fodorin määrittelemä representaatiolla tapahtuva ajattelun kieli, niin mikä sitten erottaa ihmisen muista eläimistä? Muiden eläinten tuottavuus on paljon rajoittuneempaa kuin ihmisillä. Vaikka etenkin ”korkeammat” eläimet pystyvät ilmeisesti tuottamaan hyvin monipuolisia käyttäytymisvaihtoehtoja erilaisiin

tilanteisiin, näiltä eläimiltä puuttuu rajattomaan ilmaisuun kykenevä kieli ja niiden kommunikaatio on siten rajoittunutta. Tämä estää niitä muodostamasta vastavuoroisuuden kautta muodostuvia yhteisiä käsitteitä, joiden määrä lisääntyisi ja siirtyisi sukupolvelta toiselle.

On tietysti mahdollista, että ontogeniassa eli yksilönkehityksessä kieli kehittyy ensin ja muut tuottavat kyvyt eriytyvät myöhemmässä kehityksen vaiheessa omiksi alueiksi (Greenfield 1991). Yksi analogia on tiettyjen taitojen automatisointi, jossa alun perin tietoisien ja kielellisten suunnittelun alainen toiminto muuttuu kokemuksen myötä automaattiseksi ja tiedostamattomaksi kyvyksi. Ei kuitenkaan ole uskottavaa, että tuottava toiminta vaatisi aina (ennen automatisointia) kielellistä käsittelyä (vrt. "näyt" jne.). Lisäksi on epäselvää, miten automatisointi voisi jollain tavalla kopioida tiettyjä funktioita uusille neuraalisille alueille. Voisiko esimerkiksi jonkin tietyn luovan kyvyn vaatima laskenta ensin rakentua kielen neuraalisissa korrelaateissa ja sitten kopioitua johonkin (eräänlaisena aktivoitumiskuvion siirtymisenä) toiseen paikkaan? Luonnollinen syy tällaiseen voisi olla neuraalisen laskennan vaatiman neuronien ja synapsitiheyden hyväksikäyttö (eli alkuperäisestä paikasta loppuu teho). Toisaalta voidaan kysyä, millainen sisäinen puhe ja kielellinen käsittely on syntymäkuuroilla? Tällaisilla ihmisillä kuuloalueet eivät kehity, eli he eivät voi tuottaa äänenkaltaista sisäistä puhetta.

Saattaa olla, että produktiivisuuden vaatima rekursio syntyy vasta myöhemmällä iällä, kun sen vaatimat symbolit ovat kiinnittyneet. Symbolinen muisti saattaa näin syntyä spontaanisti ja supramodaalinen symbolinen rekursio toimisi sitten kaiken produktiivisuuden mahdollistajana.

Tähän vaihtoehtoon pätee sama argumentti dissosiaatioista kuin hypoteesiin 1 mutta käänteisesti. Kielellisten kykyjen heikkeneminen tai häviäminen ei läheskään aina vaikuta muihin tuottaviin kykyihin. Esimerkiksi amobarbitaalin ruiskuttaminen kaulavaltimoon (oikea vs. vasen) aiheuttaa suurimmalla osalla

(96 %) ihmisistä kielellisten toimintojen katoamisen. Tätä ilmiötä käytetään hyväksi puheen lateralisaation kartoituksessa ennen kirurgisia toimenpiteitä, niin sanotussa Wada-testissä (Hajek et al. 1998). Amobarbitaalin vaikutukseen muihin kykyihin vaikuttaa merkittävästi kielen lateralisaatio.

3.1.3 Hypoteesi 3: Kognitiivisten kykyjen tuottavuus syntyy eri kognitiivisten kykyjen ja siten eri aivoalueiden muodostamassa verkostossa.

Kommunikaation vaatimien, yhä runsaampien ja abstraktimpien käsitteiden synty on saattanut olla pohjana tuottavien kykyjen synnylle. Abstraktio on mahdollistanut rekursion käytön alueriippumattomasti (domain independent) ja tiedon prosessoinnin kevyemmin kuin alueriippuvilla (domain specific) representaatioilla, kuten esimerkiksi kuvilla. Tässä ollaan jo lähellä klassisen kognitiotieteen perusteita (vrt. esim. Newell & Simon 1976).

Produktiivisten kykyjen perustana ilmeisesti olevaa rekursiota (Hauser, Chomsky & Fitch 2002) ei voida pitää erillisenä neuraalisena moduulina (Bloom 1994, Corballis 2011). Se on pikemminkin erilaisia kognitiivisia kykyjä organisoiva periaate. Kuitenkin jokin neuraalinen rakenne täytyy produktiivisuuden ja rekursion taustalla olla, sillä oletamme, että kaikki kognitiiviset kyvyt ja ominaisuudet ovat neuraalisten rakenteiden toiminnan aiheuttamaa ilmentymää (ks. esim. Pulvermüller 2002).

Jerry Fodor postuloi ajattelun kielen, joka edeltää ja alustaa kaikkea tuottavuutta (Fodor 1975). Tällainen kieli voisi olla myös eläimillä, mutta kenties ihmisen kollektiivisesti kielen mahdollistamassa takaisinkytkentäprosessissa kehittämä abstraktio mahdollisti laajemman tuottavuuden (Hauser et al. 2002 s. 1578, Pinker 1994 s. 77, Clark 1997). Ajattelun kieli tai I-kieli (internal language) (Berwick & Chomsky 2011) olisi siis yhtä ilmaisuvoimainen kuin ulkoinen kielikin, joka itse asiassa perustuu I-kieleen. Ainoa ero olisi kielten leksikon sisällössä ja laajuudessa. Kun ajattelun

kieli toimii ainakin tietyillä korkeammilla lajeilla evolutiivisesti saaduilla sensorisilla ja somaattisilla representaatioilla, ihmisellä tämän lisäksi kehittyneellä symbolisella kielellä on käytettävissään laajempi, abstraktinen ja alati kasvava representaatioiden kokoelma. Symbolien käsittelyn hallittavuus verrattuna esimerkiksi kuvilla tapahtuvaan ajatteluun saattaa olla avain ihmisen erityiskykyihin (esim. Jackendoff 1996).

Näin ihmisen neuraalisten rakenteiden ei välttämättä tarvitsisi erota merkittävästi ainakaan muiden kädellisten rakenteista tuottaakseen ihmiselle tyypilliset kyvyt. Yksi tapa lähestyä ongelmaa ihmiselle ominaisen tuottavan neuraalisen rakenteen rajaamisesta, on tutkia hermoston ontogeniaa eli yksilön kehitystä.

Aivotutkija Antonio Damasio (2001, s. 113-114) esittää, että perintöaines eli ”genomi määrää vain karkeasti aivojen rakenteen ja vain evolutiivisesti vanhimpien, elonjäämisen kannalta kriittisten järjestelmien ja piirien täsmällisen tai lähes täsmällisen rakenteen määrittämisen. Nämä rakenteet vaikuttavat muiden osien kehittämiseen vuorovaikutuksessa ympäristön ja muiden yksilöiden kanssa.” Lapsen oppiessa ensikielen aivojen plastisuus asettaa ympärillä olevan sosiaalisen ympäristön altistaman syntaksin rakenteet eli ilmeisen hermostollisen rakenteen lopullisesti muotoonsa. Kieltä oppiessaan lapsen sanavarasto, eli leksikko, kasvaa todella nopeasti, keskimäärin noin kymmenen sanaa ensimmäisenä vuotena, noin 300 sanaa toisena vuotena (ks. esim. Fenson et al. 2000). Ensin opitaan tiettyjen äänteiden merkityksiä yhdistämällä tiettyjä olioita tiettyihin äänteisiin (”tuo on *kissa*”) ja myöhemmin opitaan yhdistämään äänteet kirjoitusmerkkeihin. Lapsi oppi ensikielen rakenteen kuitenkin vaivattomasti, eli kielioppi näyttäisi ilmentävän joitain geneettisesti siirtyviä rakenteita. Tuo kielen rakenne voi toisaalta kuvastaa ihmisen yleistä rationaalista kykyä järjestää asioita mielekkäiksi kokonaisuuksiksi. Voidaan ehkä sanoa, että kaikkien älykkäiden agenttien toiminta kuvastaa itse maailman loogista rakennetta ja evoluution kautta

saatuja toimintamalleja. Yleisempi tuottavuus saattaa asettua ja muovautua vasta vauvana tai varhaislapsuudessa ympäristön vuorovaikutuksen ansiosta (Bloom 1994, Greenfield 1991). Rekursion mahdollistava komponentti saattaa siten olla jo mukana evolutiivisesti vanhimmissa rakenteissa, mutta rajattuna johonkin tiettyyn modulaariseen funktioon, esimerkiksi havaintojen järjestämiseen (Hauser et al. 2002). Näin yleinen tuottava kyky syntyisi vain tietynlaisen sosiaalisen ympäristön vaikutuksesta ja olisi eräänlainen itseään ylläpitävä emergentti ominaisuus. Tämän näkemyksen mukaan niissä kulttuureissa, joissa puuttuu vaadittu sosiaalinen vaikutus, jää tietty osa kognitiivisista kyvyistä pois. Esimerkiksi Pirahã-heimon kieli on rakenteeltaan kuin kaksivuotiaitten lasten kieltä ja heidän laskutaitonsa rajoittuu lukuun kaksi (Everett 2005). Voisiko jossain tapauksissa, tietyssä sosiaalisessa ympäristössä kielen rekursiivinen ominaisuus jäädä aktualisoitumatta? On todisteita, että tietyissä villilapsien, kuurosokeiden ja analfabeettien (luku- ja kirjoitustaidottomat) tapauksissa näin mahdollisesti tapahtuu.

Monimutkaisen kulttuuriympäristön aiheuttama jatkuva kognitiivinen paine voi vahvistaa tiettyjä aivoalueiden (erityisesti ohimolohkon alueen) hermostollisia kytkentöjä (vrt. lapsuuden aikainen kytkentöjen lisääntyminen eli ympäristön aiheuttama synapsiverkoston muotoutuminen ontogeenian aikana) ja luoda siten hermostollisen perustan nykyihmisen produktiivisille kyvyille. Eristyksissä elävät primitiiviset heimot ovat jääneet pääsääntöisesti tietylle tuottavuuden asteelle. Toisaalta näiden kulttuurien kieli on kuitenkin yleensä yhtä luomiskykyinen kuin mikä tahansa ns. korkeakulttuurin kieli (Pinker, 1994), poikkeuksena mahdollisesti edellä mainittu Pirahã-heimon. Onko kyse sitten kaiken alla olevasta rekursiivisesta järjestelmästä kuten Chomsky väittää, vai eikö ole mitään merkittävää hermostollista eroa (ainakaan) lähimpiin lajeihin? Eli jos *syntaksin muodostumiseen* tarvittava kyky ei siirry geneettisesti, tarvitaan jokin muu geneettisesti kehittynyt, valikoitunut ja siirtyvä ominaisuus, joka mahdollistaa ainakin kommunikaatiokyvyn

omaksumisen, eli kyvyn, jolla opitaan kumulatiivinen ekstrasomaattinen kulttuurillinen sisältö. Myös ulkoisissa olosuhteissa tai sosiaalisuhteissa tapahtunut muutos on voinut laukaista merkittäviä kognitiivisia kykyjä. Esimerkiksi pitkittynyt elinikä mahdollisti myös isovanhempien avun ja kumulatiivisen kerronnan (Caspari 2011). Ensimmäiset merkit isovanhempien yleistymisestä tulevat noin 30000 vuoden takaa, mikä sopii hyvin nykyihmisen kehitykseen (ks. luku 2.6).

Ympäristön vaikutus ei ilmeisesti kuitenkaan yksin riitä, kuten tapaukset, joissa simpansseja on kasvatettu ihmisten tavoin osoittavat (ks. esim. Beran et al. 1999). Kuuluisin tapaus liittyy yhdysvaltalaisen psykologien Winthrop ja Luella Kelloggin 1930-luvulla tekemään kokeeseen, jossa he kasvattivat Guaninimisen simpanssivauvan yhdessä oman Donald-poikansa kanssa yhdeksän kuukauden ajan (Brattico 2008a). Gua ei oppinut äänteleämään kielellisesti ihmislapsen tavoin. Koetta voidaan toisaalta kritisoida koska Kelloggit saivat seitsemän ja puolen kuukauden ikäisen simpanssin vastasyntyneen sijaan, koe kesti vain yhdeksän kuukautta eikä kokeessa opetettu viittomakieltä. Kädellisillä tehtyjä tutkimuksia on tehty myöhemminkin, esimerkiksi Nim ja Kanzi (Corballis & Lea 1999). Yhteenvetona voidaan sanoa, että muut kädelliset voivat ehkä saavuttaa kaksivuotiaan lapsen tai Bickertonin ehdottaman protokielen tason (Bickerton 1990). Näiden tapausten laajempi käsittely on tämän esityksen aihepiirin ulkopuolella. Koska ihmisen ja ihmisen lähimmän lajin, simpanssin aivojen neuroanatomia ei juuri eroa (ero on pikemminkin määrällinen kuin laadullinen (ks. luku 4.1)), täytyy erottavan tekijän olla hyvin pieni tai epämääräinen ja nykyisellä tietämyksellä ja menetelmillä vaikeasti rajattava (ks. Friederici et al. 2006).

Muiden eläinten luovuus on rajattua, mutta sitä on kuitenkin olemassa. Toisaalta ihminen on ainoa eläin, jolla on rajattoman ilmaisukyvyyn kieli. Bloom esittää hypoteesin (Bloom 1994), jonka mukaan symbolien sääntömääräistä manipulointia esiintyy sekä kielessä, että muissa kognitiivisissa domaineissa.

Yksilönkehityksessä ihminen voi yhdistää kielen ja jonkin olemassa olevan, ei-tuottavan kognitiivisen mekanismin uudeksi tuottavaksi kyvyksi. Näin esimerkiksi lukujen käsittely ja muut taidot voivat tavallaan periä kielen tuottavia ominaisuuksia.

Jos kieli kehittyi ensin kommunikaatiotarpeen lisääntymisen yhteydessä, se ei välttämättä ollut aluksi kovinkaan tuottavaa (esim. Pinker 1994). Sanavarasto eli leksikko (tai paremminkin äännevarasto) on kaikella todennäköisyydellä ollut hyvin pieni (vrt. protokieli, Bickerton 1990). Vaikka rekursion mahdollistava neuroanatomia olisikin jo tuolloin ollut käytössä, merkitykseltään ja tunnistettavuudeltaan erilaisten lauseiden tuottaminen olisi ollut käytännössä hyvin vaikeaa (Hauser et al. 2002). Sama pätee sisäiseen puheeseen ja ylipäätään käsitteisiin. Käsitejärjestelmä ja rekursio tarvitsevat alkeellisia rakenneyksiköitä, joista rakennetaan erilaisia leksikaalisia yksiköitä käsitteiksi ja edelleen rekursion kautta monimutkaisimmiksi rakenteiksi. Kielen neuraaliset vastineet eivät tällöin ole suoraan ihmisen tuottavien kykyjen neuraalinen perusta. Ne ovat sen välttämätön, mutta eivät vielä riittävä tekijä ihmisen produktiivisuudelle. Kielen kehittyminen ja monipuolistuminen sekä tämän seurauksena abstraktien käsitteiden kehittyminen ja laajentuminen ovat (positiivisella takaisinkytkennällä) aiheuttaneet painetta myös muiden aivoalueiden kehittymiselle ja ovat anatomisesti modernin ihmisen rajattoman tuottavuuden perusta.

Jos produktiivinen kyky tai sen taustalla todennäköisesti olevan rekursion mahdollistava ominaisuus ei löydy mistään rajatusta aivojen neurologisesta rakenteesta vaan on jonkinlainen yksilönkehityksen aikana syntyvä, useiden osien toiminnallisuuden muodostama (emergentti) ominaisuus, sen paikallistaminen ja määrittäminen voi olla vaikeaa. Tällöin täsmällisesti määriteltävä, vain ihmiselle ominainen, geneettisesti muodostunut neuraalinen perusta puuttuu. Jokaisella normaalilla ihmisellä syntyessään olevaa, geneettisesti periytyvää kielikyvyn mahdollistavaa hermostollista systeemiä

voidaan kuitenkin pitää lähtökohtana normaalin ontogenian ja ympäristön vaikutusten kautta syntyvälle produktiivisuuden verkostolle. Määrittelemme siten tähän vaihtoehtoon perustuvan, seuraavassa esityksen kohteeksi otettavan hypoteesin:

Ihmisen produktiivisten kognitiivisten kykyjen neuraalinen perusta on kielen rekursiivisen rakenteen mahdollistavien aivoalueiden ja muiden tuottavien kykyjen omien alueiden muodostama verkosto.

Tämä on siis kohdan 3.1 vaihtoehto 2b ja se tarkoittaa produktiivisen kyvyn löyhempää modulaarisuutta. Tätä vaihtoehtoa voidaan kutsua *integraatiohypoteesiksi*, koska siinä yhdistetään kieli ja muut produktiiviset, hierarkkiset ja rekursiiviset kyvyt yhdeksi erottamattomaksi verkostoksi.

3.2 Integraatiohypoteesin hyötyjä

Miksi sitten pitäisi olettaa, että ihmisen tuottavien kykyjen taustalla on yksi yhteinen neuraalinen perusta? Tärkeimpänä huomiona on se tosiasia, että jokin erottaa meidät muista eläimistä. Ihminen on poikkeuksellisen menestynyt eläinlaji. Neuroanatomiset ja geneettiset erot lähimpiin kädellisiin sukulaislajeihimme ovat kuitenkin pienet (ks. 2.1.1). Tarkoituksena on siis selvittää ihmiskäsitystä, eli mikä tekee meistä ihmisen. Ei ole löydetty mitään yhtä sellaista kompaktia neuroanatomista aluetta, joka selvästi tuottaisi kaikki ihmisille luontaiset produktiiviset kyvyt. Kykyjen voidaan olettaa syntyvän lukuisten eri neuroanatomisten alueiden ihmiselle ainutlaatuisesta käyttötavasta.

Integraatiohypoteesin testaus voisi tapahtua ns. tupladissosiaatiolla (double dissociation). Jos eri tuottavat kyvyt eivät ole mitään erillisiä kognitiivisia funktioita, vaan samaa neuraalista piiriä käyttävän saman funktion eri toiminnallisuuksia, pitäisi vaurion yhden tuottavan kyvyn aivoalueella

vaikuttaa myös muihin kykyihin. Tuottavat kyvyt täytyy kuitenkin määritellä tarkasti, jotta tiedetään, milloin ne puuttuvat.

On olemassa patologisia todisteita kielellisten ja muiden tuottavien kykyjen dissosiaatioista. Näissä tapauksissa joko kielellinen tai muu tuottava kyky on vaikeasti heikentynyt, toisen ollessa normaali (esim. Varley et al. 2005,). Tämän perusteella on epätodennäköistä, että sama neuraalinen komponentti olisi sekä kielellisten, että muiden tuottavien kykyjen takana. Toisaalta tapaukset voivat johtua yhden kyvyn pääsyn estymisestä johonkin yhteiseen neuraaliseen rakenteeseen.

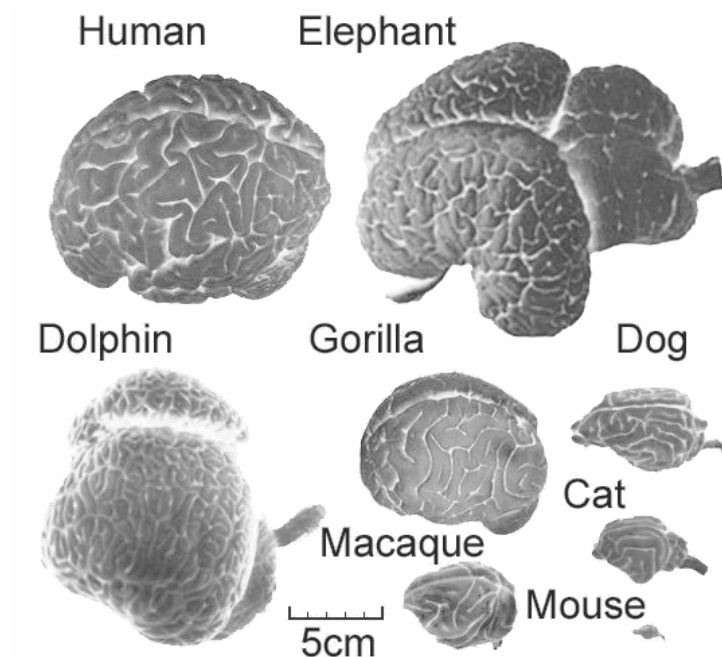
Kyseessä on myös työhypoteesi tutkimusohjelman muotoilemiseksi mielen tuottavien kykyjen yhteisestä neuraalisesta perustasta. Hypoteesien tarkoituksena on ohjata empiiristä tutkimusta. Jatkotutkimuksen tarkoituksena on siten auttaa ymmärtämään ihmismielen ominaisuuksia ja rajoituksia sekä yrittää ehkä jopa auttaa tuottavien kykyjen kehittämistä.

4 PRODUKTIIVISUUDEN NEURAALINEN PERUSTA

Tässä luvussa käsitellään aivojen produktiivisuuden mahdollisia hermostollisia rakenteita. Aluksi tarkastellaan aivojen kokoa, sitten kielen neurologisia korrelaatteja, jonka jälkeen käydään läpi muita mahdollisia aivoalueita produktiivisuudelle. Lopuksi käsitellään kulttuurin kehityksen mahdollista vaikutusta aivoihin. Luvussa pyritään löytämään todisteita integraatiohypoteesille.

4.1 Aivojen koon vaikutus

Aluksi voidaan tarkastella aivoja kokonaisuutena. Vaikuttaako aivojemme koko jotenkin produktiivisuuteen? Ovatko aivomme vain skaalautuneita muiden eläinten, erityisesti kädellisten aivoja? Aivojen kokoa tai painoa vertailemalla nähdään, että ihmisen aivot eivät ole suurimmat (kuva 6.).



Kuva 6. Eri aivojen kokojen vertailua (Public Domain, lähde: www.wpclipart.com/medical/anatomy/brain/comparitive_brain_size.png.html)

Kuvasta 6 nähdään, että esimerkiksi norsuilla, delfiineillä ja valailla on isommat aivot. Näillä eläimillä on kompleksisia käyttäytymismuotoja ja sosiaalisia suhteita, mutta niiden kognitiivisten kykyjen vertailu ihmisiin on vaikeaa (Marino et al. 2007). Tässä yhteydessä voidaan kuitenkin korostaa ihmisen erottamattomuutta hänen kulttuuriympäristöstään joka pitkälti määrittelee nykyihmisen. Tällaista pientä yhteisöä suurempaa kulttuuria ei ole millään muulla eläimellä. Lisäksi esimerkiksi älykkäänä pidetyllä simpanssilla on monia sorkkaeläimiä pienemmät aivot (Roth & Dicke 2005). Näin pelkkä aivojen ulkoinen koko ei kerro koko totuutta.

Toinen tapa aivojen vertailuun on verrata aivojen kokoa suhteessa ruumiin kokoon. Näin mitattuna suurista nisäkkäistä juuri ihmisellä on suhteellisesti suurimmat aivot, 2 % ruumiin painosta. Lisäksi on olemassa ns. enkefalisaatio-osamäärä (EQ), joka ilmoittaa miten paljon tietyn lajin aivojen koko eroaa jonkin kyseisen eläinryhmän vertailuarvosta. Myös tällä mittarilla ihmisellä on ”luonnottoman” suuret aivot (Roth & Dicke 2005).

Neuronien lukumäärä vaihtelee eri tavalla eri eläinlajeilla. Ihmisellä neuroneja on ruumiin kokoon verrattuna eniten (Herculano-Houzel 2012). Hermostolujen energian tarve on noin 6 kcal/vrk/ 10^9 neuronia, joka ihmisen 86 miljardilla neuronilla vaatii reilut 500 kcal/vrk, eli noin 25 % koko ruumiin päivittäisestä energian tarpeesta. Tämä on paljon elimelle, joka painaa 2 % ruumiin painosta. Suuri energiantarve merkitsee myös lisääntyntä ravinnon hankkimiseen kuluvaa aikaa. Raakaravinnolla elävän, vastaavankokoisilla aivoilla varustetun ihmisapinan olisi syötävä enin osa valveillaolosta (Wrangham 2010). Tällainen energiantarve ei voi toimia evolutiivisesti, jollei siitä ole merkittävää hyötyä eloonjäämisen ja lisääntymisen kannalta. Ja jos saavutettu etu mahdollistaa jonkin vain ihmiselle tyypillisen kyvyn, voidaan pelkkää neuronien määrää pitää erottavana tekijänä.

Juuri neuronien lukumäärän ja siten aivojen kompleksisuuden lisääntyminen on esimerkiksi Chomskyn (1988) mukaan voinut olla syy ihmisen produktiivisuuden syntyyn. Kielen tai muun tuottavan kyvyn synty pelkästään aivojen symmetrisen laajentumisen sivutuotteena sotii kuitenkin aivojen anatomista ja kognitiivista modulaarisuutta vastaan (Corballis 1994).

Neuronien lukumäärä ei todennäköisesti ole ainoastaan kasvanut tasaisesti vaan neuronit ovat keskittyneet tiettyihin aivojen alueisiin. Ihmisen otsalohkon etuosan kuorikerroksen laajenemista on pidetty tärkeimpänä korkeampien kognitiivisten kykyjen mahdollistavana muutoksena. Toisaalta on todisteita siitä, että ohimolohkon korteksin kasvaminen johtuu nimenomaan yleisestä aivojen kasvamisesta (Toro et al. 2008, Herculano-Houzel 2012, Zhang & Sejnowski 2000).

Kortikalisaatio eli aivokuoren kasvaminen suhteessa muiden aivojen osien kokoon on yksi ihmisaivojen erityispiirre. Tämä on seurausta suuresta neuronien määrästä (Herculano-Houzel 2012). Nykyihmisen aivot ovat enemmän tai vähemmän versio aikaisempien hominidien aivoista, niiden eri osat ovat "vain" suhteessa kasvaneet, erityisesti neokorteksi ja otsalohko. Pelkkä neokorteksin tai otsalohkon kasvu ei kuitenkaan suoraan selitä ihmiselle luontaisia kykyjä. Myös evolutiivisesti vanhempien osien, kuten hypotalamuksen, on täytynyt kasvaa, koska eri alueet liittyvät toisiinsa (Damasio 2001).

Tietty hermoston rakenne määräytyy geneettisesti syntymässä, jonka jälkeen "lopullinen" rakenne kiinnittyy normaalin ontogeneesin aikana. Lisäksi aivojen plastisuus vaikuttaa koko eliniän. Edellä on kuvattu aivojen kehityksen evolutiivisia vaikutuksia, joita on kuvattu "kokemusta odottavaksi" -kehitykseksi (experience expectant) (Stiles & Jernigan 2010). Myöhempi "kokemuksesta riippuvainen" kehitys (experience dependent) muokkaa myös merkittävästi aivokuoren paksuutta ja erilaisten kytkentöjen muodostumista

(Sowell et al. 2004). Esityksen aiheen kannalta tästä muodostuu merkittävä kysymys: miten paljon ihmisen produktiiviset kyvyt ovat "valmiita" kokemuksia odottavia ja missä määrin ne syntyvät ympäristön paineesta, kokemuksesta riippuvaisina. Tämän tarkempi selvittäminen voidaan kuitenkin rajata esityksen ulkopuolelle, sillä esityksen kannalta kiinnostavia ovat ne neuraaliset rakenteet jotka mahdollistavat normaalin, tietyssä kehityksen vaiheessa olevan ihmisen tuottavat kyvyt. Tämän selvittämiseksi on tutkittavia eri aivojen alueita.

Aivot ovat herkkiä poimimaan tiettyjä säännönmukaisuuksia ärsykkeistä. Ihmisellä on syntyessään (ja todennäköisesti jo sikiöaikana) valmius kielellisten säännönmukaisuuksien löytämiseen suurimmillaan (Friederici et al. 2011). Vaikka uusien neuronien tuotto eli neurogeneesi loppuu pääosin prenataalisessa kehityksessä, aivot kasvavat koko lapsuuden ja hermosolujen välisten yhteyksien määrä eli ns. synaptinen tiheys kasvaa koko ajan (Stiles & Jernigan 2010, Kolb & Whishaw 1990). Syntyessä saadaan perimän ja sikiöajan mukainen määrä hermosoluja ja niiden tietyt synnynnäiset kytkennät. Ensimmäisten elinvuosien aikana synapsien määrä kasvaa 2500 synapsista syntymähetkellä 15000 synapsiin/hermosolu 2-3 vuoden iässä (Kolb & Whishaw 1990). Tällöin lapsella on eräänlainen oppimisikkuna (window of opportunity), joka käsittää tietyt kaudet lapsuudessa, jolloin tietyt kyvyt kehittyvät: näkeminen ja kuuleminen, kieli sekä korkeammat kognitiiviset funktiot (Shonkoff & Phillips 2000). Lapsuuden aikaisilla kokemuksilla on dramaattiset vaikutukset aivojen strukturaaliseen ja funktionaaliseen organisoitumiseen (Stiles & Jernigan 2010). Voidaan olettaa, että tällöin, ihmisen pitkän lapsuuden aikana tähän synapsiverkoston muodostuvat käsittekartat, jotka määräävät pitkälti ihmisen kehittymisen.

4.2 Eri alueiden vaikutus

Pelkkä neuronimäärä ei kerro, miten ne ovat järjestyneet toiminnallisiksi kokonaisuuksiksi ja verkostoiksi. Seuraavaksi tarkastellaan eri anatomisten aivoalueiden mahdollista vaikutusta tuottaviin kykyihin. Aluksi tarkastellaan otsalohkoa. Kieli on selvin esimerkki tuottavista kyvyistä, joten sen neuraalisia korrelaatteja käsitellään tarkemmin seuraavaksi. Lopuksi tarkastellaan muistin neuroanatomiaa, siellä muun muassa kielen käyttämät käsitteet on tallennettava jonnekin.

4.2.1 Otsalohko

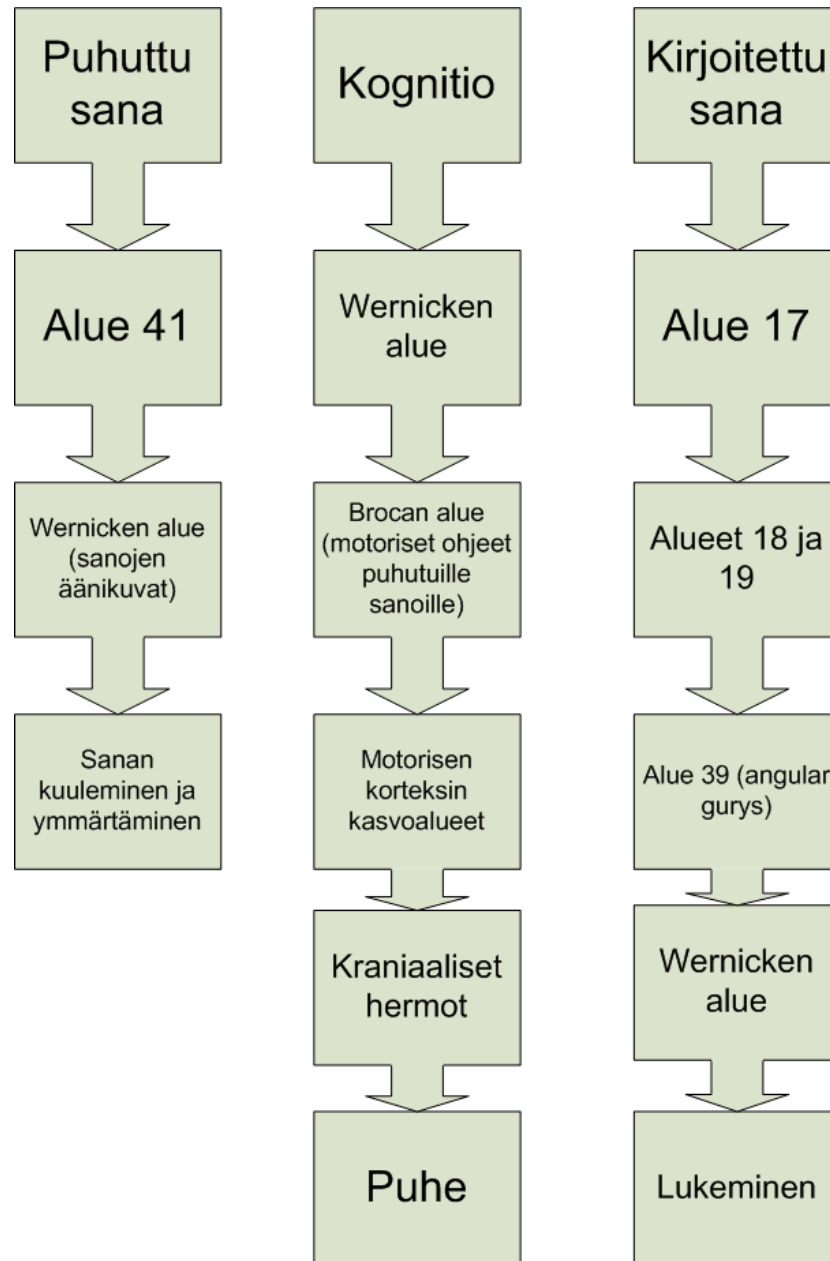
Otsalohkoa pidetään yleisesti tärkeänä korkeampien kognitiivisten kykyjen sijaintipaikkana (Kolb & Whishaw 1990, Miller & Cummins 2007). Otsalohkoon määritellyt, muille eläimille poikkeukselliset sosiaaliset kyvyt ja ominaisuudet edustavat koko ihmisen kulttuurin ja saavutusten korkeinta käyttäytymismuotoa. Mikä vaikutus otsalohkolla on tuottaviin kykyihin ja onko se jotenkin poikkeuksellinen verrattuna muihin lähimpiin eläinlajeihin?

Ihmisen otsalohkon poikkeavasta laajentumisesta suhteessa muihin aivolohkoihin verrattuna muihin hominideihin on eriäviä näkemyksiä (Semendeferi et al. 2002, Herculano-Houzel 2012, Rilling 2006). Kuitenkin meillä on muihin lähimpiin lajeihin verrattuna eniten neuroneja myös otsalohkossa (ks. luku 4.1). Semendeferi et al. (2002) ehdottaa erillisten (muun muassa otsalohkon) aivokuoren alueiden ja runsaampien liityntöjen olevan ihmisen erikoisten kognitiivisten kykyjen takana. Otsalohkon kuorikerroksen yhteyksien kehittymisen ajoitus ihmisellä onkin noin viisi vuotta ja muun muassa simpanssilla alle vuoden iässä (Liu et al. 2012). Tämä geneettinen pitkittynyt lapsuus on todennäköisesti yksi merkittävimmistä ihmisen erikoistumisen tekijöistä.

Erityisesti otsalohkon ja muiden alueiden kytkentöjen kasvu nimenomaan ihmisellä on voinut olla seurausta yhteisökoon kasvun evolutiivisista vaikutuksista. Lisääntyneet sosiaalisuhteet ovat vaatineet yhä enemmän tiedonkäsittelyn tehoa ja nimenomaan otsalohkoon nykyihmisellä paikallistuvat sosiaaliset ja kielelliset kyvyt ovat voineet olla merkittävä tekijä frontaalilohkon kytkentöjen kasvamiseen. Lisäksi lisääntynyt sosiaalinen kanssakäyminen ja monimutkaistuneet sosiaaliset verkostot ovat ehkä mahdollistaneet yhä abstraktimman ajattelun synnyn, koska kielellinen abstraktio nopeuttaa ja keventää representaatioiden siirtoa merkittävästi verrattuna suoraan aistijärjestelmän omiin, esimerkiksi kuvallisilla representaatioilla (esim. eleet) tapahtuvaan kommunikointiin. Tämän lisäksi enemmän ääntelyihin perustuva kommunikaatio on voinut vapauttaa käsien vaatiman motoriikan (ehkä ulkoisesta sisäiseen prosessointiin) ja itse kädet muuhun toimintaan (Corballis 1994), joka on voinut omalta osaltaan vaikuttaa ihmisen tuottavuuden lisääntymiseen (vrt. kommunikoinnin ja muun tekemisen yhtäaikaisuus).

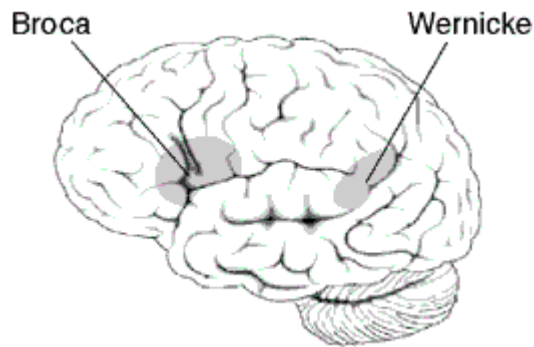
4.2.2 Kielen neuraalisia alueita

Kielen aivoalueet on määritelty klassinen Wernicke-Geschwind -mallissa (kuva 7). Norman Geshwind kehitti edelleen alkujaan Carl Wernicken muotoileman kielen neurologisen mallin (Kolb & Whishaw 1990). Mallissa kielen tuottaminen tapahtuu ohimo- ja otsalohkojen Wernicken ja Brocan alueilla (kuva 8). Mallia käytettiin aiemmin yleisesti neuroanomiassa, mutta nykyään se on jo vanhentunut erityisesti uusien ja parantuneiden aivokuvantamismenetelmien ansiosta.



Kuva 7. Wernicke-Geschwind -malli.

Erilaiset puheen ymmärtämisen ja tuottamisen häiriöt eli afasiat johtuvat usein erityyppisistä aivovammoista. Yleensä nämä afasian aiheuttamat vammat ovat keskittyneet otsa- ja ohimolohkon alueelle. Erityisesti puheen tuottamiseen vaikuttavassa ns. Brocan afasiassa potilaalla on vaurio Brocan alueella (kuva 8) (Kolb & Whishaw 1990).



Kuva 8. Brocan ja Wernicken alueiden sijainti (Wikimedia Commons).

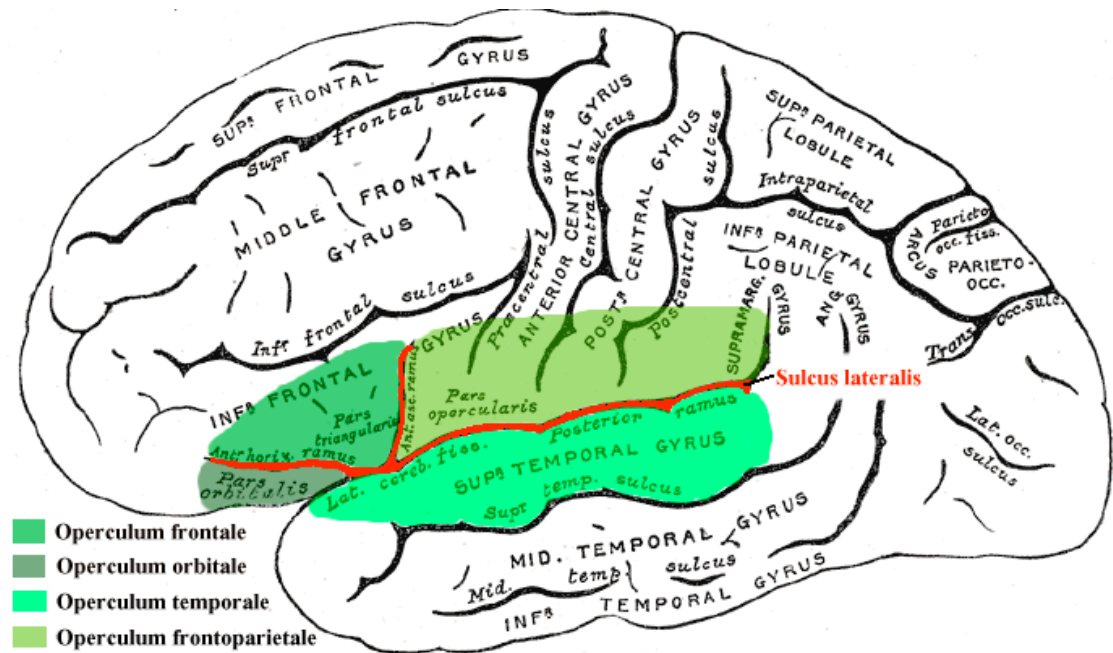
Voidaanko sitten kliinisistä potilastapauksista löytää merkkejä jonkin tietyn kielen aivoalueen vaurioiden vaikutuksesta *kaikkiin* tuottaviin kykyihin? Tätä vastaan on olemassa todisteita, esimerkiksi matemaattisten kykyjen säilymisenä (Varley et al. 2005, Grodzinsky 2000). Erilaisia potilastapauksia tunnetaan paljon ja niistä on tehty myös lukuisia tutkimuksia. Jos tuottava komponentti mielletään vasemman ohimolohkon ominaisuudeksi, niin mitä esimerkiksi kaikkein dramaattisimmat operaatiot, kuten ns. split-brain (aivolohkojen yhdistävän aivokurkiaisien eli corpus callosumin katkaisu) ja jopa toisen aivolohkon poisto vaikuttavat näihin kykyihin? Näiden tapausten vaikutusta on tutkittu lähinnä kielellisiin kykyihin (Kolb & Whishaw 1990). Tutkimusten perusteella on havaittu, että myös oikeassa aivolohkossa on kielellisiä kykyjä mm. kielen ymmärtämisessä, mutta syntaksin tai ainakin kielen tuottamisen kyky puuttuu. Toisaalta voidaan kysyä, eikö kielen kieliopin ”koodaus” takaisin ajattelun ”kielelle” vaadi myös samaa algoritmia? Toisin sanoen, kuullun tai luetun ymmärtäminen vaatii myös jotain tietoa syntaksista. Tehdyissä split-brain -kokeissa oikea aivopuolisko on pystynyt ymmärtämään sanoja ja lyhyitä lauseita semanttisesti, ilman että koehenkilö on edes tiedostanut tätä (esim. Kolb & Whishaw 1990)! Eli oikea aivopuolisko voi ymmärtää ainakin yksinkertaisia (äärellisen kielen) lauseita niin, että koehenkilö pystyy toimimaan lauseen mukaisesti, mutta ei pysty kertomaan siitä sanallisesti. Näin kieli ei voi olla täysin sama kuin ajattelu (vaikka usein

käytämmekin sisäistä puhetta esimerkiksi jonkin tekemisen suunnitteluun) ja lisäksi puheen ymmärtämisen ja puheen tuottamisen taustalla ovat eri neuraaliset korrelaatit (vrt. Fodor 1975, Pinker 1994 s. 78, Grodzinsky 2000). Voidaan kuitenkin sanoa, että kieli on ainakin syntaksin suhteen funktionaalisesti epäsymmetristä muuten anatomisesti symmetrisissä aivoissa.

Kielikyvyn mahdollistavien neuraalisten rakenteiden on täytynyt olla olemassa ennen symbolisen kielen syntyä (Lock 1999). Näiden rakenteiden funktionaalista kykyä voidaan kutsua universaaliksi kieliopiksi Chomskyn hypoteesin mukaisesti (Chomsky 1966). Ei tiedetä, sisälsivätkö nämä rakenteet jo tuottavuuden ja rekursion mahdollistavan komponentin. Tiedot kielen kehittämisestä ja vanhimmista säilyneistä arkeologisista todisteista tuottavasta toiminnasta eivät ole riittäviä. Eräiden väitteiden mukaan Homo habiliksen (ks. 2.6) fossiloituneiden kallojen sisäpuolelta olisi löydetty painauma Brocan alueen kohdalla merkkinä mahdollisesta kielikyvystä (Leakey 1995). Nykyisten lähisukulaisten, kuten simpanssien aivoissa on vastaavia rakenteita, mutta silti näiden hominidien tuottavuus on rajoittuneempaa (Schenker et al. 2008).

Havainnollisin tapa paikallistaa eri kognitiivisiin toimintoihin liittyvät aivoalueet on käyttää erilaisia kuvantamismenetelmiä (ks. luku 2.5). Funktionaalilla magneettiresonanssikuvantamisella (fMRI) on havaittu Brocan alueen (kuva 8, Pars opercularis/Pars triangularis) aktivoituminen kielen strukturaalisten hierarkioiden käsittelyssä (Friederici et al. 2006). Niin sanottuun äärelliseen kielioppiin (FSG, Finite-State Grammar) (ks. luku 2.3) perustuvia lauseita prosessoidaan evolutiivisesti vanhemmassa frontaalisessa operculumissa (Kuva 9, Operculum frontale). Hierarkkisesti rakentuneen kieliopin (PSG, Phrase-Structure Grammar) prosessointi aktivoi otsalohkon operculumin lisäksi Brocan aluetta (BA 44/45). Näiden eri alueiden sytoarkkitehtuuri eli solurakenne eroaa toisistaan. On huomattava, että myös viittomakieli aktivoi näitä samoja alueita, mikä viittaa kielen modaaliteetteja

yleisempään, abstraktimpaan prosessointiin (Emmorey 2001, Newman et al. 2010).



Kuva 9. Operculum (Wikimedia Commons).

Frontaalisen operculumin ja Brocan alueen muodostama systeemi voisi näin toimia jonkinlaisena neuraalisena perustana kielelle ja mahdollisesti myös yleiselle tuottavuudelle. Tämän mukaisesti Corballis (1991) on esittänyt vasemmassa aivolohkossa vain ihmisillä olevaa hypoteettista kombinatorista yhdistelyjärjestelmää (generative assembling device, GAD) produktiivisuuden tuottajaksi. Brocan alueesta on toisaalta tehty myös vertailua ihmisen ja muiden lähilajien välillä, eikä mitään merkittävää sytoarkkitehtuurista eroa ole löydetty (Schenker et al. 2008, Friederici 2006). Mikä sitten erottaa ihmisen muista hominideista?

On varottava lopullisesti kiinnittämästä syntaksin prosessointia ja etenkin yleistä produktiivisuutta pelkästään Brocan alueelle. Voidaan ehkä sanoa, että ainakin syntaksin prosessointi kehittyy vasemman aivopuoliskon Brocan

alueen ja tiettyjen muiden lähellä olevien alueiden muodostamaan verkostoon (vrt. Grodzinsky 2000).

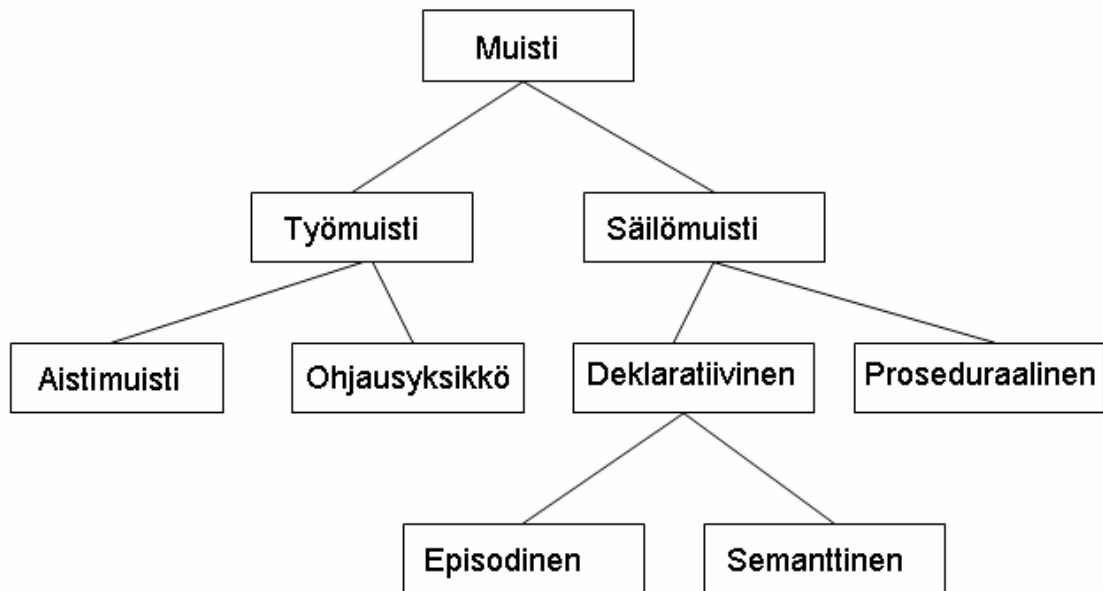
Edellisen mukaan kielen syntaksin mahdollinen neuraalinen rakenne näyttää kehittyvän yleensä normaalin ontogeneesin aikana vasemman aivopuoliskon ohimolohkoon. Nämä alueet eivät kuitenkaan aktivoitu pelkästään kielen syntaktisessa prosessoinnissa. Myös ei-kielellisten tehtävien on havaittu aktivoivan samoja alueita (Kaan & Swaab 2002).

4.2.3 Muistin neuraalisia alueita

Otsalohkon ja kielen aivoalueiden lisäksi myös muita alueita aktivoituu erilaisia produktiivisia kykyjä vaativia tehtäviä suoritettaessa, kuten esimerkiksi muistiin liittyviä neuraalisia komponentteja (Ullman 2004). Muistista on olemassa erilaisia malleja, mutta perustavin on jako lyhytkestoiseen ja pitkäkestoiseen muistiin (Kolb & Wishaw 1990). Nykyään näistä käytetään nimiä työmuisti ja säilömuisti (kuva 10).

Työmuistiin katsotaan sisältyvän aisteihin liittyvät lyhytkestoiset muistit sekä eräänlaisen näitä ja säilömuistia puskuroivan ohjausyksikön (Baddeley 1997). Työmuistin neuraalisia alueita ovat frontaali- ja parietaalilohkojen kuorikerrokset, anterior cingulate sekä tyvitumakkeet (basal ganglia) (Honey 2002). Niin sanottu DP-mallin mukaan säilömuistissa on deklaratiiivinen ja proseduraalinen osa. Deklaratiivinen muisti jakautuu vielä episodiseen (eli elämäkerralliseen) sekä semanttiseen (eli merkityksiin ja käsitteisiin liittyvään) muistiin. Deklaratiivisen muistin kannalta tärkeitä neuraalisia rakenteita sijaitsee ohimolohkossa (erityisesti hippokampus) ja neokorteksissa. Erilaiset aivovauriotapaukset näyttävät, että hippokampus on tärkeä uusien elämäkerrallisten muistojen muodostamisessa (Anderson 2007). Parahippokampus on luultavasti tärkeä semanttisen muistin tallentamisessa, mutta itse merkitysrakenteet ovat hajautuneet eri aivoalueille (Hämäläinen et

al. 2006). Proseduraalinen muisti sisältää muun muassa kykyihin ja taitoihin liittyviä implisiittisiä muistoja. Tämän muistin neuraalisia alueita on otsalohkon, tyvitumakkeiden, päälakilohkon ja pikkuaivojen rakenteissa (Milner et al. 1998, Ullman 2004).



Kuva 10. Muistin jaottelu.

Ullmanin (2004) mukaan deklarativisessa muistissa olevien leksikaalisten yksikköjen yhdistely kompleksisiksi representaatioiksi tapahtuu proseduraalisessa muistissa. Esimerkiksi kielen hierarkkisten rakenteiden yhdistely ei vaadi tiedollisia ponnisteluja, kuten ei myöskään erilaisissa havaintoihin liittyvissä ja motoriikkaa vaativissa tehtävissä. Corballis (1994) on puolestaan painottanut episodisen muistin vaikutusta produktiivisuuteen. Episodit muodostuvat erilaisten elementtien (esim. *"kuka teki mitä kenelle, milloin, miten, missä ja miksi"*) yhdistelystä. Ihmisillä episodinen muisti yhdistettynä kielelliseen kommunikaatioon on saattanut olla merkittävä kehityksen tekijä, kieli on mahdollistanut episodien jakamisen. Erityisesti kyky luoda uusia tiedollisia episodeja on yksi ilmeisesti vain ihmisille ominainen tuottava kyky (Corballis 1994).

On huomattava, että produktiivisilla kyvyillä on käytännössä rajansa. Esimerkiksi hyvin pitkien lauseiden muodostaminen ja ymmärtäminen sekä tiettyjen matemaattisten tehtävien suorittaminen ilman apuvälineitä on mahdotonta (esim. Clark 1997). Tämä saattaa johtua työmuistin koosta tai sen toimintatavasta. Voidaan myös kysyä muistin roolista ylipäätään tuottavissa kyvyissä. Onko tuottavuudelle esimerkiksi eroa, onko käsiteltävä informaatio kuvina vai abstrakteina käsiteverkkoina? Rekursion kannalta on tärkeää, että sitä käyttävän representaatiojärjestelmän alkeisyksikköjä voidaan sijoittaa sisäkkäisiksi rakenteiksi. Syntyvä uusi rakenne on jotenkin konstruoitava työmuistissa, jonka jälkeen sitä voidaan käyttää seuraavan rakenteen rakenneyksikkönä jne. Nyt voidaan kysyä, onko kuvarepresentaatioilla tapahtuva merkitysrakenteen rekursiivinen muodostus jotenkin enemmän työmuistia kuluttavaa kuin äänirepresentaatioilla (kielellinen lauseenrakennus)? Visuaaliset representaatiot tuskin muodostuvat visuaalisten representaatioiden osista itse työmuistiin vaan työmuistiin todennäköisesti haetaan kyseisen eri aivoalueille hajautuneen representaation aktivoiva muistisolmu. Näin kuvien suora käsittely voi olla itse asiassa nopeampaa, sillä kielellinen representaatio tarvitsee pääsyn ensin semanttisen muistin tietovarastoon (Hämäläinen et al. 2006). Osalla ihmisistä muun muassa päättely voikin tapahtua visuaalisesti kuvilla. Näin täytyy olla syntymäkuuroilla, mutta myös eräillä autisteilla (Sahyoun et al. 2010). Toisaalta kokeissa on havaittu verbaalisen tiedon pysyvän paremmin työmuistissa helpon toiston avulla (Milner et al. 1998). Esimerkiksi satunnainen visuaalinen informaatio vääristyy ja häviää nopeasti viivästetyn tunnistuksen kokeissa. Näin kieli voi auttaa rakentamaan erilaisia propositioita, jotka esimerkiksi visuaalisilla käsitteillä olisivat vaikeita tai jopa mahdottomia (Jackendoff 1996, Clark 1998). Erilaisten episodien luonti voi olla mahdollista myös eläimillä, mutta vain ihminen pystyy luomaan millaisia episodeja tahansa erilaisten abstraktien käsiteverkkojen avulla ja viestimään niitä toisille (Corballis 1994).

Yhteisenä tuottavuuteen liittyvänä muistitoimintona voidaan havaita syntaktisen toiminnan vaihdos deklarativisesta proseduraaliseen järjestelmään (kielen tapauksessa hippokampuksesta ja ohimolohkon kuorikerroksesta otsalohkoon Brocan alueen lähistölle) oppimisen edetessä (Ullman 2004). Erityisen selkeästi tämä on havaittu paljon informaatiota vaativien tehtävien muuttuessa rutiiniksi, kuten esimerkiksi suurkaupunkien taksikuskeilla (Viitala 2010). Ensikielen oppimisessa prosessointi siirtyy deklarativisesta proseduraaliseen muistiin ja on siten enemmän taito kuin tietoa kielen rakenteesta ja käytöstä. Samalla tavalla muidenkin kykyjen muistiin liittyvä prosessointi siirtyy niiden kehittyessä enemmän tietoisesta käsittelystä proseduraaliseen muistiin.

4.3 Tuottavuuden verkosto

Tiedämme ainakin suurin piirtein ne aivoalueet jotka aktivoituvat tiettyjä produktiivisia kykyjä käytettäessä, esimerkiksi kielen syntaksissa (Brocan alueen sekä ohimolohkon anteriorisen, keski- ja superiorisen alueiden muodostama verkko (Kaan & Swaab 2002)), symbolisessa matematiikassa (muun muassa inferiorisen otsalohkon ja päälakilohkon alueet (Dehaene et al. 1999)), musiikin tonaalisessa koodauksessa (mm. prefrontaali korteksi (Perez & Coltheart 2003)) ja tietyissä muissa luovuutta vaativissa tehtävissä. Lisäksi tiedämme, että nämä kyvyt käyttävät tiettyjä yhteisiä alueita riippumatta kyseisestä kyvystä (esimerkiksi muistin neuraalisia korrelaatioita). Tuottavien kykyjen taustalla näyttäisi siis olevan lukuisia eri alueita, joista mikään ei ole yksistään riittävä esimerkiksi poistamaan näiden kykyjen tuottavuutta aivovauriossa.

Jos produktiiviset kyvyt ovat jonkinlainen aivojen eri alueiden toiminnallisuudesta esiin nouseva, emergentti ominaisuus (esimerkiksi kun tiettyjen aivoalueiden hermoverkot vuorovaikuttavat toistensa kanssa tietyllä tavalla), ei mitään yhtä neuraalista rakennetta voida pitää produktiivisuuden

perustana. Tällöin yhden yhteisen neuraalisen perustan hypoteesilta puuttuu pohja.

Tuottavuuden taustalle voidaan ehkä postuloida eri alueita käsittävä funktionaalinen moduuli (ks. luku 2.4). Joissain tapauksissa näyttää siltä, että jotkut kognitiiviset kyvyt toimivat itsenäisesti, esimerkiksi vauriot puheen ymmärtämisessä eivät ole vaikuttaneet musiikin tunnistaminen (Perez & Coltheart 2003). Toisaalta kykyjen taustalla näyttäisi olevan jonkin verran samoja neuraalisia järjestelmiä (esim. muisti).

Kognitiivinen mallintaminen pyrkii muodostamaan kognitiosta tai sen jostakin osasta rakenteellisen mallin eli kognitiivisen arkkitehtuurin. Arkkitehtuureita on useita (esim. SOAR ja ACT-R), mutta niissä yhdistyy monia piirteitä. Mallin toimintoja voidaan yhdistää myös aivoalueisiin, jolloin sen oikeellisuutta voidaan verrata koehenkilöillä suoritettaviin kokeisiin. ACT-R arkkitehtuurissa on mallin kahdeksan moduulia yhdistetty eri aivoalueisiin fMRI-mittauksilla (Anderson 2007). Vastaavasti produktiivisuus voidaan määritellä useiden aivoalueiden muodostamaksi toiminnalliseksi verkostoksi, jossa millään yhdellä alueella ei ole muita alueita tärkeämpää roolia.

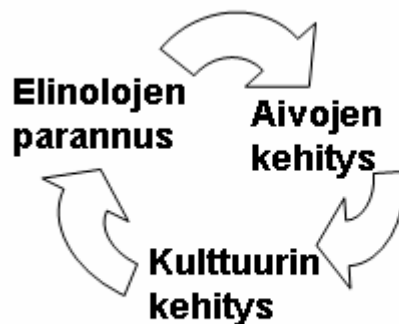
Miten hermosolut, eri aivoalueet ja niiden muodostamat verkostot sitten prosessoivat informaatiota produktiivisten kykyjen aikana aktivoituvilla aivoalueilla? Chomsky (1957) postuloi joukon sääntöjä joiden mukaan kielioppi ja siten kielen hierarkkinen produktiivisuus muodostetaan. Nämä säännöt ovat geneettisesti muodostuneita rakenteita aivoissa tai niiden ilmentymää ja ne kuvastavat sisäisen kielen rakenteita (ks. luku 3.1.1). Konnektionismin¹ mukaan kaiken kognitiivisen toiminnan taustalla olevaa neurolaskentaa tekevät neuraaliverkot puolestaan eivät sisällä mitään formaaleja sääntöjä vaan

¹ Konnektionistinen ja komputationalistinen näkökanta eivät välttämättä ole toistensa poissulkevia. Neuraaliverkkojen laskenta voidaan nähdä subsymbolisena perustana formaalien sääntöjen komputationalismille.

tuottavuus syntyy aivojen synapsiverkoston vektorimuunnoksilla (Churchland & Sejnowski 1992). Informaation prosessoinnin tarkempi käsittely on tämän esityksen ulkopuolella, mutta tässä yhteydessä on hyvä huomata, että Chomskyn komputationalistinen näkemys johtaa todennäköisesti geneettisen muutoksen aiheuttamiin havaittaviin rakenteisiin ja konnektionismin mukainen oppiminen (esim. Christiansen & Chater 1999) mahdollisesti ei havaittaviin rakenteisiin.

4.4 Aivot ja kulttuuri

Lopuksi on tarkasteltava tarkemmin kulttuurin vaikutusta ihmisen tuottaviin kykyihin. Ihmisen evoluutio nykyisenkaltaiseksi ei ole tapahtunut ympäristöstä irrallaan. Merkittävä ihmisen suuret aivot mahdollistava muutos oli kypsytetyn ruoan keksiminen (Wrangham 2010). Kun ravinnon hankkiminen ei enää vienyt suurinta osaa ajasta, saattoivat kehittyvät sosiaaliset suhteet aiheuttaa painetta kommunikoinnin kehittämiseksi. Ihmisen kehittyminen nykyiseen muotoonsa on voinut olla eräänlainen itse itseään ruokkiva prosessi tai aivojen, kognition ja kulttuurin iteratiivinen kehä (Donald 1993) (kuva 11).

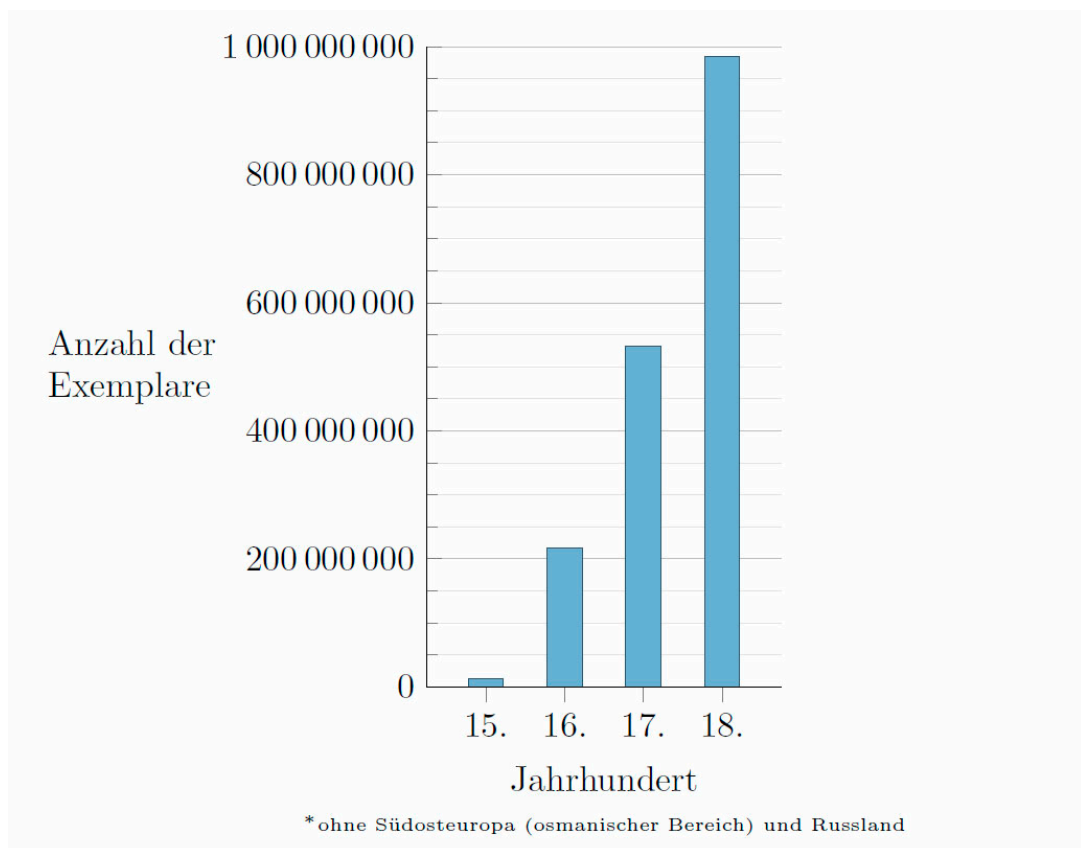


Kuva 11. Nykyihmiseen johtanut iteratiivinen kehä

Kielen synty on voinut olla suhteellisen äkillinen tapahtuma tai pitkän kehityksen tulos, todennäköisesti jälkimmäinen (esim. Pinker 2003, Jackendoff

1999). Sosiaalisten suhteiden monimutkaistuessa kommunikaation vaatimien käsitteiden määrän lisääntyminen on tehostanut kieltä ja kieli on puolestaan auttanut artikuloimaan ajatuksia myös sisäisesti (Jackendoff 1996). Primitiivisissä, eristyneissä kulttuureissa (myös nykyaikana) on vähän abstrakteja käsitteitä, eikä välttämättä kirjoitusta (esim. Everett 2005). Käsitteiden määrän vaikutus tuottavuuteen on mielenkiintoinen kysymys.

Mutta vasta kirjoitus on mahdollistanut nykyisenkaltaisen sivilisaation. Puheen avulla tieto välittyy sekä paikallisesti ja ajallisesti hyvin rajatusti. Kirjoitettu tieto ainakin säilyy ja voi levitä hyvin laajalle alueelle. Tiedon leviäminen on aluksi ollut hidasta, mutta lopullinen tiedon leviämisen räjähdys tapahtui kun Gutenberg yhdisti kiinalaisten keksimän paperin ja kirjapainotekniikan (ks. kuva 12).



Kuva 12. Euroopassa painettujen kirjojen määrä n. 1450 - 1800 (Wikimedia Commons).

Tiedon ja uusien käsitteiden kumulatiivinen lisääntyminen on vaikututtanut aivoihin. Tämä on nähtävissä myös nykyaikana, kun Internet on mahdollistanut todellisen globaalisen ja reaaliaikaisen tiedonlevittämisen. Kulttuurin ja teknologian kehitys on vaatinut erilaisten artefaktien ja apuvälineiden käyttöönoton. Nämä artefaktit ovat puolestaan vaikuttaneet ihmisen hermoston kehitykseen.

Ihmisillä on merkittävästi pitkittynyt lapsuus verrattuna muihin eläimiin. Lapsuuden aikana aivot "kypsyvät", eli tarvittavat hermoston rakenteet kiinnittyvät ympäristön syötteiden alaisena (Leakey 1995). Muilla eläimillä kognitiiviset kyvyt kiinnittyvät sitä nuorempaan mitä yksinkertaisempi niiden keskushermosto on (Sagan 1977). Ihmiselle tyypillistä on "ekstrasomaattinen", kulttuuriin ja ympäristöön sidottu joustavampi kehittyminen (Damasio 2001). Niinpä kirjoitustaidon kehittyminen kiihdytti kulttuurin evoluutiota dramaattisesti. Ehkä juuri aivokuoren synapsien hitaan kehittymisen aiheuttama pitkittynyt lapsuus on ihmisen erikoisen menestymisen takana (Liu et al. 2012). Pitkittynyt lapsuus ja kielen oppiminen mahdollistavat kulttuurin omaksumisen. Voidaan jopa sanoa, että nykyihminen on fysiologisesti ainakin jossain määrin kulttuurin tuotos.

Produktiivinen kyky on vaikeasti määriteltävissä ja rajattavissa. Millainen järjestelmä tuottaisi kaikkiin syötteisiin tiettyä luovuutta? Kognition tuottavuus voi olla osittain peräisin kielestä. Useimmat korkeammat tuottavuuden muodot vaativat tietoista, kielellistä suunnittelua, usein useiden ihmisten toimesta. Kieli ei ole kuitenkaan ole sama kuin ajattelu (Pinker 1997). Kieli on voinut syntyä evolutiivisena adaptaationa ja on sitten helpottanut ja laajentanut lähes kaikkia korkeampia kognitiivisia kykyjä. Käsitteellinen ajattelu helpottaa kaikkien asioiden käsittelyä, kun niitä voidaan käsitellä symboleina vaikeammin käsiteltävien aistirepresentaatioiden kautta. Kieli on lisäksi mahdollistanut kollektiivisen ajatusten vaihdon ja lopulta se on aiheuttanut kaiken kumulatiivisen ihmiskunnan informaation kertymisen ja siirtymisen

sukupolvelta toiselle. Näin ulkoisten tekijöiden (kirjoitetun ja puhutun kielen) vaikutus tuottavuuteen ja luovuuteen voi olla itse asiassa merkittävämpi kuin jotkin neurologisen muutoksen hominidien aivoissa.

Loppujen lopuksi voi olla vaikea tai mahdoton tietää tuliko ensin tietyt neuraaliset rakenteet ja niiden kautta tietyt evolutiiviset edut (metsästys, tulen teko, ruuan kypsentyminen, isot aivot, eliniän piteneminen, isovanhemmat (esim. Wrangham 2010)) vai toisinpäin. Osa ihmisen menestyksestä saattaa johtua myös puhtaasta sattumasta, esimerkiksi tietyn kehitysvaiheen ja tietyn ilmaston yhteen sattumisesta.

5 TULOS

Esityksen hypoteesiksi muodostui kohdassa 3.1, että ihmisen produktiivisten kognitiivisten kykyjen neuraalinen perusta on kielen rekursiivisen rakenteen mahdollistavien aivoalueiden ja muiden tuottavien kykyjen omien alueiden muodostama verkosto. Kappaleessa 4 kävi ilmi, että myös muita aivojen alueita liittyy produktiivisuuteen. Näitä ovat ainakin muistiin liittyvät ja tietyt otsalohkon alueet.

Kieli on selkeästi yksi ihmiselle ominainen produktiivinen kyky ja sen neuraaliset korrelaatit ovat yksi produktiivisuuden mahdollistava tekijä, mutta kielikyky itsessään ei tee ihmisestä tuottavaa. Vasta merkitysrakenteisiin deklarativisessa ja semanttisessa muistissa syntyvät käsitteet mahdollistavat rekursion hyödyntämisen ihmiselle ominaisella tavalla. Kielen mahdollistama käsitteiden kumulatiivinen kerääntyminen ja jatkuva hienosäätö ovat luoneet propositionaaliselle ajattelulle ainutlaatuisen tukirakennelman ja tehostuskeinon (Clark 1998, Jackendoff 1996).

Aivokuvantamismenetelmien perusteella näyttäisi siltä, että Brocan alue (BA 45/44) suorittaa geneeristä hierarkkisten rakenteiden prosessointia yhdessä eri frontaali- ja parientaalilohkojen alueiden kanssa (BA 47, 6, 7) (Friederici 2011, 2006). Produktiivisuuden taustalla oleva rekursio on mahdollisesti näiden alueiden (jotka liittyvät myös proseduraaliseen muistiin) sekä deklarativisen ja semanttisen muistin (mm. hippokampus, parahippokampus, tietyt kuorikerroksen alueet) ja frontaalilohkon eksekutiivisten prosessien organisoiva periaate. Näin deklarativiseen ja semanttiseen muistiin rakentuu käsiteyksikköjä, joista proseduraalinen muisti (ml. kielikyky) pystyy rakentamaan kompleksisia representaatioita (Ullman 2004).

Prefrontaalisen aivokuoren synapsituoton ajoituksen myöhentyminen (muihin lajeihin verrattuna) on ehkä mahdollistanut kielen ja ensikäsitteiden syntymisen

pitkittyneen lapsuuden aikana (Liu et al. 2012). Tästä eteenpäin kehitys on kenties ollut tiettyä neuraalista kehitystä suosivaa valintapainetta. Tällöin laajemmat sosiaaliset verkostot ja monimutkaistuva kieli ovat asettaneet painetta aivojen plastisuudelle tiettyyn suuntaan. Nämä postnataalisesti saadut rakenteet eivät kuitenkaan periydy geneettisesti.

Hypoteesin tueksi on jo suhteellisen runsaasti tutkimusaineistoa. Jos eri kyvyille produktiivisuuden antava tietty funktionaalinen verkosto on olemassa, sen sijainti tulisi ilmentyä erilaisia rekursiivisuutta vaativien tehtävien suorittamisen aikana aivojen aktivaatiossa. Tähän mennessä on lähinnä keskitytty tiettyjen kykyjen, kuten kielen, matematiikan ja musiikin mahdollistavien alueiden paikallistamiseen. Summaamalla näistä eri kykyjen aktivaatiosta saatu kokonaisinformaatio ja vähentämällä tästä kyseisten kykyjen varsinaiset alueet, voi kykyjä yhdistävä tuottavuuden verkosto nousta esiin.

6 YHTEENVETO

Tämän esityksen tarkoituksena oli lähdeaineiston perusteella selvittää onko testattavassa olevia todisteita siitä, että ihmisten tuottavien kykyjen, kuten puheen, päättelyn, ongelmaratkaisun ym. taustalla on yksi yhteinen hermostollinen perusta joka voidaan jotenkin lokalisoida.

Eri tutkimusten (mm. kuvantamismenetelmät, leesiotapaukset) perusteella mitään selkeää yhtä neuraalista tuottavuuden lähdettä ei ole havaittu. Eri kyvyt aktivoivat enemmän tiettyjä alueita, mutta myös joitain yhteisiä alueita. Tuottavat kyvyt näyttäisivät muodostuvan eri alueiden yhteistoiminnan muodostamassa verkostossa.

Materiaalia oli paljon (114 yksilöityä lähdettä ja lukematon määrä muita lähteitä) ja uusia tuloksia ilmaantui koko ajan. Käytännössä tässä tutkimuksessa oli kyse ikivanhoista kysymyksistä, kuten mikä tekee meistä ihmisiä tai mikä erottaa meidät muista eläimistä? Aiheesta on kirjoitettu ja siihen liittyen on tehty paljon tutkimusta. En edes oletanut alun perin löytäväni mitään lopullista vastausta kysymykseen tuottavien kykyjen neuraalisesta perustasta. Kysymys näyttäisi loppujenlopuksi olevan paljon laajemmasta ja monimutkaisemmasta kokonaisuudesta kuin yhden tietyn geneettisesti periytyvän neuraalisen rakenteen olemassaolosta tai olemattomuudesta.

LÄHDELUETTELO

Anderson, J. R. (2007). How can the human mind occur in the physical universe? Oxford University Press.

Baddeley, A. (1997). Human memory. Theory and practice. Revised edition. Psychology Press.

Barret, H. C. , Kurzban, R. (2006). Modularity in cognition: Framing the debate. *Psychological Review*, Vol. 113, No. 3: 628-647.

Bermúdez, J. L. (2003). Thinking without Words. Oxford: The Oxford University Press.

Berwick, R. C., Chomsky, N. (2011). The biolinguistic program: The current state of its development. Teoksessa A. M. Di Sciullo & C. Boeckx (toim.) *The biolinguistic enterprise. New perspectives on the evolution and nature of the human language faculty.* Oxford University Press.

Berwick, R. C. (2011). Syntax facit saltum redux: Biolinguistics and the leap to syntax. Teoksessa A. M. Di Sciullo & C. Boeckx (toim.) *The biolinguistic enterprise. New perspectives on the evolution and nature of the human language faculty.* Oxford University Press.

Bickerton, D. (2007). Language evolution: A brief guide for linguists. *Lingua* 117, 510 - 526.

Bickerton, D. (1990). Language and species. The University of Chicago Press.

Björklund. M. (2009). *Evoluutiobiologia.* Gaudeamus.

- Bloom, P. (1999). The evolution of certain novel human capacities. Teoksessa M. C. Corballis & S. E. Lea (toim.) *The descent of mind. Psychological perspectives on hominid evolution.* Oxford University Press.
- Bloom, P. (1994). Generativity within language and other cognitive domains. *Cognition*, 51, 177-189.
- Brattico, P. (2010). Recursion hypothesis considered as a research program for cognitive science. *Minds and Machines*. 20 (2):213-241.
- Brattico, P. & Liikkanen, L. (2009). Rethinking the Cartesian theory of linguistic productivity. *Philosophical Psychology* 22 (3): 251-279.
- Brattico, P. (2008a). *Biolingvistiikka. Johdatus kielen biologiaan, evoluution ja kognitiivisiin perusteisiin.* Gaudeamus.
- Brattico, P. (2008b). Shallow reductionism and the problem of complexity in psychology. *Theory & Psychology* 18: 483-504.
- Brannon, E. M. (2005). The independence of language and mathematical reasoning. *PNAS* 102: 3177-3178.
- Beran, M. J., Gibson, K. R., Rumbaugh, D. M. (1999). Predicting hominid intelligence from brain size. Teoksessa M. C. Corballis & S. E. Lea (toim.) *The descent of mind. Psychological perspectives on hominid evolution.* Oxford University Press.
- Carroll, S. B. (2003). Genetics and the making of *Homo sapiens*. *Nature* 422: 849-857.
- Caspari R. (2011). The evolution of grandparents. *Scientific American*. August 2011.
- Chomsky, N. (1988). *Language and problems of knowledge.* The MIT Press.

Chomsky, N. (1968). *Language and mind*. Hartcourt, Brace & World, Inc.

Chomsky, N. (1966). *Cartesian linguistics*. Harper & Row, Publishers.

Chomsky, N. (1957). *Syntactic structures*. Mouton & Co.

Clark, A. (1998). *Magic words: How language augments human computation*.

Teoksessa P. Carruthers & J. Bouchers (toim.) *Language and thought: Interdisciplinary themes*. Cambridge University Press.

Clark, A. (1997). *Being there. Putting brain, body, and world together again*.

The MIT Press.

Corballis, M.C. (2011). *The Recursive Mind: The Origins of Human Language, Thought, and Civilization*. Princeton University Press.

Corballis, M.C. (2009). The evolution of language. *Ann. N.Y. Acad. Sci.* 1156:

19-43.

Corballis, M.C. (2004). FOXP2 and the mirror system. *Trends in cognitive*

sciences, Vol. 8, No. 3: 95-96.

Corballis, M.C. & Lea, S. E. G. (1999). Are humans special? A history of

psychological perspectives. Teoksessa M. C. Corballis & S. E. Lea (toim.)

The descent of mind. Psychological perspectives on hominid evolution.

Oxford University Press.

Corballis, M. C. (1999). Phylogeny from apes to humans. Teoksessa M. C.

Corballis & S. E. Lea (toim.) *The descent of mind. Psychological*

perspectives on hominid evolution. Oxford University Press.

Corballis, M. C. (1994). The generation of generativity: a response to Bloom.

Cognition, 51, 191-198.

- Corballis, M. C. (1991). *The lop-sided ape: evolution of the generative mind*. Oxford University Press.
- Christiansen, M. H. & Chater, N. (2008). Language as shaped by the brain. *Behavioral and brain sciences* 31, 489-558.
- Christiansen, M. H. & Chater, N. (1999). Toward a connectionist model of recursion in human linguistic performance. *Cognitive Science* 23, 157-205.
- Churchland, P. M. (1996). *The engine of reason, the seat of the soul. A philosophical journey into the brain*. Cambridge, Massachusetts: The MIT Press.
- Churchland, P., S. & Sejnowski, T., J. (1992). *The Computational Brain*. Cambridge, Massachusetts: The MIT Press.
- Damasio, A. (2001). *Descartesin virhe. Emootio, järki ja ihmisen aivot*. Terra cognita. *Alkuteos Descarte's error: Emotion, reason, and the human brain*.
- Dehaene, S., Spelke, E., Pined, P., Stanescu, R., Tsivkin, S. (1999). Sources of mathematical thinking: Behavioral and brain-imaging evidence. *Science* 287, 970-974.
- Dennett, D. C. (1999). *Tietoisuuden selitys*. Art House, Helsinki. *Alkuteos Consciousness explained*. 1991.
- Dennett, D. C. (1995). *Darwin's dangerous idea. Evolution and the meaning of life*. New York, NY: Simon & Schuster Paperbacks.
- Descartes, R. (1637). *Metodin esitys, teoksessa Descartes, R., (1994). Teoksia ja kirjeitä*, WSOY.
- Donald, M. (1993). *Précis of origins of the modern mind: Three stages in the evolution of culture and cognition*. *Behavioral and Brain Sciences* 16, 737-791.

- Emmorey, K. (2001). *Language, cognition, and the brain: Insights from sign language research*. Psychology Press.
- Everett, D. (2005). Cultural Constraints on Grammar and Cognition in Pirahã. *Current Anthropology* 46: 621-646.
- Fenson, L., Bates, E., Dale, P., Goodman, J., Reznick, J. S., Thal, D. (2000). Measuring variability in early child language: Don't shoot the messenger. *Child Development*. Vol. 71, No. 2: 323-328.
- Fitch, W. T. , Hauser, M. D., Chomsky, N. (2005). The evolution of the language faculty: Clarifications and implications. *Cognition* 97, 179-210.
- Fodor, J. A. & Z. W. Pylyshyn. (1988). Connectionism and cognitive architecture: A critical analysis. *Cognition* 28, 3-71.
- Fodor, J. (1983). *The Modularity of the Mind*. Cambridge, MA.: MIT Press.
- Fodor, J. (1975). *The Language of Thought*. London: MIT Press.
- Friederici, A., Mueller, J. & Oberecker, R. (2011). Precursors to natural grammar learning: Preliminary evidence from 4-month-old infants. *PLoS ONE*:6(3).
- Friederici, A., Bahlmann, J., Heim, S., Schubotz, R., Anwander, A. (2006). The brain differentiates human and non-human grammars: Functional localization and structural connectivity. *PNAS* 103: 2458-2463.
- Gazzaniga, M. 2009. *Inhimillinen, ainutlaatuistemme tiede*. Terra Cognita. *Alkuteos Human: The Science Behind What Makes Us Unique*.
- Gentilucci, M. & Corballis, M. C. (2006). From manual gesture to speech: A gradual transition. *Neuroscience and biobehavioral reviews* 30, 949-960.
- Gilkey, P., Lopez S., Karousou A. (2009). Mathematics, Recursion, and Universals in Human Languages. arxiv.org/abs/0909.3591

- Greenfield, P. M. (1991). Language, tools and brain: The ontogeny and phylogeny of the hierarchically organized sequential behavior. *Behavioral and brain sciences* 14, 531-595.
- Grodzinsky, Y. (2000). The neurology of syntax: Language use without Broca's area. *Behavioral and brain sciences* 23, 1-71.
- Hajek, M., Valavanis, A., Yonekawa, Y., Schiess, R., Buck, A. & Weiser, H. (1998). Selective Amobarbital Test for the Determination of Language Function in Patients with Epilepsy with Frontal and Posterior Temporal Brain Lesions. *Epilepsia* 39, 389-398.
- Hanski, I., Lindström, J., Pietiläinen, H., Ranta, E. (1998). *Ekologia*. WSOY.
- Hauser, M. D., Chomsky, N. & Fitch, W. T. (2002). The faculty of language: What is it, Who has it, and How did it evolve? *Science* 298: 1569-1579.
- Herculano-Houzel, S. (2012). The remarkable, yet not extraordinary, human brain as a scaled-up primate brain and its associated cost. *PNAS* 109: 10661-10668.
- Honey, G.D., Fu, C. H. Y., Kim, J., Brammer, M. J., Croudace, T. J., Suckling, J., Pitc, E. M., Williams, S. C. R., Bullmore, E. T. (2002). Effects of Verbal Working Memory Load on Corticocortical Connectivity Modeled by Path Analysis of Functional Magnetic Resonance Imaging Data. *Neuroimage* 17, 573-582.
- Hu, H. Y., Fominykh, K., et al. (2012). Evolution of the human-specific microRNA miR-941. *Nature communications* 3:1145. DOI: 10.1038/nocomms2146.
- Hämäläinen, H., Laine, M., Aatonen, O. ja Revonsuo, A. (2006). *Mieli ja aivot. Kognitiivisen neurotieteen oppikirja*. Turun yliopisto.

- Jackendoff, R. (1999). Possible stages in the evolution of the language capacity. *Trends in Cognitive Science*. Vol. 3, No 7, 272-279.
- Jackendoff, R. (1996). How language helps us think. *Pragmatics & Cognition* 4, 1-34.
- Kaan, E. & Swaab, T. Y. (2002). The brain circuitry of syntactic comprehension. *Trends in cognitive sciences*, Vol. 6, No. 8: 360-356.
- Klein, R. G. (2009). *The Human Career: Human Biological and Cultural Origins*. University Of Chicago Press
- Kolb, B., & Whishaw, I. Q. (1990). *Fundamentals of human neuropsychology*. W. F. Freeman and Company.
- Leakey, R. (1995). *Ihmiskunnan juuret*. WSOY. *Alkuteos The origin of humankind*.
- Leakey, R. & Lewin, R. (1993). *Ihmisyden synty*. Otava. *Alkuteos Orgins Reconsidered. In search of what makes us human*.
- Lieberman, P. (2000). *Eeva puhui. Ihmisen kieli ja ihmisen evoluutio*. Terra Cogita. *Alkuteos EVE SPOKE, Human language and human evolution*.
- Liu, X., Somel, M., Tang, L. et al. (2012). Extension of cortical synaptic development distinguishes humans from chimpanzees and macaques. *Genome research*. doi:10.1101/gr.127324.111.
- Lock, A. (1999). On the recent origin of symbolically-mediated language and its implications for psychological science. *Teoksessa M. C. Corballis & S. E. Lea (toim.) The descent of mind. Psychological perspectives on hominid evolution*. Oxford University Press.
- Marino, L., Connor, R., Fordyce, R., Herman, L., Hof, P., Lefebvre, L., Lusseau, D., McCowan, B., Nimchinsky, E., Pack, A., Rendell, L., Reidenberg, J.,

- eiss, D., Uhen, M., Gucht, E. Van der, Whitehead, H. (2007). Cetans have complex brains for complex cognition. *PLoS Biology* 5, Vol. 5, 966-972.
- McManus, I. C. (1999). Handedness, cerebral lateralization, and the evolution of language. Teoksessa M. C. Corballis & S. E. Lea (toim.) *The descent of mind. Psychological perspectives on hominid evolution*. Oxford University Press.
- Miller, B. L., Cummings, J. L. (2007). *The Human Frontal Lobes: Functions and Disorders*. Guilford Press.
- Milner, B., Squire L. R., Kandel, E. R. (1998). Cognitive neuroscience and the study of memory. *Neuron*. Vol. 20, 455-468.
- Newell A., Simon, H. A. (1976). Computer science as empirical inquiry: Symbols and search. *Communications of the AMC*, Vol, 19, No. 3.
- Newman, A. J., Supalla, T., Hauser, P., Newport, E. L., Bavelier, D. (2010). Dissociating neural subsystems for grammar by contrasting word order and inflections. *PNAS* Vol. 107, No. 16. 7539-7544.
- Nowak, M. A., Komarova, N., L. & Niyogi, P. (2002). Computational and evolutionary aspects of language. *Nature* 417: 611-617.
- Patel, A. (2003). Language, music, syntax and the brain. *Nature neuroscience*, Vol. 6, No. 7: 674-681.
- Peretz, I. & Coltheart, M. (2003). Modularity in music processing. *Nature Neuroscience*, Vol. 6, No. 7: 688-691.
- Pinker, S., Jackendoff, R. (2005). The faculty of language: what's special about it? *Cognition* 95, 201-236.

- Pinker, S. (2003). Language as an adaptation to the cognitive niche. Teoksessa M. Christiansen & S. Kirby (toim.), *Language evolution: States of the Art*. New York: Oxford University Press.
- Pinker, S. (1994). *The language instinct*. London: Allen Lane.
- Powell, A., Shennan, S. & Thomas, M. G. (2009). Late Pleistocene Demography and the Appearance of Modern Human Behavior. *Science*, Vol. 324, No. 5932: 1298 - 1301.
- Prinz, J. J. (2006). Is the mind really modular. Teoksessa R. J. Stainton (toim.) *Contemporary debates in cognitive science*. Blackwell, Oxford.
- Pulvermüller, F. (2002). *The neuroscience of language. On brain circuits of words and serial order*. Cambridge University Press.
- Ridley, M. (2000). *Perimä - ihmisen historia 23 kappaleessa*. Art House. *Alkuteos Genome. The Autobiography of a Species in 23 Chapters*.
- Rightmire, G. P. (1998). Human Evolution in the Middle Pleistocene: The Role of *Homo heidelbergensis*. *Evolutionary Anthropology* 6: 218-227.
- Rilling, J. K. (2006). Human and nonhuman primate brains: Are they allometrically scaled versions of the same design? *Evolutionary Anthropology* 15:65-77.
- Roth, G., Dicke, U. (2005). Evolution of the brain and intelligence. *Trends in Cognitive Sciences*, Vol. 9, No. 5: 250-257.
- Sagan C. (1977). *The dragons of Eden. Speculations on the evolution of human intelligence*. Random House.
- Sahyoun, C. P., Belliveau, J. W., Soulières, Schwartz, S., Mody, M. (2010). *Neuroimaging of the Functional and Structural Networks Underlying*

Visuospatial versus Linguistic Reasoning in High-Functioning Autism. *Neuropsychologia*. 48(1): 86-95.

- Schenker, N., Buxhoeveden, D. P., Blackmon, W. L., Amunts, K., Zilles, K., Semendeferi, K. (2008). A comparative quantitative analysis of cytoarchitecture and minicolumnar organization in Broca's area in humans and great apes. *The journal of comparative neurology* 510: 117-128.
- Semendeferi, K., Lu, A., Schenker, N., Damasio, H. (2002). Humans and great apes share a large frontal cortex. *Nature Neuroscience*, Vol. 5, No. 3: 272-276.
- Shapiro, K., Caramazza, A. (2003). The representation of grammatical categories in the brain. *Trends in Cognitive Science*, Vol. 7, No. 5: 201-206.
- Shonkoff, J.P., & Phillips, D.A. (toim.). (2000). *From Neurons to Neighborhoods: The Science of Early Childhood Development*. National Academies' Press.
- Sowell, E. R., Thompson, P. M., Leonard, C. M., Welcome, S. E., Kan, E., Toga, A. W. (2004). Longitudinal mapping of cortical thickness and brain growth in normal children. *The Journal of Neuroscience*, 24(38):8223-8231.
- Stiles, J., Jernigan, T. L. (2010). The basics of brain development. *Neuropsychol Rev* 20:327-348.
- Tettamanti, M., Weniger, D. (2006). Broca's area: A supramodal hierarchical processor? *Cortex*, 42, 419-494.
- Toro, R., Perron, M., Pike, B., Richer, L., Veillette, S., Pausova, Z., Paus, T. (2008). Brain size and folding of the human cerebral cortex. *Cerebral Cortex* 18:2352-2357.

- Ullman, M. T. (2004). Is broca's area part of a ganglia thalamocortical circuit? *Cortex*, 42, 480-485.
- Ullman, M. T. (2004). Contributions of memory circuits to language: the declarative/procedural model. *Cognition* 92, 231-270.
- Varley, R., Klessinger, N., Romanowski, C., Siegal, M. (2005). Agrammar but numerate. *PNAS* 102: 3519-3524.
- Viitala, J. (2010). Älykäs eläin. Atena.
- Wrangham, R. (2010). Tulella kypsytetty. Terra Cognita.
- Young, R. (2001). Production Systems in Cognitive Psychology. Teoksessa N. J. Smelser & P. B. Baltes (toim.), *International Encyclopedia of the Social and Behavioral Sciences*. Pergamon.
- Zhang, K., Sejnowski, T. J. (2000). A universal scaling law between gray matter and white matter of cerebral cortex. *PNAS* 97:5621-5626.