帯電フラクタルダストによる惑星形成

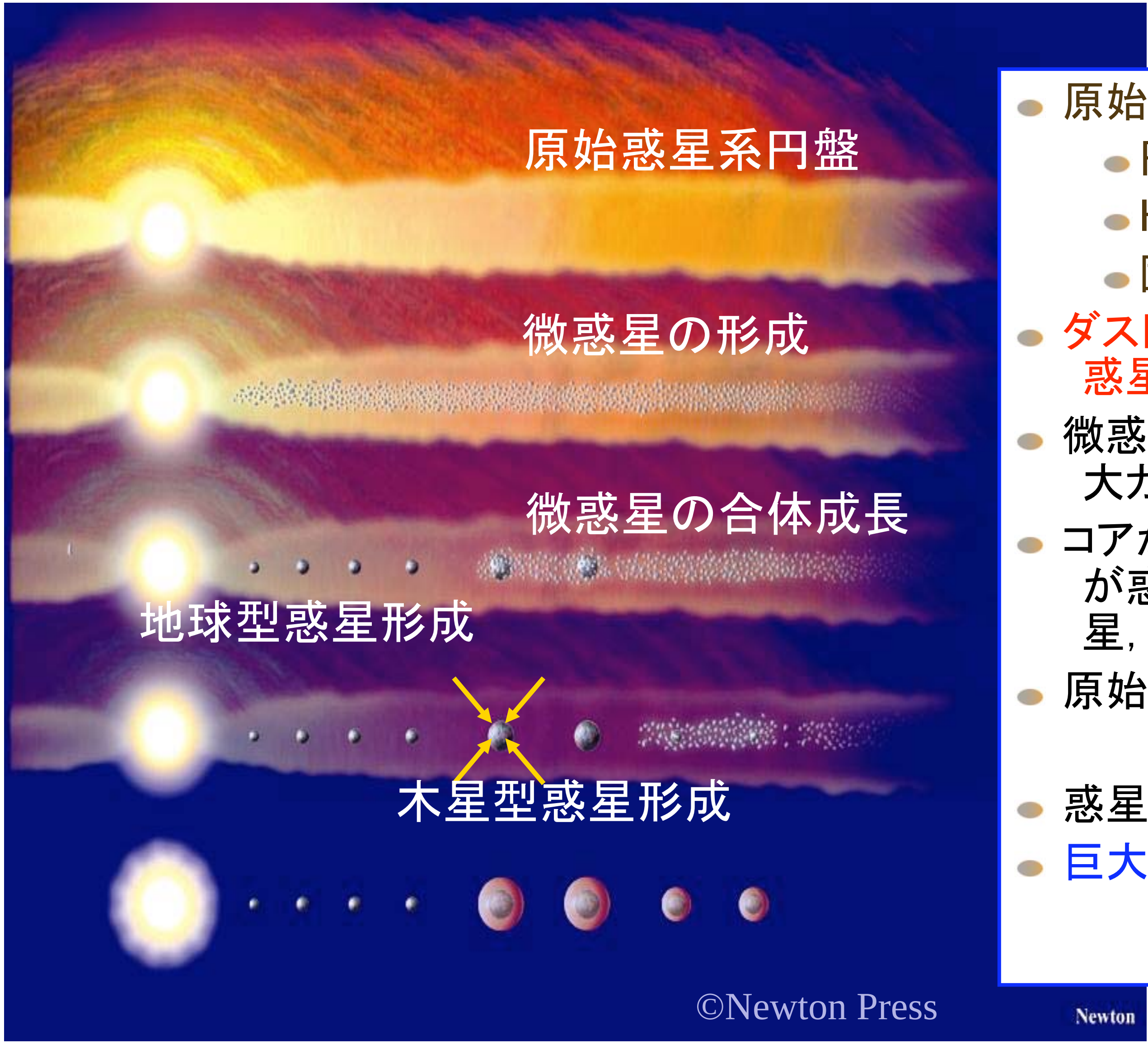
京大･人環　　阪上雅昭
　　　　　　　奥住　聡
北大･低温研　田中秀和

~~帯電~~フラクタルダストによる惑星形成

京大・人環　　阪上雅昭
奥住　聡
北大・低温研　田中秀和

太陽系形成標準理論

系外惑星(井田茂)より

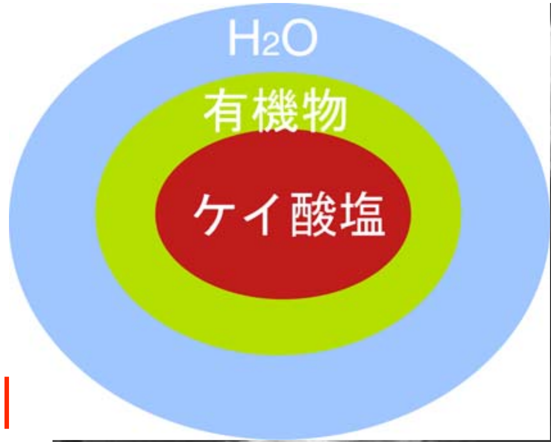


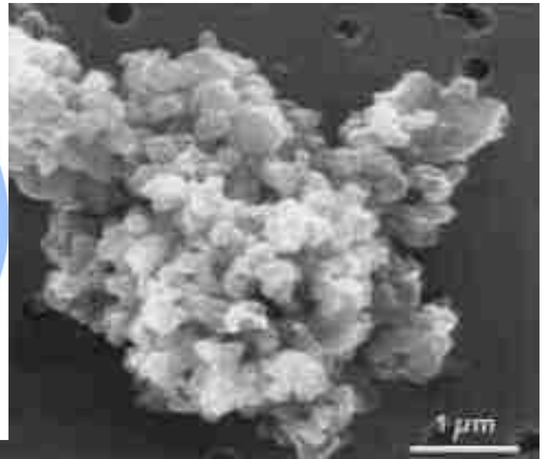
- 原始惑星系円盤を出発点
  - 円盤の質量: 太陽の1%
  - H,Heガス: 99%の質量
  - 固体成分: 1%の質量
- ダストが赤道面に沈殿し，凝集して微惑星を形成
- 微惑星が衝突合体，地球型惑星と巨大ガス惑星のコアができる.
- コアが地球質量の10倍になるとガスが惑星に流入し巨大ガス惑星(木星，土星)ができる.
- 原始惑星系円盤ガスが消失

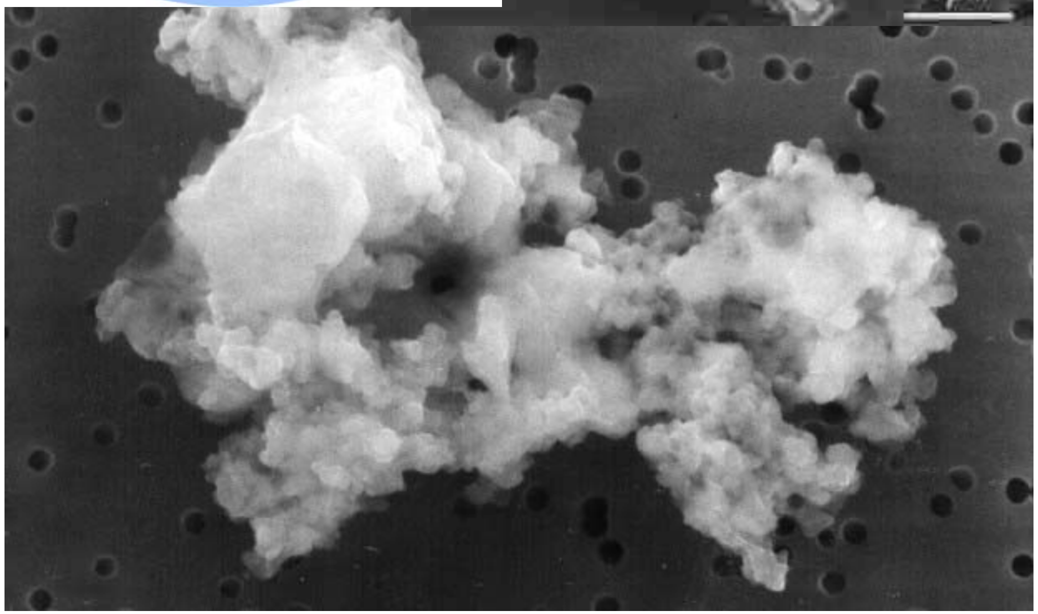
- 惑星は円軌道で形成、安定
- 巨大ガス惑星は比較的遠方で形成

ダストとは

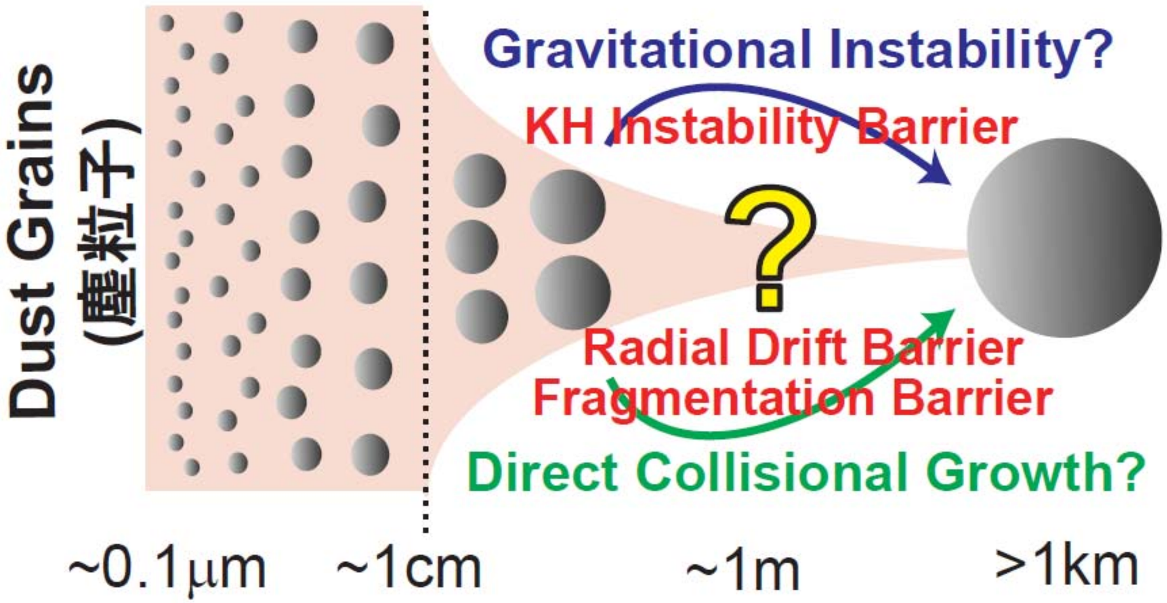
- 分子雲内
  - 半径0.1-1μm
- 惑星形成過程
  - 衝突合体によって成長
- 惑星系の固体物質はダストから形成されたと考えられている







ダスト(塵粒子)の凝集



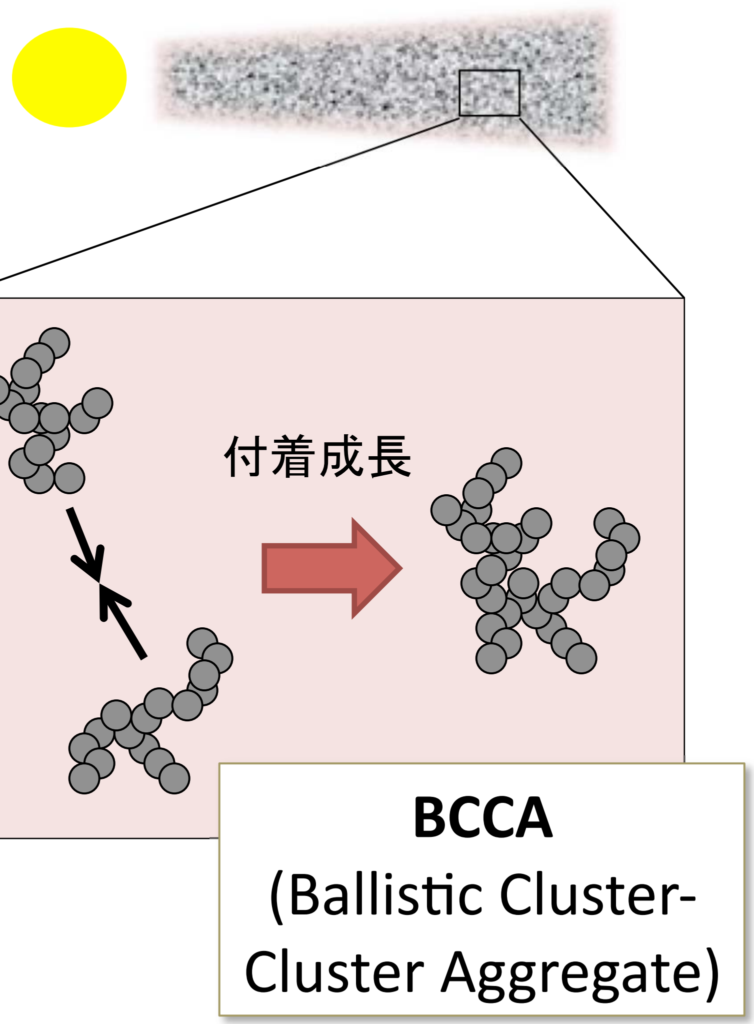
(Goldreich & Ward 73)

(e.g., Brauer et al. 08)

非平衡過程としてのダスト凝集

- ダストの成長:合体成長方程式
- 衝突によるダストの成長　→　フラクタルダスト
- ダストの帯電:電子・イオン・ダストの電離平衡
- ガス乱流の中でのダストの運動と衝突

ダストの付着成長：　微惑星形成の第一歩



微惑星(サイズa>km)より小さなダストの成長

×重力

➔表面吸着力（分子間力など）

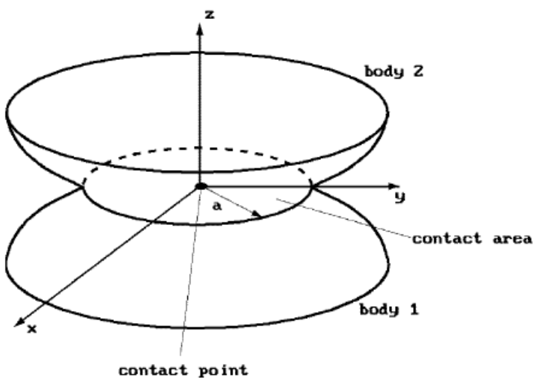
<u>実験 (Wurm & Blum 1998) ：</u>

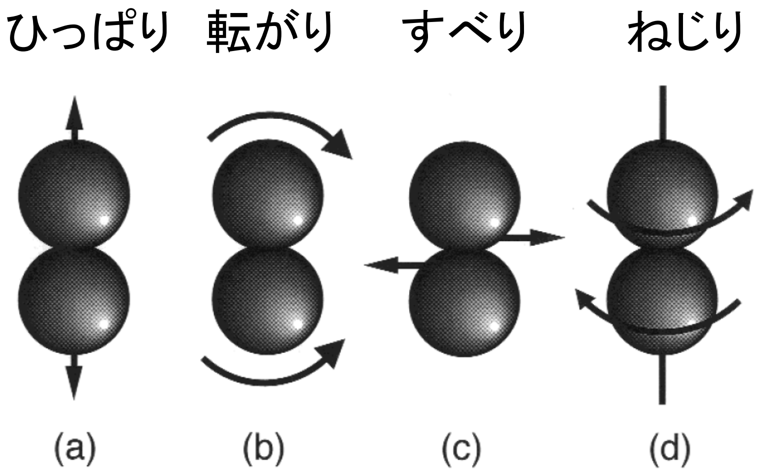
低速度のダストモノマーの集団は付着成長を通じて低密度（高空隙率）のフラクタルアグリゲイト(BCCA)に進化。

フラクタル次元 $D_f \equiv \left(\frac{d \ln a}{d \ln N} \right)^{-1} \approx 2$

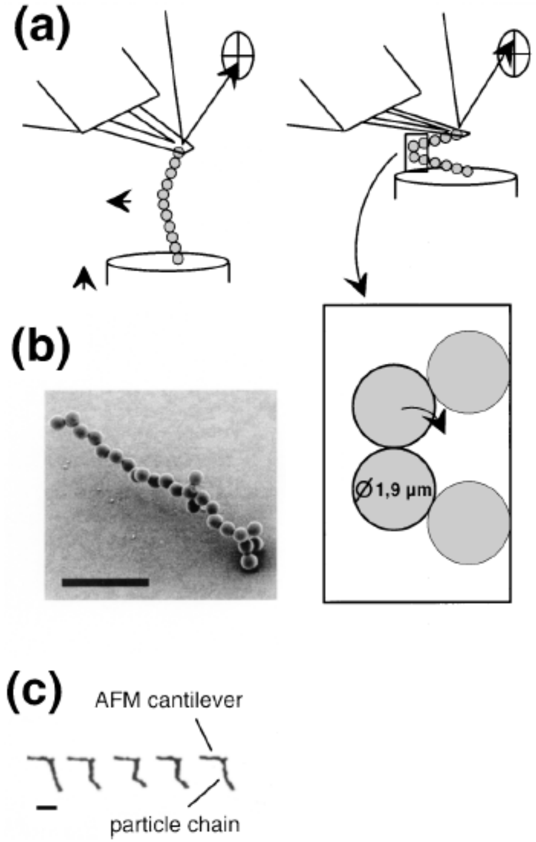
平均密度 $\bar{\rho} \propto N^{-0.5}$ （N: 構成粒子数）

ダスト粒子の付着（理論、実験）



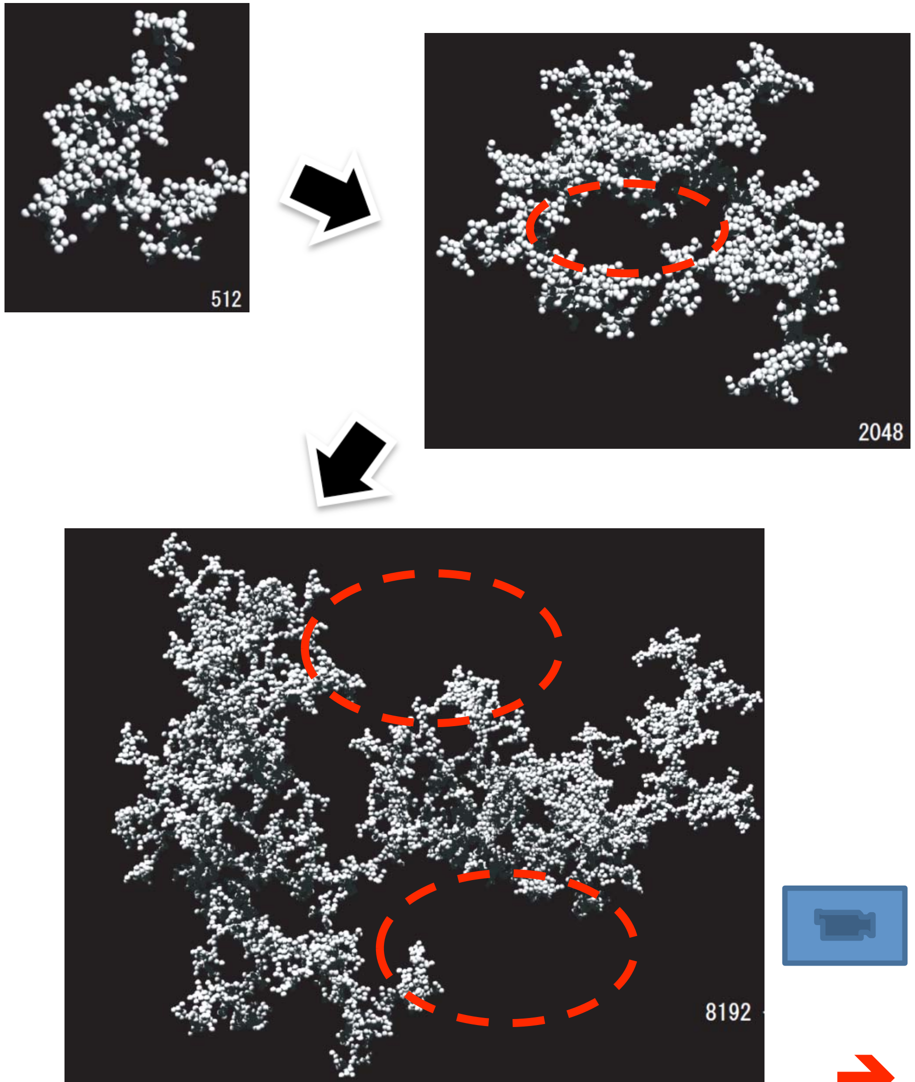


Dominik & Tielens 97



Heim, Blum, et al. 97

BCCA(Ballistic Cluster-Cluster Aggregate)



Wada+2008

■ $E_{\mathrm{kin}} \lesssim E_{\mathrm{roll}}$ なら塑性変形なしで合体。

モノマーどうしを転がすのに必要なエネルギー

■同一のクラスターどうしの合体

➔BCCAと呼ばれる。

■フラクタルな構造を持つ：

フラクタル次元 $\boxed{D_f \approx 1.9}$

■秩序成長ならこの形に近くなる。

内部に大きな空隙ができる

➔ 成長につれて平均密度が下がる

衝突合体方程式(coagulation eq.)

1D (質量Nの空間) の coagulation eq.:

$$n(N;t) = \frac{1}{2}\int_0^N dN' K(N', N-N') n(N') n(N-N') - n(N)\int_0^N dN' K(N, N') n(N')$$

$$\boxed{K(N_i, N_j) \equiv \langle \sigma_{\mathrm{coll}} v_{\mathrm{rel}} \rangle}$$

“Kernel” （ただの速度係数）

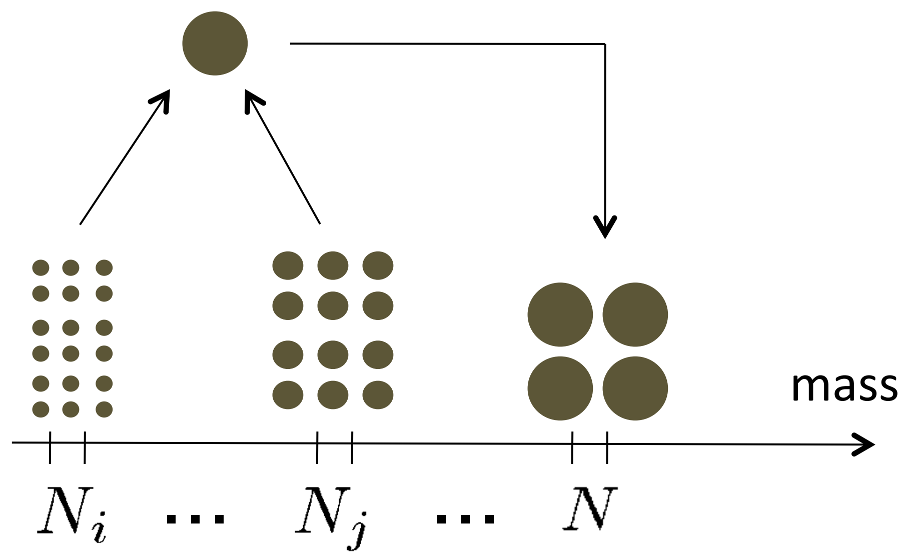
Δｔ あたりに衝突イベント

$$N_i + N_j \to N$$

が $K_{i,j} n_i n_j \Delta t$ 回起こる。

（右図は1つのイベントの例）

$$N_{i+j} = N_i + N_j = N$$



衝突合体方程式（coagulation eq.）を解く

パラメータ空間を単純に2次元（質量、密度）にしたいところだが、これは数値計算的にとてもしんどい。

１次元方向のメッシュの数を $\mathcal{N}$ とすると、
２次元パラメータ空間での衝突ペアの総計算量は $\mathcal{N}^4$ のオーダー。

（いまは考えていないが）物理空間 (r, z) 方向の移流も計算しようとするとさらに時間がかかる。

すべての衝突ペアを計算せずに、近似のいい計算をしたい。

考えられる方法：

■ Direct Monte Carlo Simulation (DSMC) ： Ormel et al. (2007)

■ 密度空間方向の分布の有限個のモーメント（たとえば平均、分散など）だけ追跡する。 これの最も簡単なものを行う。

密度進化まで取り入れた統計シミュレーション

質量Nのアグリゲイトは
みな等しい体積Vを持つとする。

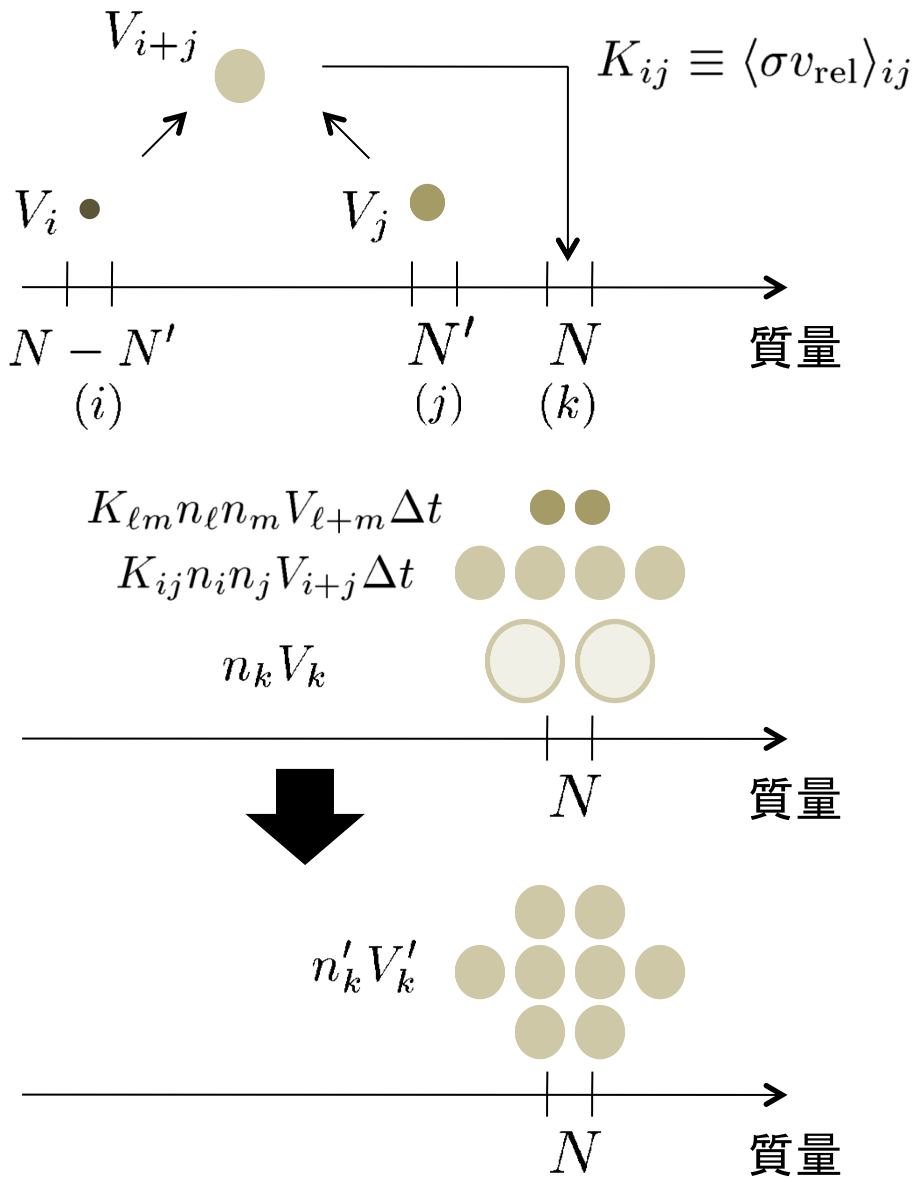
合体後の体積を次のようにして決める:

$$\boxed{V_{i+j} = V_i + V_j + \underline{V_{\mathrm{void},ij}}}$$

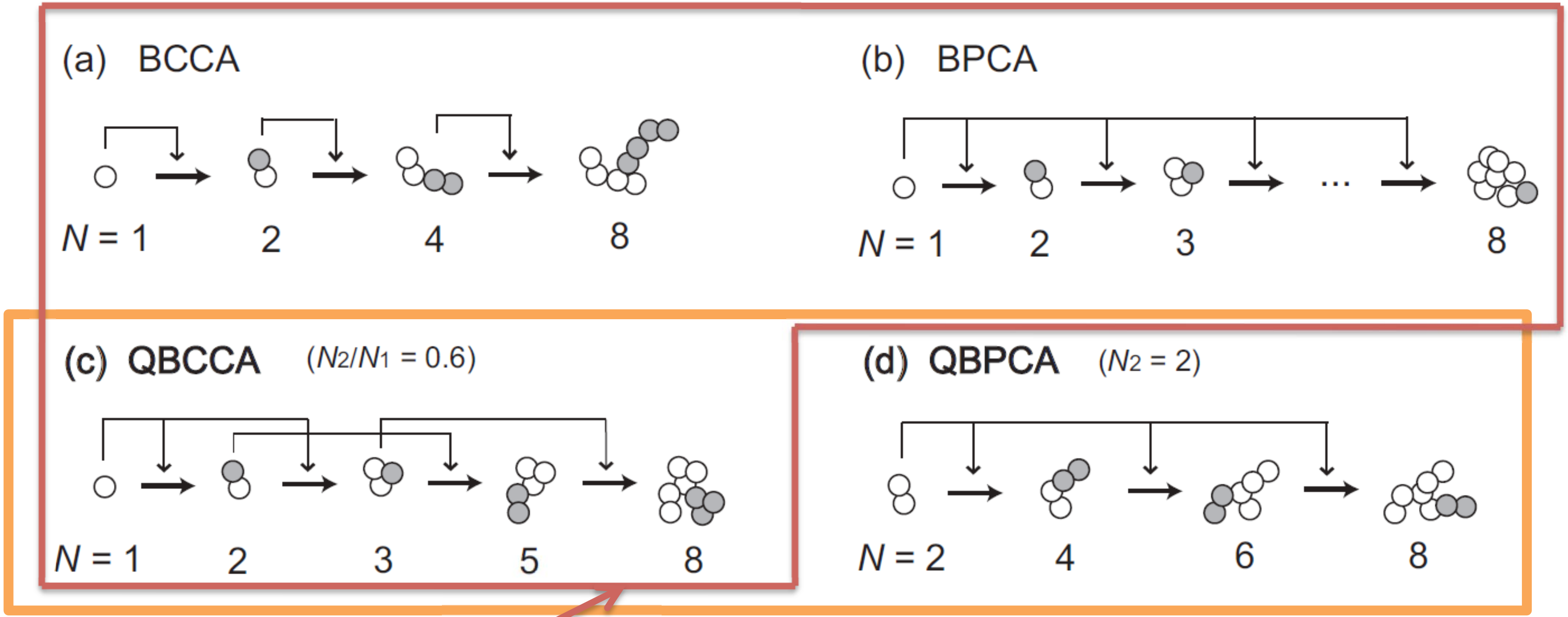
$V_{\mathrm{void},ij}$ は、合体による新たな空隙の増加量。**N体計算からの公式を利用**
（↑次のスライド）

アグリゲイトの行き先(k)　には、いろいろな密度（体積）をもつものが入ってくる。

アグリゲイト密度を平均化



ダスト合体成長モデル　4類型

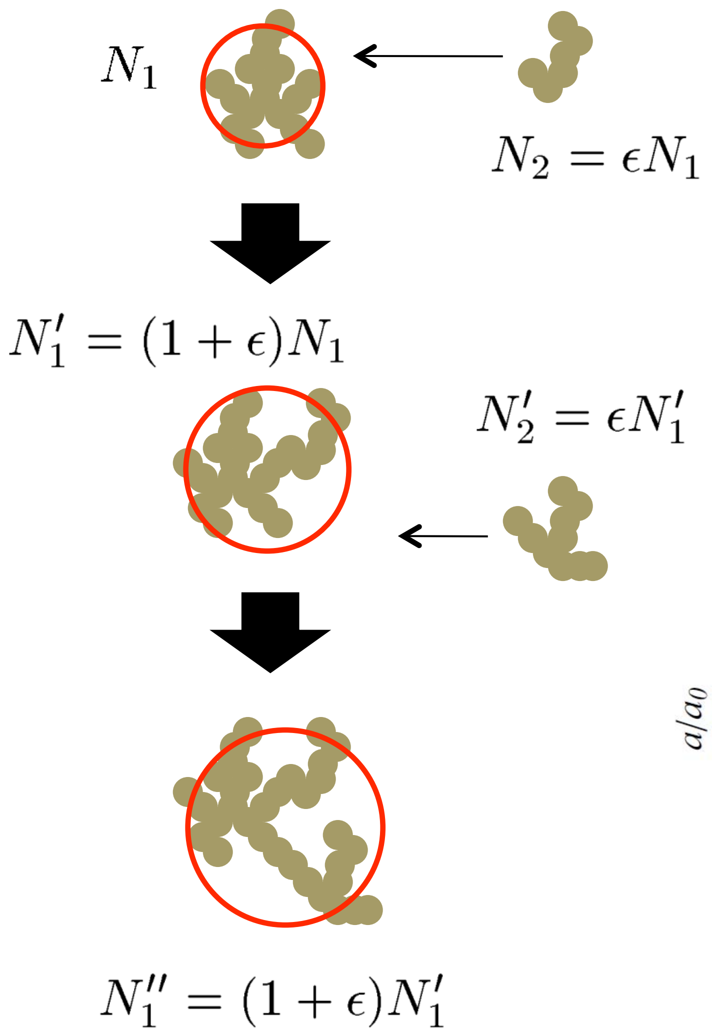


今回のN体計算の対象

新モデル

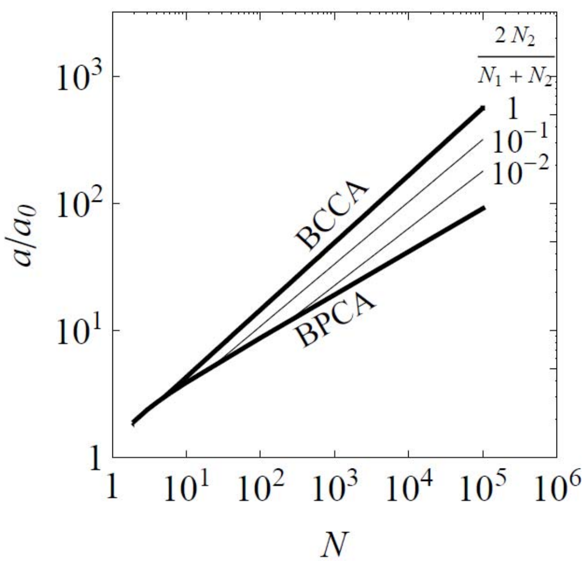
quasi-BCCA : サイズ比一定の繰り返し衝突

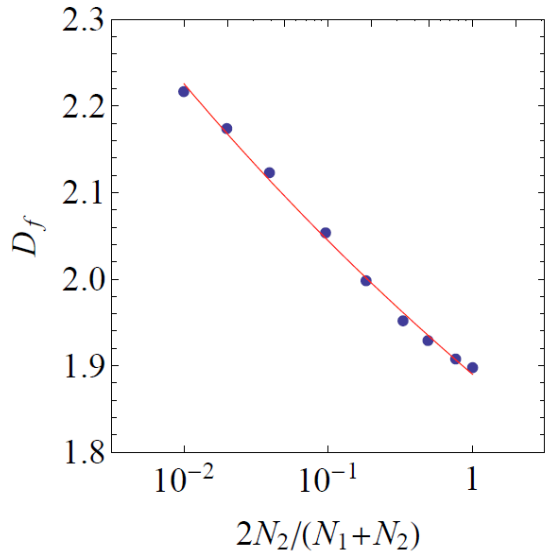
サイズ比のついた衝突モードとして、BPCAモードとquasi-BCCAモードを考える。



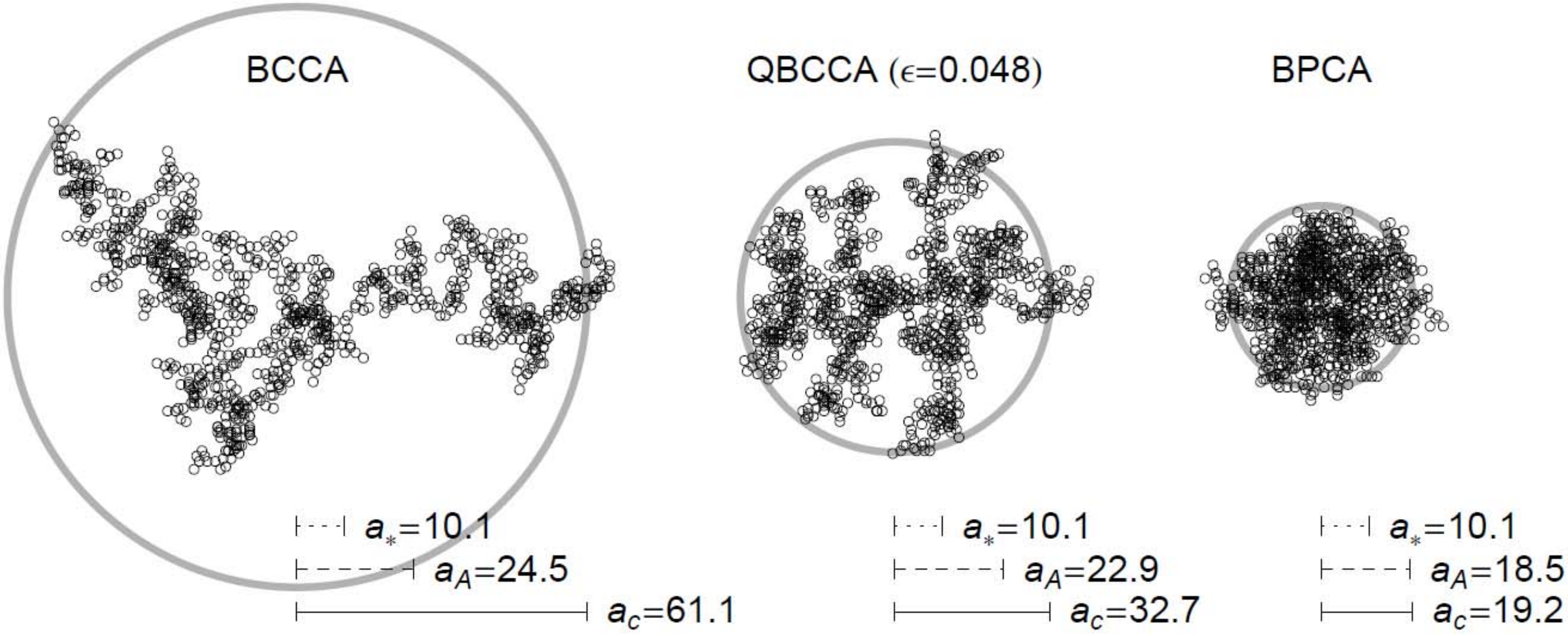
- 内部粒子数 N_1 のアグリゲイトに $N_2 = \epsilon N_1$ のアグリゲイトをぶつける。
- できあがった $N_1' = (1+\epsilon)N_1$ のアグリゲイト $N_2' = \epsilon N_1'$
- のアグリゲイトをぶつける。

この操作を繰り返す ➔ "quasi-BCCA" フラクタル次元



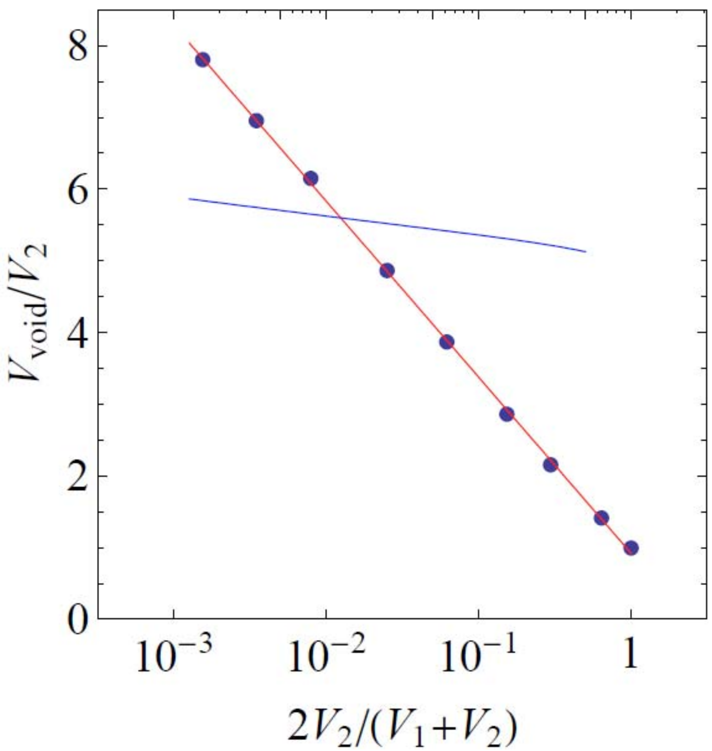


N≒1000体のアグリゲイトの射影図



サイズ:　上から順に　コンパクト半径、断面積半径、特徴半径

Volume Evolution of Aggregate Collisions



合体相手とのサイズ比に応じた
空隙率（あるいは体積）の増加の仕方を知りたい。

合体後の体積を次のように書く:

$$V_{1+2} = V_1 + V_2 + \underline{V_{\rm void}}$$

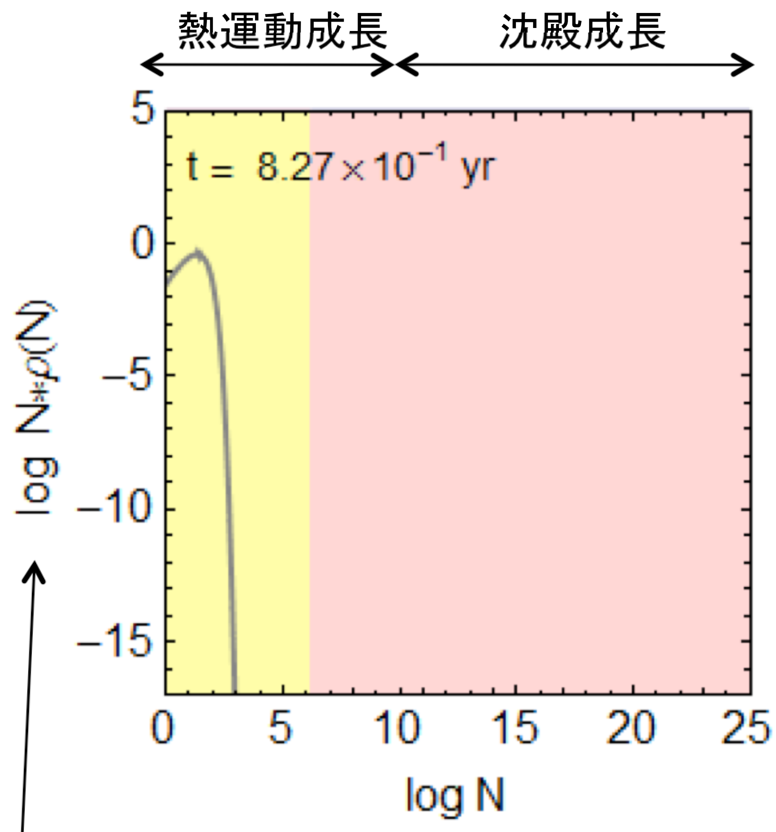
■ quasi-BCCA成長では

$$V_{\rm void} \approx \left(0.939 - \ln \frac{2V_2}{V_1 + V_2}\right) V_2$$

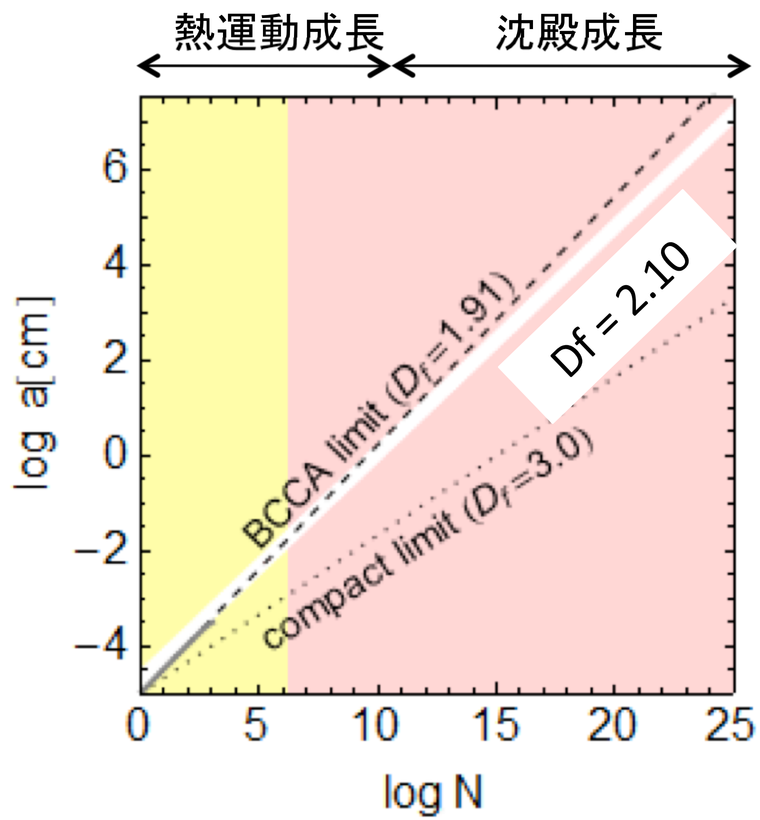
これが成り立つのは、厳密にはqBCCA衝突を繰り返したときだけだが、
（体積比が小さくない限り）任意の衝突に対してこの公式を適用する。

アグリゲイト質量分布とサイズの進化（帯電なし）

質量分布の進化



サイズの進化



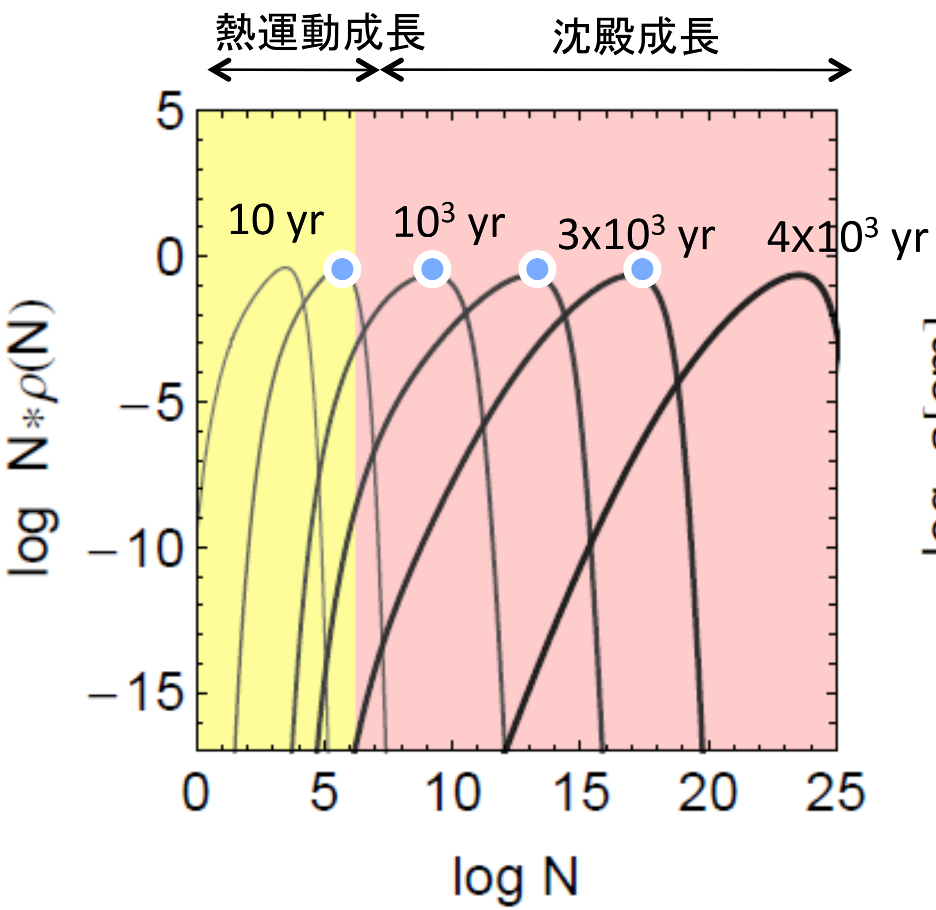
Nρ(N): 単位 log N あたりのダスト密度

林モデル; r = 5AU, z = h

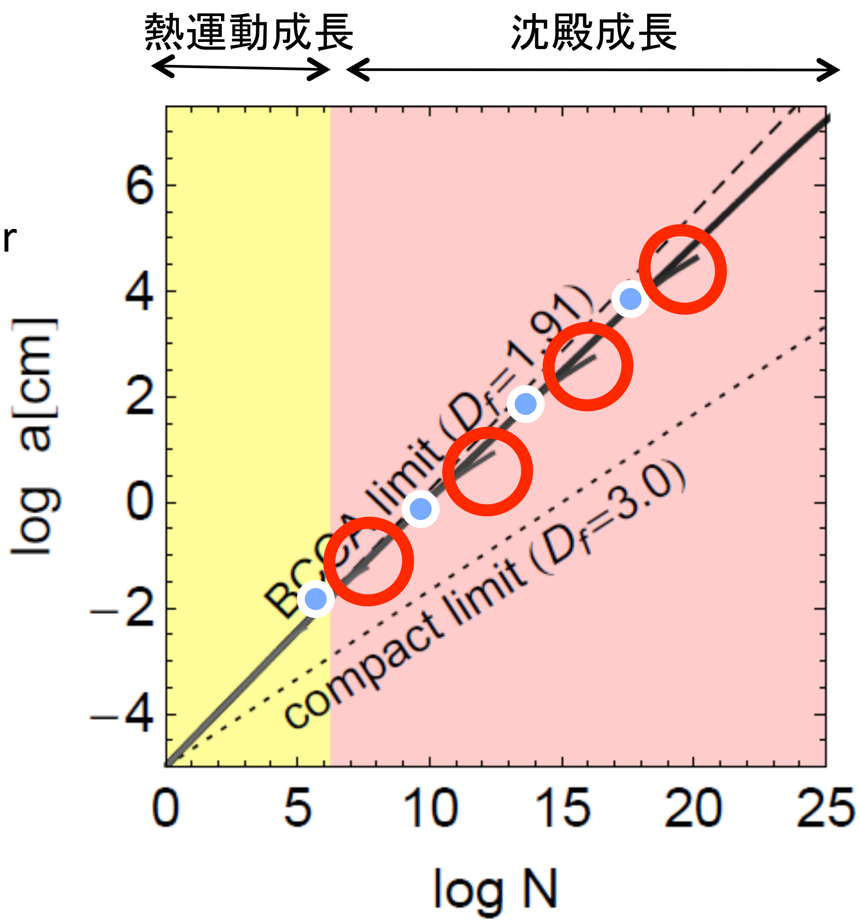
モノマー: a_0 = 0.1 μm = 10^{-5} cm, ρ_s = 1.0g/cc

アグリゲイト質量分布とサイズの進化（帯電なし）

質量分布の進化



サイズの進化



たしかに（ほぼ）BCCAで成長　・・・だが分布の先端はいつもBCCAより密度が高い

自分よりサイズの小さいものを常に食べて成長（qBCCA!!）するためと思われる。

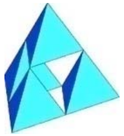
【補足】ダストの高空隙率化（フラクタル化）の重要性

シェルピンスキー四面体

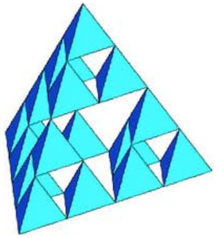
フラクタル次元 $D_f = \dfrac{d\log N}{d\log L}$

（ダストなら、 N: 質量　L: 半径）

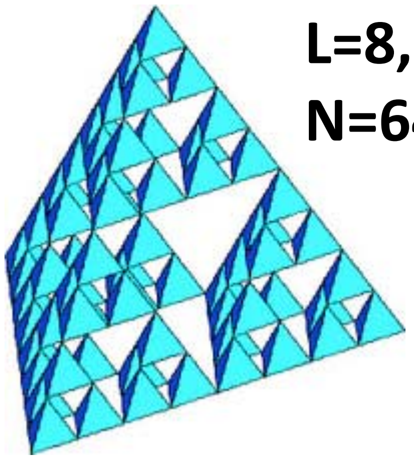
L=1, N=1



L=2, N=4=2^2



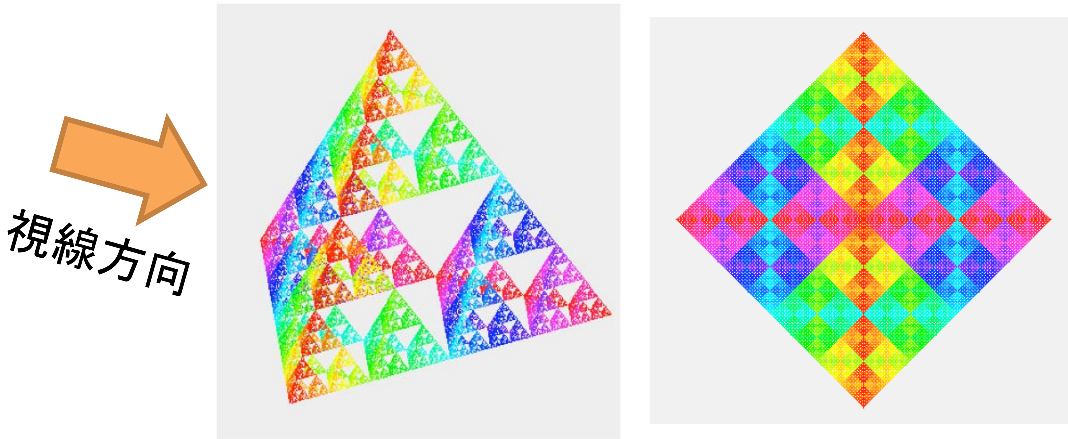
L=4,
N=16=4^2



L=8,
N=64=8^2

シェルピンスキー四面体は **D = 2**

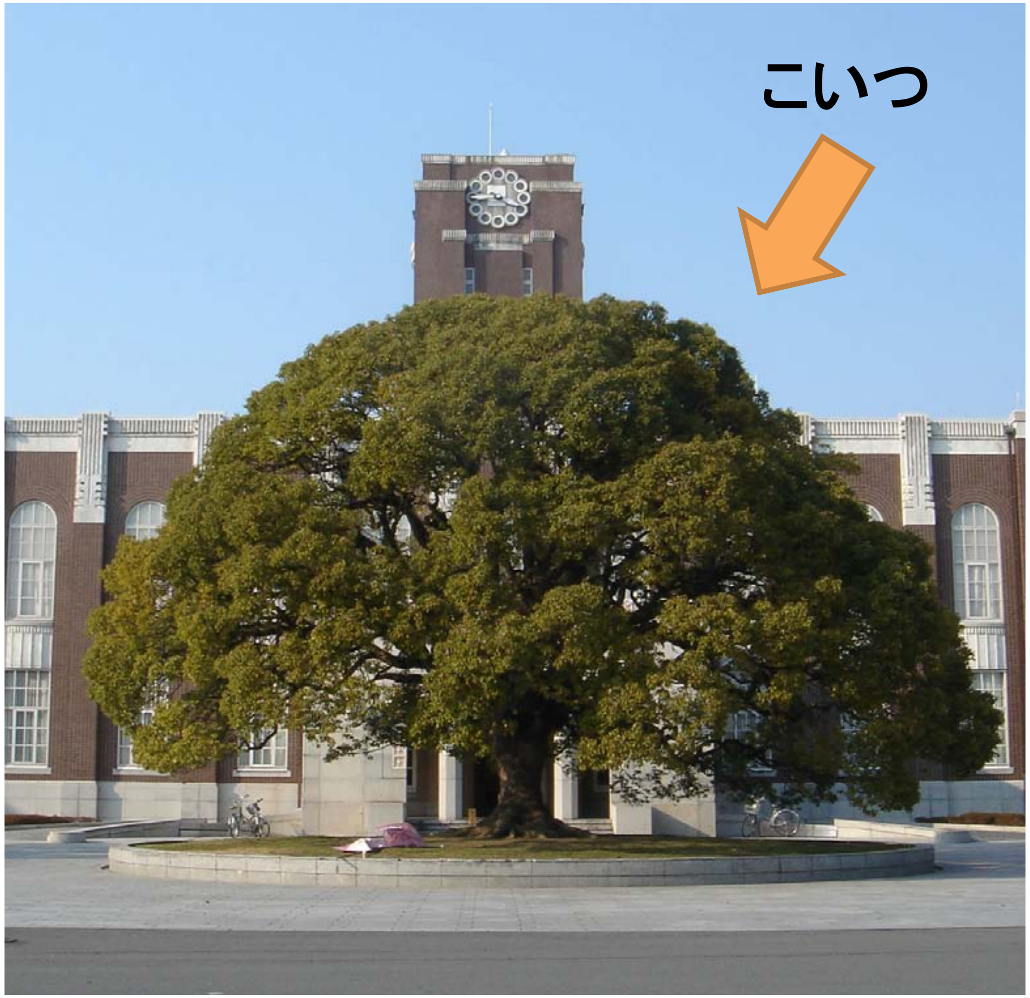
➔「平面的」, 全粒子(要素)が表面積に寄与



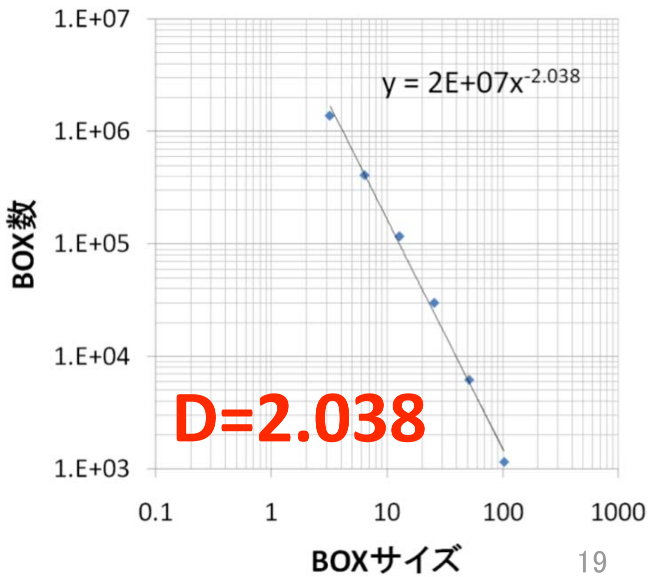
京大人環　立木秀樹准教授のHPより：　http://www.i.h.kyoto-u.ac.jp/~tsuiki/sakuhin.html

**➔ 低次元(D»2)フラクタルダストは、
強いガス抵抗・高い電荷吸収効率を維持**

【余談】 自然界のフラクタル

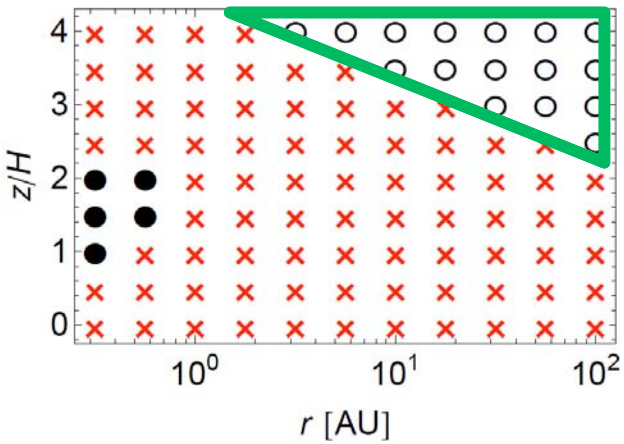


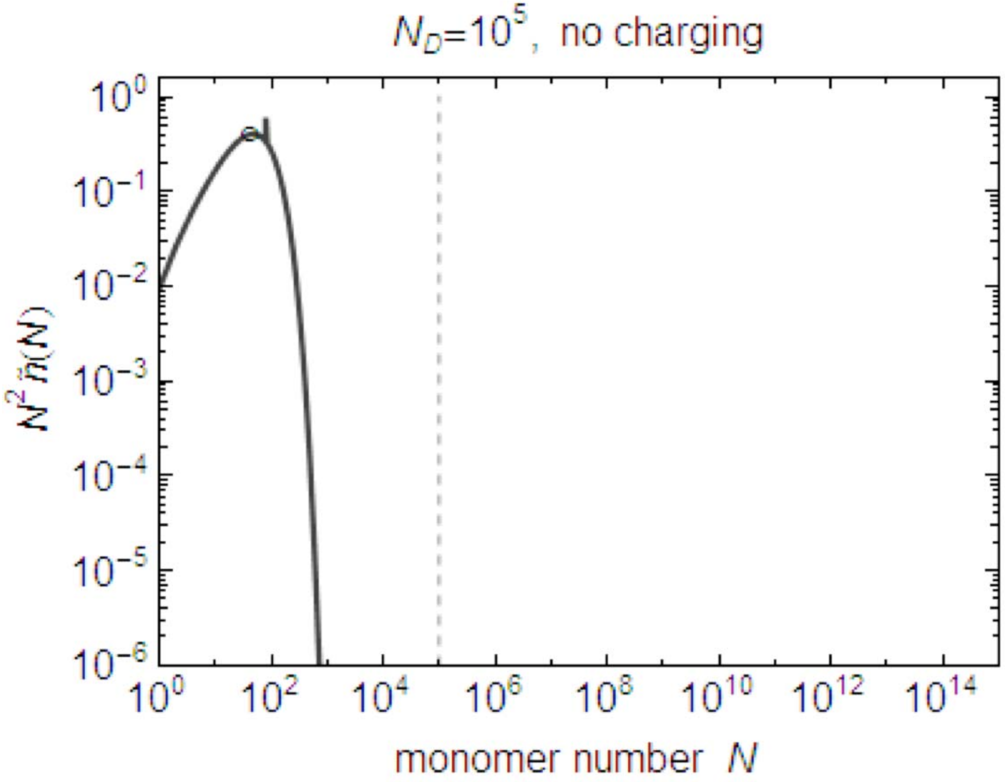
断面図

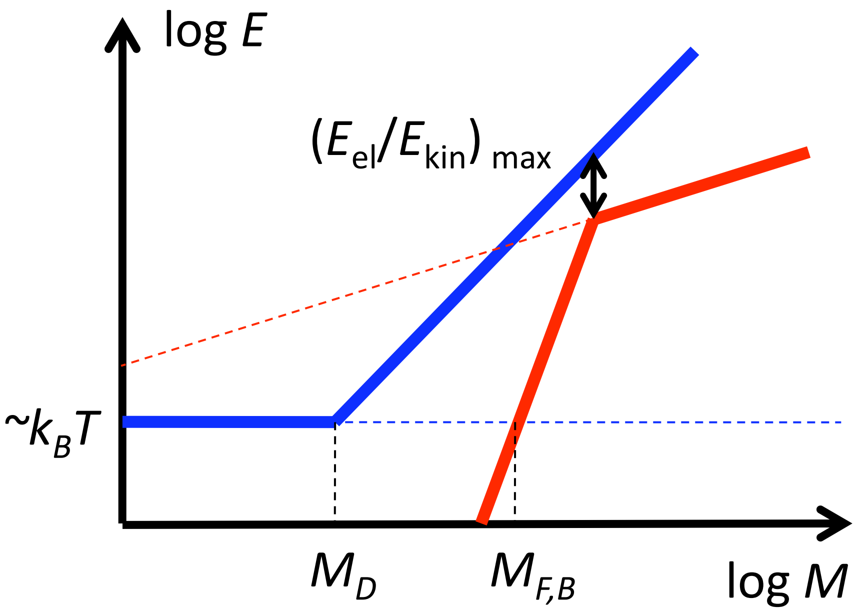


©京大人環　酒井敏教授

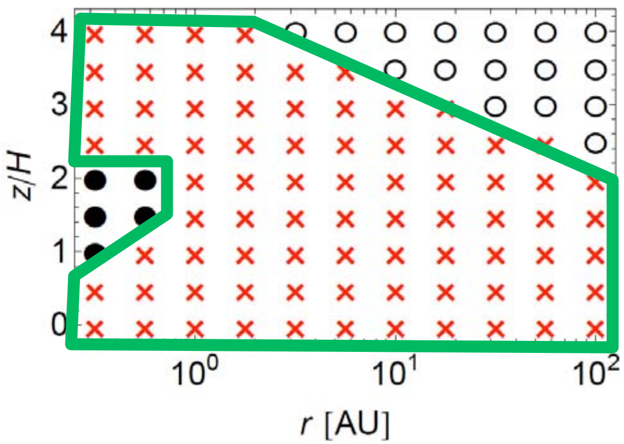
領域1： 一様成長領域

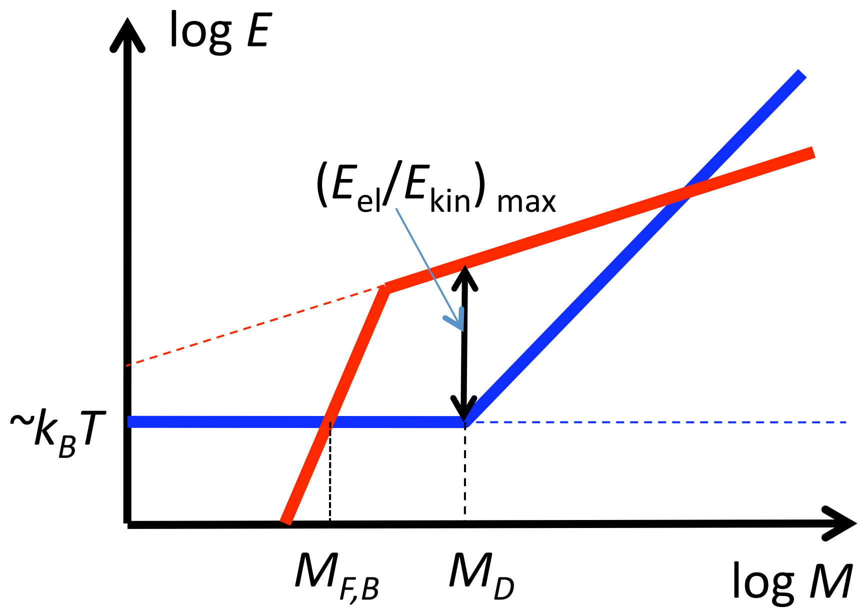

z/H
4
3
2
1
0
10^0
10^1
10^2
r [AU]

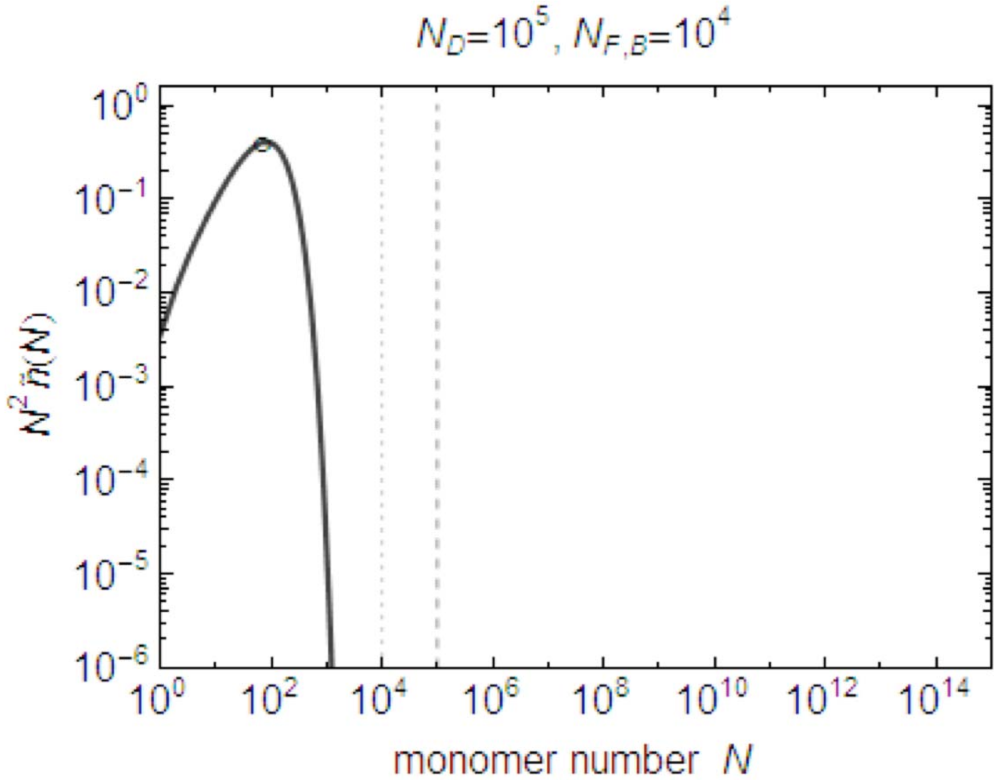

$N_D=10^5$, no charging
$N^2\tilde{n}(N)$
monomer number N
10^0
10^{-1}
10^{-2}
10^{-3}
10^{-4}
10^{-5}
10^{-6}
10^0
10^2
10^4
10^6
10^8
10^{10}
10^{12}
10^{14}


log E
$(E_{el}/E_{kin})_{max}$
$\sim k_B T$
M_D
$M_{F,B}$
log M

領域2：　完全成長凍結領域







領域3： 2極分化成長領域