

Älykkyyden neurobiologia ja periytyminen

Ismo Hyväri

LuK-tutkielma

Biologian tutkinto-ohjelma

Oulun Yliopisto

Joulukuu 2022

Sisällysluettelo

Tiivistelmä	3
1 Johdanto	4
2 Mitä älykkyys on?.....	4
2.1 Joustava ja kiteytynyt älykkyys.....	6
2.2 Työmuisti, prosessointi nopeus ja itsesääätely.....	7
3 Älykkyyden neurobiologia.....	8
3.1 Aivojen koon ja rakenteiden merkitys.....	9
3.2 Hermoverkostot.....	11
3.2.1 Moduulit	11
3.2.2 Sisäiset yhdysverkostot.....	11
3.2.3 Kiteytyneen älykkyyden verkostodynamiikka	12
3.2.4 Joustavan älykkyyden verkostodynamiikka	13
3.2.5 Yleisen älykkyyden verkostodynamiikka.....	14
4 Älykkyyden periytyminen.....	14
4.1 Tutkimus geenien ja ympäristön vuorovaikutuksesta	15
4.2 Valikoiva pariutuminen.....	16
4.3 Älykkyyteen vaikuttavien geenien löytyminen.....	17
5 Älykkyyden merkitys elämässä	18
6 Pohdinta	19
Lähteet.....	21

Tiivistelmä

Älykkyystutkimus on monitieteinen tutkimusala. Psykologien lisäksi älykkyyttä tutkii yhä enenemissä määrin ainakin neurotieteilijät ja geneetikot. Neurotiede mahdollistaa esimerkiksi älykkyuden ennustamisen hermoaktivaatiokuvioista ja genetiikka tekee saman yksilön DNA:n sekvensoinnilla, joskin ennustukset ovat vielä melko epätarkkoja.

Psykologien kehittämien älykkyystestien pohjalta on kehitetty g-tekijä, joka tulee testin eri osalueiden korrelaatioista. G-tekijä voidaan edelleen jakaa kiteytyneeseen älykkyYTEEN, joka on eräänlaista kirjanoppineisuutta ja joustavaan älykkyYTEEN, joka on kykyä ymmärtää ja oppia uusia asioita. Älykkyuden on havaittu olevan vahvasti kytköksissä työmuistiin ja myös prosessointinopeus selittää älykkyyttä jossain määrin.

Vahvimpia älykkyuden ja keskushermoston välisiä korrelaatioita ovat aivojen tilavuus, kuorikerroksen paksuus, aivojen integraatio ja valkean aineen terveys. Aivojen tilavuuden ja kuorikerroksen paksuuden on ajateltu heijastavan suurempaa neuronien määrää ja korkeampaa laskentakapasiteettiä. Aivojen integraatio selittää kuinka hyvin eri aivoalueet ovat yhteydessä toisiinsa. Valkean aineen terveys vaikuttaa ennen kaikkea tiedonsiirtoon aksoneissa. Älykkyyttä ei niinkään selitä yksittäinen aivoalue tai hermoverkosto, vaan kaikkien hermoverkostojen yhtenäinen toiminta ja dynaamisuus.

Älykkyuden variaatiosta noin puolet selittyy eroista perityssä DNA:ssa, joskin geenien osuus älykkyuden arviosta muuttuu huomattavasti varhaislapsuudesta aikuisuuteen. ÄlykkyYTEEN vaikuttavien geenien selvittäminen on kuitenkin vaikeaa, sillä keskimääräisen snipin vaikutus älykkyYTEEN on vain noin 0,005 %. ÄlykkyYTEEN yhteydessä olevia riippumattomia genomien laajuisia snippejä on tunnistettu yhteensä 1271. Kyseiset snipit osallistuvat aivojen kehitysprosesseihin ja hermosolujen väliseen kommunikointiin. Tunnistetut snipit selittävät noin 9 % älykkyuden periytyvyydestä. Jotta älykkyyttä voitaisiin arvioida tarkemmin geenien perusteella, tarvittaisiin tutkimuksiin suurempia otoskokoja ja tarkempaa teknologiaa.

Älykkyuden on havaittu olevan yhteydessä yksilön koulutustasoon, ammattiin, tuloihin ja elinajanodotteeseen. Yhteyksien taustalla olevista selittävästä tekijöistä on vaikea saada varmuutta kaikkien vaikuttaessa kaikkiin ja myös kausaalisten suhteiden suuntia on haastavaa selvittää. Selvää kuitenkin on, että älykkyystutkimus tulee kehittymään aineistojen lisääntyessä ja teknologian kehittyessä.

1 Johdanto

Kärjistetyksi ajatellen elämä on älykkyystesti, jossa yksittäiset pienet valinnat kumuloituvat elämän mittaan, vaikuttaen merkittävästi elämässä menestymiseen. Älykkyys ennustaa tärkeitä koulutuksellisia, ammatillisia ja terveydellisiä lopputulemia paremmin kuin mikään muu piirre (Plomin & von Stumm, 2018). Vuosikymmenien kuluessa monet älykkyysten teoriat ovat vaipuneet unholaan, muutaman säilyessä nykypäivään asti. Asiantuntijat eivät ole päässeet yksimielisyyteen älykkyysten määritelmästä, mutta kenties yleisin käytetty on APA:n (American Psychological Association) määritelmä. APA:n mukaan älykkyydellä tarkoitetaan yksilöiden välisiä eroja kyvyissä ymmärtää monimutkaisia ideoita, sopeutua tehokkaasti ympäristöön, oppia kokemuksesta, pystyä monenlaiseen järkeilyyn ja ratkaista ongelmia. Viime aikoina huomattavasti kehittyneet aivokuvantamisen menetelmät ovat tuoneet uutta valoa älykkyysten tutkimukseen, auttaen selvittämään älykkyysten muodostavia aivojen rakenteita ja hermoverkostoja. Älykkyysten vahva periytyminen on myös tehnyt siitä yhden tutkituimmista käyttäytymisen piirteistä geneettisessä tutkimuksessa ja siihen vaikuttavista geeneistä löydetään edelleen uutta tietoa.

Tutkielman tavoitteena oli selvittää mitä tiedetään älykkyysten neurobiologisesta taustasta, kuinka periytyvää älykkyys on ja miten älykkyys vaikuttaa elämään. Lähdin purkamaan kysymyksiä selvittämällä ensin mitä älykkyys on, kuinka sitä tutkitaan ja mihin kokonaisuuksiin se voidaan jakaa. Älykkyysten neurobiologian perustaksi esittelen muutamia asioita aivojen rakenteesta ja toimintaperiaatteesta. Periytymiseen liittyen selitän kuinka geenien ja kasvatuksen yhteyttä älykkyyteen on tutkittu ja kuinka paljon ne siitä selittävät. Lopuksi käyn vielä läpi, miten älykkyysten arvellaan vaikuttavan yksilöiden elämään.

2 Mitä älykkyys on?

Älykkyysten tutkimuksella on vanhat juuret, Charles Galtonin tehdessä ensimmäiset tutkimukset yli sata vuotta sitten. Galton esitti kirjassaan *Hereditary genius* (1869) muun muassa älykkyysten kulkevan suvussa ja ihmisten jakautuvan kyvyissään normaalijakautuneesti (Galton ym., 1869). Alfred Binet oli edelläkävijänä älykkyysten psykometrisessä mittauksessa, eli älykkyysten mittaamisessa psykologisella testillä. Binet julkaisi ensimmäisen älykkyystestin vuonna 1905. Testin tekemiseen Binetin palkkasi Ranskan valtio, tavoitteenaan tunnistaa lapset, joilla oli oppimisvaikeuksia ja tarve erityisopetukselle koulussa. Testi pyrki ennen kaikkea mittaamaan yleistä älykkyyttä, eikä yksittäisiä kykyjä. Binetin kerättyä tarpeeksi testituloksia, selvisi hänelle, kuinka

paljon pisteitä keskimäärin tietynikäinen lapsi sai. Aineiston perusteella Binet kehitti käsityksen mentaalista iästä, joka laskettiin sen mukaan, minkä ikäryhmän keskipistemäärään testin suorittaja sai (Binet & Simon, 1948).

Vuonna 1912 William Stern keksi yhdistää mentaalisen iän ja kronologisen iän, jonka avulla testin suorittajalle voitiin antaa älykkyysosamäärä (ÄO). ÄO laskettiin jakamalla mentaalinen ikä todellisella iällä ja kertomalla se sadalla, jolloin keskimääräiseksi pistemääräksi tuli 100. Ongelmaksi muodostui, ettei pistemäärää voinut laskea vanhemmille ihmisille, sillä älykkyuden kehitys alkaa tasaantumaan 17 ikävuoden jälkeen ja näin ollen todellista ikää ei ollut enää järkevää verrata mentaaliseen ikään. Ratkaisuna oli testipistemäärien vertaaminen oman ikäisten välillä, keskiarvoisen henkilön saadessa 100 pistettä. Standardijakaumana pidetään 15 pisteen keskihajontaa, jolloin esimerkiksi 68.2 % ihmisistä jakautuu 85 ja 115 pistemäärän väliin.

Nykyisin yleisin käytetty älykkyystesti on WAIS (Wechsler Adult Intelligence Scale), josta viimeisin julkaistu versio on neljäs. Testin suorittaminen kestää noin tunnin ja tarjoaa ÄO:n lisäksi pisteet yleiselle kyvykkyydelle, sanalliselle ymmärtämiselle, havainnolliselle päättelylle, työmuistille ja prosessoinnin nopeudelle. Testin eri pistemäärät voivat auttaa havaitsemaan oppimisvaikeuksia tietyillä osa-alueilla.

Ensimmäiset empiiriset tutkimukset yleisestä kognitiivisesta kyvykkyydestä teki Charles Spearman. Tutkimuksen perustana oli havainto siitä, että ihmiset jotka suoriutuivat hyvin yhdellä osa-alueella, suoriutuivat hyvin myös muilla osa-alueilla. Näin ollen voitiin ajatella olevan olemassa yksittäinen tekijä, joka vaikuttaa kaikkiin osa-alueisiin. Spearman (1904) uskoi, että älykkyys vaikutti kaikkiin kognitiivisiin prosesseihin ja hän jakoi jokaisen ÄO osatestin tuloksen spesifiseen kykyyn ja yleiseen kykyyn. Yleinen kyky selitti vain pienen osan jokaisesta yksittäisestä testistä, mutta kaikki testit yhteenlaskettuna se selitti noin puolet ÄO tuloksesta. Spearman antoi yleiselle kyvyille termin g-tekijä tai g (engl. general intelligence factor, general ability).

Ovatko g ja ÄO sitten sama asia? G:n tieteellinen konstruktio perustuu testitulosten välisiin korrelaatioihin, kun taas ÄO on vain summaus standardoitujen älyä mittaavien testien tuloksista. Älykkyystestien teko vaatii useita erityisiä kognitiivisia kykyjä ja taitoja (Colom ym., 2002). Eli vaikka ÄO-tulokseen vaikuttaa erittäin vahvasti g, on ÄO-tulos vain likimääräinen arvio g:stä.

Moniälykkyysteoria tuli aikoinaan suosituksi Howard Gardnerin esittellessä sen kirjassaan *Frames of Mind: The Theory of Multiple Intelligences* (1983). Howardin mukaan älykkyuden pystyi jakamaan seitsemään toisistaan riippumattomaan kykyyn. Eli hänen mukaansa älykkyydellisillä kyvyillä ei ollut mitään yhteyttä keskenään, jolloin ihmiset olivat usein hyviä yhdessä älykkyydellisessä kyvyssä

ja huonoja toisessa. Teoria ei kuitenkaan ole saanut minkäänlaista tieteellistä tukea, vaan päinvastoin, aineistoista havaitaan yhä uudestaan eri kykyjen korreloivan keskimäärin vahvasti keskenään, vaikka toki yksittäisiä poikkeus tapauksia aina löytyy. Lähempänä totuutta on ÄO-testissä tiettyjen osatestien vahvempi korrelaatio keskenään, jonka pohjalta osatestit voidaan jakaa pääryhmiin. Lewis Thurstonen (1943) mukaan pääryhmät olivat: assosiatiiivinen muisti, numeerinen kyky, havaintonopeus, päättely, spatiaalinen visualisointi, verbaalinen ymmärtäminen ja sanallinen sujuvuus. Pääryhmiä pidetään samoina nykyäänkin.

Tunneälystä ensimmäisiä artikkeleita julkaisi Mayer ja Salovey (1990). Artikkelissa he määrittivät tunneällyn osaksi sosiaalista älykkyyttä, joka sisältää kyvyn monitoroida yksilön omia ja muiden tunteita ja emootioita, sekä kykyä erottaa ne toisistaan ja käyttämään niiden tuomaa informaatiota ohjaamaan ajatteluaan ja toimintaa. Julkisuudessa on ollut väitteitä tunneällyn ylivoimaisesta tärkeydestä työelämässä, mille ei kuitenkaan ole löydetty tieteellistä todistusaineistoa (Mayer ym., 2000). Kiinnostava löytö tunneälykkyyden tutkimuksissa silti on, että tunneäly voi työelämässä jossain määrin paikata matalaa yleisälykkyyttä (Christopher, 2006). Tunneälykkyyden tutkimus on vielä varsin nuori, eikä sitä tunneta lähellekään yhtä hyvin kuin yleisälykkyyttä.

2.1 Joustava ja kiteytynyt älykkyyys

Raymond Cattell esitti vuonna 1941 teorian kiteytyneestä älykkyydestä (GC) (engl. crystallized general ability) ja joustavasta älykkyydestä (GF) (engl. fluid general ability) (Cattell, 1963). Hänen mukaansa älykkyytsteissä ilmenevä g-tekijä olikin kaksi erillistä tekijää. Kyseiset tekijät toimivat keskenään yhteistyössä, mutta ne poikkeavat kuitenkin ominaisuuksiltaan. GC on Cattellin (1971) mukaan tietoa, mitä yksilö on kerännyt elämänsä aikana, käyttäen GF:ää eri tilanteissa. Toisin sanoen GC on yleistä tietämystä ja opittujen operaatioiden käyttämistä ongelmien ratkaisuisissa, kuten matemaattisissa laskuissa. GC:tä voidaan mitata testeillä, jotka mittaavat opittua sanamäärää ja yleistä tietämystä.

GF on yleistä päättelykykyä, säännönmukaisuuksien tunnistamista ja kykyä oppia (Higgins ym., 2019). GF:lle on oma standardoitu älykkyyttesti Raven's Progressive Matrices. Testi koostuu vain ja ainoastaan kuviopäättelytehtävistä, joissa jokaisessa näytetään matriisissa sarja geometrisiä kuvioita. Yksi kuvioista on piilotettu ja annetuista vaihtoehdoista on valittava piilotettu kuvio. Tehtävien suorittamiseen käytetään ennen kaikkea abstraktia päättelyä.

Cattellin (1971) mukaan yksilö, jolla on aina ollut enemmän GF:ää, on myös enemmän GC:tä. GC voisi kuitenkin yhä kasvaa, vaikka GF pysyisi samana tai jopa laskisi. Asia ei kuitenkaan ole niin yksinkertainen, sillä tutkimukset eivät ole pystyneet ennustamaan GC:tä GF:n perusteella. Kuitenkin

kyky, joka voi ennustaa GC:tä, on muisti ja muistiin vaikuttaa jossain määrin GF. GF myös ennustaa akateemista tietämystä ja määrällisiä kykyjä, eli kykyä ymmärtää tieteellistä dataa ja käsitteitä (Nisbett ym., 2012). Myös Hambrickin ja kollegoiden (2008) tutkimus havaitsi, että GF ennusti yksilön tietämyksen lähtötason ja että tietämyksen lähtötaso ennusti GC:tä, mutta siltikään suoraa yhteyttä GF:n ja GC:n välillä ei löydetty.

2.2 Työmuisti, prosessointi nopeus ja itsesäätely

Monet yksittäiset kognitiiviset kyvyt korreloivat vahvasti älykkyyden kanssa. Muun muassa työmuisti ja GF ovat hyvin läheisiä käsitteitä. Työmuisti on aktiivinen prosessointi järjestelmä, joka samanaikaisesti säilyttää ja manipuloi relevanttia informaatiota. Olennainen osa prosessointia on myös häiritsevän tai tarpeettoman informaation sivuuttaminen ja väärin reaktioiden estäminen (Engle, 2002). Baddeleyn & Hitchin (1974) työmuistin malli jakaa työmuistin kolmeen alajärjestelmään: kielelliseen, visuaalisspatiaaliseen ja episodisen muistiin. Alajärjestelmiä koordinoi tarkkaavaisuus. Työmuisti ja g ovat saavuttaneet tutkimuksissa keskimäärin 0.72 korrelaation (Nisbett ym., 2012). Yhteyden ulottuvuus on silti yhä kiistanalainen, työmuistin määritelmän ollessa suurimpana väittelyn aiheena.

Erilaiset prosessointinopeuden mittaukset korreloivat merkittävästi mitatun älykkyyden kanssa Sheppardin ja Vernonin (2008) mukaan. Prosessointitehtävien trendi on, että monimutkaisemmat tehtävät korreloivat korkeammin älykkyyden kanssa, mutta vaikutus ei ole selvä kaikissa tehtävissä. Tulokset myös osoittivat prosessointinopeuden usein korreloivan vahvemmin GF:n kuin GC:n kanssa. GF:n vahvempi korrelaatio oli ilmeinen etenkin yleiseen prosessointinopeuteen liittyvissä tehtävissä, kun taas tehtävät, jotka vaativat opitun tiedon hakemista pitkäaikaisesta muistista, korreloivat vahvemmin GC:n kanssa. Yleisen prosessointinopeuden ja älykkyyden välinen korrelaatio on kohtalainen, keskimääräisen korrelaation ollessa 0.24 (Sheppard & Vernon, 2008). Eli prosessointinopeus ei vaikuta erityisen vahvasti älykkyyteen kyseisen meta-analyysin mukaan. On kuitenkin tutkimuksia, joissa prosessointinopeuden ja älykkyyden korrelaatioksi saatiin jopa 0.65 (Vernon & Weese, 1993). Prosessointinopeus kasvaa lapsuudesta aikuisuuteen, kunnes aikuisuuden saavuttaessa alkaa taas laskemaan.

Myös itsesäätelyllä on selkeä vaikutus älyllisissä tehtävissä ja sitä on pyritty selittämään useilla kognitiivisilla tekijöillä. Esimerkiksi suuremman työmuistikapasiteetin omaavat yksilöt ovat parempia säätelemään emootioitaan (Schmeichel ym., 2008). Ja yksilöt, jotka ovat keskimääräistä parempia vaimentamaan emootioitaan, saavat keskimääräistä korkeampia pistemääriä Raven's Progressive Matrices -testissä. Itsesäätelyn ja GF:n väliselle yhteydelle on ainakin kolme mahdollista

syitä (Nisbett ym., 2012). (1) Kyky itsesäätelylle voi olla älykkyyden ilmentymä, (2) ne voivat jakaa saman yhteisen muuttujan, tai (3) itsesäätely voi olla yksi prosessi, joka helpottaa älykkyyden kehittymistä. On todisteita siitä, että itsesäätely tai jokin ei-älykkyydellinen motivaatio tekijä, ei vain tue menestystä elämässä, vaan parantaa myös ÄO-tulosta. Esimerkiksi Duckworth ym. (2011) osoittivat meta-analyysissä, että kannustimet hyvälle testitulokselle paransivat ÄO-pistemäärää noin kymmenellä pisteellä.

3 Älykkyyden neurobiologia

Aivot ovat monimutkaisin tunnettu rakenne maailmassa. Ihmisen aivot sisältävät noin 86 miljardia hermosolua eli neuronia ja suunnilleen saman verran glia- eli tukisoluja (Azevedo ym., 2009). Yhdellä neuronilla voi olla tuhansia yhteyksiä muihin neuroneihin ja aivot sisältävätkin kaikkiaan noin 100 biljoonaa neuronien välistä yhteyttä. Aivojen painaessa keskimäärin noin 1,3–1,4 kg, ovat ne vain noin 2 % kehon kokomassasta. Aivot kuitenkin kuluttavat jopa 20 % kehon kokonaisenergian tarpeesta. Noin puolet aivojen kulutuksesta tulee ionipumppujen toiminnasta, jotka auttavat ylläpitämään neuronien välistä sähkösignaalien siirtoa.

Esitän lyhyesti kolme eri aivokuvantamisen tekniikkaa, jotka antavat osviittaa, kuinka aivojen toimintoja voidaan mitata pään ulkopuolelta. Elektroenkefalografia tai aivosähkökäyrätutkimus (EEG) on sähköfysiologinen mittaussuunnitelma, jossa pään pinnalta mitataan aivokuoren neuronien tuottamia jännitemuutoksia. EEG:llä on huono tilallinen ja ajallinen mittatarkkuus, minkä takia se soveltuu lähinnä hyvin yleisen aivotoiminnan mittaamiseen, kuten kuinka aktiivisena aivokuori on. EEG on yksi halvimmista ja helpoimmista menetelmistä mitata aivotoimintaa. Sitä voidaan hyödyntää muun muassa unifysiologian tutkimuksissa.

Magnetoenkefalografia (MEG) mittaa pään ulkopuolelta havaittavia heikkoja magneettikenttiä, jotka syntyvät neuronien viestinnän aiheuttamista sähkövirroista. MEG mittauksen avulla aivoissa tapahtuvat sähköisen toiminnan keskukset voidaan havaita millisekuntien tarkkuudella, spatiaalisen tarkkuuden ollessa muutamia millimetrejä.

Toiminnallisella magneettikuvauksella (fMRI) mitataan aivojen eri osissa tapahtuvia veren happipitoisuuden muutoksia. Neuronien aktivoiminen vaatii energiaa, jolloin aktivoitumisen jälkeen verenkierto aktivoituneelle aivoalueelle kasvaa, tuodakseen paikalle happea ja glukoosia. Verenkierron ja neuronien kulutuksen aiheuttamat hapellisen ja hapettoman hemoglobiinin muutokset havaitaan fMRI:llä, sillä hemoglobiinin magneettiset ominaisuudet poikkeavat eri

happipitoisuuksilla. Koska verenkierron muutokset tulevat monta sekuntia jäljessä neuronien aktivoitumisen jälkeen, on fMRI:n ajallinen tarkkuus huono. Spatiaalinen tarkkuus on kuitenkin jopa alle millimetrin luokkaa.

3.1 Aivojen koon ja rakenteiden merkitys

Yksi parhaiten tunnettu hermoston ja älykkyyden välinen positiivinen korrelaatio on aivojen koko. Aivokuvantamisen meta-analyysi (Pietschnig ym., 2015) osoitti kohtalaisen ja vakaan korrelaation (0.24) aivojen tilavuuden ja älykkyyden välillä. Miesten aivot ovat keskimäärin 8 - 14 % suuremmat kuin naisten. Kokoero on suunnilleen sama kuin useamman muunkin elimen kohdalla, kuten sydämen. Miesten ja naisten välinen aivojen kokoero ei kuitenkaan tee miehistä sen älykkäämpiä, vaan miehet ja naiset saavat keskimäärin saman ÄO-tuloksen. Eroina testituloksissa on kuitenkin se, että naiset saavat yleensä parempia pisteitä tehtävissä, jotka vaativat verbaalisia kykyjä ja miehet tehtävissä, jotka vaativat visuaalisspatiaalisia kykyjä (Nisbett ym., 2012).

Oletettavasti sukupuolten välisellä aivojen kokoerolla ei ole vaikutusta älykkyyteen, koska eri sukupuolilla on eroja myös aivojen rakenteessa. Naisilla on enemmän harmaata ainetta kuin miehillä ja miehillä enemmän valkeaa ainetta. Harmaa aine koostuu aivosoluista, etenkin neuroneista. Valkea aine koostuu neuronien viejähaarakeista, joita ympäröi eristävä rasvapitoinen kerros, myeliini. Suurin osa aivojen massasta kuorikerroksen alla on valkeaa ainetta. Lisäksi kaikki aivojen alueet eivät ole tasapuolisesti yhtä tärkeitä kognitiivisille toiminnoille. Eri sukupuolilla harmaan ja valkean aineen muodostamat kuviot ovat erilaisia, viitaten siihen, että miehet ja naiset saavuttavat samankaltaisen älykkyyden käyttäen aivojen eri alueita toisistaan poikkeavalla tavalla (Nisbett ym., 2012).

Aivojen koon lisäksi aivokuoren paksuus on osoittanut kohtalaisen (0.22) korrelaation älykkyyden kanssa (Ritchie ym., 2015). Aivokuoren paksuus on keskimäärin noin 2–3 millimetriä. Mitä paksumpi aivokuori, sitä enemmän siinä on neuroneita. Neuronien tiheys ja ryhmittely ovat ratkaisevan tärkeitä kognitiivisille kyvyille. Neuronien väliset valkean aineen ratojen vauriot taasen, ovat osoittaneet negatiivisen korrelaation älykkyyden kanssa (Ritchie ym., 2015). Hermoratoja ympäröivien myeliinituppjen halkeamat ja aukot hidastavat tai jopa estävät informaation siirtymisen paikasta toiseen, mikä pakostakin vaikuttaa prosessoinnin kokonaissuoritukseen.

Positiivinen yhteys älykkyyden ja aivojen koon välillä on aiemmin tulkittu osoittavan korkeampaa laskennallista tehoa. Laskennallisen tehon arveltiin johtuvan suuremmasta hermoston kapasiteetista ja useammasta aivojen aluekohtaisesta yhteydestä. Laskennallisen tehon rinnalle on kuitenkin tullut myös muita teorioita selittämään älykkyyttä. Yksi teorioista on parietaali-frontaalinen integraatioteoria (P-FIT).

Jung ja Haier (2007) tiivistivät P-FIT mallin toiminnan älykkyydessä ja järkeilyssä seuraavasti: (1) kognitiivisesti merkittävä informaatio tulee ihmisillä tyypillisesti aivoihin kuulo- ja/tai näköaistikanavoiden kautta, jotenka auditorisen informaation prosessointiin liittyvät alueet temporaalisissa lohkoissa ja visuaalisten havainnoiden prosessointiin liittyvät alueet takaraivolohkossa, ovat kriittisiä aistihavaintojen alkuprosessoinnille. (2) Seuraavaksi prosessoidut aistihavainnot syötetään parietaaliseen aivokuoreen ja pihtipoimuun, missä rakenteellinen symboliikka, abstraktio ja viimeistely selkiytyvät. (3) Parietaalisen aivokuoren oletetaan olevan vuorovaikutuksessa aivojen etuosien kanssa, jolloin eri vaihtoehtoja punnitaan. (4) Kun paras vaihtoehto on päätetty, etummainen pihtipoimu sitoutuu tukemaan tiettyä vastetta ja estämään muita kilpailevia vasteita. Jung ja Haier arvelivat prosessien riippuvan taustalla olevan valkean aineen tarkkuudesta, jota tarvitaan nopean ja virheettömän tiedonsiirron välitykseen etu- ja takaaivoalueiden välillä.

Yksi selkeimmin Gf:ään vaikuttava aivoalue on prefrontaalinen aivokuori (PFC). Kliinisen neuropsykologian tutkimuksissa on havaittu suorituksen huomattavaa heikentymistä järkeilyä vaativissa testeissä yksilöillä, joilla PFC on vaurioitunut (Waltz ym., 1999). Merkittävää näissä tutkimuksissa on myös se, ettei mentaalisen kyvykkyyden muut puolet, kuten hyvin opitut ja kulttuurilliset kyvyt, vaikuta juuri heikentyneen. Nämä tutkimukset antavat ymmärtää, että PFC on tarpeellinen pääasiassa visuaalisspatiaalisessa päättelyssä, jossa informaatio on uutta ja epäsemanttista (Waltz ym., 1999)

Kaksi urauurtavaa neuroanatomian tutkimusta sovelsivat koneoppimiseen perustavaa ennustavaa mallinnusta ja osoittivat, että yksilöllisen ÄO-tuloksen voi ennustaa tehtävän suorittamisen aiheuttamista hermoaktivaatiokuvioista, tosin varsin suurella virhemarginaalilla, +/- 10 ÄO-pistettä (Hilger ym., 2020). Aikaisempien raporttien mukaisesti vuorovaikutus parietaali-frontaalisten alueiden aktivoimisen ja aivojen oletustoimintatapaan liittyvien alueiden deaktivoimisen välillä vaikutti eniten tähän ennustukseen. Havainto voidaan tulkita tukena olettamukselle, että älykkäät yksilöt ovat parempia pitämään heidän aivokuorensa aktivoimisen paremmin keskittyneenä. Eli älykkäät yksilöt aktivoivat tehokkaammin aivoalueita, jotka ovat tehtävän kannalta oleellisia ja samalla deaktivoivat tehokkaammin alueet, jotka ovat epäolennaisia (Hilger ym., 2022).

Lisäksi älykkäämmät yksilöt pystyvät ratkaisemaan helpompia ongelmia nopeammin ja vähemmällä aivokuoren aktiivisuudella kuin vähemmän älykkäät yksilöt (Neubauer & Fink, 2009). Kuitenkin tehtävien vastatessa kyvykkyyden maksimitasoa, älykkäämmät yksilöt aktivoivat aivoja enemmän kuin vähemmän älykkäät. Eli voitaisiin sanoa älykkäämpien ratkaisevan helppoja tehtäviä

pienemmällä vaivalla ja haastavia tehtäviä tehokkaammalla aivojen käytöllä, ottaen aivojen prosessointikapasiteetista kaiken irti.

3.2 Hermoverkostot

Älykkyyteen liittyvää vaihtelua valkeassa aineessa on pääasiassa tutkittu diffuusiotensori MRI:llä. Valtaosa rakenteellisen kytkeytyneisyyden tutkimuksista raportoi positiivisia assosiaatioita korkeamman älykkyyden ja koko aivojen laajuisen yhtenäisemmän valkean aineen välillä (Navas-Sánchez ym., 2014). Tutkimuksissa on raportoitu koko aivojen laajuisia, kuten myös paikallisten aivoalueiden välisiä hermoratoja, jotka yhdistävät tietyt aivoalueet yhteen. Yhdessä valkean aineen radat muodostavat laajoja hermoverkostoja. Yhä selvemmin on tullut esiin, että älykkyys ei riipu vain tietystä aivoverkosta. Sen sijaan kasvava määrä todisteita viittaa siihen, että kiteytyneen ja joustavan älykkyyden yksilölliset erot heijastavat globaalia, koko järjestelmän laajuista dynamiikkaa ja kykyä siirtyä joustavasti verkkotilasta toiseen (Barbey, 2018).

3.2.1 Moduulit

Energiakustannusten minimoimiseksi aivokuori jakautuu anatomisesti paikallisiin moduuleihin, jotka muodostuvat tiiviisti toisiinsa kytkeytyneistä alueista tai yhtymäkohdista. Yhtymäkohtien keskinäinen läheisyys moduuleiden sisällä lyhentää keskimääräistä viejähaarakkeen pituutta, mikä säästää tilaa ja viejähaarakkeiden ylläpitoon tarvittavaa energiaa ja rakennusaineita (Latora & Marchiori, 2001). Lisäksi se vähentää signaalien välitykseen käytettävää aikaa ja edistää paikallista tehokkuutta. Toimintojen jakaminen omiin osiin suojelee myös koko järjestelmän kaatumiselta, paikallisen aivovaurion sattuessa. Jokaisella moduulilla on kapasiteetti toimia ja muokata omaa operointia ilman haitallista vaikutusta muihin moduuleihin. Se mahdollistaa kognitiivisen joustavuuden ja antaa tärkeän hyödyn sopeutumisen kannalta (Bassett & Gazzaniga, 2011).

3.2.2 Sisäiset yhdysverkostot

Ihmisaivojen toiminnallista topologiaa ja ryhmittynyttä rakennetta on tutkittu laajasti lepotilan fMRI-sovellutuksella. Kyseinen menetelmä paljastaa ydinjoukon sisäisiä yhdysverkostoja (ICNs) (engl. intrinsic connectivity networks), mitkä tuo esille aivotointojen yhtenäisyyden laajasti jakautuneilla aivojen alueilla. Diffuusiotensori MRI:llä mitattaessa nähdään, että toiminnalliset aivoverkostot yhtyvät suurelta osin rakenteellisten organisaatioverkostojen kanssa. Ne antavat yhdessä käsityksen yhteisörakenteeseen (engl. community structure), jossa globaali tiedonkäsittely ja älykkyyden laajuus tulevat esiin (Hagmann ym., 2007).

3.2.3 Kiteytyneen älykkyyden verkostodynamiikka

Globaalin tiedonkäsittelyn aivoissa mahdollistaa hierarkkinen yhteisö rakenne. Yhteisörakenteessa moduulit on ”upotettu” moduuleihin, muodostamaan monimutkaisia, toisiinsa kytkeytyneitä verkostoja (Meunier ym., 2010). Tätä infrastruktuuria tukevat osaltaan vahvasti kytkeytyneet, eli paljon yhteyksiä muodostavat yhtymäkohdat ja keskuksset. Nämä keskitetyt alueet toimivat eri rooleissa joko paikallisina keskuksina tai yhdistin keskuksina. Paikalliset keskuksset yhdistävät yhtymäkohtia moduuleiden sisällä ja yhdistin keskuksset muodostavat yhdysiteitä eri moduuleiden välillä. Näin ollen keskuksset ovat välttämättömiä tiedon siirrossa ICN:issä ja niiden välillä. Ne myös tarjoavat perustan kognitiivisten prosessien keskinäiselle vuorovaikutukselle. Vahvasti kytkeytyneet keskuksset muodostavat yhdessä rikkaan yhteisöverkoston, joka välittää lähes 70 % lyhyimmistä reiteistä aivoissa ja on siksi tärkeä globaalin verkoston tehokkuuden kannalta (Barbey, 2018).

Tutkimus verkostokontrolliteorian alalta avaa eteenpäin sitä, kuinka vahvasti kytkeytyneiden keskuksien topologia muokkaa verkoston dynamiikkaa (Gu ym., 2015). Lisäksi keskuksien topologia selittää niiden kykyä toimia verkostojen ohjaajina, jotka siirtävät järjestelmän tiettyihin verkkotiloihin. Tämän lähestymistavan mukaan aivojen hierarkkinen yhteisö rakenne voi tukea tai rajoittaa siirtymistä verkkotilasta toiseen. Yhteisö rakenne mahdollistaa suoria reittejä ja monimutkaisia reittejä. Suora reitti vaatii minimaalisesti siirtymiä, jotenka se on helposti saavutettava verkkotila (helppo verkkotila) (engl. An easy-to-reach network state). Monimutkainen reitti vaatii useita muutoksia, jotenka se on vaikeasti saavutettava verkkotila (vaikea verkkotila) (engl. A difficult-to-reach network state) (Barbey, 2018). Siten tutkimalla, kuinka aivot on organisoitu muodostamaan topologisesti suoria tai epäsuoria reittejä, jotka käsittävät lyhyen ja pitkän matkan yhteyksiä, voidaan tehdä luotettavia johtopäätöksiä ICN:ien joustavuudesta ja dynamiikasta.

Viimeaikaiset tutkimukset soveltaen tätä lähestymistapaa osoittivat, että vahvasti kytkeytyneet keskuksset mahdollistavat verkoston toiminnan monissa helpoissa verkkotiloissa. Helpot verkkotilat antavat pääsyn saatavilla oleviin aikaisempiin kokemuksiin, mikä on tunnusmerkki kiteytyneellä älykkyydelle (Gu ym., 2015). Kattava neurotieteellinen aineisto osoittaa, että aivoverkostojen topologia on muovautunut oppimisen ja koettujen kokemusten perusteella. Oppiminen saa aikaan uusien hermosolujen, synapsien, yhteyksien ja verisuonien muodostumista, jotka osaltaan edistävät kiteytyneen tiedon saatavuutta (Barbey, 2018). Kapasiteetti toimia helpoissa verkkotiloissa on mahdollista useiden ICN:nien avulla. Tärkeä ICN kiteytyneelle älykkyydelle on aivojen peruslepotilaverkosto (engl. Default mode network) (Gu ym., 2015). Peruslepotilaverkosto on aktiivisena, kun henkilö ei ole keskittynyt mihinkään ja mieli harhailee vapaasti. Peruslepotilaverkoston tiedetään tukevan semanttisen ja episodisen muistin kuvauksia, jotka ovat

keskeisiä kiteytyneelle älykkyydelle. Näin ollen kiteytynyt älykkyys riippuu aiemman tietämyksen saamisesta helppo verkkotilojen kautta, joita tukevat muun muassa vahvasti kytkeytyneet keskukset peruslepotilaverkostossa.

3.2.4 Joustavan älykkyyden verkostodynamiikka

Kasvava määrä todisteita viittaa siihen, ettei vahvasti kytkeytyneet keskukset pysty yksinään selittämään hermoverkosto-organisaation ylemmän tason rakenteita ja tiedonkäsittelyn joustavuutta (Gallos ym., 2012). Globaali tiedonkäsittely riippuu vahvojen kytkösten lisäksi heikkojen siteiden muodostumisesta yhtymäkohtien välillä, joissa on vain pieni määrä yhteyksiä. Toisin sanoen tiedonkäsittely vaatii laajoja, mutta vaatimattomia yhteyksiä useiden vahvasti kytkeytyneiden keskuksien välillä. Vaikka voisi kuvitella vahvojen yhteyksien olevan optimaalisia koko hermoverkoston toiminnalle, eivät ne sitä ole. Heikkojen yhteyksien tiedetään tuottavan globaalisti tehokkaamman topologian, minkä johdosta tarvitaan sekä vahvoja että heikkoja yhteyksiä rakentamaan tasapainoinen verkosto (Schneidman ym., 2006).

Tutkimus heikkojen yhteyksien roolista hermoverkostojen dynamiikassa osoittaa edelleen, että heikot yhteydet mahdollistavat järjestelmän toiminnan useissa vaikeissa verkkotiloissa. Vaikeiden verkkotilojen käyttö kuvastaa kykyä sopeutua uusiin tilanteisiin ottamalla käyttöön joustavan ja älykkään käyttäytymisen mekanismeja (Gu ym., 2015). Toisin kuin kiteytynyt älykkyys, joustava älykkyys tarvitsee helppojen verkkotilojen lisäksi käyttöön vaikeat verkkotilat. Vaikeat verkkotilat riippuvat yhteyksistä ja reiteistä, jotka eivät ole vakiintuneet aikaisemman kokemuksen perusteella. Siten vaikeat verkkotilat ovat vastaus korkeisiin kognitiivisiin vaatimuksiin, joissa tarvitaan mukautuvia valintoja ja uusien näkemysten tuottamista. Useat ICN:t, erityisesti frontoparietaaliset ja cingulo-operkular verkostot, ovat osoittaneet kyvyn käyttää vaikeita verkkotiloja (Gu ym., 2015). Näiden verkostojen tiedetään yhdessä tukevan kognitiivista hallintaa, mahdollistaen ylhäältä alas säätelyn ja henkisten toimintojen ohjauksen. Lisäksi ne auttavat sopeutumaan ympäristön muutoksiin ja muuttuviin tehtävätavoitteisiin.

Lepotilan fMRI- ja ihmisen leesiitutkimuksista saadut yhtenevät todisteet antavat vahvasti ymmärtää frontoparietaalisen verkoston toimivan kognitiivisessa ohjauksessa. Siitä voidaan olettaa, että frontoparietaalinen verkosto selittää yksilölliset erot adaptiivisessa päättelyssä ja ongelmanratkaisussa (Gläscher ym., 2010). Arviot on tehty globaalin tehokkuuden fMRI-mittauksilla ja aivojen yhtenäisyyden rakenteellisilla mittauksilla. Tästä näkökulmasta katsottuna frontoparietaalisen verkoston rooli joustavassa älykkyydessä heijastaa globaalia, koko järjestelmän laajuista kykyä sopeutua uusiin ympäristöihin. Lisäksi se osallistuu kognitiivisiin

ohjausmekanismeihin, jotka ohjaavat tavoitteiden saavuttamiseen tarvittavien henkisten toimintojen dynaamista kokoamista ja valintaa. Sen sijaan, että yritetään lokalisoida yksittäisiä eroja joustavassa älykkyydessä tiettyyn aivoverkostoon, tämä viitekehys viittaa siihen, että frontoparietaalisen ja cingulo-operkular verkostojen heikot yhteydet ohjaavat globaalia verkkodynamiikkaa (Gläscher ym., 2010). Verkostot käyttävät joustavasti vaikeita verkkotiloja, ohjatakseen sopeutuvaa käyttäytymistä. Samalla ne tarjoavat katsauksen yksilöiden yleisen älykkyyden eroihin, globaalin arkkitehtuurin tasolla.

3.2.5 Yleisen älykkyyden verkostodynamiikka

Viimeaikaiset havainnot motivoivat pohtimaan uutta näkökulmaa globaalin verkkodynamiikan roolille yleisessä älykkyydessä, irtautuen standarditeorioista. Standarditeoriat ovat ottaneet huomioon g-tekijän yksilölliset erot vain yhden aivoalueen, verkoston tai tiettyjen verkostojen päällekkäisyyksien perusteella. Kumuloituvat todisteet viittaavat kuitenkin verkoston joustavuuden ja dynamiikan olevan ratkaisevan tärkeitä yleisen älykkyyden taustalla olevien henkisten kykyjen moninaisuudelle (Barbey, 2018).

Pysyvän topologisen tilan sijaan todisteet viittaavat siihen, että ICN:nien topologisessa tilassa tapahtuu vaihtelua. Vaihtelevuus auttaa tukemaan erilaisia toiminnallisten yhteyksien profiileja (Mattar ym., 2016). Moduulien välisten yhteyksien tiedetään vaihtelevan enemmän kuin moduulien sisäisten yhteyksien, mikä osoittaa yhdistävien keskusten suurempaa dynaamista vaihtelua verrattuna paikallisiin keskuksiin. Näin ollen spesifisten henkisten kykyjen modulaarinen yhteisö rakenne tarjoaa vakaan perustan, jolle rakentuu joustavampi, laajempien kognitiivisten kykyjen topologia (Hampshire ym., 2012). Laajempien kognitiivisten kykyjen taustalla oleva ICN:nien dynaamisuus, osoittaa kognitiivisten kykyjen käyttävän sekä helppoja että vaikeita verkkotiloja.

4 Älykkyyden periytyminen

Edellisen vuosisadan aikana älykkyyden geneettinen tutkimus on ollut hyvin kiistanalainen aihe, luonto vastaan kasvatust -debatin ollessa käynnissä. Kiista on kuitenkin auttanut tekemään laadukkaampaa tutkimusta ja nykyään suuret perhe-, kaksois- ja adoptiotutkimukset ovat jatkuvasti osoittaneet vahvoja todisteita merkittävästä geneettisestä vaikutuksesta älykkyyden yksilöllisiin eroihin. Viimeisimmät meta-analyysit ovat osoittaneet erojen perityssä DNA sekvenssissä selittävän noin puolet mitatun älykkyyden variaatiosta (Hilger ym., 2022).

Mielenkiintoinen kehityksellinen löytö älykkyydessä on, että sen periytyvyyden arvio kaksoistutkimuksissa kasvaa dramaattisesti varhaislapsuudesta (20 %) lapsuuteen (40 %) ja aikuisuuteen (60 %) (Plomin & Deary, 2015). Aikuisuudessa arvio pysyy kutakuinkin samana. Mikä sitten selittää kasvavan perinnöllisyyden, geenien pysyessä muuttumattomina? Kaksoistutkimukset ehdottavat geneettisen vaikutuksen vahvistuvan geeni-ympäristö korrelaation kautta ajan kuluessa (Briley & Tucker-Drob, 2013). Eli samat geenivariantit vaikuttavat älykkyyteen lapsuudesta aikuisuuteen. Kyseiset geenit vain vaikuttavat ajan saatossa yhä enemmän älykkyyteen, yksilön valitessa ja muokatessa ympäristöjä, jotka korreloivat hänen geneettisiin taipumuksiinsa, mikä johtaa älykkyyden periytyvyyden kasvuun.

4.1 Tutkimus geenien ja ympäristön vuorovaikutuksesta

Geneettinen tutkimus on johtanut yhteen tärkeimmistä löydöistä ympäristön vaikutuksesta älykkyyteen. Älykkyyden on pitkään tiedetty kulkevan suvussa, mutta suvun yhtäläisyyden arveltiin johtuvan kasvatuksesta, eli toisin sanoen jaetun perheympäristön vaikutuksesta. Sisarusten ajateltiin olevan yhtä älykkäitä, koska he olivat kasvaneet samassa perheessä ja käyneet samassa koulussa. Kaksois- ja adoptiotutkimukset tukevat tätä olettamusta nykyäänkin, mutta vain nuoruusiän asti (Plomin & von Stumm, 2018). Aikuisuudessa yksilön älykkyyden tason määrittää suurimmaksi osaksi geenit, kun nuoruusiän aikana koetun perheympäristön vaikutus jää häviävän pieneksi (Briley & Tucker-Drob, 2013). Älykkyyden samankaltaisuus perheen sisällä johtuu siis enemmänkin geneeistä kuin kasvatuksesta. Korostaen sen kuitenkin koskevan lähinnä kohtalaisen normaaleissa perheolosuhteissa eläviä, ei äärimmäisyyksiin menevissä perheissä, joissa tapahtuu kaltoinkohtelua tai hyväksikäyttöä.

Yhteiskuntaluokkaan liittyvillä ympäristöeroilla tiedetään olevan suuri vaikutus ÄO:hön ennen aikuisikää. Vaikutus on esimerkiksi havaittu adoptiotutkimuksissa, joissa ylemmän yhteiskuntaluokan kotiin adoptoitu lapsi saa ÄO-testissä tyypillisesti 12 pistettä enemmän, kuin sisarus, joka on jäänyt kotiin, tai lapsi, joka on adoptoitu alemman yhteiskuntaluokan kotiin (Locurto, 1990). Vaikutuksen ajatellaan johtuvan pääasiassa siitä, että ylemmän yhteiskuntaluokankoti tarjoaa lapselle yleensä ottaen enemmän älyllistä stimulaatiota. Kuten esimerkiksi enemmän ja monipuolisempaa puhetta lapselle, enemmän kirjoja ja älylaitteita, enemmän oppimiskokemuksia kodin ulkopuolella, kannustavampi ilmapiiri ja niin edelleen (Nisbett ym., 2012).

4.2 Valikoiva pariutuminen

Valikoivalla pariutumisella on hyvin oleellinen vaikutus älykkyyden periytymisessä. Valikoivalla pariutumisella tarkoitetaan epäsattuinaista yksilöiden pariutumista yhden tai useamman genotyyppisen tai fenotyyppisen ominaisuuden samankaltaisuuden perusteella (Buss & Barnes, 1986). Valikoiva pariutuminen on suurempaa älykkyyden kuin minkään muun piirteen kanssa. Esimerkiksi parien pituuden ja painon ollessa kyseessä, kumppanien välinen korrelaatio piirteessä on noin 0.20 (Plomin & Deary, 2015). Eli keskimääräistä pitempi ja painavampi henkilö valitsee keskimäärin pitemmän ja painavamman kumppanin, korrelaation ollessa kuitenkin heikko. Parien persoonallisuudet korreloivat keskenään vielä vähemmän, vain noin 0.10. Parien älykkyyksien välinen korrelaatio on kuitenkin jopa 0.40 (Plomin & Deary, 2015). Lisäksi verbaalinen älykkyys osoittaa suurempaa korrelaatiota (0.50) kuin ei-verbaalinen (0.30). Kumppaneiden tiedetään muistuttavan älyllisesti toisiaan juuri valikoivan pariutumisen vuoksi, eikä siksi, että pari alkaisi muistuttamaan enemmän toisiaan yhdessä elämisen vuoksi. Voidaan myös ajatella parien valitsevan toisensa enemmänkin koulutuksen perusteella, kuin suoraan älykkyyden, sillä puolisoiden välinen korrelaatio koulutuksen määrässä vuosina on noin 0.60 (Plomin & Deary, 2015).

Merkittävää korkeassa valikoivassa pariutumisessa älykkyyden suhteen on se, että valikoiva pariutuminen polygeenisessä ominaisuudessa lisää additiivista geneettistä varianssia (Plomin & Deary, 2015). Polygeneettisillä ominaisuuksilla tarkoitetaan ominaisuuksia, joiden kehitystä säätelevät useat keskenään vuorovaikutuksessa olevat geenit. Additiivinen geneettinen varianssi viittaa alleelien tai lokuksien riippumattomiin vaikutuksiin, jotka summautuvat. Ei-additiiviset vaikutukset sen sijaan johtuvat dominanssista tai epistaasista lokuksessa, jossa alleelien tai lokusten vaikutukset ovat vuorovaikutuksessa. Vanhempien valikoiva parittelu lisää heidän jälkeläistensä additiivista geneettistä varianssia, koska jälkeläiset saavat satunnaisesti puolet kummankin vanhemman geneeistä ja muistuttavat vanhempiaan siinä määrin, missä jokaisella vanhempiensa kanssa jaetulla alleelillä on keskimääräinen additiivinen vaikutus. Koska jälkeläiset perivät vain yhden alleelin kummaltakin vanhemmalta, jälkeläiset eroavat vanhemmistaan ei-additiivisen vuorovaikutuksen suhteen.

Esimerkiksi jos korkeasti älykäs nainen saa lapsen matalan älykkyyden omaavan miehen kanssa, olisi jälkeläinen yleensä keskimääräisen älykäs. Mutta johtuen vahvasta positiivisesta valinnasta, on todennäköisempää, että lapsen äidin ollessa älykäs, myös isä on älykäs, jolloin lapsi on todennäköisesti keskimääräistä älykkäämpi. Additiivisen geneettisen varianssin kasvu voi olla merkittävä, koska sen vaikutukset kumuloituvat sukupolvesta toiseen, kunnes tasapaino on saavutettu (Plomin & Deary, 2015).

4.3 Älykkyyteen vaikuttavien geenien löytyminen

Kuten monen muunkin monimutkaisen piirteen geneettisessä tutkimuksessa, myös älykkyys tutkimuksen varhaiset tulokset olivat pettymyksiä. Vielä 2017 vuoteen mennessä ei ollut löydetty vielä yhtään replikoituvaa assosiaatioita yli sadasta ehdokasgeenistä ja GPS (engl. genome-wide polygenic scores) ennusti aikaisissa genomilajuisissa assosiaatiotutkimuksissa (GWAS) (engl. genome-wide association studies) vain 1 % älykkyyden vaihtelusta (Plomin & von Stumm, 2018). Alkoi selvenemään, että ongelmana oli tilastollinen teho. Suurimmat efektikoot assosiaatioissa snippien eli yksittäisten yhden nukleotidin polymorfismien ja älykkyyden välillä olivat äärimmäisen pieniä, selittäen alle 0.05 % älykkyyden variaatiosta. Jos keskimääräisen vaikutuksen suuruus olisi 0.005 %, tarvittaisiin 10 000 kyseistä snippiä selittämään 50 % periytyvyys älykkyydessä. Riittävän tilastollinen voiman saavuttamiseksi tarvittaisiin yli 250 000 näytettä. Näin ollen aikaisemmissa GWAS tutkimuksissa käytetyt otos koot 18 000 ja 54 000 välillä, eivät olleet tarpeeksi isoja mittaamaan niin pieniä vaikutuksia (Plomin & von Stumm, 2018).

Ratkaisu otoskokoon tuli hiukan odottamattomasta oivalluksesta, nimittäin GWAS aineistoista, joissa kysytään kokoaikaisen opiskelun määrä vuosina (Cesarini & Visscher, 2017). Osallistujan opiskeluvuosien määrää kysytään lähes jokaisessa GWAS-tutkimuksessa, minkä johdosta oli mahdollista saada kasaan riittävän suuri otoskoko älykkyystutkimusta varten. Opiskeluvuosien määrää voitiin käyttää apuna älykkyyden etsimisessä, koska opiskeluvuosien määrä korreloi vahvasti älykkyyden kanssa, fenotyypisesti 0.50 ja geneettisesti 0.65 (Plomin & von Stumm, 2018).

Leen ja kollegoiden (2018) GWAS-tutkimus analysoi opiskeluvuosien määriä noin 1.1 miljoonan yksilön otoksesta, mikä on suurin GWAS-aineisto mistään piirteestä. Tutkimus tunnisti 1 271 riippumatonta genomien laajuista merkittävää snippiä. Snipit osoittivat geenejä, jotka osallistuvat aivojen kehitysprosesseihin ja hermosolujen väliseen kommunikointiin. Opiskeluvuosien määrä ja kolmen läheisesti yhteenkuuluvan kognitiivisen kyvyn fenotyyppien yhteisanalyysi tuotti polygeenisen pistemäärän, joka selittää 11–13 % koulutus saavutusten variaatiosta ja 7–10 % kognitiivisen suorituksen variaatiosta.

Kuitenkin 10 % periytyvyys on yhä kaukana kaksoistutkimuksissa saaduista arvioista älykkyyden 50 % periytyvyydestä (Plomin & von Stumm, 2018). Kyseinen musta aukko aineistoissa tunnetaan nimellä puuttuva perinnöllisyys, joka on avainongelma kaikissa kompleksissa piirteissä. Snipeillä voidaan olettaa saavutettavan 25 % ennustettavuus älykkyydessä suuremmilla otoskoilla, mutta sitä suurempien arvojen saavuttamiseksi tarvitaan toisenlaista teknologiaa, kuten koko genomien

sekvensointi dataa, joka sisältää myös harvinaisemmat variantit, eikä vain yleisiä snippejä, joita käytetään nykyisissä snippisiruissa.

5 Älykkyyden merkitys elämässä

Laaja epidemiologinen pitkittäistutkimus lähes koko Skotlannin väestöstä on osoittanut, että lapsuudessa tehdyt älykkyystestit ennustavat huomattavia eroja aikuisten sairastuvuus- ja kuolleisuussuhteissa, mukaan lukien syöpien ja verisuonitautien aiheuttamat kuolemat (Whalley & Deary, 2001). ÄO-testituloksella 11-vuotiaana oli merkittävä yhteys eloonjäämiseen noin 76-vuotiaaksi asti. Keskimäärin henkilöt, joiden ÄO oli 85, oli muihin verrattuna 21 % korkeampi todennäköisyys kuolla ennen 76-vuoden ikää (Whalley & Deary, 2001). Suhteet pysyvät merkittävänä sosioekonomisten muuttujien kontrolloinnin jälkeenkin. Yksi selitys tuloksille on älykkäiden yksilöiden parempi huolehtiminen omasta terveydestä, koska älykkyys edesauttaa oppimis-, päättely- ja ongelmanratkaisutaitoja, jotka ovat hyödyllisiä kroonisten sairauksien ja tapaturmien ehkäisyssä, sekä monimutkaisten hoito-ohjelmien noudattamisessa (Deary & Gottfredson, 2004). Toiseksi älykkyys on yhdistetty monenlaisiin terveyskäyttäytymisiin ja seurauksiin. Positiivisella puolella ovat hyvä fyysinen kunto, vähäsokerisen ja -rasvaisen ruokavalion suosiminen, sekä pitempi elinikä. Negatiivisella puolella ovat alkoholismi, lapsikuolleisuus, tupakointi ja liikalihavuus. Oman fyysisen terveyden kunnossapito on loppujen lopuksi yksi elämässä huolehdittavista asioista.

Henkilöstövalintatutkimukset tarjoavat paljon näyttöä siitä, kuinka älykkyys on tärkeä suorituskyvyn ennustaja koulutuksessa ja työssä, etenkin korkeamman tason työssä (Gottfredson, 1997). Älykkyydelle on paljon käyttöä työympäristöissä, koska se on pohjimmiltaan kykyä käsitellä kognitiivista monimutkaisuutta. Mitä monimutkaisempi työtehtävä, sitä suuremman hyödyn korkeampi älykkyys antaa työn hyvin suorittamiseen. Jokapäiväiset tehtävät, kuten työvelvollisuudet ja kaupassa käynti, vaihtelevat monimutkaisuusasteeltaan. Näin ollen älykkyyden merkitys vaihtelee elämän eri osa-alueilla. Kansallinen aikuisten luku- ja kirjoitustaitokyselyn aineisto osoittaa korkeamman kognitiivisen kyvyn parantavan systemaattisesti yksilöiden todennäköisyyksiä suoriutua menestyksekkäästi arkielämän vaatimuksista, kuten pankkiasioiden hoitamisesta, lomakkeiden täyttämisestä ja kaupungissa navigoimisesta. Aineistot havainnollistavat, kuinka pienetkin korkeamman älykkyyden hyödyt kumuloituvat vaikuttamaan yksilöiden yleisiin elämänmahdollisuuksien (Deary & Gottfredson, 2004).

6 Pohdinta

Älykkyystutkimuksen yksi suurimmista kritiikin kohteista ovat olleet älykkyystestit. Älykkyystestien väitetään mittaavan vain kapea-alaista joukkoa taitoja tai pahimmillaan ainoastaan kykyä tehdä älykkyystesti, eikä niinkään yleisälykkyyttä. Totta on, ettei täydellistä älykkyystestiä olekaan, varsinkaan kun älykkyys itsessään on niin abstrakti ja laaja-alainen käsite, että sitä on vaikea rajata. On myös hyvä muistaa, että ÄO-testi mittaa vain kognitiivisia kykyjä, jolloin sen ulkopuolelle jää monia oleellisia tekijöitä kuten motivaatio, asenteet ja tunneäly. Kiinnostava näkökulma on myös se, että toiset ovat alttiimpia arkielämän irrationaalisille virheille järkeilyssä, eikä älykkyystestit pysty mittaamaan sitä. Yksilö voi olla jollain mittarilla hyvin älykäs, ilman että hallitsee kriittisen ajattelun taitoja, minkä kuitenkin ajattelisi osittain liittyvän älykkyYTEEN.

Usein ajatellaan akateemisen uran tai korkean sosiaaliluokan johtuvan lapsuudessa eletyn perheympäristön vuoksi, kun se todellisuudessa johtuu enemmänkin vahvasti älykkyYTEEN kytkeytyneistä geneeistä, jotka on peritty älykkäiltä vanhemmilta. Toki korkeasti koulutettu vanhempi tarjoaa lapselle yleensä ottaen enemmän älyllisiä virikkeitä ja todennäköisemmin myös kannustaa lasta korkeampaan koulutukseen. Perityn älykkyYDEN jättäminen huomiotta voi kuitenkin johtaa virhepäätelmiin, kun tutkitaan perheen ja uralla menestymisen yhteyttä.

Älykkyys ei tietystikään ole kaikki kaikessa, vaan älykkäät yksilöt voivat menestyä tai olla menestymättä lukemattomista eri syistä. Älykkyys ei siis ole takuu menestymiseen, mutta se kuitenkin antaa etua, parantaen mahdollisuuksia pärjätä arkielämässä, koulussa ja työssä. Eikä pidä unohtaa älykkyYDEN tuomaa hyötyä pitää parempaa huolta terveydestä, mikä lisää samalla elinvuosia (Deary & Gottfredson, 2004).

Julkisuudessa älykkyys on harvoin puheenaiheena ja sen merkityksellisyyttä halutaan vältellä. ÄlykkyYDEN pelätään eriarvoistavan ihmisiä. Älykkyys on kyky, jota ei voida juurikaan tasoittaa yhteiskunnallisilla toimilla, sillä abstrakti looginen päättely on varsin muuttumaton ominaisuus. Toisaalta kiteytynyttä älyä, kirjaoppineisuutta voi aina kehittää opiskelemalla paremmaksi ja se voi hyvinkin riittää pääsemään elämässä eteenpäin, vaikkei abstraktissa päättelyssä niin hyvä olisikaan.

Yhteenvedona aivojen neurobiologiasta voidaan sanoa aivojen koon, rakenteen ja eheyden korreloivan selkeästi älykkyYDEN kanssa. Lisäksi viimeaikainen hermoverkostoteorian viitekehys on tarjonnut uuden lähestymistavan ymmärtää älykkyYDEN neuronista perustaa, tutkien yksittäisiä eroja verkostojen topologiassa ja dynamiikassa. ÄlykkyYDEN muodostavasta kahdesta peruspilarista kiteytynyt älykkyys käyttää helposti saavutettavia verkkotiloja, joilla on pääsy aiempaan kokemukseen ja joustava älykkyys käyttää vaikeasti saavutettavia verkkotiloja, jotka tukevat

kognitiivista joustavuutta ja sopeutuvaa ongelman ratkaisua. Siitä päästäänkin lopputulokseen, että älykkyyttä selittää kaikkien hermoverkoston muodostaman järjestelmän dynaamisuus, joustavuus ja kyky siirtyä verkkotilasta toiseen (Barbey, 2018).

Lähteet

- Azevedo, F. A. C., Carvalho, L. R. B., Grinberg, L. T., Farfel, J. M., Ferretti, R. E. L., Leite, R. E. P., Filho, W. J., Lent, R., & Herculano-Houzel, S. (2009). Equal numbers of neuronal and nonneuronal cells make the human brain an isometrically scaled-up primate brain. *Journal of Comparative Neurology*, *513*(5), 532–541. <https://doi.org/10.1002/cne.21974>
- Baddeley, A. D., & Hitch, G. (1974). The social design of virtual worlds: constructing the user and community through code. *Internet Research Annual : Selected Papers from the Association of Internet Researchers Conferences 2000-2002, Volume 1*, 260–268.
- Barbey, A. K. (2018). Network Neuroscience Theory of Human Intelligence. *Trends in Cognitive Sciences*, *22*(1), 8–20. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2017.10.001>
- Bassett, D. S., & Gazzaniga, M. S. (2011). Understanding complexity in the human brain. *Trends in Cognitive Sciences*, *15*(5), 200–209. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2011.03.006>
- Briley, D. A., & Tucker-Drob, E. M. (2013). Explaining the Increasing Heritability of Cognitive Ability Across Development: A Meta-Analysis of Longitudinal Twin and Adoption Studies. *Psychological Science*, *24*(9), 1704–1713. <https://doi.org/10.1177/0956797613478618>
- Buss, D. M., & Barnes, M. (1986). Preferences in Human Mate Selection. *Journal of Personality and Social Psychology*, *50*(3), 559–570. <https://doi.org/10.1037/0022-3514.50.3.559>
- Cattell, R. B. (1963). Theory of fluid and crystallized intelligence: A critical experiment. *Journal of Educational Psychology*, *54*(1), 1–22. <https://doi.org/10.1037/h0046743>
- Cesarini, D., & Visscher, P. M. (2017). Genetics and educational attainment. *Npj Science of Learning*, *2*(1), 1–8. <https://doi.org/10.1038/s41539-017-0005-6>
- Christopher, T. H. (2006). Emotional Intelligence, Cognitive Intelligence, and Job Performance. *Administrative Science Quarterly*, *51*(1), 1–28. <https://doi.org/info:doi/>
- Colom, R., García, L. F., Juan-Espinosa, M., & Abad, F. J. (2002). Null sex differences in general intelligence: Evidence from the WAIS-III. *Spanish Journal of Psychology*, *5*(1), 29–35. <https://doi.org/10.1017/S1138741600005801>
- Deary, I. J., & Gottfredson, L. S. (2004). Intelligence Predicts Health and Longevity, but Why? *Current Directions in Psychological Science*, *13*(1), 1–4.
- Duckworth, A. L., Quinn, P. D., Lynam, D. R., Loeber, R., & Stouthamer-Loeber, M. (2011). Role of test motivation in intelligence testing. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *108*(19), 7716–7720. <https://doi.org/10.1073/pnas.1018601108>
- Engle, R. W. (2002). Working memory capacity as executive attention. *Current Directions in Psychological Science*, *11*(1), 19–23. <https://doi.org/10.1111/1467-8721.00160>
- Gallos, L. K., Makse, H. A., & Sigman, M. (2012). A small world of weak ties provides optimal global integration of self-similar modules in functional brain networks. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *109*(8), 2825–2830. <https://doi.org/10.1073/pnas.1106612109>

- Galton, F., Galton, F., Sydney, S. W., Dudley, J., & Warwick, E. (1892). *HEREDITARY GENIUS*. Macmillan Publishers.
- Gläscher, J., Rudrauf, D., Colom, R., Paul, L. K., Tranel, D., Damasio, H., & Adolphs, R. (2010). Distributed neural system for general intelligence revealed by lesion mapping. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *107*(10), 4705–4709. <https://doi.org/10.1073/pnas.0910397107>
- Gottfredson, L. S. (1997). Why g matters: The complexity of everyday life. *Intelligence*, *24* 1 SPEC., 79–132. [https://doi.org/10.1016/s0160-2896\(97\)90014-3](https://doi.org/10.1016/s0160-2896(97)90014-3)
- Gu, S., Pasqualetti, F., Cieslak, M., Telesford, Q. K., Yu, A. B., Kahn, A. E., Medaglia, J. D., Vettel, J. M., Miller, M. B., Grafton, S. T., & Bassett, D. S. (2015). Controllability of structural brain networks. *Nature Communications*, *6*, 1–10. <https://doi.org/10.1038/ncomms9414>
- Hagmann, P., Kurant, M., Gigandet, X., Thiran, P., Wedeen, V. J., Meuli, R., & Thiran, J. P. (2007). Mapping human whole-brain structural networks with diffusion MRI. *PLoS ONE*, *2*(7). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0000597>
- Hambrick, D. Z., Pink, J. E., Meinz, E. J., Pettibone, J. C., & Oswald, F. L. (2008). The roles of ability, personality, and interests in acquiring current events knowledge: A longitudinal study. *Intelligence*, *36*(3), 261–278. <https://doi.org/10.1016/j.intell.2007.06.004>
- Hampshire, A., Highfield, R. R., Parkin, B. L., & Owen, A. M. (2012). Fractionating Human Intelligence. *Neuron*, *76*(6), 1225–1237. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2012.06.022>
- Higgins, J. P. T., Thomas, J., Chandler, J., Cumpston, M., Li, T., Page, M. J., & Welch, V. A. (2019). Cochrane handbook for systematic reviews of interventions. Teoksessa *Cochrane Handbook for Systematic Reviews of Interventions*. <https://doi.org/10.1002/9781119536604>
- Hilger, K., Spinath, F. M., Troche, S., & Schubert, A. L. (2022). The biological basis of intelligence: Benchmark findings. *Intelligence*, *93*(December 2021), 101665. <https://doi.org/10.1016/j.intell.2022.101665>
- Hilger, K., Winter, N. R., Leenings, R., Sassenhagen, J., Hahn, T., Basten, U., & Fiebach, C. J. (2020). Predicting intelligence from brain gray matter volume. *Brain Structure and Function*, *225*(7), 2111–2129. <https://doi.org/10.1007/s00429-020-02113-7>
- Jung, R. E., & Haier, R. J. (2007). The Parieto-Frontal Integration Theory (P-FIT) of intelligence: Converging neuroimaging evidence. *Behavioral and Brain Sciences*, *30*(2), 135–154. <https://doi.org/10.1017/S0140525X07001185>
- Latora, V., & Marchiori, M. (2001). Efficient behavior of small-world networks. *Physical Review Letters*, *87*(19), 198701-1-198701–198704. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.87.198701>
- Lee, J. J., Wedow, R., Okbay, A., Kong, E., Maghziyan, O., Zacher, M., Nguyen-Viet, T. A., Bowers, P., Sidorenko, J., Karlsson Linnér, R., Fontana, M. A., Kundu, T., Lee, C., Li, H., Li, R., Royer, R., Timshel, P. N., Walters, R. K., Willoughby, E. A., ... Turley, P. (2018). Gene discovery and polygenic prediction from a genome-wide association study of educational attainment in 1.1 million individuals. *Nature Genetics*, *50*(8), 1112–1121. <https://doi.org/10.1038/s41588-018-0147-3>

- Locurto, C. (1990). The malleability of IQ as judged from adoption studies. *Intelligence*, *14*(3), 275–292. [https://doi.org/10.1016/S0160-2896\(10\)80001-7](https://doi.org/10.1016/S0160-2896(10)80001-7)
- Mattar, M. G., Betzel, R. F., & Bassett, D. S. (2016). The flexible brain. *Brain*, *139*(8), 2110–2112. <https://doi.org/10.1093/brain/aww151>
- Mayer, J. D., DiPaolo, M., & Salovey, P. (1990). Perceiving Affective Content in Ambiguous Visual Stimuli: A Component of Emotional Intelligence. *Journal of Personality Assessment*, *54*(3–4), 772–781. <https://doi.org/10.1080/00223891.1990.9674037>
- Mayer, J. D., Salovey, P., & Caruso, D. (2000). Models of Emotional Intelligence [Modelos de la inteligencia emocional]. *Handbook of Intelligence*, 396–420.
- Meunier, D., Lambiotte, R., & Bullmore, E. T. (2010). Modular and hierarchically modular organization of brain networks. *Frontiers in Neuroscience*, *4*(DEC), 1–11. <https://doi.org/10.3389/fnins.2010.00200>
- Navas-Sánchez, F. J., Alemán-Gómez, Y., Sánchez-Gonzalez, J., Guzmán-De-Villoria, J. A., Franco, C., Robles, O., Arango, C., & Desco, M. (2014). White matter microstructure correlates of mathematical giftedness and intelligence quotient. *Human Brain Mapping*, *35*(6), 2619–2631. <https://doi.org/10.1002/hbm.22355>
- Neubauer, A. C., & Fink, A. (2009). Intelligence and neural efficiency. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, *33*(7), 1004–1023. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2009.04.001>
- Nisbett, R. E., Aronson, J., Blair, C., Dickens, W., Flynn, J., Halpern, D. F., & Turkheimer, E. (2012). Intelligence: New Findings and Theoretical Developments. *American Psychologist*, *67*(2), 130–159. <https://doi.org/10.1037/a0026699>
- Pietschnig, J., Penke, L., Wicherts, J. M., Zeiler, M., & Voracek, M. (2015). Meta-analysis of associations between human brain volume and intelligence differences: How strong are they and what do they mean? *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, *57*, 411–432. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2015.09.017>
- Plomin, R., & Deary, I. J. (2015). Genetics and intelligence differences: Five special findings. *Molecular Psychiatry*, *20*(1), 98–108. <https://doi.org/10.1038/mp.2014.105>
- Plomin, R., & von Stumm, S. (2018). The new genetics of intelligence. *Nature Reviews Genetics*, *19*(3), 148–159. <https://doi.org/10.1038/nrg.2017.104>
- Ritchie, S. J., Booth, T., Valdés Hernández, M. del C., Corley, J., Maniega, S. M., Gow, A. J., Royle, N. A., Pattie, A., Karama, S., Starr, J. M., Bastin, M. E., Wardlaw, J. M., & Deary, I. J. (2015). Beyond a bigger brain: Multivariable structural brain imaging and intelligence. *Intelligence*, *51*, 47–56. <https://doi.org/10.1016/j.intell.2015.05.001>
- Schmeichel, B. J., Volokhov, R. N., & Demaree, H. A. (2008). Working Memory Capacity and the Self-Regulation of Emotional Expression and Experience. *Journal of Personality and Social Psychology*, *95*(6), 1526–1540. <https://doi.org/10.1037/a0013345>
- Schneidman, E., Berry, M. J., Segev, R., & Bialek, W. (2006). Weak pairwise correlations imply strongly correlated network states in a neural population. *Nature*, *440*(7087), 1007–1012. <https://doi.org/10.1038/nature04701>

- Sheppard, L. D., & Vernon, P. A. (2008). Intelligence and speed of information-processing: A review of 50 years of research. *Personality and Individual Differences, 44*(3), 535–551. <https://doi.org/10.1016/j.paid.2007.09.015>
- Spearman, C. (1904). "General Intelligence," Objectively Determined and Measured Author (s): C. Spearman Source : The American Journal of Psychology , Vol . 15 , No . 2 (Apr ., 1904), pp . 201-292 Published by : University of Illinois Press Stable URL : [http://www.jsto. The American Journal of Psychology, 15\(2\), 201–292](http://www.jsto. The American Journal of Psychology, 15(2), 201–292).
- Thurstone, L. L. (1943). *Primary-mental-abilities*. University of Chicago Press.
- Vernon, P. A., & Weese, S. E. (1993). Predicting intelligence with multiple speed of information-processing tests. *Personality and Individual Differences, 14*(3), 413–419. [https://doi.org/10.1016/0191-8869\(93\)90310-Y](https://doi.org/10.1016/0191-8869(93)90310-Y)
- Waltz, J. A., Knowlton, B. J., Holyoak, K. J., Boone, K. B., Mishkin, F. S., de Menezes Santos, M., Thomas, C. R., & Miller, B. L. (1999). A system for relational reasoning in human prefrontal cortex. *Psychological Science, 10*(2), 119–125. <https://doi.org/10.1111/1467-9280.00118>
- Whalley, L. J., & Deary, I. J. (2001). Longitudinal cohort study of childhood IQ and survival up to age 76. *British Medical Journal, 322*(7290), 819–822. <https://doi.org/10.1136/bmj.322.7290.819>