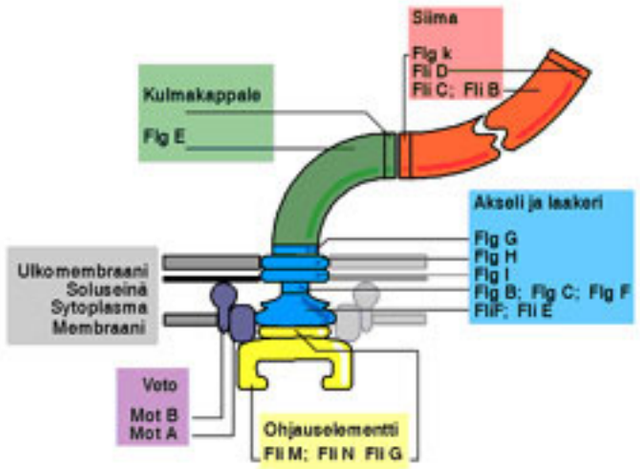


Kuva 7.37 Kaavakuva bakteerimoottorin pääkomponenteista. Siiman, kulmakappaleen, akselin ja laakerin, vetokompleksin sekä ohjauselementin osien nimet on esitetty vastaavien geenien lyhennetyillä nimillä. Gram-negatiivisilla bakteereilla moottori sijaitsee ulkomembraanin, soluseinän ja sytoplasmamembraanin välissä. (Falke et al. 1995, muokattu)

misestä proteiinista. Tämä proteiini taas koostuu yli 400 aminohaposta. Aminohappo- ja vastaava geenisekvenssi tunnetaan. Siima liittyy kulmakappaleen avulla rotaatioakselin , jonka laakeri pitää paikallaan solukalvossa ja bakteerin seinässä. Geenit, jotka koodaavat akselin ja laakerin proteiineja tunnetaan myös. Rotaatioakseli ja sen kautta siima alkaa pyöriä vetoproteiinin avulla. Ei ole vielä varmaa miten se tarkalleen tapahtuu, vaikka vastaavan proteiinin geenisekvenssi tunnetaankin.

Taulukko 7.2 *E. colin* rotaatiomoottorin mitat ja biofysikaaliset ominaisuudet.

Bakteerimoottorin mittoja	
Solun pituus	**n. 2 mm**
	500 solua » 1 mm
Siiman pituus	**n. 10 mm**
Siiman läpimitta	**n. 15 nm**
Moottoriakselin pituus	**n. 30 nm**
	35 000 moottoria » 1 mm
Varustus	**jopa 15 moottoria /solu tavallisesti: 8 moottoria**
Bakteerimoottorin teknisiä tietoja	
Jännite	**25 - 200 mV; lineaarinen välillä 25 - 125 mV**
Energiankulutus	**n. 1200 protonia/kierros 0,1% solun energiankäytöstä**
Korkein kierrosluku	**100 rpm**
Vääntömomentti	**n. 3 x 10 $^{-16}$ newtonia**
Teho	**n. 10 $^{-14}$ W kun 20 rpm**
Huippunopeus	**n. 25 mm/sekunti Vastaa auton nopeutta 180 km/h**
Tuotantokustannukset	**2% solun biosynteesikapasiteetista**

Varmaa on vain se, että moottoria pyörittää energia, jonka synnyttää solukalvon yli vaikuttava protonigradientti. Tämä protonigradientti synnyttää ulkopuolelle sytoplasmaan nähden positiivisen varauksen. Jännite-ero (= membraanipotentiaali) on noin 0,2 V. Kuvaannollisesti sanottuna bakteeri on 0,2 V paristo, joka pyörittää super-nano-sähkömoottoria. Moottorin tärkeät mitat ja tekniset tiedot on annettu taulukossa 7.2.

7.4.5 Bakteerin rotaatiomoottorin minimivaatimukset

Biologit ovat yksimielisiä siitä, että evoluution aikaisemmassa vaiheessa bakteereilla ei ollut moottoria. Miten oletetun evoluutioprosessin kuluessa syntyi moottori? Ei ole epäilystä myöskään siitä, että moderni bakteerin rotaatiomoottori ei ole voinut syntyä yhdellä makroevoluutiohyppäyksellä. Sama pätee myös paljon yksinkertaisempaan rakenteeseen, kuten esimerkiksi yhteen proteiiniin.

Miltä ensimmäinen, hyvin primitiivinen bakteerimoottori on voinut näyttää ja mistä sitä edeltäneistä osista se on voinut syntyä? Ongelman käsittelemiseksi yksinkertaistamme tilannetta radikaalisti ja teemme tätä varten osittain hyvin epärealistisia oletuksia makroevoluutiohypoteesin hyväksi:

1. Ensimmäinen moottori tarvitsee jokaisen viidestä mainitusta peruselementistä: siima, kulmakappale, rotaatioakseli, laakeri ja moottoriproteiini (kuva 7.38). Jos yksikin näistä perusosista puuttuu, ei syntyvä rakenne enää kykene toimimaan moottorina, kuten voi helposti havaita, vaan kuluttaa ainoastaan tarpeettomasti aineenvaihduntaenergiaa. Sellainen bakteeri ei selviä valintaprosessissa, vaan kuolee sukupuuttoon. Se ei siis olisi enää käytettävissä tulevaan evoluutioprosessiin. Molekulaarista perustaa ei ole olemassa oletukselle, että nämä viisi osaa kykenisivät edes epätäydellisesti hoitamaan tehtävän, johon nykyisin tarvitaan yli 40 proteiinia.

2. Toimiva moottori on haitallinen, jos sitä ei kyetä ohjaamaan. Alusta lähtien on sik-

si täytynyt olla olemassa ohjaussysteemi, joka on vähintään koostunut yhdestä sensoriproteiinista ja yhdestä signaalinvälitysproteiinista, vaikka ei olekaan olemassa mitään molekyylibiologista perustetta olettaa, että nämä kaksi proteiinia voisivat hoitaa tehtävän, johon nykyisin tarvitaan noin 8 proteiinia.

3. Tarvittavien proteiinien on täytynyt syntyä toisista hyvin samankaltaisista proteiineista, joilla oli aikaisemmin jokin toinen funktio. Emme tiedä mitä geenejä tähän on ollut käytettävissä.

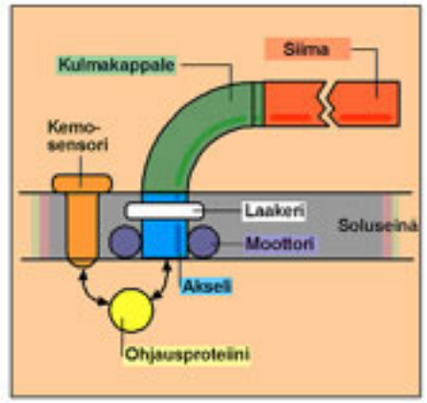
4. Oletamme lisäksi, että nämä edeltäjäproteiinit, huolimatta siitä, että niillä olikin toinen funktio aikaisemmin, tarvitsivat vain 3 mutaatiota muuttuakseen moottorin proteiineiksi (esimerkiksi rotaatioakseli). Tämä oli tapahtunut tuntemattoman esiadaptaation kautta. Tällainen on jälleen hyvin epätodennäköistä, koska proteiini, jossa on tapahtunut vain kolme muutosta pysyy lähes aina samana. Vilkaisu moderneihin tietopankkeihin osoittaa, että proteiinit, jotka poikkeavat toisistaan jopa 50%, toimivat lähes identtisesti.

5. Uusiin rakenteisiin tarvittava muutos tapahtuu esiadaptoituneiden geenien kopioissa. Kuten Osche on osuvasti todennut, ei elävä olento voi oletetun evoluutioprosessin vuoksi "väliaikaisesti lopettaa toimintaansa".

Nyt olemme määritelleet perustilan. Lähtökohtatilanne on bakteeri ilman moottoria. Siinä on kuitenkin 7 tuntematonta geeniä, jotka tuntemattomasta syystä ovat esisopeutuneet ja jotka voidaan muuttaa kolmella tuntemattomalla muutoksella kyseiseksi moottoriproteiiniksi. Pienimmillä mahdollisilla muutoksilla saavutettava seuraava perustila koskee 7 muutettua proteiinia, joista yhdessä muodostuu ensimmäinen, vielä hyvin primitiivinen mutta kuitenkin toimintakykyinen moottori.

7.4.6 Primitiivisen bakteerimoottorin synnyn todennäköisyys

Mutaatiotapahtuma on bakteerien tapauksessa hyvin helppo mitata. Bakteerien pis-



Kuva 7.38 Hypoteettisen primitiivisen bakteerin rotaatiomoottorin välttämättömät komponentit. Jokainen komponentti on välttämätön, jotta ensimmäinen valintakelpoinen rakenne voi syntyä. Tarkemmin tekstissä.

Osa	edeltäjägeenin duplikaatio	rakennegeenin mutaatioiden määrä
Siima	1	3
Kulmakappale	1	3
Akseli	1	3
Laakeri	1	3
Moottori	1	3
Ohjaus	1	3
Sensori	1	3
Duplikaatioiden määrä	7	
Mutaatioiden määrä		21

Taulukko 7.3 Ensimmäisen yksinkertaisen bakteerimoottorin syntyyn tarvittavat hypoteettiset mutaatiotapahtumat (vrt kuva 7.38).

temutaatiotiheys on nukleotidia kohti noin 10^{-8}. Kun seuraavassa puhumme mutaatioista, emme rajoitu pistemutaatioihin. Kaikki muutkin mahdolliset mutaatiolajit otetaan huomioon (IV.7.1). Teemme jälleen yksinkertaistuksen ja oletamme, että kaikki mutaatiot tapahtuvat yhtä suurella todennäköisyydellä kuin pistemutaatiot. Oletamme kuitenkin evoluutiohypoteesin hyväksi, että mutaatiotiheys oli kymmenen kertaa suurempi maapallon varhaisaikoina kuin nykyisin eli 10^{-8}. Jos geeni koostuu 1000 emäsparista, niin minkä tahansa mutaation todennäköisyys tässä geenissä on

$$P_{(1)} \approx 1000 \times 10^{-8} = 10^{-5}.$$

Tämä tarkoittaa sitä, että todennäköisyydellä 0,63 (IV.7.4.2) 100 000 bakteerisolun joukosta löytyy ainakin yksi mutantti, jossa juuri tässä geenissä on jossakin kohdassa yksi mutaatio.