Kambrijska eksplozija

Ivšić, Martina

Undergraduate thesis / Završni rad

2011

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Science / Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:217:822752

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-29**

Repository / Repozitorij:

Repository of the Faculty of Science - University of Zagreb

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
PRIRODOSLOVNO - MATEMATIČKI FAKULTET
BIOLOŠKI ODSJEK

KAMBRIJSKA EKSPLOZIJA

CAMBRIAN EXPLOSION

SEMINARSKI RAD

Martina Ivšić
Preddiplomski studij znanosti o okolišu
(Undergraduate Study of Environmental Sciences)
Mentor: doc. dr. sc. Goran Kovačević

Zagreb, 2011.

SADRŽAJ

1. UVOD 1

2. KAMBRIJSKA EKSPLOZIJA 2

2.1. EDIKARIANSKA FAUNA 4

2.2. KAMBRIJSKA FAUNA 6

3. POVIJESNI PREGLED 8

4. FILOGENIJA 9

5. UZROCI 11

5.1. RASPAD SUPERKONTINENTA 11

5.2. POVIŠENJE KONCENTRACIJE KISIKA 12

5.3. OSCILACIJE KONCENTRACIJE UGLJIKA 12

5.4. LEDENA DOBA 13

5.5. MASOVNA IZUMIRANJA 13

5.6. KOZMIČKO ZRAČENJE 14

5.7. AKTIVNO UČENJE 15

5.8. STRES 17

6. KAMBRIJSKA EKSPLOZIJA KAO ARGUMENT PROTIV EVOLUCIJE 18

7. ZAKLJUČAK 19

8. LITERATURA 20

9. SAŽETAK 22

10. SUMMARY 22

1. UVOD

Cilj ovog rada je objasniti i predočiti dosadašnje znanje i teorije u vezi jednog zanimljivog događaja u Zemljinoj prošlost, kambrijske eksplozije. Stratigrafskim analizama utvrđena jepojava mnogobrojnih organizacijskih skupina životinja (phyla) u relativno kratkom vremenu (od prije 550 milijuna godina u trajanju od oko 50 milijuna godina). Bilježi se pojava razvijenih organizama u velikom broju bez dokaza o njihovim posljednjim zajedničkim precima. Molekularna evolucija koristi se suvremenim metodama za utvrđivanje srodnosti između živih bića.

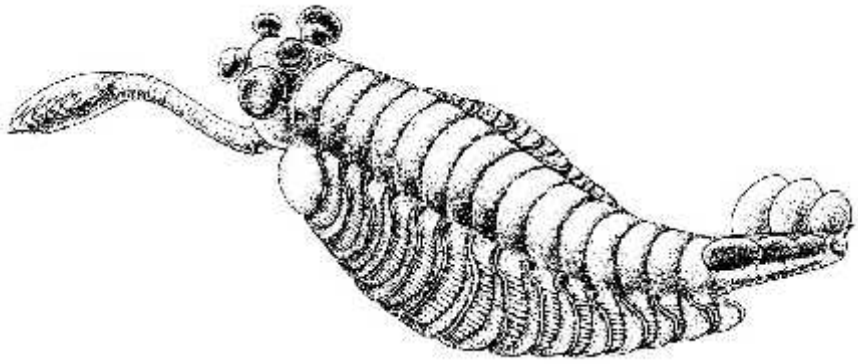
Osim pojave mnogobrojnih životinja, kambrijsko razdoblje obilježeno je klimatskim, atmosferskim, geološkim, tektonskim i drugim posebitostima. Kroz ovaj rad pokušat će se povezati abiotički i biotički uvjeti kambrijskog razdoblja te utvrditi njihov međusobni odnos.

2. KAMBRIJSKA EKSPLOZIJA

Gledajući današnji živući svijet, sve kukce, mekušce, ribe, ptice i sisavce teško je zamisliti kako je pet šestina vremena od nastanka života pripadalo jednostaničnim organizmima. Ali činjenica je da se iz prvih pronađenih tragova života od prije više od 3,5 milijardi godina tek prije 550 ili više milijuna godina javljaju višestanični organizmi; sva današnja koljena i to gotovo istodobno. Ta *eksplozija* uistinu je trenutačna uzimajući u obzir geološko vrijeme. Prema tome, fosilni ostaci indiciraju da je rani kambrij (prije 545 mil.god.) obilježen velikim periodom morfološke evolucije.[3]

Povod za to su iznenadna pojava skeleta i mnogobrojnost očuvanih tragova - dobro očuvanih za razliku od predkambrijskog razdoblja.[12] Upravo na početku kambrija pojavljuju se fosili očuvanih vanjskih ljuštura što ukazuje na sposobnost tadašnje faune za inkrustaciju minerala poput kalcijeva karbonata i kalcijeva fosfata u svojim organizmima. Tu sposobnost nazivamo biomineralizacija, a pojavila se u kambriju u gotovo 40-tak razreda životinja.[9]

Najpoznatije nalazište fosila iz kambrijskog razdoblja je u kanadskoj provinciji Britanska Kolumbija na području Burgess Shalea. Bogatstvo nalazišta uvjetovali su procesi i okoliš tog razdoblja: svi organizmi bi zajedno s muljem skliznuli niz klif te završili u anoksičnim uvjetima gdje bi bili dobro i brzo očuvani. Tamo su otkriveni organizmi koji su se promijenili od kambrija do današnjeg vremena, ali i nepoznati organizmi koji ne nalikuju niti jednom živućem organizmu i teško ih je uvrstiti u neku od postojećih skupina. Među poznatima, pronađene su alge, spužve, ramenonošci, mnogočetinaši, člankonošci (trilobiti), bodljikaši i svitkovci.



Slika 1. *Opabinia regalis*.[13]

Napomena: Literarni navodi nalaze se u fusnotama.

Najčudniji nalaz je vrsta *Opabinia regalis* (Sl. 1.). Smatra se da su pripadnici te vrste bili predatori, veličine do 7 cm, imali su neobičan nastavak za hranjenje, fleksibilno segmentirano tijelo, tri pločice na kaudalnom dijelu tijela i pet očiju. Danas životinje imaju uparene nastavke za lov za razliku od vrste *Opabinia regalis*, a više očiju nalazimo unutar skupine kukaca. Zbog tih posebnosti bilo ju je teško svrstati u neku od postojećih skupina. Prvotno su je svrstali u razred Crustacea, zatim među trilobite da bi se zaključilo da nije člankonožac, već neki daljnji predak od kojeg su se razvili kolutićavci i člankonošci.

Neka od značajnijih nalazišta su i ona u Kini iz Chengijanga i Kailija koja su postojanje tih novih tjelesnih organizacija pomaknula za 10 milijuna godina u prošlost. Time se pokazalo kako se kompleksnost novih struktura trebala razviti u kratkom intervalu, što je tom događaju pridonijelo na vrijednosti, kao i pridodalo nadimak *eksplozija*.[13]

Nasuprot tome, neki smatraju kako je kambrijska eksplozija isključivo tvorevina fosilizacije. To temelje na činjenici kako su postanku morfološki kompleksnih organizama pronađenim iz ranog kambrija zasigurno bili potrebni jednako toliko napredni preci. Ti preci su vjerojatno bili male veličine i nisu imali nikakve komponente (npr. ljušture) koji bi mogli biti sačuvani do danas.[5] Događaj je postavio mnoga pitanja od kojih su najbitnija:

a) Je li kambrijska eksplozija biološki događaj ili tvorevina nepotpune fosilizacije?
b) Postoji li dugotrajna skrivena prošlost Metazoa prije pojave u fosilnim ostacima?
c) Što je bio najveći „okidač“ koji je potaknuo eksploziju?
d) Koja je povezanost između kambrijske eksplozije i formacije „drva životinja“ (Tree of Animal – TOA)?[12]

Još nisu utvrđene granice trajanja kambrijske eksplozije jer se na temelju novih nalazišta i njihovih analiza taj period uglavnom vremenski smanjuje što povećava ekstremnost samog događaja. Prije pedesetak godina smatralo se da je kambrijska radijacija životinjskog svijeta trajala oko 100 milijuna godina, što se zaključilo na temelju stratigrafskih istraživanja nalaza prve pojave trilobita (Marocco). Pronalazak prvih graptolita smanjio je razdoblje trajanja na 30 milijina godina. Prema geološkom vremenu, frekvencija radijacije raznolikosti životinja u kambriju je dvadeset puta veća od cijelog mezozoika.[9]

Uglavnom se uzima srednja vrijednost trajanja od približno 50 milijuna godina. U kambrijskoj eksploziji dogodila su se tri veća evolucijska skoka; u edikarijanskom razdoblju, periodu Meishuchuan i Quangzusian.[12]

Većina pronađenih grupa *phyla*, prema fosilnim ostacima, sadrži mali broj vrsta što ukazuje na nedavno podrijetlo (možda već i početkom edikarianskog razdoblja). [7]

Eldredge i Gould (1972) predložili su model evolucije koja bi odgovarala kambrijskim događajima. Pojavljivanje brzih promjena u kratkom vremenu nazvali su punktuacijom. Punktuacija je proizvod specijacije i nagli je odgovor na novonastale uvjete dok se organizam ostatak vremena ne mijenja. Ovo pravilo nije primjenjivo na sve organizme, ali se ne može zanemariti.[13]

Tablica 1. Geološka skala vremena kraja prekambrija i ranog kambrija bitnih za kambrijsku eksploziju. Imena razdoblja su prema kineskoj i ruskoj podjeli. Preuzeto i prilagođeno na temelju literaturnih izvora [7, 15.1 i 15.7].

PALEOZOIK	**KAMBRIJ (544-500 mil.god.)**	**KASNI**			
		SREDNJI			
		RANI	longwangmioan	toyonian	513-510.mil.god.
			changlanpuan	botomian	520-513. mil.god.
			quangzusian	atdabanian	527-520 mil.god.
			meischuan	tommotion	530-527 mil.god.
				manacayan	544-530 mil.god.
PREKAMBRIJ			edicarian (vendian) (650-544 mil.god.)		

2.1. EDIKARIANSKA FAUNA

Edikarianska fauna veoma je različita od kambrijske. Ime je dobila prema nalazištu Ediacara Hills na jugu Australije iako to nije bilo prvo mjesto gdje je pronađen fosil edikarianske faune. Prije nalaza u Australiji, edikarianski megafosil pronađen u gradu Leicestershire u Engleskoj se dugo smatrao anorganskim. Većina autora smatra kako su to bili višestanični organizmi mekog tijela bez prepoznatljivih ljuštura. Najranije opisan fosil edikarianske faune potječe iz 1872. godine. To je *Aspidella terranovica* (Sl. 2.), a opisao ju je E. Billings iz Newfoundlanda.

Fosili organizama i tragova edikarianske faune pronađeni su na svim kontinentima osim Antarktika. Neka od važnijih nalazišta su: Edicara Hills, Charnwood Forest, Leicestershire of

England; Namibija; Bijelo more, Sibir; Newfoundland, istočna Kanada; brojni lokaliteti u Australiji i značajni u Kini.[12]



Slika 2. *Aspidella terranovica*.[15.1.]



Slika 3. *Cloudina sp.*[15.7.]

Na temelju fosila mogu se uočiti šest različitih tipova okoliša koje nastanjuju: dubokomorska staništa, plitka morska deltna ušća, plitke ravne obale, plitkovodna područja očuvana u sedimentnim stijenama, duboka mirna morska staništa naseljena makroskopskim bentičkim algama i biomineraliziran tip *Cloudina sp.* na karbonatima (Sl. 3.).

Tradicionalno shvaćanje organizacijskog sustava edikarianske faune po kojem se brojni nalazi fosila edikarianske faune ne mogu svrstati u postojeće skupine životinja, jest ono po kojemu neki organizmi pripadaju izumrlom koljenu Petalonamae. Seilacher ih izdvaja pod nazivom Vendobionta i smatra ih „neuspjelim eksperimentom“ u evoluciji života, ali prihvaća mogućnost da su pronađeni tragovi fosila od bilateralnog metazoa, što dovodi do zaključka da neki kambrijski organizmi potječu iz edikarianskog razdoblja. Seilacher smatra da su se vendobionti prehranjivali kemosimbiozom (na način da ih je bakterija opskrbljivala energijom i nutrijentima) ili fotoautotrofijom što bi značilo da su u sebi sadržavali jednostanične fotosintetičke alge. Ovo razmišljanje opovrgnuto je pronalaskom *Pteridiniuma* u dubokomorskim sedimentima gdje fotosinteza nije moguća.

Rekonstrukcija drva života (Tree of Life - TOL) na temelju tradicionalne morfološke, molekularne i paleontološke metode, dovela je do podijele života na tri domene: Archaea, Bacteria i Eukarya. Istim metodama TOA je podijeljeno na tri podcarstva: Diploblasta, Protostomia i Deuterostomia, čiju su podijelu uvjetovala četiri važna događaja: rana radijacija Metazoa, pojava bilateralnih organizama, pojava deuterostoma i kralješnjaka.[12]

Pojava višestaničnih organizama datira od prije 570 milijuna godina (Kina). Metazoa su pronađeni kao milimetarski ihnofosili zbog početka interakcije organizama i sedimenta

(ukopavanje). Edikarianski fosili u Australiji dugački su oko 43 cm (*Dickinsonia rex*) kojom se potvrđuje postojanje velikih organizama u to vrijeme (Sl. 4.).[6]



Slika 4. *Dickinsonia rex.*[15.13]

2.2. KAMBRIJSKA FAUNA

Nakon edikarianske faune, u ranom kambriju bujaju novi i „dorađeni“ organizacijski sustavi životinja. To se smatra najvećom radijacijom živoga svijeta. Najviše fosila dolazi iz meishucunianske faune.[12]

Kambrijska fauna započinje pojavom fosila *Treptichnus pedum* prije otprilike 543 milijuna godina. *T.pedum* (Sl. 5.) je crvolika životinja koja se najvjerojatnije ukopavala u sediment. Ne zna se kako je točno izgledala. Počevši s tim organizmom, započinje pronalazak većeg broja organizama s ljušturama i većih dimenzija.[14]



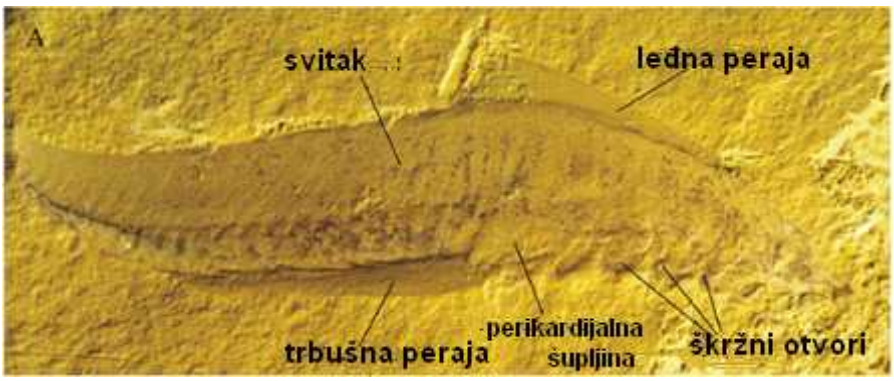
Slika 5. *Treptichnus pedum.*[15.10]

Teško je rekonstruirati faunu najranijih Metazoa jer današnji organizmi koji imaju tvrdi skelet čine tek desetinu živoga svijeta. Za postojanje mnogih organizama, zbog nemogućnosti fosilizacije, nikada nećemo saznati.[12]

Prvo nalaziše kambrijske faune je već spomenuti Burgess Shale u Kanadi. Tamo se nalaze stijene tipične za srednji kambrij. Slobodnoplivajući organizmi (nekton) pronađeni su u malom broju, dok većinu fosila čine bentički organizmi u jednakom broju sesilni i pokretni. Gotovo dvije trećine životinja koje su tamo živjele hranile su se organskim tvarima koje su pronalazile u muljevitom tlu, a približno jedna trećina bili su filtratori. Ostatak od manje od 10% bili su predatori ili strvinari.[12]

Prvi opisani fosil iz Burgess Shale nalazišta je *Marella sp*. Iako je bilo očito da je člankonožac, razlikovao se od svih do tada poznatih morskih člankonožaca po strukturi nogu i škrga, kao i u broju privjesaka na glavi.[14.3] Osim najranijih metazoa, pronađeni su i organizmi bez čvrstih struktura poput vrste *Thaumaption sp*. (Diploblasta), različiti ramenonošci i vrste koljena Priapulida (Protostomia), bodljikaši i mogući svitkovac *Pikaia sp*. (Deuterostomia).[12]

Najveća vrijednost nalaza Chengjiang fauna kambrijskog razdoblja u Kini su fosili vrste *Haikouichthys sp*. koja kasnije dobiva naziv *Myllokunmingia sp.* (Sl. 6.). Kod nje su pronađena obilježja kralješnjaka poput dorzalne i ventralne peraje, škržni otvori i škržni lukovi, miomere u obliku slova W, svitak i perikardijalna šupljina. Nalaz je popularno bio nazivan kao „ulov prve ribe“. Nakon ovog nalaza usljedili su pronalasci brojnih drugih Cephalochordata, Urochordata, mogući preci Hemichordata – Vetulicolia i Yunnanozoa.



Slika 6. *Myllokunmingia sp.*- „prva riba“. Preuzeto i prilagođeno na temelju [12].

Posebnost kambrijske faune predstavlja mnogobrojna pitanja koja se trebaju analizirati uz pomoć molekularnih metoda ili pronalaskom novih fosila kako bi se popunjavala prazna mjesta na filogenetičkim stablima. [12]

3. POVIJESNI PREGLED

Nekoliko geologa primijetilo je kako se u jednom trenutku Zemljine prošlosti dogodila dramatična promjena u pronađenim fosilima, među njima najznačaniji bio je William Buckland (1778. –1856.). Bavio se kemijom i mineralogijom te je proučavao mnogobrojne fosile amonita i dinosaura, ali i prapovijesne ihnofosile i koprolite (Sl.7.). Bio je primjer mnogima kako se detaljno mogu raditi znanstvene analize i rekonstruirati događaji davne prošlosti. Svoja opažanja o iznenadnoj pojavi mnogobrojnih organizama sažeo je u knjizi *„Geology and minerology considered with reference to natural theology“* (1836).[15.6]

Nakon objave Darwinova rada započinju sve češće rasprave o događajima na početku kambrija. Godine 1948. američki paleontolog i geograf Preston Cloud (1912.-1991.)[15.5] ovom događaju dodijeljuje naziv „kambrijska eksplozija“ koji se zadržao do danas (Sl.8.).[12]



Slika 7. William Buckland (1778. –1856.).[15.6]



Slika 8. Preston Cloud (1912.-1991.).[15.5]

4. FILOGENIJA

Filogenija je znanstvena disciplina koja proučava razvitak živih bića kroz Zemljinu prošlost i njihove srodstvene odnose, a može se iskazati filogenetskim stablima. Filogenetsko stablo pokazuje evolucijske odnose između raznih vrsta ili različitih taksonomskih skupina za koje se pretpostavlja da imaju zajedničke pretke.

Molekularna istraživanja dovela su do zaključka kako je kambrijska eksplozija kumulativan slijed povećanja frekvencija inovacija, tzv. ključnih inovacija. Kladističkom analizom filogenetskih odnosa izumrlih fosilnih Arthropoda s današnjim vrstama pokazala su kako većina njih može svoje karakterne osobine (kao i ključne inovacije) od matične linije dovesti do živuće životinje. Npr. divovski predator *Anomalocaris sp*. pokazao je visoku srodnost grupi koja se smatra primitivnom sestrinskom grupom Arthropoda (Sl. 9. i 10.).

Zanimljivo je kako su trilobiti već zauzimali različita geografska područja, što zahtjeva raniju kladističku diverzifikaciju od prvog pojavljivanja u fosilima. Najvjerojatnije je da je diverzifikacija nastala prije, moguće u prekambriju te bila nepoznate duljine trajanja. A kambrijsku eksploziju doživljamo kao eksploziju zahvaljujući ubrzanom razvitku skeleta koji je omogućio fosilizaciju.



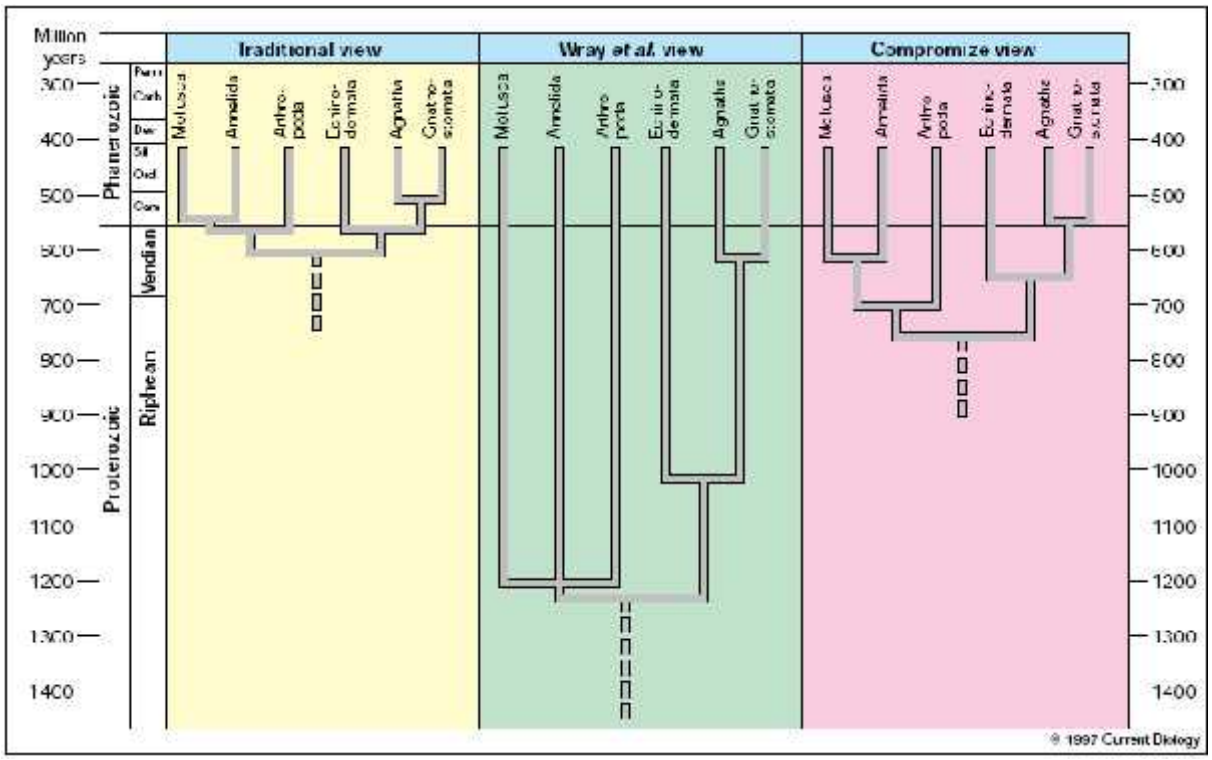
Slika 9. Umjetnička rekonstrukcija vrste *Anomalocaris sp.*[15.8]



Slika 10. Fosil vrste *Anomalocaris sp.*[15.12]

Kambrij je vremenska granica od koje počinje razvitak skeleta, povećanje veličine i povećanje fosilizacijskog potencijala. Time o precima kambrijskih organizama možemo

zaključivati samo na temelju kladističkih analiza. Na Slici 11. prikazana su tri filogenetska stabla. Prvo prikazuje tradicionalno shvaćanje na temelju fosilnih dokaza gdje se sva razgranjenja događaju na kraju edikarianskog razdoblja i početkom kambrija. Drugi prikaz je filogenetičko stablo temeljeno na Wrayevim molekularnim satovima koji indiciraju postojanje dubokih korijenja prvog pretka metazoa. Treće stablo je kompromisno rješenje između prva dva.[1] Wreyov model ukazuje na to kako se prava eksplozija dogodila puno prije kambrija, a ono pronađeno u foslima samo je odjek te bitne, ali nama zagonetne diverzifikacije života.[3]



Slika 11. Tradicionalni, Wreyev i kompromisni modeli filogenetičkog stabla za datiranje prvog zajedničkog pretka metazoa.[3]

5. UZROCI

5.1. RASPAD SUPERKONTINENTA

Kambrijsko i predkambrijsko razdoblje popraćeno je ekstremnim uvjetima: Zemlja je u pokretu, njena kora, plašt, oceani i atmosfera s fluktuacijama ugljika i temperature (-40°C do +40°C). Početak kambrijskog razdoblja obilježen je raspadom superkontinenta Rodinia (Sl.12.) koji je sadržavao većinu Zemljina kopna u razdoblju prije 1100 do 750 milijuna godina. Tektonske promjene dovele su do povećane vulkanske aktivnosti. Mnogobrojnim erupcijama, u atmosferi su završile ogromne količine dima, prašine i plinovi od kojih je najzastupljeniji ugljikov dioksid koji čini značajan udio stakleničkih plinova. Nema sumnje da su te promjene utjecale na tadašnji živi svijet. Novonastali uvjeti omogućavali su izumiranje, odnosno preživljavanje pojedinih vrsta.[10]

Pomicanje tektonskih ploča rezultiralo je promjenu i stabilizaciju oceanskih struja koje dovode kisik u dublja područja oceana i mora. Povećanje broja područja obogaćenih kisikom pogodovali su razvoju većih organizama i višestaničnosti.[11]

Za vrijeme kambrija kopno je bilo raspoređeno po cijeloj Zemlji, takva izolacija omogućavala je različite evolucijske pravce, što je značajno za biogeografiju tog razdoblja. Kopno ni nakon raspada neće mirovati, prije 250 milijuna godina dolazi do formacije novog superkontinenta Pangeae. Uz razdoblja glacijacije, ovi su procesi uzrokovali brojna „uska grla“ i izumiranja.[15.4]

Jednim od problema prilikom razjašnjavanja događaja kambrijske eksplozije smatraju se mnogobrojni fosili istih vrsta koji su se gotovo istodobno pronalazili na različitim dijelovima Zemlje. Mnogi znanstvenici se slažu kako su se razvijali na superkontinentu Rodinia te su njegovim raspadom nastavljali svoj razvoj izolirani jedni od drugih.

Na primjer, ustanovilo se da su trilobiti podrijetlom s područja Sibira (prije 580 mil. god.), podgrupa Redlichiidae završila je u Mawson oceanu, a Olenellida na rubu Iapetan i Mirovian oceana koji su međusobno dosta udaljeni. Ovime se ide u korist teoriji da je kambrijska eksplozija započela 50-70 mil.g. prije svog pojavljivanja u fosilima.[11]

5.2. POVIŠENJE KONCENTRACIJE KISIKA

Kambrijski su organizmi najvjerojatnije bili maleni, slični današnjim ličinkama planktona. Moguće da je izgradnja većih organizama i tvrdih dijelova tijela bila potaknuta povišenjem razine kisika. Vjerojatno je postojala razina kisika koja je prije toga spriječavala rast skeletnih dijelova. Prelaskom te granice organizmi su bili sposobni evolucijski napredovati.

Razina kisika se povećavala tijekom predkambrijskog razdoblja zahvaljujući fotosintetskim organizmima. Većom koncentracijom kisika omogućuje se zadovoljavanje potreba većih organizama za prijenos kisika između okoliša i unutrašnjeg metaboličkog tkiva. Također, veća koncentracija kisika omogućuje sintezu kolagena za formiranje čvrstih struktura ljuštura, kutikula ili čak mišića.[15.11]

5.3. OSCILACIJE KONCENTRACIJE UGLJIKA

Unutar velike kambrijske slagalice još jedna od zagonetki jest stalna i učestala oscilacija ugljikova dioksida. Stratigrafskim datiranjem $\delta^{13}C$ očuvanog u karbonatima uočen je nagli pad ugljika koji korespondira s pojavom vrste *T.pedum.* Nakon toga slijedi rast u koncentraciji prekinut s nekoliko oštrih padova kako bi do početka razdoblja tommotian došlo do naglog rasta. Nekoliko daljnih oscilacija, rast u srednjem i gornjem kambriju, govore kako je trajanje pojedinog rasta ili pada bilo od nekoliko stotina do milijun godina. U drugim razdobljima najkraće oscilacije su trajale 15 do 20 milijuna godina.[9]

Gledajući individualno, primjećuje se kako je svaki nagli pad ili rast, u vezi s biološkom evolucijom. Prvi pad razine ugljika praćen je pojavom vertikalnog ukopavanja organizama u sediment. Smatra se kako je sediment ranog kambrija bilo glinovit i čvrst te je bilo potrebno mnogo energije da ga se probije.[4] Nadalje, porast je popraćen radijacijom mekušaca. Primjećen je manji porast kroz tommotiansko razdoblje s pojavom člankonožaca, bodljikaša i Archaeocyatha, životinja nalik današnjim spužvama koji izumiru krajem tommotiana kada se javlja i nagli pad ugljika.

Nije sigurno kako ove specifične promjene u koncentraciji ugljika utječu na živi svijet. Prva hipoteza kaže da su ciklusi ugljika pod utjecajem povećanja i smanjenja biosfere, a druga da su oni odgovor na velike klimatske i geološke promjene Zemljine površine, a biosfera odgovara na takve podražaje. Iz ovoga nije moguće zaključiti koji bi točno čimbenici utjecali na prirodni odabir.[9]

5.4. LEDENA DOBA

Ledinim dobom se smatra ono razdoblje u kojem postoje dijelovi Zemljine površine koji su stalno pod ledom. Prema tome, i danas se Zemlja nalazi u ledenom dobu, tj. međuledenom dobu – razdoblju zatopljenja. U kasnom proterozoiku Zemlja je bila dva puta smrznuta, to su Marionan i Sturtian razdoblje. Glacijacija je trajala milijunima godina dok CO_2 nije stabilizirao albedo odbijajući dio Sunčeve radijacije.

Dvije spomenute glacijacije uzrokovale su takvo zahladnjenje da je Zemlja bila zaleđena na ekvatorskim širinama do razine mora što ju je učinilo nalik ogromnoj snježnoj grudi (Snowball Earth). Smatra se kako je topljenje bilo popraćeno lomljenjem ledenjaka i odnošenjem materijala u oceane. Takvo bogatstvo nutrijenata vjerojatno je omogućilo razvoj edikarianske faune koja prethodi kambrijskoj eksploziji. Nutrijenti su se nagomilali u plitkoj fotičkoj zoni i pogodovali razvoju raznolikosti živog svijeta omogućivši precipitaciju elemenata i izgradnju čvrstih skeleta.

Ovoj teoriji ne suprotstavlja se činjenica da se topljenjem ledenjaka povisuje razina mora i onemogućuje stvaranje takvih plitkih fotičkih zona. Naprotiv, raspadom superkontinenta Rodinije morska voda se poćela uvlačiti u plašt te je razina morske vode pala. Tada je kopno činilo 30% Zemljine površine.

Postoji teorija kako su se istim procesima nutrijenti nakupljali u kopnenim vodama. Stijene koje okružuju neko jezero mogle su glacijalnim procesima završiti u vodi i promijeniti kemiju okoliša. Metazojskim organizmima poput vertebrata potrebni su Ca, Fe^{2+}, HCO_3, P, Na^+, K^+, V, Mo i drugi elementi kako bi si izgradili čvrste dijelove, a ti elementi su se mogli otapati iz okolnih stijena poput granita. Tadašnja jezera nalikovala su današnjim jezerima afričkog rifta ili Mrtvome moru.[10]

Na kraju, ledena su doba stvarala uvjete koji su za većinu organizama pogubni, niske temperature i manje hrane. Ali ipak, postoje brojni dokazi o kompleksnim mikroorganizmima koji su u relativno velikom broju nastanjivali „ Snowball Earth“, čime možemo potvrditi kako glacijacije nisu bile katastrofalne za živi svijet, već samo vrlo značajne.[2]

5.5. MASOVNA IZUMIRANJA

Evolucija života nije konstantno povećanje bioraznolikosti. Postoje događaji koji značajno smanjuju broj vrsta, što nazivamo masovnim izumiranjima. Smatra se kako je edikarianska

fauna nestala takvim događajem. Biostratigrafski nalazi pokazuju naglu promjenu u svom sadržaju, tako da se time završava jedno, a počinje novo geološko razdoblje. Masovna izumiranja i slične promjene podloga su za utvrđivanje razdoblja neke ere.

Iznenadan nestanak brojnih vrsta omogućuje preživjelima da popune sada prazne ekološke niše. Nestankom velikog broja predatora i kompetitoram, određena vrsta će imati mogućnost boljeg napredovanja.

Masovnom izumiranju mogu prethoditi brojni događaji, kao što su glacijacija i promjena u geološkoj građi Zemlje. (A zna se kako su u predkambrijskom dobu bili takvi uvjeti.) Nakon izumiranja, uzrok masovnih izumiranja ne pogoduje u potpunosti preživjelim organizmima. Moguće je da zbog pomicanja kontinenata nastaju brojni vulkani koji atmosferu zagađuju brojnim česticama i tako smanjuju Sunčevu radijaciju. Te će posljedice biti dugotrajnije, ali višestanični organizmi su stabilniji po svojoj strukturi i moguće je da im je to bila prednost koja im je omogućila bujanje u kambrijskom razdoblju.[13]

Znanstvenik Cavalier-Smith polazi od stajališta kako je teško vjerovati da su se novi organizmi mogli brzo razvijati dok su jedina fotosintetizirajuća živa bića na Zemlji bile bakterije, ali praćenjem filogenetičkog stabla napravljenog na temelju proteina, primijetio je kako su baze životinjskog i biljnog stabla vremenski veoma blizu. Kao što se već spomenulo, u to vrijeme događale su se brojne geološke i klimatske promjene. Zabilježenim oscilacijama ugljika smatra se kako su i oscilacije u fotosintezi u tadašnje vrijeme bile aktualne. Smatra se da se plastid razvio nakon topljenja leda, te nije bilo potrebe za objašnjavanjem o njegovim strategijama preživljavanja. Plastid i formiranje biljnog carstva obogaćivali bi atmosferu kisikom i time potpomogli evoluciju metazoa. Također, Cavalier-Smith smatra kako se za vrijeme glacijacije prije 750 do 680 milijuna godina razvio kloroplast, a odgodio razvoj odvedenijih eukariota poput životinja.[1]

5.6. KOZMIČKO ZRAČENJE

Kineski znanstvenici podijelili su događaje koje prethode kambrijskoj eksploziji u četiri faze. (I) Prije 900-600 milijuna godina Veliki Magellanov oblak, galaksija u blizini naše, prošao je veoma blizu naše galaksije i uzrokovao promjenu u izgaranju zvijezda čime se povećala koncentracija kozmičkog zračenja na Zemlju. (II) Zbog intenzivnog zračenja i slabljenja geomagnetizma Zemlju je zahvatilo ledeno doba u više navrata. (III) Razdvajanje superkontinenta uzrokuje upwelling nutrijenata kroz pružanje rasjeda. Na tome mjestu se danas nalazi južna Kina gdje su i pronađeni prvi višestanični organizmi. (IV) Zračenje

uzrokuje češće mutacije koje omogućuju dupliciranje gena, razvitak novih funkcija poput biomineralizacije. (V) Povećanje kisika i okoliš obogaćen nutrijentima omogućuje intenzivan razvoj kambrijskih životinja.[10]

5.7. AKTIVNO UČENJE

Na izraelskom sveučilištu znanstvenici Ginsburg i Jablonka uzrok kambrijske eksplozije ne traže u geološkoj građi okoliša ili klimi koja je zadesila Zemlju, već se okreću izravnoj ekološkoj povezanosti između predatora i plijena. Za njih je najveću ulogu odigrao interspecijski odnos u kombinaciji s promjenom u fiziologiji tadašnjih organizama.

Njihovo polazište je pretpostavka kako su preci kambrijskih organizama bili bilateralni organizmi koji su se razvili u razdoblju prije (za njih nema fosilnih dokaza, ali smatraju kako nisu imali ljušture koja bi mogla biti sačuvana). Na temelju molekularnih analiza i nekoliko komparativnih metoda, zaključili su kako su bilateralni organizmi „izronili“ tijekom razdoblja edikarianske faune što je uzrokovalo „ekološka i evolucijska pravila“ koja su popratila kambrijsku eksploziju.

Ono što je najteže objasniti jest iznenadna pojave raznolikosti u životinjskom svijetu, takav bilateralan predak trebao je biti okarakteriziran izrazitom plastičnošću razvoja, a ta plastičnost je proizvod samoorganizirajućih svojstava kako reagiraju na promjene u okolišu.[5]

U Tablici 2. mogu se vidjeti neki ekološki i genetički uvjeti koji doprinose kambrijskoj eksploziji. Razvoj aktivnog učenja smješten je među ekološke jer je pod najvećim utjecajem odnosa s drugim vrstama.

Kada se aktivno učenje razvilo, dovelo je do povećanja mozga i diferencijacije i impregnacije među njegovim dijelovima.

Autori ove hipoteze smatraju kako je aktivno učenje važna evolucijska „povratna petlja“ za kambrijsku metazojsku radijaciju. Poboljšanje novih predatorskih vještina povlači za sobom nove i kompleksnije antipredatorske sposobnosti. U prednosti su bili oni koji su imali bolji kapacitet za razvijanje novih vještina. Time objašnjavaju izumiranje organizama edikarijanske faune koja se dogodila u ranom kambriju. Rast u populaciji bilateralnih „sposobnijih“ organizama vjerojatno je desetkovala svoje kompetitore.

Smatra se kako je povećana koncentracija kisika potpomogla razvoju aktivnog učenja pošto je živčano tkivo metabolički „skupo“ i zahtjeva puno kisika. Pamćenje iskustava omogućuje dulji život u kojemu se, povratno, i isplati imati pamćenje. A dulji život može biti

u vezi s povećanjem tijela. Prirodnom selekcijom kapacitet učenja se povećava i omogućava nastanjivanje novih niša u kojima se postavljaju novi zakoni selekcije.

Eksplozija novog ponašanja i novih ekoloških prilika koje prate razvoj aktivnog učenja bili bi praćeni eksplozijom novih morfoloških adaptacija.[5]

Tablica 2. Razvojni i genetički preduvjeti kambrijskih organizama i njihov doprinost daljnjem razvoju. Preuzeto i prilagođeno na temelju literaturnog izvora [5]

UZROK INOVACIJE	**DOPRINOSI KAMBRIJSKOJ EKSPLOZIJI**
RAZVOJNI/EKOLOŠKI PREDUVJETI	
Makroskopska predacija	Utrka u naoružavanju između predatora i plijena dovela je do pojave zakopavanja i evolucije čvrstih dijelova tijela.
Evolucija anusa i usmjerenog kretanja	Poboljšanje u razvrstavanju hrane i otpada, anteriorno-posteriornog kretanja; dolazi do diverzifikacije Metazoa.
Pojava živčanog sustava	Poboljšane motoričke sposobnosti: učenje je dovelo do ekološke kompleksnosti.
Pojava vizualne percepcije	Mogućnost nastanjivanja novih ekoloških niša.
Kopanje	Miješanje čestica tla promijenilo je njegov sastav, to dovodi do recikliranja organske tvari i zakopavanja fosfata i drugih minerala; također omogućuje bolju fosilizaciju.
Raširenost aktivnog učenja	Nastanjivanje novih niša, poboljšanje napada i obrane te suradnje među organizmima, zadobivanje iskustva.
GENETIČKI PREDUVJETI	
Neurohormonalni stres koji aktivira epigenetičku destabilizaciju	Povećava genetsku varijabilnost, osobito one u mozgu.
Akumulacija microRNA	Povećava preciznost regulacije gena.
Horizontalni prijenos gena	Dobivanje novih gena, npr. za razvitak čvrstih dijelova tijela.
Opsežna hibridizacija	Povećava sposobnosti genoma i morfoloških mogućnosti; dovodi do pojave ličinki.
Duplikacija gena/genoma	Dupli cirani geni mogu obavljati novu funkciju.

5.8. STRES

Poboljšano pamćenje uzrokovalo je mnoge odgovore na predatorsko i antipredatorsko ponašanje. U takvim slučajevima jedinka je izrazito koncentrirana na opažanje moguće prijetnje te u nekim slučajevima dolazi do pretjerane reakcije. Takvi slučajevi se nazivaju „princip detektora dima“ u kojima je odgovor bijegom energetski manje zahtjevan negoli suočavanje s „vatrom“. Reakcija je okidač mnogih procesa u organizmu koji uključuju neuroendokrini i imunološki sustav. Izlaganje organizma čestim stresnim uvjetima i odgovorima na te uvjete dovodi do destabilizacije.

Moguće da se takva destabilizacija dogodila u ranom kambriju u samom genomu organizama i dovela do trajne, rasprostanjene i nasljedne promjene u ekspresiji gena u živčanom sustavu i gametama. Utvrđeni su dokazi koji govore da stres inducira promjene u nasljednim genima, mijenjajući mitotičko, mejotičko i kromosomsko sparivanje, sprječavajući popravke mutacija ili ih uzrokovati.[5]

6. KAMBRIJSKA EKSPLOZIJA KAO ARGUMENT PROTIV EVOLUCIJE

Ne postoji točno određena brzina evolucije, već se samo podrazumjeva kako je ona dugotrajan proces postupnih razlika u organizaciji, svojstvima i ponašanju živih bića. Za kambrijsku eksploziju se smatra da nije spora koliko bi to evolucija trebala biti. Upravo zbog toga ova kambrijska eksplozija upada u oči svojim naglim skokom u evolucijskom procesu. Pojava velikih i glavnih organizacijskih skupina životinja u relativno kratkom vremenu svojom velikom rasprostranjenošću i bez nekih čvršćih dokaza za njihovo postojanje u vremenu prije, suprotstavlja se Darwinovu objašnjenju da su svi organizmi potekli iz istog zajedničkog pretka.[15.2] Nedosljednost u geološkim zapisima je najveći argument protiv teorije evolucije.[8] Zagovaratelji tog argumenta ne niječu postojanje fosilnih zapisa o životu prije kambrija već naglašavaju kako je vrijeme za takav skok u naprednosti sustava prema dotadašnjim pravilima prekratko. A nepostojanje dokaza o zadnjem zajedničkom pretku ukazuje na to da ga nema.

Darwin je bio svjestan ove nepodudarnosti sa svojom teorijom, ali smatrao je kako će se napretkom znanosti pronaći odgovor na ovo veliko pitanje.

Uzimajući u obzir kako su fosili jedni od najvećih dokaza za evoluciju, fosili kambrijskog razdoblja gotovo izdajnički tvrde suprotno. Kako su to činjenice, ne smije se zanemariti ni takvo kritičko razmišljanje.[15.2]

7. ZAKLJUČAK

Na temelju predloženih uzroka kambrijske eksplozije može se zaključiti kako ne postoji jedan razlog koji ju je uzrokovao. Svaki od navedenih imao je svoj udio u nastanku tog događaja. Među bitnije događaje stavila bih masovna izumiranja, promjene u atmosferi i tektoniku, dok mi se neka čine manje vjerojatnim, poput kozmičkog zračenja koji je najnepouzdanija teorija te zahtijeva daljnja istraživanja.

Možda bi bilo zanimljivo proučavati postoji li neki kritični uzrok bez kojeg razdvajanje na nove phyle ne bi bilo moguće. Ukoliko je prije 550 milijuna godina došlo do situacije u kojoj se biološki skok u razvoju, bez obzira na abiotičke uvjete, *morao* dogoditi, onda ne bi bilo ni važno nabrajati sve ove teorije. Nadalje, izostankom samo jednog od ovih događaja, moguće je da bi se evolucija odvijala u nekom drugom pravcu.

Uglavnom smatram kako su svi ovi uvjeti kambrijskog razdoblja i razdoblja koja mu prethode, međusobno povezana: tektonika i glacijacija s izumiranjem, izumiranje s razvojem i učenjem; te ih je teško odvojiti. Zbog toga mislim kako je kambrijska eksplozija, zajedno sa svim ovim podprocesima, zapravo jedan proces koji je omogućio značajan evolucijski događaj.

Na kraju, sa sigurnošću možemo ustvrditi da se kambrijska eksplozija dogodila, budući da se posljedice te eksplozije vidljive i danas u raznolikosti živoga svijeta. Moguće je kako su u tom razdoblju postojanjem sveobuhvatnih pogodnosti, katastrofalnih događanja poput klimatskih i geoloških promjena, ili drugih, poput učenja i povećanja koncentracije kisika, uvjetovali mogućnost razvoja i stvaranja biosfere kakvu danas poznajemo. Za sada je taj događaj jedinstven, ali u budućnosti možda ponovno dođe razdoblje kada će se poklopiti različiti procesi i događaji i omogućiti nastanak novih sustava života.

8. LITERATURA

1. Cavalier-Smith, T. The phagotrophic origin of eukaryotes and phylogenetic classification of Protozoa. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology* **52**, 297 -354 (2002).
2. Conway-Morris, S. The Cambrian "explosion" of metazoans and molecular biology: would Darwin be satisfied? *The International journal of developmental biology* **47**, 505-515
3. Cooper, A. & Fortey, R. Evolutionary explosions and the phylogenetic fuse. *Trends in Ecology & Evolution* **13**, 151-156 (1998).
4. Dzik, J. Behavioral and anatomical unity of the earliest burrowing animals and the cause of the "Cambrian explosion."*Paleobiology* **31**, 503-521 (2005).
5. Ginsburg, S. & Jablonka, E. The evolution of associative learning: A factor in the Cambrian explosion. *Journal of Theoretical Biology* **266**, 11-20 (2010).
6. Giribet, G. Current advances in the phylogenetic reconstruction of metazoan evolution. A new paradigm for the Cambrian explosion? *Molecular Phylogenetics and Evolution* **24**, 345-357 (2002).
7. Gould, S. *Dinosaur in a Haystack*. (Harmony Books: New York, 1995).
8. Gould, S. *The panda's thumb: more reflections in natural history*. (Norton: New York, 1992).
9. Kirschvink, J.L. & Raub, T.D. A methane fuse for the Cambrian explosion: carbon cycles and true polar wander. *Comptes Rendus Geosciences* **335**, 65-78 (2003).
10. Maruyama, S. & Santosh, M. Models on Snowball Earth and Cambrian explosion: A synopsis. *Gondwana Research* **14**, 22-32 (2008).
11. Meert, J.G. & Lieberman, B.S. The Neoproterozoic assembly of Gondwana and its relationship to the Ediacaran–Cambrian radiation. *Gondwana Research* **14**, 5-21 (2008).
12. Shu, D. Cambrian explosion: Birth of tree of animals. *Gondwana Research* **14**, 219-240 (2008).
13. Stearns, S. & Hoekstra, R. *Evolution*. (Oxford University Press: New York, 2005).

14. Valentine, J.W., Jablonski, D. & Erwin, D.H. Fossils, molecules and embryos: new perspectives on the Cambrian explosion. *Development* **126**, 851 -859 (1999).

15.1. http://www.ask.com/wiki/Aspidella_terranovica
15.2. http://www.darwinsdilemma.org/pdf/faq.pdf
15.3. http://www.en.wikipedia.org/wiki/Burgess_Shale_type_fauna
15.4. http://www.en.wikipedia.org/wiki/Pannotia
15.5. http://www.en.wikipedia.org/wiki/Preston_Cloud
15.6. http://www.en.wikipedia.org/wiki/William_Buckland
15.7. http://www.geomuseum.uni-goettingen.de/research/exzellenzinitiative/index.shtml
15.8. http://www.isaacbickerstaff.wordpress.com/2010/02/06/on-prehistoric-life/
15.9. http://www.learning.berkeley.edu/astrobiology/dickinsonia.jpg.
15.10. http://www.lpgms.org/newsletters/2008/april.html
15.11. http://www.sapientfridge.org/cambrian/science_papers/Did%20oxygen%20trigger%20Cambrian%201997.pdf
15.12. http://http://www.trilobites.info/species.html
15.13. http://www.ucmp.berkeley.edu/vendian/dickinsonia.jpg

9. SAŽETAK

Prema fosilnim nalazima, prije 550 milijuna godina došlo je do iznenadne pojave raznih organizacijskih skupina životinja i višestaničnosti. Nikada prije kambrija nije zabilježen takav nagli evolucijski pomak. Smatra se da je trajao oko 50 milijuna godina što je, geološki gledano, kratko vrijeme, te je ovaj događaj dobio popularni naziv kambrijska eksplozija.

Cilj seminara je predstaviti brojne teorije kojima se želi objasniti uzrok te eksplozije kao što su pomicanje tektonskih ploča, promijene u klimi i sastavu atmosfere, masovna izumiranja, kozmičko zračenje, stres i ekološki uvjeti. Nije moguće izdvojiti niti jedan od ovih čimbenika kao glavni uzrok, već se čini kako je svaki od ovih uvjeta imao svoj udio u nastanku ovog jedinstvenog događaja.

10. SUMMARY

According to the fossil records, there was a sudden appearance of various organizational groups and animal multicellularity 550 million years ago. Such a sudden evolutionary shift has never been recorded before the Cambrian period. It is believed to had lasted about 50 million years, which is a short time, geologically speaking, so this event is popularly called the Cambrian explosion.

Goal of this seminar is to introduce number theories explaining the cause of this explosion such as the movement of tectonic plates, the changes in climate and atmospheric composition, mass extinctions, cosmic rays, stress and ecology. It is not posible to point out anyone of them as a single main cause, while each of these conditions had its part in creation of this unique event.