

Земята – за физици¹

Джон Бец

Перспективата за предизвикани от човека промени в климата безпокои много хора. В допълнение към истинските мащаби на проблема стои също предизвикателството на неговата комплексност. Дяволски трудно е да се предскаже поведението на Земята в детайли. Мощността на компютрите не е достатъчна: моделите трябва да се основават на твърди физични прозрения и на добро разбиране на настоящото поведение на Земята, както и на нейната история.



Земята – за физици

За щастие, през последното десетилетие ние научихме извънредно много за нейната история. Мъглата, която закриваше миналото, се разчиства. Изглежда, че не само ние преминаваме през опасни, рискови времена. Земята е била свидетел на няколко забележителни катастрофи. За да разкажем нашата история накратко, нека се съсредоточим върху четири: “голямото изплискване” преди около 4,55 милиарда години; “последната тежка бомбардировка” от преди около 4 милиарда години; “кислородната катастрофа” от преди около 2,5 милиарда години; и събитията на “Земята – снежна топка” от преди около 850 милиона години. Детайлите на тези събития, както и въпросът дали те всъщност са се случили, остават спорни. Те представляват, обаче, широко възприети теории. Във всички случаи, в проверката на тези теории е намесена интересна физика.

Раждането на Луната

Слънцето вероятно е формирано в резултат на гравитационен колапс на облак от газ и прах. Ранните модели на звездообразуването предполагат сферична симетрия, но ако вие знаете вица, чиято поанта е “да разгледаме една сферична крава”, тогава вие бихте заподозрели, че това е опасно свръх-опростяване. Наистина, ъгловият момент играе голяма роля. При гравитационния колапс на такъв облак той би трябвало да образува въртящ се “акреционен диск”.

Когато центърът на този диск станал достатъчно плътен, така че налягането в него да го удържа, нашето Слънце се ражда като “протозвезда”. Този етап от развитието продължил примерно 100 000 години; тогава температурата нараснала до стойност, при която изтичането на горещ газ предпазва Слънцето от акреция на повече вещество върху него. В тази точка Слънцето се превръща в нещо, което наричаме звезда от типа Т от Бик и която се захранва с енергия само благодарение на бавното си гравитационно свиване. След други около 100 милиона години то става една

¹ Превод от страницата на The Physics World на 31.08.2009. Авторът е специалист по математична физика в Университета на Калифорния, Ривърсайд, САЩ. (Бел. прев.)

обикновена звезда от главната последователност, тъй като водородът в ядрото му започва да претърпява термоядрени реакции на сливане.

Част от праха, обикалящ около Слънцето се нагрява и стапя, а някои от стопените капчици по-късно замръзват във вид на “хондрули” – сфери с милиметрови размери от прости минерали като пироксен и оливин, които са съставени предимно от натрий, калций, магнезий, алуминий, желязо, силиций и кислород. Тези хондрули са главна съставна част на някои от най-простите обекти, които все още изпълват Слънчевата система: каменни метеорити, наречени “хондрити”.

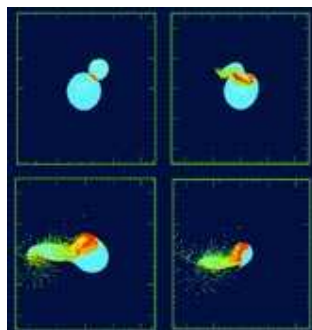
Прахът, обикалящ около ранното Слънце, започва да образува бучки, наречени “планетезимали”. При сблъскването на тези бучки те стават все по-големи и по-големи, формирайки евентуално астероидите и планетите, които наблюдаваме днес. Някои бучки се разтапят, при което по-тежките метали потъват към техните центрове, докато по-леките материали остават на повърхността. А някои се сблъскват една в друга, разтрошавайки се и образувайки други метеорити като желязно–никеловите метеорити и каменните метеорити, наричани “ахондрити”.

Като използват техниките за радиоактивно датироване на метеорити, изследователите демонстрират едно шокиращо точно познание за това, кога се е случило всичко това: някъде между 4,56 и 4,55 милиарда години в миналото. И така, Земята вероятно се формира по онова време и нашата история официално започва от този момент.

Земната история се дели на четири еона: Хадей, Архай, Протерозой и Фанерозой. Когато бях дете, в моите учебници “Камбрийската ера” беше най-далечното минало, като се изключи мрачният “Докамбрий”. Но Камбрийската ера започва само преди 450 милиона години. Камбрийят бележи началото на настоящия еон, Фанерозоя, което означава “времето на видимия живот”. Това е моментът, в който многоклетъчните организми се разпространяват по света, оставяйки вкаменелостите, които откриваме днес. Ние обаче ще копаем много по-дълбоко: Фанерозоят ще бъде в края на нашата история.

Обратно към Хадея. Както подсказва името му, това е времето, когато на Земята е било адски горещо. Той започва с едно събитие от преди около 4,53 милиарда години, което води до формирането на Луната. Как се образува Луната? Най-разпространеното днес обяснение е “теорията на гигантския удар”, понякога наричана теория на “голямото изплискване”.

Идеята е, че в една от Лагранжевите точки на земната орбита се е образувала друга планета. През 1772 година Лагранж показал, че ако една планета обикаля по кръгова орбита около Слънцето, тогава едно много по-леко тяло би обикаляло устойчиво на същото разстояние от Слънцето, ако то се движи 60° пред или зад планетата. Наистина, наблюдават се много астероиди в близост до Лагранжевите точки на Юпитер, както и някои в Лагранжевите точки на Марс и Нептун. Не са открити астероиди обаче около Лагранжевите точки на Земята. Според теорията на гигантския удар в една от тези точки се е била формирала планета. Когато достигнала приблизително масата на Марс, тя вече не била стабилна в това положение. Тя би трябвало постепенно да се придвижва към Земята да се плесне върху нея! Този сблъсък би могъл да образува Луната.



Един много лош ден

Това е една катастрофична теория, но за нея има силни доказателства, грижливо сумирани в неотдавнашната книга на Дана Маккензи *Голямото плискане, или как се е появила нашата Луна*. Например, триенето, предизвикано от приливните вълни, е причина за постепенното отдалечаване на Луната от Земята. Ние знаем, че сега тя се отдалечава със скорост около 3,8 cm на година. Древните утайки регистрират вълните и показват, че месеците стават по-дълги поне от докамбриански времена. Екстраполирайки назад, ние откриваме, че в еона Хадей Луната е била много близо до Земята. Би ли могла тя да избяга от Земята под действие на центробежната сила, или първоначално се е образувала в близост до Земята, или пък е захваната от гравитационното поле на Земята? Всички тези теории следва да се разглеждат, но все пак изглежда, че теорията на голямото изплискване най-добре обяснява наблюдателните данни. Хората я приемат дотолкова сериозно, че хипотетичната осъдена на смърт планета, която е ударила Земята, има даже и име: Тея. В гръцката митология Тея е титанесата, която ражда Луната.

През 2004 година астрофизикът Робин Кануп от Югозападния научен институт в Боулдер, Колорадо, публикува няколко забележителни компютърни симулации на големия плясък. За да получите луна, подобна на нашата – вместо някоя, която е твърде богата на желязо, или твърде малка, или погрешна в някой друг аспект, вие трябва да подберете подходящи начални условия. Кануп намери за най-уместно да приемем, че Тея е малко по-масивна от Марс: между 10 % и 15 % от масата на Земята. Тя би трябвало да започне да се движи бавно към Земята и да се удари косо в нея.²

Резултатът представлява един *много* лош ден. Тея удря Земята и отрязва от нея голям къс, образувайки шлейф от раздробени, разтопени или изпарени скали, които се движат по дъга в пространството. В течение на час половината земната повърхност се нажежава до червено, а шлейфът от отломките се разтегля в пространството на разстояние почти четири земни радиуса. След три до пет часа желязното ядро на Тея и повечето от отломките падат надолу. Цялата земна кора и външната мантия се стапят. В този момент четвъртинката от Тея фактически се е изпарила.

След един ден материалът, който не е паднал обратно долу, формира пръстен от отломки, обикалящи около Земята. Такъв пръстен обаче не би бил стабилен: в рамките на столетие той би се струпал и образувал Луната, която ние знаем и обичаме. Междувременно, желязното ядро на Тея вече е потънало в центъра на Земята.

Теорията на гигантския удар все още усилено се обсъжда, отчасти, защото са останали твърде малко преки доказателства: най-старите познати скали на Земята са се образували почти половин милиард години по-късно.

Последната тежка бомбардировка

² Т.е. ударът да не е централен. (Бел. прев.)

Архайският еон започва с формирането на първите скали, които са оцелели до наши дни. Това се е случило преди около 4 милиарда години. Много вулканични скали, по специално базалтът, би трябвало да са се образували преди това. Фактически океаните би трябвало да започнат да се формират преди 4,2 милиарда години. Ние обаче не виждаме никакви следи от тази ранна геология. Една възможна причина за това е, че началото на Архайския еон не е било спокойно време.

След формирането на Луната Земята продължава да страда от множество удари. Любопитно е, че вместо тяхната честота постепенно да намалява с времето, тя би могла да нарасне бързо по време на един период, наречен късна тежка бомбардировка, която е станала преди около 4 до 3,8 милиарда години. Множеството големи кратери върху Луната датират от този период, така че вероятно Земята също е била удряна – но тук такива стари кратери биха били заличени от изветрянето и геологичната активност. Така че наш екскурзовод е Луната.

По време на късната тежка бомбардировка Луната е ударена от 1700 метеора, които образуват кратери, чиито напречни размери са над 100 km. Земята лесно би могла да получи 10 пъти повече удари от тази величина, като някои биха могли да бъдат и значително по-големи. За да получите представа за интензивността на това обстрелване, спомнете си метеорния удар, който може би е избил динозаврите преди 65 милиона години. Той е оставил кратер с диаметър 180 km. Удари от тази величина би трябвало да бъдат нещо обикновено по време на късната тежка бомбардировка.



Метеорен блицкриг

Защо тази ера е толкова бурна? Според една теория горе долу по това време Юпитер и Сатурн влизат в 2:1 орбитален резонанс (т.е. за времето, за което Юпитер прави две обиколки по орбитата си, Сатурн прави точно една). Това предизвиква голямо разпадане на началното разпределение на астероидите и на ледените обекти, обикалящи около Слънцето. През 2005 г. една международна колаборация от физици планетолози, включваща Х. Левисън от Югозападния изследователски институт – един от хората, които прокараха идеята, че Плутон е “планета джудже”, публикуваха статия относно някои увлекателни компютърни симулации на Слънчевата система (*Nature* **435** 466). В началните условия те приемат, че всичките четири газови гиганта лежат на кръгови орбити, разположени по-близо, отколкото са сега. Чрез взаимодействие с планетезималите Сатурн, Уран и Нептун постепенно се раздалечават. Когато Сатурн достигне точката, в която той обикаля около Слънцето за времето, за което Юпитер прави две обиколки, цялата външност на Слънчевата система се дестабилизира. Орбитите на Нептун и Уран стават по-ексцентрични и те изхвърлят много планетезимали от техните орбити. Някои от тях са захвърлени във вътрешната част на Слънчевата система, което би обяснило късната тежка бомбардировка.

Кислородната катастрофа

Вярва се, че земната кора се е охладила достатъчно, за да образува кора, дори преди късната тежка бомбардировка. Междувременно, вулканичната активност освобождава огромни количества водна пара, въглероден диоксид и амониак. Това формира така наречената “втора атмосфера” на Земята. “Първата атмосфера” на Земята, съставена предимно от водород и хелий, по онова време вече е била изгубена в междупланетното пространство. Втората атмосфера е съдържала главно въглероден

диоксид и водни пари, както и известно количество азот, но вероятно не много кислород. Тази втора атмосфера е имала около 100 пъти повече газове, отколкото днешната “трета атмосфера”.

С охлаждането на Земята се формират океаните. Те биха могли да се изпарят напълно по време на някой удари от достатъчно големи небесни тела, но след това са се образували отново. Евентуално голяма част от въглеродния диоксид в атмосферата се е разтварял в морската вода. Той по-късно се утаява като карбонати, с което започва нов етап, който геологът Р. Хазен от Института Карнеги на Вашингтонската геофизична лаборатория и неговите сътрудници наричат “неорганична еволюция”. Това не е еволюция в Дарвинов смисъл, а просто постепенно разнообразяване на минералите с течение на времето. През 2008 година колектив от геолози, ръководени от Хазен, оцениха, че по време на Хадейския еон по Земята са били разпространени 350 вида минерали. С напредването на времето техният брой продължава да расте. В края на Архайския еон той достига 1500, отчасти благодарение на образуването на океаните, но също благодарение издигането на тектоничните плочи.

Първа стъпка в тектониката на плочите е било формирането на “кратони”: древни, тясно свързани парчета от земната кора и мантия, дюзини от които са оцелели и до днес. Например, във Великобритания, югоизточната част на Уелс и част от западна Англия лежат на кратона Мидланд. Докато повечето кратони са приключили формирането си преди 2,7 милиарда години, почти всички са започнали нарастването си преди това. Кратоните са изградени основно от вулканични скали като гранита, които са по-сложни от базалта. Гранитът се формира по няколко начина, например при повторно стапяне на утаечни скали. Вероятно ранните гранитоподобни скали са били по-прости.

Кратоните се съединяват един с друг, за да образуват по-големите плочи, които образуват земната кора днес. Наистина, както знаем, тектониката на плочите започва преди около 3 милиарда години. Ключова страна на този процес е рециклирането на земната кора чрез “субдукция”: океанските плочи са плъзгат под континенталните плочи и са притискани надолу в мантията. Друго явление е подводният вулканизъм, който води до хидротермални отвори – цепнатини в морското дъно, от които излиза гореща вода.

Възможно е тези цепнатини да са играли роля за най-драматичните развития през Архайския еон: началото на живота. Доколкото на ранната Земя липсва кислород, първите живи организми би трябвало да са анаеробни. Даже днес много от най-старите известни микроби, като тези, открити в хидротермалните отвори, не могат да понесат присъствието на кислород. Тези организми слагат началото на един активен серен цикъл и отлагане на залежи от серни съединения, започнали преди около 3,6 милиарда години. По-късно те създават в атмосферата нарастващи количества метан.

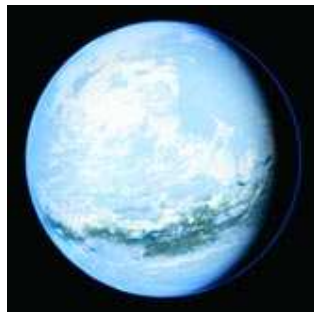
В определен момент микробите започват да фотосинтезират и да изхвърлят в атмосферата кислород. Изглежда правдоподобно, че първите растения придобиват способност да фотосинтезират чрез симбиоза с подобни микроби. Наистина, хлоропластите в растенията имат своя собствена отделна ДНК.

Не е ясно кога започва фотосинтезата – оценките се движат между 3,5 и 2,6 милиарда години назад. Едно възможно указание идва от скалите, наречени “свързани

железни формации”, които се състоят от тънки слоеве от железни оксиди, редуващи се с бедни откъм желязо скали – те започват да се появяват приблизително по това време. Те може да са се формирали когато кислородът от първите фотосинтезиращи организми реагира с желязото в морската вода. Никой не знае със сигурност защо периодите, в които има богати на желязо утайки, се появяват и прекъсват.

Било е необходимо твърде дълго време, докато фотосинтезата окаже значителен ефект върху земната атмосфера, но когато това се случва, преди около 2,5 милиарда години, резултатът се оказва драматичен. Преди всичко кислородът в газовата си фаза е силно химически активен и повечето ранни форми на живот не могат да го понасят. Поради тази причина този епизод от земната история е наречен кислородна катастрофа. За късмет, еволюцията е намерила изход: днес много видове се нуждаят от кислород.

Кислородната катастрофа бележи края на Архайския еон и началото на новия еон, Протерозойския. Следващият милиард години е доминиран от нещо, наречено “междинен океан”: морската вода съдържа много повече кислород от преди, но много по-малко, отколкото днес.



Големият студ

Снежната топка Земя

Като се започне от преди приблизително 850 милиона години, на Земята се случва нещо драматично: епизоди от неудържимо заледряване, по време на които по-голямата част от Земята се покрива с лед. Привържениците на екстремните версии на този сценарий наричат тези събития “снежната топка Земя”, докато други привеждат доводи в полза просто на една “лапавица”. Доколкото ледът отразява слънчевата светлина и с това прави Земята още по-студена, лесно може да предположим как може да се случи подобна неудържима обратна връзка. Противоположният вид обратна връзка протича днес, тъй като топенето на ледовете прави Земята по-тъмна и по такъв начин ускорява затоплянето ѝ. Интересният въпрос е защо тази нестабилност не води на Земята до екстремални температури в едната или в другата посока, защо започват събитията “снежна топка Земя” точно тогава, когато това се случва, и защо Земята не остава замръзнала.

Ето един понастоящем популярен отговор на последния въпрос. Ледените слоеве забавят изветряването на скалите. Изветряването е един от бавните процеси, които използват въглеродния диоксид и го превръщат в различни карбонатни минерали. От друга страна дори върху една покрита с лед Земя вулканичната активност би изхвърляла в атмосферата въглероден диоксид. По такъв начин евентуално въглеродният диоксид би се възстановил и парниковият ефект би довел отново до затопляне. Когато ледът се стопи, изветряването се ускорява и количеството на въглеродния диоксид в атмосферата отново намалява. Този кръгов процес на обратна

връзка обаче е много бавен. Наистина, предполага се, че в горещия етап въглеродният диоксид е съставлявал 13 % от атмосферата – 350 пъти повече, отколкото днес.

Предполага се, че в края на тези ледени цикли количеството на кислорода в атмосферата е нараснало от 2 % до 15 % (сега то е 21 %). Може би това е причината, поради която дишащите кислород многоклетъчни организми датират от онези времена. Други твърдят, че тези цикли на “замръзване – пържене” предизвикват огромен еволюционен натиск върху живите организми и водят до възникването на многоклетъчните организми. Би могло и двете тези теории да бъдат верни. (За повече подробности виж отличната книга на Gabrielle Walker *Snowball Earth*.)

Появата на многоклетъчните организми бележи края на Протерозойския еон и началото на настоящия еон – Фанерозоя. Това е краят на нашата история, но, разбира се, историята на Земята не приключва тук.

Сега ние се намираме в Ценозойската ера на Фанерозойския еон. Току що е приключил Холоценът и е започнал Антропоценът, характеризиращ се със значително влияние на човека върху екосистемите и климата. Чрез разрушаване на естествените обиталища човекът стартира един процес на масово унищожаване на видове, който може да се сравнява с края на периода Креда от преди 65 милиона години. Ние също така покачваме равнището на въглеродния диоксид в атмосферата с невероятна скорост. Ако температурата нарасне с един градус, тогава земната температура би била най-гореща за времето от преди 1,35 милиона години, преди да започне настоящият ледников цикъл. Накъде всъщност сме се отправили? Никой не знае.

Изучаването на историята на Земята обаче ще ни помогне да се ориентираме. Ние не можем да провеждаме експерименти, за да пробваме как ще откликне Земята на различни нива на парниковите газове. Компютърните модели са съществени, но доказателствата от снежната топка Земя и от другите случки от земното минало са решаващи за проверката на тези модели. По същия начин, изучавайки миналите масови измирания и възстановяването на Земята от тях, може да ни даде указания за бъдещото биоразнообразие на тази планета.

Превод: Х. Д.