



Livets djupaste rötter

De stora frågorna om livets ursprung; hur, när och var allt började, kommer antagligen aldrig att kunna besvaras med säkerhet. Men forskare beskriver allt fler pusselbitar som fogas till varandra och hjälper oss att förstå vad som hände tidigt i livets utveckling.

Fortplantningsförmågan är förutsättningen för att liv ska kunna fortleva på jorden och för att arvsanlag ska kunna föras vidare i generation efter generation. Det var också något som det första livet måste uppfinna. Dagens organismer använder DNA för att lagra, kopiera och föra vidare arvsanlag till avkomman, samt för att styra de kemiska reaktionerna i cellen. Diskussionen pågår om de första organismerna saknade DNA och istället använde sig av RNA. En fungerande organism måste också kunna innesluta en värld av kemiska ämnen och strukturer inom ett hölje där kontrollerade kemiska reaktioner kan ske. Detta kräver någon form av avgränsat rum, en primitiv cell. Dagens celler omges av ett cellmembran av fosfolipider och vissa organismgrupper har även en cellvägg.

Vilka är de minsta och enklaste organismerna som finns idag? Biologer drar gränsen för levande organismer mellan virus och bakterier. Virus behöver en cell för ämnesomsättning och fortplantning och hör därför inte till de levande organismerna.

En form av jättevirus, Tupanvirus, har uppkallats efter den sydamerikanska åskguden Tupan eftersom representanter för gruppen lever i extrema miljöer som sodasjöar och på flera tusen meters djup i havet. De är lika stora som små bakterier och deras genom kan bestå av 1,5 miljoner baspar och upp till cirka 1 400 proteinkodande gener. Men jättevirusen saknar ribosomer och gener för att frigöra energi via cellandning och kan inte leva självständigt. Jämförelsevis har bakterien *Escherichia coli* betydligt fler baspar, cirka fem miljoner, och cirka 5 000 gener.

Forskare berättar

Genom att studera bakterier och arkéer som lever idag vill forskarna förstå mer av hur det tidiga livet utvecklades. Man

Lokes Slott, ett hydrotermalt djuphavsområde i nordatlanten på flera tusen meters djup. Det var här i närheten som Lokiarkéerna (se nästa uppslag) upptäcktes.

Foto: R.B. Pedersen, Senter for geobiologi, Universitetet i Bergen, Norge

samlar in prover från miljöer som har likheter med de förhållanden som fanns under jordens tidiga historia. Det kan exempelvis gälla miljöer som heta källor på land och i havsdjupen, sedimenten i de djupa delarna av havsbotten och ständigt frusna miljöer. Flertalet bakterier och arkéer kan inte odlas på labb, men numera finns andra metoder för att ta reda på vilka mikroorganismer som finns i en miljö. Det räcker med att forskare tar ett prov på exempelvis jord, vatten eller slam från den miljö man är intresserad av och sedan sekvenserar det totala DNA-innehållet i provet. DNA-sekvenserna används för att söka efter liknande sekvenser i de stora databaserna och dra slutsatser om släktskap.

Den här delen handlar om hur de tre huvudgrenarna i livets träd: bakterier, arkéer och eukaryoter har utvecklats. I den första artikeln vidgas perspektivet till astrobiologi och frågan ställs om livet på jorden är unikt.

Den andra artikeln handlar om eukaryoternas utveckling och övergången från encellighet till flercellighet.

Undervisa om livets tidiga utveckling

Evolutionära aspekter är centrala för förståelsen av de flesta områden inom biologin och bildar också grunden för skolans biologiundervisning. I styrdokumentet för biologi finns formuleringar som på olika sätt anknyter till evolutionen av de levande organismerna. Den här delen belyser centrala frågor i biologiundervisningen kring livets tidiga utveckling och berör bland annat:

- miljöfaktors betydelse för livet uppkomst och utveckling
- teorier om livets uppkomst och tidiga utveckling mot flercellighet
- uppkomsten av och egenskaper hos mikroorganismer (bakterier, arkéer och enkla eukaryoter)
- släkträd och indelning av organismvärlden i huvudgrupper
- experimentellt arbete med systematiska undersökningar, bland annat mikroskopstudier, sterilteknik och odling av encelliga organismer

Livet på jorden lär oss om livet på andra planeter

Den tidiga jorden var en väldigt annorlunda plats mot planeten vi bebor. Genom att studera hur levande varelser på jorden uppstod och utvecklades kan vi lära oss mer om villkoren för liv inte bara på vår planet utan överallt i universum.



Texten är skriven av:

Erik Pelve

Universitetsadjunkt vid Institutionen för anatomi, fysiologi och biokemi vid Sveriges lantbruksuniversitet, SLU

Som doktorand vid Uppsala universitet studerade han cellbiologi hos arkéer av släktet *Sulfolobus* från heta källor. Sedan dess har han bland annat varit verksam i USA och utforskade mikrobiell "mörk materia" i djuphavet. Han har också studerat arkéer och bakterier från sediment. På SLU förbereder han studier av relationen mellan djur och deras mikrobiom av associerade mikroorganismer.

Astrobiologi är läran om livet utanför jorden. På sätt och vis ett lugnt forskningsområde eftersom vi fortfarande inte har hittat något. Men i brist på direkt tillgång till studieobjektet söker forskare efter modeller som kan efterlikna det, och vi har ett lysande exempel på en exceptionellt märklig planet precis där vi befinner oss.

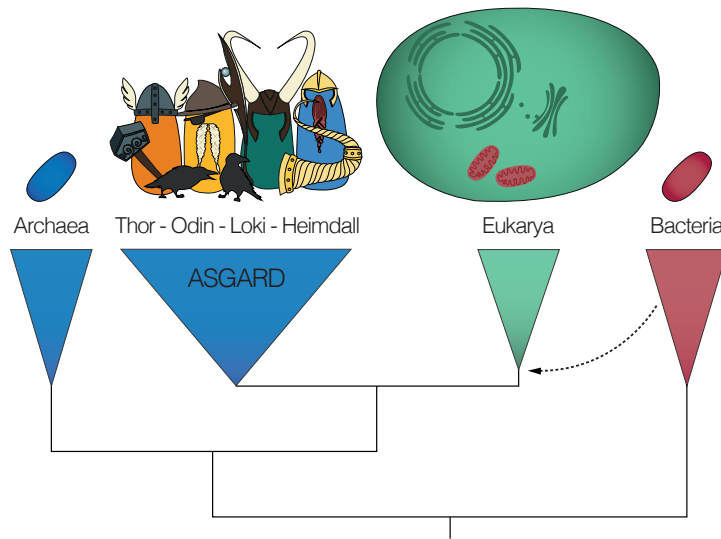
Låt oss i ett tankeexperiment starta om utvecklingen på jorden, från att den bildades och under dess 4,6 miljarder år av geologisk och biologisk utveckling. Låt oss köra simuleringar av vår planets utveckling gång på gång och se vad som händer. Hur ofta uppstår liv överhuvudtaget, och hur ofta bildas de mer komplexa, eukaryota cellerna som vi själva består av? Vi vill också veta i vilken grad de evolutionära stegen går att förutsäga. I vilken mån kan ett steg förklaras enbart av en ny evolutionär uppfinning, och i vilken mån banas vägen för dem av utomstående faktorer? Framförallt ska vi titta på den faktor som gör jorden till en på många sätt unik planet – syret.

Livets uppkomst

Hur länge har det funnits liv på jorden? Låt oss börja med en enklare fråga. Hur länge kan det ha funnits liv på jorden? En rimlig gräns för hur länge det kan ha funnits liv är omkring 3,9 miljarder år. Det är nämligen tidpunkten för *Det Sena Tunga Bombardemanget* (*Late Heavy Bombardment*), vilket

förutom att vara ett bra namn på ett rockband även var ett enormt meteorregn som anses ha gjort jorden obebodlig. 3,9 miljarder år är också den ungefärliga åldern på de äldsta bevarade bergarterna i världen. I dessa stenar har man hittat möjliga spår efter biologiska processer, till exempel *banded iron formations* som indikerar förekomsten av biologiskt producerad syrgas som kunde oxidera järn. Bland stenar i åldersspannet 3,4–3,9 miljarder år finns det också kandidater till mikrofossil, rester av blåsor och blobbar som kan tolkas som urtida celler. Det finns dock många problem med att försöka läsa de tidigaste spåren av liv i stenar som påverkats av geologiska processer under fyra miljarder år. Det är även långtifrån klart vad som är spår efter liv och vad som är spår efter abiotiska kemiska processer. I stenar yngre än 3,4 miljarder år börjar dock spåren efter liv bli så tydliga att det finns en hög grad av vetenskaplig samsyn att de faktiskt representerar biologiskt liv.

Vi kan alltså konstatera att förhållandet snart – som mest en halv miljard år – efter att livet *kunde* finnas, och att vi har möjlighet att *upptäcka* livet – så fanns det faktiskt levande varelser på jorden. Det ger oss skäl att tro att i våra tänkta simuleringar borde liv uppstå tidigt i planetens historia – och kanske också att det kan uppstå lika snabbt på andra planeter där förhållandena är gynnsamma.



Figur 1. Figuren visar domänerna Bacteria, Eukarya och Archaea med gruppen Asgårdarkéer; som tros vara de närmast levande släktingarna till dagens eukaryoter. Asagudarna Loke, Tor, Oden och Heimdall har fått ge namn åt grupper inom Asgårdarkéerna. Att man valt namn som refererar till asagudarna beror på att man funnit dessa arkéer i närheten av det hydrotermala djuphavsområdet Lokes Slott (se bild på sidan 44) i nordatlanten, mellan Svalbard och Island. Man har dock senare hittat dem i syrefria sediment i många andra miljöer. Illustration Eva Fernandez-Caceres

Hur snart efter det första livet bildades arkéer och bakterier – och vilka kom först? Det har vi väldigt svårt att veta. Namnet ”arké” syftar på den geologiska tidsåldern arkeikum som innefattar tiden för livets ursprung för omkring 4–2,5 miljarder år sedan. Namnet fick de eftersom de mest välstuderade arkéerna lever i miljöer som stämmer överens med de förhållanden man tror rådde vid livets ursprung – syrefritt, höga temperaturer, stora mängder frigjorda oorganiska näringsämnen – men det är också en vanlig miljö för bakterier, och det finns både bakterier och arkéer som är anpassade till ett liv utan syre. Till skillnad från djur, där det kan finnas välbevarade skelett, är det ofta svårt att koppla fossil av mikroorganismer till en speciell grupp, så det mesta vi kan säga om forntida mikroorganismers egenskaper måste extrapoleras från de organismer som lever nu. Därför är det svårt att säga om de tidigaste fossilen tillhörde bakterier, arkéer eller numera utdöda grupper.

Det senaste decenniet har inneburit en revolution för vår förmåga att studera mikroorganismer. De allra flesta bakterier och arkéer kan inte odlas i laboratorium, och fram tills nyligen visste vi väldigt lite om dem. Utvecklingen av DNA-sekvenseringsteknik har nu inneburit att vi kan studera organismerna direkt där de lever, utan att behöva gå steget via labbet. Tyvärr bevaras inte DNA lika länge som fossil, men genom

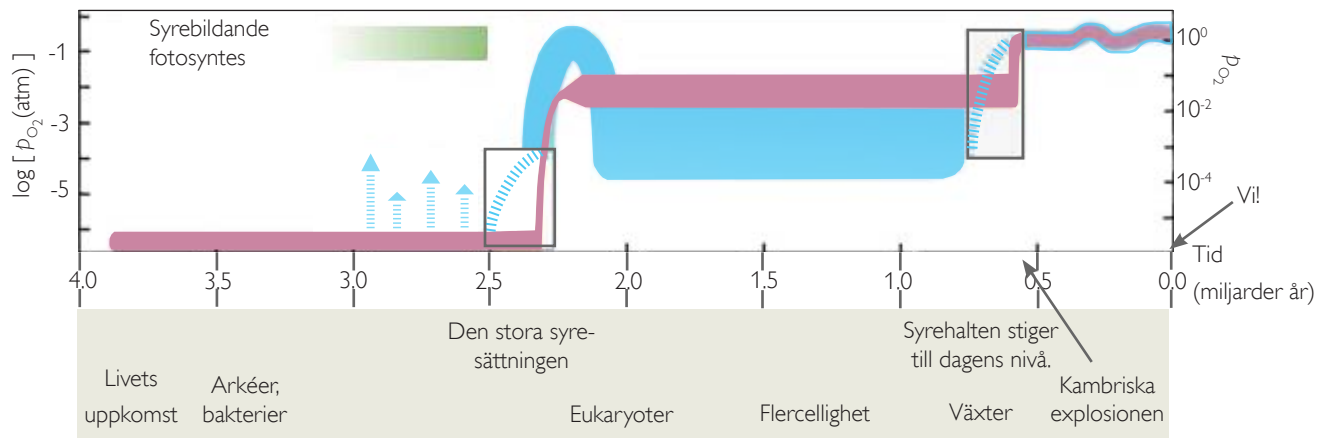
att använda tekniken för att studera nu levande arter vidgar vi vår förståelse för olika gruppers livsbetingelser och släktskap. Thijs Ettema, forskare vid Uppsala universitet, använder **metagenomiska tekniker** för att studera en grupp arkéer som lever i havsbotten, Asgårdarkéerna. De är de närmaste kända släktingarna till huvudpersonerna i nästa viktiga akt i livets drama, eukaryoterna.

Eukaryoternas uppkomst

I mer än en miljard år hade levande varelser, bakterier och arkéer, levt sina liv, tagit in metaboliter, utsöndrat avfallsprodukter och förökade sig i en ändlös kedja av celledelningar, när något nytt uppstod. Celler som hör till grupperna arkéer och bakterier ser likartade ut i mikroskop, och påminner också om de tidigaste mikrofosil vi känner till, men eukaryoter är annorlunda, med större celler och distinkta interna strukturer. Det gör att vi kan datera eukaryoternas uppkomst med större säkerhet än de två andra domänerna. De dyker upp i fossillagren för i storleksordningen två miljarder år sedan (med upp till en halv miljard års osäkerhet, för det är fortfarande hisnande evolutionära avstånd vi försöker förstå). Varför tog det så lång tid innan eukaryoterna, som vi känner dem idag, bildades?

Evolutionshistorien gestaltas ofta som ett träd där stammar, grenar och kvistar förgrenar sig i ständigt nya avknoppningar. Eukaryoterna däremot är en fusion. En arké

Metagenomiska tekniker – Prover tas från olika miljöer, som havsbotten, sjöar eller fast mark. Provernas totala innehåll av DNA, som härstammar från en mängd olika organismer; sekvenseras. De funna sekvenserna jämförs med sekvenser i en databas och därmed kan man identifiera vilka olika organismer som finns i en viss miljö. Det innebär att man inte behöver odla upp organismerna på labb, det räcker med att man analyserar DNA.



Figur 2. Den översiktliga tidslinjen visar jordens historia. Syrehalten i jordens atmosfär ökar markant i två steg. Det första, för mellan cirka 2,3 och 2,4 miljarder år sedan, brukar kallas *Great Oxidation Event* (Den stora syresättningen). Ytterligare en ökning av syrehalten till nuvarande nivå skedde för cirka 600 miljoner år sedan. Den modell för ökning av syrehalten som man hittills har antagit visas av den rosa kurvan. Den blå kurvan visar en modell som är under utveckling.

p_{O_2} anger partialtrycket för syrgas i atmosfären. Högra axeln anger syrgasens partialtryck i förhållande till nuvarande syrenivå i atmosfären. Vänstra axeln visar $\log p_{O_2}$. Blå pilar visar att det eventuellt har funnits syrgas i atmosfären innan den stora ökningen. De två rutorna markerar tidsperioder där det råder osäkerhet beträffande atmosfärens syrehalt.

Den nedre delen av figuren ger en ungefärlig uppfattning om livets utveckling i förhållande till tidsskalan.

Källa för övre delen av figuren: Lyons et al. 2014. Publiceras med tillstånd från Nature. Se Bildreferenser, sidan 79.

ASTROBIOLOGI I SVERIGE

Bland de som försöker förstå det tidiga livet och dess förutsättningar finns Thijs Ettemas forskargrupp vid Uppsala universitet som studerar den "mörka biologiska materien" – alla de mikroorganismer som vi tills nyligen inte hade metoder att studera – och de utvecklingslinjer som kom att bilda eukaryoterna. Bland de som försöker förstå förutsättningarna för liv utanför jorden finns Carina Perssons forskargrupp vid Chalmers tekniska högskola som undersöker exoplaneter, och Wolf Gepperts forskargrupp på Stockholms universitets astrobiologocentrum, som studerar hur biomolekyler formas.

tog upp en bakterie av gruppen alfaproteobakterier, anmoder till dagens mitokondrier. Många frågetecken återstår om hur det gick till – inte minst hur många andra "eukaryot-liknande" egenskaper arkén som tog upp den blivande mitokondriem redan hade. Var eukaryoternas uppkomst en så sällsynt evolutionär kombination av precis rätt betingelser att det tog mer än en miljard år från arkéernas och bakteriernas uppkomst tills två av dem lyckades fusera och bilda något nytt? Alternativt, var de första stegen av deras symbios i sig inte något ovanligt, men det var först för två miljarder år sedan som syrenivån var tillräckligt hög för att möjliggöra de nya eukaryoternas livstil med syreslukande mitokondrier som försörjer de mer energi-krävande, större cellerna?

Om tidpunkten för eukaryoternas uppkomst förutsatte ökande syrenivåer kan vi formulera en modell för vad som krävs av en planet för att utveckla komplexa celler. Syrgas är en reaktiv molekyl som inte fanns i jordens atmosfär då den bildades. Den finns inte heller i motsvaran-

de halter, jämfört med jordens nuvarande atmosfär, i atmosfären till någon annan planet vi känner till. Anledningen till att jordens atmosfär har så hög syrehalt är att levande organismer – först cyanobakterier, senare alger och växter – producerar syrgas som en biprodukt av fotosyntesen.

När de första syrgasproducerande organismerna uppstod konsumerades syrgasen direkt eftersom den reagerade med järn och andra reaktiva ämnen i jordskorpan. Det var inte förrän dessa reaktioner mättats som syrgasnivån i atmosfären kunde öka. Det var alltså planetens geologiska förutsättningar i samspel med de evolutionära uppfinningarna som satte tidtabellen för eukaryoternas uppkomst. Även nästa språng – då encelliga eukaryoter utvecklades till flercelliga växter, djur och svampar – kan kopplas till stigande syrenivåer. I våra upprepade simuleringar av jordens utveckling kan vi förvänta oss att komplexa eukaryoter som är beroende av mitokondrien för sin energi inte uppkommer förrän fotosyntetiska arkéer och bakterier har banat vägen. Hur länge det dröjer

innan eukaryoter bildas beror på när fotosyntesen först uppkommer. För andra planeter kan det gå fortare eller långsammare, beroende på geologiska faktorer vi har svårt att förutse. Däremot är hög syrenivå en möjlig indikator – inte bara för förekomsten av liv – utan också för komplexa celler.

Att använda atmosfären som prediktiv signal för liv är grundtesen i James Lovelocks Gaia-teori, där han postulerar att livet på en planet kommer att skapa och upprätthålla en balans av gaser i atmosfären som skiljer sig markant från den kemiska jämvikten. Skillnaden går att upptäcka på astronomiska avstånd och vi kan därför upptäcka liv i andra solsystem med våra teleskop.

Liv på andra planeter?

Antalet upptäckta **exoplaneter** ökar hela tiden, och det är bara en tidsfråga innan vi hittar en planet som har exakt rätt förutsättningar för liv – inte för varmt, inte för kallt, inte för mycket meteoriter, tillräckligt med vatten och rätt ämnessammansättning i jord-

skorpan. Vi skulle då kunna förvänta oss att hitta spår av liv. Troligen kommer vi att upptäcka en atmosfär i obalans, och om syrehalten är hög nog kan vi till och med förvänta oss komplext liv, analogt till våra eukaryoter och multicellulära organismer. Kanske kommer vi till och med att upptäcka radiosignaler, den heliga gralen för de som söker efter intelligent liv bortom jorden.

Vi har redan identifierat tusentals exoplaneter, och siffran stiger snabbt. Det är långt ifrån otroligt att det första livet kommer att hittas på en planet vi redan känner till med ett anspråkslöst namn som Gliese 581d eller HD75289b, som bara väntar på en grundlig analys av radiospektra och atmosfärens sammansättning. När det hänt kommer en av vetenskapshistoriens största upptäckter samtidigt att vara en av dess största källor till frustration – för när den första triumfen har klingat av, när vi har dechiffrerat radiosignaler och analyserat spektra, så kommer det att ta fruktansvärt lång tid att ta reda på exakt hur det upptäckta livet gestaltar sig.

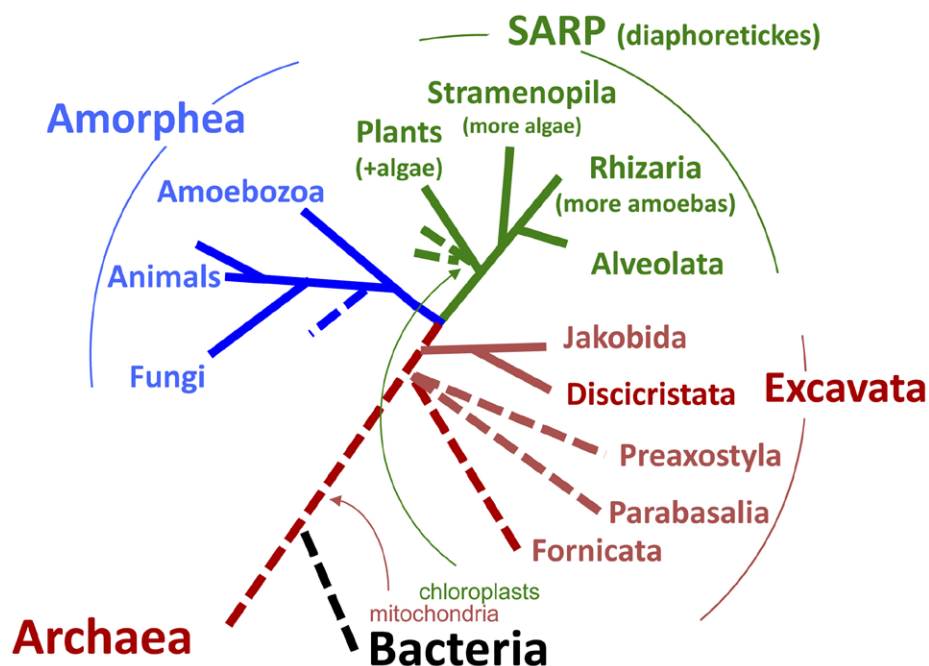
Exoplanet – planet som inte är en del av vårt solsystem

DISKUTERA

- Om man fick chansen att köra om evolutionshistorien på jorden, hur likt eller olik skulle resultatet bli?
- Finns det liv på andra planeter? Varför? Varför inte?
- Hur skulle man kunna hitta en annan planet med liv på? Vad ska man leta efter?
- Behöver intelligent liv på andra planeter syre?
- Kan vi förvänta oss gemensamma drag mellan oss själva och liv som utvecklats på andra planeter?

LIVETSTRÄD

Figur 3. De tre domänerna Bacteria (bakterier), Archaea (arkéer) och Eukarya (eukaryoter). Eukaryoterna är i sin tur indelade i tre huvudgrupper: Amorphea, SARP och Excavata.



- I gruppen SARP finns bland annat växterna.
- Excavata består av encelliga eukaryoter som tidigare ingick i gruppen protozoer; många av dessa är parasiter.
- Till gruppen Amorphea hör bland annat djur och svampar.

Nästa artikel, på sidorna 50–52, handlar om utvecklingen av eukaryoter från encelliga till flercelliga organismer. Två arter av amöbor studeras som kan växla mellan ett encelligt och ett flercelligt stadium. Den ena av modellorganismerna, *Dictyostelium*, ingår i Amorphea (Amoebozoa), och den andra, *Acrasis*, hör till Excavata.

Illustration: Sandra Baldauf

Eukaryoterna gör entré

– flercellighet på flera sätt

Mikrober har mycket att lära oss om hur en cell fungerar och om den otroliga variationen av grundläggande funktioner. Organismer som växlar mellan att leva självständigt och i ett flercelligt socialt stadium lär oss om hur flercelligt liv kan ha uppstått.



Texten är skriven av:

Sandra Baldauf

Professor i systematisk biologi vid Institutionen för organismbiologi vid Uppsala universitet
Författaren tackar Jennifer Ast, för hjälp med översättningen.

Allt liv på jorden har samma ursprung, vilket innebär att alla organismer är släkt med varandra och har en plats i livets släktträd. Sandra Baldaufs forskargrupp försöker ta reda på hur dessa släktskap ser ut. De odlar ovanliga organismer, som aldrig studerats tidigare, och utför datoranalyser av stora komplexa dataset med DNA-information, i syfte att upptäcka var i livets träd organismerna passar in.

De flesta levande organismer, under större delen av livets historia, utgörs av mikroorganismer (mikrober). Liv uppkom redan en miljard år efter jordens tillkomst. Det började som enstaka celler (mikrober) och under de första tre miljarderna av livets historia (som är ungefär fyra miljarder år totalt) fanns endast mikrober. Bland de största mysterierna är hur dessa celler först uppstod och hur de sedan så snabbt blev så komplexa att de knappast går att skilja från nutida celler. Antagligen skedde ett stort antal mindre utvecklingssteg, okända för oss idag, men resultatet blev en stor mångfald av mikrober som dominerar livet på jorden både när det gäller antal celler (biomassa) och olika celltyper (biodiversitet). Mikrober är inte bara alla prokaryoter (bakterier och arkéer) utan även många eukaryoter – de flesta alger, merparten organismer som äter dessa alger och en enorm mångfald av parasiter som äter allt möjligt inklusive varandra.

Mikrober formar vår värld. I marken, på alla ytor ovanför marken och i alla akvatiska miljöer, har mikrober många viktiga funktioner – de bildar luften vi andas, vattnet vi dricker och maten vi äter. Det mesta livet (biomassan och mångfalden), under större delen av livets utveckling (tre fjärdedelar av den tid som det funnits liv på jorden) har bestått av och utgörs fortfarande av mikrober.

Eukaryoterna uppkommer

Ungefär halvvägs i livets utveckling på

jorden, för ungefär två miljarder år sedan, utvecklades eukaryoter från prokaryoter. Dessa nya mikrober var mycket större (cirka 50 gånger) och mer komplexa än någon prokaryot. Detta krävde ett omfattande inre stödsystem (cytoskelettet), vilket ger cellerna deras varierande form och organiserar cellinnehållet (cytoplasman).

Eukaryoter kan också röra sig betydligt snabbare än prokaryoter. Antingen driver en eller två stora kraftfulla flageller en propellerliknande rörelse eller också kryper de med vätskefyllda fotliknande utskott (pseudopodier). Detta gjorde det möjligt för eukaryoter att leva som de första äkta rovdjuret, det är också så de flesta fortfarande lever (med undantag av parasiter och alger) det vill säga de äter bakterier och/eller varandra.

Förmodligen började eukaryoterna relativt tidigt utnyttja bakterier som "energislavar". Dessa bakterier lever inuti eukaryota celler, alltså en cell inuti en annan cell. En av dessa bakterier utvecklades snart till mitokondrie och en annan (något senare) till kloroplast. Dessa endosymbiotiska organeller frigör energi från organiska näringsämnen respektive solljus, vilket ger en enskild eukaryot cell 10–1 000 gånger mer energi än någon prokaryot.

Snart efter det att mitokondrien uppfunnits började den här kraftfulla nya cellen, en eukaryot, differentieras till ett stort antal arter. Det berodde på att cellerna anpassade sig till olika mikrohabitat, vardera med en egen unik miljö och blandning av

prokaryota vänner, fiender och byten. Bland dessa anpassningar uppstod helt nya cellmorfologier som inte har någon motsvarighet i den prokaryota världen. De innefattar ett avancerat och elegant yttre cellskikt, i form av till exempel fjäll, plattor eller piggar, tillverkade av kisel, kalk (CaCO₃), organiskt material eller blandat nedbrutet material. Syftet med denna "rustning" är förmodligen att skydda cellen från predatorer, parasiter och kanske framför allt virus, vilka förekommer överallt i stor mängd.

Att studera den mikrobiella mångfalden även med det enklaste mikroskop är fascinerande. Några få deciliter vatten från en damm, som får sedimentera under 20–30 minuter, kan innehålla hundratal små simmande och krypande varelser. Mångfalden av eukaryota mikroorganismer är spektakulär.

Emellertid, det är viktigt att nämna att mycket är okänt när det gäller omfattningen av denna mångfald. Det är endast under de senaste 5–10 åren, med hjälp av allt mer sofistikerad nanoteknologi, som vi har börjat studera mikrober i stor skala, från varje tänkbar miljö, såväl som på detaljerad nivå. Vi har endast börjat förstå omfattningen av den mikrobiella mångfalden av eukaryoter (och prokaryoter) och de viktiga funktioner de har.

Vissa blir flercelliga

Även om de flesta eukaryoter är encelliga går det inte att bortse från att en av de mest fascinerade egenskaper eukaryoterna utvecklat är flercellighet. Det förekommer huvudsakligen hos växter, djur, svampar och "heterokonta" alger (de flesta arter av stora alger, tång).

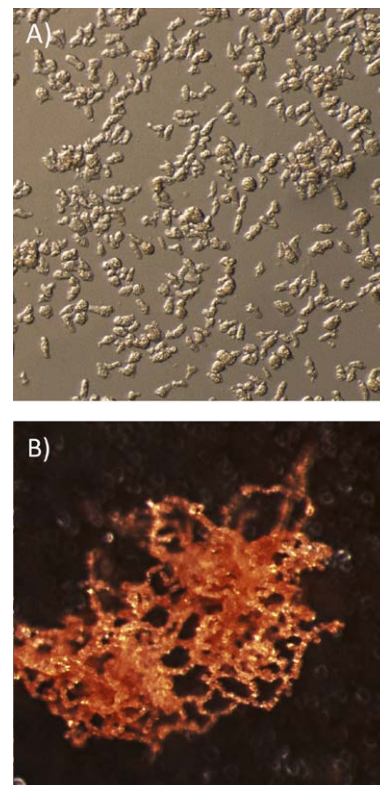
Dessa grupper är mycket olika varandra, och varje grupp uppfann flercellighet på egen hand och på olika sätt. Men det finns några viktiga likheter. Utvecklingen börjar alltid med en enskild cell (ägg, zygot eller spor). Denna cell delar sig många gånger och hos grupper av dotterceller kan olika gener aktiveras eller stängas av i genomet. Instruktionerna från de aktiverade generna medför att olika celltyper, vävnader och organ bildas. Som resultat bildas hud, skelett,

och tänder (djur); blommor, rötter och blad (växter); nätverk av mycel och fruktkroppar (svampar). Denna typ av tillväxtbaserad flercellighet kallas ofta klonal eftersom alla celler i organismen härstammar från en ursprunglig cell. Alla celler är genetiskt identiska och utgör en klon.

Eukaryoter (och åtminstone en prokaryot) har även utvecklat en helt annorlunda form av flercellighet. Denna kallas aggregerad flercellighet (aggregative multicellularity, AGM) och har fascinerat biologer i över 200 år. I AGM växlar organismen mellan ett encelligt stadium och ett mångcelligt stadium.

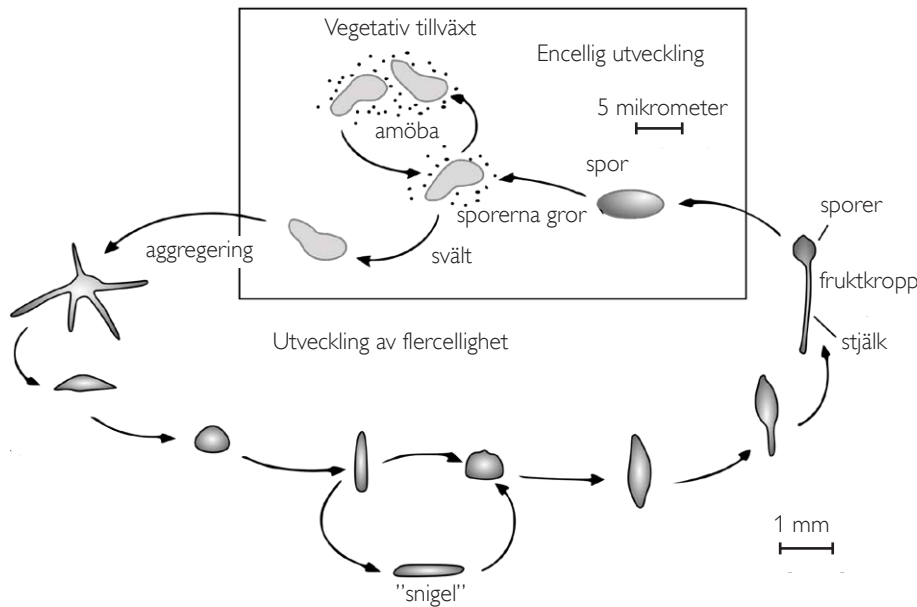
De mest välkända AGM-organismerna är jordlevande amöbor. Det encelliga stadiet, då de försörjer sig själva, är i huvudsak jämförbart med andra icke-AGM-amöbor. Det innebär att de tillbringar mesta tiden med att söka efter föda i eller på marken. Amöborna kryper runt växternas rötter och svamparnas mycel, mellan jordpartiklar och kring nedbrutet material, på jakt efter föda. De letar mest efter bakterier eller andra mikrober som vanligen (men inte alltid) är mindre än de själva och vilka amöborna tar fast med sina pseudopodier och slukar hela. Alltså, cellerna äter, tillväxer och delar sig för att bilda nya amöbor, som sedan i sin tur fortsätter att äta och dela sig. Denna cykel kan i princip fortsätta i all evighet, så länge det finns mat och bra levnadsförhållanden.

Så småningom kommer förhållandena med all sannolikhet att försämrats eftersom miljön i marken inte är konstant. I jämförelse med havet som alltid är vått och salt kan marken torka ut eller mättas med regnvatten, frysa till is eller hettas upp av solen. Födan är också ojämnt fördelad. På en plats kan det vara massor av bakterier (kanske för att du tappat en bit ost från din smörgås), men när allt är uppätet kan det vara långt till ytterligare en bit mat – alltför långt att kravla för en liten amöba. När merparten av bakterierna i närmiljön är uppätta blir livet tufft. Mikroorganismer i marken har utvecklat flera strategier för att överleva ogynnsamma förhållanden, vanligast är att vänta på bättre tider genom att omvandlas till sporer eller cystor (betyder i stort sett sam-



Figur 4–5. *Acetabularia kona* lever ibland som små självständiga amöbor (A), men plötsligt kan de förvandlas och börja samarbeta. De organiserar sig då själva till små rosa trädlika strukturer (B, sett ovanifrån). Sandra Baldaufs forskargrupp undersöker vad det beror på att amöborna förändras från den självständiga formen till den sociala, samt hur amöborna signalerar till varandra och bestämmer vem som ska bilda vilken av formerna.

Foto: Chengjie Fu



Figur 6. Livscykeln hos *Dictyostelium discoideum* växlar mellan ett encelligt och ett flercelligt stadium.

ma sak). Cellen bygger en yttre tjock vägg, upphör nästan helt med metabolismen och väntar på att förhållandena ska förbättras. När det blir bättre tider gror sporen och amöban fortsätter leva som tidigare.

AGM-organismer

Att invänta bättre förhållanden är den enklaste strategin, men AGM-organismer har ett annat alternativ. När förhållandena för tillväxt försämrats, övergår dessa amöbor till ett flercelligt socialt stadium. Några av amöborna börjar utsöndra en kemisk signal som visar att de är villiga att aggregera. Andra amöbor i närheten fångar upp signalen och rör sig mot den, samtidigt som de själva börjar utsöndra samma signal. Detta gör att signalen förstärks och sprids i jorden och följderna blir att fler och fler amöbor rör sig mot den punkt varifrån signalen först spreds. Slutresultatet blir att amöborna samlas i en "cellpöl" (ett aggregat). Aggregatet kan innehålla färre än 100 celler, som hos acrasida amöbor (till exempel *Acrasis kona*) eller upp till flera hundratusentals celler hos *Dictyostelium discoideum*.

Nästa steg i AGM-utvecklingen beror på vilken art det är. I acrasida amöbor börjar de aggregerade cellerna omedelbart klättra på varandra och bilda en trädliknande fruktkropp, en sorocarp. Denna har en stam med grenar högst upp, allt uppbyggt av amö-

bor. Så snart som amöborna hittar sin plats i sorocarpen omvandlas de till sporer så att den mogna sorocarpen ser ut som ett litet träd uppbyggt av kulor om man tittar i mikroskop. I dictyostelida amöbor omvandlas aggregatet först till en masklik "snigel", som liknar en enda organism och kan förflytta sig mycket längre än en enskild amöba. Snigeln har en huvudregion som känner av den omgivande miljön och styr snigelns rörelser. Så snart den hittar en lämplig plats stannar snigeln och börjar omvandlas till en sorocarp. Något av det mest anmärkningsvärda är att cirka 20 procent av amöborna är avsedda för den sorocarpa stjälken, där de fylls med cellulosa och sedan dör. Resultatet är en väldigt kraftig stjälk vilket gör det möjligt för dictyostelider att bygga upp förhållandevis stora sorocarper, som ibland är synliga för ögat.

Det finns stora fördelar med AGM-organismernas livsstil, som exempelvis större möjligheter till spridning. Det som sticker upp ovanför markytan ger möjlighet att spridas med vinden eller med vektorer som råkar passera, exempelvis insekter, fåglar eller till och med dina kängor. AGM ger också anledning att ställa intressanta frågor. *Hur kommer det sig att självständiga celler plötsligt övergår till att samarbeta och ingå i ett kollektiv? Hur kan de fatta beslut på gruppnivå och fördela uppgifter mellan sig? Hur känner amöbor igen sina släktingar och hur nära släkt behöver de vara för att kunna samarbeta?* Det senare är speciellt viktigt hos dictyostelida amöbor där 20 procent av cellerna måste dö så att resten ska överleva. *Och kan amöbor luras och avsiktligt undvika att sluta som döda stjälkceller?*

Slemsvampar (jätteamöbor) hör till myxomyceterna och är nära släkt med *Dictyostelium*, men de aggregerar inte. De används i biologiundervisningen bland annat i USA, där man kan köpa enkla experimentsatser för skolan. Slemsvampar finns även naturligt i svenska skogar. De kan bli stora och vissa är färggranna, till exempel trollsmör.

Mångfalden av liv är en enorm resurs för lärande om vi bara tar oss tid att titta närmare. Denna mångfald av organismer är människans arv och vårt ansvar att bevara och en närmast oändlig källa till förundran.



Mångfalden av liv är en enorm resurs för lärande.

Uppgifter till Livets utveckling



ODLA OCH STUDERA SLEMSVAMP

Experimentsatser med *Dictyostelium* eller *Physarum* finns att köpa från företag i USA. Försök visar att *Physarium* kan reagera på stimuli och leta sig fram genom en labyrint. Dessa organismer är inte patogena. (Filmer som visar tillväxt av *Physarum* finns på YouTube.)

Ett exempel på slemsvamp som man kan hitta på hösten i skogen är det starkt guldfärgade trollsmöret.

STUDERA CELLTYPEN I MIKROSKOP

Genom att titta på celler i mikroskop från olika organismgrupper, som exempelvis bakterier, jästsvampar, växter och djur, kan elever få förståelse för hur cellernas egenskaper varierar. Även evolutionära frågeställningar kan diskuteras i detta sammanhang. Mätning av cellstorlek kan inkluderas i uppgiften för att visa på storleksskillnader mellan prokaryota och eukaryota celler.

KOLLA PÅ PLANKTON

Hämta ett planktonprov, helst från en näringsrik sjö eller damm. Här brukar finnas en stor variation av organismgrupper som kan bli utgångspunkt för en diskussion kring evolutionen av organismvärlden.

Skilj mellan cyanobakterier och grönalger. De förra har mycket små celler och ofta en blågrön färg medan grönalger har mycket större celler och en mer gulgrön färg. Leta speciellt efter olika arter av grönalger. Det finns ofta encelliga, kolonibildande och flercelliga arter i samma planktonprov. De flercelliga arterna kan vara trådformade (grenade eller ogrenade) eller skiktade. De olika arterna av grönalger får illustrera utvecklingen mot flercelliga växter.

EUGLENA

Ögonflagellaten *Euglena* är en intressant organism att studera praktiskt och diskutera kring i samband med evolutionsundervisning i skolan. *Euglena* är lätt att odla och har egenskaper som gör att den liknar både växter och djur, men är inte närmare släkt med dessa organismgrupper.

PLASTIDFÄRGÄMNINGEN

I laborationen beskrivs hur plastidfärgämnen från några olika fotoautotrofer separeras med papperskromatografi, isoleras och identifieras. Jämförelser görs för att se släktskap mellan olika grupper som cyanobakterier, alger och gröna växter.

PRAKTISKA FÖRSÖK MED ARKÉER

Försök med *Halobacterium*, en rosafärgad, saltälskande arkée, har utvecklades för skolan och ett omfattande laborationshäfte finns på Bioresurs hemsida. Laborationerna kan genomföras stegvis för att eleverna ska kunna dra egna slutsatser och förklara cellernas egenskaper, men de kan också göras var för sig. *Halobacterium* kan även användas för att visa hur celler påverkas av antibiotika. Detta försök kan med fördel ersätta andra försök med antibiotikaresistens. Det finns stora fördelar med att använda *Halobacterium* vid laborationer i skolan eftersom cellerna kräver hög salthalt för att växa och det är få skadliga mikroorganismer som trivs i en sådan miljö. Odlingarna är dessutom mycket hållbara och klarar sig under lång tid även i rumstemperatur.

METANPRODUKTION

I en bioreaktor finns bakterier av olika slag, samt metanproducerande arkéer. Gör ett modellförsök med en bioreaktor och samla upp metangas.

WINOGRADSKYKOLONN

Tillverka en Winogradskykolonn med ett miniatyr-ekosystem hämtat från exempelvis sjösediment. Här kan ett brett spektrum av bakterier leva under lång tid. I kolonnen ser man färgskiftningar beroende på bakteriernas preferenser beträffande syrehalt. Evolutionära frågeställningar som berör utvecklingen av fotosyntes och betydelsen av anaeroba och aeroba miljöer kan diskuteras i anslutning till försöket.

TIDSBRICKAN

En bricka fylls med föremål som representerar både levande organismer och sådant som inte är levande, exempelvis bakterier, arkéer, olika eukaryoter, järnmalm, granit, lava, vatten, syrgasmolekyl, DNA, RNA och protein. Uppgiften för eleverna är att gruppvis diskutera hur dessa objekt inordnas i jordens utveckling och evolutionen av levande organismer.

EFTER LINNÉ

Häftet *Efter Linné*, i serien Linnélektioner från Bioresurs, handlar om evolutionen av bakterier, arkéer och växter. Här finns artiklar kring dessa organismgrupper såväl som praktiska uppgifter.

Ta reda på!

Se Bioresurs hemsida för fullständiga beskrivningar och länkar: www.bioresurs.uu.se

LIVETS UTVECKLING

Introduktionsbild: Lokes Slott. Foto: R.B. Pedersen, Senter for geobiologi, Universitetet i Bergen, Norge (Relaterad artikel: Anja Spang, Jimmy H. Saw, Steffen L. Jørgensen, Katarzyna Zaremba-Niedzwiedzka, Joran Martijn, Anders E. Lind, Roel van Eijk, Christa Schleper, Lionel Guy, Thijs J. G. Ettema. Complex archaea that bridge the gap between prokaryotes and eukaryotes. *Nature* volume 521, pages 173–179 (14 May 2015), doi.org/10.1038/nature14447)

Porträttbild Erik Pelve. Foto: Lena Holm

Porträttbild Sandra Baldauf. Foto: Joan Strassmann

Figur 1. The Asgard Archaea, Uppsala university. Illustration: Eva Fernandez-Caceres (Relaterad artikel: Katarzyna Zaremba-Niedzwiedzka, Eva F. Caceres, Jimmy H. Saw, Disa Bäckström, Lina Juzokaite, Emmelien Vancaester, Kiley W. Seitz, Karthik Anantharaman, Piotr Stamawski, Kasper U. Kjeldsen, Matthew B. Stott, Takuro Nunoura, Jillian F. Banfield, Andreas Schramm, Brett J. Baker, Anja Spang, Thijs J. G. Ettema. Asgard archaea illuminate the origin of eukaryotic cellular complexity. *Nature* volume 541, pages 353–358 (19 January 2017), dx.doi.org/10.1038/nature21031)

Figur 2. Övre delen av figuren: Evolution of Earth's atmospheric oxygen content through time. Källa: Timothy W. Lyons, Christopher T. Reinhard, Noah J. Planavsky. The rise of oxygen in Earth's early ocean and atmosphere. *Nature* volume 506, pages 307–315 (20 February 2014). Reprinted by permission from Nature.

Figur 3. Livets träd. Illustration: Sandra Baldauf

Figur 4–5 *Acrcasis kona*. Foto: Chengjie Fu

Figur 6. Dicty Life Cycle H01 av Tijmen Stam, IIVQ (SVG conversion), Hideshi (original version), Wikimedia Commons, GFDL + CC-BY-SA

MÄNNISKANS EVOLUTION

Introduktionsbild: Den ovanliga grottbegravningen av den 6-årige pojken "Matojo" (ATP12-1420) från kopparåldern. Foto: Eneko Iriarte (Relaterad artikel: Torsten Günthera, Cristina Valdiosera, Helena Malmströma, Irene Ureña, Ricardo Rodriguez-Varela, Óddny Osk Sværisdóttir, Evangelia A. Daskalaki, Pontus Skoglund, Thijessen Naidoo, Emma M. Svensson, José María Bermúdez de Castro, Eudald Carbonell, Michael Dunn, Jan Storå, Eneko Iriarte, Juan Luis Arsuaga, José-Miguel Carretero, Anders Götherström, Mattias Jakobsson. Ancient genomes link early farmers from Atapuerca in Spain to modern-day Basques. *PNAS* September 22, 2015 112 (38) 11917–11922. doi.org/10.1073/pnas.1509851112)

Porträttbild Mattias Jakobsson. Foto: Mikael Wallerstedt

Figur 1. Demographic model of African history and estimated divergences. Källa: Schlebusch CM, Malmström H, Günther T, Sjödin P, Coutinho A, Edlund H, Munters AR, Vicente M, Steyn M, Soodyall H, Lombard M, Jakobsson M. Southern African ancient genomes estimate modern human divergence to 350,000 to 260,000 years ago. *Science*. 2017 Nov 3;358(6363):652–655. doi: 10.1126/science.aao6266. Texten i figuren är översatt av Bioresurs.

Figur 2. Migration scenarios into postglacial Scandinavia. Källa: Günther T, Malmström H, Svensson EM, Omrak A, Sánchez-Quinto F, Kilinç GM, Krzewinska M, Eriksson G, Fraser M, Edlund H, Munters AR, Coutinho A, Simões LG, Vicente M, Sjölander A, Jansen Sellevold B, Jørgensen R, Claes P, Shriver MD, Valdiosera C, Netea MG, Apel J, Lidén K, Skar B, Storå J, Götherström A, Jakobsson M. Population genomics of Mesolithic Scandinavia: Investigating early postglacial migration routes and high-latitude adaptation. *PLoS Biol*. 2018 Jan 9;16(1):e2003703. doi: 10.1371/journal.pbio.2003703. Figuren är modifierad av Bioresurs.

Figur 3. Portabelt ancient DNA-labb. Foto: Mattias Jakobsson

Figur 4. Utgrävning vid Ajvide, Eksta socken, Gotland. Foto: Göran Burenhult

SMITTSPRIDNING OCH -SPÅRNING

Introduktionsbild: Gräsänder. Foto: Carola Vahldiek, Adobe Stock

Figur 1. Chlamydiae Life Cycle av Huckfinne, Wikimedia Commons

Figur 2. Principer för PCR. Källa: Björn Herrmann

Figur 3. Antal fall av klamydiavarianten nvCT i fyra landsting. Källa: Björn Herrmann

Figur 4–5. Kontaktmönster för personer smittade med klamydia. Källa: Björn Herrmann

Figur 6. Diagram över sexuella kontakter i relation till avstånd. Källa: Björn Herrmann

Figur 7. Subtyper av influensavirus. Illustration: Michelle Wille

Figur 8. Gräsand med sändare. Foto: Erik Kleyheeg

MÄNNISKANS MIKROBIOM

Introduktionsbild: Yoghurt och blåbär. Foto: Kaycco, Adobe Stock

Porträttbild Lars Engstrand. Foto: John Sennett

Figur 1. Mag-tarmkanalen. Eget montage.

Figur 2. Nyttig mat. Foto: Pixelbliss, Adobe Stock

Figur 3. Människokropp. Foto: 7activestudio, Adobe Stock

Övriga referenser

Inledningstexterna till varje avsnitt är skrivna av Britt-Marie Lidsten. Laborationer och övningar är sammanställda och utformade av Bioresurs. Fullständiga beskrivningar samt länkar finns på hemsidan: www.bioresurs.uu.se. Där finns även referenser till artiklarna i magasinet.