1/21 発表@駒場

研究方法

- 概要 → 系の進化の様子

1．初期粒子分布作成

- 使用ソフトウェア
  - 宇宙論的初期条件作成専用ソフトGRAFIC(Bertschinger,95)

re-simulation法

- 目的
  - ある特定のハローの質量分解能をできる限り高めたい
    - そのハロー周辺領域のみ粒子数を増やせばいい
- アルゴリズム
  - **1.宇宙論的初期粒子分布Aを用意**
  - **2.Aの低解像度版の粒子分布Bを作成**
  - **3.z=0までBを時間積分**
  - **4.z=0にて、ハロー探索**
    - その中のあるハローに注目(＝ターゲットハロー)
      - ターゲットハローの選択基準は？
        - 考察
          - 最大ハローだと。。。
            - そのメンバの初期分布が広大
              - → 画像参照
              - 高解像度化しなければならない領域が広すぎるため、re-simulationのメリットが薄くなる
            - マージのプロセスが複雑で分析しにくそう
              - → 動画参照
          - そこそこのサイズのハローだと。。。
            - 高解像度領域がごく狭い　計算が楽
            - マージが比較的穏やかで分析しやすそう
        - 結論
          - **最大ハローは避け、孤立した、ある程度のサイズのハローが好ましい**
  - **5.そのハロー構成粒子がzinitにて占める領域を特定**
  - **6.その領域のみ、高解像度なＡの分布で置換(分布C)**
  - 7.ＡとＢの折衷分布Cを時間積分
- 補足
  - サンプリング方法
    - 目的
      - 高解像度粒子分布Ａから、その統計的性質を保ちつつ、低解像度粒子分布Ｂを抽出する
        - 統計的性質とは
          - **ＡとＢでパワースペクトルの特徴が同じ**　(⇔)　**z=0にて生成されるハローの位置が同じ**
    - 方法
      - **適当な個数の粒子ごとに、重心でまとめる**
    - 結果
      - **ハロー生成位置がほぼ一致**
      - 具体例　z=0にて
        - → 高解像度粒子分布：N=8M
        - → 低解像度粒子分布：N=1M
  - → 折衷分布積分動画
- 特徴
  - メリット
    - 愚直に系全体のＮを増やして高分解能化した場合に比べて、オーダーで計算量を減らせる
  - デメリット
    - シミュレーションに、物理的な怪しさが混入してしまう
      - 理由
        - 質量が軽重２種類の粒子が混在
          - 軽い粒子　ハロー粒子（高解像度領域）
          - 重い粒子　ハロー以外の粒子（低解像度領域）
          - 副作用
            - 重い粒子が、ハロー中心部へと沈み込んでくる　本来ダークマター粒子の質量は一様なので、そのような現象は生じえないはず
            - 対策　重い粒子がハロー中心付近に侵入してこない程度の、質量比にする
          - 実証実験
            - １．系全体を高解像度粒子とした分布と、一部を高解像度化した折衷分布をそれぞれ積分
            - ２．同一のハローについて、それぞれ密度プロファイルを取り比較
            - 結果　両プロファイルはほぼ一致　少なくとも、見分けがつかないレベル
            - **結論　質量比１：８程度ならば折衷分布を用いても、密度プロファイル分析において問題はない**

2．時間積分

- 積分パラメータの詳細
  - power pointにて
- 積分の様子
  - → ターゲットハローの初期分布画像
  - → 系全体の進化の様子

ハロー探索法

- 目的
  - ハローの中心を求める　注意点　バウンドしているかどうかは見ない
- アルゴリズム
  - １．系を２次元のメッシュで切る
  - ２．２次元メッシュ内の、粒子数をそれぞれカウント　粒子数とは：X-Y平面上に投影した系の粒子数のこと
  - ３．粒子数極大のメッシュを特定　上下左右の隣接メッシュと粒子数を比較
  - ４．その極大メッシュについて、今度はz方向に、３次元のメッシュを切る
  - ５．その３次元メッシュの間で、粒子数極大のメッシュを特定　その極大メッシュの中のポテンシャル極小粒子を、ハロー中心ということにする
- 特徴
  - メリット
    - 物理的に（SKIDのように）怪しい部分はない
    - 実装が簡単　特に「メッシュで切る」という操作が、統計言語R で扱いやすい
    - 計算量は特に問題ない
      - 計算量の柔軟な調整が可能
        - 事前の粒子サンプリングによる軽減　探索前に、あらかじめ系の粒子をサンプリングして減らしておけば、実質Ｎがいくつでも対応できる
          - 根拠
            - 重要なのは各メッシュ間の粒子密度の相対的な関係なので、それが崩れない範囲なら、サンプリングしても問題ない
            - 経験則　１０万体程度あれば、ハロー中心はちゃんと求まる
        - 探索領域の限定による軽減　系全体を探索せずとも、親たいハローの出現位置は既知なので、そこに探索領域をフィットさせれば、大幅に計算量を削ることができる
      - 万一のときは、並列化で対応可能　その実装も単純　ボトルネックとなっている手順２（各セル中の粒子数計算部分）を並列化すればよい　並列R環境をan XXにインストール済み
      - 具体例　国立天文台an03にて計算時間測定（プログラム開始から探索終了まで）
        - N=1Mのとき：10s
        - N=8Mのとき：100s
        - 補足：10 x 10個のセルで探索
  - デメリット
    - 分解能の限界　２ハロー間距離＜メッシュサイズ のとき　普通、両者を区別できない or 片方しか検出されない
    - 特定の状況での誤検出　メッシュ同士の境界にハロー中心が来ると、ハローが検出されなかったり、逆に２重に検出されることがある
- 結果
  - → 画像参照

3．積分結果の解析

密度プロファイル分析

- 信頼性の評価（「信頼半径」の導入）
  - Fukushige&Makino(2001)を参考
    - 目的
      - 密度プロファイルの内側の、どこまでを物理的に信用できるかを把握
    - criterion 1
      - $\frac{t_{rel}(r)}{t} > 3$
      - 意味
        - 半径ｒ以内の粒子の緩和が、まだ３割程度しか進んでいなければ、ｒより外側のプロファイルは信用できる　根拠　convergence test
      - 用途
        - 二体緩和の影響を無視できる、最小の半径を知ることができる
      - 変数の説明
        - t_rel : 局所二体緩和時間
          - $t_{rel}(r) = \frac{0.065 v^3}{G^2 \rho(r) m \ln(1/\epsilon)}$
            - 意味
              - 概要　半径ｒ以内の粒子の、およその緩和時間
              - r : ハローの中心からの半径
              - v : 半径r以内の粒子の典型的な速度　シミュレーション中ではRMSとした。
              - ε : ソフトニング
              - ρ : 半径r以内の平均密度
            - 性質　実質、ρ(r)に支配されている
              - 根拠　→ ρ(r)のグラフ
                - およそ傾き-2
                - → 緩和時間のグラフ　およそ傾き+2　つまり、式中の1/ρ(r)が効いている
              - 即ち、中心部ではρが大きいので緩和が進みやすいといえる
        - t : ハローの年齢
    - criterion 2
      - $\frac{t_{dy}(r)}{\Delta t} > 40$
      - 意味
        - 半径ｒに位置する粒子が中心まで落ち込む間に、タイムステップが４０回刻まれるような、そういう大きさの半径ｒより外側は、信頼できる
      - 用途
        - ちゃんと粒子の軌道が解ける、最小の半径を知ることができる　それより内側は、誤差が激しくプロファイルも信用できない
      - 変数の説明
        - t_dy : 局所力学時間
          - $t_{dy} = (G\bar{\rho})^{-1/2}$
            - 意味　半径r上の粒子が、ハロー中心に落ちるまでの典型的な時間
            - \bar(ρ) : 半径r以内の平均密度
        - Δt : タイムステップ
    - １かつ２を満たす半径ｒよりも外側が、信頼できる領域　その時の最小の ｒ ≡信頼半径、とする
    - 結果
      - → 画像参照　FM2001との信頼半径値の一致をほぼ確認

マージ過程の分析

- 「マージ」の定義
  - 下準備
    - とりあえず、ハロー同士のまじりあう様子（メンバ同士の混合）を観察してみる
      - → 画像参照
      - マージのタイプ分けが可能　（ハローAに対するハローBの接近＆衝突を考える）
        - **Ｍ１．ＢがAと一様にまじりあうタイプ**　お互いのメンバが、中心部でも外縁部でも、およそ均一に混合される
        - **Ｍ２．ＢがAの外縁部に、おもに粒子をばらまくタイプ**
        - **Ｍ３．ＢがサブハローとしてAの周りを回るタイプ**　これはマージとして認めるべきか？　否
          - とりあえずAの中心付近に大きな影響を及ぼすタイプの衝突を見たいので、当面、これはマージには含めないことにする
          - いずれ壊れて混じり合うので、この段階ではマージ認定する必要も特に無い
  - 「ハローAにハローBがマージする」とは
    - １．Ｂのハロー重心＜Ａの5*信頼半径内
      - 意図
        - M1、M2の状況をマージ認定できる
        - M3を排除できる（サブハローはマージとはみなさない）
        - 「５倍」の意味　ただの信頼半径内だと小さすぎ、マージしているように見えても、マージ認定されないことがある。ビリアル半径だと大きすぎ、サブハローまで含んでしまう恐れがある。その中間程度にしておく。
    - ２．１の状態が「Ａの局所力学時間(5*信頼半径)」以上継続する
      - 意図　ただ単に、マージではなくＢがＡの中心を通り過ぎているとき、を排除したい
      - 物理的根拠
        - ２－１．まず、局所力学時間(r)とは、その半径r上の粒子がハロー中心まで移動する、およその時間である。　かつ、ケプラー的な運動を仮定している量なので、落下を開始するときの半径方向初期速度はおよそ０と考えてよい。
        - ２－２．一方Ｂの重心は、Ａの外からＡに向かって落下して来ているのであるから、その5*信頼半径に辿り着いたとき、速度０のＡの粒子に対して、すでにある程度大きな中心方向速度をもっていることになる　即ち、Ｂの重心は、Ａの力学時間よりも短い時間でＡの中心に達すると考えられる。　つまり、5*信頼半径内にBの重心を検出した時　前述の力学時間だけ待てば、Ｂが単なる通りすがりの場合は、ほぼ確実にその重心は領域外へと出て行くことになる
        - 実測値による支持　実際、200My間隔のスナップショットでＢの運動を観察していると、Ａの中心にいたＢが、１ステップの後にはすでにＡの中心から外れている。一方、問題の力学時間は300Myr程度。つまりその力学時間だけ待っていれば十分に、通りすがりのBは排除できると考えられる。
    - **１かつ２であれば、マージしたと認定することにする**
  - 「世代」の定義
    - 1. 宇宙で最初に誕生したハローの世代≡1　これらを特別に、ファーストハローと呼ぶことにする
    - 2. ハローAとBがマージして誕生したハローの世代 ≡ max(A の世代、B の世代) + 1
- merger tree作成
  - → ターゲットハロー(z=0)へと至るまでの、各ハローのマージの過程を図示したもの
- 備考　「ハロー」の定義
  - １．ビリアル半径が定義可能であること　意味　最も中心部分の半径内の密度が、200*pcritよりも小さいときはハローとは認めない。そのような低密度の天体は単なるノイズであると解釈する。
  - ２．信頼半径＜ビリアル半径　意味　ビリアル半径の外側を観察してもあまり意味がないので、そのようなハローは却下する
  - 「ファーストハロー」の定義
    - １．「ハローの定義」１．２を満たす
    - ２．ビリアル半径内が、ハロー未所属の粒子のみで構成されている
      - 意味
        - 宇宙初期にできたハローのこと。
        - 前提：系の全ての粒子は、ハローへの所属情報（未所属or所属先ハローのID）を持っている
      - 検出したら、それらの粒子にファーストハローメンバとしての所属を与える

結果&考察

- → 1. 系全体の進化の様子
- 2. マージ過程の分析
  - → merger tree
    - 考察
      - あるハローに対して、各ファーストハローが敗発的にマージしてゆく、という非常に特徴的なマージ過程をたどっている
    - → ターゲットハロー（赤丸）の質量進化
      - 考察
        - マージしていったハローの全質量を足しあわせても、z=0におけるターゲットハローには遠く及ばない
          - minor merger（ハロー間の質量比の大きなマージ）しか存在していない　本来、major mergerも存在してもよいはず　考えられる理由
            - 「孤立した、中程度のサイズのハローを選ぶ」というターゲットハローの選定基準を採ったために、minor mergerしか含まない、特殊なハローが選ばれやすくなっていた（実際選んでしまった）、という可能性が考えられる
              - → 系全体の進化の様子
          - では、ハロー以外の粒子がターゲットハローの質量を支配している？
      - → 各ハローの構成粒子の、混合の様子　考察
        - 宇宙初期から、ターゲットハローに連続的に流入してきた（いかなるハローにも属さない）粒子が、実質的にターゲットハローを構成している
          - この試行においては、ターゲットハローの成長に、ハローのマージはほとんど寄与していない
- 3. 密度プロファイル分析結果
  - → 第一世代の密度プロファイル
    - 考察　NFWプロファイルとは異なる。また、ハローごとに形状が大きくばらついている
  - → 第二世代以降の密度プロファイル
    - 考察
      - NFWプロファイルによくフィットする　ハローは、質量成長とともにNFWプロファイルへと進化した
      - Romano-Diaz(2006)曰く
        - 「穏やかな質量流入の段階においては、ハローはNFWプロファイルをとる」　本シミュレーションは、こちらの状況に類似
        - 「violentなmajor mergerを経ると、NFWプロファイルとはならない」　このようなハローについても、今後解析してみる必要がある
  - 卒論との比較
    - → 卒論での系の進化の様子
    - → 卒論で得られた、完全に孤立したハローの密度プロファイル
      - 中心付近の傾き0　⇔　NFWプロファイル：-1
      - 外縁部の傾き-4　⇔　NFWプロファイル：-3　考察　外縁部への連続的な質量流入が、傾きをなまらせている可能性

結論

- **ハローの密度プロファイルは、連続的な質量流入によって成長する場合、NFWプロファイルへと進化する**
  - 先行研究でもそれは示唆されているが、今回、宇宙論的により自然な（恣意的にハロー生成時刻やmerger historyを操作したりしない）シミュレーションにおいても、同様の現象が発生することがわかった

Future Work

- major mergerを含むようなターゲットハローの解析を行う　そもそも、なぜNFWプロファイルというものが生成されるのかを考える

提出先　smasuda@ea.c.u-tokyo.ac.jp