دکتر تقی عدالتی
دانشگاه فردوسی مشهد

مدلی برای تشکیل منظومهٔ شمسی

مدل مورد نظر برای این منظور مدل «سحابی» است بدین ترتیب که برای تشکیل خورشید و سیارات وجود یک ابر از گاز و غبار بین سیاره‌ای ضروری است. با وجودی که جزئیات این مدل هنوز مبهم است، اما سیمای کلی آن قابل قبول است. در این مقاله ما بر روی دو جنبه مهم این مدل بحث می‌کنیم:

الف-دینامیک

منظومه شمسی برحسب خواص دینامیکی اش ساختمان منظمی دارد، به‌طوری که اگر از بالای قطب شمال به خورشید نگاه کنیم قواعد زیر را در منظومه شمسی درخواهیم یافت:

۱ ـ سیارات در جهت خلاف عقربه های ساعت در اطراف خورشید می چرخند و خورشید نیز در همان جهت به دور خود می چرخد.

۲ ـ به استثنای عطارد و پلوتون، اکثر سیارات دارای سطوح چرخشی اند که خیلی جزئی به سطوح گرفتگی تمایل دارند و مسیرهای چرخش آنها تقریباً دوگانه است.

۳ ـ به استثنای عطارد و پلوتون، سیارات در مسیری می چرخند که از نظر شکل بیشتر به دایره نزدیک است.

٤ ـ به استثنای زهره و اورانوس، سیارات در خلاف جهت عقربه های ساعت به دور

خود می چرخند یعنی در همان جهت حرکت چرخشی به دور خورشید.

۵ ـ فاصلهٔ مسیر چرخش سیارات از خورشید از یک قاعده منظم تبعیت می‌کند،بدین ترتیب که فاصله هر سیاره تا خورشید تقریباً دو برابر فاصلهٔ آن از سیاره قبلی خودش است.

۶ ـ اکثر اقمار در همان جهتی می چرخند که سیاره مادر به دور خود می چرخد و محل آنها در نزدیکی سطوح استوایی سیارات مادر قرار دارد.

۷ ـ فواصل مسیرهای چرخشی برخی از اقمار از یک قانون منظم فاصله گذاری تبعیت می‌کند.

۸ ـ سیارات مجموعاً ممنتم زاویه‌ای بیشتری از خورشید را دارا هستند.

۹ ـ مسیر چرخش ستاره‌های دنباله‌دار با پریود طولانی در همه جهات و زوایا است در حالی که سیارات، اقمار، آستروئیدها و ستاره‌های دنباله‌دار با پریود کوتاه دارای مسیرهای دوگانه‌اند.

۱۰ ـ تا کنون سه سیاره مشتری مانند شناخته شده‌اند که دارای حلقه هستند.

لزوم وجود مدل سحابی این است که خورشید و سپس سیارات از یک ابر ناشی از مواد بین سیاره‌ای تشکیل شده باشند. خورشید در مرکز یک ابر مسطح تشکیل می شود در حالی که سیارات از سطح صفحه ابر رشد می‌کنند. این مسأله شامل دو بخش است:

۱ ـ چگونگی تشکیل منظومه شمسی مسطح ۲ ـ چگونگی ایجاد و رشد سیارات از میان ابر

برای بررسی قسمت اوّل با توجه به بقای اندازه حرکت زاویه‌ای وقتی یک جرم سماوی می چرخد تا زمانی که هیچ گشتاوری بر آن اثر نکند به چرخش ادامه می دهد. اندازه حرکت زاویه‌ای آن بستگی به جرم و اندازه و توسعه جسم دارد. اگر جسم سماوی به خودی خود تغییر کند(مثلاً، اگر توسط نیروی ثقل کشیده شود) طبیعةً سریعتر به دور خود خواهد چرخید تا اندازه حرکت زاویه‌ای اش را ثابت نگه دارد. به عنوان یک نتیجه طبیعی از همراهی با اسپین(چرخش)، ما مسیر چرخش‌سیارات را دریک قرص‌نازک قرار می دهیم و چرخش خورشید به دور خود را نیز در همان جهتی قرار می دهیم که سیارات می‌گردند.

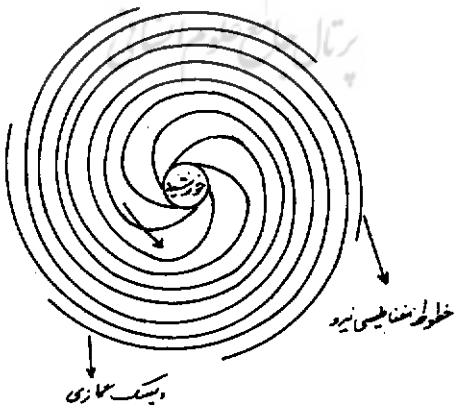
اگرچه خورشید ۹۹ درصد جرم سیستم را در بردارد ولی کمتر از یک درصد اندازه حرکت زاویه‌ای را داراست. در حالی که سیارات مشتری مانند ۹۹ درصد کل مقدار را در بردارند.

یک مدل سحابی قابل قبول محتاج فرایندی برای توجیه، توزیع فعلی اندازه حرکت زاویه‌ای می باشد. فرضیهٔ مورد مطالعه در این باره برخورد میدانهای مغناطیسی و ذرات باردار را برای تجدید شکل توزیع اندازه حرکت زاویه‌ای ضروری و لازم می داند. راه حل اساسی آن است که اسپین قسمت مرکزی سحابه کاهش یافته و به نواحی خارجی منتقل شود.

وقتی ذرات باردار در طول خطوط مغناطیسی نیرو دارای حرکت مار پیچی باشند، با میدانهای مغناطیسی بر هم کنش متقابل خواهند داشت. به محض تشکیل خورشید، دمای نواحی داخلی سحابه بالا رفته و گازیونیزه می شود و خطوط میدان مغناطیسی، ذرات باردار را به دام می اندازند. وقتی خورشید به دور خود می چرخد، خطوط میدان مغناطیسی را با خود حمل می‌کند. خطوط میدان مغناطیسی در این حالت در امتداد ذرات باردار کشیده می شوند و در عین حال متوالیاً با گاز و غبار بر هم کنش دارند و در امتداد باقیمانده آنها کشیده می شوند. بنابراین، میدان مغناطیسی در اطراف مواد درون سحابه نزدیک خورشید حرکت مار پیچی دارد. در همان زمان، درون سحابه در مقابل چرخش به دور خود، مقاومت می‌کند و این کشش روی خطوط میدان مغناطیسی تأثیر گذاشته و آنها را به حالت مار پیچ در می آورد (شکل ۱)

ب ـ جنبهٔ شیمی

تشکیل یک سیاره مستلزم یک فرآیند چند مرحله‌ای است. ابتدا ذرات(دانه های) جامد در روی گازهای سحابه متراکم می شوند، سپس این ذرات با هم یکی شده و اجرام



شکل ۱

سماوی بزرگ به نام ریزسیاره(Planetesimal) را تشکیل می دهند. آنگاه این اجرام با هم تصادم کرده و برای تشکیل پیش سیاره(Protoplanet) با هم یکی می شوند تا سیارات امروزی تکامل یابند. ترکیبات شیمیایی سیارات توسط فرآیندی به نام تسلسل تراکم(Consendation Sequence) بر اساس تراکم دانه ها تعیین می شود. ایده اولیه تسلسل تراکم این است که مرکز سحابه باید دارای دمایی برابر چندین هزار درجه کلوین بوده باشد(در این دما دانه های جامد حتی ترکیبات آهن و سیلیکات ها نمی توانند متراکم شوند). تراکم مواد به صورت دانه های جدید به میزان دما بستگی دارد، بدین ترتیب که فقط در دمای زیر $۲۰۰۰^{\circ}k$ است که دانه های ساخته شده از مواد خاکی، متراکم می شوند و در دمای زیر $۲۷۳^{\circ}k$ است که دانه های مواد خاکی و یخی می توانند شکل بگیرند. عموماً، گازهای قابل دسترسی و جامدات موجود از نظر شیمیایی در دماهای متفاوتی واکنش نشان می دهند و اجسام مرکب متنوّعی را تولید می‌کنند. چگالی و ترکیبات سیارات را با تسلسل تراکم می توان مشخص کرد. اگر دمای سحابه از مرکز به طرف بیرون به سرعت کاهش یابد دماهای مختلف در فواصل متفاوت از خورشید امکان تراکم مواد شیمیایی مختلفی را به وجود می آورند که باعث تشکیل دانه های سازنده پیش سیارات می شود. حال اگر ماده به دلیل بالا بودن دما متراکم نشود، آن ماده دیگر در پیش سیاره موجود نخواهد بود.

به طور کلی برای آن که بتوان دلیل موجهی برای ترکیبات شیمیایی شناخته شده در سیارات ارائه داد حداقل وجود یک دمای معین برای تسلسل تراکم لازم است. این دماهای تقریبی برای سیارات مختلف عبارتند از: $۱۴۰۰^{\circ}k$ برای عطارد، $۹۰۰^{\circ}k$ برای زهره، $۶۰۰^{\circ}k$ برای زمین، $۴۰۰^{\circ}k$ برای مریخ و $۲۰۰^{\circ}k$ برای سیاره مشتری. باید توجه داشت که در یک فاصله معین از خورشید تفاوت دما بستگی به زمان دارد و لذا این مقادیر کمترین میزان به دست آمده در خلال تشکیل سیارات می باشند.

ج - نموّ

به محض تراکم، دانه ها برای تشکیل جرمهای بزرگتر به هم می چسبند. فرآیند نمو از نظر فیزیکی به دو صورت مختلف انجام می‌گیرد:

۱ - رشد توسط برخورد و چسبیدن بر طبق سطح مقطع.

۲ - رشد به وسیله برخورد توسط نیروی جاذبه ثقلی، با یک سطح مقطع نیروی ثقلی.

شکل ساده سطح مقطع برای یک دانه عبارتست از πR^2 که R شعاع دانه کروی است. می توان سطح مقطع نیروی ثقلی (یا پارامتر برخورد) را به روش زیر معین کرد:

یک ذره آزمایشی که با سرعت V_∞ به دانه‌ای به شعاع R نزدیک می شود را در نظر بگیرید. هنگامی‌که ذره آزمایشی به دانه ضربه می زند، دارای سرعت V است. اگر S بیشترین فاصله از مرکز دانه باشد(شکل ۲)، وقتی ذره آزمایشی از مکان S>>R شروع به حرکت می‌کند انرژی پتانسیل در S صفر است. طبق اصل بقای اندازه حرکت زاویه‌ای داریم:

$$VR = V_\infty S$$

همچنین طبق اصل بقاء انرژی نیز داریم:

$$mV_\infty^2/2 = mV^2/2 - Gm M/R$$

که m جرم ذره آزمایشی و M جرم دانه است. پس

$$V^2/2 = V_\infty^2/2 + GM/R$$
$$V = (V_\infty^2 + 2GM/R)^{1/2}$$

با جانشین کردن این عبارت برای V با توجه به معادله بقاءِ اندازه حرکت داریم:

$$V_\infty S = (V_\infty^2 + 2GM/R)^{1/2} R$$

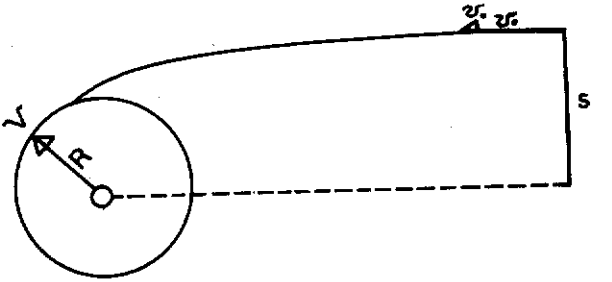
یا

$$S = \left(\frac{R}{V_\infty}\right)(V_\infty^2 + 2GM/R)^{1/2}$$
$$= (R^2 + 2GMR/V_\infty^2)^{1/2}$$

معادلهٔ فوق پارامتر برخورد جاذبه ثقلی می باشد که عبارت است از مجموع یک عبارت هندسی و یک عبارت نیروی ثقلی.

با توجه به این که ذرات توسط افزایش موادی با دانسیته یکسان رشد می‌کنند، داریم:

$$\frac{dM}{dt} = \frac{d}{dt}\left[\left(\frac{4}{3}\right)\pi\varphi R^3\right] = 4\pi\varphi R^2\left(\frac{dR}{dt}\right)$$



شکل ۲. هندسه برخوردهای ذرّه.

با فرض آن که جاذبه ثقلی بر رشد غالب باشد، ملاحظه می‌کنیم که چگونه یک ذره در حین حرکت در میان گروهی از ذرات دیگر رشد می‌کند. سرعت برخورد به سرعت، سطح مقطع و عدد دانسیته سایر ذرات بستگی دارد، لذا:

$$\frac{dM}{dt} = \text{سطح مقطع} \times \text{دانسیته ذره} \times \text{سرعت}$$

$$= V.\,\varphi.\,\pi\,S^2$$
$$= V.\,\varphi.\,\pi\,(R^2 + 2GMR/V.^2)$$
$$= V.\,\varphi.\,\pi\,R^2 + 2\,\pi\,\varphi.\,GMR/V.$$

حال اگر عبارت اوّل(هندسی) را برای حالتی که سطح مقطع نیروی ثقلی غالب است حذف کنیم، خواهیم داشت:

$$\frac{dM}{dt} = (2\,\pi\,G\,\varphi./V.)MR$$
$$= (2\,\pi\,G\,\varphi.^2/V.)\,[\,(\tfrac{4}{3})\,\pi\,R^3\,]\,R$$
$$\frac{dM}{dt} \propto R^4$$ یا

ذرات همزمان با رشد، مواد را نیز با یک سرعت بسیار زیاد و شتابدار افزایش می دهند. در اینجا این سئوال مطرح می شود که در چه اندازه‌ای از ذره، سطح مقطع جاذبه ثقلی غالب می شود؟ در جواب باید بگوئیم که این امر زمانی رخ می دهد که، $S^2=2R^2$ ، یعنی:

$$S = V2\ R = (R^2 + 2GMR / V.^2)^{1/2}$$

$$2R^2 = R^2 + 2GMR / V.^2$$

$$R^2 = 2GMR / V.^2$$ لذا

$$R = 2GM / V.^2 = (2G / V.^2)(\frac{4}{3})(\pi \varphi R^3)$$ و

$$R = (3V.^2 / 8\pi G\varphi)^{1/2}$$ یا

که در اینجا $V.$ سرعت نسبی ذرات و φ دانسیته آنها است. به ازاء $V. = 1^{km}/_{sec}$ و $P=۳۰۰ kg/m^3$ داریم:

$$R \simeq 1000\ km$$

شیئی بزرگتر از این اندازه احتمالاً یک ریزسیاره است.
بر این اساس می توان به تشکیل بعضی از سیارات به ترتیب زیر اشاره کرد:

۱ ـ تشکیل زحل و مشتری

مشتری و زحل ممکن است با روشی غیر از آنچه که به صورت مدل نموّ ریزسیارات توضیح داده شد شکل گرفته باشند. در قیاس با تولد یک ستاره، مشتری و زحل ممکن است به جای نموّ ریزسیارات، توسط نیروی ثقل از گلوله های منفرد بزرگ درون سحابه تراکم یافته باشند. اگر چنین باشد، تکامل یک پیش-مشتری و پیش-زحل با تکامل پیش-ستاره ها ارتباط دارد. در حقیقت ترکیبات شیمیایی مشتری و زحل با ترکیبات ستارگان کاملاً نزدیک و هماهنگ است و تفاوت بین آنها از آن جاییست که جرم مشتری و زحل به قدری نیست که دمای کافی برای مشتعل ساختن واکنش های لازم فراهم شود و دمایی که آنها کسب می کنند از تبدیل انرژی پتانسیل نیروی ثقل به گرما در طول برهم کنش نیروی ثقل حاصل می گردد.

هارولد گرابوسک و همکارانش در مورد تکامل مشتری از یک آغاز داغ، پس از آن که پیش-مشتری تشکیل شده بود، محاسبات تئوری خود را انجام دادند. آنها مخلوطی از مواد خورشیدی(۷۴ درصد هیدروژن، ۲۴ درصد هلیم، ۲ درصد از هر چیز دیگر) را در نظر گرفته و با یک پیش مشتری به اندازه ۱۶ برابر مشتری فعلی، با دمای مرکزی $۱۶۰۰۰^{\circ}k$ و دمای

سطحی 10^{3} k و درخششی تقریباً 10^{-2} برابردرخشش فعلی خورشید، محاسباتشان را شروع کردند، به این صورت که ابتدا نیروی ثقل پیش-مشتری رامضمحل می سازد(درزمانی که درون سیاره به حالت مایع است و مایعات به سختی به هم فشرده می شوند). در ۴/۵بیلیون سال آینده، مشتری تا اندازه فعلی اش منقبض می شود و چون گرمای حاصل از تشکیل خود را با سرعتی معادل $1/8\times10^{-9}$ انرژی تابندگی به فضا می دهد، لذا دمای مرکزی اش تا 3000° k پائین می آید.

این مدلها نشان می دهند که اندکی پس از تشکیل، پیش-مشتری از یک مرحله کوتاه ولی پردرخشش عبور می‌کند. این درخشش زیاد اولیه ممکن است دلیل یک تسلسل تراکم باشد که در این صورت برای ما روشن خواهد شد که چرا دانسیته اقمار گالیله‌ای با دور شدن از مشتری کاهش می یابد. کاهش دانسیته دلیل این است که کالیستو نسبت به آیو مواد یخی بیشتری دارد و در فاصله نزدیکتر به آیو(قمر مشتری) نسبت به فاصله کالیستو(قمر دیگر مشتری) یخ کمتری متراکم می یابد. اگر مشتری در زمان تشکیل اقمار داغ بود، اقمار داخلیتر به اندازه اقمار خارجیتر مواد یخی را جمع آوری نمی‌کردند. لذا ممکن است تراکم و نمو اقمار گالیله ای مشابه تراکم و نمو سیارات خاکی باشد.

جیمز پولاک و همکارانش مدلهای مشابهی را برای تکامل ابتدایی زحل پیشنهاد کردند. در اینجا نیز تسلسل شبیه وضعیت سیاره مشتری بود. مدلهای آنها ۴/۵ بیلیون سال پیش با سیاره‌ای به اندازهٔ ده برابر اندازه فعلی سیاره با ترکیبات خورشیدی و صخره‌ای شروع می شود. نیروی ثقل به سرعت، سیاره را متراکم می‌کند. بر این اساس در حدود یک میلیون سال، زحل حدود دو برابر اندازه فعلی و دمای مرکزاش برابر 22000° k بوده است. این دمای زیاد فشار داخلی را بالا و برهم کنش نیروی ثقل را پائین آورده و سپس ۴/۵ بیلیون سال طول کشیده تا به زحل اندازه کنونیش منقبض شده است.

۲ ـ تشکیل آسترویدها، شهابسنگها و ستاره‌های دنباله‌دار

بر اساس تحقیقات انجام شده در سالهای اخیر آسترویدها(سیارکها) ریزسیاراتی هستند که رشدشان برای تشکیل یک سیاره کافی نبوده است. اگر تنوع ترکیبات را در سراسر کمربند آستروئیدی مورد نظر قرار دهیم متوجه می شویم که بُعد داخلیتر که در بر گیرنده آسترویدهایی از نوع S است و لبه خارجیتر از نوع C ، تفاوتهای آلبدو(نسبت

انرژی تابشی به انرژی انعکاسی) کاملاً با تسلسل تراکم هماهنگی دارد. حال اگر مقدار نوع C بیشتر از مقدار نوع S باشد، نشانه این است که دماهای کافی برای تراکم مواد سیلیکاتی در درون کمربند کم بوده است. برای انجام چنین عملی باید مواد کربن دار دارای دمای بالا و بیش از اندازه‌ای باشد، تا هر دو نوع مواد متراکم شوند و امکان وجود در ریزسیارات را داشته باشند. جواب این است که چرا آنها یک سیاره تشکیل ندادند؟ احتمالاً به دلیل اثر نیروی جزر و مد پیش-مشتری و کمک نیروهای جزر و مدی خورشیدی تغییر مسیر چرخش ریزسیارات از حالت دایره‌ای به بیضوی بوده است که باعث شده بعضی از آنها بر روی بعضی دیگر سقوط کرده و آنها را به قطعات کوچکتری تقسیم کنند که برخی از این تکه‌ها به درون قسمت داخلی منظومه شمسی پرتاب شود و نهایتاً بر روی سطوح عطارد، زهره، ماه، زمین و مریخ افتاده‌اند.

چگونه شهابسنگها بر روی مدل سحابی جای می‌گیرند؟ ویژگیهای شهابسنگهای کندرایتی نشان‌دهنده تبعیت آنها از مدل تراکم است و ترکیب شیمیایی و ساختمان مخلوط نشده آنها نشان می دهد که آنها منشأ مواد تراکم در سحابه هستند. بدین صورت که آشفتگی درون سحابه ممکن است باعث ایجاد موجهایی ناگهانی شده باشد و به سرعت دانه‌ها را ذوب کرده‌اند که این قطرات پس از عبور منجمد شده و در نتیجه کندرولها تشکیل شده‌اند. کندرولها ذراتی هستند که اکثر آنها در دماهای حدود $۶۰۰^{\circ}k$ متراکم می شوند(بر طبق تسلسل تراکم، این محدوده موادی مشابه آنچه که زمین را می سازند، تولید می‌کند). حدود یک میلیون سال پس از شکل گیری، تشعشعات رادیو اکتیو برخی از ریزسیارات را مجدداً گرم و آنها را تا حدودی ذوب کرده و اجازه داده تا مواد مذاب به‌صورت هسته‌های آهنی و پوششهای سنگی تغییر کنند. ریزسیاراتی که به شکل یک پیش سیاره جمع نشده‌اند احتمالاً به‌صورت اجرام سماوی منشأ شهابسنگ شده‌اند که این اجرام بعدها به علت تصادم تجزیه می شوند.

اما برای سایر ریزسیارات چه اتفاقی می افتد؟ برخی ممکن است در سرعت‌های زیاد با ریزسیارات دیگر برخورد و به قطعات کوچکتری تقسیم شده باشند. تعداد کمی هم ممکن است به علت نزدیکی زیاد به یک پیش‌سیاره در مسیر چرخشی آن به‌صورت یک قمر درآیند.

ریزسیارات نزدیک سیارات مشتری مانند اغلب مواد یخی خواهند بود. اینها ممکن است هسته ستاره‌های دنباله‌دار را تشکیل داده باشند. این اجرام سماوی یخ زده ممکن است بعدها توسط نیروی ثقل به درون ابر اورت(محل سرچشمه گرفتن ستارگان دنباله‌دار)

هدایت شده باشند. برطبق تسلسل تراکم انتظار داریم که اجرام سماوی شکل گرفته در نزدیکی سیارات مشتری مانند دارای ترکیب یخی باشند. ترکیبات حقیقی اورانوس و نپتون(به‌طور تخمینی) عبارتند از ۱۰ تا ۱۵ درصد مواد خورشیدی، ۲۰ تا ۲۵ درصد مواد خاکی و ۶۰ تا ۷۰ درصد مواد یخی. اعتقاد بر این است که ستاره‌های دنباله‌دار نیز تقریباً همین درصدهای نسبی از مواد مختلف را دارا می باشند(شاید از مواد خورشیدی و خاکی کمی کمتر دارا باشند).

۳ـ تشکیل زمین و ماه

با توجه به این که ماه یک جرم سماوی ساده‌تر و اولیه‌تری نسبت به زمین است، از تاریخ تشکیل آن اطلاع بهتری داریم ولی از نحوه تشکیل آن، خیر. کوشش ها و تحقیقات مربوط به کشف تئوری توضیح شکل گیری ماه معمولاً در سه طبقه قرار گرفته‌اند: ۱ـ تسخیر، ۲ـ انشقاق و ۳ـ نمو مضاعف. در مدل تسخیر، ماه بر اساس مدل نمو در فاصله‌ای از زمین شکل می‌گیرد و سپس به وسیله نیروی جاذبه زمین تسخیر می شود. در مدل انشقاق ساده: زمین در حالت شکل‌پذیری، با چرخش سریع به دور خود، قسمت بزرگی از پوشش خود را به بیرون پرتاب می‌کند(درست پس از آن که هسته‌اش تشکیل شد)، این تکه بعداً سرد و به ماه تبدیل می شود. مدل نموّ مضاعف تشکیل زمین و ماه را به عنوان واقعه‌ای کمابیش همزمان از قسمت مشابهی از سحابه خورشیدی بیان می‌کند. هر مدل نقاط ضعف و قوت متفاوتی دارد و دانشمندان ستاره‌شناس اکنون احساس می‌کنند که باید بجای ارائه یک جمله در مورد تسلسل شکل گیری، بر روی برخی جنبه‌های بسیاری از فرآیندهایی که حقیقتاً رخ می دهند، تأکید کنند.

امروزه مدل تسخیر تقریباً منسوخ شده است. این مدل بیشتر به تفاوت ترکیبات شیمیایی زمین و ماه توجه دارد. بر اساس این مدل(کمبود آب و آهن و فراوانی اورانیم و عناصر نادر زمینی در ماه کاملاً محسوس است) این تشابه نشان‌دهنده آن است که آنها احتمالاً در نزدیکی سحابه خورشیدی شکل گرفته‌اند. همچنین، دینامیک تسخیر مستلزم شرایط بسیار ویژه‌ای است که امکان ایجاد آن مشکل است(چون وجود یک جرم عظیم سماوی ثالث در حین تسخیر ضروری است تا بقای اندازه حرکت را تضمین کند).

در مقابل، مدل انشقاق بر روی شباهتهای بین زمین و ماه تکیه می‌کند(به‌ویژه، ترکیب

شیمیایی پوشش زمین). اما، برای مواد فرّار و عناصر اصلی به تفاوتهای اساسی قائل است. به خصوص، نسبت منیزیم به سیلیکات برای ماه با مقادیر لازم برای پوشش زمین متفاوت است. عناصر مقاوم(مانند آلومینیم و کلسیم) در ماه حدود دو برابر غنی شده و عناصر فرّار تهی شده‌اند و نسبت نیکل به آهن کمتر از آن است که از پوشش زمین مشتق شده باشد.

مدل نموّ مضاعف بسیاری از این مسایل را بررسی می‌کند. زمین و ماه به صورت نموّ در ناحیه مشابه و یکسانی از سحابه خورشیدی از مواد حول و حوش، رشد می‌کنند. برخی مواد به علّت برخوردهای غیر عادی از جرم سماوی نمو یافته و به بیرون پرتاب می شوند. زمین بیشتر از آهن نموّ می یابد، که به درون هسته سقوط‌می‌کند و درابتدای‌تسلسل شکل می گیرد.

اخیراً مدل دیگری برای توضیح منشأ زمین و ماه ارائه داده‌اند که بر اساس این مدل برای ایجاد زمین و ماه برخورد یک جسم سماوی به اندازه مریخ با زمین جوان ضروری است. انرژی این برخورد عظیم بخش بزرگی از جرم زمین و جسم سماوی برخورد کننده را به درون دیسکی از مواد در اطراف زمین تزریق می‌کند که باعث نموّ ماه از آن می شود. به‌منظور توجیه اندازه حرکت زاویه ای برای سیستم زمین-ماه، جرم سماوی ثالث مجبور است با سرعتی معادل ۱۰Km/sec به‌طور مماس با زمین برخورد کند. این ایده، مدل برخورد عظیم نامیده شده است که تا کنون هم با هیچ اعتراض جدی مواجه نشده و با آن که جزئیات آن محتاج بررسیهای بیشتری است، لکن بسیار امیدوار کننده به نظر می رسد.

حال مشخصاً به زمین باز می‌گردیم. پس از دوران نموّ(که ممکن است فقط چند میلیون سال طول کشیده باشد) زمین یک سیاره آبله گون(یک سطح با حفره‌هایی نظیر بلندیهای ماه) متشکل از مواد تقریباً یکسانی بوده که جوّ آن عمدةً از هیدروژن تشکیل شده و سپس گرمای رادیو اکتیویته قسمتهای درونی آن را گرم کرد بدین ترتیب هسته تشکیل شده است. این گرما گاز قسمتهای درونی را زدوده و باعث شده تا جوّی غنی از «آب، دی اکسید کربن، متان و آمونیاک» ایجاد شود. پس از آن وقتی سطح زمین به اندازه کافی خنک شده، بارانهای شدیدی باعث تشکیل اقیانوسها شده‌اند و حدود یک بیلیون سال پس از تشکیل طبقات مسطح، پوسته که سرد و نازک شده شروع به تغییر شکل کرده است و بستر اقیانوسها اکثراً پر شده‌اند. حیات توسعه یافت و اتمسفر به آنچه که امروز داریم تغییر داده است و حدود ۲۰۰ میلیون سال پیش، قاره‌ها تجزیه و توسط طبقات مسطح به موقعیتهایی که اکنون می بینیم کشیده شده‌اند.