

## علت مهاجرت سیارات

دکتر راهوار

آریانا سیف اللهی 402100837 – نرگس صفری 402100872

در مراحل آغازین تشکیل منظومه‌های سیاره‌ای، دیسکی از گاز و غبار به نام دیسک پیش ستاره ای (protoplanetary disk) در اطراف ستاره‌ی جوان شکل می‌گیرد. درون این دیسک، ذرات غبار به تدریج به هم چسبیده و اجرام بزرگ‌تری می‌سازند که نهایتاً به سیارات اولیه (protoplanets) تبدیل می‌شوند. اما موقعیت مداری سیارات در این مرحله ثابت نمی‌ماند. مشاهدات منظومه‌های فراخورشیدی (exoplanetary systems) نشان داده‌اند که بسیاری از سیارات بزرگ، به‌ویژه مشتری‌های داغ (Hot Jupiters)، در فاصله‌های بسیار نزدیک به ستاره قرار دارند، در حالی که بر اساس مدل‌های تشکیل سیاره، این اجرام باید در فاصله‌های بسیار دورتری شکل گرفته باشند. این پدیده با مفهوم مهاجرت سیاره ای توضیح داده می‌شود: یعنی جابه‌جایی مداری سیارات در اثر اندرکنش‌های گرانشی با گاز یا اجرام دیگر دیسک.

### ۱. مهاجرت ناشی از اندرکنش با دیسک گازی

وقتی یک سیاره درون دیسک گازی در حال چرخش قرار دارد، گرانش سیاره موجب ایجاد امواج چگالی (density waves) در دیسک می‌شود. این امواج، در دو ناحیه‌ی داخلی (inner disk) و خارجی (outer disk) نسبت به مدار سیاره، شکل می‌گیرند و هرکدام گشتاور گرانشی مشخصی بر سیاره اعمال می‌کنند.

موج‌های ناحیه‌ی داخلی تمایل دارند سیاره را به بیرون هل دهند.

موج‌های ناحیه‌ی بیرونی تمایل دارند سیاره را به سمت داخل بکشند.

در حالت کلی، گشتاور ناشی از موج‌های بیرونی کمی قوی‌تر است، بنابراین نیروی خالص باعث کاهش تدریجی فاصله‌ی مداری و در نتیجه مهاجرت به سمت ستاره می‌شود.

### الف) مهاجرت نوع ۱ (Type I Migration)

برای سیارات کوچک‌تر (جرم کمتر از حدود جرم نپتون)، که نمی‌توانند شکافی در دیسک ایجاد کنند، این نوع مهاجرت اتفاق می‌افتد. در این حالت:

$$\frac{da}{dt} \approx -\frac{2a\Gamma}{L_p}$$

که در آن  $\Gamma$  گشتاور کلی وارد بر سیاره،  $a$  شعاع مداری، و  $L_p$  تکانه زاویه‌ای مداری سیاره است. این مهاجرت معمولاً بسیار سریع است و ممکن است در کمتر از 100000 سال باعث سقوط سیاره به سمت ستاره شود، مگر اینکه عوامل بازدارنده‌ای وجود داشته باشد (مثل تلاطم مغناطیسی یا نواحی با چگالی کمتر در دیسک).

## ب) مهاجرت نوع ۲ (Type II Migration)

وقتی جرم سیاره به اندازه‌ای زیاد می‌شود که بتواند در دیسک شکافی باز کند (مثل مشتری یا زحل)، سیاره دیگر درون شکاف حرکت می‌کند و همراه با تکامل ویسکوزیته‌ی گاز در دیسک، به‌صورت تدریجی به سمت داخل یا بیرون جابه‌جا می‌شود. سرعت این مهاجرت به زمان‌مقیاس تکامل دیسک گازی بستگی دارد:

$$\tau_{mig,II} \sim \frac{r^2}{\nu}$$

که  $\nu$  ویسکوزیته مؤثر دیسک است. این نوع مهاجرت آهسته‌تر ولی پایدارتر از نوع I است.

## ۲. مهاجرت ناشی از اندرکنش با سیارات یا سیارک‌ها

در مراحل بعدی، هنگامی که دیسک گازی پراکنده می‌شود، اندرکنش‌های گرانشی میان سیارات یا میان سیارات و قرص سیارکی باقیمانده می‌تواند باعث تغییر مدارها شود. برای مثال:

برخوردها یا تبادل گشتاور زاویه‌ای (angular momentum exchange) بین سیارات می‌تواند یکی را به سمت بیرون و دیگری را به سمت داخل جابه‌جا کند.

پدیده‌ای مشابه در منظومه شمسی احتمالاً باعث شد که نپتون به بیرون مهاجرت کند و در نتیجه سیارک‌های کمربند کوپر در مدارهای رزونانسی (مانند پلوتو با نسبت ۳:۲) گرفتار شوند.

این نوع مهاجرت را گاهی مهاجرت نوع III یا دینامیکی (dynamical migration) می‌نامند.

## ۳. نقش اصطکاک گازی و مقاومت هیدرودینامیکی

در مراحل اولیه، وقتی هسته‌های سیارات در میان گاز متراکم حرکت می‌کنند، نیروی drag هیدرودینامیکی نیز به تغییر انرژی مداری کمک می‌کند. این نیرو معمولاً باعث کاهش نیم‌قطر بزرگ مدار می‌شود، مگر اینکه گشتاورهای دیسکی اثر معکوس داشته باشند.

## ۴. اثرات مغناطیسی و باد ستاره‌ای

ستاره‌ی جوان معمولاً دارای میدان مغناطیسی قوی و باد ستاره‌ای است. این میدان در ناحیه‌ی داخلی دیسک می‌تواند گاز را از مدارهای خاصی بیرون براند یا متوقف کند.

اگر مرز مغناطیسی (magnetospheric truncation radius) جایی باشد که سیارات در حال شکل‌گیری‌اند، سیاره نمی‌تواند از آن نقطه به سمت داخل‌تر حرکت کند و ممکن است حتی بازتابی به سمت بیرون داشته باشد.

همچنین باد ستاره‌ای با از بین بردن گاز در ناحیه‌های نزدیک، می‌تواند شرایط فشار و گشتاور را تغییر دهد و مسیر مهاجرت را عوض کند.

#### ۵. تغییر جرم سیاره در حین رشد (Mass Growth Feedback)

سیاره‌ای که در حال رشد است، به‌صورت همزمان در حال مهاجرت نیز هست. افزایش جرم باعث تقویت گشتاور گرانشی آن و تغییر نوع مهاجرت از نوع I به II می‌شود. در برخی مدل‌ها، اگر نرخ رشد سریع باشد، سیاره می‌تواند از "حالت فروریزش به داخل" نجات یابد و در مداری پایدارتر باقی بماند.

#### ۶. ناپایداری‌های ویسکوزیته و دما در دیسک

در دیسک‌های گازی واقعی، ویسکوزیته و دما ثابت نیستند. تغییرات موضعی (به دلیل یونیزاسیون یا تلاطم مغناطیسی) می‌تواند نواحی‌ای با چگالی بیشتر یا کمتر بسازد که به عنوان تله‌های سیاره‌ای (planet traps) شناخته می‌شوند. سیاره در این نواحی ممکن است متوقف شود، مسیرش عوض شود یا حتی به بیرون رانده شود.

#### ۷. اثرات نسبیتی و جزر و مدی (Tidal Migration) در مراحل پایانی

برای سیاراتی که به ستاره بسیار نزدیک‌اند (مثل مشتری‌های داغ)، پس از پایان دوران دیسک، نیروهای جزر و مدی بین ستاره و سیاره نیز می‌توانند مدار را تغییر دهند:

اتلاف انرژی درون سیاره باعث کاهش تدریجی نیم‌قطر بزرگ مدار می‌شود.

اتلاف انرژی درون ستاره ممکن است مدار را گسترش دهد یا سیاره را در حالت هم‌چرخش (tidal locking) قرار دهد.

#### ۸. برخوردها و هم‌ادغامی‌ها (Mergers)

در مراحل اولیه‌ی تشکیل منظومه، برخورد بین سیارات اولیه و خرده‌سیاره‌ها بسیار شایع است. هر برخورد، انرژی جنبشی و تگانه زاویه‌ای قابل‌توجهی مبادله می‌کند و می‌تواند مدار را به‌طور ناگهانی تغییر دهد. در نتیجه، مسیر مهاجرت ممکن است جهشی و غیرپوسته باشد.

#### ۹. ناپایداری‌های ناشی از رزونانس‌های مداری

وقتی دو یا چند سیاره وارد رزونانس مداری (مثلاً ۲:۱ یا ۳:۲) می‌شوند، تبادل منظم گشتاور زاویه‌ای رخ می‌دهد. این رزونانس می‌تواند باعث کشیده‌شدن مدارها (افزایش خروج از مرکز) یا تغییر میانگین فاصله‌ی مداری شود. برای نمونه، نپتون و پلوتو در رزونانس ۳:۲ هستند و این رزونانس حاصل مهاجرت تدریجی نپتون به سمت بیرون است.

## پیامدهای مهاجرت سیاره‌ای

توضیح وجود مشتری‌های داغ و نپتون‌های داغ در منظومه‌های دیگر.

تغییر پایداری مداری در منظومه‌های چندسیاره‌ای.

تغییر در توزیع مواد جامد و فرار در نواحی مختلف دیسک، که بر ترکیب شیمیایی سیارات تأثیر می‌گذارد.

در منظومه شمسی، مدل Nice نشان می‌دهد که مهاجرت متقابل سیارات غول‌پیکر باعث جابه‌جایی کمر بند سیارکی و شکل‌گیری ساختار کنونی منظومه شد.

به طور خلاصه، مهاجرت سیارات نتیجه مستقیم تبادل گشتاور زاویه‌ای بین سیاره و محیط پیرامونش (دیسک گاز یا دیگر سیارات) است. نیروهای گرانشی و ویسکوزیته‌ی گاز تعیین می‌کنند که سیاره به سمت داخل یا بیرون حرکت کند. این فرآیند نقش بنیادینی در شکل‌دهی ساختار نهایی منظومه‌های سیاره‌ای دارد و بدون آن، تنوع شگفت‌انگیز منظومه‌های فراخورشیدی امروزی قابل توضیح نبود.