惑星間塵雲:構造・起源・力学進化 向井 正 (京都情報大学院大学)

(要旨)

1. 塵雲の構造 1683年 J.D.Cassiniによる黄道光の発見(太陽の 赤道面に沿った平らな雲)と、それが惑星間空間のsolid matter によっ て反射された太陽光であること(1874年 A.W.Wright)から、惑星間塵 雲の存在は知られるようになった(参照; "Interplanetary Dust", 2001, Springer)。

その後、地上からの黄道光の可視測光・分光・偏光観測によって、塵雲 の構造・組成が明らかになった。1970年代に入って地球大気外の飛翔 体観測が始まると、可視波長域に加えて赤外線領域での塵雲の熱放射 観測も進み、塵雲の情報は飛躍的に増大した。

他方、惑星間塵の直接測定は、1970年代に始まる上層大気中での宇宙塵の捕獲・室内分析と、惑星間飛翔体による衝突塵の測定によって個々の塵の軌道・大きさ(質量)・形状・組成(化学組成・同位体組成)などが知られるようになった。

塵雲の空間構造をまとめると、(1)塵雲の対称面は黄道面からずれ
ている。地球軌道内側では金星軌道、外側では木星軌道に近いというが
確証はない。(2)黄道面内の塵密度は R^{-1.3}で太陽に向かって増大(Rは
日心距離)。赤外線衛星による小惑星族に対応した dust bands や
彗星の軌道に沿った dust trails の発見で、可視光で見た塵雲の滑らか

な空間構造という仮説は崩れ、塵雲の微細構造の存在が明らかになった。

この辺りの詳細は "Cosmic Dust" ed. J.A.M.McDonnell, 1978, John Wiley & Sons. "Dust in the Solar System and Other Planetary Systems" eds. S.F.Green et al. 2002, Pergamon 等に詳しい。



図2.惑星間塵雲の供給源。

2. 塵雲の起源 塵は、太陽放射圧による 摂動(Poynting-Robertson効果)を受けて、 太陽に落ち込む。これを補うように、彗星・小 惑星から塵が供給されている。その他の供 給源も含めて、塵雲の平衡状態が保たれて いると考えたのが図2である。

主な供給源である彗星と小惑星の貢献度 について決着はついていない。月試料の微小 クレータの解析では、月に飛び込む塵の 70%以上が小惑星起源(密度の大きなもの) (2001, "Interplanetary Dust", Springer) とされているが、最近の彗星核や小惑星 表面の反射スペクトルの解析から、 90%以上は彗星起源という報告がある (Yang & Ishiguro 2015, ApJ 813, 87)。



図1. 可視黄道光(対称面が 黄道面からずれている)

(1995.9.23.4am (local

time), Haleakara, Hawaii)

彗星の尾に、太陽放射圧を受けて惑星間空間に拡散する塵が含まれることは古くから知られていた。 短周期彗星からの供給量は、10³⁻⁴kg/s と推定されている (Nesvorny et al. 2011, ApJ 743, 129, Yang & Ishiguro 2015, ApJ 813, 87)。また、Spizer 衛星の中間赤外域で、観測した18個の短周期彗星の 12個において、彗星軌道に沿った塵の集積(dust trails)がみつかっている。この塵は数mm以上で、個々 の trail で見積もった塵供給量は平均で2kg/sと少ない (Reach et al. 2007, Icarus 191, 298)。

赤外線衛星IRASが見つけた dust bands は、小惑星族の軌道要素の一致から、族形成時に発生した 塵雲の軌道進化したものと考えられる (Dermott et al. 1984, Nature 312, 505)。 この説を支持する若い 族に付随した形成途中の dust bands がみつかっている (Espy et al. 2009, Planetary Space Sci. 57, 235)。 dust bands自体は、その輝度が背景黄道光の数%以下の微細構造である。小惑星 (596)Scheila (半径~50km)において、衝突によって塵雲が噴出する様子(~3x10⁷kg)が撮像された (Neslusan et al. 2016, Planetary Space Sci., 125, 37)。

彗星と小惑星が現在の塵雲の主な供給源であることは間違いない。しかし、空間の位置や時期によって、塵の供 給源からの寄与は異なっており、小惑星と彗星の境目が不透明になりつつある現状では、供給源の貢献度は重要で はない。むしろ、個々の塵の出生を識別する手段(例えば年代・同位体測定)の確立が急がれる。

3. 塵の力学進化 塵に働く太陽放射圧と太陽重力の比 β は 塵半径 s に対して $\beta \sim s^{-1}$ となるので、 小さな塵は $\beta > 1$ となって太陽系から飛び出すと予想された。しかし、太陽放射圧の効率は塵の半径や塵 構成物質の光学定数・塵の形状に依存するので、 $\beta > 1$ となるのは、光吸収物質(金属やカーボン系)の半 径0.1 μ m付近のものだけである。透明な物質(氷、シリケイト系)では β は1を越さない。また、構成物質 によらず β は、半径0.1 μ m付近でピークとなって、それより小さくなるにつれ放射圧効率が減少するため に β は小さくなっていく (Mukai et al. 1992,A&A 262,315)。



図3. 塵の寿命 t(yrs)の半径 s 依存 (Mukai 1989, Enrico Fermi School, Course Cl)

塵がケプラー軌道を一周した際に残ってくる非保存力(摂動力)としては、太陽放射圧の光行差によるPR効果、太陽風による同種の効果(准PR)、帯電した塵に働く惑星間磁場からのLorentz効果 (Mukai and Giese 1984, A&A 131, 355) 等がある。

(i) PR効果のみを考慮した塵の軌道進化では、塵軌道の長 半径 a と離心率 e とは、a(1-e²)e^{-4/5} = const を保ち、塵 は円軌道になりつつ太陽に落ち込む。この時、軌道面傾斜角 i は変化しない。

(ii) PR効果に惑星摂動(重力散乱、軌道共鳴効果)を加味した軌道進化の数値シミュレーションから、地球軌道に沿った塵雲の集積が予言され(Dermott et al. 2001, from "Interplanetary Dust" Springer)、赤外線衛星COBEで確認された(Reach et al. 1995, Nature 374,

521)。さらに、惑星摂動は、木星族短周期彗星から放出された塵の軌道進化に大きく影響すること が知られている (Yang & Ishiguro 2017, ApJ in press)。

(iii) 図3から、半径1μm以下の塵では、Lorentz効果が効き、可視黄道光の80%を反射する 1~100μm の塵の軌道進化は PR効果 が支配し、100μm以上の大きな塵は相互衝突によって寿命が決まる。

4. 今後の課題 (i) 塵の軌道進化のシミュレーションにおいて、相互衝突で生まれた小さな塵についての追跡はない。衝突破片のサイズ・速度・方向分布が室内での実験で決められるといいが、数百μmの塵同士の数km/sでの衝 突実験は難しいだろう。

(ii) 小さな塵はLorentz効果で軌道面傾斜角 i が変化し、母天体の軌道面から拡散する。これは i を変えないPR効果との大きな違いである。黄道面に近い短周期彗星群からの塵は、黄道面外に向かうにつれて小さい塵の比率が増すと予想される。黄道面外での塵サイズ分布の測定が待たれる。(以上)