

原始惑星系円盤でのダストの振る舞いと微惑星形成

Dust behavior and planetesimal formation in the protoplanetary disks

渡邊 誠一郎[1]

Sei-ichiro Watanabe[1]

[1] 名大・理・地球惑星

[1] Earth and Planetary Sci., Nagoya Univ.

原始惑星系円盤は、降着流が収まり乱流が弱くなるパッシブディスクの段階になると含まれるダストは程度成長し沈澱する。しかし、ダストが cm オーダーのサイズになるとガスとの差動回転の影響で中心星方向に落ちていってしまい、合体成長によって直接惑星サイズになるのは困難である一方で、cm オーダー以下のサイズが中心面に十分薄く沈澱し、自己重力不安定により、一気に微惑星を形成するのにも、ダスト沈澱が自励的に乱流を引き起こす可能性が指摘されて困難と考えられてきた。これらを解決するモデルとして、放射圧によるダストの動径方向の循環と、ガスダスト 2 流体シミュレーションによる流抑制効果について論ずる。

原始惑星系円盤は、中心星への降着流が盛んなアクティブディスクの段階から降着流が収まり乱流が弱くなるパッシブディスクの段階へと進化する。ガス中に数%程度含まれるダストは、アクティブディスクの段階ではほとんど成長・沈澱しないが、パッシブディスクの段階になるとある程度成長し沈澱する。しかし、ダストが cm オーダーのサイズになるとガスとの差動回転の影響で中心星方向に落ちていってしまい、合体確率もそのサイズ以上ではかなり小さくなることを考えると、合体成長によって直接惑星サイズになるのは困難である。

一方で、cm オーダー以下のサイズが中心面に十分薄く沈澱し、自己重力不安定により、一気に微惑星を形成するには、乱流が十分弱くなっている必要がある。ところがダストが沈澱するにつれダスト濃集層とその上方のダストがほとんど無くなったガス層の間に差動回転が生じ、Kelvin-Helmholtz 不安定が励起され、ダスト沈澱が自励的に乱流を引き起こす可能性が指摘されてきた(e.g. Cuzzi 1993)。そのため自己重力不安定を起こすほど薄い層にダストが沈澱するのもまた困難となってしまう。

物質科学的な証拠も原始惑星系円盤での微惑星形成に至る過程を暗示している。始源的隕石を構成する要素の一つ CAI やコンドリユールといった高温凝縮粒子は、惑星集積前の原始惑星系円盤内で形成された可能性が高い。これらの粒子は鉱物学的特徴から、ダストアグリゲートが、一旦熔融温度付近まで加熱され、その後、急冷され生成されたと考えられる。これらの粒子はマトリックスに含まれる微細な低温成分と機械的に非常に均質に混合されている。

こうした状況を原始惑星系円盤で考えるためには、太陽に近い部分と外側部分の間にダストの循環を考える必要がある。降着円盤やダストのガスに対する相対運動はともにダストを太陽方向に運ぶだけなので、逆に太陽近傍から外側へのカウンターパートとなる。

ダスト輸送が無いとダストの循環は達成されない。この外側への輸送のメカニズムとして、ディスクの最内部から磁気遠心力効果で吹き出すジェットに乗ってダストが運ばれるモデルが提唱されている。このモデルはサイズソーティング等を説明できる可能性を持っているが、最も重大な欠陥はディスクがパッシブな段階ではジェットはほぼ停止してしまうことが観測からわかっていることである。

こうした問題を解決する別のダスト輸送メカニズムが放射圧によるダストの輸送である。真空中のケプラー粒子を放射圧で外側へ飛ばすためには、放射圧と太陽重力の比がおおよそ 1 を超える必要がある。この条件によれば、太陽質量程度の若い星では、サブミクロンの粒子しか外側には運べない。ところがガスが存在すると放射圧を受けたダストは公転速度が減衰するため、ガスから角運動量を受け、放射圧が重力の 1/1000 程度を上回れば外側へ輸送されることがわかった。このメカニズムは中心星の放射を直接受けるディスク最内部や上層表面部において有効である。よってこの新たな効果によるダストの外向き輸送の可能性を論ずる。

さらに、ダストガス 2 流体のシミュレーションからダスト沈澱により形成される鉛直方向密度分布が中心面以外にピークを持つ可能性を示す。このような分布の場合、ピーク上方では Kelvin-Helmholtz 不安定条件を満たさないことが解析的にわかり、実際シミュレーション結果でも確認できる。これによって自励的乱流によって妨げられずダストが沈澱できる可能性を論ずる。