J. Plasma Fusion Res. Vol.87, No.7 (2011) 441‑448

小特集 長距離相関による自己組織化

4．重力多体系での自己組織化

郷田直輝
自然科学研究機構国立天文台 JASMINE 検討室

（原稿受付：2011年２月15日）

宇宙には広大なスケールに渡って様々な天体が存在し，階層構造を形成していることがわかっている．これらの天体の形成過程や力学構造等を解明することが宇宙物理学の大きな課題の一つである．この課題の解明のためには，長距離力である重力が運動を支配している重力多体系での緩和過程，(準)平衡状態，定常状態の安定性などの物理的特徴，つまり重力多体系の“自己組織化”の解明が重要となる．本章では，短距離力が支配している通常の気体などの系における緩和過程と重力多体系との違いを中心に，重力多体系での“自己組織化”に関して説明する．

Keywords:
gravitating system, galaxy, astorometry, relaxation process, chaotic itinerancy, statistical mechanics for systems with long-range forces

4.1 はじめに

古来，天文学では観測技術の進歩や新しい観測方法の確立により，我々の宇宙観が拡大していった．特に，宇宙の階層構造という広大なスケールに亘っての階層的な天体構造の存在が20世紀末に明らかになってきた．小さなサイズからみていくと，惑星，そして太陽のように自ら燃えて輝いている星，つまり恒星，さらには，恒星の進化の終末に形成されるブラックホールや中性星といった“星”の構造が存在する．次に大きなサイズの構造として，太陽とその周りを回る惑星から成り立つ太陽系（惑星系）(約100億km のサイズ)，さらには恒星が約2000億個も集まって集団を組んでいる天の川銀河（銀河系）の存在（約10万光年のサイズ：１光年は，約９兆5000億 km)，また我々の天の川銀河のような銀河が，様々な形態，サイズをもってこの宇宙には無数に存在していることがわかってきた（観測できる範囲内でも約1000億個レベル)．さらには，これらの銀河が，比較的小規模な銀河群と呼ばれる集団を組んでいる場合や銀河団とよばれる比較的大規模な集団（数千万光年のサイズ）を組んでいる場合がある．また，銀河団が複数個連なった超銀河団と呼ばれる集団（数億光年のサイズ）が存在し，宇宙の大構造を形成している．さらに，銀河の中では，恒星がいくつか集まって星団とよばれる集団を組んでいる場合もある．このように宇宙には，サイズにして約20桁，密度にして約44桁にも渡る広大なスケールに亘って，階層的に様々な天体構造が存在しているのである．これが図１に示したような宇宙の階層構造と呼ばれているものである[1,2]．

では，なぜこのような広大なスケールに亘って宇宙では

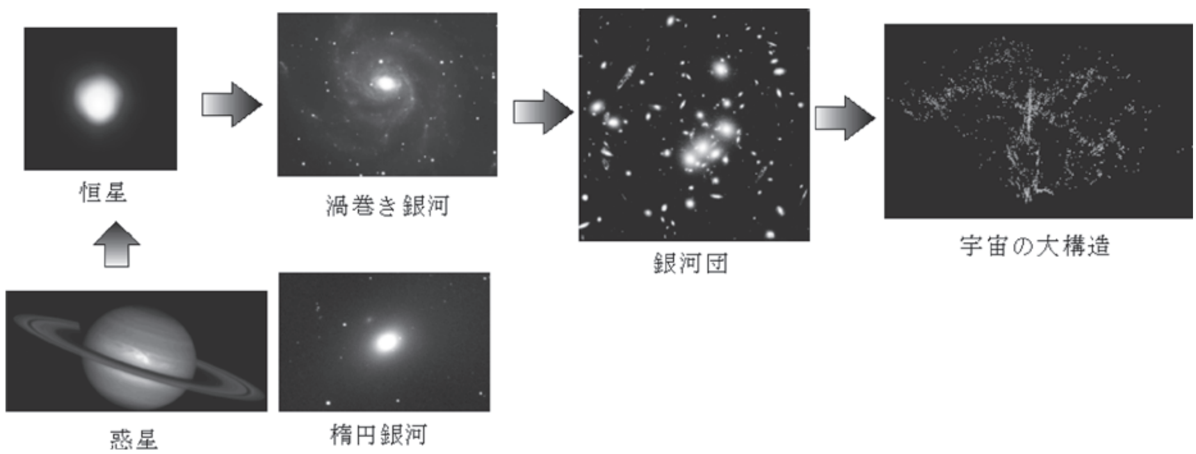

図１　宇宙の階層構造．惑星系から宇宙の大構造に至るまで，広大なスケールに亘って，様々なサイズをもった天体構造が存在する．

4. Self-Organization in Gravitating Many-Body System
GOUDA Naoteru

author's e-mail: naoteru.gouda@nao.ac.jp

天体構造が形成されているのだろうか．その根本的理由は，天体構造を形成している“力”の源が，本質的に重力であり，その重力の性質に起因するからである．つまり重力は，その力やポテンシャルエネルギーが，２粒子間の距離のベキ則であり，特徴的なスケールをもたず，長距離にわたって力を及ぼすことが可能である（スケールフリーとよばれる．一方，電磁気力も重力と同じ形のクーロン力に従うが，電荷には正と負があるため，自然界では一般的に，正の電荷の周りに負の電荷が集まり，力を遮蔽してしまい，力が届く小さな有限サイズが存在してしまう．重力は正の質量しかないため，このような遮蔽は起こらない）．このため，広大なスケールに亘り天体構造を形成することが可能なのである．では，これらの構造は如何にして形成され，力学構造（(準)定常状態における質量や重力ポテンシャルの空間分布，さらに構成天体や物質の軌道分布など）はどのようになっているのであろうか？本章では特に銀河の力学構造に関する問題を中心にして，重力多体系の力学構造とその自己組織化を展望してみることとする．実は後述するように，重力が実際的な長距離力であるが故に，通常の気体などの系ではみられない非常に興味深い現象を示してくれるのである[3]．

4.2 重力多体系の力学構造と基礎概念

4.2.1 重力多体系とは

（自己）重力多体系とは，ある系に粒子（天体）が複数個存在し，各々の粒子が系内の質点とみなせる他の粒子からの重力による万有引力のみ受けて，全体として束縛されながら運動している系を一般には指す．このような系が（準）定常状態の時に，粒子の運動がどうなっており，粒子のある場所での存在確率（密度分布に対応）や速度の分布がどうなっているのか，またその分布への進化などを探り出そうというのが，重力多体系での力学構造やその構造に至る緩和過程の問題である．このような，重力多体系での（準）定常状態やそれに至る緩和過程，また定常状態の安定性などの物理的特徴を“重力多体系の自己組織化”と呼ぶことにする．系が内包する“自己”の重力だけで，ある（準）定常状態に向かい，天体構造という“組織”を形成するからである．この自己組織化の解明が銀河といった天体の形成，進化の解明にとって重要となる．さらには，重力多体系での緩和過程は，後述するように長距離力系での“統計力学”の必要性を要求する格好の物理的題材にもなるのである．

4.2.2 太陽系の力学構造と多体系の問題

太陽系も自己重力多体系の一つである．ある惑星の運動は，他の惑星の質量が太陽に比べてはるかに小さいので近似的に太陽と対象としている惑星との２体運動として扱ってよく，惑星軌道はほとんどケプラーの法則に従う楕円軌道を描いてはいる．しかし実は，他の惑星からの効果は小さいとはいえ影響を受け，厳密には一定の楕円運動ではなく，複雑な変化をしていく．そして，ポアンカレの議論（位相空間での幾何学的，測度論的方法）によれば，太陽系はつぶれずに力学的に安定である可能性は非常に高いが，壊れてしまう可能性もわずかではあるが残されている．しかし，実際どうなるかは明らかではない．むしろ，“複雑”であるが故に“明らかではない”ことが明らかになったといえる[4]．このようにニュートン力学で一見，明らかになったと思えた太陽系での惑星の運動もでさえ，厳密には複雑な運動をする．したがって，同じような質量をもった粒子が３体以上多数個集まった系の問題，つまり多体問題を解くのは困難が予想される．実際，銀河のように恒星が約1000億個も集まっており，さらにはダークマターとよばれる正体不明だが，質量をもった物質が恒星以上の総質量をもってこの銀河には存在していると考えられている．このような銀河の力学構造，つまり重力ポテンシャルの形やその中での星の運動，星やダークマターのエネルギーおよび速度の分布関数は一体どうなっているのだろうか？このような問題を以下で考えてみたいと思う．

4.3 重力多体系進化の基礎方程式と定常解

4.3.1 ボルツマン方程式とポアソン方程式

まず，重力多体系の状態を記述するのは（確率）位相分布関数 $f(x, v, t)$ である．流体の場合だと，局所熱平衡に達する時間尺度が，系の力学的に進化する時間尺度や大局的熱平衡に達する時間尺度より十分小さいため，十分に早く局所的に熱平衡に達し（速度分布が決まる），その後の力学的進化は３次元的位置のみに依存する物理量（密度，平均速度，温度，圧力など）で流体の系は記述できる．しかし，重力多体系の場合は，一般に力学的に進化する時間尺度に比べて，局所熱平衡や大局的熱平衡に達する時間尺度が十分大きいため，重力多体系の進化は，３次元的位置以外に３次元速度にも独立に依存する．そのため，重力多体系の進化は一般的には位相分布関数を考える必要がある．

さて，位相分布関数の時間進化を記述するのが，いわゆるボルツマン方程式である[5,6]．ボルツマン方程式の中には，力を表す項が含まれるが，重力系の場合は，そこに重力ポテンシャルが含まれる．重力ポテンシャルは，密度分布，つまり位相空間分布によって決まるが，これを表す方程式が，ポアソン方程式である．つまり，重力多体系の進化を記述する基礎方程式は，ボルツマン方程式とポアソン方程式の連立方程式である．

4.3.2 衝突系と無衝突系

重力多体系を考える場合，大別して２種類ある．一つは，近接する２粒子（天体）がお互いの重力によって散乱する２体散乱の効果が効いている系で，衝突系と呼ばれる．そして，２体散乱の効果によって，系に含まれる粒子の速度分散（速度のばらつき度）が場所や速度の方向に依らずに一定となる緩和を２体緩和と呼ぶ．一方，２体散乱による効果が，考えている時間までに十分効いていない系のことを無衝突系と呼ぶ[6,7]．２体緩和が起こる時間尺度は，$t_{\mathrm{r}} \sim N/(4\pi lnN)t_{\mathrm{c}}$ で与えられる[6]．ここで，N は粒子数，t_{c} は，系の力学的時間尺度とよばれ，一つの粒子が系の端から端までを横切るのに必要な時間にほぼ相当する．ここで，２体緩和による時間尺度は，粒子数Nが増えると長くなることに留意すべきである．

さて，具体的な天体として，宇宙年齢の間に 2 体散乱の効果が効いている衝突系としては，球状星団，無衝突系としては，例えば銀河が挙げられる[6]．銀河団は，衝突系と無衝突系のちょうど境界あたりにある．以下では銀河といった無衝突系の力学構造に関して説明することとする．

4.3.3　無衝突系の定常解

無衝突系では，ボルツマン方程式に含まれる衝突項が平均重力場の項に比べれば十分小さくて無視できる．つまり，系の進化は無衝突ボルツマン方程式に従い，位相分布関数は，リウヴィルの定理に近似的に従う．ところで，ジーンズの定理により無衝突ボルツマン方程式の定常解は，運動の積分量（保存量）を通してのみ位相空間座標に依存することが知られている[6,7]．特に，強いジーンズ定理というのがあり，それによると，系のほとんどすべての軌道が，規則的であるとき，定常状態の分布は，3 つの独立な孤立積分の関数としてあらわされることも知られている（ただし，3 つの基本周期が通約できない場合に限る）．無衝突重力多体系の定常解の構築を考える際は，このように，系の積分量（保存量）に注目し，積分量のみに依存する位相分布関数を考えればよい．

4.4　緩和と力学構造

4.4.1　銀河と激しい緩和

銀河といってもサイズ，質量，形態，色などに関して様々なものが存在する．例えば，楕円銀河の特徴は，我々の天の川銀河にあるような渦巻きがなく，楕円型の形状をしている．新しい星を生み出す源となる冷たいガスはほとんどなく，星は新しくは生まれていないと考えられている．そこで，全体の総エネルギーは保存した（ハミルトン系），星とダークマターからのみなる重力多体系とみなして良いと考えられる．そして，楕円銀河でも比較的大きいものは，空間 3 方向で軸比が異なった形状である三軸不等楕円体をしていると考えられている．さらに，この形状は楕円銀河の回転速度が小さいことから，回転による遠心力の効果ではなく，速度分散に伴う“圧力”が重力を支えており，しかも速度分散が三軸方向で各々異なっていることが原因と考えられている[8]．また，大きな楕円銀河の特徴として，密度分布がドゥ・ボークルールの 1/4 則とよばれる分布に従っているなど[8]，共通の特徴がみられる．しかし，前述したように，楕円銀河は無衝突系であり，2 体緩和は宇宙年齢までには起こっていない．では，どうして個々の楕円銀河が似た共通の特徴を持つことができるのであろうか．何らかの緩和過程が起こったのだろうか？そこで，リンデンベルは，“激しい緩和”という緩和機構を提唱した[6,7]．これによれば，楕円銀河は，初期の状態では重力の平均場が空間的および時間的に激しく変動し，位相空間における位相分布が引き延ばしと折り畳みの効果によりミキシングしていく（位相分布は，リウヴィルの定理に従うため，位相空間上での要素“体積”は保存しながら，形を変形していく）．これは，まさしくハミルトン系のカオスの発生過程と同様である[9]．その結果，位相分布が変化しているスケールは，段々とより小さなスケールのみへと移行し，比較的大きなスケールで位相分布をならして粗視化してやると，巨視的には変化が起こらなくなる．粗視化した分布関数は，初期条件に依らなくなり，一種の緩和が起こると考えるものである．つまり，平均重力場によってカオスが起こり，系をある種の平衡状態（過渡的段階なので準平衡状態とよぶべきもの）へと導かれると考えたことになる．ハミルトン系では，一般にこういったカオスによる位相分布の位相空間でのミキシングと粗視化といった操作が緩和を起こす源であると考えられている[9]．リンデンベルは，無衝突系の楕円銀河でも，このような緩和が起こると提唱したことになる．

しかし一方，前述したように楕円銀河は速度分散が三軸方向で異なっているという非等方性があるが故に，三軸不等の形を保っている可能性が高い．つまり，速度分散の大きさは，流体だと“圧力”に相当するが，圧力が三軸方向で異なっているために，三軸不等楕円体の形になっていると考えられる．だとすれば，定常的な楕円銀河を形成する星は，ほとんど規則的な軌道でなければならない．なぜならばもし，完全にカオスであるとすれば，保存量はエネルギーしかなく，星の 1 体分布関数 f は，その星の全エネルギー E だけに依存する．すると，E は，運動エネルギーの部分のみを通じて速度の“大きさ”の自乗 v^2 だけに依存し方向に依らない．したがって，ある i 方向の速度分散は，$\langle v_i^2 \rangle = \int v_i^2 f(E) d^3v$ で与えられるが（平均速度はゼロとする），式からわかるように，速度分散は方向 i には依らずに等しくなり，等方となってしまう．つまり，三軸方向の速度分散が異なったものになるためには，f は E 以外に 2 つの（孤立）積分量 (I_1, I_2) に依存して，$f = f(E, I_1, I_2)$ となっていなくてはいけない．自由度 3 の系において，（孤立）積分が 3 個存在するということは，可積分系，つまり，規則的な系であることを意味する[10]．つまり，楕円銀河は規則的な軌道で構成されていることになる．

4.4.2　銀河の緩和の二面性と安定カオス

さて，ここで奇妙なことに気付く．リンデンベルは，楕円銀河の“緩和”はカオスによる位相空間でのミキシングによって起こると考えた．異なった銀河で共通点があるということは，何らかの緩和が必要で，その源は“カオス”であると考えられる．しかも，多体系の場合，カオスが生じるのは当然と考えられる．しかし，一方，そうやってできた楕円銀河の力学構造としては，個々の粒子は規則的な軌道を描いていると考えられている．この二つの事実は，矛盾するように思えるが，実際はどうなのだろうか．問題点を繰り返すと，一般的に 3 体問題でさえ，粒子は非常に複雑な軌道を描く．ということは，銀河の中の星の数を考えれば，当然複雑であり，カオスであることが期待される．しかし，三軸不等の形を保つためには，規則的な軌道でなくてはならない．この二面性はどう説明されるのであろうか？

さて，カオス力学の研究においてもいろいろなカオスの状態が存在することが研究で明らかになっている．例えば，カオスであってもトーラスの周りにまとわりつき，長い間，一見規則的な運動を行い，相関がかなり長時間残る

淀み運動[10]や遅い運動[11]とよばれるものがある．これらは，カオスではあるが，一見，ある時間範囲では規則的運動とは見かけ上変わらないようにみえる（ここではこのようなカオスを“安定カオス”と呼ぶこととする）．これらの運動の一部は，相空間での残留トーラスの複雑な（自己相似的，フラクタル的な）構造がもたらすものと考えられている．例えば，淀み運動は，位相空間内で，淀み層とよばれる残留トーラスが密に存在する領域で，残留トーラスの周りに“まとわりついている”と考えられているが，残留トーラスのサイズが，フラクタル的に分布していることを反映して，淀み層に滞在する時間の分布がベキ則であらわされる[10]．

さて，楕円銀河内の星の軌道ももしかしたら，カオスだが，長時間にわたって近似的に規則的な軌道になっているのではないだろうか．だとすれば，前述した矛盾点もある程度解明するが，この答えはまだ明らかではない．そこで，我々は粒子が多く存在する大自由度系，しかも重力のような長距離力のみが働いている重力多体系の緩和へ至るプロセスや行き着く先の力学構造はどうなっているのだろうか，という問題を設定し，それを解明していきたい．そのため，まず我々は解析が困難な3次元系である銀河を直接扱うのではなく，研究の第一歩として，広い時間にわたった運動を正確に計算することができ，なおかつ重力の長距離力としての特徴が損なわれない単純なモデルである，1次元重力シート系での研究を行った[12-15]．次では，その結果について報告することとする[3]．

4.5 カオス的遍歴と熱平衡〜新しい統計力学の必要性〜

4.5.1 1次元シート多体系

無限に広がった一様なシートが複数存在し，それに垂直な一方向（ここでは x 方向とする）のみに運動する系を考える．この系の自由度は1であり，お互いのシートが作る重力のみで運動する系なので，1次元重力シート多体系とよんでいる[12]．このシート系でのハミルトニアンは，$H = m/2\cdot\sum_i v_i^2 + (2\pi Gm^2)\sum_{i\neq j}|x_i - x_j|$ と書くことができる．ここで，(x_i, v_i) は各々，シートの位置と速度を表し，m はシートの面密度を示す．重力ポテンシャルの形からわかるように，シートがつくる重力は，一定となっている．このモデルでは，シートの交差が起こったときは，お互いにすり抜けると考える．シートの運動は，シートが交差するまでの解析解をシートが交差する毎につないでいくことによって計算できる．そのため，高精度で数値実験できるメリットがある．

4.5.2 緩和過程とカオス的遍歴

さて，この系の進化を一般に非平衡状態である初期状態から追うと以下のようになる[12-15]．先ず，動力学的平衡状態（ビリアル平衡）[6,7]が達成する．この状態は，重力エネルギーが運動エネルギーの2倍になり，いわば重力と運動エネルギーによる“圧力”とが等しくなり釣り合うところで起こる．力学的時間尺度 t_c の数倍の時間で達成される．この場合のビリアル平衡状態は初期条件に依存する．その後，系は平均場の時間振動や近接シートによる“衝突”（離散的なシート分布に起因する平均場からのずれ）が効き始め，ある種の緩和が起こってくる．我々の研究結果によると，まず t_c の N（シート数）倍あたりで，微視的緩和というものが起こる．この緩和では，シートのエネルギーの変化およびシート間のエネルギーの交換が十分に起こり，シートのエネルギー等分配が成立している．しかし，系の巨視的な分布（1体のエネルギー分布関数）には，変化は見られない．このように，この微視的緩和過程では微視的には緩和しているようにみえるのだが，巨視的には緩和していない状態であって，“準平衡状態”とよぶこととする．さて，その後は，$t\sim 10^4 Nt_c$ のあたりで，ようやく巨視的な変化が見られる．この時間尺度は，初期条件として，water bagとよばれる場合の値で，初期条件によって，この時間尺度は異なる．このとき系の状態として，大きなエネルギーを持ったシートが現れる．この状態を，“遷移状態”と呼ぶこととした．しかし，その後も系は変化し，再び元の“準平衡状態”に近い状態に戻る．さらに，系は“遷移状態”と，“準平衡状態”の間を行ったり来たり遍歴するが，両状態ともまったく同じ状態を繰り返しとることはない．この遍歴現象がずっと続くのである．カオス研究の中で，大域結合マップなどにみられるカオス的遍歴[16]に近い現象であると考えられる．また，各々の状態に滞在する時間の確率分布はベキ則に従っていることもわかった．この現象は，4.4.2で記述したような安定カオスの性質の一つである．

4.5.3 平均場 vs. ゆらぎ

系がカオスかどうかを定量的に判断する方法として，軌道の不安定性を表すリヤプノフ数 λ が用いられる[9]．λ が正の場合はカオスで，ゼロの場合が規則的となる．さて，そのリヤプノフ数 λ が，シート数 N がある程度を超えると，N の増加に伴って，減少することがわかった（最大のリヤプノフ数は，$N^{-1/5}$ に比例する）．$\lambda>0$ がカオスの条件であるので，$N\to\infty$ では，この系はカオスではなくなると期待される．一般的に3体以上の問題になると解は複雑であるが，N が無限大ではむしろカオスではないのである．これはどういうことであろうか．実際，1次元シート系では，解析的に解けるのはやはり，2シート系のみであり，一般に3シート以上の系では解析的には解けない．そして，N の増加とともに，リヤプノフ数は増加して，カオス性が強まる．ところが，N が20のあたりを境にして，これ以上 N が増えると，逆にリヤプノフ数は減少するのである．その理由は，まずカオスを発生させる源は主に，平均場からのずれである，“衝突”の効果である．この“衝突”の乱雑性により，カオスが生じる．しかし，シート数 N が大きいと，この効果に比べて，平均的な重力の効果の方が圧倒的に大きくなる．そもそも4.3.2では，3次元重力系での2体緩和の時間尺度を示したが，粒子数 N を大きくすると，緩和時間は長くなり，なかなか緩和できない．つまり，N を大きくすると3次元系でも同様に衝突の効果がないことを物語っていた．系全体からの平均場は，一般的に全体を“そろえる”という規則的な運動に系を導く方向に

働くと考えられる．この平均場による規則化と“衝突”による乱雑性との競合過程が起こる．それが，N の増加とともに，平均場の効果が勝ってくるのである．実際，カオス的遍歴を示す，大域結合マップでは，平均場の効果とカオスを発生させる乱雑性の効果を一緒に取り入れたモデルとなっており[16]，そのバランスによってカオス的遍歴が起こっている．１次元シート系も本質的には同等であると言える．N が有限の場合，この平均場とゆらぎ（“衝突”）の共存により，前述したような遍歴現象が長くみられるのだろう．N を無限にすれば，平均場のみが効き，系全体は規則的になるのであろう．

4.5.4　１次元重力多体系の“緩和”と“熱平衡”

さて，１次元シート系は遍歴を続けるのだが，１つの状態に滞在する時間尺度として，$t \sim 10^6 Nt_c$ を超える状態はほとんど存在しない（それより短い滞在時間に関しては，ベキ則にしたがって，分布している）．そこで，$t \sim 10^6 Nt_c$ の時間尺度で系を長時間平均すれば，確かにエルゴード性が成立しており，系のエネルギー分布関数は等温分布（ミクロカノニカル分布）になっている．１次元重力系は３次元系と違って，エントロピーの最大値が存在し，それが等温分布に対応している．つまり，１次元シート系は，$t \sim 10^6 Nt_c$ の時間尺度で“緩和”すると考えて良い．しかし，我々が統計力学で言っているところの気体などの緩和とは少し意味が違う．普通の緩和は，緩和時間を過ぎると熱平衡状態になり，“いつ見ても”巨視的にはほぼ同じ分布（マックスウェル・ボルツマン分布）を観測できる．これに対し，１次元シート系では，確かに，緩和時間でエルゴード性が成立して，長時間平均がミクロカノニカル分布に等しくなるのだが，“いつ見ても”ミクロカノニカル分布になっているわけではなく，緩和時間以後でも等温分布と違った分布を遍歴していることは留意すべきである．

4.5.5　緩和時間

１次元シート系の緩和時間は，どのような力学量と関連しているのであろうか？カオス的遍歴の（$2N$ 次元）位相空間での様子を推測した模式図を**図２**に表した（１次元シート系は，１自由度であり，１シートにつき，位置と速度の２次元情報をもち，シートが N 枚あるので，系全体での位相空間は $2N$ 次元となる）．おそらく，ある状態にしばらく軌道が閉じこめられるバリアが存在するのであろう．そのバリア間を遷移していくと推測される．そして，そのバリアが位相空間でフラクタル的に分布していることによって，ある状態の滞在時間の確率分布が（ある最長の滞在時間までは）ベキ則を示すと考えられる．すると，系の緩和時間は，ある状態に滞在できる最長の時間にほぼ等しいと考えて良いだろう．では，こういった時間尺度は，どのような微視的力学量から求められるのだろうか？位相空間での幾何学的手法による解析が必要かもしれない．

4.5.6　３次元重力多体系は？

以上では１次元系の結果しか示していないが，実際の３次元系ではどうなっているのであろうか？３次元系でも長距離力であり，粒子数が増えれば増える程，平均場の効果が効いてくるという性質は１次元系と同様である．したがって，２体緩和の効果（平均場からのずれ）が効きだしても，１次元シート系と同様に複雑な遷移現象が期待されるのだが，まだ明確にはわかっていない．また，楕円銀河の場合は，そもそも２体緩和の効果は現在までには効いていない．無衝突系のままである．したがって，初期条件の影響をまだ強く反映しているはずである．にもかかわらず，共通の特徴も見受けられる．しかし，リンデンベルの提唱したような，位相空間での完全なミキシングは期待できない（“衝突”が効くようになっても，１次元系では遍歴を続けていた．いわんや，無衝突系では平均場の振動などの影響のみでミキシングが起きるはずだが，その効果は小さいだろう）．むしろ，トーラスの近傍を徘徊する，規則的な振る舞いを示すはずである．しかし，共通の特徴があるとすれば，巨視的に同じ特徴をいくつかもつ程の部分的なミキシングによる緩和の効果があるのか，初期条件に共通した要素があるのか，どちらかであろう．だが，これもまだ明らかではない．いずれにせよ，銀河の重力ポテンシャルは１次元系とは全く異なるが，大自由度の重力多体系の緩和に対する問題点としては１次元系の場合と同様であろう．

4.5.7　集団運動の規則性と新たな統計力学の必要性

通常の気体などの短距離力系の場合，大自由度，つまり粒子数が多ければ，個々の粒子の軌道はカオスとなり，個々の軌道は予測不可能となってしまうが，逆に大自由度であることが幸いして，統計力学を用いて緩和後の巨視的な系の状態を予測することが可能となった．まさに，統計力学の勝利である．しかし，重力多体系では，前で示したように，１次元系の場合，大自由度になればなるほど，カオス性は薄れてしまい，集団としてのコヒーレントな運動が顕著になる．カオスという性質を使って統計的に予測できたことが不可能になる．しかも有限の自由度では，カオスと規則性との競合により，複雑な遷移現象を起こす．エ

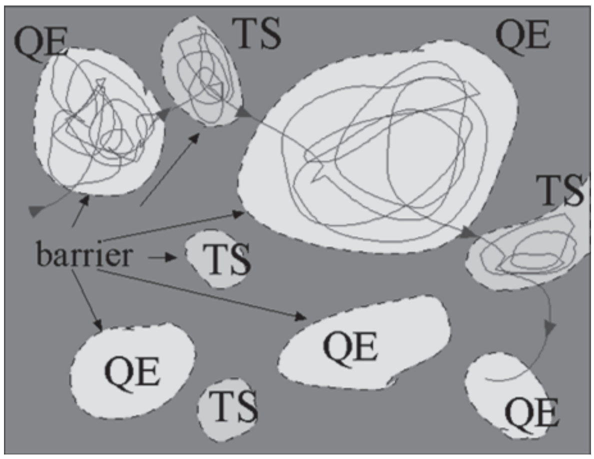

図２　（２N 次元）位相空間中での軌道（系全体の状態の進化をあらわす）の概念図．“準平衡状態”（QE）や“遷移状態”（TS）を与える領域（バリア内）に軌道が閉じ込められて，その状態に滞っている場合と別の領域へ移っていくことが繰り返されていく．いずれ位相空間全体を軌道が覆うと，エルゴード性が成立する．バリアは位相空間内に密に分布しており，そのサイズ分布はフラクタル的（ベキ則）であると推測される．

ルゴード性が成立し，長時間平均＝位相平均が成立したとしても，系全体の分布は等温分布にはとどまらない．では，この遷移に関する何らかの規則性を見いだすことができるのだろうか？また，緩和時間は，何らかの力学量と結びつくのだろうか？系の巨視的な状態の変化を“集団運動”と呼ぶことにすれば，まさに，重力多体系における集団運動の規則性を何らかの法則で予測することができるのかという問題である．ハミルトン系である以上，ハミルトニアンを与えれば，本来はその系の力学状態は“決まって”いるはずである．ただ，個々の軌道をすべて長時間追うのは困難であり，何か新たな方法（長距離力系での統計力学とよぶべきもの）から，“集団運動”の規則を導き出せないのだろうか？漠然としているが，何か新しい数理物理の概念手法，例えば位相空間内の幾何学的，あるいは測度論的方法が必要な気がしている．

4.5.8　現実の力学構造は？

いずれにせよ，重力多体系を含め，長距離力が働き平均場が効くような系の自己組織化に関する研究は発展途上である．しかし，カオスや複雑系といった力学系の研究が進み，新しい概念・手法が発展してきているのは間違いない．また，コンピュータの進歩により，様々なモデルでの力学進化を数値実験できるようになってきた．ただ，現実の重力多体系の力学構造を考えると，実は太陽系以上の（束縛された）重力多体系の現実の力学構造をまだ誰も知らないのである．天文学はもちろんのこと，自然科学においては，やはり，実際の自然がどうなっているかという“事実”がわからないと研究のさらなる進展が困難となる．そこで，一番身近であり，近未来に一番詳細かつ精密な観測により力学構造が解明できる可能性がある，天の川銀河の力学構造を観測で構築する計画が進み出している．太陽系と新しい星やガスを多く含むディスクと呼ばれる部分を大きく取り囲むハロー構造と呼ばれる部分や天の川銀河の中心部をとりまくバルジ構造という部分の力学構造も銀河の形成・進化，銀河中心での巨大ブラックホール形成とも絡んで天文学上でも関心をよんでいる[1]．また，バルジは楕円銀河と同様に三軸不等楕円体であり力学的にも興味深い．これらの力学構造を明らかにするために，天の川銀河内の星の位置，運動といった軌道を明らかにする必要がある．つまり，今まで知り得なかった天の川銀河内の個々の星の６次元位相空間での情報を明らかにし，現実の天の川銀河の力学構造を解き明かしていく必要がある．

4.6　赤外線位置天文観測衛星（JASMINE）による天の川銀河の力学構造構築

4.6.1　位置天文学

4.5.8で述べたように，現実の重力多体系の力学構造，例えば，天の川銀河の力学構造を知るためには，星の３次元位置と３次元速度の情報が必要となってくる．天文学では，星の天球上での位置とその動きを測定し，星までの距離や運動速度を導出する分野を位置天文学と呼ぶ．星の天球上での動きから，年周視差法と呼ばれる三角測量の原理で星までの距離を求め（**図3**参照），また天球上を横切る星の角速度から，星までの視線方向に垂直な接線方向の星の速度成分を導き出す[1]．

4.6.2　位置天文学の歴史的背景

位置天文観測は天文学において最も古い分野であり，脈々と続けられてきている人類の営みである[1]．ただ，地上観測においては，大気のゆらぎや装置の重力変形などの影響もあり，20世紀には測定精度に限界がきていた．そのため，分光，測光，高分解イメージなどの他の観測手段に比べて，天体物理学や宇宙物理学へのインパクトが弱いものになっていた．ところが，20世紀の末，ヨーロッパ宇宙機関（ESA）が世界で初めての位置天文観測衛星HIPPRCOS（ヒッパルコス）を打ち上げ，地上の観測精度に比べて一桁以上もの精度向上を果たした．これは，画期的な進展であり，位置天文観測を用いた新たな天文学，天体物理学の幕開けとなった．ただ残念なことにヒッパルコス衛星の精度は，年周視差では，１ミリ秒角であり，この精度ではまだ，我々から高々300光年以内の星までの距離しか年周視差で正確に求めることはできていないのである．天の川銀河全体（太陽から銀河系中心まででも約８kpc，２万６千光年におよぶ）に比べればはるかに小さいスケールである．そこで，当然ながら，世界の位置天文コミュニティは，太陽系から３万光年先までの正確な距離測定を行うため，ヒッパルコス衛星よりもさらに２桁も高精度な10マイクロ秒角（10万分の１秒角）精度の測定をめざして，あらたな位置天文観測衛星の計画に乗りだした[1]．

4.6.3　位置天文学の国際的状況とJASMINE計画

前述した歴史的背景のもと，３万光年にわたる星の距離測定が可能な10マイクロ秒角クラスの測定精度をもつ位置天文観測衛星の計画が世界的に進められている．全天を観測し，例えば可視光で15等級の星に対して，12〜25マイク

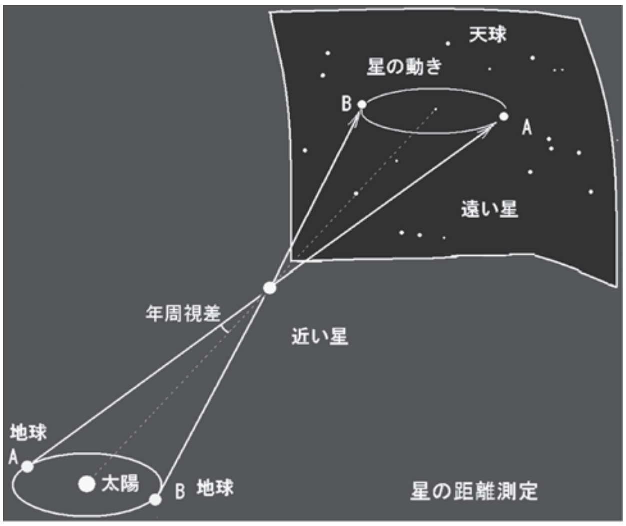

図３　年周視差法による星までの距離測定．地球の太陽周りの公転運動から，星は地球から眺めると見かけ上，天球上を一般的に１年周期の楕円運動する．その楕円の長半径を年周視差と呼ぶ．三角測量の原理により，年周視差が，大きければ星は近く，逆に小さければ，星が遠いということがわかる．なお，天文学では，年周視差が１秒角になる星までの距離を１パーセク（約3.26光年）と定義して，パーセクという距離単位をよく用いる．

ロ秒角精度で観測するヨーロッパのGaia計画が2013年の打ち上げ予定で進んでいる[17]．Gaiaは可視光線での観測となる．一方，多くのダスト（塵）で覆われ，可視光線ではダストに吸収されて十分に高精度で観測できない天の川面，特に**図4**のようにバルジ領域方向のみを（ダストによる吸収を受けにくい）近赤外線で観測するのがJASMINE（ジャスミン）計画である[18]．このように，JASMINEは，唯一の赤外線位置天文観測衛星計画であり，海外の計画ではできない多数のバルジ星の高精度位置天文観測が可能という優位性をもつとともに，世界各国の衛星が相補的役割をはたしており，日本はバルジ領域を担当する役割を世界から強く期待されている．世界全体の協力，役割分担で天の川銀河の全貌がつかめることになる．

4.6.4 JASMINE計画シリーズ

国立天文台JASMINE検討室を中心として，JAXAや京都大学等の協力のもと，JASMINE計画が進められている[18]．計画では，超小型衛星，小型科学衛星，中型科学衛星を順番に打ち上げて観測能力を上げながら科学的成果をあげていく予定である．これらの計画を「JASMINE計画シリーズ」と呼んでいる．なお，段階的に行うのは，位置天文観測は観測装置や衛星システムに対して非常に厳しい技術的要求を課すため，技術的蓄積を積みながら技術的実現性を順次高め，より大きな科学的成果の達成をめざすためである．各々の衛星計画の概要は以下の通りである．

(1) Nano-JASMINE計画：国立天文台，東京大学，京都大学を中心として開発を進めている超小型衛星．主鏡口径5 cm，重さ35 kg，サイズ50 cm立方程度の衛星．ウクライナのサイクロン－4ロケットに搭載され，ブラジルのアルカンタラ発射場から2011年度に打ち上げられる予定．日本で初めての位置天文観測衛星であり，ヒッパルコス衛星に続く，世界でも2番目の位置天文観測衛星となる．実際の宇宙軌道上での技術的蓄積や経験を積むとともに，世界的な科学的成果もめざしている．zw-バンド（波長領域が0.6ミクロン～1.0ミクロン）での全天位置天文カタログを世界で初めて作成する．超小型衛星とはいえ，検出器の技術革新などにより，Nano-JASMINE単独では，ヒッパルコス衛星と同程度の観測精度の達成を目標とする．さらに，ヒッパルコスによる恒星の位置カタログと組み合わせることにより，これまでより一桁精度の高い運動情報を含む位置天文カタログが作成できる．なお，Nano-JASMINE計画は順調に進み，2010年末には実際に打ち上げる衛星（フライトモデル）の組み立ては完了した．

(2) 小型JASMINE計画：Nano-JASMINEに引き続く計画．JAXAの小型科学衛星シリーズへのミッション提案を予定しており，打ち上げ目標は2017年度頃．望遠鏡の主鏡口径は30 cmクラス，衛星重量は約400 kgとなる．バルジ中心付近（天の川銀河中心付近）の数平方度方向をメインの観測領域として，Hw - バンド（波長領域が，1.1～1.7ミクロン）の近赤外線で観測する．位置天文精度は，精度がもっと良い箇所で10マイクロ秒角をめざす．これによって，バルジの星の初めての直接的な高精度距離測定と接線速度測定を行う．

(3) （中型）JASMINE計画：小型JASMINEに続く，中型科学衛星クラスの計画．打ち上げ目標は2020年代前半．望遠鏡の主鏡口径は，80 cmクラスとなる．位置天文精度は，小型JASMINEと同様の10マイクロ秒角をめざす．ただ，小型JASMINEよりサーベイ領域がかなり広くなり，バルジのほぼ全領域を覆う，天の川銀河中心を中心とした，20度×10度の領域をKw-バンド（波長領域が，1.5～2.5ミクロン）の近赤外線でサーベイする．観測手法，データ解析方法は，小型JASMINEとほぼ同様である．科学的目標としては，小型JASMINEで先駆的研究を行い，中型JASMINEにおいて，バルジに関する研究の完全実現をめざす．

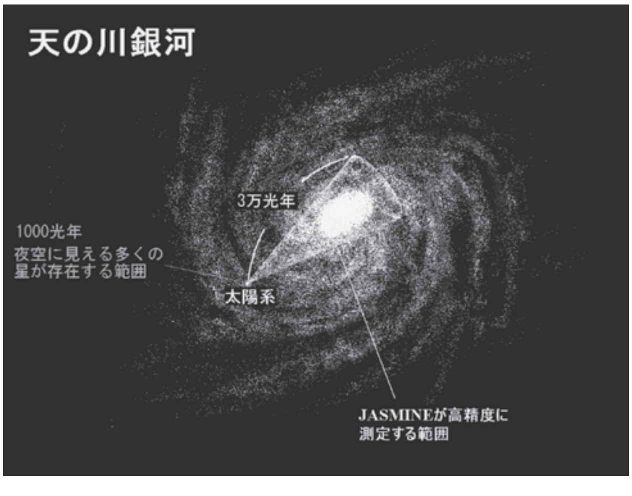

図4 赤外線位置天文観測衛星（JASMINE）が高精度（10マイクロ秒角）で星の位置や距離，運動を測定する領域．現在は，まだ太陽系から約300光年以内しか正確に距離が測定されていないが，今後は，3万光年先までの星の距離や運動が正確に測定できるようになる．

4.6.5 力学構造の構築方法

天の川銀河の力学構造を知ることは，天の川銀河の形成史といった天文学的興味以外にも，前述したように，重力多体系の緩和過程や定常状態の物理的解明というアカデミックな研究にとっても重要である．さて，力学構造を“知る”というのは，その構造の重力を形成している構成要素（重力を担うすべての物質，つまり重力物質）の位相分布関数を知ることである．位相分布関数が出せれば，それを用いて（ポアソン方程式を通じて）重力ポテンシャルや速度分布，密度分布などが導出できる．さて，この位相分布関数を位置天文観測から得られる5次元情報（天球上の星の位置，つまり2次元的位置，天体までの距離（年周視差による），固有運動（視線に垂直方向の速度）），および他の分光観測で測定した視線速度を加えた6次元情報（つまり，3次元的な位置と3次元速度ベクトル）から構成物質の分布関数を導出しなくてはいけない．ただ，位置天文観測と視線速度観測により，“星”の6次元位相分布関数がわかるからといって，これがそのまま力学構造を知ること，つまり“重力物質”の重力ポテンシャルや位相分布関

数を知ることにはならないことを注意すべきである．それは，観測されるのは，重力物質のうちのごく一部だということである．つまり，観測される星以外にも観測限界より暗い星，さらには星以外のダークマターが存在すると思われる．力学構造の構築とは，こういったすべての重力物質の位相分布関数やそれらが作る重力ポテンシャルを知ることにある．つまり，観測されている一部の星のデータから見えていないすべての物質がつくる位相分布関数や重力ポテンシャルを構築する必要がある．では，どのように構築するのか，その方法について以下記述する．

観測される一部の有限の星のデータから，すべての重力物質による重力ポテンシャルや位相分布関数を求めるには先ず，理論的なモデルによる力学構造のテンプレートを用意する．そのモデルでは，重力ポテンシャルの形状が仮定され，それをもとに位相分布関数は理論的に評価されている．このようなテンプレートを考え得るだけ多く用意しておく．そして，そのテンプレート，つまり理論的に評価された位相分布関数（確率分布関数）と観測値とを比較することによって（相関をとる），どのテンプレートが一番観測データをうまく説明できるかを統計的解析によって見つける．そうやって得られたテンプレートが，観測事実をもっともよく説明できる力学構造となる．このような手法により力学構造の構築を行う必要がある．そこで先ず任意の重力ポテンシャル中での（定常状態での）位相分布関数を構築する方法を開発する必要がある．その際，ジーンズ定理により，位相分布関数は積分量のみに依存するので，ある与えられた任意のハミルトニアン（規則的軌道が多い場合に限る）に対して，積分量をまず見つける．そして，その系がその積分量をもつウェイト，つまり位相分布関数の形を求める必要がある．我々は与えられた系での積分量を数値的に求め，観測で得られる(x, v)座標と積分量との関係を付ける方法として，不変トーラス fitting 法と呼んでいる方法を現在開発中である．また，位相分布の関数形を求めるために，軌道の重み評価法（位相分布関数の導出）の確立をめざしている．最後に，こうして得られた理論的な位相分布関数と実際の観測データとの（統計的）比較方法の確立を行う予定である．

4.7 最後に：重力多体系と非中性プラズマ，ビーム物理の自己組織化

いままで，重力多体系の力学構造に関して，（準）定常状態への緩和過程で短距離力系にはみられない現象が起こること，新しい統計力学の必要性，さらに自己組織化した現実例である（銀河の）力学構造の構築方法などに関して記述してきた．ところで，4.6.5で記述した位相分布関数構築法は無衝突ボルツマン・ポアソン方程式系に従う多体現象一般に対し拡張可能である．例えば，非中性プラズマの場合は，クーロン力が重力の場合と同様に長距離力の性質をもち，同等に扱うことが可能である．また，加速器中を相対論的速度で伝搬するビームをその重心系で眺めれば，実験室系で静止した非中性プラズマとまったく同等であることから，ビーム物理も同等に扱うことが可能である．このように，無衝突ボルツマン・ポアソン方程式系では，定常解の構築方法といった手法の共通利用が可能である．さらに，手法利用のみならず，緩和過程や，定常解の安定性の議論において，共通的な現象，もしくは異なる現象をもとに，長距離力系での進化に関して新しい物理的理解が可能かもしれない．したがって，分野を超えた相互協力によって，重力多体系，非中性プラズマ，ビーム物理学等が扱う長距離相互作用する粒子系全般の自己組織化現象に対する統一的理解と新展開を今後是非期待したい．

なお，本章の一部は数理科学（サイエンス社）2000年3月号に掲載された筆者の記事[3]をベースにしたものであることを申し添えておく．

参 考 文 献

[1] 郷田直輝：天の川銀河の地図をえがく（旬報社，2009）．
[2] 谷口義明・岡村定矩・祖父江義明編：シリーズ現代の天文学「銀河I」（日本評論社，2007）．
[3] 郷田直輝：自己重力多体系の物理（数理科学，2000年3月号）．
[4] 丹羽敏雄：数学は世界を解明できるか（中公新書，1999）．
[5] 観山正見・野本憲一・二間瀬敏史編：シリーズ現代の天文学　天体物理学の基礎Ⅰ（日本評論社，2009）．
[6] 加藤正二：天体物理学基礎理論（ごとう書房，1989）．
[7] 観山正見・野本憲一・二間瀬敏史編：シリーズ現代の天文学　天体物理学の基礎Ⅱ（日本評論社，2008）．
[8] 家　正則：銀河が語る宇宙の進化（培風館，1992）．
[9] 中野藤生・服部眞澄：エルゴード性とは何か（パリティ物理学コース，丸善，1994）．
[10] 相沢洋二・原山卓久：カオスを視る（別冊・数理科学，1998年10月号）．
[11] 小西哲郎：大自由度ハミルトン系（数理科学，1999年8月号）．
[12] 土屋俊夫，郷田直輝，小西哲郎：重力シート多体系の緩和過程とカオス的遍歴，日本物理学会誌 **52**, 738 (1997).
[13] T.Tsuchiya, T.Konishi and N.Gouda, Phys. Rev. E **50**, 2607 (1994).
[14] T.Tsuchiya, N.Gouda and T.Konishi, Phys. Rev. E **53**, 2210 (1996).
[15] T.Tsuchiya, N.Gouda and T.Konishi, Astronomy and Space Science, **257**, 319 (1997).
[16] 金子邦彦・津田一郎：複雑系のカオス的シナリオ（朝倉書店，1996）．
[17] Gaia 計画：http://www.rssd.esa.int/index.php?project=GAIA&page=index
[18] JASMINE 計画：http://www.jasmine-galaxy.org/index-j.html