

DEL BIG BANG A L'HOMO SAPIENS SAPIENS

Una visió evolutiva global de la Història de l'Univers

Introducció

Cosmos, evolució, vida, home, ... Temes amplis, d'enormes implicacions, als que he anat donant voltes i més voltes cercant explicacions congruents amb el rerefons dels meus propis coneixements científics. Un breu article meu, publicat el 1970, comença d'aquesta mateixa manera. El 1970 ja li havia donat al tema voltes i més voltes! Potser això justifiqui el meu atreviment en intentar condensar una temàtica tan àmplia en un breu llibre. Amb tot, i a pesar que l'he escrit amb la màxima honestedat, el lector hauria de tenir en compte:

- a), que el tema de l' "evolució global" cobreix tots els àmbits de la ciència i no hi ha ser humà amb coneixements suficients per a parlar de tots ells amb certa autoritat;
- b), que moltes de les explicacions presentades, que per l'estil narratiu emprat puguin semblar "plenament" demostrades, pot ser que en la realitat científica estiguin lluny de ser-ho;
- y c), que alguns dels temes són especialment "durs" per a mi ja que estan molt allunyats de la meua pròpia especialitat (la Química orgànica) i els he tingut que estudiar autodidàcticament. De fet, he de confessar que hi ha algun punt del Capítol 1 que no estic plenament convençut que l'hagi entès per complet.

D'altra banda, sé -per activa i per passiva, com autor i com lector- l'efecte *dogmàtic* de la lletra impresa i per això voldria dir i repetir al lector que llegeixi el llibre amb esperit crític ja que el text representa "una visió", òbviament "la meua visió", d'un tema molt extens i freqüentment complex. En el text utilitzo, en moltes ocasions, *la primera persona del singular*, tot confiant en què, d'aquesta manera, contribueixo a *reduir* el valor dogmàtic de la lletra impresa.

En iniciar la lectura del llibre, m'agradaria que el lector considerés que assisteix a un espectacle fantàstic, un espectacle d'enorme transcendència, al llarg del qual observará com una petita part d'un "quelcom" inicial dóna lloc a l'*energia* i la *matèria*, la qual s'organitza més i més i acaba per generar la *vida* i, finalment, la *vida intel·ligent*.

L'espectacle que està a punt d'iniciar-se podria anunciar-se sota diversos títols, tots igualment vàlids, però com que el terme *evolució* expressa bé la idea d'una organització progressiva al llarg del temps, he escollit com a títol "Una visió evolutiva global de la Història de l'Univers", complementant-lo amb el menys acadèmic i més atractiu "Del Big Bang a l'*Homo sapiens sapiens*".

Per tal que, des del començament, el lector-espectador tingui una certa idea de l'espectacle al qual ha estat convidat, en el programa repartit a l'entrada s'indicaria que

l'acció es desenvolupa en diferents "escenaris" ja que en funció, fonamentalment, del lloc on els processos evolutius ocorren, es distingeixen diverses etapes en l' "evolució global": còsmica, estel·lar, interestel·lar i planetària; i es prossegueix amb l'evolució biològica, que inclou l' antròpica (biològica); es podria prosseguir, però en aquest llibre no es fa, amb l'evolució antròpica cultural o social.

El programa també indicaria que, *grosso modo*, la progressiva auto-organització de la matèria tindrà lloc de la següent manera:

- 1.- En el gran puré còsmic inicial, els quarks donen lloc als nucleons (protons i neutrons).
- 2.- Limitadament en el puré inicial i extensament en els "gresols estel·lars", els nucleons s'organitzen en nuclis.
- 3.- Als espais interestel·lars, els nuclis i els electrons donen lloc als àtoms i a un limitat nombre de molècules relativament senzilles.
- 4.- D' una manera encara molt poc coneguda, en u determinat lloc de l' Univers, s' "organitza" el Planeta Terra
- 5.- Als oceans primitius del Planeta Terra, les molècules senzilles van generant molècules més complexes.
- 6.- També als oceans, les molècules complexes van generant protocèl·lules i aquestes donant lloc als organismes monocel·lulars.
- 7.- Els organismes monocel·lulars donen lloc (als oceans i a les interfàcies terra-aire) als pluricel·lulars, es a dir, a les plantes i els animals.
- 8.- Finalment, a algun lloc de la Terra, probablement a l'Àfrica oriental, l'evolució en el regne animal condueix a l'*Homo sapiens sapiens*, espècie a la que pertanyem.

Crec que les anteriors afirmacions són correctes però potser serien més informatives si les formulés posant de relleu que els "escenaris" no son medis homogenis i que els "actes evolutius" no tenen lloc d'una manera generalitzada; al contrari, els "actes evolutius" es produeixen en "llocs", "regions" o "zones" en els que pels motius que siguin, es donen circumstàncies particularment favorables. Precisant el llenguatge, les etapes 1 i 6, per exemple, podrien formular-se així:

- 1.- En alguna regió (o algunes regions) del gran puré còsmic inicial, en la qual (o en les qual) regeixen circumstàncies particularment favorables, els quarks ...
- 6.- També en alguna zona (o zones) dels oceans en la que (o en les que) regeixen circumstàncies particularment favorables, les molècules complexes ...

El programa avança com tindrà lloc la gradual auto-organització de la matèria i, certament, aquest procés representa el fil conductor bàsic del llibre; emperò, m'agradaria que el lector s' estigués preguntant, "quin motiu hi ha perquè la matèria s' auto-organitzi?" La resposta a aquesta pregunta transcendent o, molt millor, *la meva resposta* (i en aquest tema en concret és realment obligat insistir en la "meva"), totalment congruent amb el Segon Principi de la Termodinàmica, l'elaboro al Capítol 10.

A manera de resum informal

Crec que un resum lleugerament informal pot animar al lector a endinsar-se en el seriós contingut dels capítols següents:

S'aixeca el teló (fa uns tretze mil set cents milions d'anys) amb un "chupinazo" que deixa en ridícul als dels "sanfermines".

L'entropia comença a augmentar ... i ja no parerà!

L'empat inicial entre la matèria i l'antimateria es decanta a favor de la matèria, encara que per molt poc!

Matèria i antimatèria s'anihilen, però el lleuger excés de matèria fa que en l'anihilació en quedin suficients traces per a que la funció pugui continuar.

Existeix un antimón d'antimatèria que transcorre en un antitemps i en el qual un antiCastells format de D-aminoàcids i L-carbohidrats ha escrit un antillibre?

L'univers ja s'ha refredat suficientment per a que el deuteri pugui perviure un xic: via lliure a la formació de l'heli-4 (etapa còsmica).

La matèria s'organitza ostensiblement: neix el Sistema de Períodes (etapa estel·lar).

Els estels exploten i la pols formada embruta tot l'espai interestel·lar (etapa interestel·lar).

Visita al "zoo molecular": molt carboni i molt enllaç triple. Espècies molt reactives que no reaccionen ... per no trobar amb què!

El futbol, va també envair l'espai?

En el tebi oceà, la matèria continua la seva escalada de la complexitat (etapa planetària). Apareix la vida: però, què és la vida?

Fi de l'evolució determinista i començament de l'evolució contingent (etapa biològica).

Justificada alarma entre els anaerobis: qui ha deixat escapar aquest gas (oxigen) tan verinós?

El miracle de la vida en un univers hostil.

L'arsenal d'armes preventives i defensives: vitamines C i E, catalasa, peroxidases, dismutases superoxídiques, etc.

La meravella del transport electrònic. Com es possible tanta perfecció?

L'escalada de la complexitat prossegueix acceleradament.

Finalment, s'arriba a l'*Homo sapiens sapiens*: podria no ser com és?

Millor canviar l'entorn que canviar l'*Homo*: l'evolució biològica s'ha acabat.

Comença l'evolució cultural o social.

La possible existència de vida i de vida intel·ligent extra-terrestres.

La inevitable protagonisme de la Química dels derivats del carboni.

El Principi antro-po-cosmològic: realment, estem sols?

Capítol 1

ETAPA CÒSMICA: ELS TRES PRIMERS MINUTS

1.1 El big bang i l'expansió de l'Univers

En valorar les línies que segueixen, el lector ha de tenir en compte que el tema de l'"origen origen" de l'Univers no està tancat i que, per exemple, la més recent teoria interpretativa del món de les partícules elementals, la teoria de les cordes (*string theory*) suggereix que el *big bang* no va ser l'origen de l'Univers sinó, simplement, el resultat d'un estat pre-existent (1).

Movent-nos a un nivell més consolidat podem dir que d'acord amb la teoria del *big bang* calent, que es basa en la relativitat general i és la clàssicament acceptada en el món científic no especialitzat, tot l'estudiable comença amb un enorme "espetec" en una singularitat de l'espai-temps (singularitat: regió de l'espai-temps on alguna variable física pren un valor infinit). La Ciència actual, tot acceptant les propostes de l'anomenat *model inflacionari*, està en condicions de donar un *marc interpretatiu coherent* a tots els esdeveniments que van tenir lloc a partir de 10^{-43} segons després del *big bang*, el qual es creu que va ocórrer ara fa aproximadament uns quinze mil milions d'anys.

La relativitat general ensenya que l'univers s'expansiona a una velocitat aproximadament proporcional a l'arrel quadrada de la seva densitat (recordem que la densitat es la massa dividida pel volum) i tenint en compte les circumstàncies imperants en els estadis inicials, la quantitat de massa a considerar es la suma de la massa pròpiament dita i l'equivalent massic de l'energia (calculable per la famosa relació d'Einstein $\Delta E = \Delta m \cdot c^2$, en què E és l'energia, c la velocitat de la llum i m l'equivalent en massa de l'energia E). La teoria condueix a admetre que quan més gran es l'energia, més lentament es perd; per tant, als estadis inicials després del *big bang*, la pèrdua d'energia (o, si es prefereix, el seu equivalent en massa) havia de ser molt lenta. Conseqüentment, la densitat es va anar mantenint elevada, cosa que va conduir a que l'univers fos objecte d'una expansió molt ràpida o *inflació*. Els estadis inicials compresos entre 10^{-43} s i 10^{-35} s són només interpretables pel model inflacionari; a partir dels 10^{-35} s comença la validesa de l'anomenat *model estàndard* de les partícules elementals.

1.2 **Matèria i antimatèria. La pèrdua de la simetria T.**

Admetem, per a poder seguir amb la nostra exposició, que el gran "espetec" inicial ha donat lloc, ja, a la creació de gran quantitat de *matèria*, la meitat de la qual és de la variant que anomenem senzillament *matèria* i l'altra meitat de la variant que anomenem *antimatèria*. Una analogia contribuirà a fer més "digerible" la terminologia que estem emprant: *matèria de la variant matèria* i *matèria de la variant antimatèria*.

Si per alguna estranya circumstància la humanitat hagués evolucionat de manera que tots els humans només tinguessin la cama dreta, la paraula *sabata* hauria significat, exclusivament sabata dreta; ara bé, si a algun lloc hagués aparegut un "mutant" humà amb dues cames, hagués estat necessari introduir un nou terme, que hagués pogut ser *antisabata*, per a referir-nos a la sabata esquerra, és a dir, a l'apropiada per a la nova cama. Per tant, a partir del moment en què s'havia establert que existien humans amb

dues cames, a aquesta "cosa" anomenada *sabata* se li reconeixien dues variants (la sabata dreta i la sabata esquerra) a les quals, d'acord amb la terminologia acreditada per la història, hauria que referir-se com "*sabata sabata*" o "sabata de la variant sabata" i "*sabata antisabata*" o "sabata de la variant antisabata".

Tota la matèria estava constituïda per les *partícules elementals* que a l'actualitat coneixem com *quarks* i *electrons* i tota la matèria antimatèria pels *antiquarks* i *antielectrons*; el nombre de quarks era exactament igual al d' antiquarks i el d'electrons, al d' antielectrons. Totes les partícules es trobaven a una temperatura elevadíssima, a una temperatura d'uns 10^{12}K , o més (2). Per tant, podem dir que "molt poc temps després de començar la funció", es disposava d'una gran quantitat de partícules elementals -una forma de *matèria* molt poc organitzada o estructurada- dotades d'una gran quantitat d'*energia* -ja que això és allò que significa una temperatura molt elevada.

La teoria de la gran unificació (G.U.T., emprant les inicials de l'expressió anglesa), explica que a temperatures molt elevades els antielectrons (també anomenats *positrons*) poden convertir-se en quarks i els electrons en antiquarks, però mentre es consideri que preval la plena *simetria* que s'admet que existeix en el moment inicial, partícules i antipartícules han de comportar-se *idènticament* i, per tant, el mateix nombre d' antielectrons es converteixen en quarks que d'electrons en antiquarks; en altres paraules, el nombre de quarks i antiquarks romandrà constant. Emperò, la plena simetria que es postula existia en el moment inicial, desapareix immediatament, ja que desapareix la simetria T, la simetria referent al temps.

En el món de les partícules elementals, la simetria plena o perfecta implica el compliment de les tres simetries fonamentals que són la simetria C (que és refereix a la carrega de les partícules); la simetria P (que es refereix a la paritat de les partícules, tema sobre el qual no podem aquí entrar); i la simetria T (que es refereix a la simetria dels fets físics respecte a la inversió del temps; vegis apartat 1.6).

Emprant les paraules de Hawking (3): "Certament, l'univers primitiu no posseeix la simetria T: quan el temps avança, l'univers s'expandeix, si el temps retrocedís, l'univers es contrauria".

1.3 Un Univers permanentment asimètric

Ens trobem amb una *primera* o *primordial* asimetria que potser sigui (i en la meua opinió, és) l'asimetria fonamental origen de totes les asimetries vigents en el món en què estem inserits. Només fa falta observar el nostre entorn o profunditzar en determinats aspectes de la realitat per a comprovar l'existència d'asimetries difícils d'explicar: la Terra gira a l'entorn del sol d'una certa manera i no de l'oposada; la pròpia Terra gira al voltant d'ella mateixa d'una certa manera i no de l'oposada; certs òrgans humans dels quals solament en tenim un, com el cor, no ocupen posicions centrals; la matèria viva està constituïda per aminoàcids L i carbohidrats D i no d'aminoàcids D i carbohidrats L.

Quan no hi ha plena simetria, partícules i antipartícules ja no tenen l'"obligació" de comportar-se *idènticament* i la teoria del *big bang* admet (o dedueix, l'autor no n'està segur) que al trencar-se la simetria T són més els quarks que es formen a partir d' antielectrons que antiquarks es formen a partir d'electrons. Aquest és un fet molt

important i crec admissible recórrer aquí una altra vegada a un exemple referent a sabates per a fer més comprensible que en un món no totalment simètric, partícules i antipartícules no es comportin idènticament.

Suposem que en un determinat recipient hi tenim una gran quantitat de parells de sabates del mateix número i que disposem d'un certa eina amb la que pretenem anar "pescant" sabates per a treure-les del recipient; suposem que la part davantera de l'eina és canviable i, d'entrada, com a part davantera, posem una bola: observarem que l'eina encaixa tant bé amb les sabates dretes ("sabates sabates") com amb les sabates esquerres ("sabates antisabates") i que les dos variants són "pescades" i tretes del recipient en iguals quantitats. Canviem la part davantera i en lloc d'una bola hi posem un cub: el resultat és el mateix. Finalment, com a part davantera hi posem la part davantera d'una forma real corresponent al peu esquerra: observarem que ara "pesquem" més "sabates antisabates" que "sabates sabates" i que, per tant, el recipient es va enriquint en "sabates sabates".

El resultat és ben clar: mentre ha imperat la simetria (la bola i el cub són objectes simètrics), el "comportament" de les "sabates sabates" i de les "sabates antisabates" ha estat idèntic, però en trencar-se la simetria (emprant una forma real corresponent al peu esquerra) el comportament ja ha estat diferent.

A l'Univers primitiu, immediatament després del *big bang*, els quarks i els electrons comencen a estar en excés sobre els antiquarks i els antielectrons; en altres termes, la matèria comença predominar sobre la antimatèria: aquest excés arriba a ser, com a màxim, d'una part en 10^{10} . A causa de l'elevada temperatura imperant, matèria i antimatèria *encara* poden conviure: per a dir-ho d'alguna manera, a causa de l'elevada velocitat (elevada energia) amb que xoquen les partícules amb les antipartícules, *reboten* intactes en lloc d'*anihilar-se* (veure més endavant).

1.4 Victòria pírrica de la matèria matèria

Amb la continuada expansió, el jove (joveníssim!) Univers es va refredant i bastant abans d'haver transcorregut una bilionèsima (4) de segon (una bilionèsima és 10^{-12}), la temperatura ja ha baixat quelcom (posem a 10^{11} K) i les partícules de matèria i antimatèria, en xocar, romanen en contacte un temps suficientment llarg per a "començar a reconèixer-se": en efecte, en entrar en contacte, *comencen a anihilar-se*. Tota la massa que va desaparèixer apareix en forma d'energia (energia de la radiació electromagnètica); finalment (i ben aviat per cert) només queda l'*excés de matèria matèria* justificat en el paràgraf anterior.

L'evolució d'aquest excés de matèria matèria, que a partir d'ara ja anomenarem senzillament matèria, *organitzant-se o estructurant-se cada vegada més i més*, és el que ens ocuparà a partir d'ara, centrant-nos especial en "com" té lloc l'evolució, però queda pendent la importantíssima pregunta: és físicament justificable que tingui lloc aquesta creixent organització?, no va en contra del Segon Principi de Termodinàmica? A la meua opinió, no solament és justificable, sinó que és *obligada*. Sobre aquest tema insistiré al Capítol 10.

A manera d'incís, una pregunta que pot semblar de ciència ficció però que a l'autor li resulta inquietant, i suposa ho és també per a tots els obsessos de la simetria: a

la singularitat de l'espai-temps, és possible que "la simetria no s'hagi trencat" i que la creació del *temps* i d'un *Univers de matèria* hagi anat acompanyada de la creació d'un *antitemps* i d'un *Antiunivers d'antimatèria*?

1.5 Els primers passos en l'escalada de la complexitat de la matèria

Prosseguim amb la descripció del fets en el *nostre* Univers. L'Univers continua la seva expansió, amb el consegüent refredament, i en la primera milionèsima de segon els quarks ja es reuneixen de tres en tres donant lloc a protons (nuclis d'hidrogen) i neutrons. *Passat el primer segon*, el *puré còsmic* està format per cinc poblacions de partícules elementals: protons, neutrons, electrons, neutrins i fotons; els protons i els neutrons, en xocar, donen lloc als deuterons, però els fotons xoquen amb ells i el escindeixen de nou en protons i neutrons.

En continuar l'expansió, la temperatura acaba per baixar a uns 10^9 K i ja cada vegada són menys els fotons capaços de trencar els deuterons que es van formant i, en haver deuterons "perdurables", la nucleosíntesi de l'heli-3 i de l'heli-4 és fàcil, ja que de fet el problema per a que aquestes nucleosíntesis tinguessin lloc era disposar de deuterons estables durant un cert temps.

Els fets explicats constitueixen l'anomenada *nucleosíntesi primordial*, que sols durarà uns tres minuts. Són els "tres primers minuts de l'Univers" tan detalladament relatats per Weinberg (5). En aquesta fase, parlem de nucleosíntesi: nucleosíntesi de l'hidrogen (síntesis del protó), del deuteri (síntesi del deuteró), etc. i no de *síntesi dels àtoms corresponents*, ja que a la temperatura existent l'atracció entre les càrregues elèctriques de signe contrari *encara* no poden "fer-se sentir".

1.6 Un apassionat al·legat contra certes idees extrapolades a partir de la "Física del punt"

Generalment, en Física més o menys elemental, allò que s'explica és la "Física del punt" en la qual s'admet, justificadament, que les lleis físiques compleixen la simetria T, d'acord amb la qual les dites lleis són invariants respecte a la inversió del temps, és a dir, es compleixen d'idèntica forma en les direccions cap endavant i cap enrera en el temps; ara bé, això no és cert a la realitat en què estem inserits, en la qual el Principi rector d'allò que succeeix, o pot succeir, és el Segon Principi de Termodinàmica (6).

H. Weyl dóna la següent definició de *simetria*: una cosa és simètrica, respecte una determinada operació, si sotmesa a la dita operació apareix exactament igual que abans d'haver-la sotmès a ella. Si es té un *cub* i se'l sotmet a l'operació "reflexió en un espill", la imatge obtinguda és un *cub* idèntic, indistingible, etc. al cub inicial, com qualsevol incrèdul pot comprovar construint un objecte corpori idèntic a la imatge que es veu a l'espill: el cub és, per tant, simètric respecte a l'operació de simetria "reflexió en un espill".

Aquesta definició de *simetria*, en la seva interpretació més àmplia, és útil per a discutir la *simetria de les lleis físiques*. Convé aclarir una qüestió de nomenclatura o llenguatge: dir que una llei física és simètrica respecte una determinada operació és equivalent a dir que és *invariant* respecte aquesta operació.

Suposem que, com probablement el lector haurà fet algun cop, projectem un vídeo familiar i, a continuació, el projectem "cap enrere", és a dir, *invertint la direcció del temps*. Molt probablement, la projecció "cap enrere" ens farà somriure o riure descaradament ja que succeeixen coses que *a la realitat, no poden succeir*: els nens s'elevan tranquil·lament de la terra a l'arbre; un ou esclafat es recompon sense problemes; etc., etc. Això que ens sembla tan obvi -és obvi que a la realitat *no pot passar* el que veiem que passa a la projecció "cap enrere"- no resulta en absolut obvi (al contrari, més aviat resulta contradictori) en interpretar els fets d'acord amb la Física (clàssica, relativística o quàntica) que se'ns explica. *Vexem-ho*.

Imaginem que el nostre vídeo té tant detall que mostra el moviment de totes les partícules constituents de les coses i persones que en ell hi intervenen. La simetria T, és a dir, la inversió en el temps (projecció "cap enrere") té l'efecte d'invertir totes les *velocitats (u)* i els *moments angulars*, però les acceleracions (**a**) i les *velocitats de canvi dels moments angulars* no canvien (**a** = du/dt , i s'han invertit els signes tant de **du** com de **dt**). Com les *forces* són les mateixes tant en la projecció "normal" com en la projecció "cap enrere", en aquesta projecció totes les partícules continuen obeint les lleis de la Física i, conseqüentment, per a la Física que se'ns explica, tan normal és el que passa a la realitat -és a dir, en la projecció del vídeo "cap endavant" (temps en una determinada direcció)- com el que passa en la projecció "cap enrere" (temps en la direcció inversa). Pomposament, la Física ens diu que "les lleis de la Física són invariants pel que fa a l'operació *inversió del temps*".

És obvi que en la rigorosa exposició que hem efectuat hi ha algun error ja que l'experiència demostra que en el món real les coses no van com s'ha exposat. L'error procedeix de no tenir en compte *-ja sigui perquè quasi mai se'ns diu explícitament* o, en qualsevol cas, *perquè no ens ho han repetit suficientment*- que, en principi, les lleis de la Física es postulen o es dedueixen o són vàlides per a *partícules aïllades* (Física del punt material), no per a partícules formant part d'un conjunt molt extens. Ignorant totes les altres partícules, a una partícula de l'immens conjunt comentat en els paràgrafs anteriors, *li és realment igual* que el temps vagi "cap endavant" o "cap enrere", però al conjunt de partícules considerat en la seva totalitat, *no li és igual*. Si les coses succeïssin com es veu que succeeixen en la projecció "cap enrere" s'estaria anant en contra del Principi fonamental que regeix el comportament de la realitat en que estem inserits, el Segon Principi de termodinàmica. Aquest Principi postula que en l'evolució d'un sistema aïllat l' *entropia* ha d' augmentar (o quedar-se igual) i això no succeeix a la projecció "cap enrere".

D'acord amb el "Principi de coherència" (7), si el Segon Principi regeix el comportament *actual* de la realitat de la qual en formem part, també devia regir l'evolució del Cosmos en les etapes inicials o, si més no, cal emprar-lo com a primera hipòtesi de treball mentre no es demostrï la seva invalidesa en aquelles condicions. Com ja hem afirmat fent recurs a les pròpies paraules de Hawking, "l'Univers primitiu no posseeix la simetria T" i no és el mateix anar "cap endavant" que anar "cap enrere".

1.7 Breu comentari final

Per a finalitzar, vull indicar, tot recurrent a les expressions mal definides però il·lustratives de "Ciència tova" i "Ciència dura", que la interpretació teòrica rigorosa de

la matèria esbossada en el present Capítol pertany a la part més *dura* de la Física *dura*. Confesso que, per exemple, em va resultar pràcticament inintel·ligible un article "de divulgació" (8) que vaig llegir fa uns anys per a donar més solidesa als meus coneixements.

BIBLIOGRAFIA I COMENTARIS

1.- Gabriele Veneziano, "The myth of the beginning of Time", *Scientific American*, May 2004, pp. 30-39

2.- En els textos científics, la temperatura es mesura en *graus kelvin* [Encara que les recomanacions de la IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry) indiquen la conveniència d'emprar el terme *kelvin* (sense anteposar-hi la paraula *grau*) el cert és que d'ordinari els científics encara empren l'expressió *grau kelvin*]. La *magnitud* del grau kelvin és la mateixa que la del grau celsius o centígrad però el zero de l'escala de temperatures és diferent: el *zero* en l'escala de graus kelvin correspon a -273 en l'escala de graus centígrads. Per tant, n'hi ha prou en restar 273 de la temperatura expressada en graus kelvin per a tenir la temperatura expressada en graus centígrads. De fet, per a temperatures molt elevades i aproximades, com els 10^{12} graus aquí indicats, és totalment indistint que siguin graus kelvin (K) qque graus centígrads ($^{\circ}\text{C}$).

3.- Stephen W, Hawking, "Historia del Tiempo. Del big bang a los agujeros negros", Editorial Crítica, Barcelona, 1989.

4.- El bilió català (i, de fet, el de l'Europa continental en general) és 10^{12} mentre que el bilió anglès i americà és 10^9 , és a dir, el nostre miliard. Anàlogament, la bilionèsima nostra és 10^{-12} , mentre que l'anglesa i l'americana és 10^{-9} . La rellevant importància dels Estats Units fa que en la nostra premsa hi hagi molta confusió sobre valor del terme bilió i relacionats.

5.- Steven Weinberg, "Los tres primeros minutos del universo. Una concepción moderna del origen del universo", Alianza Editorial, Madrid, 1977.

6.- L'autor ha elaborat aquest apartat, que ell considera particularment important, basant-se fonamentalment en:

J. R. Waldram, "The Theory Of Thermodynamics", Cambridge University Press, Cambridge, 1985, pag. 292 o apartat 19.2.

Richard P. Feynman, Robert B. Leighton, Matthew Sands, "The Feynman Lectures On Physics" Vol. 1. Addison-wesley Publishing Company, Inc., London 1963. Pàgina o Apartat 11-1.

7.- Christian de Duve, "Vital Dust. Life as a Cosmic Imperative", Basic Books, 1995.

8.- Michael J. Duff, *Scientific American*, **1998** (Feb.), 54-59. L'article porta per títol "The Theory Formerly Known as Strings" i com a subtítol "The Theory of Everything is emerging as one in which not only strings but also membranes and black holes play a role"

Capítol 2

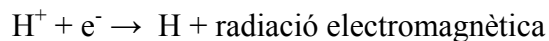
DEL "PURÉ CÒSMIC" A L'UNIVERS GALÀCTIC, PASSANT PER LA "SOPA DE GRUMS"

En l'Univers "*post-big bang*" immediat, es a dir, immediatament després dels "tres primers minuts", la major part de la homogèniament distribuïda matèria gasosa, estava constituïda, com s'ha dit, per electrons i nuclis atòmics d'uns pocs elements químics; la càrrega positiva d'aquests nuclis, conjuntament, compensava la càrrega negativa dels electrons. Amb molta diferència, els nuclis més abundants eren els de l'hidrogen (protons), però també hi havia una certa quantitat de nuclis d'heli (relació aproximada 1:10, en respecte als protons, molts pocs nuclis de deuteri (D o ^2H) (relació aproximada 1:100.000) i traces de nuclis de liti, beril·li i bor. Per simplicitat, a continuació només em referiré a l'element més abundant, l'hidrogen (1).

2.1 Naixement de l'àtom i de la molècula d'hidrogen

A conseqüència de la seva expansió, l'Univers es va anar refredant i les reaccions nuclears es van anar fent més i més rares. Passats, més o menys, *un milió d'anys* es va arribar a una temperatura d'uns deu mil kelvins, temperatura a la qual les forces electromagnètiques "ja es fan notar" i per això, tot unint-se els nuclis amb els pertinents electrons, van naixent els àtoms ... dels que hi havia nuclis!; naix també la molècula d'hidrogen, que està formada per la unió de dos àtoms. Simultàniament, en deixar de haver-hi electrons lliures, l'Univers es va fer transparent ; l'omnipresent radiació electromagnètica es va poder anar expansionant sense obstacles i la seva longitud d'ona es va fer (i continua fent-se) cada cop més llarga (2); aquesta radiació acabarà convertint-se en la que ara anomenem "radiació fòssil".

L'excés d'energia inherent a la formació dels àtoms a partir dels nuclis i els electrons pertinents (ja s'ha indicat que, bàsicament, allò que anava passant era la formació d'àtoms d'hidrogen per unió, un a un, de protons i electrons) es va anar alliberant per *emissió* de radiació electromagnètica (radiació del camp de la llum ultraviolada):



Cal donar-se compte que el sistema inicial (el conjunt de protons i electrons) disposava d'un mecanisme (la emissió de radiació electromagnètica) que li permetia evolucionar alliberant-se de l'excés d'energia originat en la formació d'entitats de *rang superior* (àtoms d'hidrogen) de contingut energètic inferior al de les entitats reaccionants. Si no existís un mecanisme per alliberar-se de l'excés d'energia, el protó i l'electró no s'haurien pogut unir donant lloc a un àtom d'hidrogen: en aproximar-se, senzillament "rebotarien" i continuarien la seva "vida independent" sense formació de l'entitat de rang superior que és l'àtom. Aquesta precisió és important.

Continuant amb el procés evolutiu, la pròpia expansió de l'Univers anava fent que les "trobades", els xocs, entre protons i electrons fossin cada vegada menys probables, el que explica que el gas interestel·lar mai arribés a estar constituït

exclusivament de partícules; el gas romania lleugerament ionitzat (3) i això va tenir conseqüències importants en els processos químics subsegüents. En aquest punt de la història de l'evolució, en què la formació d'àtoms d'hidrogen era ja *pràcticament* completa, l'Univers tenia uns *cinc cents mil* (5×10^5) *anys d'edat* i la seva *temperatura era d'uns 3000K*.

2.2 Entren en joc les forces gravitatòries

Lentament, el puré còsmic "post-big-bang" havia d'anar deixant de ser un "puré" homogeni per anar-se convertint en una "sopa de grums" lleugerament heterogènia ja que les condicions a les que s'anava arribant començaven a permetre l'entrada en joc d'un nou tipus de forces (forces que, fins el moment, les condicions existents no havien permès que es manifestessin): ens referim a *les forces gravitatòries*. Aquestes forces, *treien profit de les fluctuacions de densitat en el "puré"*, van donar lloc a uns efectes locals transcendents (iniciació de la formació de "grums") i, mentre l'Univers globalment s'anava expansionant, certes regions de matèria anaven col·lapsant donant origen a les *protogalàxies*. Amb aquest terme designem un objecte gasós *en camí* vers la seva transformació en *galàxia*, és a dir, vers la seva parcial concreció en regions materials diferenciades (*estels, etc.*); cal observar que en la protogalàxia s'està en camí de la concreció, de la fragmentació, però aquesta encara no ha tingut lloc.

En aquest punt és important que el lector es doni compte de la transcendent "càrrega oculta" que conté l'en aparença innocent expressió emprada a l'apartat anterior. Aquestes forces, *"treien profit de les fluctuacions de densitat en el "puré", van donar lloc..."* No estic preparat per a predir i explicar que hagués passat en un "puré" còsmic perfectament homogeni, com era el resultat del *big bang*, a temperatura suficientment baixa per a que els efectes de les forces gravitatòries es poguessin manifestar (4), però si es segur que *no s'haurien format "grums"*: per a la formació de grums era imprescindible que hi haguessin regions amb una densitat de massa superior a la de l'entorn. El procés evolutiu que va tenir lloc implica la intervenció d'una *ruptura de l'homogeneïtat* que, en certa manera, significa una segona ruptura de la simetria (la primera va tenir lloc amb el propi *big bang*). La justificació de les esmentades *fluctuacions de densitat*, que expliquen la ruptura de l'homogeneïtat, cau també en el camp de la Física més *dura*.

La *història de l'evolució global* s'exposa en aquest llibre adoptant com a fil conductor la progressiva organització d'una mínima porció de la matèria còsmica. Aquesta progressiva organització no hagués pogut tenir lloc en un medi perfectament homogeni: per a iniciar-se, era necessària una certa diferenciació, era necessària la ruptura de l'homogeneïtat perfecta. Els comentaris que s'acaben de fer són, per tant, de gran significació.

2.3 Continua el "col·lapse": la massa de Jeans

El problema següent que ens plantegem és explicar *com*, iniciat el procés de *concreció* del material còsmic (el "col·lapse", que és com se sol denominar aquest procés) aquest procés pot prosseguir donant lloc a una protogalàxia i continuar fins a donar origen a una galàxia. A nivell elemental, els coneixements generals aplicables condueixen a dificultats ja que ens indiquen que la compressió causada per la que podríem anomenar "auto-gravetat" (la gravetat actuant en l'interior de l'objecte

considerat, no em relació a un objecte extern) deu anar acompanyada d'un augment de la temperatura interior que, al seu torn, deuria originar un augment de la *pressió* gasosa que hauria de conduir finalment a compensar l'acció de la gravitació i, per tant, hauria d'acabar per detenir el col·lapse. D'altra banda, es comprèn intuïtivament que si el gas és poc dens les forces de auto-gravetat seran petites i és poc probable que el col·lapse tingui lloc (5).

La teoria no elemental ensenya que perquè el col·lapse tingui lloc, o sigui, per a que l'auto-gravetat superi la pressió interna, una determinada regió del cosmos cal que tingui una massa de magnitud superior a l'anomenada *massa de Jeans*, el valor aproximat de la qual és (si considerem, per a simplificar, que la regió considerada és esfèrica):

$$M_J/M_\odot = 2 \times 10^4 (T^3/n)^{1/2}$$

M_J = massa de Jeans

$M_\odot$ = massa solar (aproximadament, 2×10^{30} kg)

T = temperatura expressada en kelvins, K

n = densitat numèrica: nombre d'àtoms d'hidrogen, H, per metre cúbic.

Observi's que la massa de Jeans augmenta amb la tercera potencia de la temperatura i disminueix amb la densitat: per tant, si s'ha superat la massa de Jeans i la temperatura es manté constant (i més encara, si disminueix), com que n va augmentant (per efecte de la contracció gravitacional), la massa crítica de Jeans cada vegada té un valor més petit i el col·lapse i fragmentació va tenint lloc en "objectes" més i més petits.

2.4 Processos físics i químics a les protogalàxies : prossegueix el refredament del cosmos

Per a profunditzar en el tema, hem de conèixer quins són els *processos* que poden tenir lloc entre els "ingredients" constitutius de la protogalaxia i quines són les conseqüències *tèrmiques* i *materials* d'aquests processos. En la profundització que ens proposem potser sigui didàctic distingir entre processos físics (amb conseqüències exclusivament tèrmiques) i processos químics (amb conseqüències materials i, subsegüentment, tèrmiques).

2.4.1 Processos físics

En un gas a alguns deu mil kelvins, els àtoms d'hidrogen estan dotats d'una gran energia cinètica (gran velocitat) i els seus xocs poden donar lloc a processos d'excitació (pas de l'electró a òrbites més externes, de més energia) i, fins i tot, d'ionització o sigui, de separació de l'electró dels "dominis" del protó (o nucli de l'hidrogen) (vegis més endavant la raó per la qual no és considera que en xoc pugui formar-se la molècula d'hidrogen, H₂):



En aquest procés *es perd* energia cinètica, cosa que equival a dir que el gas es refreda, però podria objectar-se que en algun altre moment i/o en algun altra lloc, un protó i un electró es reuniran regenerant un àtom d'hidrogen i alliberant la mateixa

quantitat d'energia (6), la qual tornarà a escalfar el gas, però les coses no funcionen així. De fet, un protó i un electró es reuneixen regenerant un àtom d'hidrogen i alliberant energia, però aquesta energia *no* apareix en forma d'energia cinètica dels àtoms (augment de temperatura) sinó com a *radiació electromagnètica que s'escapa del gas*.

Una parcial analogia amb el que es porta explicat, la trobem en una conguda observació casolana: les llampades groguenques que s'observen quan cau sal a la flama de gas. Els ions sodi (Na^+) i clorur (Cl^-) de la sal comuna, a la temperatura de la flama, adquireixen una gran energia cinètica i en xocar entre ells els ions sodi s'ionitzen encara més (perden més electrons); quan en regions més fredes de la flama, el sodi "superionitzat" es torna a reunir amb electrons de l'entorn, no hi ha un re-escalfament sinó que es desprèn energia en forma de *radiació electromagnètica*, en forma de *llum de color groc*. En resum, també en aquesta experiència culinària hi ha hagut conversió d'energia cinètica en energia radiant.

Amb processos físics com l'explicat, la temperatura va poder anar disminuint, però no molt, ja que en disminuir la temperatura disminueix el nombre d'àtoms amb energia cinètica suficient per a, en el xoc, produir ionització.

2.4.2 Reaccions químiques i conseqüències tèrmiques subsegüents

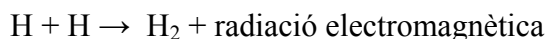
A la vista dels "ingredients" constitutius inicials que s'han especificat mes amunt, el lector amb una *certa* formació química (però no excessiva!) pronosticaria que el primer que succeirà en el gas protogalàctic és la unió de dos en dos dels àtoms d'hidrogen per a donar molècules d'hidrogen, H_2 ; el pronòstic es basa en què entre els seus coneixements de química hi consta l'extrema dificultat (aquí a la Terra!) de disposar d'hidrogen atòmic, per l'extraordinària "tendència" dels àtoms d'hidrogen a unir-se per a donar molècules. El lògic pronòstic del lector "amb una *certa* formació química" és erroni, però ambdós *fets experimentals*, la molt fàcil reacció, en el planeta Terra, dels àtoms d'hidrogen per a donar molècules d'hidrogen, i la seva molt difícil reacció a les protogalàxies, tenen la mateixa explicació, que es dona a continuació.

A partir d'un estat inicial consistent en àtoms d'hidrogen, la situació final d'equilibri és la corresponent a que la immensa majoria dels àtoms s'hagin unit donant molècules, ja que així l'entropia de l'univers de l'esdeveniment augmenta el màxim possible i es compleix el Segon Principi de Termodinàmica. Però a l'equilibri només s'hi arriba si existeix un mecanisme, un camí, per a què les molècules es puguin formar. Aquest "si" condicional és important, ja que pot ser que no hi hagi camí.

L'augment d'entropia en el procés que estem considerant el desencadena, en últim terme, l'alliberament d'energia que té lloc quan dos àtoms d'hidrogen s'uneixen donant lloc a una molècula. En altres termes: per a què hi hagi un augment d'entropia i dos àtoms d'hidrogen puguin passar de l'estat "dos àtoms d'hidrogen lliures" a l'estat "dos àtoms d'hidrogen lligats o units", és a dir puguin passar a constituir la molècula H_2 , *és necessari que pugui alliberar-se l'excés d'energia que el primer estat té en relació al segon*. Veiem si es pot o no es pot.

A causa de les característiques innates, íntimes, pròpies dels àtoms d'hidrogen i de les molècules d'hidrogen (les característiques d'aquestes derivades directament de les d'aquells) l'alliberament d'energia inherent al pas del estat "dos àtoms lliures" a l'estat

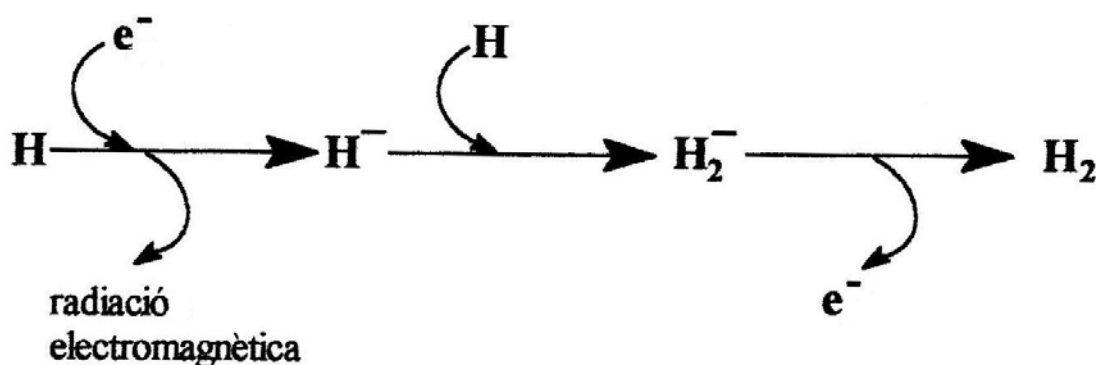
"dos àtoms lligats" no està permès que es faci per emissió de radiació electromagnètica: és a dir, la reacció



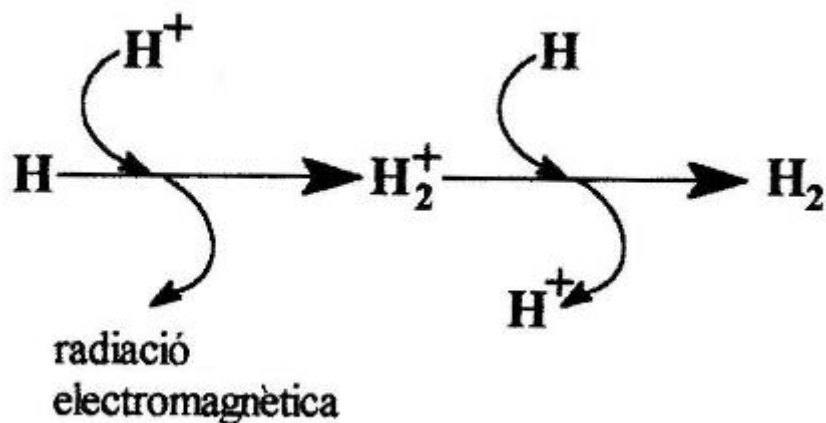
és una reacció *prohibida* que no té lloc i no representa un camí vàlid per a la formació de molècules ni en les protogalàxies ni en el planeta Terra.

Ara bé, existeixen altres mecanismes que permeten que el sistema pugui alliberar-se de l'excés d'energia. Un mecanisme o camí important implica la intervenció, en l'acte de col·lisió dels dos àtoms, d'un *tercer cos* que "s'emporti" l'excés d'energia; de fet, en les condicions del planeta Terra, la presència d'un tercer cos (un altre àtom d'hidrogen, àtoms o molècules d'impureses, superfícies dels recipients, etc.) és *pràcticament inevitable* i d'aquí deriva la *dificultat de preparar hidrogen atòmic en els laboratoris terrestres*. En canvi, en les protogalàxies i en els espais interestel·lars, les densitats materials són molt petites i la probabilitat de presència d'un tercer àtom "en el lloc oportú" és també molt petita i per això la formació de molècules d'hidrogen, H_2 , per aquest mecanisme només té lloc en una extensió mínima.

Dos camins importants que possibiliten la unió de dos àtoms d'hidrogen per a donar una molècula d'hidrogen són del tipus que, ben mirat, podríem dir *catalític* (7): en un d'ells, el *catalitzador* són els electrons (II·lus. 2.1) i en l'altre, els protons (II·lus.2.2).



II·lus. 2.1



Il·lus. 2.2

No sembla oportú estendre'ns aquí en aquests temes però si volem recordar que anteriorment (apartat 2.1) ja s'ha indicat que "gas romania lleugerament ionitzat i això va tenir conseqüències importants en els processos químics subsegüents".

2.5 L'hidrogen molecular, com a refrigerant

Es calcula que, com a conseqüència del conjunt de processos operants, en el gas protogalàctic hi havia una o dos molècules (H_2) per cada milió d'àtoms (H), però fins i tot en aquesta petita proporció, la "col·laboració" de l'hidrogen molecular al refredament de la protogalàxia va ser molt important ja que l'hidrogen molecular, com a "refrigerant", opera en una zona de temperatures -per sota dels deu mil kelvins- en la qual l'hidrogen atòmic no es efectiu com a "refrigerant".

Bàsicament, allò que passa és que a les temperatures ja més baixes que ara es consideren, els xocs del àtoms d'hidrogen amb les molècules són capaços d'excitar-les *vibracionalment* (pas de la molècula a estat vibracionals d'energia superior a la del estat fonamental) (1) i subsegüentment, el retorn de la molècula a l'estat fonamental es fa emetent radiació electromagnètica, que s'escapa de la protogalàxia. En resum, "s'ha perdut" part de l'energia cinètica que les partícules tenien en xocar i, per tant, la protogalàxia s'ha refredat. Mitjançant aquests processos, pot arribar-se a *temperatures de l'ordre dels 100K*.

Una altra experiència culinària -aquesta referent a l'ús del microones- ens aporta una analogia que pot facilitar la comprensió d'allò que es porta exposat. La radiació electromagnètica que anomenem *microones* és l'apropiada per a interaccionar amb els *estats rotacionals* de les molècules; a causa d'això, en el forn de microones s'escalfen els *aliments* -que sempre tenen una quantitat substancial d'aigua, constituïda per molècules triatòmiques H_2O (que no són esferes) que poden passar a estats rotacionals excitats- i, en canvi, el plat que conté l'aliment no s'escalfa ja que en l'estructura constitutiva del vidre o la llosa no hi ha molècules senzilles, "discretes", que puguin passar a estats rotacionals excitats (les seves estructures consisteixen fonamentalment en un extens

entramat poliatòmic, amb milers i milers d'àtoms units entre ells). Si s'observa que el plat, la tassa, etc. s'han escalfat, es deu al contacte amb l'aliment calent.

En els aliments, l'energia de les molècules d'aigua rotacionalment excitades acaba equilibrant-se amb les altres possibilitats d'excitació energètica, amb inclusió de l'energia cinètica de les diferents entitats moleculars i tot això equival simplement a un augment de temperatura del conjunt. En bona aproximació, per tant, l'escalfament dels aliments que té lloc al forn de microones, representa el *procés invers* del tram final del refredament del "forn" protogalàctic.

2.6 Resum i perspectives

Retornant a la principal línia argumental, podem resumir la situació dient que el conjunt d'esdeveniments esbossat intenta explicar com el "puré còsmic", a través de la seva conversió en una incipient "sopa de grums còsmica", va generar primer les protogalàxies i finalment va convertir-se en un *Univers de galàxies*, en el qual ara distingim els estels dels espais interestel·lars.

L'*escalada de la complexitat* en la matèria havia continuat amb bon peu. Mentre que l'Univers, considerat globalment, s'anava expansionant i omplint-se de radiació electromagnètica més i més "degradada" de longitud d'ona cada vegada més llarga (o si es prefereix, constituïda per *fotons o quanta unitaris* d'energia cada vegada més petita), una petita part d'ell s'anava "organitzant" progressivament passant-se de nuclis i electrons separats a entitats de rang superior, els àtoms, i d'aquests, a entitats de rang encara superior, les molècules.

BIBLIOGRAFIA I COMENTARIS

1.- Per a una lectura plenament profitosa del present Capítol, es convenient tenir uns mínims coneixements dels estats electrònics dels àtoms i dels estats electrònics, vibracionals i rotacionals de les molècules, així com de l'anomenat *camp electromagnètic*. En un *resum d'urgència, incomplet i poc rigorós*, podríem explicar el següent:

a) La *radiació electromagnètica* és una successió contínua de "llums", successió de la qual ara només és necessari comentar les zones o camps de les llums ultraviolada, visible, infrarroja i de les microones. Tota radiació està constituïda per *fotons*, cadascun dels quals té una energia $h\nu$, expressió en què h és la constant de Planck i ν la *frequència* de la radiació: quan més gran és la frequència, més gran és l'energia del fotó. La *frequència* ν i la longitud d'ona λ estan en relació inversa. L'ordre de frequències de les radiacions indicades, és el següent: ultraviolada>visible>infrarroja>microones; per tant, l'ordre de longitud d'ones és: microones>infrarroja>visible>ultraviolada.

b) Els àtoms poden tenir els electrons (o l'electró, en el cas de l'hidrogen) en diferents òrbites i cadascuna d'aquestes situacions representa un *estat estable*; el primer estat estable és el d'energia *més petita*. Els altres estats s'anomenen estats *excitats*: en passar d'un estat excitat a un altre menys *excitat*, o al d'energia més petita, s'*emet energia en forma de radiació ultraviolada o visible*, mentre que, per a que tingui lloc el procés invers (pas a un estat *més excitat*), l'àtom necessita absorbir radiació d'aquests mateixos camps.

c) Les molècules també poden tenir diferents *estats electrònics estables* i, com passa amb els àtoms, la "interconnexió" entre els estats s'efectua mitjançant radiació ultraviolada o visible. D'altra banda, els àtoms dins de les molècules "vibren" amb més o menys intensitat i existeixen diversos *estats vibracionals estables*, poden passar-se d'uns als altres per emissió o absorció de *radiació infrarroja*, els fotons de la qual són, com s'ha dit, d'energia inferior als de les radiacions ultraviolada i visible. I, finalment, les molècules poden *rotar*, girar sobre elles mateixes, i existeixen diversos *estats rotacionals estables*, passant-se d'uns als altres per emissió o absorció de radiació del *camp de les microones*, els fotons de les quals, com ja s'ha dit, són els d'energia més petita (en el context que ara es comenta).

2.- Per la relació inversa que hi ha entre la *longitud d'ona* i la *frequència* de la radiació. dir que la longitud d'ona es fa cada vegada més llarga (més gran) és el mateix que dir que la frequència es fa cada vegada més petita.

3.- Els ions són àtoms (o conjunts d'àtoms) amb càrrega elèctrica, a causa de tenir electrons en defecte o en excés en relació a la càrrega nuclear positiva.

4.- Potser no ocorreria res perquè tota atracció seria anul·lada per una altra d'efectes oposats.

5.- Per a l'actualització del seus coneixements sobre els temes del present Capítol, a l'autor li ha resultat molt profitós l'estudi del següent llibre: T. W. Hartquist, D. A. Williams, "The chemically controlled cosmos. Astronomical molecules from the Big Bang to exploding stars", Cambridge University Press, 1995.

6.- D'acord amb el Primer Principi de Termodinàmica, *l'energia ni es crea ni es destrueix* (solament es transforma) i per això aquesta energia ha de ser igual, *en quantitat*, a la perduda en el procés invers.

7.- Un catalitzador és un agent que facilita (accelera) una reacció i que és recupera en acabar el procés.

Capítol 3

L'ESCENARI ESTEL·LAR: LA "CREACIÓ" DEL SISTEMA DE PERIODES

En les condicions esbossades en acabar l'anterior Capítol, la matèria continua condensant-se i en ordre jeràrquic (potser no cronològic) ens trobem a l'actualitat amb l'existència de super-cúmuls, cúmuls i galàxies (com la nostra Via Làctia). Des d'un punt de vista, diríem, funcional, les galàxies són com màquines capaces de transformar la matèria còsmica gasosa en estels. Als estel construïts amb material "de primera mà" procedent directament del *big bang*, se'ls anomena *estels de la primera generació* i, a continuació, em referiré fonamentalment a elles. Per l'interès que per a nosaltres, els humans, té el nostre Sol, val la pena posar de relleu que *el sol no es un estel de la primera generació*.

3.1 Les nanes blanques

Dins les galàxies, l'energia gravitatòria es va transformant en energia cinètica de les entitats constitutives (és a dir, en energia calorífica o, més senzillament, calor) i les masses "compactants", és a dir, els estels, es van re-escalfant mentre que l'Univers, en el seu conjunt, es va refredant.

En primer lloc, i al llarg de molt temps, l'únic que passa és la "combustió" - "combustió" en sentit nuclear- de l'hidrogen donant heli; aquest és el procés que en l'actualitat està tenint lloc en els estels anomenats de *la seqüència principal*, entre els quals s'hi troba el nostre Sol. L'evolució subsegüent a aquesta "combustió", depèn de la massa inicial de l'estel.

Si, com passa en *la immensa majoria del casos*, la massa de l'estel en formar-se era "petita" (inferior a unes 8-10 vegades la massa del Sol), es consumeix tot l'hidrogen per a donar heli, i l'heli per a donar carboni i oxigen (veure més endavant) i, finalment, l'estel -format bàsicament per una barreja de carboni i oxigen, amb petits restes d'hidrogen i oxigen a la superfície- s'incorpora com a *nana blanca* al mal anomenat "cementiri nuclear". Diem "mal anomenat" ja que els estels que en ell "reposen", de fet no estan mortes ni molt menys i donen lloc a una sèrie d'interessants processos sobre els quals no és aquí lloc per a profunditzar-hi (1).

3.2 La gravitació com a gallet evolucionari: nucleosíntesi estelar

Si la massa de l'estel en formar-se era "gran", cosa que passa en una fracció mínima dels estels (fracció de l'ordre del 0,03-0,05 %), el re-escalfament local acabarà conduint a temperatures molt elevades i, començant als 10^6K , té lloc una fructífera etapa de nucleosíntesi, *la nucleosíntesi estelar* (recordi's que en la que hem anomenat etapa còsmica havia tingut lloc la *nucleosíntesi primordial*). En aquests estels s'entra en una nova fase de progrés dins l'*escala de la complexitat*, de progrés en l'organització de la matèria.

Per tal de centrar el tema de la nucleosíntesi estel·lar seguirem l'evolució d'un hipotètic estel de gran massa, de la primera generació (en Astronomia observacional aquests estels formen part de l'anomenada "Població II"), en el qual ja s'ha arribat a una temperatura de l'ordre dels 10^6 K. A aquesta temperatura, l'hidrogen existeix com a àtoms ionitzats (protons) i l'estel és una massa de *plasma d'hidrogen*, d'una densitat d'uns 100 g/cm^3 (recordi's que la densitat de l'aigua és de 1 g/cm^3), en la qual els electrons formen com un gas, sense que pugui parlar-se de correspondència unívoca protó-electró, formant àtom d'hidrogen.

En certa manera, en arribar al estadi a que hem arribat, pot dir-se que la gravitació ha complert amb la seva missió de *gallet evolucionari* ja que, gràcies a la contracció gravitacional, els protons estan dotats d'una energia cinètica que els permet vèncer la repulsió electrostàtica ("les càrregues del mateix signe es repel·leixen", ens ensenya l'electrostàtica elemental) i posar-se en contacte íntim. D'aquesta manera poden entrar en joc, *de nou*, les forces nuclears, el valor de les quals només és significatiu (i molt significatiu, certament!) a distàncies molt petites; en entrar en joc aquestes forces, s'inicia l'*evolució química* que té lloc en una sèrie de sub-etapes que impliquen delicats equilibris entre la contracció gravitatòria i l'expansió tèrmica. Aquests equilibris perduren al llarg de milers de milions d'anys.

A continuació s'expliquen els punts més destacats de l'evolució química i per fer més fàcil la lectura del text és recomanable tenir a mà un Sistema periòdic, inexcusable referència quan es parla dels *elements químics*.

3.3 Combustió de l'hidrogen (3)

A temperatures de l'ordre de 10^6 K, a partir de la reacció inicial en la qual s'uneixen dos protons per a donar lloc a un deuteró (nucli de l'element deuteri) i un positró o electró positiu (acompanyat d'un neutrí), es posen en marxa diverses *cadena*s de reaccions nuclears (les anomenades *seqüències p-p*) mitjançant les quals l'hidrogen (passant per la formació de l'isòtop [4] de l'element heli que es designa com heli-3) és *finalment cremat* a l'isòtop ordinari heli-4. La reacció inicial, primària, transcorre molt lentament i s'ha calculat que donada una certa quantitat d'hidrogen, han de passar uns 10^{10} anys per a què es redueixi a la meitat. També transcorre molt lentament la combustió de l'hidrogen a heli-4 per intermedi de l'anomenat *cicle de Bethe* (o *cicle CON*, carboni-oxigen-nitrogen), cicle catalític que entra en joc quan les cadenes p-p i reaccions subsegüents han proporcionat els "ingredients" necessaris.

Els estels de l'anomenada *seqüència principal* del diagrama de Hertzsprung-Russell (diagrama H-R) estan a l'estadi de combustió de l'hidrogen. El nostre Sol és un estel que està en aquesta fase i l'energia que d'ell rebem (pràcticament tot el subministrament d'energia útil rebut pel planeta Terra) procedeix d'aquesta combustió. S'ha calculat que la llum solar (*l'energia radiant* solar) incideix sobre la Terra a raó de 10^{21} kJ/any (5); d'aquests kilojoules, aproximadament un 50% es reflecteix immediatament a l'espai, mentre que l'altre 50% es absorbit com a calor que després és ràpidament i pràcticament per complet, irradiat a l'espai. Solament un 0,1% del total, és a dir, uns 10^{18} kJ/any, queden "lligats" com *energia interna* (*energia química*), fonamentalment en els carbohidrats, gràcies a l'*acció clorofílica* de les plantes verdes.

3.4 Combustió de l'heli

Prosseguim amb la història evolutiva de l'estel teòric que ens serveix de model. Mentre s'està cremant (com sempre, cremant en el sentit de combustió nuclear) l'hidrogen, el volum de l'estel no sofreix variació acusada, ja que les forces gravitacionals queden compensades per la pressió tèrmica, però quan l'hidrogen comença a ser escàs, aquelles guanyen i té lloc una nova contracció de la massa estel·lar, arribant-se a temperatures de l'ordre dels 10^8 K i densitats a l'entorn de 10^5 g/cm³ (recordi el lector, un cop més, que la densitat de l'aigua és de 1 g/cm³!). En aquestes condicions té lloc la combustió (nuclear) de l'heli. Cal tenir present que els nuclis de hidrogen-1 (protó), hidrogen-2 (deuteró) i hidrogen-3 o triti són els que es cremen més fàcilment ja que en tenir una sola càrrega positiva necessiten menys energia cinètica (temperatura) per a superar la repulsió electrostàtica i apropar-se a les petites distàncies a les quals les forces nuclears són operatives. En la combustió de l'heli-4 es nucleosintetitzen bàsicament els isòtops ordinaris del carboni i del oxigen, o sigui, el carboni-12 i l'oxigen-16.

Amb la combustió nuclear de l'heli-4 s'ha alliberat pràcticament tota l'energia potencial màssica de l'estel i ha transcorregut la major part de la seva existència, però els resultats pel que fa a la creació d'elements químics, encara són molt pobres: fonamentalment, s'ha creat hidrogen-2, hidrogen-3, heli-3, heli-4, carboni-12 i oxigen-16.

En el context de l'Astronomia observacional es diu que, en el diagrama H-R, l'estel "surto" de la seqüència principal i "es dirigeix" cap a la regió de les *gegantes roges*.

3.5 Combustió del carboni i de l'oxigen, i del silici

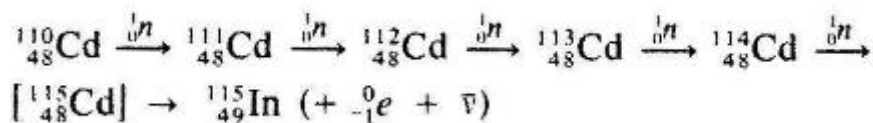
Esgotat l'heli, l'estel sofreix una nova contracció i el consegüent augment de temperatura i densitat possibilita la combustió del carboni i de l'oxigen, formant-se, entre d'altres, els elements neó, sodi, silici i fòsfor. A continuació, és el silici l'element que es emprat com combustible nuclear i, per fusió amb l'heli-4, dona lloc, entre d'altres, al sofre i l'argó.

A l'actualitat s'admet que la combustió del silici és la base de la nucleosíntesi dels nucleïds amb nombre de massa entre 28 i 57, nucleïds als quals corresponen els màxims valors de l'energia d'enllaç per nucleó. També s'acostuma a dir que amb aquests nucleïds s'arriba al màxim de l'anomenada *corba d'estabilitat*,

3.6 Captura de neutrons i "escalada" definitiva del Sistema periòdic

Dins de la massa estel·lar, en la fase evolutiva a que s'ha arribat en la descripció feta fins ara, hi ha abundància de *neutrons*, originats en reaccions secundàries que no és oportú comentar aquí. Els neutrons són molt bons *reactius nuclears* ja que, com el seu nom indica, són neutres i no tenen problemes de repulsió electrostàtica per a aproximar-se als nuclis. La captura neutrònica, "rematada" amb emissió β (8), acaba conduint a un element de nombre atòmic superior al de partida i, per tant, tenint en compte la facilitat

en que té lloc, representa un excel·lent mecanisme per a "escalar" el Sistema periòdic. Donem un exemple a títol il·lustratiu:



El cadmi és l'element químic que ocupa la posició 48 dins del Sistema periòdic, la qual cosa equival a dir que el nucli de l'àtom de cadmi té 48 càrregues positives; en altres termes, 48 dels nucleons (el terme nucleó significa partícula constituent del nucli) són protons: l'isòtop cadmi-110 té un número de massa (o número màssic) de 110 i això equival a afirmar que en el nucli, a més de 48 protons, hi ha uns altres 62 (110 - 48) nucleons que són neutrons. El nombre de neutrons pot augmentar, de manera que existeixen diversos isòtops *estables* del cadmi, però en arribar al que seria l'isòtop cadmi-115 resulta que el sistema ja no és estable i s'estabilitza emetent un electró (la qual cosa sempre té lloc amb l'emissió simultània d'un *antineutrí*). La conseqüència és que el nucli ha augmentat en una unitat de càrrega positiva, és a dir, "s'ha escalat" una posició en el Sistema periòdic: el nou element, que ocupa la casella 49, s'anomena *indi*.

Per successives captures neutròniques, "rematades" amb emissió β , sembla que es podrien anar sintetitzant nuclis indefinidament, però no és així i amb la síntesi del bismut-209 s'arriba al nucleid més pesat *perfectament estable*; a pesar de la seva inestabilitat a l'estel es sintetitzen també els nucleids que, *en terminologia de la Química terrestre*, es coneixen com *nucleids radioactius* (9).

Com veurem al Capítol següent, el nostre planeta s'ha format amb els materials sintetitzats en les nucleosíntesis estel·lars i allò que resulta evident és que l'antiguitat del planeta i els temps de semidesintegració dels nucleids de número atòmic superior a 83 són tals que, en l'actualitat, a la Terra, només es troben els nucleids amb número atòmic *no superior a 92*. En altres paraules, el Sistema periòdic *terrestre i natural*, arriba fins l'element 92, que és l'urani.

3.7 Fi de l'escenari estel·lar i inici de l'escenari interestel·lar

A la vida del nostre hipotètic estel, arriba un moment en que es trenca el delicat equilibri que regia la seva evolució i es produeix una brusca discontinuïtat, una "catàstrofe" que condueix a la dispersió còsmica de la matèria estel·lar (l'Astronomia observacional detecta *supernoves*, *noves*, etc.).

El lector podria preguntar-se si tot el treball de *síntesi*, d'*organització* de la matèria que ha tingut lloc en el "forn" estel·lar (organització d'una petita part feta, com sempre, a càrrec d'una més gran desorganització de la resta de l'Univers) ha estat un treball inútil. En absolut: els diversos nuclis, i el corresponents electrons (la matèria, en el seu conjunt, és neutra), no han desaparegut sinó que, senzillament, s'han dispersat per l'espai, refredant-se. S'ha creat l'anomenat univers fred i, amb la seva creació, entra en joc un nou escenari: *l'escenari interestel·lar*.

BIBLIOGRAFIA I COMENTARIS

- 1.- R. Canal, "Supernoves termonuclears, estels de neutrons i la Física de les nanes blanques", Memorias de la Real Academia de Ciencias y Artes de Barcelona, Tercera època, Núm 946, Vol. LVII, Núm. 1, Barcelona, 1997.
 - 2.- Aquest Capítol es nodreix, fonamentalment, d'allò que s'exposa en el llibre del propi autor, "Química General", Editorial Alhambra, Madrid 1981. L'interès de l'autor per aquests temes es va iniciar amb la lectura dels següents articles: A. G. W. Cameron, "Nuclear Astrophysics", *Am. Rev. Nucl. Sci.* **1958**, 8, 299-326; G. Burbidge, *Ann. Rev. Nucl. Sci.* **1962**, 12, 507-576.
 - 3.- En el context nuclear de la present exposició, el terme "combustió" té un significat diferent al clàssic: l'oxigen no intervé per a res en la reacció. Aquí, el terme "combustió" només significa que el material "cremat" desapareix per a donar lloc a un altre, amb desprendiment d'energia (recordi's la bomba d'hidrogen o la de fusió).
 - 4.- Tots els àtoms d'un mateix element tenen el mateix *número atòmic* Z , que coincideix amb el número de *càrregues positives del nucli* i amb la *casella* que l'element ocupa en el Sistema periòdic (S. P.): l'hidrogen ocupa la casella 1 del S. P. i tots els àtoms d'hidrogen tenen número atòmic 1; l'heli ocupa la casella 2 del S. P. i tots els àtoms d'heli tenen número atòmic 2; ... ; el carboni ocupa la casella 6 del S. P. i tots els àtoms de carboni tenen número atòmic 6; etc. De fet, quan es dona el nom d'un element, el número atòmic ja es sobreentén.
- Els *isòtops d'un element* tenen, obligadament, el mateix número atòmic Z (ja que si no el tinguessin ja no serien el mateix element), però diferent número de massa; així, per exemple, de l'hidrogen existeix l'hidrogen-1, de massa 1, que és l'isòtop més abundant, el "normal", podríem dir, però també es coneixen bé l'hidrogen-2, de massa 2 (que té nom propi: *deuteri*), i l'hidrogen-3 (que també té nom propi: *triti*); de l'heli, es coneixen bé l'heli-3 i l'heli-4 (que és el més abundant); del carboni, el carboni-12 (que és el més abundant), el carboni-13 i el carboni-14; etc.
- 5.- Una caloria (cal) equival a 4,18 J (jouls).
 - 6.- La *fórmula d'Einstein* és: $\Delta E = \Delta m \cdot c^2$, en la qual ΔE és el balanç d'energia, Δm el balanç de massa i c , la velocitat de la llum ($2,99792 \times 10^8$ m/s). Una determinada quantitat de massa pot convertir-se, en les condicions apropiades, en la quantitat d'energia numèricament indicada per aquesta fórmula. Per tant, la massa és una *reserva d'energia* i, consegüentment, té sentit parlar d'"energia potencial massica".
 - 7.- El terme *nucleid* és pràcticament equivalent al d'*element*, però amb ell s'emfatitza que s'està fent referència a tots els isòtops possibles de l'element.
 - 8.- El terme "*emissió β* " es va introduir durant l'estudi de la radioactivitat terrestre i, amb el temps, ha esdevingut equivalent a "feix d'electrons".
 - 9.- No sembla que es tingui coneixement exacte de fins a quin punt s'"escala" el Sistema periòdic al llarg de la nucleosíntesi estel·lar. Aquí, en el planeta Terra, en laboratoris especialitzats, es van "re-sintetitzant" ("re-sintetitzant" en el sentit que potser algun dia

havien existit però ràpidament s'havien desintegrat) elements cada vegada més pesats. Al final de l'any 2004, la IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry) havia admès la síntesi de tots els elements fins al de número atòmic 111 (pel qual ha proposat el nom *roentgenium* i el símbol Rg), encara que, en alguns casos, el nombre d'àtoms sintetitzats no hagi superat els deu. D'altra banda, la síntesi dels elements 112, 113, 114, 115, 116 i 118 ha estat publicada (i en ocasions, retractada) però no ha estat confirmada per la IUPAC.

Capítol 4

L'ESCENARI INTERESTEL·LAR

A l'espai, els nuclis i els electrons es van unint donant àtoms, molècules, ions i radicals de diversa complexitat, mentre que les forces gravitatòries continuen actuant. Quan ho fan sobre grans quantitats de massa, aquestes forces donen lloc a *estels de la segona generació*: el nostre sol és un d'aquests estels o, potser, d'una generació subsegüent. A partir de quantitats de massa més petites, s'originen, d'entre altres cossos, els planetes, els meteorits i l'anomenada pols estel·lar, interestel·lar o còsmica, constituïda per milers de milions de *grans de matèria sòlida*; aquests *grans* poden arribar a tenir (a l'igual que els fums terrestres) un diàmetre de l'ordre del micròmetre, la qual cosa es molt a escala atòmica.

4.1 Núvols interestel·lars

Concretant-nos a la nostra galàxia (1), l'*espai interestel·lar*, es a dir, l'espai entre els estels, està constituït bàsicament per un gas molt tènue, de molt poca densitat (densitat numèrica, $n \approx 10^4 \text{ H/m}^3$) (temperatura d'uns 10^6 K), junt amb un altre gas una mica més dens ($n \approx 10^6 \text{ H/m}^3$) (temperatura d'uns $10^3 - 10^4 \text{ K}$) i inserides en aquest entorn hi ha *núvols* més densos de gas més fred els quals, a pesar del seu insignificant volum (en termes relatius), contenen quasi tota la massa del medi interestel·lar.

Es distingeixen dos tipus de *núvols* freds: els *núvols difusos*, amb temperatures de l'ordre dels 30-100 K i densitats numèriques n de l'ordre de 10^8 H/m^3 ; i els *núvols obscurs*, amb temperatures de l'ordre dels 10-30 K i densitats numèriques n de l'ordre dels $10^9 - 10^{10} \text{ H/m}^3$. Precisament aquesta elevada densitat, que implica una elevada concentració de partícules de pols, explica que aquests núvol siguin obscurs.

4.2.-Acció catalítica de les superfícies

Una idea important per a la interpretació de l'*escalada de la complexitat* en l'escenari interestel·lar és l'*acció catalítica o cooperativa de la superfície* de la pols interestel·lar. D'acord amb les idees més modernes, l'efecte cooperatiu de les superfícies cal també tenir-lo molt en compte al llarg de l'etapa evolutiva que condueix als sers vius.

Al contrari d'allò que passa en l'interior d'un objecte concret, diferenciat del seu entorn, a la seva superfície -que és la regió limitant que el defineix coma tal objecte diferenciat- queden sempre forces atractives residuals que queden satisfetes quan sobre ella -la superfície- es dipositen "impureses" que no són altra cosa que espècies químiques -molècules, ions, radicals- de naturalesa diferent a la del propi material constitutiu de la superfície. Això explica la gran dificultat que hi ha en els laboratoris terrestres de disposar de superfícies "perfectament netes": les molècules d'aigua adherides a les superfícies són pràcticament inevitables.

El *diamant* proporciona un exemple aclaratori senzill d'això que acabem d'exposar. Com és ben sabut, en el diamant cada àtom de carboni s'uneix a uns altres quatre àtoms de carboni mitjançant valències que es dirigeixen del centre (on resideix el nucli del carboni) als vertexs d'un tetràedre (Il·lus. 4.1). Emperò, l'extensa, extensíssima trama d'enllaços, perfecta i completa a l'interior, en arribar a la superfície del "tros" de diamant considerat s'ha d'acabar tot deixant insatisfeta la tetravalència dels àtoms de carboni que a la superfície es troben. A la il·lustració, s'intenta representar una mínima porció de la *superfície superior* del diamant i, per a una major claredat, les valències "residuals" es representen per traços verticals més gruixuts. Grups OH (hidroxil), àtoms d'hidrogen i "impureses" químiques diverses tenen cura de satisfer aquestes "valències residuals".



Il·lus. 4.1

Per sort per a l'*escalada de la complexitat*, les superfícies de la pols estel·lar tampoc romanen "perfectament netes". Gran part d'aquesta pols es troba recoberta d'aigua, millor dit, d'una capa de gel i espectroscòpicament (veure més endavant), s'ha detectat, per exemple, la presència de monòxid de carboni (CO) "dissolt" en la capa de gel.

Entre els especialistes, a l'actualitat la idea prevalent és que, diríem, una meitat dels àtoms d'oxigen, carboni i nitrogen existents en els espais interestel·lars es troben dissolts en la matriu de gel, donant lloc a concentracions locals *infinitament superiors* a les concentracions existents en els espais circumdants. En els laboratoris terrestres s'estan investigant les reaccions en matrius sòlides i, per exemple, s'ha vist que per acció de la radiació ultraviolada, el monòxid de carboni reacciona amb la pròpia aigua que constitueix la matriu de gel.

Les condicions ambientals als espais interestel·lars condicionen que els processos que van tenint lloc siguin ja els *molt moderadament energètics* propis de la Química terrestre i les seves extensions, com la Fotoquímica. La Química interestel·lar de moment sembla complicada (potser perquè encara sigui poc coneguda) però hi ha un fet que convé posar de relleu: la *perdurabilitat* d'espècies químiques que en condicions terrestres qualificaríem de *molt reactives* i, consegüentment, de vida efímera (en condicions ordinàries de treball). L'explicació és senzilla: als espais interestel·lars, les entitats microcòsmiques (molècules, radicals, etc.) un cop formades en els anomenats núvols negres, es troben en unes condicions de *dilució* molt elevada (que fan improbable els xocs entre d'elles o el contacte amb les matrius de gel); la temperatura és baixa; i queden protegides dels efectes de les radiacions procedents dels estels mercès a que les radiacions són dispersades per les partícules responsables de la pròpia opacitat del medi.

4.3 Tècniques de detecció

A la temperatura mínima imaginable, el 0 absolut (0 K), totes les entitats microcòsmiques (àtoms, molècules, etc.) ocupen els nivells més baixos de les diferents

opcions energètiques que la seva constitució les hi ofereix i, conseqüentment, no hi ha fenòmens espectroscòpics observables. En els núvols dels espais interestel·lars les temperatures són baixes, entre 5 i 200 K, però superiors a 0 K, i per això una proporció significativa de molècules ha d'ocupar temporalment *nivells energètics rotacionals excitats* (és a dir, superiors al nivell mínim) i d'aquests nivells poden passar a nivells inferiors tot *emetent radiació de la pertinent longitud d'ona*; d'altra banda, per diversos mecanismes (com és el xoc entre elles), hi ha molècules que passen de nivells energètics inferiors a nivells superiors.

Allò que, en forma molt simplificada i rudimentària, s'ha exposat en el paràgraf anterior, significa que hi ha possibilitat d'estudi dels espais interestel·lars mitjançant un determinat tipus d'*espectroscòpia*, l'espectroscòpia que s'ocupa de la zona de l'espectre electromagnètic corresponent a les longituds d'ona que entren en joc en el tipus de processos a que ens hem referit (2).

Precisament, entre els avenços més espectaculars de l'Astrofísica es troba la detecció d'espècies químiques a l'espai, facilitada per l'ús de sondes espacials i pel desenvolupament de radiotelescopis capaços d'operar en el camp de les microones i de les ones milimètriques, és a dir, a freqüències compreses entre 1 i 200 GHz. Naturalment, continuen també sent emprats altres tipus d'espectroscòpia diríem més clàssics, que operen sobre radiació infra-roja, hertziana, etc. En aquestes investigacions treballen conjuntament, químics, espectroscopistes i astrònoms.

En els espectres rotacionals (regió de 1-200 GHz), les bandes (línies) són molt estretes i apareixen en trames molt característiques, de manera que l'"empremta dactilar" permet la identificació unívoca d'una espècie química, si ja era coneguda en "química terrestre" i el seu espectre s'havia registrat prèviament. En qualsevol cas, cal tenir en compte que, en general, en els laboratoris terrestres les espècies químiques que es preparen són *barreges isotòpiques* en la proporció derivada de l'abundància natural dels diferents isòtops: per exemple, a la Terra, d'ordinari (si és necessari pot també treballar-se amb les espècies isotòpiques pures) en preparar monòxid de carboni, CO, en realitat s'està preparant una barreja de $^{12}\text{C}^{16}\text{O}$, $^{12}\text{C}^{17}\text{O}$, $^{12}\text{C}^{18}\text{O}$, $^{13}\text{C}^{16}\text{O}$, $^{13}\text{C}^{17}\text{O}$ i $^{13}\text{C}^{18}\text{O}$, barreja en la qual l'espècie preponderant és, amb molta diferència, $^{12}\text{C}^{16}\text{O}$. Emprant aquesta "barreja", l'espectre rotacional enregistrarat és la suma dels espectres de les sis espècies isotòpiques; en canvi, a l'espai interestel·lar cada espècie isotòpica "viu" independentment de les altres i dona lloc exclusivament a l'espectre corresponent. Com a curiositat, pot indicar-se que, concretament en el cas del monòxid de carboni, s'han detectat a l'espai interestel·lar *les sis espècies isotòpiques possibles*.

4.4 Espècies químiques interestel·lars detectades

La identificació d'*espècies químiques interestel·lars* va començar l'any 1985 i amb data novembre del 2006 (3), se n'havien identificat unes *cent trenta*, amb un nombre d'àtoms entre 2 i 13 (vegeu taules, més endavant); la majoria d'elles són realment vulgars, però algunes no ho són tant i fins i tot n'hi ja unes poques que són realment exòtiques. Estem emprant les expressions "espècies químiques" en lloc de la més senzilla "molècules" perquè els conjunts atòmics detectats no sempre són *molècules* en el sentit més estricte del terme: en efecte, a més de molècules, es detecten també *ions* i *radicals* (4). Val la pena posar de relleu que des fa uns deu anys es va imposant la idea

que els processos químics, que, com veurem, són bàsics en les etapes evolutives subsegüents (etapa planetària, etapa biològica, etc.), pot ser també ho són en la etapa interestel·lar (5).

Especial interès té l'estudi dels *mecanismes* (els "camins") de formació de les espècies químiques en els espais interestel·lars: per exemple, la formació dels isòmers cíclic i lineal de fórmula C_3H (6). La detecció, fa uns anys, de l'espècie H_3^+ va ser important ja que, segons els especialistes, la seva existència confirma la validesa de certs mecanismes generals de reacció, que havien estat postulats amb anterioritat (7). El descobriment (any 2006) de l'anió C_6H^- ha conduït a afirmar que cal "revisar la Química Orgànica Interestel·lar" (8).

L'aigua, substància fonamental per a la *vida*, és molt abundosa en els espais interestel·lars, a on, a causa de la temperatura, existeix com a gel. Els cometes són gel!

A les pàgines següents ens donen les fórmules empíriques de les molècules detectades amb data novembre de 2006. El lector podria preferentment entrar a la web indicada a la referència 3.

Molecules in the Interstellar Medium or Circumstellar Shells (as of 11/2006)

2 atoms	3 atoms	4 atoms	5 atoms	6 atoms	7 atoms
H ₂	C ₃ *	c-C ₃ H	C ₅ *	C ₅ H	C ₆ H
AlF	C ₂ H	I-C ₃ H	C ₄ H	I-H ₂ C ₄	CH ₂ CHCN
AlCl	C ₂ O	C ₃ N	C ₄ Si	C ₂ H ₄ *	CH ₃ C ₂ H
C ₂ **	C ₂ S	C ₃ O	I-C ₃ H ₂	CH ₃ CN	HC ₅ N
CH	CH ₂ 2005	C ₃ S	c-C ₃ H ₂	CH ₃ NC	CH ₃ CHO
CH ⁺ 2005	HCN	C ₂ H ₂ *	H ₂ CCN	CH ₃ OH	CH ₃ NH ₂
CN	HCO	NH ₃	CH ₄ *	CH ₃ SH	c-C ₂ H ₄ O
CO	HCO ⁺	HCCN	HC ₃ N	HC ₃ NH ⁺	H ₂ CCHOH
CO ⁺	HCS ⁺	HCNH ⁺	HC ₂ NC	HC ₂ CHO	C ₆ H ⁻ 2006
CP	HOC ⁺	HNCO	HCOOH	NH ₂ CHO	
SiC	H ₂ O	HNCS	H ₂ CNH	C ₅ N	
HCl	H ₂ S	HOCO ⁺	H ₂ C ₂ O	I-HC ₄ H* (?)	
KCl	HNC	H ₂ CO	H ₂ NCN	I-HC ₄ N	
NH	HNO	H ₂ CN	HNC ₃	c-H ₂ C ₃ O 2006	
NO	MgCN	H ₂ CS	SiH ₄ *	H ₂ CCNH (?) 2006	
NS	MgNC	H ₃ O ⁺	H ₂ COH ⁺		
NaCl	N ₂ H ⁺	c-SiC ₃			
OH	N ₂ O	CH ₃ *			

PN	NaCN
SO	OCS
SO ⁺	SO ₂
SiN	c-SiC ₂
SiO	CO ₂ [*]
SiS	NH ₂
CS	H ₃ ⁺⁺
HF	H ₂ D ⁺ , HD ₂ ⁺
SH [*]	SiCN
HD	AINC
FeO (?)	SiNC
O ₂ (?) 2005	
CF ⁺ 2006	
SiH (?)	

8 atoms	9 atoms	10 atoms	11 atoms	12 atoms	13 atoms
$\text{CH}_3\text{C}_3\text{N}$	$\text{CH}_3\text{C}_4\text{H}$	$\text{CH}_3\text{C}_5\text{N}$ 2006	HC_9N	$\text{C}_6\text{H}_6^* (?)$	HC_{11}N
HCOOCH_3	$\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CN}$	$(\text{CH}_3)_2\text{CO}$ 2005	$\text{CH}_3\text{C}_6\text{H}$ 2006	$\text{C}_2\text{H}_5\text{OCH}_3$ (?) 2005	
CH_3COOH	$(\text{CH}_3)_2\text{O}$	$(\text{CH}_2\text{OH})_2$ 2005			
C_7H	$\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$	$\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CHO}$			
H_2C_6	HC_7N				
CH_2OHCHO 2006	C_8H				
$\text{I-HC}_6\text{H}^* (?)$	$\text{CH}_3\text{C}(\text{O})\text{NH}_2$ 2006				
CH_2CHCHO (?)					
CH_2CCHCN 2006					

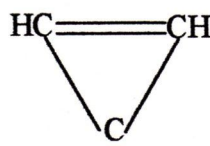
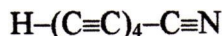
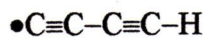
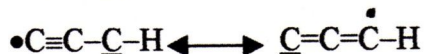
Extragalactic Molecules (as of 09/2005)

2 atoms	3 atoms	4 atoms	5 atoms	6 atoms	7 atoms
OH	H ₂ O	H ₂ CO	c-C ₃ H ₂	CH ₃ OH	CH ₃ CCH
CO	HCN	NH ₃	HC ₃ N	CH ₃ CN	
H ₂	HCO ⁺	HNCO	CH ₂ NH		
CH **	C ₂ H	H ₂ CS (?)	NH ₂ CN		
CS	HNC	HOCO ⁺			
CH ⁺ **	N ₂ H ⁺	C ₃ H			
CN	OCS				
SO	HCO				
SiO	H ₂ S				
CO ⁺ (?)	SO ₂				
NO	HOC ⁺				
NS	C ₂ S				

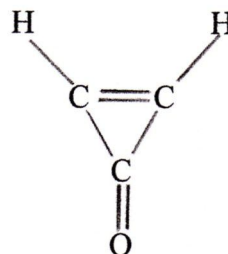
Table created by S. Thorwirth (09/2005) based on information kindly provided by S. Martín.

You are visitor No. **11878**

A la il·lustració 4.2 és dona la formula desenvolupada d'algunes molècules realment exòtiques, com podrà comprovar el lector amb coneixements de Química Orgànica. Aquestes molècules tenen carbonis radicalaris i/o carbènics i, en Química terrestre, serien considerades (ja que ho serien) espècies molt reactives, inestables, etc. En l'espai interestel·lar, aquestes molècules perviuen durant llargs períodes de temps a causa d'estar protegides contra la radiació electromagnètica, la baixa temperatura imperant i la "solitud" en que es troben.

Fórmula empírica**Fórmula desenvolupada**

(ciclopropenilideno)



Il·lustr. 4.2

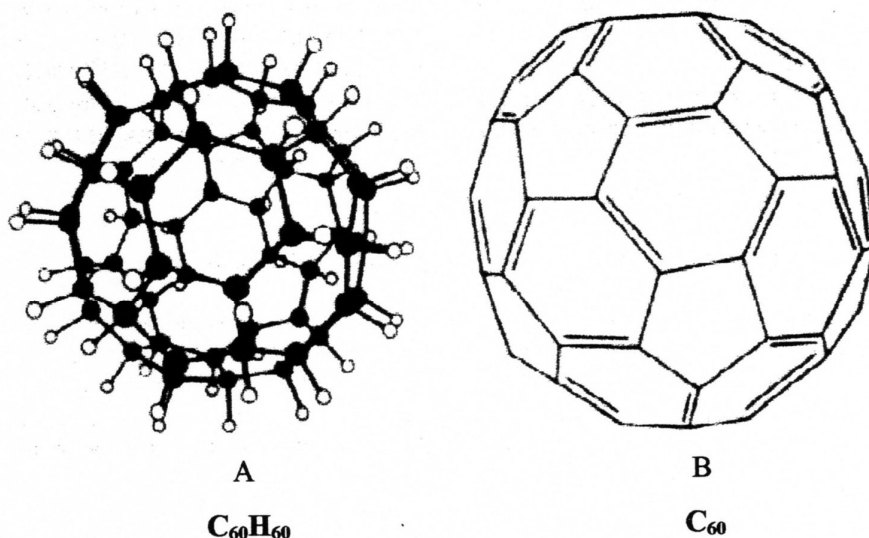
A part de les espècies químiques identificades rigorosament, que són les indicades a la Taula, hi ha indicis molt sòlids de la presència en els espais interestel·lars, i en grans quantitats, de espècies de complexitat estructural molt elevada, en particular, hidrocarburs aromàtics policíclics (PAH) i també ful·lerens, compostos dels que tracta l'apartat següent. Sobre aquest tema, com també sobre molts d'altres que es tracten en aquest llibre, pot trobar-se informació actualitzada i detallada amb cerques pausades i selectives a Internet.

4.5 El particular problema del ful·lerè-60

L'any 1985 va establir-se experimentalment que, a més del diamant i el grafit, existia un tercer al·lòtrop del carboni o, parlant amb més propietat, tota una família de nous al·lòtrops del carboni, que finalment es va acordar anomenar-los *ful·lerens*; el terme més representatiu és el *ful·lerè-60* (al moment del seu descobriment es va anomenar *buckminsterful·lerè*) (9), la fórmula del qual és C_{60} . Aquest compost és notablement estable. En experiments terrestres, sempre que el carboni en fase gasosa dóna origen a partícules microscòpiques, es forma aquesta modalitat al·lòtròpica i, per tant, ja que en l'Univers aquest procés, pel que sembla, és omnipresent, és concebible que quantitats molt significatives de molècules C_{60} estiguin distribuïdes per l'espai. A pesar de les intenses investigacions portades a terme, la presència de C_{60} en els espais interestel·lars *no està encara* rigorosament demostrada; una notícia relacionada és que experts de la

NASA van detectar traces de ful·lerens en una nau espacial "de llarga permanència" (Long Duration Exposure Facility [LDEF] spacecraft) (10).

La molècula C_{60} es molt interessant ja que la seva fórmula desenvolupada, que és la que es mostra a la Il·lus. 4.3, B, correspon a la de una molècula-pilota de futbol: molt abans d'envair el Planeta Terra, és probable que el futbol hagués ja envaït l'Univers! Per a l'autor, el tema té una al·licient especial (no espacial!) ja que el 1983 (11) (dos anys abans del descobriment del C_{60} !), conjuntament amb el Dr. Fèlix Serratos, va "inventar" (sobre el paper!) i anomenar sistemàticament d'acord amb les normes de la "International Union of Pure and Applied Chemistry" (IUPAC) un hidrocarbur cíclic, $C_{60}H_{60}$, al qual van anomenar, òbviamment, "futbolà" o "soccerà" (Il·lus. 4.3, A).



Il·lus. 4.3

4.6 Canvi d'escenari

Com s'ha dit al començament del Capítol, en l'espai interestel·lar, les forces gravitatòries procedeixen a condensar la matèria amb resultats que depenen de les densitats locals considerades. En aquests processos es formen *estels* a l'entorn dels quals giren "cossos menors", els *planetes*. Un d'aquests estels és el *nostre sol* i un del "cossos menors" que gira a l'entorn del sol és el *planeta Terra*: a partir d'ara, a ell dedicarem la nostra atenció. El seu elevat interès deriva, senzillament, de la nostra presència en ell.

L'autor es conscient que, d'acord amb el pla general d'aquesta obra, en el Capítol següent hauria de discutir les fases evolutives per les que ha passat el nostre planeta però, pura i simplement, la manca de coneixements (seus i en general) sobre el tema, li ho impedeix. Convé indicar, emperò, que a l'actualitat el tema ha esdevingut d'interès prioritari en diversos centres de recerca (12).

BIBLIOGRAFIA I COMENTARIS

- 1.- Taylor, S.; Williams, D., "Star-studded chemistry", *Chemistry in Britain*, **1983** (August), 680-683.
- 2.- Reviseu la Nota 1 del Capítulo 2.
3. Molecules in space : <http://www.astro.uni-koeln.de/site/vorhersagen/molecules/>
- 4.- Els ions són àtoms o conjunts d'àtoms amb càrrega elèctrica positiva (*cations*) o negativa (*anions*); els radicals es caracteritzen per posseir "electrons no aparellats".
- 5.- Hartquist, T. W.; Williams, D. A., "The chemically controlled cosmos", Cambridge University Press, 1995.
- 6.- Kaiser, R. I.; Ochsenfeld, C.; Head-Gordon, M.; Lee, Y. T.; Suits, A. G., "A Combined Experimental and Theoretical Study on the Formation of Interstellar C₃H Isomers", *Science*, **1996** (29 November), 274, 1508-1511.
- 7.- a) Lepp, S., "Missing link found in space", *Nature*, **1996**, 384, 309-310. b) Geballe, T. R.; Oka, T., **1996**, 384, 334-335.
- 8.- *La Recherche*, nº 405 (Février 2007), 9
- 9.- Kroto, H. W.; Heath, J. R.; O'Brien, S. C.; Curl, R. F.; Smalley, R. E., "C₆₀: Buckminsterfullerene", *Nature*, **1985**, 318, 162-163.
- 10.- Baum, R., "Fullerenes detected in crater on spacecraft", *Chemical & Engineering News*, **1994** (May 9), 5.
- 11.- Castells, J.; Serratosa, F., *J. Chem. Ed.*, 1983, **60**, 941. El lector interessat en el tema dels ful·lerens, pot consultar els següents treballs del propi autor:
Castells, J., "Els ful·lerens: una família de nous al·lòtrops del carboni", *Arxius de les Seccions de Ciències, I. E. C.*, **1995**, 100, 333-344.
Castells, J., "El futbolà i els ful·lerens", *Memorias de la Real Academia de Ciencias y Artes de Barcelona*, Tercera época, nº 940, Vol. LVI, nº 5, Barcelona 1997.
- 12.- Bowring, S. A.; Housh, T., "The Earth's Early Evolution", *Science*, **1995** (15 September), 269, 1535.
Les Dossiers de la Recherche, nº 25 (Novembre 2006-Janvier 2007), "L'histoire de la Terre".
Lasserre, T., Pajot, P., "L'intérieur de la Terre en direct", *La Recherche*, **2006** (Octobre), 50.

Capítol 5

EL PLANETA TERRA, LA VIDA I L'EVOLUCIÓ BIOLÒGICA

5.1 El Planeta Terra

A l'espai, l'*escalada de la complexitat* va acabar trobant-se amb un atzucac però la Naturalesa se les va arreglar per a "inventar" un medi en el qual l'*escalada* pogués prosseguir: un medi que va facilitar els contactes, en què no hi feia ni molta calor ni molt fred i en què la protecció contra les més destructives radiacions estel·lars estava garantida. L'"invent" s'anomena ***planeta Terra***.

Sobre la formació de la Terra i, en general dels planetes, no sembla (o, almenys a l'autor no li sembla) que els coneixements estiguin tan consolidats com els que es refereixen, per exemple, als primers estadis del *big bang*. En línies generals, es creu que a les nebuloses, a causa (un cop més) de les forces gravitatòries, la pols estel·lar i la matèria gasosa se aglomeren i a l'entorn dels glomèruls es disposen noves capes de matèria (acreció) en les quals s'inicia un llarg procés de condensació; una regió més massissa que les altres (pels motius que sigui), triomfa en aquesta "lluita atractiva"... i es converteix en un *planetèsim*. I a partir dels planetèsims es formen els planetes, un conjunt dels quals gira a l'entorn d'un determinat estel: així és genera, entre molts d'altres sistemes, el sistema solar, en el qual un dels planetes que giren a l'entorn de l'estel *sol* és el *planeta Terra*.

El següent és un resum cronològic temptatiu dels esdeveniments que podien tenir lloc tot conduint a la formació del planeta Terra (1):

-Ara fa 4700 milions d'anys: Acreció. El protoplaneta comença a escalfar-se a causa dels xocs de planetèsims, la compressió gravitatòria i la desintegració espontània dels materials radioactius. La Terra, en anar-se formant va captar molta aigua (gel) dels espais interestel·lars (2), aigua que portava substàncies dissoltes; mes endavant, en formar-se els *oceans*, gran part dels gasos es van desprendre, donant origen a l'*atmosfera*.

-Ara fa 4500-4000 milions d'anys: Diferenciació. A temperatures de 1700-2000K, el ferro metàl·lic comença a fondre, i a "caure" cap el centre de la Terra. Es va lliurant energia gravitatòria (augment del calor) i la temperatura arriba a 2000K. Amb la formació del nucli (de ferro), s'ha iniciat el procés de diferenciació de l'inicial cos homogeni en zones: un nucli de ferro fos, una escorça composta de materials lleugers i, al mig, el mantell de densitat i composició intermèdia. Els gasos s'escapen de l'interior i s'inicia la formació dels oceans i l'atmosfera.

-Ara fa 4000-3700 milions d'anys: Convecció i refredament dels materials presents. El mantell es solidifica i es formen les primeres roques. A Austràlia i Groenlàndia es troben roques d'aquest període. Predomini de la diferenciació química en zones. El calor es dissipa més ràpidament.

-Ara fa 4000-2500 milions d'anys: Formació de continents, oceans i atmosfera. Hi ha fusió i re-fusió de materials, formació i re-formació de l'escorça, desgast dels materials,

erosió, escapament de gasos i formació de nous materials, etc. Acaba formant-se l'escorça actual. L'activitat volcànica, en alliberar aigua originalment bloquejada a l'interior, resulta fonamental per la formació dels oceans. L'alliberació de gasos condueix a la formació de l'atmosfera (els planetèsims no tenien atmosfera). L'oxigen es combina amb el metà (CH_4) i el monòxid de carboni (CO) per a donar diòxid de carboni (CO_2) i aigua (H_2O); també dona lloc a altres reaccions químiques.

Per tal que tinguessin lloc processos constructius, es a dir, per a què continués l'*escalada de la complexitat*, la Terra havia de disposar d'energia i, en efecte, en disposava. L'energia procedia dels tremends xocs meteorítics que havien tingut lloc al llarg de la seva formació (i que potser continuaven en haver-se format) i de la descomposició dels elements radioactius que havia incorporat; i, sense interrupció, el seu "estel patrocinator" li anava enviant energia en forma de radiació electromagnètica aprofitable.

5.2 L'aparició de la vida

Tenint en compte el desenvolupament subsegüent, s'ha suposat que en la calenta *sopa oceànica* primigènia devien donar-se les condicions òptimes per a què la matèria re-empregués l'*escalada de la complexitat* mitjançant reaccions químiques "normals" (és a dir, "normals" per als humans actuals) i, naturalment, la va re-emprendre. En aquest procés d'organització, en el que es creu molt probable que en certes regions de la sopa primigènia hi apareguessin *grums o crêpes* (3, 4), van acabar per entrar-hi en joc els "enllaços intra- o inter-moleculars dèbils", com són els ponts d'hidrogen, les forces de van der Waals, els efectes hidrofòbics, etc. i, d'alguna manera, la matèria va aconseguir un grau de complexitat organitzativa tan elevat que *va permetre* l'aparició dels primers indicis de *vida*. I, amb el temps, l'evolució va conduir a la *vida intel·ligent* i, finalment, a l' *Homo sapiens sapiens*.

Observi's que s'ha emprat l'expressió "*va permetre*" (l'aparició dels primers indicis de vida). Por preguntar-se: aquesta expressió "*va permetre*" no és excessivament "*tova*"? Per alguns investigadors, entre els que podria destacar-se al Premi Nobel Christian de Duve, sí que ho és i el títol del seu interessant i documentat llibre -"Vital Dust. Life as a Cosmic Imperative" (5)- reflecteix ben clarament el seu punt de vista. L'autor d'aquestes línies comparteix en gran mesura els diversos plantejaments que en el llibre es formulen.

5.3 Què és la vida?

Semblaria lògic que si, a partir d'ara, hem de parlar de la *vida*, comencéssim per definir *que és la vida*, però resulta extraordinàriament difícil trobar una definició que tota la comunitat científica accepti com a vàlida. La gran quantitat de definicions proposades demostren l'absència d'una definició satisfactòria per a tothom.

La clàssica divisió de la realitat en què estem inserits en tres móns: el mineral, el vegetal i l'animal, continua tenint el seu sentit. Els dos últims móns, conjuntament, constitueixen el *món dels sers animats o sers vius*. Hi ha unanimitat en considerar com sers vius o dotats de *vida*, a pesar de ser molt diferents, "trossos de matèria" tan diversos com un microbi, un bolet, un tomàquet, una gardènia, una alzina, una puça, una mula, una balena, un ser humà, etc., etc.

Què és el que tenen en comú tots els "trossos de matèria" esmentats per a que a tots ells se'ls consideri dotats de *vida*? Observi's que aquests "trossos de matèria" són realment molt molt diferents entre ells: per exemple, el "tros de matèria" corresponent a una balena blava té un pes que no és ni un milió (10^6) ni un bilió europeu (10^{12}) sinó 10^{21} vegades més gran que el pes del microbi més petit! I a pesar d'aquesta enorme diferència, que fa difícilment imaginable que els dos "trossos de matèria" tinguin quelcom en comú, hi ha absoluta unanimitat en considerar ambdós com a sers vius. En resum, convé que ens tornem a preguntar, què és la VIDA?

Sembla correcte admetre que hi ha tres propietats importants comuns a tots els sers dotats de vida: el *manteniment* de les característiques pròpies; la possibilitat de "canvis no destructius" o *mutacions*, i la *auto-reproducció*, molt lligada a l'*heretabilitat* o *capacitat de transmissió* de les característiques pròpies del ser a un nou ser viu. Però vegem amb quina facilitat les coses es compliquen en intentar generar definicions rigoroses (6): suposem que s'ha acceptat aquesta última propietat com la més fonamental o definitòria per a catalogar de viu a un organisme; immediatament cal procedir a matisacions complementàries, ja que en exigir l'obligatorietat de possessió d'aquesta propietat per a catalogar a un ser de *viu*, es deixen fora d'aquesta categoria els humans no fèrtils, els animals híbrids no fèrtils (com les mules), etc.

Per a sortir de l'*impasse*, pot observar-se que els sers que designem com *vius* o són senzilles cèl·lules autònomes o són sers pluricel·lulars i, que la cèl·lula és (per definició) un ser que té la capacitat d'*auto-reproducció*.

Però, realment, hem sortit de l'*impasse*? No hi ha ambigüitat en la definició del terme "auto-reproducció"? Molts lectors coneixeran l'operació de laboratori anomenada "cristal·lització" que, freqüentment es practica afegint un petit cristall d'un compost químic a una solució sobre-saturada d'aquest compost en un dissolvent adequat. La pregunta és: la cristal·lització és conceptualment diferent de l'auto-reproducció? Ho és, però no és fàcil justificar-ho sense complicar considerablement el tema, per la qual cosa remetem novament al lector a la referència anteriorment indicada (6).

5.3 L'origen del suport material de la vida

És aquest un títol correcte? No seria més clar i contundent posar senzillament "L'origen de la vida"? Potser sí, però, si més no, el títol elegit és menys polèmic (7).

Com s'ha indicat, la vida precisa de matèria organitzada d'un alt grau de complexitat, es a dir, de *compostos químics complexos*. La *varietat*, la *perdurabilitat* o *estabilitat*, la *modificabilitat* i la *reproducibilitat* (no es parla ara de auto-reproducibilitat) de les molècules constituents dels compostos que s'estudien en l'anomenada *Química Orgànica*, fan que aquests compostos o substàncies siguin especialment aptes per a constituir el component bàsic del necessari *suport material de la vida*.

La Química orgànica s'anomena també *Química del carboni*, ja que tots els compostos orgànics contenen l'element carboni (C); molt freqüentment, i en particular dins del context que ara ens ocupa, els compostos orgànics contenen també hidrogen

(H), oxigen (O) i nitrogen (N), sent també rellevant el paper que juguen els elements sofre (S) i fòsfor (P) (8).

Els sers vius, com ara se sap científicament, generen els compostos químics complexos necessaris per la *vida* (en la seva forma actual de manifestar-se) mitjançant processos metabòlics (9) de gran complexitat i extraordinària bellesa (almenys per a molts científics!) que funcionen gràcies a la intervenció de *catalitzadors* (10) que, ells també, poden tenir estructures molt complicades. Puntualitzem, ja que es tracta d'un punt de gran importància, que la investigació científica ha posat de manifest que els processos metabòlics que es van elucidant, resulten ser comuns a tots els sers vius.

Però, passem ja a la pregunta inevitable: com va començar la vida?, quin és l'origen de la vida?

Una gran part dels compostos orgànics essencials són substàncies *polímeres* construïdes per unió repetitiva d'unitats idèntiques o molt semblants entre elles: per exemple, les proteïnes són polímers d'aminoàcids mentre que els àcids nucleics (RNA, DNA) són polímers d'"unitats" formades per un sucre senzill (D-ribosa en l'RNA; D-2-desoxirribosa en el DNA), una base nitrogenada (citosina, uracil, adenina i guanina en l'RNA; citosina, timina, adenina i guanina en el DNA) i àcid fosfòric. És lògic que en els primers estudis moderns sobre l'origen de la vida l'atenció es centrés en la *síntesi abiòtica* (síntesi sense intervenció de sers vius) dels "ingredients" més senzills: aminoàcids, bases nitrogenades, etc. Això explica l'enorme impacte dels experiments de Miller (síntesi abiòtica d'aminoàcids) (11) i de Joan Oró (síntesi abiòtica de bases nitrogenades) (12).

Els experiments de Miller i d'Oró foren realitzats en condicions que intentaven reproduir la composició de l'atmosfera primitiva ... la composició de l'atmosfera acceptada en aquells moments! (el títol del treball de Miller és "*A Production of Aminoacids under Possible Primitive Earth Conditions*"), Des dels treballs d'Oparin (13), s'anava admetent que l'atmosfera primitiva era molt rica en hidrogen (atmosfera *reductora*), el qual estava present en forma lliure (H_2) i combinada (fonamentalment, metà, CH_4 i amoníac, NH_3). El curiós del cas és que en l'actualitat, l'opinió dominant és que l'atmosfera primitiva hi havia carboni però en forma de diòxid de carboni, CO_2 i també nitrogen, però en forma lliure, N_2 o com òxids de nitrogen i es creu que quasi no hi havia hidrogen.

En les condicions experimentals dictades per les noves idees sobre la composició de l'atmosfera terrestre primitiva és més que dubtós que els experiments que hem comentat haguessin tingut èxit, però aquest fet resulta irrellevant ja que a l'actualitat es coneixen multitud de processos abiòtics que tenen lloc a la Terra i fora d'ella i que poden explicar la presència dels "ingredients" fonamentals en el nostre incipient planeta. Una explicació podria començar, per exemple, amb la incorporació al planeta, durant la seva formació, del "zoo molecular" l'existència del qual en els espais interestel·lars ha estat científicament establerta (veure Capítol 4).

A l'actualitat, l'enigma que els científics realment es plantegen és: com i on els "ingredients" fonamentals es van anar unint per finalment donar lloc a les complexes entitats moleculars necessàries per al funcionament de la vida? Se saben molt poques coses segures (se'n sap alguna?) sobre aquest apassionant tema i en admetre la meua

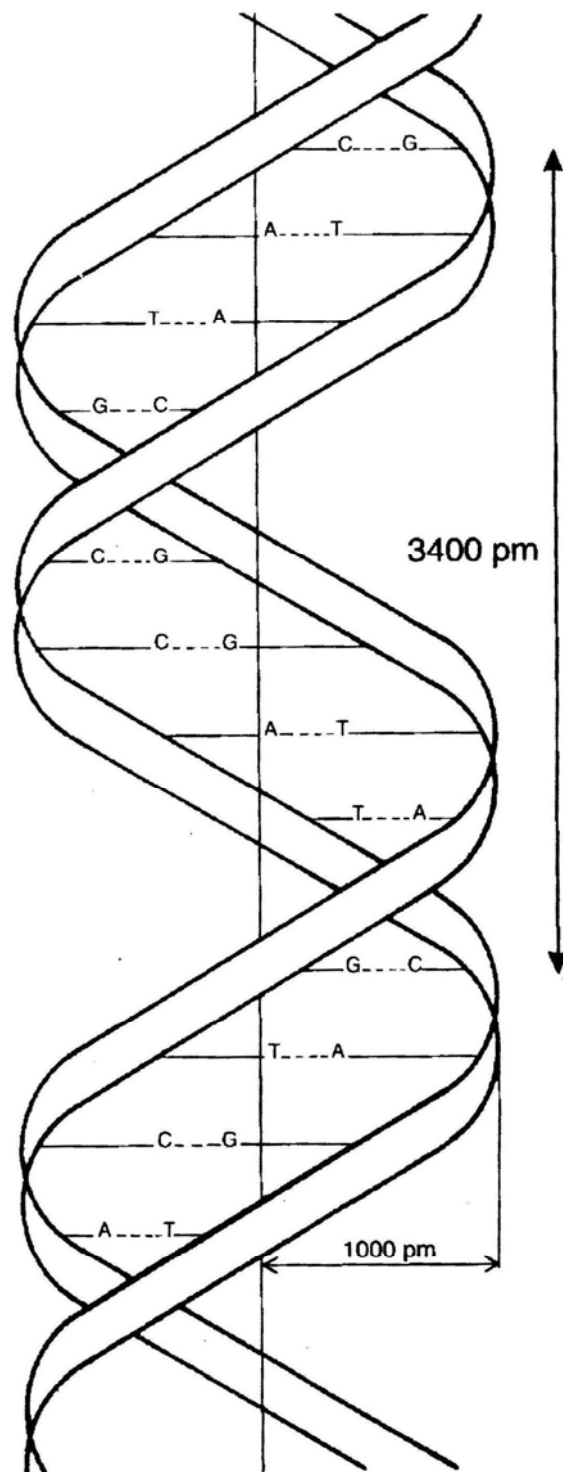
incapacitat per a resumir en unes poques línies "l'estat de la qüestió", em limito aquí a recomanar la lectura d'alguns articles sobre el tema (14) i formular uns comentaris basats en el *Preface* de l'esplèndid llibre de de Duve (5a).

5.4 Alguns comentaris sobre la Química com a Informació

De Duve, formula una "història de la vida" en la que distingeix set "edats" o nivells de complexitat, els dos primers dels quals són l' "edat de la Química"(15) i l' "edat de la Informació". *Grosso modo*, podria dir-se que en l'edat de la Química els processos que es creu que van tenir lloc són els que constitueixen l'objecte d'estudi de la "Química clàssica moderna", és a dir, els processos que els químics coneixien i explicaven fins, diem, 1970: reaccions d'oxidació-reducció, reaccions iòniques, reaccions de formació d'enllaços covalents, etc., etc. Pel contrari, a l'edat de la Informació, els processos més significatius que tingueren lloc, *que també són químics*, van ser els que s'estudien a la "Química supramolecular" (16), processos tots ells descoberts i interpretats més recentment.

Des del meu punt de vista, seria preferible designar com "edat de la Química supramolecular" l'etapa que de Duve denomina "edat de la Informació", ja que a la primera etapa hi va haver igualment *informació química*, encara que la informació no fos a nivell de molècules més o menys complexes sinó a nivell de partícules elementals, àtoms i molècules senzilles. Recordi's que ja en el Capítol 1 he expressat la situació existent dient: "les partícules de matèria i antimatèria, en els seus xocs, romanen en contacte un temps suficientment llarg per a començar a reconèixer-se: en efecte, en entrar en contacte, *comencen a anihilar-se*". Un exemple més casolà de *reconeixement químic* entre substàncies relativament senzilles: si en menjar un ou dur el cobert és posa més o menys negrós, podem concloure, amb gran probabilitat d'encert, que el cobert és de plata. El sofre de la cistina del rovell d'ou *ha reconegut* la plata del cobert, ha tingut lloc una interacció selectiva i "s'ha creat" sulfur de plata. En el fons, i mirant-ho des d'una perspectiva global, tota la *marxa* de l'antiga Química Analítica es basava en un seguit de *reconeixements selectius*.

La Química supramolecular està regida pels "enllaços intra- o inter-moleculars dèbils" (ponts d'hidrogen, forces de van der Waals, efectes hidrofugs, etc.) i explica el "reconeixement molecular", l' "auto-enllaçament " de molècules i infinitat de realitats biològiques entre les quals mereix ser destacat l' *aparellament de bases nitrogenades* justificatiu de l'estructura en doble hèlix del DNA, descoberta fa més de 50 anys per Watson i Crick (Ilus. 5.1) (17).



Ilust. 5.1

5.5 Evolució biològica

L' aparellament de bases nitrogenades va obrir la porta a la *còpia* ("replication") *molecular*, la qual, al seu torn, les va obrir a l'*herència* i a l'*evolució*. Seguint un llarg recorregut que de Duve anomena "edat de la protocèl·lula", es va arribar finalment a un *organisme viu primigeni* que molts autors consideren el comú avantpassat de tots els éssers vius que foren, són o seran.

Com la realitat posa clarament de manifest, aquest *organisme viu* no és va anar reproduint indefinidament i exclusivament en forma clònica, donant lloc a éssers iguals a ell mateix. Contràriament, d'acord amb l'opinió científica àmpliament majoritària, ja des de l'inici de la vida, va entrar en joc l'*evolució biològica* que -d'acord amb la interpretació *neodarwiniana*- va tenir com a fonament el "binomi mutació-selecció natural". Quin és el significat d'aquest binomi? Simplificant: aparició aleatòria, a l'atzar, de *mutants* -ja sigui per lectura errònia del codi genètic, per influències externes anòmales, etc.- i domini final d'un d'ells a causa d'una millor resposta a les condicions de l'entorn, és a dir, per *selecció natural*. Aquesta "millor resposta" es basa, en moltes ocasions, en una millor capacitat de *reproducció*.

5.6 Evolució determinística, evolució contingent i evolució lamarckiana

En entrar a l'etapa biològica, l'estudiós té la justificada sensació que el terme *evolució* ha sofert un substancial canvi de naturalesa en relació a la que tenia en les etapes prèvies. En efecte, en aquestes, amb la Física i la Química actuant "a cara descoberta" tot allò que va anar passant sembla estrictament *determinat* i predible, si es coneguessin les condicions exactes en el punt de partida; en canvi, en l'evolució biològica interpretada neodarwinianament, entra en joc la *contingència* (19), ja que, en principi, les mutacions tenen lloc a l'atzar. En altres termes, una mutació que en la *nostra pròpia història evolutiva* (la del Planeta Terra, la que ens ha conduït a allò que som, aquí i ara) l'atzar va fer que tingués lloc i subseqüentment "va aprovar" l'examen permanent de la *selecció natural* i que, en ser "aprozada", va empenya l'evolució en un determinat sentit, ... *podia no haver tingut lloc!*

Alguns autors, com Monod i Gould (19) admeten, sense cap matisació, que l'*evolució biològica* va tenir lloc a l'atzar; altres, com de Duve (5), prefereixen alleugerar aquesta conclusió extrema posant de relleu que diversos condicionants o lligams (20) de tipus físic, químic, biològic i ambiental posen importants límits a la "llibertat" de l'atzar operant. Voldria fer notar que si al lector li resulta difícilment "digerible" que existim per pur atzar tampoc ha de deixar-lo molt tranquil·litzat la *contingència condicionada* de de Duve que, portada al seu límit, equival a incloure l'*evolució biològica* en els dominis de l'evolució determinística. Tornaré a referir-me al caràcter contingent de l'evolució biològica en comentar la possible existència de vida intel·ligent extraterrestre (Capítol 9).

El lector pot estar interessat en conèixer que hi ha dos recents i extensos "Dossier"s de la revista *La Recherche*, dedicats, respectivament, a "L'histoire de la vie" (21a) i a "L'histoire de la Terre" (21b).

Culminada l'evolució biològica amb l'*evolució antropològica* (Capítol 8), no és incoherent admetre que l'evolució prossegueix, però ara en la modalitat que podem

denominar *evolució social* o *cultural*. Aquesta modalitat evolutiva ja no és interpretable neodarwinianament: ben al contrari, l'evolució cultural pot qualificar-se de *lamarckiana*, si aquest qualificatiu s'entén, exclusivament, com indicatiu de la vigència d'una transmissió efectiva dels *caràcters adquirits*, independentment de la manera en què aquesta transmissió tingui lloc. Havent emprat el terme *lamarckiana* és important aclarir immediatament que la transmissió no s'efectua per incorporació del caràcter adquirit al patrimoni genètic ("creació" del pertinent gen) sinó *socialment*. La societat és la responsable de l'*herència* dels caràcters culturals: en un determinat *espai*, lliga els individus al llarg del temps gràcies a la "cohabitació" de diverses generacions; i en un determinat *temps*, els lliga al llarg de l'espai, gràcies al diversos medis de comunicació.

L'evolució social o cultural deixa intacte, repetim, el patrimoni genètic dels individus, cosa que pel que sembla ignoraven aquells que justificaven les grans "purgues" (com la matança d'entre un i dos milions de persones ordenada per Pol Pot) basant-se en la teoria que després de "modelar" dues o tres generacions, els "bons" caràcters imposats passarien al patrimoni genètic i a partir de llavors ja tot el món "es comportaria com havia que comportar-se".

5.7 Divagacions sobre la interpretació neodarwiniana de l'evolució biològica

Com a cloenda del present Capítol, em sembla oportú formular alguns comentaris, concretar alguns pensaments, donar-li algunes "voltes" a aquesta importantíssima arma interpretativa de la Biologia actual que és la interpretació neodarwiniana de l'evolució. Com no soc expert en el tema, ha introduït en el títol de l'apartat la paraula "Divagacions".

A mi no em resulta difícil admetre disciplinadament l'exclusivitat del binomi "mutació-selecció natural" en el camp dels éssers unicel·lulars o pluricel·lulars relativament senzills, però la cosa no em resulta tan clara quan cal explicar, per exemple, l'ordenada distribució de les dents i dels artells dels humans, la filigrana de la seva oïda interna o processos tan extraordinàriament complexos i eficients com la cadena respiratòria (veure el següent Capítol). Sempre acabo preguntant-me: com se les ha arreglat el binomi "mutació-selecció natural" per arribar a aquests meravellosos resultats?, no actuaran alguns factors complementaris? Probablement el meu problema radiqui, en gran mesura, en primer lloc, en desconèixer la velocitat en que té lloc cada un dels que potser podria anomenar "procés evolutiu unitari"; i en segon lloc, en no fer-me càrrec plenament de la magnitud dels lapses de temps que es manegen en el terreny evolutiu (milions, centenar de milions d'anys).

Una altra qüestió que m'intriga, i que repetidament s'esmenta a la literatura sobre el tema, és la rapidesa amb que, pel que sembla, tenen lloc els estadis finals conduents a noves i complexes estructures: per exemple, la unió de les neurones en xarxes progressivament més complexes fins adonar origen al *cervell* (suport material de la *consciència*). A mi, aquest "creixement exponencial" de la velocitat de complexació, em recorda allò que succeeix en alguns entreteniments i jocs (solitaris, mots encreuats, etc.) en el quals, després d'una fase inicial que pot arribar a ser molt laboriosa, les respostes o solucions es van trobant més i més ràpidament, fins el punt que s'hi s'està jugant en companyia, el joc s'acaba atropelladament perquè tots els presents aporten respostes correctes.

Suposo que una futura explicació satisfactòria sobre l'anterior qüestió tindrà en compte la consideració següent: l'actuació de forces de rang elevat però molt específiques condueix a estructures en què estan més pròxims centres entre els quals és possible l'actuació de forces de rang inferior i no tan específiques, forces que abans no es manifestaven per la llunyania dels centres; amb l'actuació d'aquestes forces, queden més pròxims centres entre els quals es possible l'actuació de forces de rang encara inferior i encara menys específiques, etc., etc.

Una nova pregunta: a la llum del neodarwinisme, com ha d'interpretar-se (en el camp dels sers superiors) la famosa asseveració "la funció crea l'òrgan" (i la seva inversa, "la no funció fa desaparèixer l'òrgan") que a començaments del segle XX representava el *summum* de la modernitat i que, certament, explicava molts fets observats?

Quan la "funció" es directament interpretable a nivell cel·lular, les meves dificultats disminueixen considerablement en substituir l'expressió "la funció crea l'òrgan" per l'expressió "l'èxit de la funció desenvolupa l'òrgan". En efecte, en la majoria de casos, en la situació de partida ja existeix un "òrgan incipient" i una "funció incipient": si la funció té èxit, l'òrgan es va perfeccionant o desenvolupant i, si no té èxit, continua com estava o acaba per desaparèixer. El sistema immunitari ofereix un exemple paradigmàtic d'aquest tipus de situació:

Pocs mesos després del seu naixement, el jove ser humà disposa de milions de cèl·lules, cada una de les quals (o tota una petita població d'elles) produeix un anticòs diferent; aquesta disponibilitat es deguda a que a pesar de la seva breu existència, els limfòcits del ser humà ja han sofert milions de mutacions; d'altra banda, si el recent nascut ha fruit de la lactància materna, la llet de la mare actua de vacuna natural aportant grans quantitats de limfòcits de tots tipus. La quantitat disponible d'anticòssos diferents és, per tant, molt elevada i, en principi, qualsevol antigen (microorganisme invasor) pot ser combatut, amb la peculiaritat que la unió "limfòcit efectiu"-antigen, desencadena la multiplicació del limfòcit. Pocs dies després, els limfòcits "efectius", inicialment poc nombrosos, han passat a constituir una població de milers de milions.

Com veiem, en el sistema immunitari, l' "òrgan incipient" ja existia: era els pocs "limfòcits efectius" presents en les condicions normals. Es donen les circumstàncies (la invasió del antigen) que permeten que la "funció incipient" es manifesti (la "funció incipient" és aquí *eliminar l'invasor*). Ho fa amb èxit i acaba conduint a un gran desenvolupament de l' "òrgan": en efecte, el nombre de "limfòcits efectius" augmenta espectacularment.

Quan la funció, almenys aparentment, no és interpretable a nivell cel·lular, a mi les coses se'm compliquen: per exemple, existeix una bona explicació neodarwiniana de la (crec jo) evident progressiva degradació del queixal del seny?

L' actualment anatemitzat postulat lamarckià "la funció crea l'òrgan" està molt relacionat amb el tema de la *no heretabilitat* dels caràcters secundaris adquirits. Aquest tema, al qual abans ja m'he referit, a mi particularment em posa en una tessitura anàloga a la de la bona gallega que va acabant afirmant que no creia en meigues, però que "de haberlas, haylas".

Un últim comentari. La interpretació neodarwiniana de l'evolució biològica, en particular la segona part del binomi mutació-selecció natural, equival estrictament al *mercat regit pel liberalisme més salvatge*. A nivell humà, ens satisfan els seus resultats?, podem influir en la *contingència* de les "mutacions"?, com a sers conscients, fem el suficient per a mitigar entre nosaltres els efectes de la *selecció natural*?

BIBLIOGRAFIA I COMENTARIS

- 1.- Com de qualsevol altre tema, a Internet pot trobar-se molta informació sobre la formació del planeta Terra. Des d'un punt de vista didàctic, i en un esforç de concreció, pot indicar-se (per a iniciar la cerca), per exemple, l'adreça:
<http://www.odp.usyd.edu.au/1st/sem1/firstyear/Lecture7/Lecture7.htm>
- 2.- A títol comparatiu, pot indicar-se que s'han descobert quantitats considerables de gel a la lluna, gel que es considera que procedeix dels cometes que han impactat sobre la lluna des de la seva formació. Pot veure's LA VANGUARDIA, 6 de març de 1998.
- 3.- Conscientment, es repeteix la terminologia emprada al Capítol 2
- 4.- von Kiedrowski, G., "Primordial soup or crêpes?", *Nature*, **1996** (2 May), 381, 20-21
- 5.- a) Christian de Duve, "Vital Dust. Life as a Cosmic Imperative", Basic Books, A division of Harper Collins Publishers, New York, 1995
b) Entretien: *La Recherche*, **1996** (Avril), 286, 90-93.
- 6.- Hi ha infinitat de textos que poden recomanar-se per a precisar idees sobre que és la *vida* però per a no aclaparar al lector em limito aquí a recomanar-li la lectura del Capítol 8 (The Anthropic Principle and Biochemistry) del llibre de J. D. Barrow i F. J. Tipler, "The Anthropic Cosmological Principle", Clarendon Press, Oxford, 1986. A la pàgina 515 els autors diuen "Thus, basically we define life to be self-reproduction with error correction", definició molt relacionada amb les tres característiques fonamentals de la vida que en el text es citen.
- 7.- Estrictament parlant, els qui compartim els punts de vista de de Duve potser no siguem molt coherents (començant pel propi de Duve!) fent la distinció entre *vida* i *suport material de la vida*, però de moment aquesta és la norma establerta.
- 8.- En el supòsit de preparació química insuficient, el lector interessat deuria consultar algun llibre de text adequat. com podria ser (per què no?) el del propi autor: J. Castells, "Química General y Bioorgánica", Editorial Alhambra, Madrid 1985.
- 9.- El terme *metabolisme* engloba tant els processos de *construcció d'espècies químiques* (anabolisme) com els de *transformació o degradació* (catabolisme).

10.- Un *catalitzador* és una espècie química que *accelera* la velocitat a què una determinada reacció té lloc i que, en acabar-se la reacció, es recupera sense haver sofert, aparentment, cap canvi.

11.- Miller, S. L., *Science*, **1953**, 117, 528-529.

12.- Oró, J., *Biophys. Res. Commun.* **1960**, 2, 407-412.

13.- Oparin, A. I., "The Origin of life on the Earth", 3d. ed. New York, Academic Press, 1957.

14.- Cita de Nota 5.

Orgel, L. E., "The Origin of Life on the Earth", *Scientific American*, **1994** (October), 53-61.

Ferris, J.P.; Hill Jr., A. R.; Liu, R.; Orgel, L. E., "Synthesis of long prebiotic oligomers on mineral surfaces", *Nature*, **1996** (2 May), 381, 59-61.

Russell, M. J.; Hall, A. J., "The emergence of life from iron monosulphide bubbles at a submarine hydrothermal redox and pH front", *Journal of the Geological Society, London*, **1997**, 154, 377-402.

La revista *Chemistry in Britain*, a la p. 16 del número de juliol de 1997, publica un comentari sobre l'article anterior que comença de la forma següent: "La famosa proposició de Darwin -que la vida a la Terra podria haver començat en un *bassal petit i calent* que contenia tots els factors químics i físics necessaris- podria estar molt allunyada de la interpretació correcta, d'acord amb Mike Russell i Allan Hall, de la Universitat de Glasgow. Segons aquests dos geòlegs, l'aigua de mar, extremadament alcalina i sobreescalfada és un escenari més probable per al *naixement* de la vida.

15.- El fet que de Duve denomini "edat de la Química" a la primera de les seves "edats" no significa *en absolut* que consideri que amb aquesta "edat" finalitzi la intervenció de la Química. Tot al contrari, afirma amb rotunditat (p. XV): "Life, a chemical process, is to be understood in terms of chemistry". I més endavant, concreta el seu important concepte de *congruència*, concepte que utilitza al llarg de tot el llibre: "... there must be congruence between protometabolism -set of chemical reactions that first put life on track- and metabolism -the set of chemical reactions that support life today. Thus, our knowledge of present-day metabolism yields insights into life's beginnings". El subratllat és meu.

16.- Vegeu, per exemple, Jean-Marie Lehn, "Supramolecular Chemistry - Scope and Perspectives. Molecules, Supermolecules, and Molecular Devices (Nobel Lecture)", *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.* **1988**, 27, 89-112.

17.- Watson, J. D.; Crick, F., "A Structure for Desoxyribose Nucleic Acid", *Nature*, **1953**, 171, 737-738.

18.- El Diccionari de la Llengua Catalana, de l'Institut d'Estudis Catalans, dona la següent definició de *contingent*: Que pot esdevenir-se o no esdevenir-se, eventual.

19.- J. Monod, "*El Azar y la Necesidad*", Barral Editores, Barcelona, 1971.

Stephen Jay Gould, "The Evolution of Life on the Earth", *Scientific American*, **1994** (Oct.), 63-69.

Entretien: *La Recherche*, **1997** (Septembre), 301, 111-113.

20.- L'autor creu que en contextos com el present, el terme "lligam" és la millor traducció del terme anglès "constrain".

21.- a) *Les Dossiers de La Recherche*: "*L'Histoire de la Vie. Les Grandes Étapes de l'Évolution*". N° 19 - Mai-Juillet 2005; b) *Les Dossiers de La Recherche*: "*L'Histoire de la Terre*". N° 25 - Novembre 2006-Janvier 2007.

Capítol 6

EVOLUCIÓ BIOLÒGICA: EL PAS DE LA VIDA ANAERÒBIA A LA AERÒBIA

6.1 Més de mil milions d'anys de tranquil·la vida anaeròbia

Com que s'han trobat fòssils de bacteris d'uns $3,5 \times 10^9$ anys d'antiguitat, generalment es considera que la cèl·lula primitiva, antecessora comuna de tot el vivent, es va concretar o originar ara fa aquest nombre d'anys. Aquesta data cau dintre (emprant *unitats cronostratigràfiques*) de l'eó geològic anomenat *arqueà*, eó que pertany a l'etapa *precambriana* (etapa que es divideix en tres eons que començant pel més antic, són prearqueà (priscoà), arqueà i proterozoic). Amb tot, es possible, d'acord amb altres investigacions, que la vida a la Terra sigui encara més antiga, $3,8 \times 10^9$ anys (en el límit entre els dos eons, el prearqueà i l'arqueà (1)).

Les cèl·lules primitives eren del tipus que ara s'anomena *procariota*: cèl·lules sense nucli, petites (d'una micra de cantó a cantó) i d'estructura interna relativament senzilla. Entre els organismes procariotes hi ha una divisió molt important en dos grups: els *arqueobacteris* i els *eubacteris* que, d'ordinari, es designen simplement *bacteris* (2). Durant un llarg període de temps, es creu que els microorganismes monocel·lulars procariotes van ser els únics sers vius.

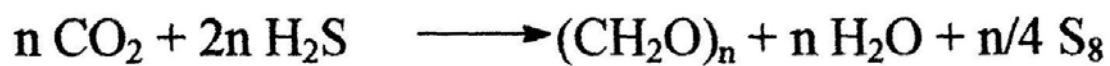
Hi ha autor que opina que "els bacteris representen el gran èxit de la història de la vida (3). La seva capacitat de reproducció és extraordinària: una cèl·lula pot dividir-se en dues cada 20 minuts, la qual cosa vol dir que si la divisió binària de totes i cadascuna de les cèl·lules prossegueix ininterrompudament, en 10 hores (que són 30 intervals de 20 minuts), partint d'una sola cèl·lula, s'arriba a una població de 2^{30} (= 1.073.741.824) cèl·lules o sigui, s'arriba a una població de cèl·lules superior als mil milions (10^9).

Podríem dir que l'evolució anava prosseguint sense sorpreses però en aquesta tranquil·la, monòtona i poc competitiva vida anaeròbia arriba un moment, ara fa uns 2500-2000 milions d'anys, en que succeeix quelcom, aparentment irrellevant, però que va canviar el camí emprès per l'evolució. Estudiem-ho (4).

6.2 El mutant trencador de l'enllaç O-H

En el període a que ens hem estat referint fins ara, entre els ser monocel·lulars procariotes n'hi havia alguns que eren litotròfags fotosintètics, la qual cosa significa que a partir de nutrients minerals com el CO_2 i l' H_2O -i amb l'energia aportada per la radiació solar- podien sintetitzar els seus constituents vitals, del tipus dels carbohidrats. Un procés anabòlic tipus en aquests microorganismes era l'indicat a la Il·lus. 6.1 (a).

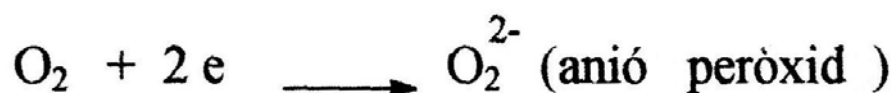
El producte de rebuig, el sofre, és un compost sòlid, l'entitat microcòsmica representativa del qual es S_8 , vuit àtoms de sofre units covalentment en forma d'elegant corona (Il·lus. 6.2); el sofre és un sòlid poc reactiu en les condicions ambientals que imperaven i se separava del medi aquós, sense jugar cap paper significatiu en el procés evolutiu.



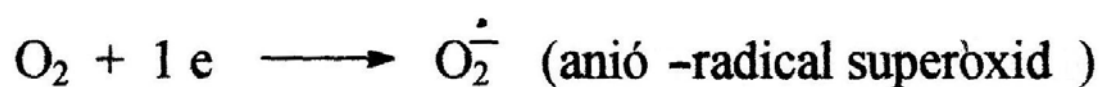
(a)



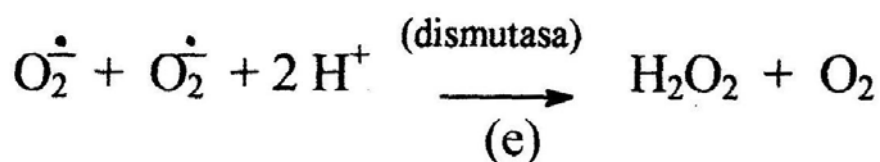
(b)



(c)

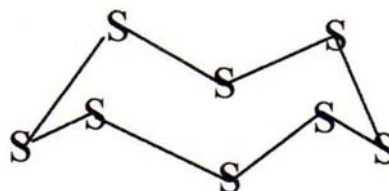


(d)



(e)

Il·lus. 6.1



Il·lus. 6.2

El fet aparentment irrellevant que va tenir lloc ara fa 2500-2000 milions d'anys fou l'aparició d'un mutant bacterià capaç de superar la barrera de les 102 kcal/(mol d'enllaços) [426 kJ/(mol d'enllaços)] (5). Quina importància té aquest fet?

Trencar l'enllaç H-S requereix unes 82 kcal (343 kJ) per cada mol d'enllaços mentre que trencar l'enllaç H-O en requereix 102 (426 kJ). Els joves mutants procariotes -als quals, més endavant, haviem d'anomenar cianobactèries (algues blau-verdoses)- eren capaços de trencar l'enllaç H-O i el procés anabòlic que en ells tenia lloc era en tot anàleg a l'actual procés fotosintètic de les plantes verdes (plantes amb clorofil·la), com explicita la Il·lus. 6.1 (b).

En el present context el realment important no és el producte de reacció aparentment principal, és a dir, el carbohidrat $(CH_2O)_n$ (la glucosa, per exemple, és $C_6H_{12}O_6$), sinó el producte "secundari", el gas oxigen (O_2). En el nou procés, en lloc de l' "honestament covalent" i "reposat" sofre, apareix el "bi-radicalic" i "agressiu" oxigen, la gran reaccionabilitat del qual el químic docent justifica amb satisfacció en explicar la primera lliçó d' *orbitals moleculars* (6).

6.3 L'oxigen a l'atmosfera terrestre

Amb l'oxigen, tot va començar a canviar: per exemple, unes espècies químiques s'oxidaven solubilitzant-se i altres s'oxidaven insolubilitzant-se. En anar passant el temps (en passar d'ara fa 2 mil milions d'anys a ara fa mil milions d'anys) la producció d'oxigen va augmentar molt i després d'haver oxidat tot l'oxidable que hi havia en els oceans, com grans quantitats de ferro(II) soluble que s'insolubilitzaren en passar a òxids de ferro(III) (el ferro constitueix ara el 5% de l'escorça terrestre), l'oxigen -que és molt poc soluble en aigua- va començar a bombollear, passant a incorporar-se a l'atmosfera terrestre.

L'oxigen, aquest gas fortament ... oxidant! feia, per tant, la seva aparició en l'atmosfera terrestre; pensi's que és precisament l'oxigen el component de l'atmosfera que al més petit descuit ens inutilitza els instruments més cars i precisos i que ens obliga constantment a greixar, a pintar amb materials de protecció, etc. Per donar-se plena compte de "com les gasta" l'oxigen, no més cal observar el que passa en tallar una poma, per exemple, i permetre així que l'oxigen es posi en contacte amb el material interior (material, abans d'obrir la poma, meravellosament protegit per la pell).

L'aparició de l'oxigen acompanyant al nitrogen de l'atmosfera terrestre, deu haver estat pels microorganismes anaerobis una cosa així com l'aparició d'un àngel exterminador dispost a no deixar rastre de vida sobre la Terra. Fou, quasi, una liquidació total, però solament "quasi"; gràcies a aquest "quasi", la continuïtat del procés evolutiu, de l' "escalada de la complexitat", va quedar garantida. De moment, les pròpies cianobactèries van desenvolupar els seus sistemes defensius i sobrevisqueren al gas letal que elles mateixes anaven generant.

Amb el temps, en ple domini ja de l'atmosfera oxidant, emergiren sobre la Terra els organismes eucariotes, és a dir, els organismes amb cèl·lules nucleades, com les de l'home. La "gestació" de la cèl·lula eucariota a partir de la procariota és un altre dels processos fascinants de l'evolució (8).

6.4 L'evolució canvia de rumb

L'objectiu de l'evolució va canviar radicalment amb el cop de timó que va significar l'aparició de l'oxigen i la conseqüent possibilitat de vida aeròbia: ara del que es tractava era d'aprofitar al màxim l'energia que les oxidacions (combustions!) podien proporcionar ... i, a la vegada, protegir-se al màxim del gas "verinós" que s'emprava en aquestes oxidacions.

En aquest punt l'autor ha d'excusar-se del pecat anti-neodarwinia que ha comès en la redacció del paràgraf anterior en emprar l'expressió "L'objectiu de l'evolució ... "; expressant-se d'acord amb el "dogma" (9), havia d'haver dit: "el rumb de l'evolució va canviar radicalment, imposant-se les mutacions que permetien anar aprofitant al màxim l'energia etc. etc."

No podem entrar aquí en el, per a mi, superb, insuperable sistema de combustió - la cadena respiratòria- que l'evolució ha generat però convé fer notar que, en últim terme, el procés que té lloc en l'extrem de la cadena respiratòria és la reducció completa d'una molècula de dioxigen (O_2) (10) per incorporació de quatre electrons (Il·lus. 6.3).

A més del procés reductiu complet i fonamental que s'acaba d'esbossar, "desgraciadament" són també possibles altres processos reductius parcials, no solament menys rendibles energèticament, sinó productors d'entitats químiques molt nocives per als materials estructurals que actuen de suport per a la vida. Si la reducció de la molècula de dioxigen té lloc amb dos electrons solament (Ilus. 6.1 (c)), es forma l'anió *peròxid*, O_2^{2-} , que en presència de protons (H^+) dóna lloc al *peròxid d'hidrogen* (representable per H_2O_2 o, en fórmula més desenvolupada, per HO-OH, i col·loquialment anomenat *aigua oxigenada*); i si la reducció té lloc amb un sol electró (Ilus. 6.1 (d)), l'espècie formada, que és una espècie *radicàlica*, s'anomena *anió-radical superòxid* ($O_2^{\cdot-}$).

6.5 Mecanismes de prevenció i curació

L'evolució ha anat dotant als ser aeròbis de mecanismes de prevenció i de curació dels desastres que poden causar el propi oxigen (espècie química molt reactiva, com ja s'ha dit repetidament) i les seves formes no plenament reduïdes. A l'actualitat se sap que hi ha més de 200 enzims que empren com a substrat espècies oxigenades. Com és millor prevenir que curar, a continuació es comenten primer els mecanismes preventius.

En el procés per a entrar dins una cèl·lula, l'oxigen aportat i alliberat per l'hemoglobina dels eritròcits, troba molts espais lliures i pot apropar-se massa als lípids de les membranes cel·lulars, reaccionant amb els àcids grassos mono- i poli-insaturats, tot generant *hidroperòxids* (RO-OH). Per a prevenir-ho, a les membranes hi ha *vitamina E* que és un antioxidant (agent reductor) liposoluble (soluble en greixos). La vitamina E és un preventiu "suïcida", en el sentit que intervé com un reactiu químic qualsevol, és a dir, consumint-se en el procés; emprant altra terminologia, la vitamina E no actua enzimàticament o catalíticament ja que si així fos, intervindria en els processos sense

"gastar-se" o "consumir-se". En conseqüència, cal reposar constantment la vitamina E, ingerint-la amb els nutrients.

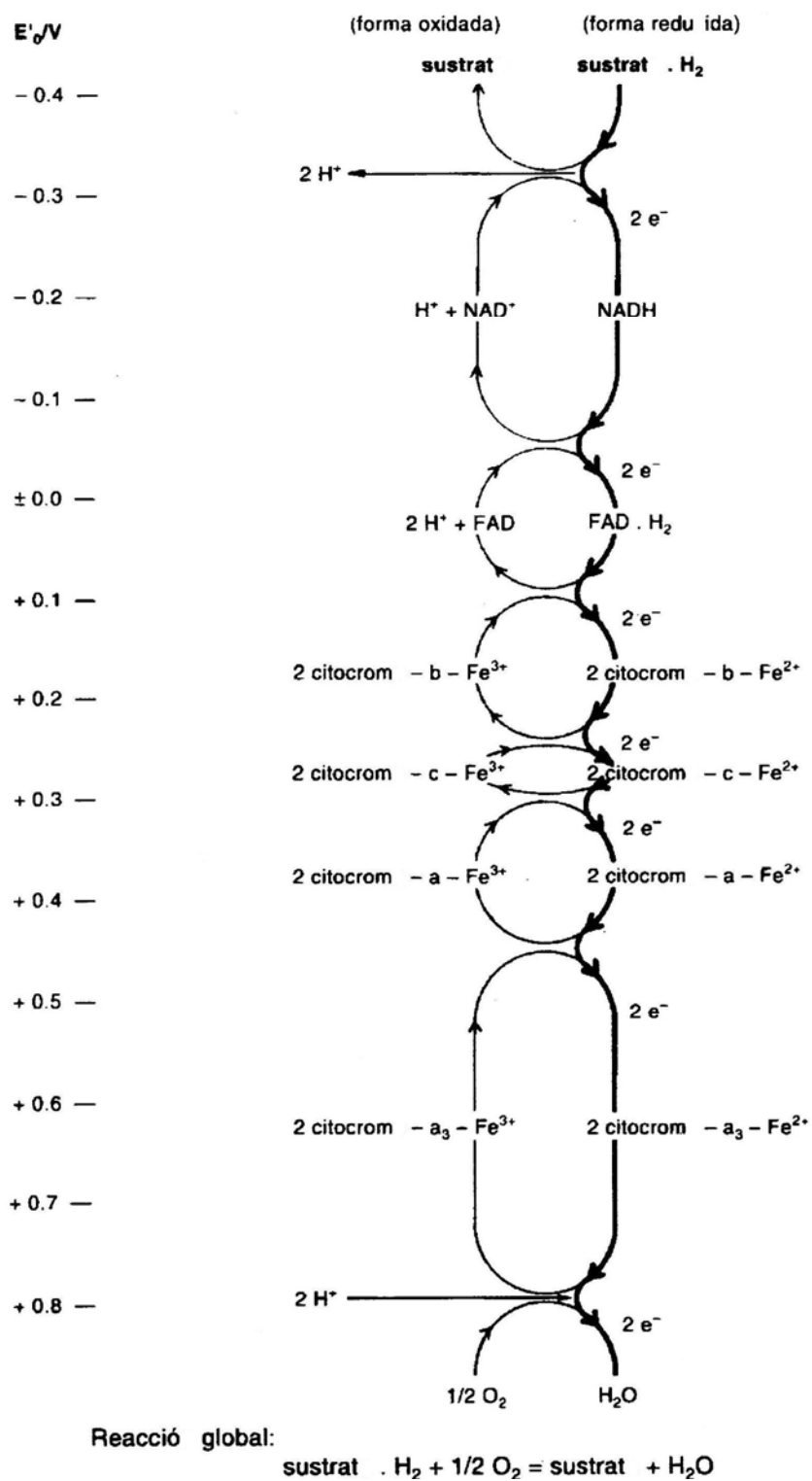
Un cop dins de la cèl·lula, en el citoplasma, l'oxigen podria atacar la membrana de la mitocòndria; per això, el citoplasma està replè d'antioxidants. Un d'aquests antioxidants és la *vitamina C*. Incidentalment, l'autor comparteix les idees divulgades entusiàsticament pel que fou doble Premi Nobel, Linus Pauling, d'acord amb les quals -i probablement a causa d'un error metabòlic d'origen evolutiu- la vitamina C que ingerim amb la dieta ordinària és insuficient i resulta molt recomanable prendre'n diàriament una dosi complementària, ja sigui d'origen natural (ingesta diària de taronges, per exemple) o sintètic (11).

Per a cobrir la possibilitat que la prevenció no sigui del 100% eficaç (i mai no ho és), l'organisme -i, en concret, el ser humà- disposa d'una gran varietat d'armes curatives. En aquest context, alguns dels enzims més coneguts, són:

La *catalasa*, la missió e la qual es defensar l'organisme del peròxid d'hidrogen; la catalasa es omnipresent en l'organisme humà.

La *peroxidasa glutatònica* (notable pel fet de ser un dels pocs enzims que contenen *seleni*) la qual no solament catalitza la reducció del peròxid d'hidrogen sinó que també elimina els hidroperòxids orgànics (RO-OH) que es formen quan (malgrat totes les "precaucions" abans esmentades) l'oxigen aconsegueix reaccionar amb els àcids grassos insaturats de les membranes cel·lulars; tingui's present que si els hidroperòxids no s'eliminen, es descomponen en dos radicals els quals ataquen les molècules veïnes i donen lloc, eventualment, a una destructiva reacció en cadena. L'acció de la peroxidasa glutatònica es complementa amb la de la *reductasa glutatònica*.

Les *dismutases superoxídiques*, SOD (superoxide dismutase) les quals ens protegeixen de l'anió superòxid que, com a espècie radical que és, presenta una gran reactivitat. En els teixits humans hi ha dues dismutases superoxídiques: la SOD1, que és una proteïna dimèrica de pes molecular 33.000, que conté un àtom de coure (Cu) i un de zinc (Zn) per subunitat; i la SOD2, que és una proteïna teramèrica, de pes molecular 85.000 i que conté un àtom de manganès (Mn) per subunitat. Esquemàticament, l'acció de les dismutases superoxídiques consisteix en convertir dos anions superòxid (més dos protons) en dioxigen (O₂) i peròxid d'hidrogen, (del qual en tindran cura els enzims abans esmentats). L'acció de les dismutases superoxídiques s'esquematitza en la Ilus 6.1 (e), però cal tenir en compte que, *en principi*, una equació química no pretén reflectir el *mecanisme* mitjançant el qual el procés té lloc; per exemple, encara que el resultat global de la reacció sigui l'indicat, se sap que aquests enzims, les dismutases superoxídiques, actuen sobre els anions superòxid *un a un*.



Nota: en el gràfic, on diu "sustrat" hauria de dir "substrat".

La disponibilitat de mecanismes d'oxidació gradual, eficient i controlada, així com també de mecanismes de prevenció i curació, té com a resultat que les cèl·lules puguin viure en una atmosfera aeròbia durant lapses de temps "vitalment significatius" encara que, com tot sabem, *acabin morint-se* ... per oxidacions no desitjades!

Es van fer investigacions que en el futur poden ser importants pel tractament científic de l'envelliment humà. Per exemple, hi ha un article científic (12) en què s'exposa que per enginyeria genètica s'ha aconseguit "preparar" drosòfiles amb sobreproducció de dismutasa superoxídica SOD1, i s'ha comprovat que la vida mitjana d'aquestes drosòfiles és un 40% més llarga que la de les drosòfiles normals.

BIBLIOGRAFIA I COMENTARIS

- 1.- a) Hayes, J. M., "The earliest memories of life on Earth", *Nature*, **1996** (7 Nov.), 384, 21-22.
b) Mojzsis, S. J.; Arrhenius, G.; McKeegan, K. D.; Harrison, T. M.; Nutman, A. P.; Friend, C. R. L., "Evidence for life on Earth before 3,000 million years ago", *Nature*, **1996** (7 Nov.), 384, 55-59.
- 2.- a) Olsen, G. J., "Archae, Archae, everywhere", *Nature*, **1994**(20 Oct.), 371, 695-697.
- 3.- Gould, S. J., "The Evolution of Life on the Earth", *Scientific American*, **1994** (Oct.), 63-69.
- 4.- a) Baugh, M., "Chemistry and aerobic Evolution", *Education in Chemistry*, **1987** (March), 40-43.
b) Baugh, M., "Aerobic evolution -a fascinating world", *Education in Chemistry*, **1991** (Jan.), 20-22.
c) Deby, C., "La Biochimie de l'oxygène", *La Recherche*, **1991**, 228, vol.22, 56-64.
- 5.- El mol és la unitat química per excel·lència: $6,023 \times 10^{23}$ entitats. Per tant, un mol d'enllaços són $6,023 \times 10^{23}$ enllaços.
- 6.- Vegeu Nota 8 del Capítol 5.
- 7.- Solucions 10^{-3} en condicions estàndard.
- 8.- a) de Duve, C., "The Birth of Complex Cells", *Scientific American*, **1996** (April), 39-45.
b) Doolittle, W. F., "L'origine des cellules à noyau", *La Recherche*, **1998** (Juin), 310, 44-45.

9.- L'autor es permet aquesta innocent ironia per a posar de relleu que, en el moment actual, la força del neodarwinisme es tal que el científic que a ell no es sotmeti corre el perill de sentir-se exclòs de la comunitat intel·lectual.

10.- En el seu continuat esforç per anar fent més i més precís el llenguatge químic, la IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry) recomana que en un context científic, per a designar l'element oxigen *en la seva forma de presentació ordinària*, s'empri el terme *dioxigen* en lloc d'*oxigen*. El motiu és que l'oxigen, en la seva forma de presentació ordinària, té com a entitat microcòsmica representativa, la molècula O_2 . L'*oxigen atòmic*, l'entitat microcòsmica representativa del qual és l'àtom d'oxigen, O, té propietats totalment diferents de les del dioxigen. També el *trioxigen*, és a dir, l'ozó, que té com a entitat representativa la molècula O_3 , presenta propietats totalment diferents a les del dioxigen.

11.- D'acord amb una publicació apareguda en els *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **1996**, "The optimal daily intake of vitamin C is about 200 mg. Daily doses above 400 mg have no evident value, and 1000 mg o more could be hazardous.

12.- Parkes, T. L.; Elia, A. J.; Dickinson; D.; Hilliker, A. J.; Phillips, J. P.; Boulianne, G. L., "Extension of *Drosophila* lifespan by overexpression of human *SOD 1* in motoneurons", *Genetics Nature*, **1998**, 19 (2), 171-174.

Capítol 7

EVOLUCION DE LOS SERES PLURICELULARES

7.1 La escalada de la complejidad en la atmósfera oxidante

A nivel biológico colectivo, el hecho que, lentamente, se fueran imponiendo los mutantes con más y mejores "armas" preventivas y curativas para los posibles "destrozos" que pudiera ocasionar el uso del agresivo oxígeno y que éste, por tanto, pudiera ir cumpliendo cada vez mejor su función básica, la *función quemadora, generadora de energía*, ha significado que, con la atmósfera aerobia, la evolución ha podido proseguir la *escalada de la complejidad* y ¡en efecto!, la ha proseguido: partiendo de los seres monocelulares procariotas se ha llegado *finalmente* al *Homo sapiens sapiens*, pasando por los seres monocelulares eucariotas o *protistos*; los primeros seres pluricelulares; la inmensa variedad biológica que se esquematiza en la TABLA adjunta (1 y 2); y la subsiguiente evolución antrópica. Más adelante comentaré si, de acuerdo con la opinión que ahora prevalece, el *finalmente* que he utilizado es un *finalmente* temporal o definitivo.

En el Capítulo anterior, ya se ha apuntado la trascendencia de la "gestación" de células eucariotas a partir de células procariotas (3), gestación en la que cabe distinguir dos etapas (4): la pre-endosimbiótica -entre ahora hace 3,5 y 1,5 mil millones de años- y la post-endosimbiótica -desde hace 1,5 mil millones de años hasta el presente. A lo largo de la primera etapa, la célula primitiva pasó a ser una célula nucleada en tanto que a lo largo de la segunda se consolidó la presencia de las mitocondrias, los cloroplastos y, quizá, los peroxisomas; se considera ahora que todos estos *orgánulos* celulares derivan de bacterias fagocitadas por la célula ya nucleada. Merece destacarse que mitocondrias, cloroplastos y peroxisomas son de un tamaño aproximado al de las bacterias.

TABLA

Fechas indicativas de aparición de los distintos tipos de seres vivos e información geocronológica complementaria

Eon (inicio¹)	Período (inicio¹)	Fecha²	<u>Vida acuosa</u>	<u>Vida terrestre</u>
Fanerozoico (570)	Cuaternario (1,64)	0,1		<i>Homo sapiens sapiens</i>
		0,2		<i>Homo sapiens arcaico</i>
		1,6		<i>Homo habilis</i>
	Neogeno ³ (23,3)	1,8		primeros humanos
		4,5		homínidos
	Paleogeno ³ (65)	26		perros
		38		abejas
		40		caballos, murciélagos
		60	ballenas primitivas	hierbas
		63		primeros primates
		65	quinta extinción masiva	tercera extinción masiva
	Cretácico (145,6)	70	peces teleósteos	
		75		<i>Pteranodon</i>
		140	<i>Mosasaurus</i>	<i>Tyrannosaurus rex</i>
	Jurásico (208)	160	cangrejos	aves, plantas con flores
		205		mamíferos
		208	cuarta extinción masiva	segunda extinción masiva
	Triásico (245)	215		dinosaurios
		220	Tortugas	
		230	<i>Diplocaulus</i>	reptiles "planeadores"
	Permiano (290)	248	tercera extinción masiva	primera extinción masiva
		270		<i>Dimetrodon</i>
	Carbonífero (355)	350	<i>Mesosaurus</i>	insectos alados, reptiles (<i>Hylonomus</i>)
	Devoniano (408,5)	360	nautiloides enrollados	anfibios
		367	segunda extinción masiva	artrópodos terrestres
		390	pterapsis	
		400	placodermos	plantas terrestres
	Siluriano (439)	438	primera extinción masiva	
	Ordoviciano (510)	500	primeros vertebrados	
	Cambriano (570)	530	"explosión cambriana"	
		540	tribolitos, nautiloides	
Proterozoico (2.500)		580	seres pluricelulares: fauna Ediacara	
		2.000	primeros eucariotas	
Arqueano (3.800)		3.500	microfósiles más antiguos	
		3.800	indicios químicos en Groenlandia	
Hadeano ⁴ (4.500)				

1.- Millones de años antes del presente (en inglés, b.p. [before present])

2.- Fecha, en millones de años antes del presente, correspondiente al evento indicado en las columnas "Vida acuosa" y "Vida terrestre".

3.- Los períodos paleogeno y neogeno se conocen conjuntamente como *período terciario*.

4.- Eon también denominado *prearqueano* o *priscoano*.

7.2 Animales, plantas y hongos: vida acuosa y vida terrestre

Como se observa en la TABLA, *durante unos tres mil millones de años*, sólo hubo vida monocelular y, esta vida, se desarrollaba en los océanos: los primeros indicios de existencia de *seres pluricelulares* son de hace unos 600 o 700 millones de años. La aparición de seres pluricelulares no representó ni mucho menos la desaparición de los monocelulares, que en la actualidad continúan siendo muy abundantes en toda la biosfera.

Una contestación "comodín" derivada de los principios del neodarwinismo puede servir de respuesta a la pregunta ¿por qué aparecieron los seres pluricelulares?: alguna mutación casual debió hacer factible una "asociación íntima" entre células eucariotas y el "conjunto asociado" así formado resultó mejor facultado, *en las condiciones imperantes en el entorno*, en la lucha por la existencia.

Muy esquemáticamente, puede decirse que los "conjuntos asociados" en los que el nexo de asociación eran las conexiones intercelulares, acabaron por dar origen a los *animales* en tanto que aquellos en los que el nexo era una pared o caparazón externo, acabaron dando origen a las *plantas* y los *hongos*. Los animales son heterótrofos, es decir, para sobrevivir y desarrollarse, requieren nutrientes orgánicos producidos por otros organismos vivos, lo cual implica a su vez, que una de sus características básicas sea la movilidad; las plantas (verdes) son fototróficas, lo que quiere decir que, con la ayuda de la luz (radiación electromagnética), preparan sus propios nutrientes, hecho que justifica su inmovilidad; los hongos han desarrollado un peculiar tipo de heterotrofía que es compatible con la inmovilidad.

Los animales macroscópicos más tempranos de los que se tiene conocimiento se denominan conjuntamente *fauna de Ediacara*, por pertenecer al registro fósil encontrado en los montes Ediacara, al sur de Australia (5). La datación de este registro conduce a una antigüedad de 580 millones de años; en términos geocronológicos, se está a finales del eón denominado *proterozoico* y comienzos del *período cambriano*, período con el que se inicia la *era paleozoica*, con la cual, a su vez, da comienzo el eón *fanerozoico* (en el que aun nos encontramos).

En el período *cambriano*, hace unos 530 millones de años, hay en los océanos un tremendo crecimiento cuantitativo y cualitativo (diversidad de especies) de vida vegetal y animal que suele denominarse *explosión cambriana*. De algún modo, esta explosión debe estar relacionada con el "ajuste" de la concentración de oxígeno en la atmósfera y la formación de la capa de ozono protectora de la radiación ultravioleta, fenómenos que muy probablemente se enmarcaron en una extensa trama de cambios tectónicos y climáticos (5).

Hace unos 438 millones de años, en los comienzos del período *siluriano* o entre los períodos *ordoviciano* y *siluriano* (que son los períodos que siguen al cambriano), ocurre la primera de las cinco *extinciones masivas* bien establecidas de las que me ocuparé más adelante.

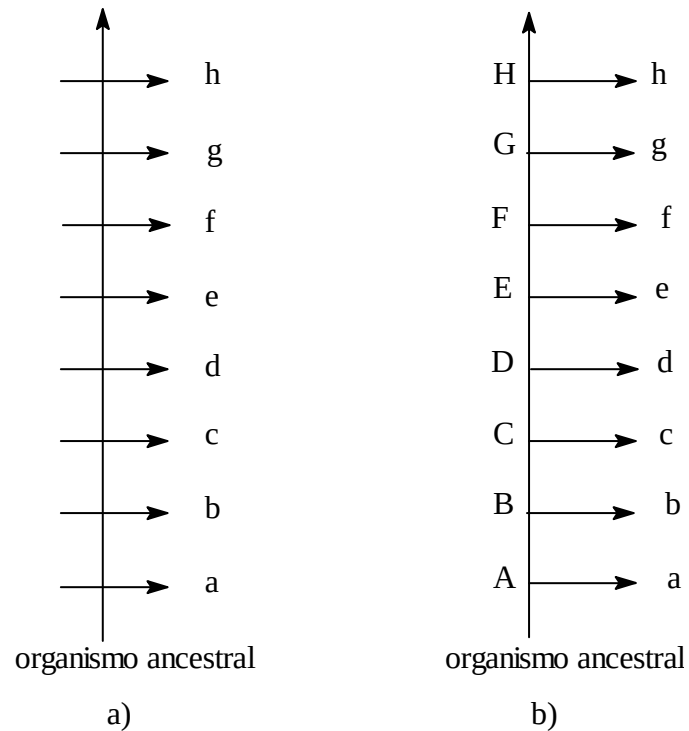
Siguiendo con la información resumida en la TABLA, observamos que *la vida terrestre* comenzó hace unos 400 millones de años, cuando las plantas verdes, acompañadas por las bacterias, invadieron los continentes. A la vida vegetal terrestre le siguió pronto la vida animal.

Uno de los temas clásicamente polémicos en Biología evolutiva ha sido el origen de las aves que, de acuerdo con el registro fósil, tuvo lugar hace unos 150 años, a fines del jurásico (TABLA). Parece que, finalmente, el tema ha quedado "visto para sentencia" (6) y que las aves desciende de dinosaurios carnívoros, pequeños y de dos patas (*terápodos*); muy probablemente, las plumas y otras características que parecen típicas y exclusivas de las aves, habían aparecido previamente, como adaptación a la caza, en animales rápidos pero terrícolas.

7.3 Los "organismos-bifurcación"

Como que en el presente texto sólo se pretende dar *una idea general* de la evolución biológica, no puedo entrar en absoluto en el detalle de los fascinantes procesos evolutivos que se han ido estableciendo científicamente, pero si quiero comentar el importante concepto de *organismo-bifurcación* ("fork-organism") (7). Un organismo-bifurcación es un organismo (actualmente, extinto) que, por mutación, puso en marcha una nueva *escalada de la complejidad*.

La Ilus. 7.1 puede ayudar a aclarar la idea que quiero exponer. En ella, las flechas pequeñas horizontales representan especies o grupos de organismos concretos, en tanto que las dos flechas verticales representan el curso de la evolución.



Ilus. 7.1

La idea sencilla e incorrecta que muchas veces se tiene de la evolución biológica sería la representada esquemáticamente en la Ilus. 7.1, a): un grupo de organismos *evoluciona* y da lugar al grupo de organismos *superior*. "El hombre viene del mono" sería una expresión típica reflejo de esta interpretación, que es incorrecta pues las cosas transcurren de otro modo.

Supongamos (Ilus. 7.1, b) que la evolución ha conducido a organismos con un patrimonio genético capaz de acabar manifestándose, por ejemplo, como la especie que he denominado organismos "e"; supongamos también que, en el camino hacia los organismos "e", algunos individuos sufren una *mutación* que, en su momento, permitirá en el ser alguna

innovación importante: se ha originado así el "organismo-bifurcación" E. Se ha creado una *bifurcación* y la evolución dispone ahora de dos vías: una, seguida por los organismos *que no han sufrido la mutación*, al término de la cual se encuentra la especie "e"; la otra, que es la vía de la *escalada de la complejidad*, seguida por los individuos *que han sufrido la mutación*, cuyo patrimonio genético es capaz de acabar manifestándose (en el caso concreto que se discute) como organismos "f". Suele decirse que la mutación que da lugar a los "organismos bifurcación" introduce un cambio (en el sentido de una mayor complejidad) en el *plan corporal*.

La Ilus. 7.1 b) sirve como pauta de los siguientes resúmenes que, en esencia, son sólo una re-presentación de las Figs. 19.1, 21.1 y 22.1 del libro de de Duve (7):

Evolución de las plantas

Organismo ancestral: algas ancestrales

<u>Especies existentes en el presente</u>	<u>Novedad introducida en el organismo-bifurcación</u>
f: plantas angiospermas	
e: plantas gimnospermas	E: flores, frutos
d: helechos, etc.	D: semillas
c: musgos	C: vascularización
b: algas marina	B: adaptación a la tierra firme, esporas
a: algas unicelulares	A: asociación

Evolución de los invertebrados

organismo ancestral: protistos ancestrales

<u>Especies existentes en el presente</u>	<u>Novedad introducida en el organismo-bifurcación</u>
h: vertebrados	
g: lanceolados	G: vértebras
f: equinodermos, gusanos "bellota"	F: tubo neural, notocordio
e: Moluscos, anélidos, artrópodos	E: el blastoporo pasa de ser la boca a ser el ano
d: gusanos	D: segmentación
c: gusanos	C: celoma
b: dipoblastos	B: mesodermo, simetría bilateral
a: fragelados	A: asociación

Evolución de los vertebrados

organismo ancestral: vertebrados ancestrales

Especies existentes en el presente

i: homínidos, HOMOs

h: chimpancés

g: otros primates

f: otros placentarios

e: marsupiales

d: monotremos (prototerios)

c: reptiles, pájaros

b: anfibios

a: peces

Novedad introducida en el organismo-bifurcación

H: neotenia, bipedismo (o bipedalismo)

G: ??

F: vida en los árboles

E: placenta

D: útero, bolsa marsupial

C: glándulas mamarias

B: huevos amnióticos

A: adaptación a la tierra firme

7.4 Las extinciones masivas

Uno de los aspectos más intrigantes de la historia de la evolución, lo constituye las *extinciones masivas*: se ha comprobado que, en los últimos 500 millones de años, han tenido lugar, al menos, cinco de ellas. Ver TABLA:

- a) La primera extinción ocurrió ahora hace 438 millones de años, prácticamente en el límite entre los períodos *ordoviciano* y *siluriano*, cuando sólo había vida en los océanos.
- b) La segunda, hace 367 (¿377?) millones de años, en pleno período *devoniano* (época *superior*, entre las edades *frasniana* y *fameniana*) fue relativamente moderada y parece que también afectó sólo la vida acuosa, si bien había ya vida vegetal y animal en tierra firme.
- c) La tercera (primera en tierra firme) ocurrió hace 248 (¿250?, ¿251?) millones de años, en el límite entre los períodos *permiano* y *triásico*, por lo cual suele denominarse *extinción permotriásica*, y al igual que las dos siguientes, afectó tanto la vida acuosa como la terrestre. Esta extinción fue realmente catastrófica y rápida (8): se cree que en un periodo breve, que podría no llegar al millón de años, desaparecieron al menos el 80%, y quizá hasta el 95%, de las especies marinas y, en tierra firme, afectó gravemente -por única vez en la historia de la evolución- a los *insectos*. Geológicamente hablando, cuando la extinción tuvo lugar, todos los actuales continentes aun estaban unidos en un supercontinente que se ha denominado *Pangea*.

d) La cuarta (segunda en tierra firme) se sitúa en los comienzos del período *jurásico*, hace 208 millones de años.

e) La quinta y última extinción masiva (tercera en tierra firme), durante la cual los dinosaurios desaparecieron definitivamente del planeta y "dejaron el mando" a los mamíferos que sobrevivieron, tuvo lugar hace 65 millones de años, en el límite entre los períodos *cretácico* y *terciario*.

Las causas posibles de las extinciones masivas son muchas y diversas: catastróficas erupciones volcánicas, impactos de meteoritos, profundos pero graduales cambios climáticos, efectos de la tectónica de placas, "normalización" de situaciones previamente mantenidas en equilibrios inestables, etc. Muy probablemente, no todas las extinciones tuvieron una causa común pero en el caso de la quinta extinción, parece establecido que la causa fue el impacto de un enorme meteorito en el sudeste de Méjico (9); por si el impacto no fuera suficiente, se cree ahora que (¡para desgracia de los dinosaurios!), el meteorito cayó en una región geológicamente única, especialmente rica en azufre y miles de millones de toneladas de azufre (como tal o en sus formas oxidadas) pasaron a la atmósfera terrestre (10).

En el caso de la extinción permo-triásica, la tendencia entre los científicos es considerar que la extinción no tuvo una causa única y que pudieron juntarse diversos efectos catastróficos tales como un dramático cambio climático causado por el progresivo descenso de casi 150 metros en el nivel del mar; la erupción volcánica siberiana en la que fueron "vomitados", al menos, *dos millones de kilómetros cúbicos de lava*; y el rápido regreso de aguas marinas de bajo contenido en oxígeno (anóxicas) (8).

Un punto sumamente importante con respecto a las extinciones masivas es el papel que juegan en el curso o ritmo de la evolución. En la actualidad, va imponiéndose la idea que en los "períodos de calma" los cambios evolutivos transcurren lentamente y el entramado ecológico permanece estable; por el contrario, es en los agitados tiempos post-extinción, cuando tienen lugar cambios rápidos y profundos pues las especies supervivientes deben enfrentarse con entornos muy distintos a los previamente existentes y con notables ausencias en "la competencia".

Elaborando las ideas anteriores, se ha propuesto dividir los últimos 460 millones de años en seis "unidades evolucionarias ecológicas ", de una extensión entre 35 y 142 millones de años; cada unidad empieza y acaba en una extinción masiva y queda estabilizada ecológicamente después de una agitada recuperación vital post-extinción que dura entre 3 y 8 millones de años. En cada unidad, ciertas clases de animales ocupan los nichos clave: en la última, los mamíferos; en la penúltima, los dinosaurios; en la antepenúltima, los reptiles mamiferoides, etc. (11).

BIBLIOGRAFIA Y COMENTARIOS

- 1.- La Tabla ha sido preparada a partir de la ilustración "The Emergence of Life", que aparece en el artículo de Steven Weinberg, "Life in the Universe", *Scientific American*, **1994** (October), 22-27; de la Fig. 1 del libro citado en Nota 2; y de información adquirible en manuales de Geología. Particularmente detallado y bien presentado es el encarte "Taula general de les unitats cronostratigràfiques" adjunto al "Diccionari de Geologia", dirigido por O. Riba y editado por Enciclopèdia Catalana-Institut d'Estudis Catalans, Barcelona, 1997.
- 2.- Bertranpetit, J; Junyent, C., "Viatge als orígens", Edicions Bromera, Universitat de València, 1997. La Fig. 1, "Cronologia evolutiva del planeta" (pp. 16 y 17) es muy completa e informativa.
- 3.- Ver Nota 7 del Capítulo 6
- 4.- Ver Nota 4 a) del Capítulo 5, p. 138.
- 5.- Knoll, A. H., "End of the Proterozoic Eon", *Scientific American*, **1991** (October), 42-29
- 6.- Pavian, K.; Chiappe, L. M., "The Origen of Birds and Their Flight", *Scientific American*, **1998** (February), 28-37.
- 7.- Ver Nota 4 a) del Capítulo 5, pp. 183-84, 201-02, 210-11 y 331.
- 8.- Kerr, R. A., "The Greatest Extinction Gets Greater", *Science*, **1993** (26 November), 262, 1370-1371.
- 9.- "La fin des dinosaures", *La Recherche*, **1996** (December), 293, 53-69. Interesante "dossier" pluridisciplinar con aportaciones de diversos autores.
- 10.- Breve resumen de *Chemical and Engineering News*, **1995** (January 9), 23, que hace referencia al trabajo original de Baines, K. H. et al., *Earth & Planetary Letters*, **1994**, 128, 719.

11.- Kerr, R. A., "Who Profits From Ecological Disaster?", *Science*, **1994** (7 October), 266, 28-30.

Capítulo 8

EVOLUCION ANTROPICA (BIOLOGICA)

8.1 La escalada de la complejidad en los mamíferos

Pronto después de la tercera extinción masiva (primera en tierra firme) los dinosaurios fueron imponiéndose y durante más de 150 millones de años fueron los principales protagonistas en todos los ecosistemas: los había herbívoros, carnívoros y omnívoros; bípedos y tetrápodos; grandes (se estima que el *Brachiosaurus* tuvo un peso superior a los 50.000 kg) y pequeños (hubo terópodos de unos 50 kg) (1); etc. Por el contrario, los mamíferos, que habían aparecido "sólo" unos diez millones de años después, jugaban un papel realmente limitado (2).

Sin embargo, la quinta extinción (tercera en tierra firme) representó literalmente la liquidación masiva de los dinosaurios en tanto que los pequeños y discretos mamíferos existentes en la época, "capearon" bien la catástrofe y, con el tiempo (y hasta el presente), pasaron a ser ellos los principales protagonistas. La escalada de la complejidad prosiguió y hace ahora unos 60 millones de años aparecieron los primeros primates, algunos de los cuales acabaron instalando su *habitat* en la copa de los árboles (3). En la actualidad, sus lejanos descendientes son los distintos tipos de monos y ... ¡nosotros!

En este punto es oportuno comentar que a los métodos tradicionales de estudio de estos temas, hace menos de una década se ha sumado la potente técnica de análisis del DNA nuclear y del DNA mitocondrial, creándose la rama de la Biología que se denomina antropología molecular (en la que se incluye la paleoantropología molecular).

Esta especialidad está aportando nuevos e importantes resultados, algunos de los cuales difieren de los que se creía bien establecidos: el análisis del DNA de las mitocondrias, que es distinto del DNA clásico, el DNA nuclear, se ha convertido en una arma particularmente incisiva ya que este DNA, a diferencia del nuclear, procede exclusivamente de la *madre* del ser estudiado. Unos primeros estudios del DNA mitocondrial parecieron apuntar a una única antecesora para toda la humanidad, antecesora que debió vivir en el Africa oriental, ahora hace unos 200.000 mil años: en la prensa en lengua inglesa pronto aparecieron las expresiones "African Eve" y "Mitochondrial Eve", que se han incorporado al lenguaje científico coloquial. En el momento actual, sigue abierto el debate sobre el exacto significado de los resultados analíticos obtenidos (4).

En la clasificación tradicional de los humanoides, (homínidos y monos), basada fundamentalmente en estudios anatómicos, se distinguen dos familias: la familia Hominidae, con un solo género, el de los homínidos; y la familia Pongidae, con tres géneros: chimpancés, gorilas y orangutanes. Sin embargo, la extraordinaria semejanza entre el patrimonio genético de los chimpancés y los hombres (que, al parecer, es común en un ¡99,7%!) ha conducido a muchos investigadores a proponer nuevas clasificaciones en las que la característica común es que *chimpancés y hombres se originan en una última bifurcación*, como se indica en la TABLA (5).

En efecto, se admite ahora que hace unos 6 millones de años, ocurrió algo de consecuencias trascendentales ¡por lo que a nuestra existencia se refiere!: en el curso evolutivo hacia constituirse como los seres que ahora conocemos como *chimpancés*, algunos individuos sufrieron una mutación que, en su momento, había de permitir importantes innovaciones (como el bipedismo): se había originado el "organismo-bifurcación" H, del resumen "Evolución de los vertebrados", del capítulo anterior y, por tanto, a partir de este momento, la evolución disponía de dos vías. Una de las vías la seguirían los individuos *que no habian sufrido la mutación* y que continuaron su vida arbórea; al término de esta vía, se encuentran los antecesores del chimpancé actual.

TABLA

Años A.C. millones	Superfamilia	Familia	Subfamilia	Tribu	Subtribu	Género
6						HOMO (homínidos)
						Pan (Chimpancé)
7					Hominina	
					Gorillina	Gorilla (Gorila)
13					Hominini	
					Pongini	Pongo (Orangután)
17					Homininae	
					Hylobatinae	Hylobates (Gibón)
25		Hominidae				
	Hominoidea					

Los puntos "o" representan organismos-bifurcación

La segunda vía, que es la vía de la escalada de la complejidad, fue seguida por los individuos *que habían sufrido la mutación* simbolizada por el punto H; estos individuos descendieron de los árboles a la savana circundante y, con ello, iniciaron la larga línea evolucionaria al término de la cual (pasadas unas 300.000 generaciones, si se considera 20 años como la duración media de una generación) se encuentra el *Homo sapiens sapiens*, los humanos anatómicamente modernos.

.

8.2 La escalada de la complejidad en el propio género Homo

Australopithecus ramidus, *Australopithecus afarensis*, *Homo habilis*, *Homo ergaster*, *Homo erectus*, ... , *Homo sapiens* arcaico, *Homo sapiens sapiens* y variedad de especies en ramas laterales como *Australopithecus africanus* o *Homo sapiens neanderthalensis* (con una masa cerebral superior a la del *Homo sapiens sapiens*), ... La historia de lo sucedido desde que, en algún lugar del Africa oriental (que el evento tuvo lugar en Africa oriental parece firmemente establecido), nuestro ancestro decidió dejar la más o menos divertida vida en la copa de los árboles y aventurarse por la savana circundante, es una historia apasionante y compleja, ¡muy compleja!, que se va reconstruyendo poco a poco y en cuyo conocimiento se está invirtiendo mucha y fructífera dedicación.

Por diversas circunstancias, algunos estudios han traspasado el campo de lo puramente científico y han alcanzado una considerable divulgación y popularidad; por ejemplo, el famoso fósil de hembra denominado *Lucy* (así "bautizada" en recuerdo de la canción de los Beatles "Lucy in the Sky with Diamonds"). *Lucy* (6) fue descubierta en 1974 y se le atribuye una antigüedad de unos 3,5 millones de años; ya andaba erecta y se la encuadra ahora en el grupo de los *Australopithecus afarensis*.

El tema es tan amplio y complicado y, en algunos aspectos, también tan polémico, que he considerado que en lugar de presentar un resumen, forzosamente parcial e incompleto, era preferible remitir al lector a unas pocas referencias seleccionadas: afortunadamente, no sólo se encuentra buena información en trabajos

originales (7, 8) y libros (9, 10) sino también en recientes artículos periodísticos de divulgación científica (11, 12).

Uno de los factores claves en la *escalada de la complejidad* dentro del, digamos, género combinado *Australopithecus-Homo*, fue la adopción del *bipedismo*, por lo que termino este apartado con unos comentarios sobre el mismo. El bipedismo permitió la posición erecta, la cual, a su vez, permitía ver mejor a los posibles enemigos y a las posibles presas; liberaba para acciones más productivas uno de los dos pares de manos (el de las "extremidades superiores"); y hacía posible una generosa aspiración de aire. Incidentalmente, es curioso observar que en el hombre el fruto de la evolución son los *pies*, no las *manos*; nuestros parientes más próximos (orangutanes, gorilas, chimpancés) no son *cuadrúpedos*, son *cuadrumanos*.

Se considera ahora que el bipedismo puede incluso haber influido directamente en nuestra *evolución cultural o social*. Según parece (13), el bipedismo hizo que en los homínidos el canal de nacimiento "se retorciese" y el parto pasara a ser *una cosa complicada* (no lo es para las hembras de ningún género animal relacionado). Como consecuencia, la partera necesitó ayuda y compañía, fomentándose las relaciones sociales (las hembras no bípedas paren solas), la inducción a la comunicación oral, etc.

8.3 ¿Pudo la evolución seguir algún otro camino alternativo?

En nuestro planeta Tierra, ¿pudo la evolución haber seguido un camino distinto al seguido para llegar a un ser inteligente, conceptualizador o como quiera designársele ... capaz de formularse este tipo de preguntas? La respuesta es importante no sólo por ella misma sino por su íntima conexión con otras preguntas de gran trascendencia y permanente actualidad: ¿hay *vida* en algún otro lugar del Universo?; si la hay, ¿es como la nuestra?; ¿hay *vida inteligente* en algún otro lugar del Universo?; si la hay, ¿es como la nuestra?

En mi opinión -como en la de muchos científicos actuales- las posibilidades de aparición de vida y las opciones evolutivas con posibilidades de éxito eran mínimas y el

hombre es como es porque no podía ser de otro modo. En términos coloquiales, se diría que la idea dominante es que, en el planeta Tierra, la evolución ha llegado donde ha llegado porque "todo ha ido lo mejor que podía ir". A continuación, resumo una serie de consideraciones que, aunque formuladas en un trabajo ya bastante antiguo (14), continúan siendo válidas.

-En el planeta Tierra, la larga evolución acuática, antes de la invasión de la interfases tierra-aire, condujo a plantas estáticas (sistemas autotróficos fotosintéticos) y a animales móviles *heterotróficos*, que, en último término, lo que hacen es aprovechar la energía acumulada por las plantas (energía interna, química). Los triunfadores en la competitiva vida de los seres heterotróficos (busca del alimento, persecución de la presa, huida del enemigo, etc.) fueron los de constitución aerodinámica, veloces, simétricos y que, en último término, acabaron por tener una boca anterior y un ano posterior. De ellos debía derivar el sistema vivo inteligente para el cual sería fundamental la más amplia disponibilidad de energía.

-Alrededor de la boca debe haber los órganos sensoriales y el "centro de cálculo", el cerebro o ganglión, debe estar próximo para ahorrar espacio, reducir las posibilidades de daño y reducir al máximo los "ruidos de fondo". En todo caso, es preferible que los conductores de los datos sensoriales sean cortos, aunque sea a costa de una mayor longitud en los conductores de las ordenes.

-Dada la base química de la vida, la miniaturización alcanzada en el *Homo sapiens* representa probablemente un límite difícilmente superable y que, por tanto, para el pensamiento conceptual se precisan cerebros del volumen del del *Homo sapiens*.

-Parece que está ahora razonablemente bien establecido que el voluminoso cerebro del *Homo sapiens* emergió concurrentemente con su comportamiento social, el uso de herramientas y la comunicación oral. Se cree que ha sido un proceso de "feed-back" y el uso de herramientas, por ejemplo, es difícil en el agua e impensable en el aire. El ser de cerebro voluminoso habrá de haber emergido en la interfases tierra-aire.

-La locomoción se hace siempre con pares de patas o piernas y los dos pares de los mamíferos superiores son justificables a partir de los seres acuáticos de que derivan. Pero una mayor disponibilidad de energía, imprescindible para la vida inteligente,

implica una mayor entrada de aire y esto se logra con la posición erecta, sobre un único par de piernas (bipedismo).

En este punto es oportuno enlazar con otro tema atrayente, ¿puede el ser inteligente tener un tamaño muy distinto del del *Homo sapiens*? Aquí, me limito también a resumir un trabajo que se ha convertido en un clásico en su campo (15). La idea directriz es que el ser erecto no puede tener un tamaño cualquiera ya que son muchas las cosas que no dependen linealmente de la altura: aunque en la literatura no científica se haya hecho, las características de enanos y gigantes no pueden deducirse mediante una simple regla de tres a partir de la altura de los humanos "normales".

-La cabeza de un hombre de unos dos metros que tropieza y cae adquiere una cierta energía cinética, determinante del daño que la caída ocasiona; si la estatura fuese de cuatro metros, la energía cinética que su cabeza adquiriría en la caída sería aproximadamente 32 veces mayor y andar sería realmente peligroso. Hay un ejemplo muy conocido sobre el mayor peligro que corren, al caerse, los animales grandes (16): si se arroja un ratón a un pozo de 800 metros, al llegar al fondo se dará un ligero golpe y saldrá corriendo, siempre que el suelo sea lo bastante blando; una rata, se mataría, un hombre se descoyuntaría y un caballo estallaría. Estas consideraciones ponen un *límite superior* al tamaño de los seres bípedos, entre los que se encuentra el *Homo sapiens*.

-El uso del fuego (que el hombre logró dominar hace unos 400.000 años) suele considerarse un factor diferenciador típico entre el hombre y la bestia; ahora bien, el fuego tiene unas limitaciones dimensionales que implican un tamaño crítico por parte del usuario y ello nos permite disponer de un *límite inferior* para la altura del ser inteligente.

-Una llama no puede tener una longitud menor de algunos milímetros (las cerillas no pueden ser mucho más pequeñas de lo que son) porque la temperatura de ignición de gases y vapores es bastante alta (algunos centenares de grados) y si la temperatura baja por debajo de estos valores, la llama se apaga. Ahora bien, la llama se mantiene con el oxígeno del aire y el aire es frío (en relación al tema que se discute) y enfría la llama y, por tanto, la llama debe ser suficientemente "poderosa" para calentar el aire de su entorno (y para conseguir volatilizar el combustible).

-Si el material de partida es el tronco seco de un árbol, su tamaño crítico es considerablemente mayor que el de la llama "pura" pues debe calentarse la parte inerte de la madera. Para transportar los leños que mantendrán vivo el fuego se necesita realizar un trabajo que los seres pequeños, como las hormigas, no pueden realizar. El ser utilizador del fuego, debe tener, cuando menos, *una altura de unos decímetros*.

Podrían discutirse toda una serie de funciones que distinguen al hombre de las bestias: el uso de la energía mecánica y animal; el uso de la rueda; el uso de la piedra y el metal manipulados; el uso de la escritura; el uso de la información almacenada; etc. Probablemente, la discusión permitiría ir acotando, "horquilleando", el tamaño ideal del ser inteligente. Si la discusión se hiciera rigurosamente, el tamaño ideal del ser inteligente ¿resultaría ser el del *Homo_sapiens*?

8.4 ¿Ha terminado la evolución biológica?

Fijémonos bien: la pregunta se refiere a la *evolución biológica*, es decir, a la evolución que se interpreta neodarwinianamente mediante el binomio mutaciones al azar - selección natural, en busca de la mejor adecuación al entorno. Al llegar al *Homo* se invalidan las reglas del "juego" que regían hasta el momento, puesto que el *entorno* deja de ser inmodificable: precisamente, una de las características del colectivo *Homo* y, más en concreto, del *Homo sapiens sapiens*, es procurar modificar el entorno para acomodarlo a sus necesidades y deseos. En la actualidad, si hace frío, se procura instalar calefacción; si hace calor, se procura instalar aire acondicionado; si se tienen defectos auditivos o visuales, se procura solucionarlos con los artilugios adecuados; etc., etc. La especie humana ya no debe esperar centenares, miles de años para que una *mutación contingente* abra el camino a una mejor adecuación al entorno existente: resulta mucho más simple, cambiar el entorno y esto es lo que se hace y lo que se hace cada vez con más medios y más rapidez (17).

Parece innegable que la *evolución biológica*, por lo que respecta a su, diríamos, límite superior, ha terminado¹. En estilo de comunicado militar podría decirse:

"Hominizado y ocupado por tierra, mar y aire el planeta azul, la *escalada de la complejidad* ha terminado". La fecha aproximada del comunicado sería 100.000 A.C.; sobre el firmante, no hay unanimidad.

Lo que sucede o puede suceder a otros niveles del proceso evolutivo es confuso y complejo, pues depende mucho de la intervención presente y futura del *Homo sapiens sapiens*. Por ejemplo, no hay la menor duda que la evolución biológica sigue en plena dinámica en el dominio de los seres procariotas no sólo, diríamos, *per se*, sino también en respuesta a "las agresiones humanas": permanente prueba de ello la constituye la repetida aparición de cepas de microbios resistentes a antibióticos en su momento activos. En el más puro estilo neodarwiniano, aparecen mutantes y más mutantes hasta que uno de ellos se encuentra cómodo en un determinado entorno antibiótico. A título de experiencia personal relacionada, puedo indicar que nunca en mi vida he visto moscas más grandes y, al parecer, saludables, que las que me rodearon durante una visita a una fábrica de DDT.

Al otro lado de la moneda, el interrogante se refiere al comportamiento que los ecosistemas puedan tener en respuesta a "las protecciones humanas". El respeto a la *biodiversidad*, ¿es realmente un respeto global?, ¿puede en realidad serlo? Los "respetos parciales", ¿pueden ser causa de inesperados desequilibrios poblacionales? Los microbios causantes de enfermedades ¿forman parte de la biodiversidad que debe ser protegida? ¿Y los animales superiores agresivamente depredadores? Por el momento, el tema queda abierto.

¹ En las consideraciones formuladas en este apartado, he ignorado la posible *evolución biológica*, desencadenada por la modificación del patrimonio genético llevada a cabo *artificialmente* por el propio *Homo sapiens sapiens*. Se trata de un tema nuevo y grave que no considero oportuno tratarlo marginalmente, como aquí debería hacerse.

BIBLIOGRAFIA Y COMENTARIOS

- 1.- Thomas A. McMahon, John Tyler Bonner, "Tamaño y Vida", Prensa Científica, Editorial Labor, Barcelona 1986.
- 2.- Ver organismo-bifurcación C, en la descripción de la "evolución de los vertebrados", dentro del apartado 7.3.
- 3.- Ver organismo-bifurcación F, en la descripción de la "evolución de los vertebrados", dentro del apartado 7.3.
- 4.- Ayala, F. J., "The Myth of Eve: Molecular Biology and Human Origins", *Science*, **1995** (22 December), 270, 1930-1936. Ver también pp. 232-234 del libro de de Duve (Nota 4, Capítulo 5)
- 5.- El autor ha elaborado esta Tabla a partir de la de Morris Goodman, reproducida en la p. 173 del libro de Roger Lewin, "Patterns in Evolution. The New Molecular View", Scientific American Library, New York, 1997. La clasificación que en la Tabla se propone tiene amplia pero no unánime aceptación, pero, en cualquier caso, el concepto de un ancestro común entre los chimpancés y los homínidos está plenamente consolidado.
- 6.- Donald Johanson, Blake Edgar (principal photography by David Brill), "From Lucy to Language", A Peter N. Nevraumont Book, Weidenfeld and Nicolson, London, 1996. Libro muy bien presentado y con un contenido fotográfico extraordinario.
- 7.- Wood, B., "The oldest hominid yet", *Nature*, **1994** (22 September), 371, 280-281.
White, T. D.; Suwa, G.; Asfaw, B., "*Australopithecus ramidus*, a new species of early hominid from Aramis, Ethiopia", *Nature*, **1994** (22 September), 371, 306-312.
Fischman, J., "Putting Our Oldest Ancestors in Their Proper Place", *Science*, **1994** (30 September), 265, 2011-2012

8.- Gibbons, A., "Old Dates for Modern Behavior", *Science*, **1995** (28 April), 268, 495-496.

Brooks, A. S. *et al.*, "Dating and Context of Three Middle Stone Age Sites with Bone Points in the Upper Semliki Valley, Zaire", *Science*, **1995** (28 April), 268, 548-553.

Yellen, J. E. *et al.*, "A Middle Stone Age Worked Bone Industry from Katanda, Upper Semloki Valley, Zaire", *Science*, **1995** (28 April), 268, 553-556.

9.- Josef H. Reichholf, "La aparición del hombre", Colección Drakontos, Crítica, Grupo Grijalbo-Mondadori, Barcelona, 1994.

10.- Libro citado en Capítulo 7, Nota 2.

11.- Jordi Serrallonga (con ilustraciones de Marcel Socías), "Los Diez Eslabones del Hombre", *Magazine del periódico La Vanguardia*, **1998**, 19 de Abril, 39-62.

12.- Luis Miguel Ariza (infografía: A. Grajera, Albondi y F. Tórtola), "La huella humana", *El País semanal del periódico El País*, **1998**, 14 de Junio, 30-45.

13.- Fischman, J., "Putting a New Spin on the Birth of Human Birth", *Science*, **1994** (20 May), 264, 1082-1083.

14.- Bieri, R., "Huninoids on other planets?", *American Scientist*, **1964**, 52, 452-458.

15.- Went, F. W., "The size of man", *American Scientist*, **1968**, 56, 400-413

16.- Haldane, J. B. S., "On being the right size", *Possible Worlds*, pp 20-28, Harper, New York, 1928.

17.- El autor recomienda la lectura del Capítulo 8, "Els nostres gens, del passat al futur", del libro referenciado en el Capítulo 7, Nota 2.

Capítulo 9

VIDA EXTRA-TERRESTRE

En el apartado **8.3** (Capítulo anterior) han quedado sin responder unas importantes preguntas: ¿hay *vida* en algún otro lugar del Universo?; si la hay, ¿es como la nuestra?; ¿hay *vida inteligente* en algún otro lugar del Universo?; si la hay, ¿es como la nuestra? A pesar de la extensa literatura sobre el tema (que, *en general*, no me interesa por su superficialidad), los argumentos básicos objeto de discusión científica son pocos y sólo a ellos me referiré, pues creo que se está ya en condiciones de formular respuestas sino definitivas, al menos, razonadas.

9.1 Los compuestos orgánicos como soporte material de la vida

En la actualidad, la creencia generalizada entre los científicos es que sólo los compuestos orgánicos, es decir, los derivados del *carbono* son adecuados, gracias a su *variedad, estabilidad o perdurabilidad, modificabilidad y reproducibilidad* (en el sentido de facilidad de producción repetida de un mismo objeto), para constituir el componente básico del necesario soporte material de la *vida*. En cierto modo, con lo dicho, queda ya contestada la segunda pregunta: en efecto, *si* hay vida en algún otro lugar del Universo, *esta vida será como la nuestra*, basada en la Química del carbono¹.

La *modificabilidad* y la *reproducibilidad* de los compuestos orgánicos se comprueban a diario en los laboratorios químicos. Veamos, aunque sólo sea muy superficialmente, la justificación de la *variedad* y *estabilidad*.

¹ En cualquier caso, si no lo es, lo más probable es que no haya posibilidad de establecer ningún tipo de comunicación y, por tanto, es inútil preocuparse por el tema.

La experiencia indica que existe una enorme cantidad de compuestos orgánicos: en el *Chemical Abstracts* hay registrados más de diez millones, en tanto que los compuestos derivados del resto de los elementos (unos cien) del Sistema Periódico, no deben llegar a los cien mil. La tetravalencia del átomo de carbono y su capacidad para unirse con otros átomos del mismo elemento y con átomos de muy diversos elementos químicos es fundamental para el "éxito cuantitativo" de la Química orgánica. Todos estos compuestos orgánicos son, en líneas generales, interpretables a base de un sencillo esquema lógico: se considera, sobre el papel, que los *hidrocarburos*, es decir los compuestos que sólo contienen carbono e hidrógeno, son las "estructuras de base" y que estas "estructuras de base" pueden modificarse substituyendo hidrógenos por *grupos funcionales* que contienen otros elementos. Los grupos funcionales más frecuentes son los derivados del oxígeno (O), del nitrógeno (N), del fósforo (P) y del azufre (S),

La clave de la diferencia -incluso de la diferencia numérica- entre los derivados del carbono y los posibles derivados de otros elementos estriba en su *estabilidad*, estabilidad que puede retrotraerse a la de los propios hidrocarburos: el tema lo he tratado con rigurosidad en otro lugar (1) discutiendo tanto la "estabilidad intrínseca" como la "estabilidad por inercia reaccional". Aquí me limitaré a sugerir al lector que compare las propiedades del hidruro más sencillo del carbono, el metano (CH_4), con las de los hidruros más sencillos vecinos (véase cualquier Sistema Periódico): el borano (BH_3), el amoníaco (NH_3) y el silano (SiH_4). Las grandes cantidades de metano que circulan por las tuberías urbanas son prueba más que suficiente de su estabilidad; en cambio, el borano es un *ácido de Lewis* muy reactivo, tanto que en realidad no existen moléculas de BH_3 pues reaccionan entre si dando B_2H_6 ; el amoníaco, NH_3 , es bien conocido por comportarse como un compuesto alcalino o básico; y el silano, SiH_4 , arde espontáneamente en contacto con el aire.

En términos químicos relativamente rigurosos puede afirmarse (1) "que si se toma como referencia la energía de los orbitales moleculares ocupados por los pares de electrones compartidos, el metano no presenta ni orbitales de análoga energía ocupados por pares de electrones sin compartir (como ocurre con el amoníaco), ni orbitales de análoga energía desocupados (como ocurre en el borano y en el silano [en este son los

orbitales 3d]). Las características orbitálicas que se dan en el metano se repiten en todos los hidrocarburos saturados, pero no se dan en ningún otro compuesto, sea este del elemento que sea". Estas características *moleculares*, derivadas de las características *atómicas*, conducen *determinísticamente* a que el soporte material de la vida haya de basarse en los derivados del carbono.

Para evitar posibles malinterpretaciones, debo aclarar que si bien los elementos químicos que más frecuentemente intervienen en la construcción de las moléculas "sencillas", además de los inevitables carbono (C) e hidrógeno (H), son el oxígeno (O), el nitrógeno (N), el fósforo (P) y el azufre (S), en las complicadas moléculas bioquímicas y para un normal funcionamiento del complejísimo quimismo vital de los seres vivos superiores, se precisa la intervención de muchos otros de los elementos del Sistema Periódico. En el caso del hombre, por ejemplo, en una relación que no pretende en absoluto ser exhaustiva, observamos que son esenciales el hierro (Fe) (en los eritrocitos), el cobre (Cu), el zinc (Zn), el manganeso (Mn) y el selenio (Se) (en diversas enzimas); el bromo (Br) (en las hormonas del tiroides); el litio, el sodio y el potasio, como cationes (Li^+ , Na^+ , K^+) y el cloro, como cloruro (Cl^-), en los fluidos corporales; el calcio, también como catión (Ca^{2+}), en los huesos;; etc. Al encontrar inesperadamente, en un artículo bioquímico, que trazas del elemento *vanadio* eran indispensables para el buen funcionamiento de un delicado proceso del quimismo vital, se me abrió el interrogante (que continua abierto) de si, para el correcto funcionamiento de los animales superiores, no serán necesarios *todos* los elementos del Sistema Periódico.

9.2 ¿Hay vida en algún otro lugar del Universo? ¿Hay vida inteligente en algún otro lugar del Universo?

En el Capítulo 5, haciendo gala de una vaguedad digna de mejor causa, he dicho que "Por un largo recorrido que de Duve denomina "edad de la protocélula" se llegó finalmente a un *organismo vivo primigenio* que muchos autores consideran el común antepasado de todos los seres vivos que fueron, son o serán" (¡en el planeta Tierra!). Recordemos que, al originarse la vida, se culmina la etapa de *evolución determinística* y se inicia la etapa de la *evolución contingente*. A pesar de lo poco, poquísimos, que en concreto se sabe sobre el origen de la vida, lo que si va resultando cada vez más

evidente es que su aparición exige unos requisitos *muy estrictos* y por ello la opinión prevalente es que sólo puede tener lugar en situaciones *muy próximas* a las que, *en su día*, se dieron en el planeta Tierra.

De acuerdo con lo expuesto, el primer paso en la permanente investigación de posible existencia de vida extra-terrestre es, en el momento actual, la localización de cuerpos celestes de características lo más próximas que sea posible a las del planeta Tierra; el satélite de Júpiter denominado *Europa* ocupa ahora un lugar preferente en este contexto. El *quid* de la cuestión está en el grado de proximidad que pueda ser necesario para que la evolución determinística siga idéntico curso al seguido en la Tierra. Por ejemplo, ¿deben también ser muy próximas las características de los espacios estelares circundantes? Para no alargar el comentario, ¿las "situaciones muy próximas" no habrán de ser, quizá, "situaciones idénticas"?

Dando por supuesto un escenario muy parecido al planeta Tierra, un razonamiento simple parece conducirnos a aceptar que si hay vida extra-terrestre toda ella será análoga a la terrestre, porque la evolución habrá seguido el mismo curso; lo único variable podría ser *donde* ha llegado la escalada de la complejidad: si a un punto "pre-*Homo sapiens sapiens*", o justo al "*Homo sapiens sapiens*" o bien a un punto "post-*Homo sapiens sapiens*". Sin embargo, este razonamiento ignora un aspecto muy importante al que, en discusiones como la presente, no parece dársele la atención que merece: de acuerdo con la interpretación neodarwiniana, la evolución biológica en el planeta Tierra, ha sido una *evolución contingente*, una evolución que se interpreta gracias a una serie de eventos, las *mutaciones*, que en principio *podían no haber ocurrido nunca* o no haber ocurrido *en el momento y lugar oportunos*. Aun partiendo de un mismo *organismo vivo primigenio* en unas idénticas o muy parecidas condiciones de entorno, ¿cuál es la probabilidad de repetición de la evolución biológica en la forma que ha tenido lugar en el planeta Tierra?

9.3 El principio antropo-cosmológico

Acepto que, con todo, resulta difícil admitir, por ejemplo, que con tantos millones de millones de objetos astronómicos sólo haya vida inteligente en el planeta

Tierra. De un modo u otro, el hombre se ha formulado siempre preguntas relacionadas con este tema; quizá una de las formulaciones más poéticas la encontramos en el "Paraíso perdido" de Milton, cuando Adán, incapaz de entender que el Universo rinda pleitesía a la humilde Tierra con sus miles y miles de "inútiles" estrellas, pregunta al arcángel Rafael:

"¿Cómo puede ser que la Naturaleza, tan seria y frugal, pueda haber cometido tal contrasentido creando con mano superflua tantos y tan nobles objetos?"

El arcángel replica: "El *amplio circuito del cielo* es evidencia de la gran magnificencia del Hacedor". Indudablemente, el arcángel no creyó pertinente dar en aquel momento una contestación más técnica del estilo de la que hubiera dado un científico moderno adepto al resucitado Principio cosmológico antrópico.

Este Principio, del que hay dos versiones, *la dura* y *la blanda* (Nota 2), en cierto modo puede formularse diciendo que "las cosas son como son porque si no fuesen como son la evolución no habría conducido a seres inteligentes que puedan preguntarse: ¿por qué las cosas son como son?". El Principio cosmológico antrópico, favorece, pues, la idea que el planeta Tierra constituye un caso singular. Sólo daré un ejemplo para ilustrar el tipo de argumentación cuantitativa en que se basa dicho Principio.

De acuerdo con la teoría de la relatividad, en la Naturaleza existe una magnitud invariante, que tiene las dimensiones de una velocidad: la velocidad de la luz en el vacío, c . La existencia de este invariante pone el espacio y el tiempo en pie de igualdad y de ello se deriva que el tamaño del universo observable (representado por su radio, λ) está ligado a su edad (t_u) por la relación

$$\lambda = c \cdot t_u$$

El modelo del *big bang* permite calcular la masa total contenida en el universo en expansión; esta masa (M_u) viene dada por la expresión siguiente, en la cual $M_\odot$ es la masa del sol y s es el símbolo del segundo:

$$M_u \cong 10^5 \cdot M_\odot \cdot t_u / 1s$$

Se cree que nuestro Universo consta de 10^{12} galaxias, análogas a la galaxia por antonomasia: la Vía Láctea. Indudablemente, 10^{12} galaxias son muchas galaxias y podemos estar tentados a considerar que sería posible una considerable "economía cósmica" con poca repercusión sobre la vida y, en particular, sobre la vida inteligente: veamos que ocurriría si el Universo consistiera exclusivamente de la Vía Láctea. El cálculo aproximado es fácil, pues se considera que cada galaxia consta de unas 10^{11} estrellas (soles) y, por tanto, la vida o tiempo de existencia (t_e) de este universo "económico" sería:

$$10^{11} \cdot M_{\odot} \cong 10^5 \cdot M_{\odot} \cdot t_e / 1s$$

$$t_e \cong 10^6 \cdot s \cong \underline{\underline{12 \text{ días}}}$$

Vemos, pues, que un universo consistente en la Vía Láctea, con sus 10^{11} estrellas (!lo que no es ninguna nadería!), se habría expandido sólo durante unos 12 días, pero según sabemos se requieren miles de millones de años sólo para transformar el hidrógeno primordial en los otros elementos de los cuales el ser inteligente está construido. Por tanto, en unos días, no podrían haber emergido observadores inteligentes que se hicieran preguntas sobre este universo "cósmicamente" (¿o quizá "cómicamente"?) económico.

Si el arcángel Rafael hubiese creído oportuno expresarse en términos del Principio cosmológico antrópico, hubiese contestado al Adán del "Paraíso perdido": "el *amplio circuito del cielo* es necesario para que tu existas y puedas formularte las preguntas que te estás formulando". La contestación no contradecía la del texto de Milton sino que aclararía que "la gran magnificencia del Hacedor" consistió en haber decidido crear al Hombre.

BIBLIOGRAFIA Y COMENTARIOS

- 1.- Libro referenciado en Nota 7 del capítulo 5.
- 2.- John D. Barrow, Frank J. Tipler, "The Anthropic Cosmological Principle", Clarendon Press, Oxford, 1986. Se trata de un libro extenso (más de 700 páginas) e interesante pero de contenido muy heterogéneo.

Capítulo 10

EN BUSCA DEL PORQUÉ

10.1 Una aclaración necesaria

No hay duda que el científico actual está mucho mejor preparado para profundizar en el “como” suceden las cosas que en el “porqué” suceden. Si a un químico trabajando en su laboratorio se le pregunta sobre la reacción que está llevando a cabo, a buen seguro dará explicaciones razonables del tipo “tal reactivo ataca tal región de tal molécula, etc.”; si el químico es especialista en aquella reacción, la explicación que nos dará sobre el *mecanismo de la reacción* (sobre *como* transcurre) puede llegar a ser de un detalle, precisión y profundidad realmente espectaculares. Del dominio que los científicos tienen del *como* ocurren los hechos (o en como se suponen que ocurren, en función de sólidos razonamientos) nos da buena cuenta los capítulos anteriores en los que hemos llegado al *Homo sapiens sapiens* partiendo del big bang.

Muy al contrario, la preparación del científico para responder la pregunta ¿por qué tiene lugar este suceso? es prácticamente nula. Quizá considere que el “porqué” de las cosas corresponde más al campo filosófico que al científico pero lo cierto es que, al menos aparentemente, la pregunta le interesa poco y sus respuestas son pobres, cuando no erróneas.

Lo curioso, lo sorprendente, lo irritante de la situación es que el científico no sólo tiene a su disposición en cualquier texto de Física o de Química el *Segundo Principio de Termodinámica, a partir del cual se generan científicamente las respuestas a los “porqué”* (1), sino que dicho Principio le es familiar, lo *conoce*, lo *sabe*. La gran mayoría de profesores de Física o Química, pongo por ejemplo, nos darán una definición razonable del Segundo Principio, porque su conocimiento les ha resultado obligado a lo largo de su vida profesional, pero me temo que muy pocos al pedirles una respuesta muy precisa y profunda, a la pregunta

¿por qué cae una piedra hasta topar con el suelo? nos responderán algo parecido a: “porque al caer, la energía potencial de la piedra ha pasado a cinética y, finalmente, al topar con el suelo, a energía térmica (calor) y con ello ha aumentado la *entropía* del universo del sistema en estudio, cumpliéndose así el Segundo Principio”.

Al llegar a este punto, el lector quizá esté preguntándose a que conduce esta larga introducción. La contestación es la siguiente: a continuación intento ensayar una respuesta, basada en el Segundo Principio de Termodinámica, a la pregunta ¿por qué la *evolución global* tuvo lugar como tuvo lugar? y es mi deseo que una respuesta de este tipo no se considere una novedad, una originalidad mía (2). Si algo hay de *original* en tomar como base el Segundo Principio, será en el sentido etimológico del término, en el sentido de *volver al origen*.

10.2 El Principio de coherencia

En los Capítulos anteriores he procurado dar una visión global de “como” ha tenido lugar la *evolución*: ha sido una visión personal pero, *en general*, me he limitado a exponer, muy condensadamente, las ideas actualmente prevalentes en el mundo científico. Por el contrario, en este Capítulo el tratamiento es mucho más personal.

Como punto de partida, me adhiero al que se ha dado en llamar “Principio de coherencia” (3), de acuerdo con el cual en todo razonamiento científico referente a épocas pasadas o incluso remotas, las primeras hipótesis de trabajo que se deben manejar (y continuar manejando en tanto en cuanto no se demuestre su inadecuación) son las que se manejarían en el momento actual. Y en el momento actual, uno de los pocos Principios básicos que rigen el quehacer científico es el Segundo Principio de Termodinámica.

De acuerdo con lo expuesto, para explicar *porqué las cosas han sucedido como han sucedido*, lo que procede es aplicar el Segundo Principio de Termodinámica a la situación existente inmediatamente después de haber tenido lugar el big bang, pero primero son necesarias algunas precisiones previas (4).

10.3 Sistemas, universos y Universo

Cuando tiene lugar cualquier suceso -la caída de una piedra, un apretón de manos, la oxidación de la glucosa dentro de nuestro organismo- en puridad todo el Universo resulta afectado: después del suceso, ninguna parte del Universo es exactamente igual a como era antes del mismo. Sin embargo, en Termodinámica, en la inmensa mayoría de los casos, es admisible definir un universo limitado, el *universo del suceso*, que incluye todos los objetos cuyos cambios son de significación para la interpretación del fenómeno en estudio.

Resulta conveniente considerar el universo del suceso formado por dos “partes” conectadas o acopladas entre sí:

- a) El *sistema* formado por los “materiales” aislados (real o conceptualmente) para el estudio; en principio, en el sistema pueden ocurrir sucesos o cambios de todo tipo;
 - b) Los *alrededores térmicos*, que sólo pueden cambiar en energía calorífica.
- (en ocasiones resulta conveniente considerar también unos *alrededores mecánicos*, con los que el sistema puede intercambiar los otros tipos de energía).

Una vez seleccionado, el sistema ya no cambia, lo que cambia es el *estado* del sistema, que, dentro de un determinado universo, pasa de un *estado inicial* a un *estado final* (5). ¿Por qué tiene lugar cambio alguno? Este es el dominio del Segundo Principio de Termodinámica.

El Principio de coherencia justifica que intentemos aplicar el Segundo Principio a un *universo* muy particular: el Universo.

10.4 El Segundo Principio de Termodinámica.

Utilizaré una de las formulaciones “más crudas” del Segundo Principio, que es la siguiente: “Supuesto el tiempo necesario, todo universo cambia a fin de que se cumplan las leyes del azar (o leyes de la probabilidad)” (4b); obviamente, si ya se cumplían las leyes del azar, el universo del suceso no cambia. Las leyes del azar o de la probabilidad son *leyes de los grandes números* y este tipo de formulación del Segundo Principio es posible porque se presupone la admisión de una *estructura microcósmica* tanto de la materia como de la energía: núcleos, electrones, átomos, moléculas, cuantos de energía $h\eta$, etc. De esta formulación básica se pasa con facilidad a formulaciones más habituales, como son: “*La entropía de un universo, tiende a aumentar*” o “*En todo cambio, la entropía de un universo*

aumenta” o “Al llegar al estado de equilibrio, la entropía de un universo llega a su máximo” (6).

Para evitar extrapolaciones incorrectas es necesario tener siempre bien presente la condición “Supuesto el tiempo necesario” (7). El paso del universo del sistema del estado inicial al final *no* ocurre instantáneamente; de hecho, si así fuera, ya habría ocurrido “todo”, incluso en el universo que más nos interesa, el Universo, y no habría lugar para razonamientos y explicaciones.

10.5 La distribución boltzmanniana

Es importante no tener dudas sobre el significado de la expresión “a fin que se cumplan las leyes del azar”. Para aclarar ideas, discutiré dos ejemplos concretos: el primero, tiene contenido físico en tanto que el segundo es un ejemplo, diríamos, “casero”.

1) Consideremos el universo constituido por el *sistema* formado por un conjunto considerable de átomos, acoplado a unos *alrededores*, con los que puede intercambiar energía de todo tipo; consideremos un *estado inicial* en que todos los átomos estén en su *segundo nivel energético*, E_2 .

Empecemos por centrar nuestra atención en uno de los átomos, el átomo nº 1, por ejemplo. Por estar en el estado correspondiente al segundo nivel energético, el átomo está excitado y por tanto, usando la expresión más frecuente, tiene “tendencia” a *emitir* un fotón y pasar al estado fundamental, de energía E_1 . ¿Qué significa esta “tendencia”? ¿Puede expresarse por algún Postulado o Principio general? En realidad, es un caso particular del Segundo Principio de Termodinámica. Transcribo las acertadas palabras del Premio Nobel de Física, R. P. Feynman (8): “¿Por qué un átomo radia? La respuesta está relacionada con la *entropía*. Cuando la energía está en el campo electromagnético [en nuestra terminología, en los *alrededores*] tiene tantos distintos modos de existencia -tantos lugares donde puede ir- que si buscamos la condición de equilibrio [en nuestra terminología, el *estado final*] encontramos que en la situación más probable, el campo está *excitado* con un fotón y el átomo está des-excitado”

Pasemos ahora al sistema formado por un número considerable de átomos. En principio parecería lógico que *todos* los átomos emitiesen un fotón de energía $h\eta = E_2 - E_1$ y pasasen al estado fundamental, E_1 , *pero no es así*. El estado más probable del universo del suceso, el de máxima entropía, aquel al que se ha de llegar para que se cumplan las leyes del azar, no es el estado en que todos los átomos están en estado des-excitado, sino uno en que *casi todos* lo están, pero algunos están en estados excitados, *existiendo representantes de todos los estados atómicos posibles*. La fracción del número total de átomos en un cierto estado viene dada por un coeficiente o *factor de Boltzmann* que depende del desnivel energético entre este cierto estado y el estado fundamental o de menor energía.

En resumen, pues, el estado *más probable* es aquel en el cual existe una *distribución boltzmanniana* de los estados de los átomos.

2) Consideremos los doce naipes del palo de oros de una baraja española. Si después de barajar con cuidado los doce naipes los extendemos sobre la mesa, el número de “variantes” o “distribuciones” o “posibilidades” o “casos” diferentes que pueden darse en el conjunto final es muy elevado: en concreto, el número es factorial de 12 ($12!$), es decir, $12 \times 11 \times 10 \times 9 \times 8 \times 7 \times 6 \times 5 \times 4 \times 3 \times 2 \times 1 = 479.001.000$. ¡Algo más de 479 millones de variantes!.

La variante en la que los naipes aparecen en el orden as, dos, tres, cuatro cinco, seis, siete, ocho, nueve, sota, caballo y rey de oros nos resulta particularmente impactante y la consideramos la variante “organizada”; las otras 479.000.999 variantes (9) las podemos designar conjuntamente como variantes “desorganizadas”. La probabilidad que, al cartear, nos salga la variante “organizada” es, pues, pequeñísima, un caso favorable de entre 479.001.000 casos; a buen seguro, todos estamos dispuestos a predecir que no saldrá.

Ahora bien, si hubiese espacio, dispositivos y material para hacer simultáneamente muchos, muchos, muchos carteos, la cosa cambiaría. Si se lograsen hacer $100.000 \times 479.001.000 = 47.900.100.000.000$ carteos no sólo no nos extrañaría que *alguno* de los carteos diese lugar a la variante “organizada” sino que el sentido común nos conduciría a predecir que, en promedio, en uno de cada 479.001.000 carteos, es decir -en nuestro ejemplo- en 100.000 carteos (o un número muy próximo a 100.000) aparecerían variantes “organizadas”.

El “experimento” anterior, resulta quizá aun más ilustrativo si se modifica del siguiente modo: se dispone de 47.900.100.000.000 variantes “desorganizadas” y se les da la oportunidad de que “evolucionen” (agitando cada una de ellas en un bombo de lotería, o como sea). Se comprueba *el estado final* y se observa que unos 100.000 conjuntos aparecen como variantes “organizadas”: si los conjuntos se *analizaran individualmente* resultaría que, “increíblemente”, unas 100.000 variantes “desorganizadas” han pasado a ser variantes “organizadas”.

Apuremos aun más el ejemplo, para aproximarnos a la terminología del Segundo Principio. El *estado final más probable*, no es aquel en el cual todos los carteos han dado lugar a la variante más probable, la “desorganizada”, sino aquel que ha dado lugar a una “*distribución boltzmaniana*” de carteos en la que, por término medio, hay una variante “organizada” por 479.000.999 variantes “desorganizadas”. *Este estado final es el que predice el Segundo Principio de termodinámica.*

Una última observación: es correcto afirmar que, de acuerdo con las leyes del azar, la “existencia” de unos cientos o miles de millones de variantes “desorganizadas” ha conllevado la “existencia” de algunas variantes “organizadas”.

10.6 La evolución, interpretada como sucesión de estados del Universo en tránsito hacia su distribución boltzmanniana

Nos situamos 10^{-42} s después de haber tenido lugar el big bang; nuestro universo del suceso, es el Universo. Este Universo está constituido por un “algo” que en el devenir se irá manifestando como materia (con masa) o como energía, bien en *sistemas materiales*, bien en sus *alrededores*; la característica más notable de este “algo”, de este *estado inicial* del Universo es su nula (¿o casi nula?) probabilidad, su nula (¿o casi nula?) entropía, su perfecto (¿o casi perfecto?) orden. A este Universo se le ha dado la oportunidad de evolucionar ... y evoluciona: la entropía aumenta y no parará de aumentar hasta llegar algún día a un *estado final* en el que se habrá alcanzado la distribución boltzmanniana de este “algo” que, repito, a los humanos -extraños *observadores internos* del proceso- se nos manifiesta como materia o como energía.

En todos los procesos de la *escalada de la complejidad*, de organización de la materia, se pierde masa (aunque la medición de esta pérdida pueda ser difícil en los procesos débilmente energéticos, como son la gran mayoría de los procesos químicos y bioquímicos) y la masa perdida aparece en el entorno como *energía radiante* (10). Los *fotones* o cuantos $h\eta$ de esta energía radiante, sea cual sea su naturaleza (ultravioleta, visible, etc.), es decir, sea cual sea la magnitud de la *frecuencia* η , van degradándose en fotones, cuantos de energía térmica, de valor unitario más y mas pequeño. Al final, esta radiación acaba incorporándose a la *radiación fósil*.

Visto el Universo en su conjunto, la radiación fósil constituye, diríamos, el inmenso conjunto de variantes “desordenadas” del ejemplo de naipes antes discutido. El *estado final* al que la evolución se dirige habrá de ajustarse a la correspondiente distribución de Boltzmann, lo cual significa no sólo que en el transcurso de la evolución *pueden* ir apareciendo variantes “organizadas” sino que *deben* ir apareciendo variantes “organizadas”. Y en el transcurso del proceso es totalmente normal, *no representa ninguna excepción que obligue a formular ninguna nueva teoría*, que una variante “organizada” se organice aun más, siempre que esta organización se complemente -como se complementará, si el proceso ha de tener lugar- con una superior “desorganización” en el entorno (emisión de radiación).

En su tránsito hacia la distribución boltzmanniana, el Universo ha ido pasando por una continua sucesión de *estados estables transitorios* (estados estables a escala humana) que le ha conducido a la situación actual en la que, como un disciplinado universo termodinámico, el Universo consiste de un *sistema* y unos *alrededores*: el *sistema* es un conjunto muy numeroso de *subsistemas* (se admite que hay unas 10^{12} galaxias), cada uno constituido a su vez por un conjunto muy numerosoo de sub-subsistemas (se admite que hay 10^{11} estrellas en cada galaxia); en los inmensos *alrededores* se ubican infinitos *fotones, cuantos de energía*.

Independientemente de cualquier actuación humana, la *evolución en el Universo continua*: hay aun capacidad de evolución pues la masa de los sistemas materiales se puede continuar reduciendo con simultánea emisión de radiación. En el inmenso conjunto que representan 10^{12} galaxias con 10^{11} estrellas cada una y todos los *alrededores*, ¿es el sub-sub-sub-...-subsistema denominado planeta Tierra el que se está convirtiendo en la variante

“organizada” que se necesita para que, al término del recorrido, se cumpla la distribución boltzmanniana, es decir, para que se cumplan las leyes del azar?. El Principio antropocosmológico así lo postula; y con o sin este Principio, yo así lo creo.

BIBLIOGRAFIA Y COMENTARIOS

1.- El autor tiene diversas comunicaciones sobre este y relacionados temas:

a) J. Castells, “Aspectes microcòsmics i macroscòpics de la reacció química”, Memorias de la Real Academia de Ciencias y Artes de Barcelona, Tercera época, Núm. 828, Vol. XLVI, Núm. 1, Barcelona, 1984.

b) J. Castells, “Reencuentro con la entropía”, Revista de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, de Madrid, Tomo LXXXI, cuaderno 2º, Madrid, 1987.

c) J. Castells, “En busca de un lenguaje químico correcto”, Memorias de la Real Academia de Ciencias y Artes de Barcelona, Tercera época, Núm. 891, Vol. L, Núm. 9, Barcelona, 1991.

2.- J. Castells, “La Evolución”, Boletín de la Asociación Nacional de Químicos de España, 1970 (Marzo-Abril), nº 64.

3.- Christian de Duve, “Vital Dust. Life as a Cosmic Imperative”, Basic Books, 1995.

4.- a) Citas de la Nota 1. b) J. Castells, “Química General”, Editorial Alhambra, S. A., Madrid, 1981, pp. 77-100

5.- Por ejemplo, termodinámicamente hablando, en la reacción entre el hidrógeno y el oxígeno para dar agua debe decirse que “el *sistema* químico pasa de un *estado inicial* representado por cierta temperatura, volumen y presiones parciales de hidrógeno, oxígeno y agua, a un *estado final* representado por otros valores de estas funciones”.

6.- Es fundamental conocer que la *entropía* tiene dos componentes: la *entropía térmica* y la *entropía material o configuracional*. Todo razonamiento o especulación que se base en sólo uno de los dos componentes no tiene ningún valor (4b).

7.- Por ejemplo, si se considera un bosque en su entorno natural, es decir, rodeado de aire y a temperatura ambiente, la situación final después de cumplirse el Segundo Principio, sería que bosque y oxígeno del aire se hubiesen convertido (simplificando) en dióxido de carbono y agua. Pero *el tiempo necesario* para que esto ocurriera, en condiciones ordinarias, sería de *millones y millones* de años; en otros términos, en condiciones ordinarias no se cumple el “supuesto el tiempo necesario”. Ahora bien, para que se cumpla (¡desgraciadamente!) el Segundo Principio, basta que en un pequeñísimo entorno, a causa de un aumento accidental de temperatura, aumente considerablemente la *velocidad* del proceso y con ello disminuya espectacularmente *el tiempo necesario*.

8.- Richard P. Feynman *et al.*, “The Feynman Lectures on Physics”, Addison-Wesley Publishing Company, Inc., Reading, Massachusetts, 1965, p. 7-1.

9.- Individualmente consideradas, cada una de estas variantes es, a su modo, tan “organizada” como la singularizada, pero su “organización” nos resulta poco atrayente.

10.- En este caso, el Principio de coherencia nos ha conducido a la aplicación del Primer Principio (generalizado) de Termodinámica: “el conjunto masa-energía de un universo permanece constante, sin que se cree ni se destruya” (... ¡después del big bang!).

ALGUNS LLIBRES RELACIONATS AMB "DEL BIG BANG A L'HOMO SAPIENS
SAPIENS"

(llibres llegits o consultats per l'autor)

Com que en aquests temes, el factor data de publicació és important, la relació es presenta per ordre cronològic i, en cas necessari, per ordre alfabètic de primer autor; en els llibres traduïts, la data de publicació és menys significativa.

Melvin Calvin, "CHEMICAL EVOLUTION. Molecular Evolution towards the Origin of Living Systems on the Earth and Elsewhere", Clarendon Press, Oxford, 1969.

Steven Weinberg, "LOS TRES PRIMEROS MINUTOS. Una Concepción Moderna del Origen del Universo", Alianza Editorial, Madrid, 1978

Wen-Hsiung Li, Dan Graur, "FUNDAMENTALS OF MOLECULAR EVOLUTION", Sinauer Associates, Inc. Publishers, Sunderland, Massachusetts, 1981.

Carl Sagan, I. S. Shklovskii, "VIDA INTELIGENTE EN EL UNIVERSO", Editorial Reverté S. A., Barcelona, 1981.

W. W. Duley, D. A. Williams, "INTERSTELLAR CHEMISTRY", Academic Press, London, 1984.

Freeman Dyson, "ORIGINS OF LIFE", University Press, Cambridge, 1985.

Hubert Reeves, "PACIÈNCIA DINS L'ATZUR. L'Evolució del Cosmos", Biblioteca Universal, Editorial Emúries, Barcelona, 1985.

John D. Barrow, Frank J. Tipler, "THE ANTHROPIC COSMOLOGICAL PRINCIPLE", Clarendon Press, Oxford, 1986.

Daniel R. Brooks, E. O. Wiley, "EVOLUTION AS ENTROPY. Toward a Unified Theory of Biology", The University of Chicago Press, Chicago and London, 1986.

Thomas A. McMahon, John Tyler Bonner, "TAMAÑO Y VIDA", Biblioteca Scientific American, Prensa Científica, Editorial Labor, Barcelona, 1986.

Jacques Neiryneck, "LE HUITIÈME JOUR DE LA CRÉATION. Introduction à l'Entropologie", Presses Polytechniques Romandes, Lausanne, Suisse, 1986.

Frank Close, "LA CEBOLLA CÓSMICA. Los Quarks y la Naturaleza del Universo", Enseñanza/Crítica "Instrumentos", Barcelona, 1988.

Stephen W. Hawking, "HISTORIA DEL TIEMPO. Del big bang a los agujeros negros", Serie Mayor, Editorial Crítica, Barcelona, 1988.

William F. Loomis, "FOUR BILLION YEARS: An Essay on the Evolution of Genes and Organisms", Sinauer Associates, Inc. Publishers, Sunderland, Massachusetts, 1988.

James Trefil, "THE DARK SIDE OF THE UNIVERSE. A Scientist Explores the Mysteries of the Cosmos", Charles Scribner's Sons, New York, 1988.

Luis Mas (Selección e introducción), "COSMOLOGIA", Libros de Investigación y Ciencia, Scientific America, Prensa Científica, Barcelona, 1989.

David Layzer, "COSMOGENESIS. The Growth of Order in the Universe", University Press, Oxford, 1990.

Stephen F. Mason, "CHEMICAL EVOLUTION. Origin of the Elements, Molecules, and Living Systems", Clarendon Press, Oxford, 1991.

Murray Gell-Mann, "THE QUARK AND THE JAGUAR. Adventures in the Simple and the Complex", Little, Brown and Company, London, 1994.

Josef H. Reichholf, "LA APARICIÓN DEL HOMBRE", Drakontos, Crítica, Barcelona, 1994.

Charles R. Cowley, "AN INTRODUCTION TO COSMOCHEMISTRY", University Press, Cambridge, 1995.

Christian de Duve, "VITAL DUST. Life as a Cosmic Imperative", BasicBooks, a Division of HarperCollins Publishers, New York, 1995.

T. W. Hartquist, D. A. Williams, "THE CHEMICALLY CONTROLLED COSMOS", University Press, Cambridge, 1995.

Donald Johanson, Blake Edgar (principal photography by David Brill), "FROM LUCY TO LANGUAGE", A Peter N. Nvraumont Book, Weiden and Nicolson, London, 1996.

Roger Lewin, "PATTERNS IN EVOLUTION. The New Molecular View", Scientific American Library, A Division of HPHLP, New York, 1996.

Rudolf A. Raff, "THE SHAPE OF LIFE. Genes, Development, and the Evolution of Animal Form", The University of Chicago Press, Chicago and London, 1996.

Frans de Waal, "GOOD NATURED. The Origins of Right and Wrong in Humans and Other Animals", Harvard University Press, London, 1996.