

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 23 日現在

機関番号：17701

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2016

課題番号：15K13536

研究課題名(和文)重力で結合した多体振動子における協同現象と自己組織化

研究課題名(英文)Structure formation of self-gravitational oscillator system

研究代表者

和田 桂一(Wada, Keiichi)

鹿児島大学・理工学域理学系・教授

研究者番号：30261358

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,100,000円

研究成果の概要(和文)：1次元振動子系として進化を調べる数値計算コードを作成し、位相空間での振る舞いを調べた。また、2次元回転系で、中心力場中での自己重力相互作用する粒子系の進化を調べるための重力多体計算コードを作成し、無衝突粒子回転円盤において、粒子数1000から10000個程度で、非定常渦巻き構造を再現した。その構成要素(粒子)の集団運動の解析から、角運動量-Jacobi積分空間において、非定常渦巻き構造の粒子は円運動から制限される領域から大きく外れずに、非線形振動することがわかった。これは渦巻き構造に起因する重力ポテンシャル自体の摂動が引き起こすレゾナンスによる粒子散乱が構造形成の主因ではないことを示唆する。

研究成果の概要(英文)：We have made a numerical code to investigate evolution in phase and real spaces of one-dimensional oscillators interacting each other with a long-range gravitational-like force. We also developed a N-body code for 2-dimensional rotating disks consisted of many interacting particles in an external potential. Non-steady spiral-like structures are self-developed, and we analyze their group behavior in angular momentum-Jacobi integral spaces (E-J space). We found that the particles in the non-steady spirals non-linearly oscillate in the E-J space along the critical curve. This suggests that the structure formation in the real space does not result in the scattering by dynamical resonances due to the non-steady spiral arms.

研究分野：Astrophysics

キーワード：spiral structure N-body system

## 1. 研究開始当初の背景

銀河は約1千億個の恒星からなる系だが、その最も特徴的な構造は渦巻き腕 (spiral arm) である。渦巻き腕は銀河によってさまざま形態 (本数や巻き込みの角度、強さ) をしているが、差動回転する銀河円盤で定常的な構造を実現するメカニズムとして密度波仮説、すなわち渦巻き腕は恒星系円盤を伝播する「波」である、というのが定説であった。ところが、近年恒星系円盤を重力で相互作用する多数の粒子の系、すなわち重力多体系として表した N-体シミュレーションによって、渦巻き腕は非定常的であり、生成や消滅を繰り返す、単純な波ではないとがわかってきた。

しかし、その物理メカニズムは不明であった。

恒星系円盤では、粒子 (恒星) の平均自由行程が長く (無衝突系) かつ、自己重力によって構造と構成粒子が相互作用している。これは、渦巻き腕=波として流体的な振る舞いを考える古典的な理論との決定的な違いである。構成粒子はポテンシャルを作るため、粒子の運動 (振動) と構造は非線形に結びついているが、その詳細は不明である。一方、非線形物理学では古くから散逸系において振動子の同期現象が調べられ、またハミルトン系の緩和過程においても動的な構造形成があることが知られており、銀河渦巻き構造との類似関係には本質的な物理が隠されている可能性がある。

非定常渦巻き構造は理論シミュレーションによって発見された比較的新しい現象であり、天文学業界で40年以上前に提唱されたものの、多くの矛盾点がある定常密度波仮説を置き換えるパラダイムとなる可能性がある。そのためには、なぜ構造が発現するのか、なぜ非定常になるのか、なぜ完全に熱平衡にならないのかという基本的な物理が明らかになることは非常にインパクトがある。加えて、天の川銀河系の10億個の星の位置・速度情報が得られる天体位置測定衛星 GAIA が打ち上げられたことにより、太陽系近傍の渦巻き腕に付随した恒星の6次元位相空間情報が得られ、非定常渦巻きが観測データによって裏付けられる可能性もある。

## 2. 研究の目的

恒星系円盤では、粒子 (恒星) の平均自由行程が長く (無衝突系) かつ、自己重力によって構造と構成粒子が相互作用している。これは、渦巻き腕=波として流体的な振る舞いを考える古典的な理論との決定的な違いである。構成粒子はポテンシャルを作るため、粒子の運動 (振動) と構造は非線形に結びついていると考えられるが、その物理過程を粒子の非線形振動の観点から調べる。比較的結合が弱い場合についてはよく研究されているが、振動子自身のポテンシャルが外場に影響を与え、さらに振動子が自由に動くような非線形性が

強い問題は未開拓の分野である。自己重力系の場合、1次元シート系の緩和過程についてはよく調べられているが、銀河円盤のような回転2次元系での自己重力による構造形成を非線形振動子系として理解する端緒となる研究を行う。

## 3. 研究の方法

(1) 本質的には2次元回転系の問題である銀河円盤中の恒星の軌道と渦巻き構造の関連を明らかにするために、遠距離相互作用する1次元多体振動子系での位相空間での構造形成を調べる。粒子間距離  $x_{ij}$  に対し、 $1/x_{ij}^2$  に比例した力で相互作用する振動子の進化について、位相空間上での秩序的な構造と実空間での密度構造の関係を調べる。実際の銀河円盤での密度の粗密が渦巻き腕に相当する。

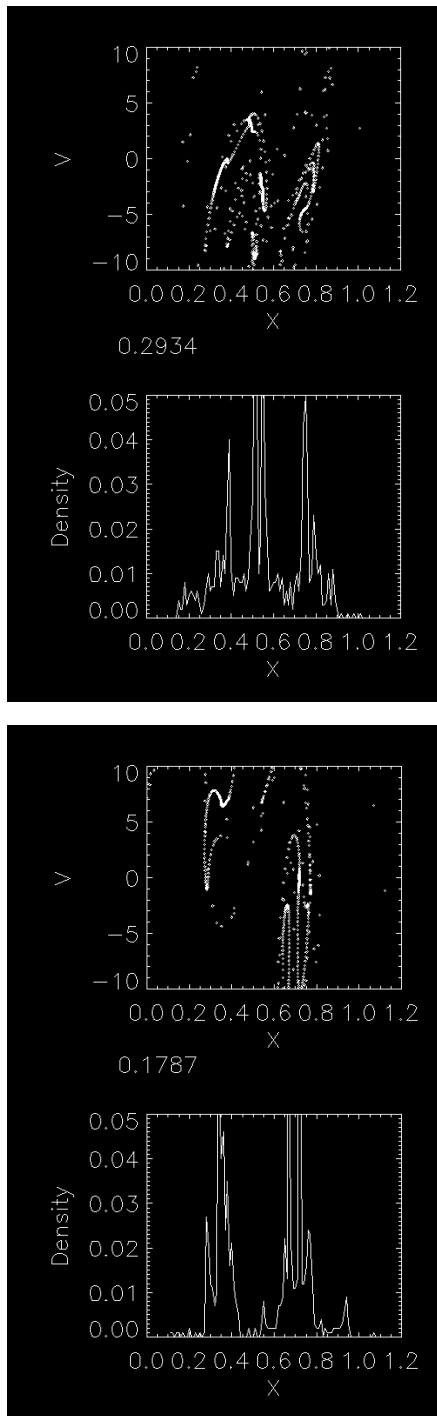
(2) 外場 (銀河の場合はダークマターポテンシャル) 中の2次元回転系の N 体シミュレーションで見られる角運動量-Jacobi 積分平面での非線形振動現の考察をする。角運動量-Jacobi 積分平面の critical curve 付近 (円運動) での非線形振動と1次元振動子との関連、および実空間での構造形成との関連を調べる。

## 4. 研究成果

第一年度に自己重力かつ無衝突系である恒星系の力学進化のモデル化を行った。本来2次元、もしくは3次元の現象だが、1次元振動子系として進化を調べる数値計算コードを作成し、位相空間での振る舞いを調べた (図1)。

また、2次元回転系で、中心力場中での粒子数100個程度の自己重力相互作用する粒子系の進化を調べるための重力多体計算コードを作成した。2016年3月にメルボルン工科大学 (オーストラリア) において、銀河中心領域の自己重力多体系の力学進化と構造形成についての議論、研究を行った。その成果は出版準備中である。

図1： 多数の相互作用する1次元振動子の位相空間(速度-位置)と実空間の構造(密度分布)。それぞれの振動子は逆2乗則に従って、引力を及ぼし合う。2つの違う時間を示す。



第二年度は、2次元の無衝突粒子回転円盤において、重力と同様に逆2乗則に従う相互作用をする粒子系の進化を計算し、粒子数1000~10000個程度で、非定常渦巻き構造を再現した。その構成要素(粒子)の集団運動について解析したところ、角運動量-Jacobi積分空間において、非定常渦巻き構造の粒子は円運動から制限される領域から大きく外れずに、非線形振動することがわかった。これは渦巻き構造に起因する重力ポテンシャル自体の摂動が引き起こすレゾナンスによる粒子散乱が構造形成の主因ではないことを示唆する。しかし、角運動量-Jacobi積分空間で非線形振動する粒子群の自己発現的な構造と実空間での非定常構造の直接的な関連については今後の研究が必要である。

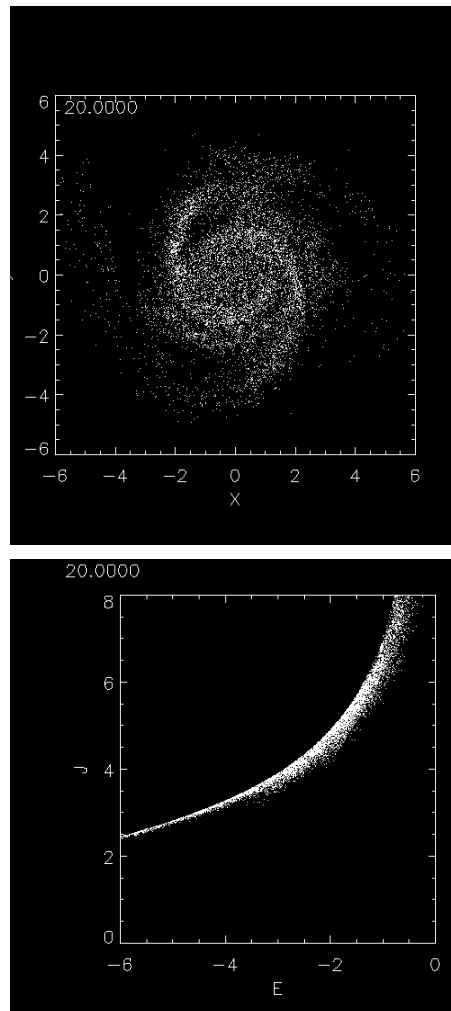


図2 2次元円盤に発現するスパイラルアーム(上)と、そのE-J空間での構造。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 0 件)

〔学会発表〕(計 0 件)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況(計 0 件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

出願年月日:

国内外の別:

○取得状況(計 0 件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

取得年月日:

国内外の別:

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

和田 桂一 (Wada, Keiichi)

鹿児島大学・理工学域理学系・教授

研究者番号: 30261358

(2) 研究分担者

なし ( )

研究者番号:

(3) 連携研究

なし ( )

研究者番号:

(4) 研究協力者

なし ( )