Tieteellisen edistyksen mallintaminen

Teemu Tonteri

9. helmikuuta 2001

1 Johdanto

Ei ole olemassa yleisesti hyväksyttyä tieteen määritelmää. Voidaan vain epämääräisesti puhua yhtäältä systemaattisesta ja täsmällisestä tietojen kokonaisuudesta, johon on päädytty havaintojen ja päättelyn kautta; tai toisaalta tiedosta, jonka erityinen tiedeyhteisö on tuottanut ja hyväksynyt. Ensin mainittu kuvaus liittyy tieteen tuloksiin ja tutkimusprosessissa käytettäviin metodeihin, jälkimmäinen tiedeyhteisöön. Jako metodologisiin ja sosiaalisiin kysymyksiin on tämän esitelmän lähestymistavan kannalta keskeinen. Esimerkkinä metodologisesta periaatteesta on ajattelun ekonomiaksi kutsuttu sääntö, jonka mukaan kahdesta muuten yhtä pätevästä teoriasta on valittava yksinkertaisempi. Sen sijaan sääntö, jonka mukaan kuka tahansa, riippumatta oppiarvosta, kansalaisuudesta tai sukupuolesta, saa osallistua tieteelliseen keskusteluun, liittyy nimenomaan tiede*yhteisön* toimintaan.

Tieteenfilosofiassa voidaan nähdä kaksi pääsuuntausta. Historiallisesti suuntautuneista tieteenfilosofeista ensimmäinen oli Karl Popper (1902–1994). Muita saman suuntauksen edustajia ovat olleet Thomas Kuhn (1922–1996), sekä Popperin oppilaat Imre Lakatos (1922–1974) ja Paul Feyerabend (1924–1994). Historiallisen suuntauksen edustajat ovat ensisijaisesti korostaneet sosiaalisten kysymysten merkitystä tieteen edistymisessä. Tosin, kuten jatkossakin käy ilmi, huolimatta historiallisesta lähestymistavastaan tieteenfilosofiaan, Popper painotti voimakkaasti metodologisten sääntöjen merkitystä tieteen etenemiselle.

Metodologisten periaatteiden merkityksen painottaminen on tyypillistä systemaattisen suuntauksen edustajille. Esimerkiksi Francis Bacon (1561–1626) väitti, että hänen teoksessaan *Novum Organum* (1620) esittämä induktioon perustuva menetelmä on kuin kone, joka syötteenään luonnon tosiasioita, tuottaa tieteellisiä totuuksia (Niiniluoto, 1997). On vain kysymys siitä, millaiset koneen säädöt tuottavat mahdollisimman nopeasti, mahdollisimman paljon, mahdollisimman virheetöntä tietoa (Niiniluoto, 1997, ss. 35–

36). Induktiokone ei kuitenkaan ole vailla ongelmia. Esimerkiksi David Hume (1711–1776) korosti voimakkaasti induktion ongelmallisuutta: Toisin kuin deduktiiviset päätelmät, joiden premissien totuus riittää takaamaan johtopäätöksen totuuden, induktiivisten päätelmien yksittäisistä havaintolauseista tuottamat yleiset lait ovat aina epävarmoja. Vaikka painovoima on tähän mennessä vaikuttanut kaikkiin tuntemiimme kappaleisiin, mikä oikeuttaa meidä päättelemään, että se vaikuttaa myös muihin kappaleisiin?

2 Falsifikationismi ja sen kritiikki

Yksi yritys välttää induktion ongelma on hypoteettis–deduktiivinen menetelmä, jossa hypoteesista johdetaan ennusteita, joita testaamalla voidaan arvioida hypoteesin pätevyyttä. Tämä ajatus on perustana Popperin *falsifikationismille*, jonka mukaan havainnot voivat vain kumota teorian, eivät todistaa sitä oikeaksi. Popper esitti falsifikationismin ensisijaisesti vastauksena niin sanottuun *demarkaatio-ongelmaan*: Miten erotetaan toisistaan tieteelliset ja näennäistieteelliset teoriat? Falsifikationismin mukaan ollakseen tieteellinen, teorian tulee kieltää jotkin loogisesti mahdolliset tapahtumat. Ilman tätä ehtoa mikään tapahtuma ei voi kumota teoriaa. Popperin mukaan näin on laita muun muassa freudilaisen psykoanalyysin ja marxismin kohdalla. Popperin mukaan tieteellinen teoria, joka selviää toistuvista kumoamisyrityksiltä, vahvistuu. Hän kuitenkin eksplisiittisesti kieltää vahvistumisen asteen olevan läheisessä suhteessa todennäköisyyden kanssa.[1] Popperin falsifikationismin mukaista tieteen edistysaskelelta kuvaa seuraava esimerkki.

Esimerkki 1 (Lavoisier ja happi) *Ennen vuosia 1773–1777 palaminen selitettiin ilmiöksi, jossa ainetta nimeltä* flogiston *vapautuu palavasta aineesta. Tämä selitys kuitenkin hylättiin, kun kokeellisesti todettiin palavan aineen massan kasvavan. Havaintojen perusteella flogistonteoria hylättiin ja otettiin käyttöön uusi teoria, jonka mukaan palaminen on hapen yhtymistä palavaan aineeseen (Hempel, 1966, s. 29). Kunnian hapen löytämisestä saa yleensä Antoine-Laurent Lavoisier (1743–1794) (Kuhn, 1994, ss. 64–72).*

Popperin mallia vastaan voidaan kuitenkin esittää vastalauseita. Ensinnäkin, lähes kaikkien tieteellisten teorioiden seuraukset ovat ennustettavissa

[1] Itse asiassa vahvistumisen aste ja todennäköisyys ovat Popperin mukaan likimain käänteisessä suhteessa: Mitä epätodennäköisempi teoria, sitä enemmän se vahvistuu selvitessään testistä (Popper, 1975, ss. 269–273). Esimerkiksi tautologia "joutsenet ovat mustia tai eivät ole mustia" ei voi koskaan saavuttaa yhtään vahvistumista, koska mikään havainto ei voi kumota sitä.

vain likimääräisesti. Koetilanteeseen vaikuttavien häiriötekijöiden ja rajallisen mittaustarkkuuden seurauksena teoriaa ei yleensä voida hylätä täysin varmoin perustein. Tämän ongelman ratkaisemiseksi on kehitetty tilastollisia apuvälineitä, kuten Sir Ronald Arthur Fisherin (1890–1962) sekä Jerzy Neumanin (1894–1981) ja Egon Pearsonin (1895–1980) esittämät menetelmät, joissa niin sanottu nollahypoteesi voidaan hylätä annetulla merkitsevyystasolla. Toinen falsifikationismin ongelma sen kyvyttömyys ratkaista kilpailevien hypoteesien paremmuus tilanteessa, jossa havaintoaineisto ei riitä kumoamaan kumpaakaan. Vaikka periaatteessa täsmällisempi hypoteesi saa kumoamisyrityksistä selvitessään enemmän vahvistusta kuin epätasmällinen hypoteesi, ei hypoteesien paremmuutta voi ratkaista vertaamalla vahvistumisen asteita, koska vahvistumiselle ei ole olemassa mitään numeerista arvoa.

Imre Lakatos kritisoi falsifikationismia siitä, että teorian kumoaminen kuvataan liian yksinkertaiseksi tapahtumaksi. Se ei esimerkiksi ota huomioon, että käytännössä mitään tieteellistä teoriaa ei voi testata ilman, että oletetaan päteväksi joukko apuhypoteeseja. Esimerkiksi Lavoisierin ja hapen tapauksessa palamistuotteen alkuperäistä suurempi massa kumoaa flogistonteorian vain, jos oletetaan flogistonin massan olevan nollaa suurempi. Tällaisessa tilanteessa voidaan teoria pelastaa uhraamalla jokin apuhypoteeseista. Lakatoksen mukaan kumoaminen onkin prosessi, jonka aikana tiedeyhteisö joutuu punnitsemaan mikä kilpailevista teorioista osoittautuu pitkällä aikavälillä hedelmällisimmäksi.

Falsifikationismin kritiikkiä on esittänyt myös Thomas Kuhn, joka on tunnettu tieteellisen paradigman käsitteestä (Kuhn, 1994). Paradigmaa voidaan kuvailla jonkin tieteellisen yhteisön yhteisesti hyväksymänä ajattelu- ja toimintatapana. Se sisältää asioita kuten käsitteiden määritelmät ja teoriat sekä niin sanotut koulukirjaesimerkit eli ne ongelmat, joiden ratkaiseminen nähdään paradigman puitteissa mielekkäänä. Esimerkkejä eri paradigmoista ovat Isaac Newtonin (1642–1727) ja Albert Einsteinin (1879–1955) teoriat painovoimasta. Kuhn kutsui paradigman vaihdoksia tieteellisiksi vallankumouksiksi. Kumoukset eivät noudata mitään yleistä metodologista säännöstöä; pikemminkin argumentit, jolla kunkin paradigman edustajat perustelevat oman paradigmansa paremmuutta sisältyvät itse paradigmaan. Mitään säännöstöä ei voikaan olla olemassa, mikäli Kuhnin teesi *yhteismitattomuudesta* pätee. Väitteen mukaan eri paradigmojen teoriat ovat yhteismitattomia sikäli, että ne puhuvat eri asioista; yhden paradigman lauseita ei voi kääntää toisen paradigman lauseiksi.

Yhteenvetona voidaan sanoa, että keskeisessä asemassa falsifikationismin kritiikissä on ollut ajatus siitä, että kaikissa teorioiden tai paradigmojen välisissä kiistoissa ei voida soveltaa falsifikationismin kaltaisia yhteisesti hyväksyttyjä metodologisia sääntöjä. Näissä tilanteissa määräävät ratkaisun pääosin ei-tieteelliset perusteet, joista osa liittyy tiedeyhteisön sosiaaliseen toimintaan. Paul Feyerabendin esittämän metodologisen anarkismin mukaan ei ole olemassa *mitään* tieteentekijöitä sitovia metodologisia sääntöjä (Niiniluoto, 1997). Näinollen Feyerabendin anarkismi muodostaa toisen ääripään asteikossa, jonka vastakkaiseen päähän voidaan sijoittaa Baconin induktiokone. Näiden äärimmäisyyksien väliin sijoittuvat Popper, Lakatos ja Kuhn.

3 Bayesiläinen päättely

Kaikki tieteenfilosofiset järjestelmät eivät Popperin tapaan hylkää induktiota tieteellisen edistyksen perustana. Markiisi Pierre-Simon Laplace (1749–1827) esitti tunnetuksi tulleen esimerkin todennäköisyyslaskentaan perustuvasta induktiosta.

Esimerkki 2 (Laplace ja uurnakoe) *Oletetaan, että uurnassa on N lippua, joista tuntematon määrä, n, on valkoisia, loput mustia. Oletetaan lisäksi, että on jokainen muuttujan n arvo välillä 0–N on yhtä todennäköinen. Uurnasta nostetaan lippuja, joista jokainen osoittautuu valkoiseksi. Laplace todisti, että kun on nostettu r valkoista lippua, todennäköisyys, että myös seuraava lippu on valkoinen, on* $\frac{r+1}{r+2}$.

Laplacen todistus näyttäisi ratkaisevan induktion ongelman uurnakokeen tapaisissa tilanteissa. Siihen sisältyy kuitenkin yksi ongelmallinen oletus: ei ole selvää, että ennen lippujen nostamista jokainen valkoisten lippujen määrä on yhtä todennäköinen. Yhtä hyvin voitaisiin sanoa jokaisen uurnassa olevan lipun olevan yhtä suurella todennäköisyydellä valkoinen kuin musta, jolloin suurilla N:n arvoilla olisi etukäteen lähes varmaa, että uurnassa olevista lipuista noin puolet on valkoisia. Kumpikin tapa määrittää valkoisten lippujen määrän todennäköisyys ennen koetta, ja itse asiassa mikä tahansa muukin todennäköisyysjakauma muuttujan n arvoille, on loogisesti mahdollinen. Tilanteessa täytyy siis tehdä päätös, jota ei voi perustella millään yleisellä periaatteella.

Laplacen lähestymistapaa on myöhemmin yleistetty ja se on tullut tunnetuksi niin sanottuna bayesiläisenä päättelynä. Sen mukaan todennäköisyys voidaan tulkita uskomuksen asteeksi, jota päivitetään todennäköisyyslaskennan mukaisesti aina, kun saadaan uusia havaintoja. Seuraava Bertrand Russelin (1872–1970) esittämän esimerkin muokattu versio kuvaa bayesiläistä päättelyä (Russell, 1948).

Esimerkki 3 (Bayesläinen päättely ja Neptunus) *Vuoden 1840 tienoilla Uranuksen radassa havaittiin poikkeamia Newtonin painovoimateorian* *mukaisesti ennustetusta radasta. Poikkeamien selitykseksi ehdotettiin toisen, aikaisemmin tuntemattoman planeetan painovoimaa. Newtonin teorian avulla voitiin ennustaa tämän tuntemattoman planeetan sijainti tietyllä rajallisella tarkkuudella. Myöhemmin hyvin läheltä ennustettua paikkaa löytyikin planeetta, joka myöhemmin nimettiin Neptunukseksi.*

Oletetaan, että ottaen huomioon 1800-luvun havaintovälineiden mukainen virhemarginaali, todennäköisyys, jolla tietyllä etäisyydellä d aurinkoa havaitaan ennalta tuntematon planeetta, on $p_d = 1100$. *Oletetaan lisäksi, että todennäköisyys, että kyseinen planeetta on havaittaessa radallaan kohdalla* α *yhden asteen virhemarginaalilla, on* $p_\alpha = \frac{1}{180}$.

Merkitään kirjaimella E evidenssiä, eli sitä, että Neptunus oli ennustetulla paikallaan, ja kirjaimella T Newtonin painovoimateoriaa soveltuvilta osiltaan.[2] *Evidenssin todennäköisyys ilman Newtonin teoriaa on*[3] $P(E \mid \neg T) = p_d p_\alpha = \frac{1}{18000}$. *Koska Newtonin teoriasta seuraa, että Neptunuksen kaltaisen planeetan on oltava ennustetulla paikallaan, on todennäköisyys* $P(E \mid N) = 1$. *Koska Newtonin teorian todennäköisyys annettuna evidenssi on* $P(N \mid E) = \frac{P(E \mid N)P(N)}{P(E \mid N)P(N)+P(E \mid \neg N)P(\neg N)}$. *Vaikka Newtonin teorian todennäköisyys ennen Neptunuksen löytämistä olisi ollut yksi sadasta* ($P(N) = \frac{1}{100}$), *saataisiin sen todennäköisyydeksi annettuna evidenssi* $P(N \mid E) = \frac{1 \cdot \frac{1}{100}}{1 \cdot \frac{1}{100} + \frac{1}{18000} \cdot \frac{99}{100}} \approx 0.99$. *Toisin sanoen evidenssin kasvatti Newtonin teorian todennäköisyyden yhdestä prosentista 99 prosenttiin.*

Ennen havaintojen tekemistä päteviä todennäköisyyksiä kutsutaan bayesiläisen päättelyn yhteydessä prioritodennäköisyyksiksi. Niiden, samoin kuin ehdollisten todennäköisyyksien, määrittämiseen ei ole olemassa yleistä periaatetta, mistä bayesiläistä päättelyä on usein kritisoitu.

4 Tieteellisen edistyksen mallien vertailua

Tieteellisen edistyksen ymmärtämiseksi sitä on yritetty mallintaa ja automatisoida eri tavoin. Yksi näistä tavoista, niin sanottu automatisoitu päättely, perustuu tietämyksen esittämiseen loogisina lauseina, joista johdetaan muita lauseita logiikan päättelysääntöjä soveltaen. Tämä lähestymistapa ei voi olla hedelmällinen luonnontieteessä, jossa yleisiä lakeja ei voi johtaa yksittäisistä havaintolauseista. Lisäksi luonnontieteellisessä aineistossa taustatietämys

[2]Vaikka Einsteinin jälkeen voidaankin perustellusti sanoa, että Newtonin painovoimateoria ei päde, soveltuu se kyseisessä tapauksessa riittävällä tarkkuudella planeettojen ratojen ennustamiseen.

[3]Merkintä $P(E \mid \neg T)$ tarkoittaa lauseen E ehdollista todennäköisyyttä, kun $\neg T$ oletetaan tunnetuksi.

tai havaintoaineisto on usein ristiriitaista. Puhdas logiikka ei pysty käsittelemään ristiriitatilanteita millään tavalla. Automatisoitua päättelyä on kuitenkin menestyksekkäästi sovellettu matematiikassa, jossa teoreemat seuraavat deduktiivisesti aksioomista.

Toisena tapana mallintaa tieteellistä edistystä voidaan nähdä bayesiläiseen päättelyyn perustuvat älykkäät järjestelmät. Koska bayesiläisessä päättelyssä epävarmuuden käsittely on luontevaa, se soveltuu hyvin luonnontieteellisiin ongelmiin. Lisäksi se on melko suoraviivaisesti automatisoitavissa, koska metodologisten sääntöjen ulkopuolelle jäävä alue, prioritodennäköisyyksien määritys, on tarkasti rajattu. Kuten edellä on mainittu, tieteenhistorian tutkimuksen perusteella on usein päädytty siihen, ettei tieteellinen edistys käytännössä perustu ainakaan täysin yleisesti hyväksytyn metodologian soveltamiseen. Jotkut tutkijat ovat pyrkineet mallintamaan tiedeyhteisön sosiaalista toimintaa. Esimerkkinä tästä lähestymistavasta on Simon Parsonsin jan Peter McBurneyn esittämä Risk Agora -malli. Seuraavassa käsitellään esimerkkitapauksen valossa kahta jälkimmäisenä mainittua menetelmää; ensin Risk Agoraa, sitten bayesiläistä päättelyä.

4.1 Risk Agora

Risk Agora poikkeaa kahdesta muusta edellä mainitusta tavasta (automatisoitu päättely ja bayesiläinen päättely) mallintaa tieteellistä edistystä. Sen perustana on Feyerabendin näkemys tiedeyhteisön toiminnasta, tarkemmin sanoen yleisesti hyväksyttyjen metodologisten sääntöjen olemassaolon kieltäminen. Risk Agora on nimensä mukaisesti[4] ympäristö, jossa joukko agentteja voi keskustella ja väitellä. Esimerkkitapauksessa agenttien väittelyn aiheena on tietyn kemikaalin karsinogeenisyys, toisin sanoen kysymys siitä, altistaako kyseinen aine syövälle. Risk Agora koostuu kolmesta tasosta. Alin, looginen taso perustuu samaan periaatteeseen kuin automatisoitu päättely; agentit soveltavat päättelysääntöjä ja johtavat uusia lauseita evidenssinä toimivasta tietämyskannasta. Feyerabendille uskollisena agentit saavat itse valita päättelysääntönsä ja kiistää toistensa väitteet vedoten väitteen taustalla olevien päättelysääntöjen pätemättömyyteen.

Risk Agoran toisella, niin sanotulla dialektisella tasolla eri agenttien eriäviä näkökantoja verrataan keskenään. Joidenkin väitteiden suhteellinen voima voi osoittautua suuremmaksi kuin toisten. Tekijät eivät kuitenkaan tarkenna, miten väitteen suhteellinen voima määritetään, vaan vetoavat jälleen Feyerabendiin, jonka mukaan tässäkään tilanteessa ei ole olemassa mitään yleistä periaatetta. Dialektisen tason yläpuolelle voidaan liittää kolmas, re-

[4]Sana *agora* on kreikkaa, ja se merkitsee toria tai kokoontumispaikkaa.

torinen taso, jossa argumentit puetaan sanalliseen muotoon, jotta niiden uskottavuutta yleisön silmissä voitaisiin kasvattaa.[5] Seuraavassa on yksinkertaistettu versio McBurneyn ja Parsonsin esittämästä esimerkistä (McBurney & Parsons, 2000a,b).

Esimerkki 4 (Risk Agora ja karsinogeenisyys) *Tarkoituksena on väitellä kemikaalin X karsinogeenisyydestä ihmiselle. Merkitään väitettä kirjaimella **V**. Olkoon evidenssinä seuraavat lauseet:*

E1: *Ihmisen elimistössä muodostuu luontaisesti kemikaalia X.*

E2: *Rotan elimistössä muodostuu luontaisesti kemikaalia X.*

E3: *Kemikaali, jota muodostuu luontaisesti jonkin eläinlajin (tai ihmisen) elimistössä, ei ole karsinogeeninen kyseiselle lajille (ihmiselle).*

E4: *Kliinisissä kokeissa on todettu kemikaalin X aiheuttavan huomattavia karsinogeenisiä vaikutuksia rotille.*

Lisäksi esitellään seuraavat päättelysäännöt, joihin agentit voivat sitoutua tai olla sitoutumatta:

S1: *Annettuna lause a ja lause b, voidaan päätellä lause* $(a \wedge b)$.

S2: *Annettuna lause a ja lause* $(a \rightarrow b)$, *voidaan päätellä lause b.*

S3: *Jos kemikaali on karsinogeeninen jollekin eläinlajille, voidaan päätellä sen olevan karsinogeeninen ihmiselle.*

*Agenttien **A1**, **A2**, **A3** ja **A4** välinen keskustelu voi edetä seuraavasti (jokaisen askeleen kohdalla on merkittynä väitteen esittävä agentti ja itse väite):*

1. ***A1:*** *väitä(**V**)*
2. ***A2:*** *kysy(**A1:** väitä(**V**))*
3. ***A1:*** *perustele(**E4*** $\overset{\mathbf{S3}}{\rightarrow}$ ***V**)*
4. ***A2:*** *kiistä(**A1:** väitä(**V**))*
5. ***A3:*** *kysy(**A2:** kiistä(**A1**: väitä(**V**))*
6. ***A2:*** *ehdota(¬ **V**)*

[5] Retoriikan hyödystä tieteen kaltaisessa objektiivisuuteen ja eksplisiittisyyteen pyrkivässä toiminnassa on ollut kriittisiä näkemyksiä jo jonkin aikaa (Platon, 428–347 e.a.a.).

7. ***A1:*** *kysy(**A2:** ehdota(¬ **V**))*

8. ***A2:*** *perustele((**E1**, **E3**)* $\xrightarrow{\mathbf{S2}}$ *¬ **V**)*

9. ***A4:*** *kiistä(**A2:** perustele((**E1**, **E3**)* $\xrightarrow{\mathbf{S2}}$ *¬ **V**))*

10. ***A4:*** *perustele((**E2**, **E4**)* $\xrightarrow{\mathbf{S1}}$ *¬ **E3**)*

*Väittelyn kulku on suurin piirtein seuraava: Agentti **A1** väittää, että **V** pätee. Vastauksena agentin **A2** kysymykseen, agentti **A1** perustelee väitteensä seuraavan lauseesta **E4** päättelysäännöllä **S3**. Agentti **A2** kuitenkin kiistää perustelun ja väittää, että **V** ei päde. Askeleessa 8 agentti **A2** perustelee kantansa lauseilla **E1** ja **E3** päättelysäännöllä **S2**. Agentti **A4** kiistää perustelun, koska evidenssilause **E3** voidaan kiistää lauseiden **E2** ja **E4** sekä säännön S1 nojalla.*[6] *Lopputuloksena väitteen **V** todenperäisyys jää epäselväksi.*

Esimerkistä on tässä esityksessä jätetty pois viittaukset uskomuksen asteisiin, jotka agentit liittävät lauseisiin ja päättelysääntöjen soveltuvuuteen. Alkuperäisessä esityksessä agentit liittävät lauseisiin uskomuksen asteen, joka on jokin seuraavista: varma, vahvistettu, todennäköinen, uskottava, kannatettu, avoin.[7] Agenttien kanta päättelysääntöön on jompi kumpi kahdesta vaihtoehdosta: pätevä, ei-pätevä. Tekijät eivät kuitenkaan esitä mitään sääntöjä uskomusten asteiden käsittelyyn, joten niiden hyöty jää kyseenalaiseksi.

4.2 Bayesiläinen päättely

Bayesiläisen päättelyn piirissä kysymys siitä, onko kemikaali X karsinogeeninen, voidaan ymmärtää kysymykseksi siitä, mikä on todennäköisyys, jolla kyseinen kemikaali on karsinogeeninen. Seuraavassa edellisen esimerkin tulkinta bayesiläisen päättelyn kontekstissa.

Esimerkki 5 (Bayesiläinen päättely ja karsinogeenisyys)
Ongelmakentän kannalta olennaisina atomilauseina voidaan pitää seuraavia:

L1: *Kemikaalia X muodostuu luontaisesti rotan elimistössä.*

L2: *Kemikaali X on karsinogeeninen rotalle.*

[6] Viimeinen askel näyttää muodollisesti epäilyttävältä: sääntö **S1** tuottaa vain premissiensä konjunktion, mikä ei ole sama kuin lauseen **E3** kielto. Tosin lauseiden **E2**, **E3** ja **E4** ristiriitaisuus voidaan perustella semanttisesti.

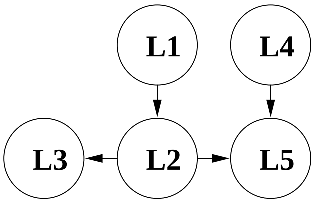
[7] Englanninkieliset vastineet ovat: *certain, confirmed, probable, plausible, supported, open.*

L3: *Kemikaali X aiheuttaa kliinisissä kokeissa voimakkaita karsinogeenisiä vaikutuksia rotille.*

L4: *Kemikaalia X muodostuu luontaisesti ihmisen elimistössä.*

L5: *Kemikaali X on karsinogeeninen ihmiselle.*

*Jokainen näistä lauseista voi olla tai olla olematta tosi. Oletetaan yksinkertaisuuden vuoksi, että evidenssin perusteella tiedetään lauseiden **L1**, **L3** ja **L4** olevan tosia. Palataan myöhemmin siihen, että itse asiassa myös niiden suhteen evidenssi on epävarmaa. Olettamalla taustatietämyksen perusteella järkevät riippumattomuudet voidaan muuttujien väliset riippuvuudet esittää kuvan 1 mukaisella, niin sanotulla Bayes-verkolla.*[8] *Edellisen esimerkin lause*



Kuva 1: Lauseiden **L1**–**L5** välisiä riippuvuuksia kuvaavan Bayes-verkon rakenne.

E3 *on luontevinta tulkita päättelysäännöksi. Päättelysäännöt ovat bayesiläisessä kontekstissa ehdollisia todennäköisyyksiä. Jokaiselle todennäköisyydelle on määrättävä lukuarvo. Valitaan päättelysääntöjä vastaavat todennäköisyydet seuravasti.*

1: $P(\mathbf{L2} \mid \mathbf{L1}) = 0.001$

2: $P(\mathbf{L3} \mid \mathbf{L2}) = 0.99$

3: $P(\mathbf{L3} \mid \neg\mathbf{L2}) = 0.001$

4: $P(\mathbf{L5} \mid \mathbf{L2} \wedge \mathbf{L4}) = 0.01$

5: $P(\mathbf{L5} \mid \neg\mathbf{L2} \wedge \mathbf{L4}) = 0.001$

Näillä todennäköisyyksillä saadaan mielenkiinnon kohteena olevaksi todennäköisyydeksi $P(\mathbf{L5} \mid \mathbf{L1} \wedge \mathbf{L3} \wedge \mathbf{L4})$ *noin 25 prosenttia.*

[8] Bayes-verkoista, katso esimerkiksi (Pearl, 1988).

Lauseiden **L2** ja **L3** välinen suhde on esimerkki tavasta, jolla voidaan käsitellä epävarmaa evidenssiä. Evidenssin perusteella lausetta **L2** ei voida pitää varmasti totena, mutta koska todennäköisyys $P(\mathbf{L3} \mid \mathbf{L2}) = 0.99$ on varsin suuri, ja todennäköisyys $P(\mathbf{L3} \mid \neg\mathbf{L2}) = 0.001$ on varsin pieni, saadaan lauseen **L2** todennäköisyydeksi 75 prosenttia. Samankaltainen käsittely voitaisiin suorittaa myös lauseiden **L1**, **L3** ja **L4** kohdalla.

Esimerkin perusteella voidaan yhtyä siihen kritiikkiin, jonka mukaan bayesiläisen päättelyn avulla voidaan perustella mitä tahansa kantaa valitsemalla prioritodennäköisyydet ja ehdolliset todennäköisyydet sopivalla tavalla.[9] Hyvänä puolena on pidettävä sitä, että priorien merkitys on suhteellisen selvä, jolloin niitä koskevat erimielisyydet ovat tarkasti määriteltyjä.

5 Johtopäätökset

Epävarmuus on mukana lähes kaikkialla tieteessä, niin havainnoissa kuin päätelmissäkin. Epävarmuus ilmenee muun muassa induktion ongelmana, jonka ratkaisuyrityksinä voidaan nähdä Popperin falsifikationismi ja Lakatoksen, Kuhnin ja Feyerabendin, osin hyvinkin paljon toisistaan poikkeavat teoriat, joilla kaikilla on kuitenkin melko vahva yhteys popperilaiseen perinteeseen. Falsifikationismin vaikutus modernin luonnontieteen metodologiaan näkyy äärimmäisen voimakkaana Neyman–Pearson -tilastotieteen muodossa. Toisaalta kokonaan tästä perinteestä poikkeavana ratkaisuna induktion ongelmaan voidaan nähdä bayesiläinen päättely, jonka keskeisin periaate on nimenomaan epävarmuuden käsittely todennäköisyyslaskennan keinoin.

Myös käsitelty esimerkkitapaus toi omalta osaltaan esiin epävarmuuden ongelman. Parsonsin ja McBurneyn Risk Agora -malli on ehkä kelvollinen formalismi tieteellisen keskustelun kuvaamiseen, mutta jotta sen avulla voitaisiin selittää tieteellistä *edistystä*, formalismin lisäksi tarvittaisiin sääntöjä, joiden mukaisesti yksittäiset agentit toimivat ja joiden mukaisesti eri agenttien näkemysten väliset ristiriidat ratkaistaan. Feyerabend saattaa olla oikeassa siinä, ettei todellinen tiedeyhteisö noudata yhteisesti hyväksyttyjä sääntöjä. Tämä huomio on kuitenkin vain kuvaileva, eikä sitä voida pitää tieteellisen toiminnan normien perustana sen paremmin kuin perustana älykkäiden järjestelmien rakentamiselle.

Bayesiläinen päättely näyttäisi soveltuvan juuri niiden ongelmien käsittelyyn, jotka Risk Agora jättää avoimeksi. Nämä ongelmat liittyvät ennen kaikkea eri lähteistä saatavan epävarman tiedon yhdistämiseen. Bayesiläi-

[9] Niin sanottu epäinformatiivinen priori lienee ristiriitainen käsite. Esimerkiksi Laplacen uurnakokeen yhteydessä tuli ilmi, että tasaisen jakauman käyttö ei auta, koska on päätettävä minkä suhteen jakauma on tasainen.

sen päättelyn lähtökohtina toimivien prioritodennäköisyyksien ja ehdollisten todennäköisyyksien valitseminen on kuitenkin tehtävä, johon ei ole olemassa objektiivisia perusteita. Objektiivisuus mainitaan usein tieteentekemisen edellytykseksi. On tosin kyseenalaista, voidaanko objektiivisuutta saavuttaa muidenkaan lähestymistapojen kuin bayesiläisen päättelyn avulla.

Viitteet

Hempel, C.G. 1966. *Philosophy of Natural Science.* Eaglewood Cliffs (NJ), USA: Prentice-Hall.

Kuhn, T.S. 1994. *Tieteellisten vallankumousten rakenne.* Juva: Art House. (englanninkielisestä alkuperäisteoksesta *The Structure of Scientific Revolutions*, 2. painos, suomentanut Kimmo Pietiläinen).

McBurney, P., & Parsons, S. 2000a. Modeling Scientific Discourse. *In:* Pearce, D. (ed), *Workshop on Scientific Reasoning in AI and Philosophy of Science, Fourteenth European Conference on Artificial Intelligence (ECAI-2000).*

McBurney, P., & Parsons, S. 2000b. Risk Agoras: Dialectical Argumentation for Scientific Reasoning. *Pages 317–379 of:* Boutilier, G., & Goldszmidt, M. (eds), *Proceedings of the Sixteenth Annual Conference on Uncertainty in Artificial Intelligence (UAI-2000).* San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers.

Niiniluoto, I. 1997. *Johdatus tieteenfilosofiaan: käsitteen- ja teorianmuodostus.* Keuruu: Otava. (ilmestyi ensimmäisen kerran 1980).

Pearl, J. 1988. *Probabilistic Reasoning in Intelligent Systems: Networks of Plausible Inference.* Second edn. Morgan Kaufmann Publishers.

Platon. 428–347 e.a.a.. *Gorgias.*

Popper, K.R. 1975. *The Logic of Scientific Discovery.* Eighth edn. (saksankielinen alkuperäisteos *Logik der Forschung* ilmestyi ensimmäisen kerran 1934).

Russell, B. 1948. *Human Knowledge: Its Scope and Limits.* Lontoo: George Allen and Unwin.