京の威力で
「見えない宇宙」の正体に迫る
― ダークマターの超大規模
シミュレーション

牧野淳一郎

東京工業大学 地球生命研究所

理化学研究所 計算科学研究機構

概要

- 宇宙の始まり、はて、終わりはどうなってるのか？
- 何がまだわかっていないのか？
- シミュレーションでわかることは?
- 「京」でどんな計算をしようとしているか？
- さらにその先は？

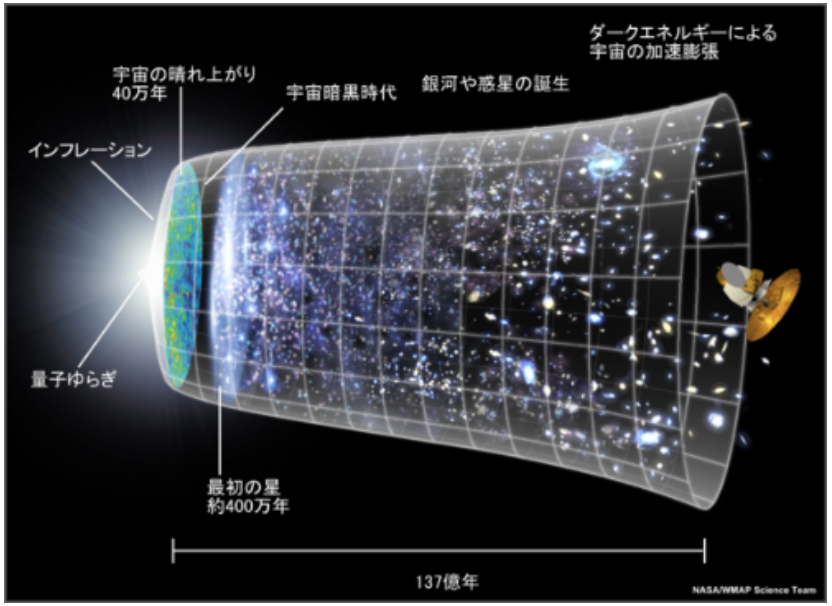
宇宙の始まり、はて、終わり

世界の始まり、はて、終わりがどうなっているか？

- 人類にとって根源的ななにか？
  - 大抵の神話、宗教は「世界の始まり」と「終り」についての物語を含む
  - キリスト教、ギリシャ神話、その他多数の例
- 素粒子物理学と天文学の進歩により、「科学の対象」になってきた
  - なにか役にたつか？と言われるとただちに役に立つわけではないが、、、
  - 科学の限界を広げる、という意味でも重要

宇宙の始まり、はて、終わり

まず、現在の我々の理解を簡単に。



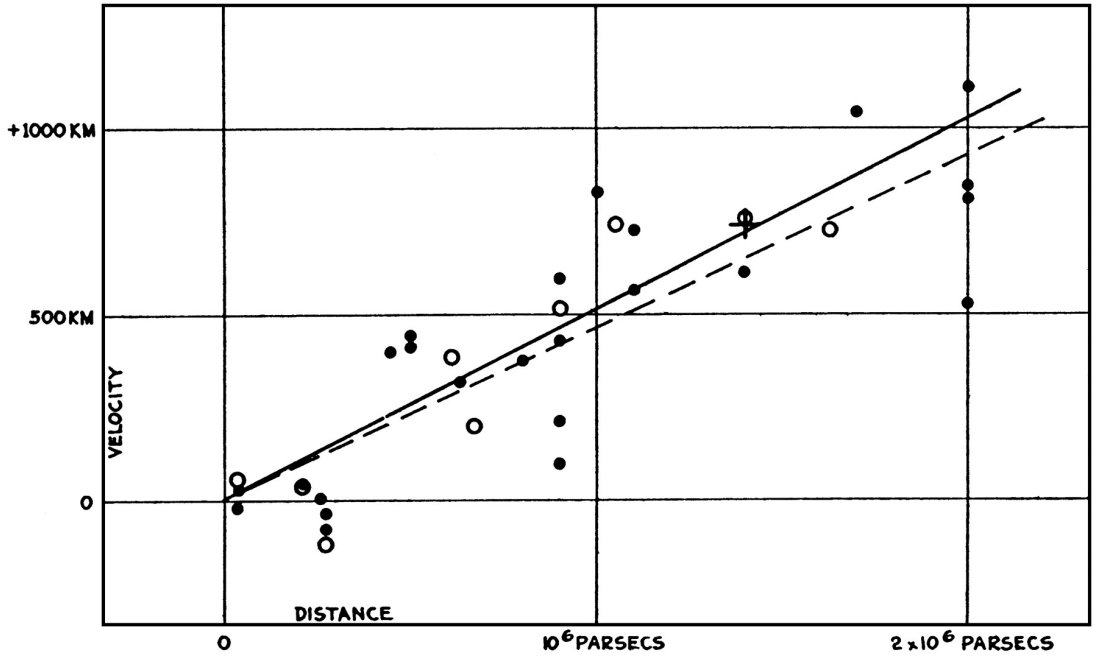
- 始まり: 本当の最初がなんだったかは良くわからないが、ものすごく密度・温度が高い状態があって、そこから現在まで膨張してきた。
- はて: 我々が知る (観測する) ことのできる宇宙にははてがある (宇宙ができてから現在まで光が走る距離)。インフレーション理論では、その外側にもかなり広く同じような宇宙が広がっている。
- 終わり: 膨張が速くなっていき、無限にひろがって最終的にはほぼ「ダークエネルギー」だけの宇宙になる。

キーワード: 「宇宙膨張」 「ダークエネルギー」

それぞれについてもうちょっと詳しく。

宇宙膨張

20 世紀初め: E. ハッブル



遠くの銀河ほど速く我々の銀河系から遠ざかっている

「宇宙膨張」

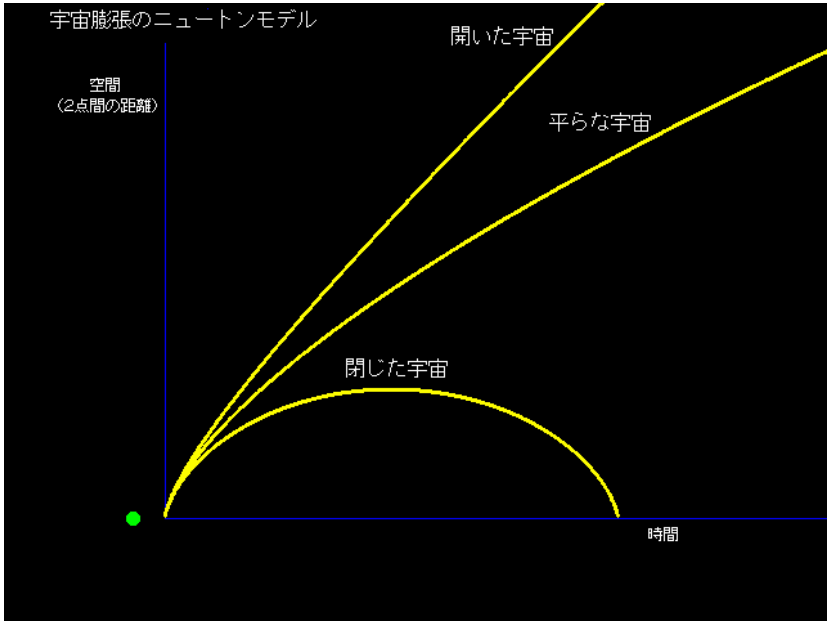
我々の宇宙は「ビッグバン」から始まった

宇宙が膨張するって？

- 一応正しいんだけどあんまりわかった気がしない説明:

アインシュタインの一般相対性理論の方程式を、「宇宙が空間的に一様」として解くと、「静止している」という解はなくて「膨張している」か「収縮している」である

謎な定数をいれて静止解も出すことはできるが



- もうちょっと感覚的な説明:

宇宙に物質があれば、必ず重力があって、お互いにひきあう。なので、「止まっている」解はない。全体として膨張、全体として収縮、はありうる。

重力のため、段々膨張がゆっくりになる。

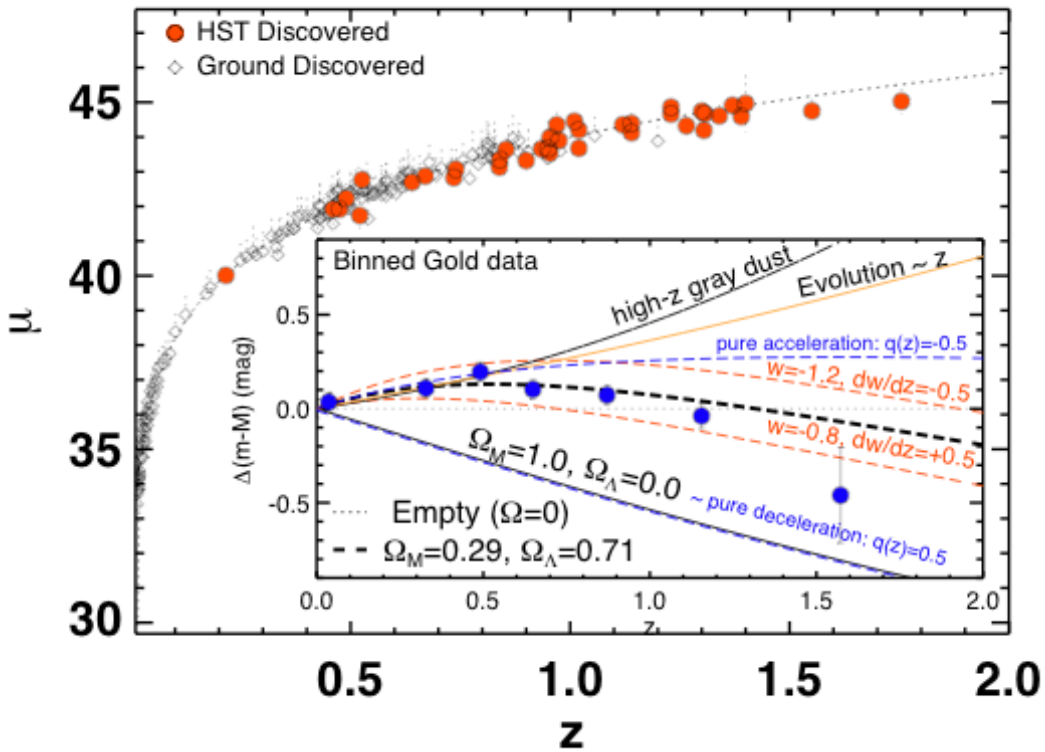
どんなふうにゆっくりになるか？

- 現代の宇宙物理学の基本問題だった。2000 年代はじめまでほぼ 1 世紀に渡る論争
- 15 年くらい前までの支配的な考え:(意味はちょっとおいといて)「平坦な宇宙」
  - 無限の未来に膨張速度がゼロに近づく
- 最近の観測からの示唆:実はゆっくりにならない。無限の未来に無限に速くなる

非常に予想外な発見。

宇宙膨張の加速

遠方の超新星の明るさを観測する：同じ「赤方変移」でも膨張のしかたで距離、従って明るさが違う



- 普通に平坦な宇宙：明るい
- 物質が少ない宇宙：暗い
- 膨張が加速している宇宙：もっと暗い
  これが我々の宇宙

2011 年ノーベル物理学賞

膨張を加速しているなにか＝ダークエネルギー

では「物質」のほうは？

- 観測の示唆: ダークエネルギー$+$物質$=$「1」
- ダークエネルギー: 68.3%, 「ダークマター」:26.8%, 普通の物質: 4.9%
- 普通の物質: 陽子、電子、中性子からなる普通の元素。それぞれクォークからできている。
- ダークマター: 普通の物質「ではない」なにか。現在の宇宙ではほぼ重力しか働いていない

ダークマターは何か？

大きくわけて 2 つの理論：

- Hot dark matter 質量をもったニュートリノが大量にあって、それが宇宙の物質のほとんどを占めている。
  → 銀河がまだできていないはず、という問題、、、
- Cold dark matter 未知の素粒子があってそれが宇宙の物質のほとんどを占めている。
  → こちらが有力。但し全く正体不明

ダークマターの正体 ???

- というわけで、現在のところダークマターの正体は「未知の素粒子」
- 有力な候補、と考えられているもの:「超対称性理論」で予言されている粒子 (どういう理論でどういう粒子かはあまり聞かないで)
- 名前: 「ニュートラリーノ」、質量: 陽子の 100 倍くらい？
- 普通の物質や他のダークマター粒子と、全く相互作用しないわけではない。
  - 1 秒に 1 億個くらいのダークマター粒子が我々の体を通り抜けている
  - ダークマター粒子が私の体の原子とぶつかる: 1000 年-1 億年に 1 度くらい?
  - ダークマター粒子同士の衝突、というのもある。

ダークマター探査

2 つの方針:

- 直接検出: 検出器を通り抜けるダークマター粒子が普通の物質とぶつかり、はね飛ばすのを検出 (日本の XMASS、アメリカの CDMS-II など) CDMS-II は「発見したかも」と 4 月に発表したが ???
- 間接検出: 宇宙の中でダークマター粒子が集まっているところでの対消滅からでてくるなにか (γ 線？電子？陽電子？) を人工衛星で観測 (Fermi 望遠鏡の天体の中にないか？ AMS 実験:ISS 上で反粒子を観測) AMS も「発見したかも」と 4 月に発表したが ???

もちろんまだ見えてないので、どこにどれだけあるのかよくわからない
シミュレーション: どう分布しているかを予測。直接検出、間接検出について、どんなふうに見えるかいえるはず。

ダークマター構造形成シミュレーション

計算の 1 例戦略分野5 石山さん
できた構造の1つ
ここでやっていること：

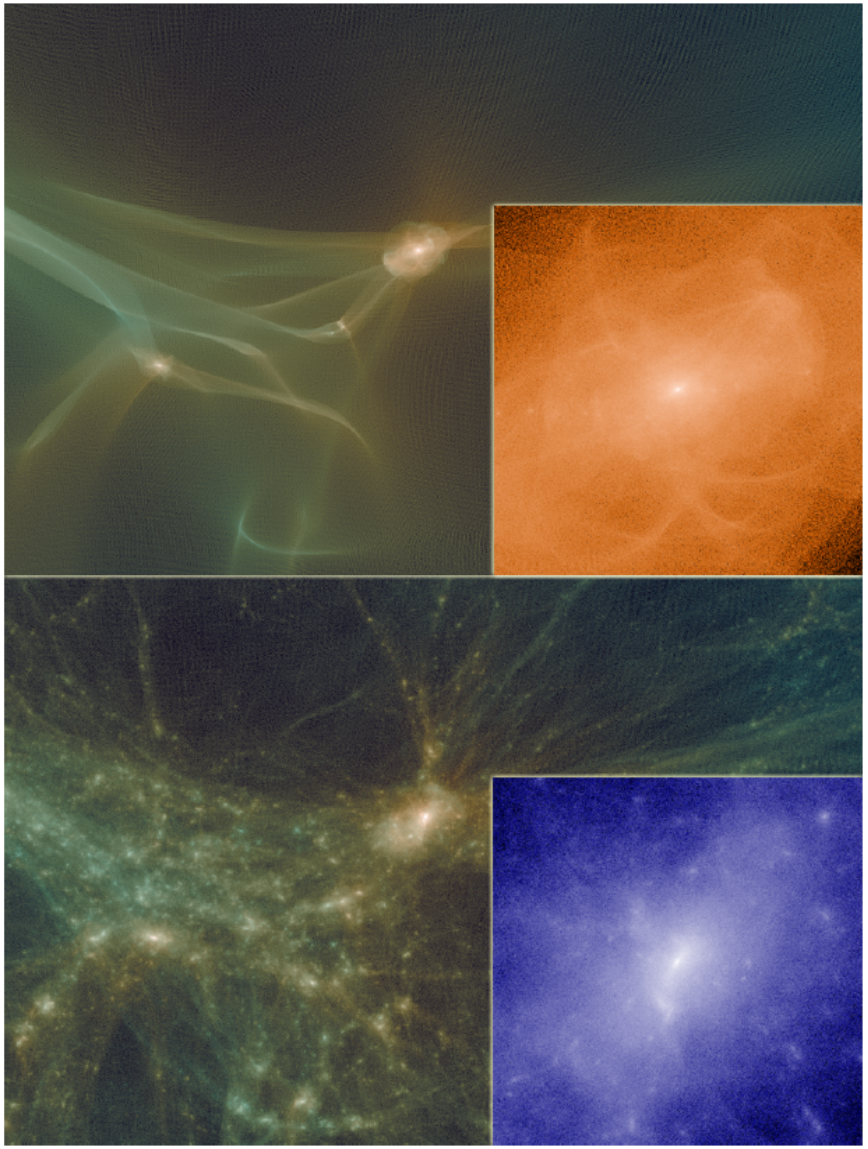
- 基本的には「一様」な宇宙を、なるべく沢山の粒子で表現する
- 理論的に「こう」と思われる揺らぎを与える
- 理論的に「こう」と思われる初期の膨張速度を与える
- あとは各粒子の軌道を数値的に積分していく。

計算について

- 最初に密度が高いところは、他に比べて相対的に密度がどんどん大きくなっていく。これは重力で集まるから。
- 最初に小さいものが沢山できて、それらがだんだん集まって大きなものになる。
- この計算では、銀河くらいの天体の形成を計算
- ダークマター粒子検出で興味: 銀河の中でのダークマター粒子の分布
- 理論的には地球質量くらいのものが最初に沢山できる。それが集まったり、一部生き残ったりする。

「京」を使ってこの過程を調べたい

我々の(ちょっと前の)計算



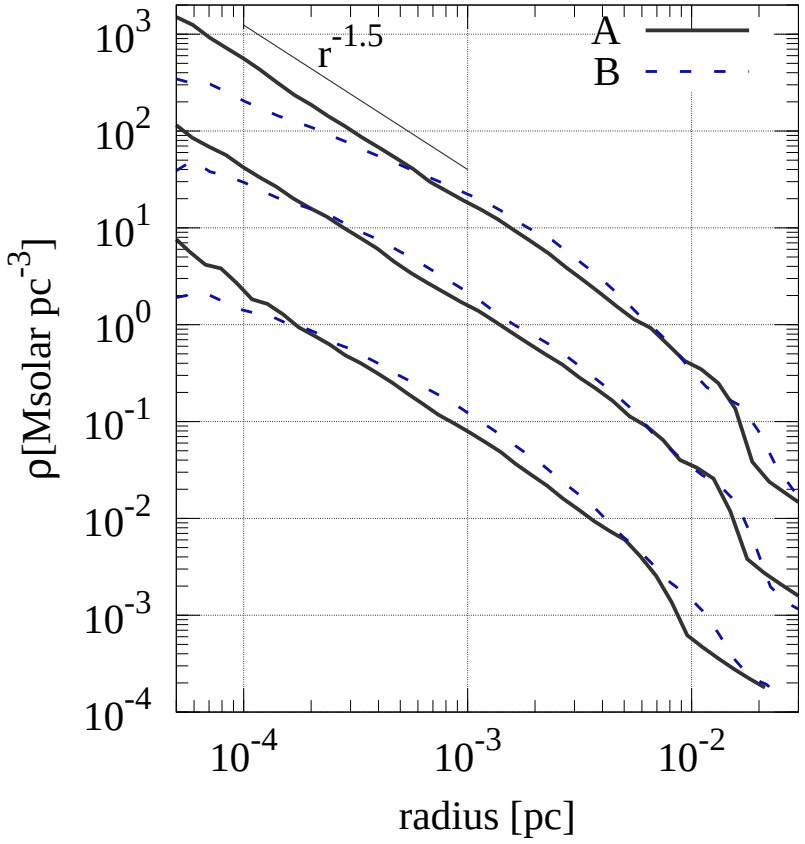
Ishiyama et al., 2010

国立天文台の Cray XT4。
「京」の 1/500 の能力

10 億粒子くらい

- 上: 地球質量くらいに対応する計算。
- 下: もっと大きなサイズに対応する計算。

密度分布



実線: 地球質量に対応する計算。中心部で -1.5 乗の密度べき

波線: もっと大きなスケールに対応。中心密度低い

密度が中心で高い
＝ダークマター粒子同士の衝突が起こりやすい

地球質量ハローの中心部がγ線で光っている?

「京」でやろうとしていること

- 理想的には、地球質量のダークマター天体が集まって銀河くらいになるところまで
- これはまだ無理だが、可能な限り大規模な計算をいくつかやって、もっと先を予測。

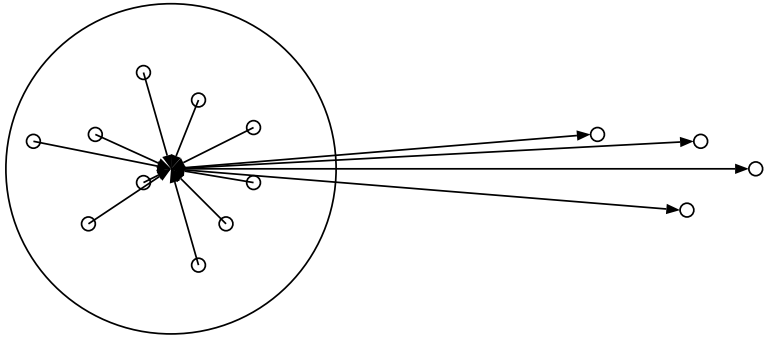
↓

我々の周りのダークマターの分布について、理論に基づいた定量的な予言

計算例: 168 億粒子の計算
アニメーション
「京」の全能力を使うとあと 100 倍程度大きな計算

計算方法等について少しだけ

遠距離重力の評価:ツリー法

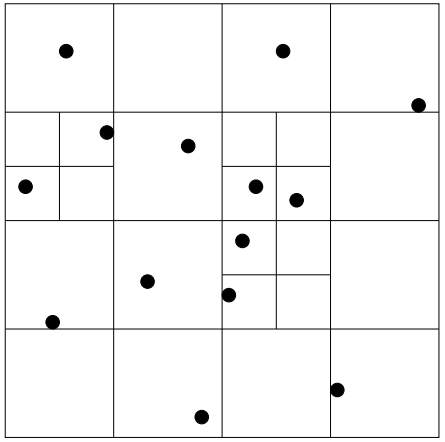


遠くの粒子からの力は弱い

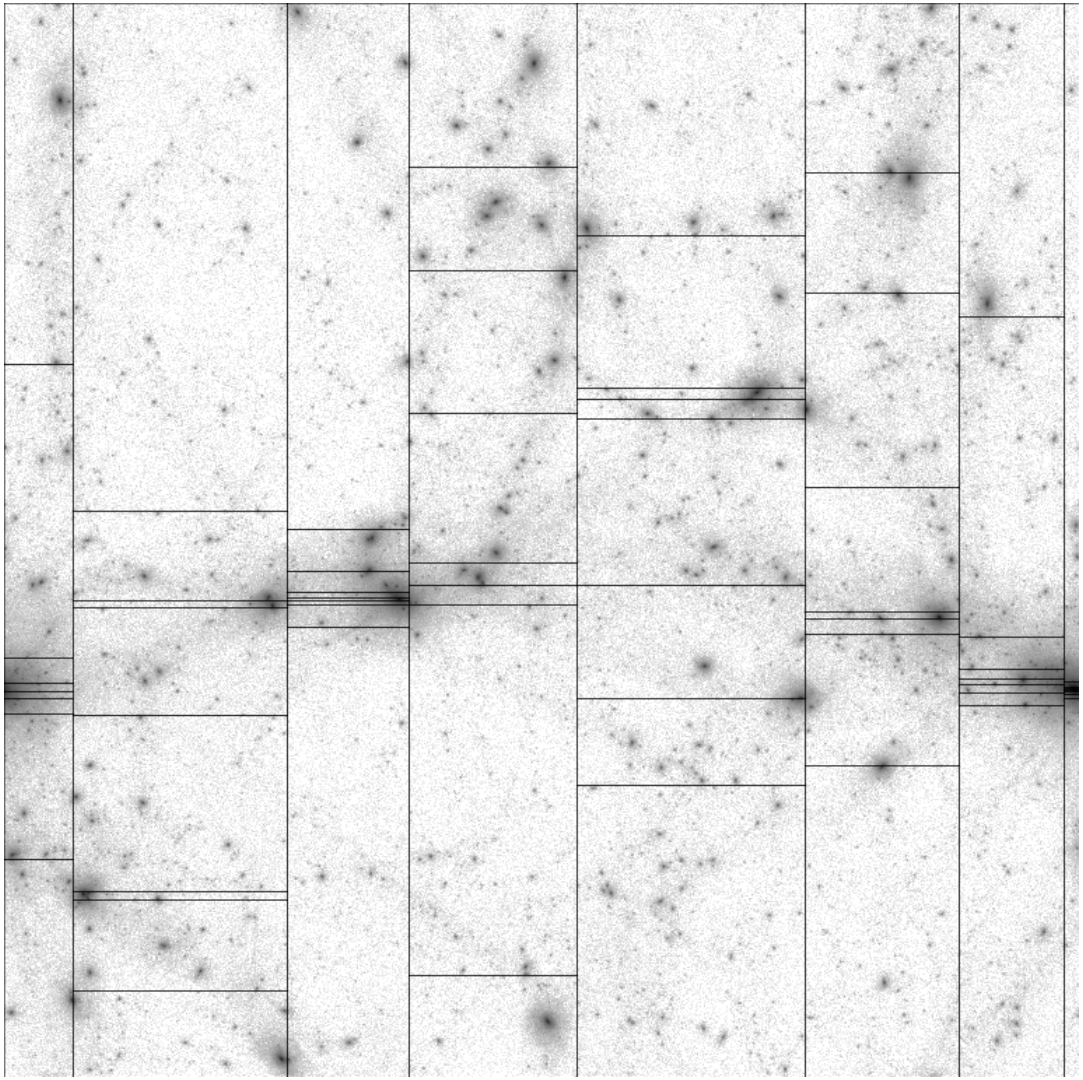
↓

まとめて計算

ツリー構造:



どうやって「京」を使うか？



空間分割して計算ノードに割り当て

Recursive Multi-section (JM 2004)

「京」の Tofu ネットワークに適した方法

計算時間が均等になるよう領域サイズ調整 (石山他 2009、2012)

チューニング

「京」を使いこなすには色々な努力も必要

- 粒子間相互作用計算カーネルの最適化。
  - 区分多項式の SIMD 向け変形、ビルトイン関数で SIMD データ型を直接利用
  - 最適な命令列がでるようなコードをスクリプトで生成 (アンロール回数等)
  - コンパイラによるアンロールも適用
  - メモリアクセスを減らすため、1 粒子から複数粒子への力を並列計算する形にアルゴリズム変更 (これは従来から行われている)
- 通信の工夫

実現できた性能

- 「京」全ノード使った 2 兆粒子の計算で、5.67 ペタフロップス (ピークの 55%)
- 1 秒に 400 億粒子アップデート (2 兆粒子 1 ステップ 50 秒)
- 20PF の BG/Q での同様な計算 (Habib et al. 2012): 14 ペタフロップスだけど 1 秒に 160 億粒子アップデート (2 兆粒子 1 ステップ 120 秒)
- 我々の「京」での計算のほうが、実質 2.4 倍速い

2012 年ゴードンベル賞獲得!!

2011 年に続いて「京」での計算は 2 年連続でゴードンベル賞

何故こんなに性能差が？

- 理由ははっきりしている: BG/Q のグループのプログラムはしなくてもいい計算をしている
- 良くわからないこと: 何故しなくてもいいことをしているのか？
  - 我々が (私じゃなくて実際にプログラム開発した石山さん、似鳥さんが) 偉かった？
  - BG/Q に対しては彼らのがベスト？
  - それ以外のなにか？

多分このへんは日本が進んでいる、といってもいいのではないかと思う

今後の方向

- ダークマターだけでなく、普通の物質も計算にいれて銀河の形成・進化を
- さらに、以下のような方向も
  - 恒星の形成過程、惑星形成過程の解明
  - 生命が発生できる惑星はできるか？
- 計算機の能力向上に期待
- 計算方法の改良も必要

他分野への応用

- 現在のコードで並列化、ロードバランスに使っているアルゴリズムは重力でなくても、粒子系なら汎用に近い。
- 分子動力学、粒子による流体や連続体力学、エージェントシミュレーション等にも応用可能？
- そのための汎用並列化プラットフォーム開発も始めている (AICS 粒子シミュレータ開発チーム)

まとめ

- 我々は、「京」を使って大規模シミュレーションで、銀河系の中のダークマター粒子の分布、どのように観測されるかを予言することを目指している
- このため、「京」の全能力を発揮できる、非常に高性能な計算コードを開発した
- その結果、演算性能では「京」の2倍ある BG/Q での米国のグループの計算の 2.4 倍の性能を実現し、2012年ゴードンベル賞も獲得できた
- 日本はソフトウェアが弱い、と言われるがそうでもないところもある
- 「京」でのサイエンス、このソフトウェア技術の他の分野への応用にも期待して欲しい

最後に

「京」での実際にのコード開発、計算は、石山さん (筑波大)、似鳥さん (AICS) によるものです。

似鳥さん、石山さん、牧野 @SC12 つくばCCSブース