

## Тема 6. Космогонія Сонячної системи

### План

1. Гіпотези виникнення Сонячної системи.
2. Сучасна теорія виникнення Сонячної системи.
3. Формування планет.

#### 1. Гіпотези виникнення Сонячної системи.

Вивченням Сонячної системи займалися різні вчені, починаючи від грецьких філософів до астрономів і фізиків ХХІ століття. Але й сьогодні, коли науково-технічний прогрес дозволяє запускати супутники на Марс, походження Сонячної системи залишається загадкою. Але цілком можливо, що вчені в найближчому майбутньому з'ясують питання, пов'язані з народженням Сонячної системи, тому що за останні три десятиліття прояснилися деякі моменти еволюції зір. Хоча залишаються нерозкритими деталі народження зір з газопилової туманності, але вже уявляється загальна картина того, що з нею відбувається протягом мільярдів років подальшої еволюції.

#### Космогонічні гіпотези

*Космогонія* - розділ астрономії, що вивчає походження й розвиток небесних тіл (Сонця, планет та їхніх супутників, зір, галактик) і їхніх систем. Астрономи спостерігають космічні тіла на різних стадіях розвитку: що утворилися зовсім недавно й у далекому минулому, що швидко "старіють" або майже застигли у своєму розвитку. Зіставляючи численні дані спостережень із фізичними процесами; що можуть відбуватися за різних умов у космічному просторі, вчені намагаються пояснити, як і з чого утворюються небесні тіла. Єдиної, завершеної теорії утворення зір, планет або галактик дотепер не існує. Проблеми, із якими стикалися вчені, часом важко піддаються вирішенню. Наприклад, вирішення питання про походження Землі і Сонячної системи загалом значно ускладнюється тим, що інших подібних систем учені поки не знайшли. Нашу Сонячну систему досі немає з чим порівнювати, хоча подібні їй системи повинні бути досить поширеними, а їхнє виникнення має бути не випадковим явищем, а закономірним.

Сьогодні всі гіпотези про походження Сонячної системи значною мірою ґрунтуються на даних про хімічний склад і вік порід Землі й

інших тіл Сонячної системи. Найбільш точний метод визначення віку порід полягає в підрахунку відношення кількості радіоактивного урану до кількості свинцю, що знаходиться в цій породі. Швидкість такого утворення відома точно, і її неможливо змінити жодним чином. Проби порід показали, що найбільш давні з них нараховують кілька мільярдів років. Земля як якась субстанція виникла, мабуть, трохи раніше, ніж земна кора.

Якщо розглядати різні космогонічні гіпотези, що висувалися протягом останніх двох сторіч, то особливої уваги заслуговують гіпотези німецького філософа Канта й теорія, яку через кілька десятиліть незалежно запропонував французький математик Лаплас. Передумови до створення цих теорій досить цікаві і витримали іспит часом.

Погляди Канта й Лапласа щодо важливих питань різко відрізнялися.

#### ***А) Гіпотеза Канта.***



**Еммануїл Сведенборг**



**Іммануїл Кант**



**П'єр-Симон Лаплас**

Сучасну загальноприйнятту гіпотезу («теорія туманності») щодо формування Сонячної системи першим запропонував Еммануїл Сведенборг у 1734 році. В 1755 році Іммануїл Кант, який був знайомий з роботами Сведенборга, цю теорію доповнив та доробив. Незалежно від них аналогічна теорія була запропонована П'єром-Симоном Лапласом у 1796 році. Кант запропонував свою теорію утворення Сонячної системи, що ґрунтується на законі всесвітнього тяжіння. Філософ виходив з еволюційного розвитку холодної пилової туманності, упродовж якого спочатку виникло центральне масивне

тіло, яке в перспективі мало б стати тим, що ми називаємо Сонцем, а потім планети.

### ***Б) Гіпотеза Лапласа***

Лаплас зі свого боку докладно описав гіпотезу утворення Сонця і планет із туманності, яка вже обертається. Він вважав первісну туманність не пиловою, а газовою, дуже гарячою і з високою швидкістю обертання. Стискаючись під дією сили всесвітнього тяжіння, туманність, унаслідок закону збереження моменту імпульсу, набирала обертів й оберталася чимраз швидше й швидше. Через високу швидкість і великі відцентрові сили, що виникають при швидкому обертанні в екваторіальному поясі, від газоподібного тіла послідовно відокремлювалися кільця. Потім у результаті високотемпературної конденсації з цих тугоплавких "породоутворюючих" елементів утворилися планети. Спираючись на гіпотезу Лапласа, мимоволі напрашується висновок, що планети утворилися раніше, ніж Сонце. Однак, незважаючи на розходження між теоріями Канта і Лапласа, загальною й важливою особливістю є уявлення, що Сонячна система виникла в результаті закономірного розвитку газопилової туманності. Тому цю концепцію прийнято називати "гіпотезою Канта-Лапласа".

### ***Недоліки гіпотези Канта-Лапласа***

Однак ця теорія відповідає не на всі питання. Загальновідомо, що наша Сонячна система складається з восьми планет, різних за розмірами і масою. Лаплас припустив, що обертальний рух - природжена властивість матерії. Труднощі полягають у незвичайному розподілі моменту кількості руху Сонячної системи між центральним тілом - Сонцем - і планетами. Момент імпульсу - одна з найважливіших характеристик будь-якої ізольованої від зовнішнього світу механічної системи. Сонце й планети можна розглянути саме як таку систему. Момент імпульсу можна визначити як "запас обертання" системи. Це обертання складається з орбітального руху планет і обертання навколо осей Сонця і планет. Левина частка моменту кількості руху Сонячної системи зосереджена в орбітальному русі планет-гігантів Юпітера й Сатурна.

З погляду гіпотези Лапласа, це зовсім незрозуміло. В епоху, коли від первісної туманності, що швидко оберталася, відокремилася

кільце, шари туманності, з яких потім у результаті конденсації утворилося Сонце, мали (на одиницю маси) приблизно такий самий момент, як речовина кільця, що відокремилася (кутові швидкості кільця й частини, що залишилася, були приблизно однакові). Через те що маса останнього була значно меншою від основної туманності (прото-сонця), то повний момент кількості руху кільця повинен бути набагато меншим, ніж у протосонця. У гіпотезі Лапласа відсутній який-небудь механізм передачі моменту від протосонця до кільця. Тому протягом усієї подальшої еволюції момент кількості руху протосонця, а потім і Сонця повинен бути набагато більшим, ніж у кільця і планет, що утворилися з них. Але цей висновок суперечить фактичному розподілу імпульсу між Сонцем і планетами.

Для гіпотези Лапласа ці труднощі виявилися нездоланими.

### ***В) Гіпотеза Джинса***



**Джеймс Хопвуд Джинс**

Зупинимося на гіпотезі Джинса, яка поширилася в першій третині минулого століття. Вона цілком протилежна до гіпотези Канта-Лапласа. Якщо остання змальовує утворення планетарних систем як єдиний закономірний процес еволюції від простого до складного, то в гіпотезі Джинса утворення таких систем є справою випадку і становить собою рідкісне явище.

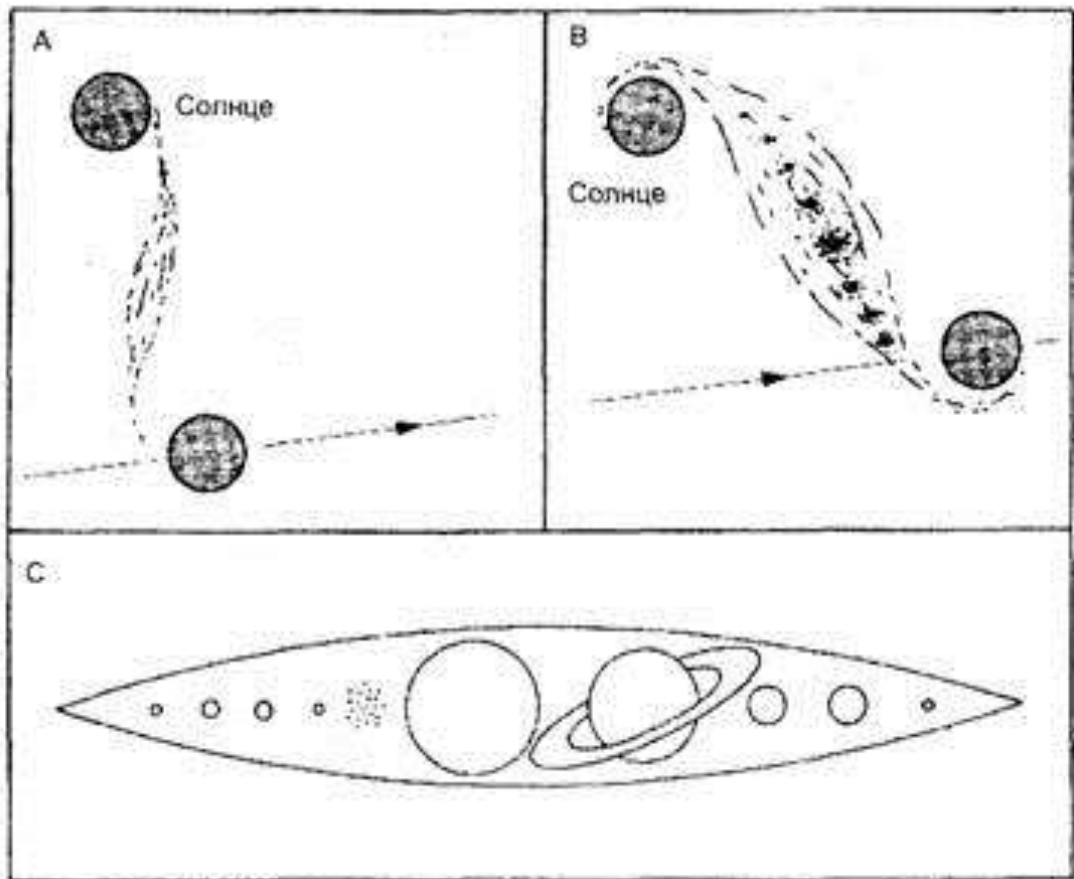


Рис. 1. Приливна теорія Джинса. Зірка проходить поруч із Сонцем, витягаючи з нього речовину (рис. А і В); планети формуються з цього матеріалу (рис. С)

Вихідна матерія, з якої потім утворилися планети, була викинута із Сонця (яке на той час уже було схожим на нинішнє) при випадковому проходженні поблизу нього якоїсь зорі. Це проходження було настільки близьким, що його можна розглядати практично як зіткнення. Завдяки приливним силам, що виникли з боку зорі, яка налетіла на Сонце, із поверхневих шарів Сонця був викинутий струмінь газу. Цей струмінь залишився у сфері притягання Сонця і після того, як зоря віддалилася від Сонця. Потім струмінь сконденсувався й зміг дати початок планетам.

Гіпотеза Джинса припускає, що утворення нашої Сонячної системи, як й інших подібних, малоїмовірне, тому що близьке проходження зір у нашій Галактиці та їхнє зіткнення - явище рідкісне, а точніше, раз на 5 млрд років Сонце має один шанс із десятків мільярдів зіштовхнутися з якою-небудь зорею. Якби гіпотеза Джинса була правильною, число планетарних систем, що утворилися за десять мільярдів років її еволюції, можна було б

перелічити на пальцях. Але планетарних систем насправді безліч, тому цю гіпотезу можна вважати непридатною. І нізвідки не випливає, що викинутий із Сонця струмінь гарячого газу може скондесуватися в планети, тому що, за розрахунками відомих астрофізиків, речовина струменя повинна розсіятися в навколишньому просторі. Крім цього, гіпотеза Джинса не пояснює, чому переважна частина моменту імпульсу Сонячної системи зосереджена в орбітальному русі планет (математичні розрахунки показали, що в рамках цієї гіпотези утворюються планети з вельми маленькими орбітами). Таким чином, космологічна гіпотеза Джинса виявилася безгрунтовною.

На основі гіпотези Джинса Вулфсоном була висунута нова: газовий струмінь, із якого утворилися планети, був викинутий з пухкого об'єкта, що проходив повз Сонце - протозорі, маса якої була порівняно невеликою, але обсяг її майже в 10 разів перевищував радіус земної орбіти. При наближенні протозорі до Сонця під впливом приливних сил поверхня протозоряного згустку повинна деформуватися. Через те що не весь захоплений Сонцем газ зміг конденсуватися в планети, навколо протозоряного згустку мало б утворитися газове середовище, що викликало б його гальмування. При цьому, як відомо, спочатку ексцентрична орбіта поступово (протягом декількох мільйонів років) стане круговою. Звідси, кожен протозоряний згусток еволюціонує в протопланету, а його обертання обумовлюється дією приливних сил, що виходять від Сонця. До речі, цим може пояснюватися і походження супутників планет, які при стисканні відокремлюються від протопланет. Якщо додержуватися цієї гіпотези, то порівняно легко пояснювати утворення великих планет і їхніх супутників (крім планет земної групи). Цією гіпотезою також пояснюється і виникнення зір, що утворюються з міжзоряного газопилового середовища так званими "зоряними асоціаціями" - групами молодих зір. У таких групах, за спостереженнями, спочатку утворюються відносно великі зорі, а потім уже "зоряний дріб'язок", який еволюціонує в карлики.

### ***Г) Гіпотеза Г. Альфвена - О.Ю.Шмідта***

У 1942 році Г. Альфвен висловив гіпотезу, згідно з якою Сонце наштовхнулося на міжзоряну хмару газу, атоми якого, падаючи на



**Ганнес Альфвен**



**Отто Шмідт**

Сонце, іонізувались і стали рухатися по орбітах, що відповідають магнітному полю Сонця. Іонізовані атоми рухалися вздовж ліній магнітного поля Сонця і надходили в певні місця рівноваги екваторіальної площини. У тому випадку, коли атоми зазнавали прискорення в бік Сонця з певними швидкостями та іонізовані на певних відстанях від Сонця, математичний розрахунок показав, що кінцевий розподіл густини іонів повинен відповідати розташуванню зовнішніх планет. Теорія Альвена цікава, але вважається, що вона не може пояснити виникнення внутрішніх планет. Крім того, можливість зустрічі Сонця з газовою хмарою розглядається як малоімовірна

Як продовження гіпотези Альвена в 1943 році радянський математик і фізик О. Шмідт висунув «метеоритну теорію». Відповідно до цієї широко відомої теорії Сонце зустріло й захопило космічну туманність міжзоряних частинок, з яких у результаті зіткнень утворилися планети. Він виходив з передумов двох невирішених питань: «де ж знайшлася у Сонця сила, щоб так далеко відкинути майбутню Землю, і де ця зірка, що проходила повз?». І це питання Шмідт ставив не випадково. Він ніяк не припускав, що цією зіркою був двійник Сонця, нині згаслий і тому не проявляє властивостей зірки. Дотримуючись гіпотези Канта, Шмідт узяв за основу нескінченні скупчення холодного космічного пилу, який утворював безформні згустки газопилових речовин. Кожен згусток

поступово зростав, вбираючи в себе інші уламки і маленькі частинки з міжзоряної туманності, що падали на його поверхню. Шмідт вважав, що лише пізніше почалося коливання й обертання Землі, а також частковий розігрів і розплавлення гірських порід завдяки розпаду радіоактивних елементів. Цікаво, що радіоактивному розпаду елементів Шмідт приписав певну роль у походженні планети, але не приділив ніякої уваги ядерному синтезу її речовини, тобто розглядав якісний склад космічних тіл, які цілком утворилися, а не в поступовому розвитку.

Отже, за Шмідтом планети народилися не з самого Сонця, в чому він мав рацію тільки частково. За наявності високого рівня математичного обґрунтування космогонічна теорія Шмідта повністю оминає питання якісного розвитку матерії.

## **2. Сучасна теорія виникнення Сонячної системи.**

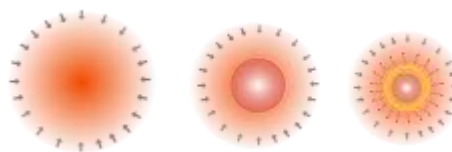
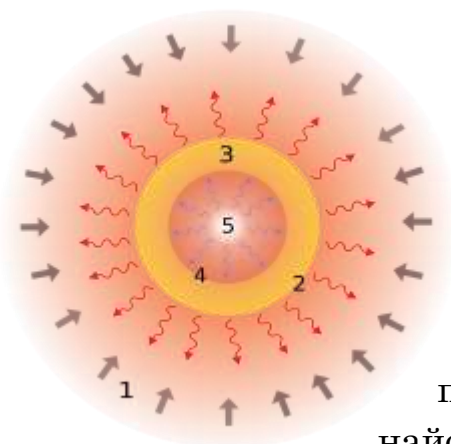
Сонячна система почала формуватися близько 10 млрд років тому й остаточно сформувалась 4,6 млрд років тому завдяки гравітаційному стисканню велетенської молекулярної хмари. Ця початкова хмара була завдовжки приблизно 20 парсек, тобто 65 світлових років, і брала участь у формуванні кількох зір. Хоча спочатку цей процес вважали таким, що не супроводжувався великими викидами енергії, останні дослідження давніх метеоритів виявили в них сліди елементів, які формуються тільки всередині дуже великих зір, що вибухають. Це дозволяє зробити висновок, що Сонце було сформоване серед кількох сусідніх наднових. Ударна хвиля від цих наднових запустила процес формування Сонця шляхом утворення областей високої густини в молекулярній туманності, провокуючи речовину в цих місцях до подальшого стискання.

### **Протозоря**

Газопилова хмара у зоряній туманності не може бути повністю однорідною: у ній є невеликі флуктуації густини. Підвищення густини у хмарі може статися через різноманітні причини. Здебільшого його зумовлює ударна хвиля, яка виникає через зіткнення окремих хмар, спалаху наднової неподалік чи ж потрапляння хмари до спірального рукава галактики. Ці фрагменти



мають розмір 1–5 парсек. За певних умов кожен фрагмент стає центром зореутворення. Стадія перетворення фрагмента газопилової хмари у зорю



головної послідовності називається **протозорею**. За підрахунками вчених у стадії протозорі Сонце перебувало приблизно 30 млн років. Дослідження найстаріших метеоритів показало, що формування Сонця у протозорю почалося 4,568 млрд років тому.

Схематичне зображення колапсу газопилової хмари та утворення протозорі

#### *Структура протозорі:*

1. Оптично прозора газова оболонка у вільному падінні.
2. Несправжня фотосфера, що випромінює переважно в інфрачервоному діапазоні.
3. Непрозора пилогазова оболонка («кокон»).
4. Фронт ударної хвилі.
5. Гідростатично рівноважне ядро.

У процесі формування Сонця з газопилової хмари у протозорю виділяють три основні етапи:

1. Ізотермічний колапс та формування компактного ядра.
2. Акреція протяжної оболонки на сформоване ядро.
3. Повільне стискання ядра після завершення акреції.

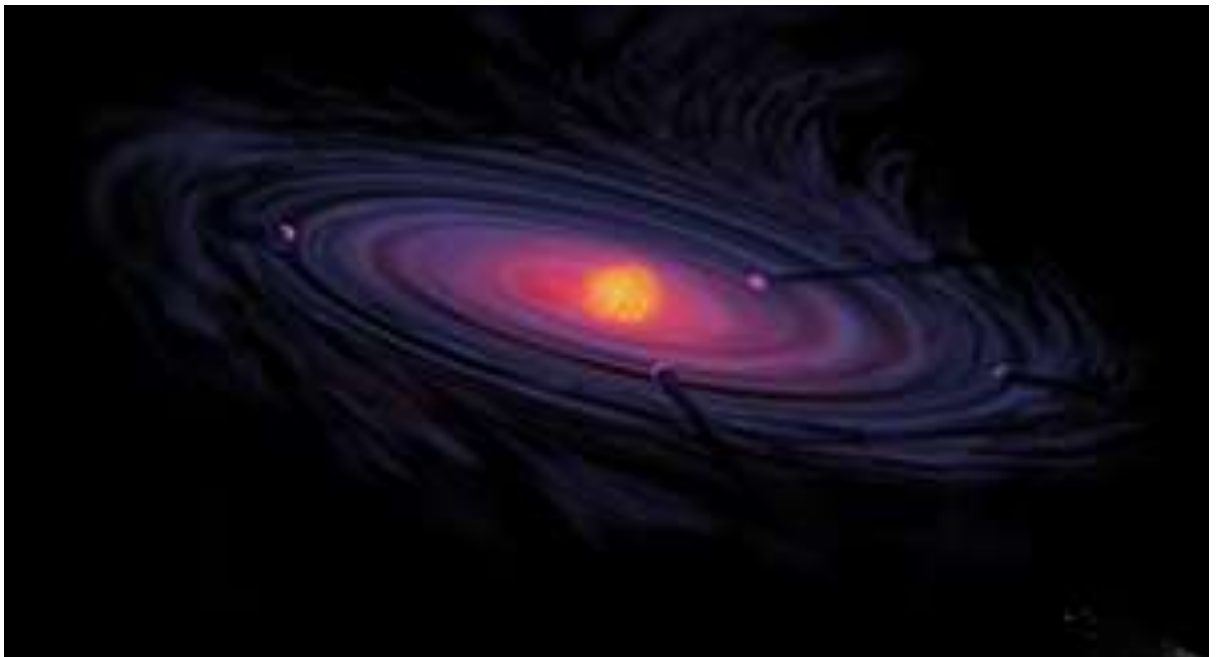
На початку процесу формування протозорі пилові частинки та молекули газу падають до центру фрагмента хмари, потенціальна енергія гравітації переходить у кінетичну, а кінетична внаслідок зіткнень частинок у теплову. Таким чином, значна частина гравітаційної енергії стискання витрачається на нагрівання речовини. Газ і пилинки швидко трансформують цю енергію в інфрачервоне випромінювання, яке вільно залишає газопиловий комплекс. Тому протозорі є потужними джерелами інфрачервоного випромінювання.

У процесі формування ядра зі значно більшою густиною, ніж у навколишній хмарі, протозоря стає непрозорою для власного інфрачервоного випромінювання і температура її надр починає стрімко зростати. Енергія від центральних до зовнішніх зон переноситься шляхом конвекції.

Коли температура ядра досягає кількох мільйонів кельвінів, включаються перші термоядерні реакції «вигорання» літію, берилію, бору. Але газового тиску за таких температур недостатньо для припинення стискання. І тільки через десятки мільйонів років для майбутнього Сонця, коли температура в центрі в процесі стискання досягає приблизно 10 млн. К, починаються термоядерні реакції перетворення водню на гелій з виділенням величезної кількості енергії. Відтепер сила газового тиску, що підтримується високою температурою, зрівноважує сили гравітації, і стискання припиняється. Протозоря досягає стану гравітаційної рівноваги і перетворюється на молоду зорю, яка відповідно до своєї маси і світності займає певне місце на головній послідовності діаграми спектр—світність.

### **3. Формування планет**

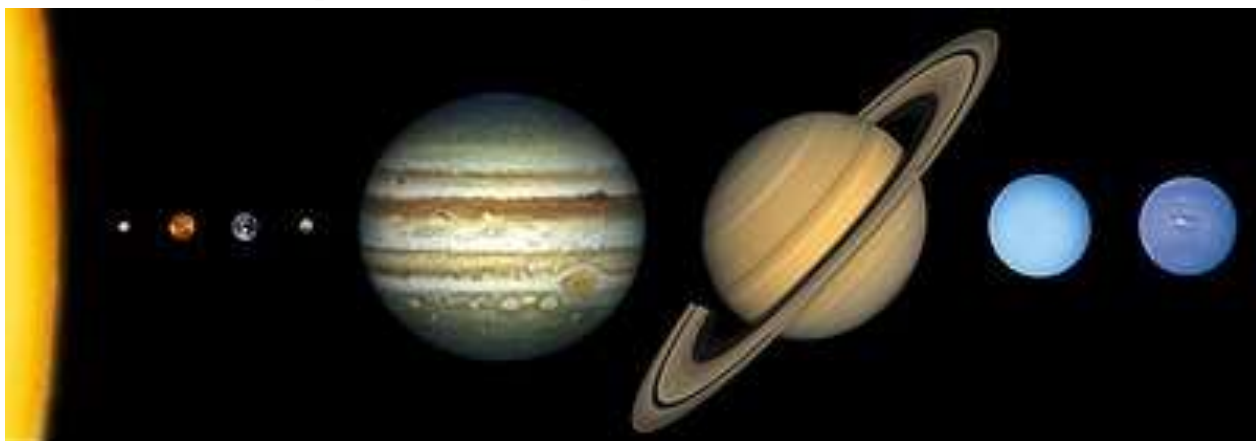
Сучасні дані спостережень фізико-хімічного складу планет і кометно-астероїдних компонентів дозволяють запропонувати наступний найімовірніший сценарій їх утворення в процесі формування Сонця і самої Сонячної системи.



**Рис.4 Протопланетний диск у період формування планет**

Численні розрахунки і комп'ютерні експерименти дозволяють зробити висновок про те, що на фазі формування ядра протозорі зовнішні області газопилової хмари мають складну багатозонову структуру.

Насамперед, в області ядра виникла зона акреції навколишньої речовини на центральне утворення, що призвело до збільшення його маси. Виділена в результаті стиснення ядра енергія сформувала область сильної іонізації, що розширювалася до периферії хмари. Під дією випромінювання речовина «видулася» до периферії і зібралася в щільну оболонку — пиловий кокон, що простягся аж до зовнішньої межі хмари. Відносно слабке обертання протозоряної хмари на початку стиснення у міру формування щільної центральної зони пришвидшилось і призвело до сплюснення всієї системи в тороїдальне утворення.



**Рис.5. Планети Сонячної системи (масштаб не збережений)**

Комп'ютерне моделювання дозволяє виділити кілька характерних етапів цього процесу. На першій фазі баланс між гравітацією, тиском і обертанням речовини призвів до утворення спочатку товстого, а потім все тоншого диску. Далі в диску відбулася фрагментація речовини на згустки пилу. Через приблизно мільйон років пилові згустки злипаються в компактні тіла астероїдних розмірів з близьким до них фізико-хімічним складом. Після цього приблизно ще 100 млн років рій астероїдів відчував інтенсивне переміщення, що супроводжувалося дробленням більших об'єктів і об'єднанням (злипанням) дрібних. На цій фазі, власне, і формуються зародки планет земної групи — Меркурія, Венери, Марса і Землі. Потім приблизно ще за 200 млн років сформувалися планети групи Юпітера, увібравши в себе газ, що не увійшов до

менш масивних планети земної групи. І, нарешті, ще через 1 млрд років утворюється найвіддаленіша від Сонця планета — Нептун і екзопланети з поясу Койпера, завершивши процес формування сонячної системи.

З цього сценарію стає зрозуміло, що астероїди і комети — це залишки рою протопланетних тіл, причому астероїди — це кам'янисті утворення внутрішньої зони, що породила планети земної групи, а комети — це кам'яно-крижані утворення, генетично пов'язані з зоною планет-гігантів. Але найпримітніше, що в процесі формування планет групи Юпітера планети-гіганти Юпітер і Сатурн виконали роль своєрідних «чистильників» сонячної системи, своїм гравітаційним полем викинувши малі протопланетні згустки на далеку периферію сонячної системи. Таким чином, сонячна система виявилася оточена роєм кам'яно-крижаних тіл, що простягається на відстані від 20000 до 200000 радіусів орбіт Землі навколо Сонця.