

Hvorfor er DNA en høyregjenget dobbelheliks og hva var opprinnelsen til livet på Jorden?

Olav Steinsvoll, Steinsvolls Materialforskning og IFE, Kjeller

I en jubileumsartikkel om DNA i KVANT [1] var det et avsnitt om chiralitet som roper etter en fortsettelse. Det ble bare fortalt at oppdagerne av DNA dobbelheliksen og proteiners alfaheliksdeler presenterte som et faktum at dette var høyregjengede skrueformer. Man kan da spørre om hvilket grunnlag de hadde for disse påstandene: En venstregjenget heliks kunne vært like sannsynlig. I denne artikkel undersøkes begrepet chiralitet nøyere.

Bevis for at DNA heliksene er høyregjengede

Det var nok slik at DNA-prøvene i 1950-årene, i form av fiberbunter og ikke molekylære enkrystaller, ikke tillot å bestemme skrueformen av heliksene ved hjelp av røntgendiffraksjon. Derfor er det i ettertid ikke mulig å finne noe i de mange publikasjonene om strukturen av DNA og proteiner fra 1951 og utover som antyder at det har vært gjort forsøk på å bestemme skrueformen fra røntgendiagrammene på den tiden. Det skrives bare at det var bygget en høyregjenget modellheliks for proteiner i samsvar med de kjemiske dataene for aminosyrene. Dette ble godtatt som godt nok bevis ettersom oppdageren, Linus Pauling, var spesialisten innen dette feltet. Tilsvarende finner vi for DNA der det var bygget en høyregjenget modellheliks for DNA på grunnlag av de kjente kjemiske dataene for nukleotidene.

Når man ser bilder av de primitive kjemiske modellene som ble laget av holdere for kjemisk apparatur, papplater, trepinner og kuler, kan man undre seg over at verden godtok dette! Men modellene ble også fulgt av argumenter om muligheter for hydrogenbindinger mellom vindingene i heliksen. Det var først i 1973 [2] at man kunne gjøre røntgendiffraksjon med atomær oppløsning og kunne fastslå at DNA virkelig var en høyregjenget dobbelheliks slik som Watson og Crick hadde foreslått i sin modell.

Begrepet chiralitet

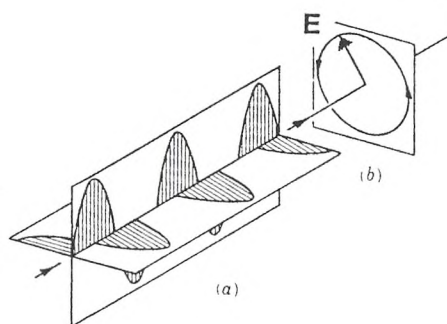
Når en struktur forholder seg til sitt speilbilde som høyre til venstre hånd, eller altså ikke kan dekke sitt eget speilbilde, sier vi at den har en chiral egenskap. Skruer (helikser) forholder seg nettopp slik: En venstregjenget mutter kan ikke skrus på en høyregjenget skrue! Man kan også uttrykke den chirale egenskapen matematisk for helikser. Går vi opp en høyrevridd vindeltrapp, får vektorproduktet av retningene av successive kanter av trappetrinn retning oppover. Går vi opp en venstrevridd vindeltrapp, får vektorproduktet retning nedover. Vi kan derfor tillegge en høyreskrudd heliks en chiral karakter eller helisitet (+1) og en venstreskrudd heliks helisiteten (-1). DNA har altså helisiteten (+1).

Forklaring av Pasteurs eksperimenter

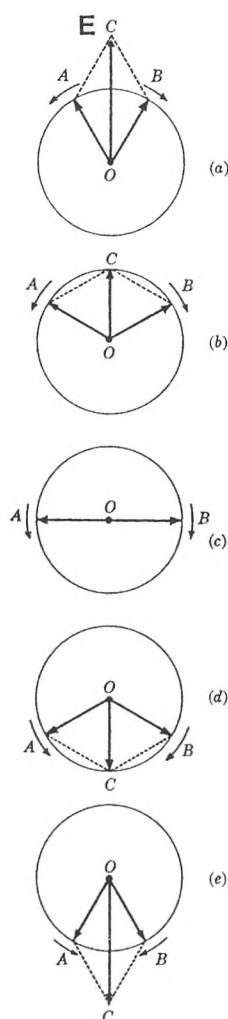
La oss gå tilbake til Louis Pasteurs observasjoner [3, 4] der et salt av vinsyre felte seg ut av en oppløsning i form av like mengder av to typer krystaller med strukturer som forholdt seg til hverandre som høyre til venstre hanske, eller som speilbilder av hverandre, en racemisk blanding. Han sorterte dem deretter ut etter krystallform med en nål under mikroskop og oppløste dem igjen hver for seg i vann. Da han så sendte planpolarisert lys gjennom disse to oppløsningene i et polarimeter (se boks 1), fant han at polarisasjonsretningen for lyset ble vridd mot venstre i den ene løsningen, *l*, og mot høyre i den andre, *d*. Når han felte ut krystaller fra hver av disse oppløsningene, fikk han spontant tilbake de to opprinnelige krystallformene som han hadde startet med, og bare dem. En væske har ingen akse, så det måtte altså være noe spesielt, "aksielt", med molekylene til de to typer vinsyresalt som han hadde klart å atskille. Krystaller, slik som kvartskrystaller, kan også ha optisk aktivitet, men det kan skyldes en egenskap for hele krystallen, altså dens struktur.

Boks 1: Virkemåten av et polarimeter

Et polarimeter er et apparat som brukes for å bestemme dreiningen av polarisasjonsplanet når planpolarisert lys går gjennom et optisk aktivt stoff. Det består av en lyskilde, en polarisator, *p*, og en analysator, *a*, som kan dreies i forhold til hverandre, og et fotometer som måler lysgjennomgangen i et stoff eller væske som plasseres mellom *p* og *a* som funksjon av dreiningen. Væsken (vann) med oppløste molekyler (for eksempel sukker) holdes i en liten standard skuff med vindu i begge ender. Når polarisert lys har samme polarisasjonsretning som analysator, slippes lys gjennom apparatet. Stilles analysatorretningen på tvers av lysets polarisasjonsretning, blir det ingen lysgjennomgang. Fylles skuffen med en optisk aktiv oppløsning, må man dreie litt på analysatoren for å få det helt mørkt, til den ene eller andre retningen. Dreiningretningen, enten mot venstre eller høyre, forteller om man har *l* – eller *d*-type sukker, se figur 3.



Figur 1. En venstresirkulær polarisert lysstråle. (a) Prosjeksjoner på et tilfeldig tidspunkt av den roterende elektriske vektoren, \mathbf{E} , på horisontal- og vertikalplan lagt gjennom forplantningsretningen z for etterfølgende steder langs z -aksen. Dette mønster beveger seg i tid mot høyre. Ethvert sted langs z -aksen opplever da at projeksjonene setter seg sammen til resultatvektoren \mathbf{E} som roterer rundt stedet som en venstregjenget skruer, normalt på z -aksen. (b) Prosjeksjonen av den elektriske vektoren \mathbf{E} inn i et plan normalt på forplantningsretningen for et tilfeldig sted og tidspunkt på z -aksen.



Figur 2. En vertikal planpolarisert lysstråle, \mathbf{E} , dekomponert i to motsatt sirkulært polariserte lysstråler. To elektriske vektorer, $\frac{1}{2} \mathbf{E}$, roterer hver sin vei på tvers av forplantningsretningen.

I figur 1 forklares det som kalles sirkulært polarisert lys. Man kan se på en stråle av vertikalt planpolarisert lys med elektrisk vektor \mathbf{E} som sammensatt av to sirkulært polariserte lysstråler der to elektriske vektorer, $\frac{1}{2} \mathbf{E}$, roterer hver sin vei gjennom oppløsningen av molekylene, se figur 2. Vi kan tillegge lysstrålene helisitetene (+1) og (-1). Dersom lysbrytningsindeksen for den ene sirkulært polariserte stråledelen i en bestemt molekylær oppløsning er større enn indeksen for den motsatt roterende stråledelen, betyr dette at den første delen kommer senere frem ved enden av væskebeholderen i polarimeteret, og resultatanten av de to elektriske vektorene, altså polarisasjonsretningen ved utgangen av polarimeteret, har svingt bort fra den opprinnelige vertikallretningen, se figur 3. Det ser ut som at en type molekyler har kraftigere vekselvirkning med den ene formen av sirkulært polarisert lys enn med den andre.

Boks 2: Nomenklaturer for speilmolekyler.

I figur 4, til venstre, vises den *l*-enantiomere utgaven av aminosyren alanin. *d*-utgaven er speilbildet av denne. Går vi over til å karakterisere alanin med betegnelsene D og L som i [4], betyr dette at vi *løfter saken fra å være en eksperimentell kuriositet vedrørende polarisert lys, opp til et strukturelt plan*, hvor det tas hensyn til de underliggende forhold som antas å være de fysiske årsakene bak fenomenet [5]. Nomenklaturen, D og L ble innført av kjemikeren Emil Fischer i 1891. Han foreslo regler om hvordan man skulle projisere gruppene rundt et chiralt senter inn i et plan for lettere å kunne se høyre- og venstreformer, D/L. Den absolutte og entydige strukturbeskrivelsen av de fire atomgruppene rundt et chiralt senter ble senere innført av R. Cahn, C. Ingold og V. Prelog i 1956 med deres R/S terminologi (rectus, sinister). Denne har med rekkefølgen av de bundne atomer rundt det angjeldende C-atom etter plasseringen i det periodiske systemet. For alanin av formen L(*l*) fås rekkefølgen N, C, C, H eller NH₂, COOH, CH₃, H for gruppene, se figur 4, til høyre. Den angir en rotasjonsretning mot Solen rundt bindingsaksen i retning mot H-atomet. R/S regelen forteller da at strukturen har konfigurasjon S, og vi kan tillegge, helisitet (-1).

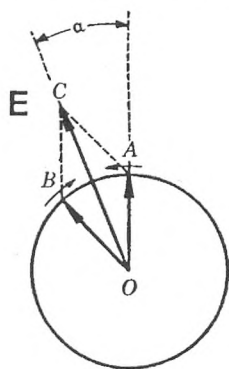
R/S terminologien gir en enda dypere forståelse av stereokjemien, men faller nesten helt sammen med D/L terminologien. Det viktige er at vi heretter kan tillegge molekylene helisitet, en skrueretning. Vi vil holde oss til D/L betegnelsen, men gi den et utvidet innhold. Fra nå av er altså L- og D-betegnelsene helt uavhengige av den optiske aktiviteten, og vi må se det som en ren tilfeldighet at vi kan skrive L(*l*) og D(*d*) for de to enantiomere utgavene av alanin og for alle de andre livsviktige aminosyrene. Sukkerkjemien er komplisert, og for noen sukkerarter kan man finne både D(*l*) og D(*d*), (for eksempel, fruktose(*l*) og glukose(*d*), som sammen utgjør vanlig sukker!). Vi skal se at det er de oppløste molekylenes helisitet som bestemmer deres vekselvirkning med det sirkulært polariserte lyset med en bestemt helisitet.

Stereokjemi og polarisert lys fra Kosmos

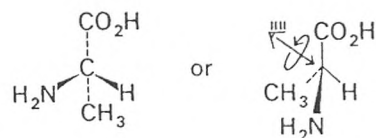
Vi er nå kommet inn i stereokjemien. Fenomenet ble senere forklart ved at salter av vinsyre selv hadde en molekylstruktur der det fantes såkalte asymmetriske karbonatomer eller chirale senter som førte til at molekylet kunne opptre i to utgaver som var speilbilder av hverandre, såkalte enantiomere former. Ut fra en blandingsoppløsning søkte altså likeformede molekyler sammen til hver sine krystallformer på grunn av fordelaktige energi- og bindingsforhold. Dette fenomenet brukes i våre dager ofte til renfremstilling av en bestemt enantiomer utgave av et molekyl innen farmasøytisk industri og ved illegal narkotikafremstilling.

Når det gjelder navn på stereoisomere eller enantiomere utgaver av organiske molekyler, er det skjedd en historisk utvikling av mer og mer treffsikre metoder og betegnelser. Man har forsøkt å karakterisere dem ved deres struktur og derigjennom ved de underliggende kjemisk/fysiske årsakene bak deres oppførsel i polarisert lys. Nomenklaturen er gått fra Pasteurs høyre/venstre-dreining av lyset, *d/l*, til E. Fischers projeksjonsregel, *D/L*, og senere til angivelse av *R/S* konfigurasjoner. En kort gjennomgang er forsøkt i boks 2 og figur 4 der alanin *L(l)* er brukt som illustrasjon. Vi holder oss til en utvidet *D/L* form.

I 1997 oppdaget man en kraftig kilde for rent høyresirkulært polarisert lys i stjernebildet Orion (se bildet på bagsiden). Hva vil skje dersom dette spesielle lyset sendes mot en racemisk blanding av enantiomere aminosyrer? Vil den asymmetriske vekselvirkningen av lyset kanskje kunne ødelegge molekyler av *L*-typen, og altså frembringe en kjemisk ubalanse i blandingen? Det er det høyresirkulært polariserte lyset som har den kraftigste vekselvirkningen med og som blir forsinket av det vi kaller *L*-type molekyler og som fører til en vridning mot venstre av polarisasjonsvektoren, se $\frac{1}{2} \mathbf{E}$ ved B i figur 3.



Figur 3. Med en venstrevridende aminosyre, *L*, i polarimeteret blir den høyresirkulære del av den planpolariserte lysstrålen forsinket i sin rotasjon. Når den venstresirkulære vektor $\frac{1}{2}\mathbf{E}$ ved A har gjort et heltallig antall rotasjoner gjennom stoffet, har vektoren $\frac{1}{2}\mathbf{E}$ ved B rotert en litt mindre vinkel. Resultantvektoren ved C ligger i et plan som danner vinkelen α med den inngående opprinnelige planpolariserte lysbølge, til venstre for dens polarisasjonsretning (se boks 1). Figurene 1, 2 og 3 er lånt fra F.W. Sears, Optics (1949) Addison-Wesley Press



L (*l*) - alanin

priority order: $\text{NH}_2 > \text{CO}_2\text{H} > \text{CH}_3 > \text{H}$

Figur 4. På venstre siden av figuren er *l*-formen av aminosyren alanin fremstilt på en tredimensjonal måte der atomgruppene CO_2H og CH_3 ligger under billedplanet, mens gruppene H_2N og H ligger over billedplanet. I en Fischerprojeksjon tegnes dette som et kors i papirplanet og molekylet gis betegnelsen *L*. På høyre siden av figuren er det antydning et øye som ser inn mot det sentrale C-atomet i alanin i retning av H-atomet. Rekkefølgen av atomgruppene NH_2 , CO_2H , og H går i motsatt retning av solen, som antydning av den lille sirkelen rundt H-aksen. Molekylet kan derfor etter *R/S* regelen tilordnes konfigurasjonen *S* (sinister) og helisitet (-). Vi vil likevel betegne denne enantiomeren av aminosyren alanin som *L(l)* (se boks 2).

Homochiralitet og heliksform for proteiner og DNA

Alt liv inneholder proteiner som primært er bygd opp av aminosyrer, kjedet sammen i lange tråder eller polymerer, mange hundre aminosyrer lange. De mest vanlige aminosyrene, 20 stykker, kan ses på som monomerer som inngår i forskjellig antall og i en bestemt rekkefølge i proteinene. 19 aminosyrer har ett chiralt senter og forekommer derfor i to former, *L*- og *D*-form. Den 20. aminosyren, glycin, mangler et asymmetrisk C-atom, og finnes bare i en "nøytral" utgave. Under oppbyggingen av proteiner i cellene anvender naturen stort sett bare de monomerer som kan karakteriseres som *L*-utgaver av aminosyrene. Noen *D*-utgaver forekommer hos bakterier, i deres celledvegger og peptider. De finnes faktisk også i "høyere" organismer. Et ferdig protein inneholder lineære, båndliknende og heliksformede områder.

Byggekløssene, monomerene, som inngår i DNA, er fire forskjellige nukleotider, som alle består av en fosfatdel, en sukkerdel (en pentose, femring) og en aminbasedel. Det forekommer flere asymmetriske atomer i sukkerfemringen. Undersøkelser har likevel vist at alle monomerene som inngår i DNA dobbelheliksen, inneholder *D*-type deoksyribose. Alle de andre er biologisk inaktive. Hos RNA, ribonukleinsyre, opptrer bare *D*-ribose, og strukturen er en enkel heliks. Denne egenskapen til monomerene hos proteiner, DNA og RNA kalles homochiralitet. Min artikkel supplerer på dette området det viktige bidraget fra A.C. Andersen et al. [4].

Heliksformene hos proteiner, DNA og RNA er å betrakte som spesielle lineære enkrystaller med stor utstrekning, og for fysikeren kan det synes som om vi her har et tilsvarende tilfelle som for Pasteurs salter av vinsyre der like, asymmetriske monomerutgaver søkte sammen og dannet faste krystaller med enten *l* eller

d egenskaper i en mettet oppløsning. Hvis vi hadde en samling med bare D-type deoksyribose i vann, kunne vi kanskje etter en tid observere at DNA hadde bygd seg opp spontant? Det er mange likhetspunkter med Pasteurs eksperimenter, og vi kan si at Pasteur både oppdaget fenomenet chiralitet og homochiralitet i planteriket. Men naturen er ikke så enkel i DNA tilfellet. Vi må huske at bindingsenergiene som utløses i faststofftilfellet, er ganske store, og dessuten er alle molekylene som inngår i krystallene, omgitt av likeartede molekyler i alle retninger. Vannmolekyler er utsluttet. Dannelsesenergiene for DNA- og proteinheliksene er ganske betydelig mindre.

Vann, et viktig biomateriale

Vannmolekylet har et elektrisk dipolmoment, og vannmolekyler danner lett hydrogenbindinger med hverandre og danner kortlivede lenker og klynger. Vann er derfor et viktig støtteapparat for heliksens struktur [6]. Kjeder av vannmolekyler kan danne broer og binde enkelte molekyldeler sammen. Dessuten stabiliserer vannet dobbelheliksens struktur på den måten at de hydrofobe molekyldelene vender inn mot midten, mens de hydrofile delene ligger ut mot vannet. Heliksens struktur og funksjoner kan bare bestå og foregå i vandige oppløsninger. Denne konstruksjonen oppsto under en singular, enestående begivenhet i tidens morgen, og DNA strengen og dens nødvendige vandige biologiske omgivelser er siden blitt bevart og overført fra generasjon til generasjon ved inneslutning i celler.

For DNA fører altså forekomsten av bare D-monomerer til helikser på grunn av fordelaktige energi- og bindingsforhold. DNA er i tillegg en dobbelheliks, og dessuten bærer de to samvirkende helikser med seg en retningsgivende komponent langs heliksaksen i sukkerringen, se figur 4 i [1]. Dersom vi definerer den som "oppover" på den ene heliksen, vil den være rettet "nedover" på den andre heliksen. Alt dette stiller ekstra krav til de elementene som inngår i oppbygningen for å få et mest mulig regulært og holdbart "sluttprodukt". På den annen side kan det forekomme at innskutte heliksdeler i DNA er venstreskrudde, nemlig såkalte Z-former [1].

Som en generell konklusjon kan man si at helikser fremkommer som en nødvendig struktur når små asymmetriske molekyler setter seg sammen ved hjelp av kovalente bindinger i en lineær sekvens. Den viktigste grunnen til homochiralitet hos DNA er kanskje at en eventuell DNA med heterochirale elementer ikke kan lage identiske kopier av seg selv, og derved er blitt utsjaltet tidlig under evolusjonen. Naturens tilfeldige valg av den homochirale enhet, D-formen i stedet for L-formen i begynnelsen, bestemte sikkert at vi fikk høyregjengede helikser for DNA.

En tilsvarende betraktningssmåte kan vi anlegge for proteiner. Når et ferdig lineært protein av bare L-former i neste omgang søker å oppnå en mer stabil form, kan man anta at fordelaktige energi- og bindings-

forhold styrer i retning av en heliks med en bestemt skrueretning for noen deler av proteiner. Linus Pauling fant at siden amidgruppen er plan og stiv, kunne han bygge en heliks som blir stabilisert av regulære hydrogenbindinger mellom atomer i amider plassert på forskjellig vindingsnivå. Vi har allerede nevnt at modellen kommer ut som høyregjenget. Med en eneste aminosyre av D-typen i utvalget blir heliksformen kanskje umulig.

Livets opprinnelse på Jorden

Det at alle livsformer inneholder de samme byggestener, slik som aminosyrer, fettsyrer, nukleinsyrer og karbohydrater og har egenskapen homochiralitet hos monomerene for både DNA og proteiner, har ført til mange spekulasjoner om livets felles opprinnelse. Dessuten er det en sammenheng mellom naturens bruk av L-aminosyrer og D-nukleotider. Det er mange teorier for hvordan livet er oppstått på jorden. Er det kommet en DNA streng fra et fjernt himmellegeme dalende ned på jorden en gang i en fjern fortid, eller har RNA, proteiner og DNA utviklet seg fra en serie tilfeldige kjemiske prosesser her på jorden? I det siste tilfellet vet vi at livet er like mye avhengig av alle de tre kjemiske byggestenene.

Nylig bombarderte en romsonde fra USA en kometkjerne med et prosjektil. De foreløpige analyser viser at "den skitne snøballen" som ventet, hovedsaklig består av vann, men også karbonforbindelser, såkalte organiske molekyler. Hvilke stoffer det dreier seg om og eventuelt deres chiralitet var ikke oppgitt. I referansene [4, 7] beskrives hvordan Stanley L. Miller kunne lage "organiske" molekyler fra uorganiske stoffer ved hjelp av elektriske utladninger, og at han fant at de dannede aminosyrene forekom med 50 % av L-formen og 50 % av D-formen, en racemisk blanding. Dessuten diskuteres hva det innebærer om romsondene til planeten Mars finner liv med samme chiralitet som på Jorden. Hvis det finnes liv og det derimot har motsatt chiralitet av på Jorden, har vi et bevis for at liv kan utvikles overalt og lokalt i Universet, hvis forholdene er de rette. Det skal nå sendes romsonder ikke bare til Mars, men også til månene Titan og Europa i solsystemet for å se etter liv.

Allerede i 1970-årene fant man at "Murchinsons meteoritt", som var falt ned i Australia, inneholdt et overskudd av L-type aminosyrer. Denne ubalansen kan nettopp ha blitt forårsaket av lyset fra sterke sirkulært polariserte lyskilder i Universet, slik som fra kilden i Orion. Nylig har en fransk gruppe ved lagringsringen LURE i Orsay, Frankrike, bestrålt en racemisk blanding av aminosyren leucin i fast form med høyresirkulært polarisert lys med samme frekvens som lyset fra Orion (182 nm, UV stråling) og fremkalt en overvekt på 2,6 % av D-typen enantiomer for stoffet [8, 9]. Denne selektive ødeleggelsen av L-typen enantiomer kalles fotolyse: Helisiteten av lyset og helisiteten av molekylene passer sammen som skrue og mutter. Vi

har dermed fått svar på spørsmålet som ble stilt foran i artikkelen. Dette eksperimentet skal nå gjentas ved den franske synkrotronlysilden SOLEIL for andre aminosyrer. Dessuten vil man se på om det går an å få til en biomolekylær asymmetrisk dannelse av aminosyrer fra enkle stoffer som vann, ammoniakk, metanol osv under påvirkning av kraftig monokromatisk sirkulært polarisert lys [9], altså et eksperiment som ligner på S.L. Millers eksperiment i [7].

Det mest trolige er at både tilfeldigheter og nødvendigheter har spilt en rolle for Livets opprinnelse og utvikling her på jorden. Hvis det har skjedd en asymmetrisk lyspåvirkning eller en forsterkning av en tilfeldig fluktusjon i en racemisk "urblanding" av aminosyrer eller nukleotider, kunne man tenke seg at den ene speilformen "får overtaket" i kampen om tilgjengelig informasjon, definert som "bits" etter C. Shannon ("negativ entropi") [10]. En etterfølgende langsom kjemisk utviklingsprosess a la Darwin er så et mulig scenario for begynnelsen av Livet på jorden der det hersker homochiralitet.

Dannelse av organisk stoff i førbiologisk tid

Et annet scenario som er diskutert, er om en enkel form av nukleinsyren RNA kunne ha vært den første som har oppstått tilfeldig under en "prebiotisk", førbiologisk, periode, kanskje under andre atmosfæriske forhold. På vårt utviklede stadium av livet brukes "nyere" utgaver av RNA til å avlese den genetiske koden i DNA og oversette den til en sammenhengende lineær rekkefølge av aminosyrer i ribosomene. De korteste av dem kalles peptider, de lengre polypeptider og de lengste proteiner med opptil tusen aminosyrer i kjeden. På et tidlig stadium kunne denne evnen hos RNA kanskje vært brukt til å lage polypeptider. Dette ville så avgjøre chiraliteten til proteinene. Et slags primitivt liv ville da kunne tenkes der RNA utgjorde "minnebrikken" før DNA dukket opp. DNAs store hukommelseskapasitet og selvkopieringsegenskaper muliggjorde mer komplekse livsformer. DNA kunne ha utviklet seg på grunnlag av RNA. Vi får dermed en "enkel" forklaring på mysteriet om homochiraliteten og sammenhengen mellom L- og D-former hos henholdsvis proteiner og DNA. Dessuten burde energilagringenheten ATP, adenosintrifosfat, og forstadier til cellevegger, også vært tilstede på et tidlig tidspunkt.

Hele veien fra det førbiologiske stadium, frem til det moderne mennesket, er livet gått gjennom "flaskehals" eller singulariteter, som har styrt utviklingen i nye retninger [11]. Nobelprisvinneren Christian de Duves nyeste bøker inneholder en fersk oppdatering om forskning, fakta og filosofi på denne interessante, til dels førbiologiske tidsperioden for Jorden.

Sammendrag

Vi har funnet en sannsynlig forklaring på DNAs og α -heliksens høyreskrueform med helisitet (+1). Dessuten har vi sett på det fysiske grunnlaget for at chiral, sirkulært polarisert elektromagnetisk stråling slik som UV lys, og molekyler med chirale egenskaper

har evne til heftige omfavnelser og vekselvirkninger med alvorlige følger for dem begge når helisitetene er tilpasset hverandre!

Man har observert en kilde for sirkulært polarisert stråling i stjernebildet Orion. Slike kilder kan ha ført til naturlige, asymmetriske forekomster av aminosyrer i Kosmos. Deretter kan de ha kommet som et kosmisk regn over Jorden i en førbiologisk periode og ha dannet utgangspunktet for Livet med den homochiraliteten vi observerer i dag. Senere oppsto muligheten for videre utvikling av denne kjemien i et vandig miljø i celler med en "behagelig" temperatur på Jorden frem til alt Liv som fins på Jorden i dag. En blanding av utenomjordiske og jordiske forhold kan altså ha ført til Livets opprinnelse. Et annet scenario er at Livet kan ha oppstått helt selvstendig på Jorden etter en førbiologisk periode av karbonkjemi.

En stor takk til alle dem som er kommet med gode innspill under arbeidet med denne artikkelen innen astrobiologi.

Litteratur

- [1] Steinsvoll, O. (2004), DNAs fysisk/kjemiske struktur kjent i 50 år, KVANT, bind 15, nr. 4, 16
- [2] Rosenberg, J.M., Seeman, N.C., Kim, J.P., Suddath, F.L., Nicholas, H.B., and Rich, A. (1973), Double helix at atomic resolution, Nature, bind 243, 150.
- [3] McManus, Chris, Right hand, left hand, The Origins of asymmetry in Brains, Bodies, Atoms and Cultures (2003) Phoenix Paperbacks. Orion Books Ltd.
- [4] Andersen, Anja, C., Brandenburg, B. og Multamäki, T. (2005), Er det en naturlov at aminosyrer er venstredrejede? KVANT bind 16, nr. 3, p 18.
- [5] Hart, H. and Schuetz, R.D. (1978), Organic Chemistry 5. ed., Houghton Mifflin Company.
- [6] Steinsvoll, O. (1996), Vann, et viktig biomateriale, Fra Fysikkens Verden, årgang 58, nr. 3, 74.
- [7] Miller, S.L. (1953), A Production of Amino Acids under possible primitive Earth Conditions, Science, bind 117, 528.
- [8] Meierhenrich, U.J., Nahon, L., Alcaraz, C., Bredehøft, J.H., Hoffmann, S.V., Barbier, B. and Brack, A. (2005), Asymmetric Vacuum UV photolysis of the Amino Acid Leucine in the Solid State, Angew. Chem. Int. Ed., nr. 44, p 5630-5634.
- [9] Nahon, Laurent (2005), "L'asymetrie des biomolecules vient de l'espace", La Recherche, nr. 390, 10 (I intervjuet med Nahon står det at eksperimentene viste et overskudd av leucine "gauche". Det riktige er et overskudd av leucine "droite", altså D-typen. Se referansen, et nummer foran).
- [10] Loewenstein, W.R. (1999), The Touchstone of Life. Molecular information, cell communication, and the foundations of life, Penguin Books.
- [11] de Duve, C. (2005), Singularities, Landmarks on the Pathway to Life, Cambridge University Press.



Olav Steinsvoll (født 1931), opprinnelig biofysiker, seniorforsker, dr. philos., popularisator av forskningsmetoder og -resultater, fhv. redaktør av tidsskriftet "Fra Fysikkens Verden", mangeårig bruker av nøytronspredning innen materialforskning, fhv. leder av Nøytronlaboratoriet, IFE, Kjeller.