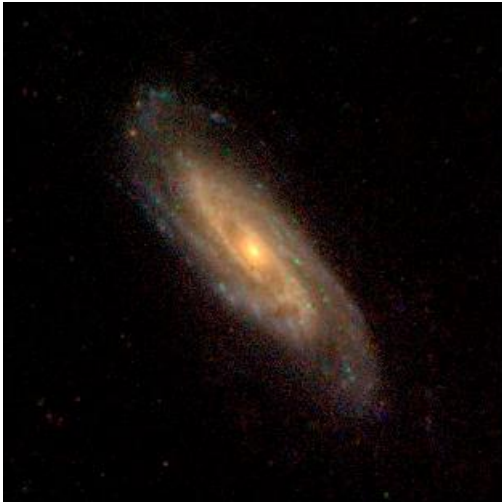


# La Kemia Evoluado de la Galaksio

*Helio J. Rocha-Pinto*

lasta modifo: 21-01-2000



La teorio de la kemia evoluado de galaksioj estas tre nova kompare kun kelkaj branĉoj de la Astrofiziko. Ĝi estis kreata de diversaj esploristoj dum la 60-jardeko. Tie ĉi, vi povos trovi kelkajn konceptojn de tiu teorio kaj lemi iomete pri nia Galaksio.

## 1. La praeksplodo aŭ bigbango

Laŭ nuntempaj kosmologiaj teorioj, la Univerŝon komencigis grandenergia okazaĵo, kiun ni nomas praeksplodo (aŭ bigbango, devenante de la anglaj vortoj por "granda eksplodo"). Tiu okazis antaŭ pli malpli 15-18 miljardo da jaroj. Dum ĝia unua sekundo de ekzisteco, diversaj eventoj okazis en la Universo. La energio tiumomente estis tre granda, simila al la ripozenergio de kelkaj partikuloj, kaj multon da partikuloj estis kreitaj po kontraŭaj paroj: elektronoj kaj pozitronoj, kvarkoj kaj antikvarkoj, kaj ankaŭ kelkaj neŭtralaj partikuloj: neŭtrinoj, mezonoj, bozonoj-Z, bozonoj-W, ktp. Kiam la ĵus kreita materio malvamiĝis, dum

ĝia tri unuaj minutoj de vivo, la elementaj partikuloj kvarkoj kunligiĝis formante protonojn kaj neŭtronojn. Poste, tiuj unuiĝis en atomoj.

Ne ĉiuj atomoj estis sukcese kreita dum la Bigbango. Nur hidrogeno, deŭterio, heliomo-3 kaj heliomo-4 (kaj tre malmulte da litio, berilio kaj boro) povis esti kreita elde la fornego de la juna Universo. Tio okazis pli malpli je la fino de la unua sekundo. La denseco de la Universo malkreskiĝis pro tio, ne permesante pluan kombiniĝon de la partikuloj, ĉar la distanco inter ili ekkreskis.

Se la komenca denseco de la Universo estus pli granda, la formado de la atomoj povus daŭri pli longe, kaj certe nia Universo estus tre "peza", tial ke la atomoj de hidrogeno kaj heliomo povus kombiniĝi kun aliaj protonoj, formante pli pezajn atomojn. Se la denseco estus malpli granda, ni havus la malon: la Universo eble ne havus atomojn, sed nur partikulojn, ĉar la distanco inter la partikuloj estus tre granda por permesi iun ajn kombiniĝo. Do, nia Universo komencis kun la ĵusta denseco por permesi la formadon de la atomoj kaj la postan aperon de la vivo ĉe nia planedo, kaj eble ĉe multon da aliaj planedoj.

Tamen, se nur hidrogeno kaj heliomo estis kreita de la praeksplodo, el kie devenas la aliaj atomoj kiel oksigeno, karbono, ktp?

## 2. Nukleosintezo

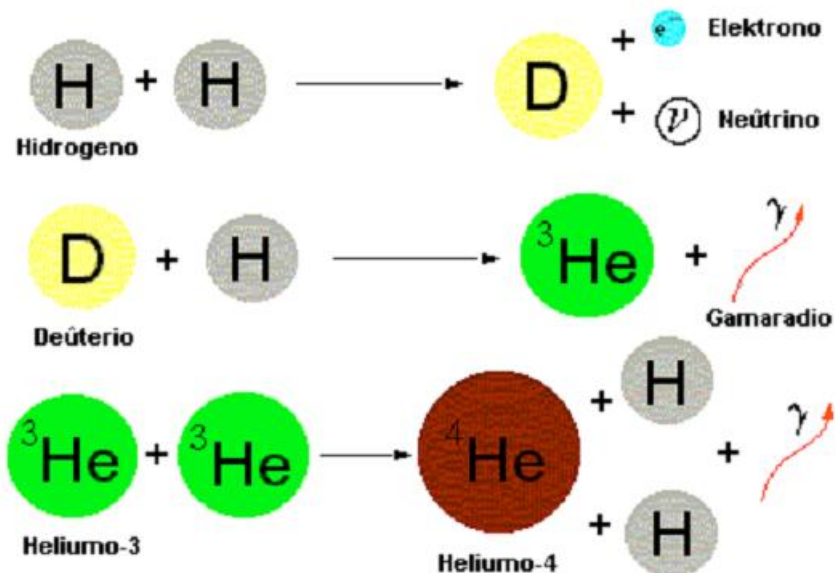
Oni nomas nukleosintezo la formadon de l' atomoj. En la antaŭa ĉapitro, mi menciis la pranukleosintezon faritan de la bigbango. La origino de la kemiaj elementoj estis tre nekonata afero antaŭ la 50-jardeko. Tiu situacio ŝanĝis dank' al la brila laboro de D-ro Geoffrey Burbidge, sia edzino D-rino Margareth Burbidge, D-ro Willian Fowler kaj D-ro Fred Hoyle. Tiuj sciencistoj elpensis unu el la plej belaj teorioj de la moderna fiziko, kunligante samtempe du problemojn de tiutempa scienco: la origino de la kemiaj elementoj kaj la energifonto de la steloj.

La steloj elĵetas ĉirkaŭen ĉiusekunde grandan amason da energio. La fonto de tiu energio estis nekonata je la komenco de la jarcento. La unuaj taksadoj de la aĝo de nia planedo montris ke la Tero devus esti pli maljuna ol miloj da jaroj. Arkeologiaj esploroj kreskigis tiun aĝon al milionoj da jaroj, kaj la geologiistoj estis konkludanta ke la aĝon devus esti kelkaj miliardoj da jaroj. Multaj sciencistoj klopodis formuli sennombrajn hipotezojn por ekspliki tion, kio permesigis al la Suno kaj al aliaj steloj brili dum tre longa tempo. Nevarie, ĉiuj tiuj teorioj ne sukcesis doni bonan eksplikon por la problemoj.

Tiu estis solvita je la 30-jardeko de la usona fizikisto Hans Bethe kiu proponis ke la energifonto de la steloj estas nukleoreakcioj okazantaj en la centro de la stelo, kiun la astrofizikistoj nomas *kerno*. La energio devenas de fuzio de du hidrogenaj atomoj je helioma atomo. Tiel okazante, la abundo de heliomo

ene de la stelkerno kreskus laŭtempe. Tiu energifonto estas tre efika, permesante la stelojn vivi dum miliardoj da jaroj.

Rigardu nun la malsupran skemon. Ĝi montras kiel funkcias la *ĉeno protono-protono*, kiu estas la plej grava ĉeno de nukleoreakcioj en sunsimilaj steloj.



Nur la plej ofta ĉeno estas montrata, kiu estas nomata "pp1". Ankaŭ du aliaj branĉoj de tiu ĉeno ekzistas, sed la precipaj rezultoj estas la samaj: pere de ili, kvar hidrogenaj atomoj kombiniĝas en unu atomon de heliumo-4. Inter aliaj kromproduktoj de tiu reakciaro estas la gama-radioj, kiuj korespondas al la energio kiun la stelo gajnas. Kurioze, la reakciaro montrata en tiu desegnaĵo okazis ankaŭ dum la pranukleosintezo, en la ĵus formita Universo. Tial heliumo estis produktata de la bigbango.

La brilega ideo de la geedzoj Burbidge, Fowler kaj Hoyle estis ke nukleoreakcioj en la stelkerno povus produkti ĉiujn aliajn kemiajn elementojn. Ili trovis 8 procezojn kiuj faradas tiujn atomojn: la hidrogen-

bruligo (de kiu la ĉeno protono-protono estas unu el aliaj reakciĉenoj), la heliumbruligo, la alfa-procezo, la e-procezo, la s-procezo, la r-procezo, la p-procezo kaj la x-procezo. En la tabelo malsupra, ni montras la plej oftajn produktojn de tiuj nukleoprocezoj, kaj la astrofizikajn lokojn kie ili okazas.

Nukleoprocezo	Plej Oftaj Produktoj	Astrofizikaj Lokoj
Hidrogenbruligo	He	Stelkerno de prekaŭ ĉiu stelo kaj Tavola hidrogenbruligo en gigantsteloj
Heliumbruligo	C, O, kaj Ne inter aliaj	Stelkerno de masegaj steloj post la hidrogenbruligo kaj Tavola heliumbruligo en asimptotbranĉaj gigantsteloj
Alfa-procezo	Mg, Si, S, Ar, Ca, Ti	Stelkerno de tre masegaj steloj
E-procezo	Precipe elementoj de la fergrupo (V, Cr, Fe, Co, Ni), sed ankaŭ diversaj izotopoj havantaj atomezon malpli grandan ol 56	Stelkerno de tre masegaj steloj kaj Novaoj, inter aliaj
S-procezo	Multaj atomoj pli pezaj ol Fe	Envolvaĵo de asimptotbranĉaj gigantsteloj kaj Stelkerno de tre masegaj steloj
R-procezo	Neŭtronriĉaj atomoj pli pezaj ol Fe kaj ĉiuj atomoj havantaj atomezon pli grandan ol 210	Supernovaoj
P-procezo	Malabundaj protonriĉaj izotopoj	Ne sufiĉe konata ĝis nuntempe, sed oni kredas ke supernovaoj estas unu el iliaj produktaĵoj
X-procezo	Li, Be, B	Kolizio de kosmradioj kun atomoj en la interstelspaco kaj Envolvaĵo de asimptotbranĉaj gigantsteloj

### 3. La stela deveno de la kemia diverseco

Kiel mi diris supre, ĉiuj atomoj krom H kaj He devenas el steloj. Ĉu vi iam ekpensis la tre gravan rolon de la kemia diverseco en nia ekzistado?

Vidu, la atomoj estas en multnombraj substancoj necesaj por la vivo:

- La karbono partoprenas en preskaŭ ĉiuj organikaĵoj.
- La oksigeno formas la aeron kiun ni enspiras kaj la akvon kiu ni trinkas, precipe.
- La kalcio estas en niaj ostoj.
- La fero estas gravega komponaĵo de nia sango.
- La kalio, la fosforo, la magnezio, inter aliaj, komponas niajn manĝaĵojn.
- Kupron oni uzas por kondukti elektron.

Tiuj estas nur ekzemploj. Ĉiu el tiuj elementoj iam estis **ene de iu stelo**. Kredeble tia kosma deveno de nia korpo estas unu el la kialoj de nia ĉiama pasio por la astroj, ĉu de la mistikuloj, ĉu de la sciencistoj...

Sed la elementoj estas ĝenerale farataj interne de la astroj. Kiel ili estas en la Tero, kaj en aliaj planedoj?

#### 4. Kelkaj vortoj pri stelevoluo

Respondo por tiu demando estas, ke steloj ne estas eternaj. Ili naskas, vivas kaj mortas, same kiel ni. Ĉiujare, almenaŭ unu nova stelo naskiĝas en nia Galaksio. Dum tuta vivo, steloj spertas titanan bataladon inter la gravito kaj la premforto, aplikata de la densigita interna materio sur ĉirkaŭantajn eksterajn tavolojn. La nukleoreakcioj estas kvazaŭ eksplodoj kiuj rezultas el tia milito. Sed la lukto havas ĉesodaton: tiam, kiam brulaĵo estos elĉerpita.

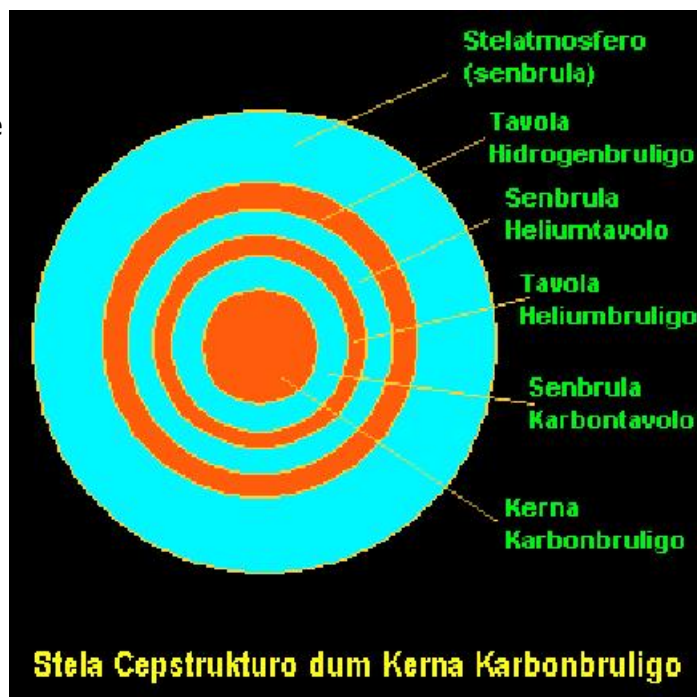
La unuaj nukleoreakcioj ja okazas en la stelkerno, sed post kelke da tempo ili ankaŭ okazas pli malproksime de ĝi. La kaŭzo estas simpla. Iom post iom, la reakcioj ŝanĝas la kemian konsiston de la kerno, ĝin igante pli peza kaj malpli brulaĵhava. La pezo de la kerno igas ĝin pli densa, kaj ĝin varmigas. Tio varmigas ankaŭ la apudajn tavolojn, incitante la komencon de nukleoreakcioj tie, kie estas ankoraŭ multo da brulaĵo. La kerno mem restas inerta, ĉar ju pli atompeza estas materio, des pli da varmo oni bezonas por komencigi aliajn brulĉenojn. Tiu restos senbrula ĝis kiam la densigo pligrandigos la temperaturon por la komenco de fuzio de sekvaj elementoj.

Nu, ni ekvidu internan strukturon de iomete evoluita stelo. Ĝi similas al cepo. En la kerno akumuliĝas inerte ĵus freŝfaritaj elementoj kies fuzitemperaturo estas pli grandaj ol la stelcentra temperaturo.

Super la kerno, tra irante la stelsurfacon, ni trovas alternajn tavolojn, brulantajn kaj senbrulajn, kie malpezaj atomoj ankoraŭ estas konsumataj de tiaj reakciretoj antaŭe okazintaj en la kerno.

Tiuj strukturŝanĝoj okazas dum daŭro de milionoj aŭ miliardoj da jaroj, depende la stelmaso. Tiu ankaŭ determinas kiel la stelo mortiĝos. Steloj havantaj mason malpli grandan ol la suna maso (*subsunmasaj steloj*) ĝenerale nur sukcesas bruligi hidrogenon kerne. Kompakta heliuma kerno krekigiĝas, sed la hidrogenbruligo daŭras tre longe, pli ol la aĝo de Universo mem. Tial, oni konsideras ilin steloj kiuj vivas por ĉiam (*porĉiamvivantaj steloj*).

Tamen, steloj havantaj mason pli grandan ol la suno (*masegaj steloj*) atingas kernajn temperaturojn sufiĉe grandaj por bruligi heliumon aŭ eĉ pli pezajn atomojn. La plej masegaj el tiuj steloj konsumiĝas tiel rapide ke oni ilin konsideras steloj kiuj mortas tuj post sia naskiĝo (*tujmortantaj steloj*). Estas tiuj steloj kiuj plej riĉigas la Galaksion per novaj kemielementoj.



## 5. La riĉigado de l' interstelspaco

Gasoj en la interstelspaco povas esti en tri formoj: atoma, ionigita kaj molekula.

La atoma gaso estas konsistigata precipe de hidrogenaj atomoj. Tio estas la plej ordinara formo de la gaso, en la Galaksio. La ionigita gaso konsistas precipe el ionigitaj atomoj de H. Tiu gasa komponanto ĝenerale ricevas la nomon de H II-regiono, kaj ĝi estas rilata al la ĉirkaŭnajbara spaco de masegaj steloj, pro tio ke estas la grandenergiaj fotonoj emititaj de tiaj, kiuj ionigas la gason. Siavice, la molekula gaso konsistas precipe el molekuloj de hidrogeno (H<sub>2</sub>). Pli densa ol la aliaj gasaj formoj, la molekula gaso prezentiĝas agreginta je gigantaj gasamasoj nomataj molekulaĵaj nuboj.

Steloj formiĝas senĉese elde la galaksia materio je la formo de molekula gaso. Tio okazas pro tio ke en molekulaĵaj nuboj la temperaturo de la gaso estas sufiĉe malalta por permesi la aperon de malgrandaj kondensiĝoj kiuj naskos la protostelojn. La kemiaj abundoj de ĵusnaskiĝinta stelo estas tiuj de la molekula nubo el kiu ĝi formiĝis. Kaj ankaŭ la planedoj kiuj formiĝas ĉirkaŭ tiu stelo, posedus la kemiajn abundojn de la patrinnubo. Pro tio, ni havas ĉiujn kemielementojn kiuj permesas la aperon de la vivo ĉe nia planedo.

Nu, memoru kelkajn aferojn kiujn ni pritraktis supre:

- Post la praeksplodo, nur H kaj He estis en Universo.
- La aliaj kemielementoj estas produktitaj ene de la steloj.
- Steloj eventuale mortas kaj eksplodas, depende de sia maso.

Kiam unu stelo eksplodas, ĝia materio estas disĵetita en la interstelspaco. En aliaj vortoj, la novaj kemielementoj, faritaj ene de tiu stelo, estas miksitaj al la galaksia gaso. Tiu procezo karakterizas la kemian riĉigadon de la interstelspaco. Ekde la apero de la unua stela generacio, la Galaksio spertas senĉesan riĉigadon de sia kemia diverseco, pro la stela nukleosintezo.

Supozante ke la mikso de la stela elĵetaĵo estas procezo relative efika, oni povas antaŭdiri precize kiu estas la abundo de ĉiu kemielemento en Universo, laŭ tempo. Tio estas la precipa celo de la teorio de kemia evoluo de la Galaksio.

*Helio J. Rocha-Pinto*

---

fonto: <http://www.esperanto.org/AEK/biblio/galaksia.htm>

PDF-versio: Szilvási L.