



N -body SPH code ASURA の開発とその周辺

斎藤貴之(神戸大学)





牧野さん

還曆

おめでとうございます！



1 □ 2008PASJ...60..667S 2008/08 cited: 128   
Toward First-Principle Simulations of Galaxy Formation: I. How Should We Choose Star-Formation Criteria in High-Resolution Simulations of Disk Galaxies?
 Saitoh, Takayuki R.; Daisaka, Hiroshi; Kokubo, Eiichiro; Makino, Junichiro *and 4 more*

2 □ 2009ApJ...697L..99S 2009/06 cited: 156   
A Necessary Condition for Individual Time Steps in SPH Simulations
 Saitoh, Takayuki R.; Makino, Junichiro

3 □ 2009PASJ...61..481S 2009/06 cited: 96   
Toward First-Principle Simulations of Galaxy Formation: II. Shock-Induced Starburst at a Collision Interface during the First Encounter of Interacting Galaxies
 Saitoh, Takayuki R.; Daisaka, Hiroshi; Kokubo, Eiichiro; Makino, Junichiro *and 4 more*

4 □ 2009ApJ...706..471B 2009/11 cited: 82   
The Origin of Large Peculiar Motions of Star-Forming Regions and Spiral Structures of Our Galaxy
 Baba, Junichi; Asaki, Yoshiharu; Makino, Junichiro; Miyoshi, Makoto *and 2 more*

5 □ 2010PASJ...62..301S 2010/04 cited: 46   
FAST: A Fully Asynchronous Split Time-Integrator for a Self-Gravitating Fluid
 Saitoh, Takayuki R.; Makino, Junichiro

6 □ 2011ApJ...730..109F 2011/04 cited: 130   
The Dynamics of Spiral Arms in Pure Stellar Disks
 Fujii, M. S.; Baba, J.; Saitoh, T. R.; Makino, J. *and 2 more*

7 □ 2012ApJ...746...26M 2012/02 cited: 19   
Origin of Multiple Nuclei in Ultraluminous Infrared Galaxies
 Matsui, Hidenori; Saitoh, Takayuki R.; Makino, Junichiro; Wada, Keiichi *and 5 more*

8 □ 2012NewA...17...76S 2012/02 cited: 10   
A natural symmetrization for the plummer potential
 Saitoh, Takayuki R.; Makino, Junichiro

9 □ 2012PTEP.2012aA303M 2012/10   
Astrophysics with GRAPE
 Makino, Junichiro; Saitoh, Takayuki

10 □ 2013ApJ...768...44S 2013/05 cited: 143   
A Density-independent Formulation of Smoothed Particle Hydrodynamics
 Saitoh, Takayuki R.; Makino, Junichiro

11 □ 2013PASJ...65..108H 2013/10 cited: 13   
Density-Independent Smoothed Particle Hydrodynamics for a Non-Ideal Equation of State
 Hosono, Natsuki; Saitoh, Takayuki R.; Makino, Junichiro

12 □ 2014PASJ...66....1S 2014/02 cited: 79   
Flaring up of the compact cloud G2 during the close encounter with Sgr A*
 Saitoh, Takayuki R.; Makino, Junichiro; Asaki, Yoshiharu; Baba, Junichi *and 7 more*

13 □ 2015PASJ...67...37Y 2015/06 cited: 5   
Smoothed particle hydrodynamics with smoothed pseudo-density
 Yamamoto, Satoko; Saitoh, Takayuki R.; Makino, Junichiro

14 □ 2016ApJ...823..144S 2016/06 cited: 14   
Santa Barbara Cluster Comparison Test with DISPH
 Saitoh, Takayuki R.; Makino, Junichiro

15 □ 2016ApJS..224...32H 2016/06 cited: 13   
A Comparison of SPH Artificial Viscosities and Their Impact on the Keplerian Disk
 Hosono, Natsuki; Saitoh, Takayuki R.; Makino, Junichiro

16 □ 2016Icar..271..131H 2016/06 cited: 19   
The giant impact simulations with density independent smoothed particle hydrodynamics
 Hosono, Natsuki; Saitoh, Takayuki R.; Makino, Junichiro; Genda, Hidenori *and 1 more*

17 □ 2017NewA...50...82T 2017/01 cited: 2   
Variable inertia method: A novel numerical method for mantle convection simulation
 Takeyama, Kosuke; Saitoh, Takayuki R.; Makino, Junichiro

18 □ 2019NatGe..12..418H 2019/04 cited: 36   
Terrestrial magma ocean origin of the Moon
 Hosono, Natsuki; Karato, Shun-ichiro; Makino, Junichiro; Saitoh, Takayuki R.

19 □ 2022MNRAS.517.4856H 2022/12 cited: 15   
Origin of highly r-process-enhanced stars in a cosmological zoom-in simulation of a Milky Way-like galaxy
 Hirai, Yutaka; Beers, Timothy C.; Chiba, Masashi; Aoki, Wako *and 4 more*

1 □ 2023arXiv230804839J 2023/08   
 N -body simulation of planetary formation through pebble accretion in a radially structured protoplanetary disk
 Jinno, Tenri; Saitoh, Takayuki R.; Ishigaki, Yota *and 1 more*

宇宙7、惑星3、シミュレーション手法10

2023/9/4 出版済み+受理済み



Contents

2023

ASURA-FDPS

FDPS

MNcore

CELib 2018

DISPH

Symmetrized Plummer

2011

FAST

Timestep limiter 2009

XT-4/Phantom-GRAPE

ASURA開発 2007
スタート

GRAPE-7/GRAPE-DR

2004

2002

GRAPE-5



Takayuki Saitoh (Kobe Univ.)

Takayuki Saitoh & Tadaaki Takeda <https://www.youtube.com/watch?v=Rdd9KAUcvgQ>

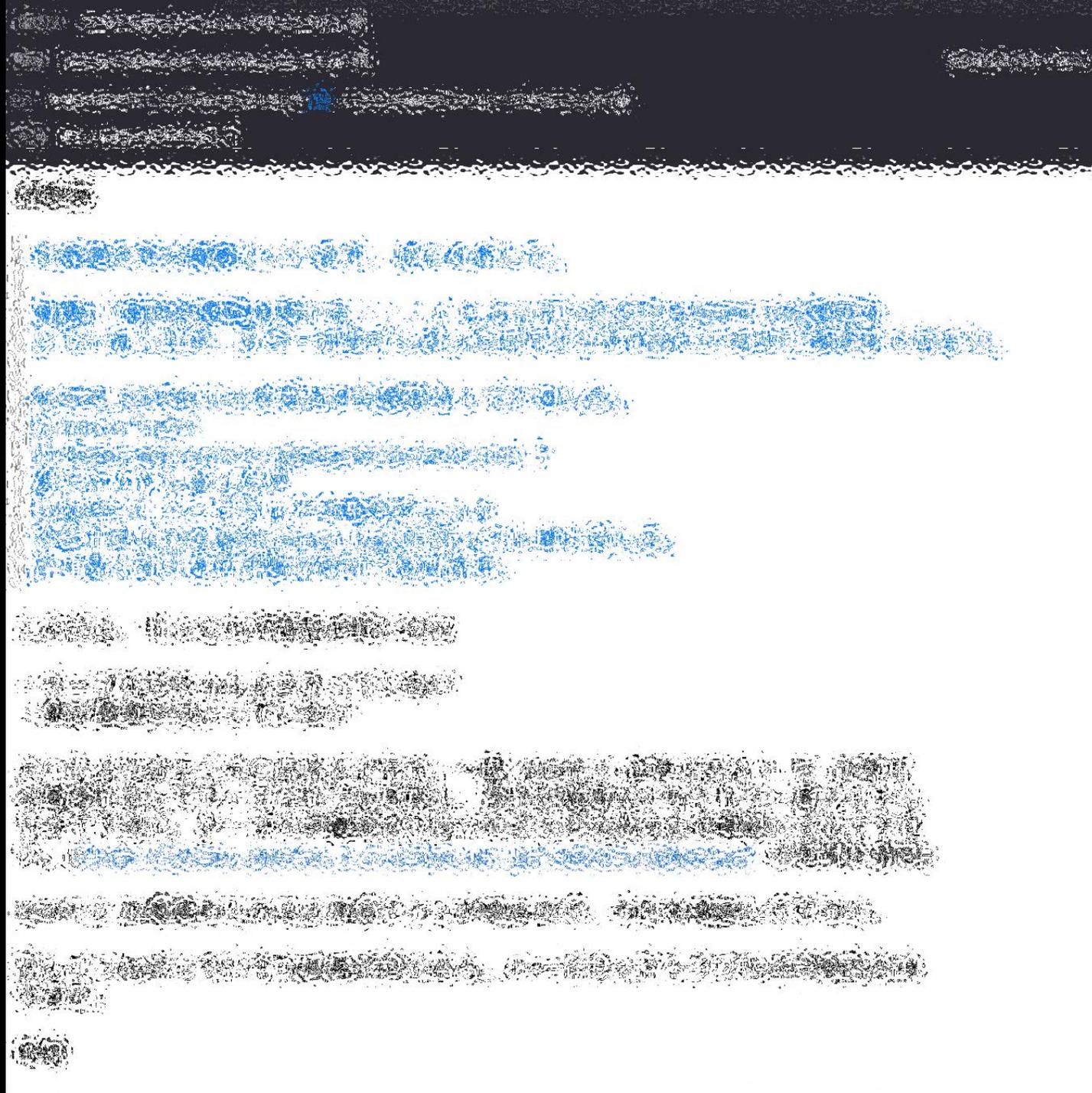


21years ago...

On 4th Jan. 2002

The first contact

GRAPE-5が
動かない、助けて





最初の論文：GRAPE-5での近傍探査加速法

PASJ: Publ. Astron. Soc. Japan **55**, 871–877, 2003 August 25
© 2003. Astronomical Society of Japan.

Acceleration Method of Neighbor Search with GRAPE and Morton Ordering

Takayuki R. SAITOH

*Division of Physics, Graduate School of Science, Hokkaido University, N10W8, Sapporo 060-0810
takayuki@astro1.sci.hokudai.ac.jp*

and

Jin KODA*

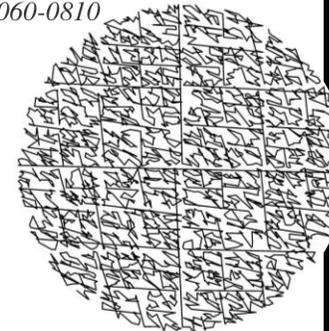
*National Astronomical Observatory, 2-21-1 Osawa, Mitaka, Tokyo 181-8588
jin.koda@nao.ac.jp*

(Received 2003 April 14; accepted 2003 May 20)

Abstract

We describe a new method to accelerate neighbor searches on GRAPE, i.e. a special-purpose hardware that efficiently calculates the gravitational forces and potentials in N -body simulations. In addition to gravitational calculations, GRAPE simultaneously constructs lists of neighbor particles that are necessary for Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH). However, the data transfer of the neighbor lists from GRAPE to the host computer is time-consuming, and can be a bottleneck. In fact, the data transfer can take about the same time as the calculations of the force themselves. Making use of GRAPE's special treatment of neighbor lists, we can reduce the amount of data transfer if we search neighbors in the order that the neighbor lists, constructed in a single GRAPE run, overlap each other. We find that the Morton ordering requires very low additional calculation and programming costs, and results in successful speed-up on data transfer. We show some benchmark results in the case of GRAPE-5. Typical reduction in transferred data becomes as much as 90%. This method is suitable not only for GRAPE-5, but also for GRAPE-3 and the other versions of GRAPE.

Key words: cosmology: large-scale structure of universe — galaxies: formation — galaxies: ISM — methods: numerical



- GRAPEは重力計算のついでに近傍粒子リストを作る
- 近傍粒子リストを圧縮して返す
- 近傍粒子リストが重複しているほど転送効率が高い
- モートンを使う

We thank Jun Makino,
the referee, for useful suggestions, which improved the
appendices.





D論のシミュレーション

(200万粒子/GRAPE-5)

4D2U

シミュレーション:
2003/12-2004/10
国立天文台MUV
GRAPE-5 x 1



<http://4d2u.nao.ac.jp/t/var/download/spiral2.html>

Simulation: Takayuki Saitoh, Visualization: Takaaki Takeda, Sorahiko Nukatani





天の川創成プロジェクト(2004~)

- 「世界最速レベルの計算機(汎用並列+GRAPE)と独自開発の並列コードにより世界最高精度の理論シミュレーションを実現し、天の川銀河の形成を明らかにする」
- ポスドク最初の年にこのプロジェクトのメンバーとしてシミュレーションコードの作成、シミュレーションの実行などを担当
 - 2004年2月ごろ、こういうプロジェクトが立ち上がるよというアナウンスが tennet に流れて、大変だなあ誰がやるんだろかなあと思っていた

件名 [tennet:3269] 天の川創成プロジェクト会◆合のお知らせ

天文学会員の皆様

「天の川創成プロジェクト(仮称)」会合のお知らせ

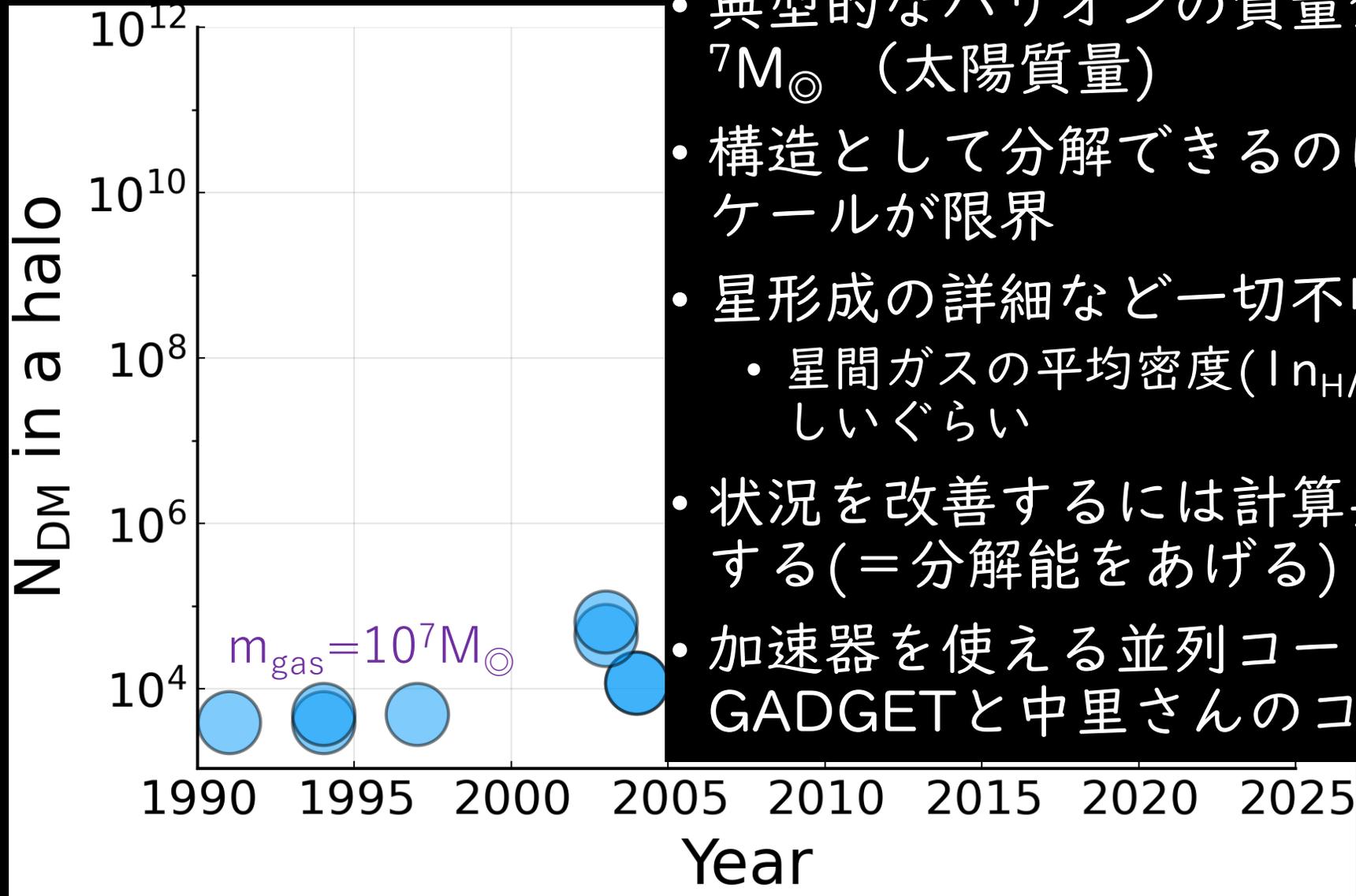
国立天文台では、現在スーパーコンピュータ、GRAPEクラスタを用いた計算機共同利用を行っており、宇宙物理のさまざまな分野で多くの成果が得られていますが、それとは独立に、特定の分野で世界を圧倒的にリードする天文シミュレーションプロジェクトの検討を有志で行っています。それがここで簡単にご紹介いたします「天の川創成プロジェクト(仮称)」です。

天の川創成プロジェクト(仮称)

発起人 富阪幸治、牧野淳一郎、和田桂一、小久保英一郎、台坂博、吉田直紀



2004年当時の銀河形成シミュレーションの 典型的質量分解能



- 典型的なバリオンの質量分解能は 10^6 – $10^7 M_{\odot}$ (太陽質量)
- 構造として分解できるのは矮小銀河スケールが限界
- 星形成の詳細など一切不明
 - 星間ガスの平均密度 (n_H/cc) も分解が難しいぐらい
- 状況を改善するには計算要素を細かくする (= 分解能をあげる) しかない
- 加速器を使える並列コードは当時は GADGET と中里さんのコードぐらい?





N-body/SPHコード ASURA

- 並列化
 - Makino (2004)
- 重力計算
 - Tree+PhantomGRAPE(Tanikawa+2013)+Symmetrized Plummer softening (Saitoh & Makino 2012)
- 流体計算
 - DISPH (Saitoh & Makino 2013)
- 時間積分
 - 独立時間刻み法
 - Timestep limiter for strong shock (Saitoh & Makino 2009) and Fully Asynchronous Split Time-Integrator (FAST; Saitoh & Makino 2010)
- バリオン物理
 - Star formation/Radiative cooling&heating/Stellar wind, Supernovae II/Ia feedback, AGB stars' mass loss, and NSM
 - 化学進化ライブラリ：CELlib (Saitoh 2017)

2004年12月ごろから実装開始、最初の一年ぐらいは
どうやってデータを保持してやりとりするかを書いていた





Saitoh & Makino 20xx

1. A Necessary Condition for Individual Time Steps in SPH Simulations(2009)
2. FAST: A Fully Asynchronous Split Time-Integrator for a Self-Gravitating Fluid(2010)
3. A natural symmetrization for the plummer potential(2012)
4. A Density-independent Formulation of Smoothed Particle Hydrodynamic region (2013)

この辺は、日々押しかけていって珈琲を飲みながらの雑談を
してもらってできました: 教訓「珈琲は大事」
牧野さんの手描き文字、私は読めます





A NECESSARY CONDITION FOR INDIVIDUAL TIME STEPS IN SPH SIMULATIONS

TAKAYUKI R. SAITOH^{1,2}, AND JUNICHIRO MAKINO^{1,2}

¹ Center for Computational Astrophysics, National Astronomical Observatory of Japan, Mitaka, Tokyo 181-8588, Japan; saitoh.takayuki@nao.ac.jp,
saitoh.takayuki@cfca.jp

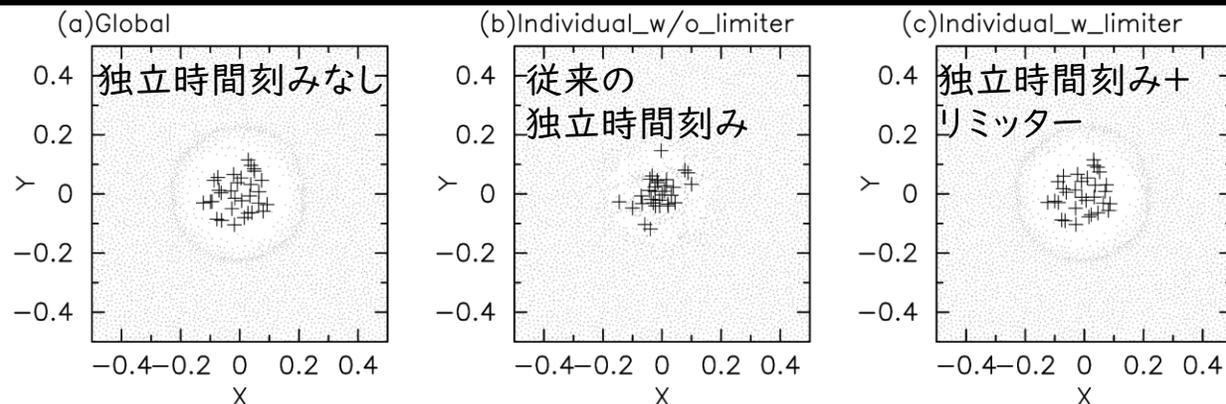
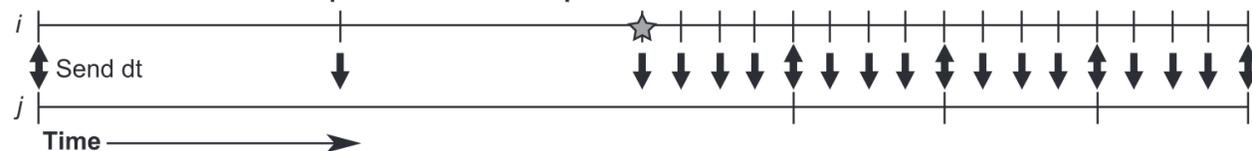
² Division of Theoretical Astronomy, National Astronomical Observatory of Japan, 2-21-1 Osawa, Mitaka-shi, Tokyo 181-8588, Japan

Received 2008 August 5; accepted 2009 April 9; published 2009 May 6

Case 1. Individual time steps without the time-step limiter



Case 2. Individual time steps with the time-step limiter



- 通常 dt を決めた後に周辺で起きた情報は反映できない
→ 著しい作用反作用の法則破綻 (e.g., SN)
- 近傍粒子間で著しい dt の差を許さないこと (ある程度) 回復
- 「論文は短い方がいい」ということで sec 3 まで





FAST: A Fully Asynchronous Split Time-Integrator for a Self-Gravitating Fluid

Takayuki R. SAITOH

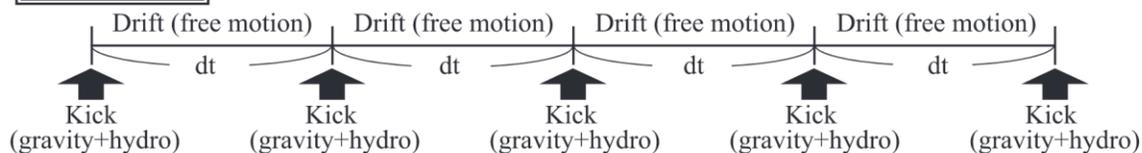
*Division of Theoretical Astronomy, National Astronomical Observatory of Japan, 2-21-1 Osawa, Mitaka, Tokyo 181-8588
saitoh.takayuki@nao.ac.jp, saitoh.takayuki@cfca.jp*

and

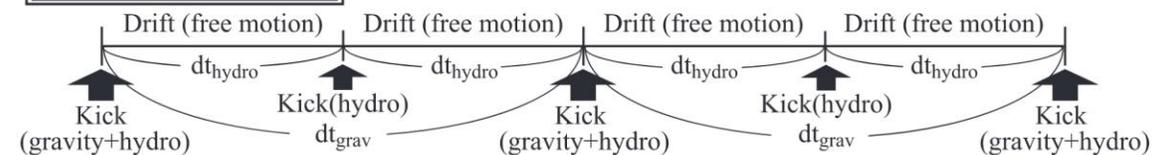
Junichiro MAKINO

*Division of Theoretical Astronomy and Center for Computational Astrophysics,
National Astronomical Observatory of Japan, 2-21-1 Osawa, Mitaka, Tokyo 181-8588
Department of Astronomical Science, School of Physical Sciences, The Graduate University for Advanced Studies (SOKENDAI),
2-21-1 Osawa, Mitaka, Tokyo 181-8588*

Leap-frog



FAST ($dt_{\text{grav}} = 2 dt_{\text{hydro}}$)



- ハミルトニアン分割して流体相互作用を短い時間刻みで計算
- 遠距離力の重力の計算頻度を減らせる→効率化!
- 「SNが起きた時にdtが小さくなって困るんですよ」
「こういう方法があるよ、原理的にはうまくいくはず」
「できました！」
- Fully Asyn... は牧野さん発案、模式図は Fujii+07参考





Contents lists available at [SciVerse ScienceDirect](http://SciVerse.ScienceDirect.com)

New Astronomy

journal homepage: www.elsevier.com/locate/newast



A natural symmetrization for the plummer potential

Takayuki R. Saitoh^{a,b,*}, Junichiro Makino^c

^aCenter for Computational Astrophysics, National Astronomical Observatory of Japan, 2-21-1 Osawa, Mitaka-shi, Tokyo 181-8588, Japan

^bDivision of Theoretical Astronomy, National Astronomical Observatory of Japan, 2-21-1 Osawa, Mitaka-shi, Tokyo 181-8588, Japan

^cInteractive Research Center of Science, Tokyo Institute of Technology, 2-12-1 Ookayama, Meguro, Tokyo 152-8551, Japan

$$\phi_{ij} = -\frac{Gm_j}{|r^2 + \epsilon^2|^{1/2}} \quad \longrightarrow \quad \phi_{ij} = -\frac{Gm_j}{|r^2 + \epsilon_i^2 + \epsilon_j^2|^{1/2}}$$

- 粒子種(ソフトニング)の異なる粒子を一本のツリーで計算
- 途中震災があり輪番停電で計算機が止まる中計算
- 私はFMMを何度か書いた、というレフェリーとあれこれ





A DENSITY-INDEPENDENT FORMULATION OF SMOOTHED PARTICLE HYDRODYNAMICS

TAKAYUKI R. SAITOH AND JUNICHIRO MAKINO

Earth-Life Science Institute, Tokyo Institute of Technology, 2-12-1 Ookayama, Meguro, Tokyo 152-8551, Japan; saitoh@geo.titech.ac.jp

Received 2012 February 20; accepted 2013 March 7; published 2013 April 12

Smoothed hydrodynamics particles の定式化

物理量: $f(r) = \int f(r') \delta(r - r') dr'$

カーネル近似: $f(r) \approx \int f(r') W(r - r', h) dr'$

離散化: $f_i = \sum_j f_j W_{ij}(h) \Delta V_j$

従来のSPH

$$\rho_i = \sum_j m_j W_{ij}(h)$$

Density independent SPH

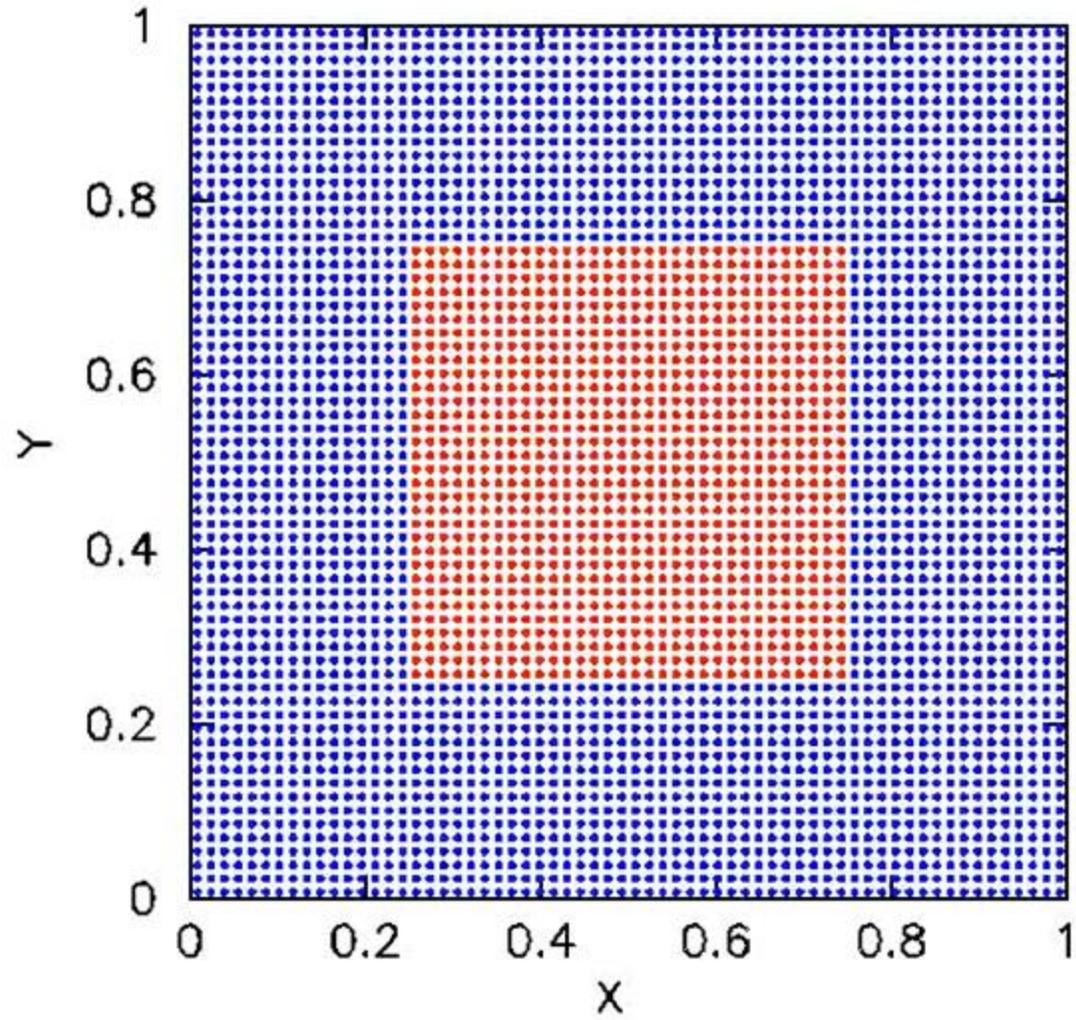
$$q_i = \sum_j U_j W_{ij}(h)$$

詳しくは湯浅さん講演



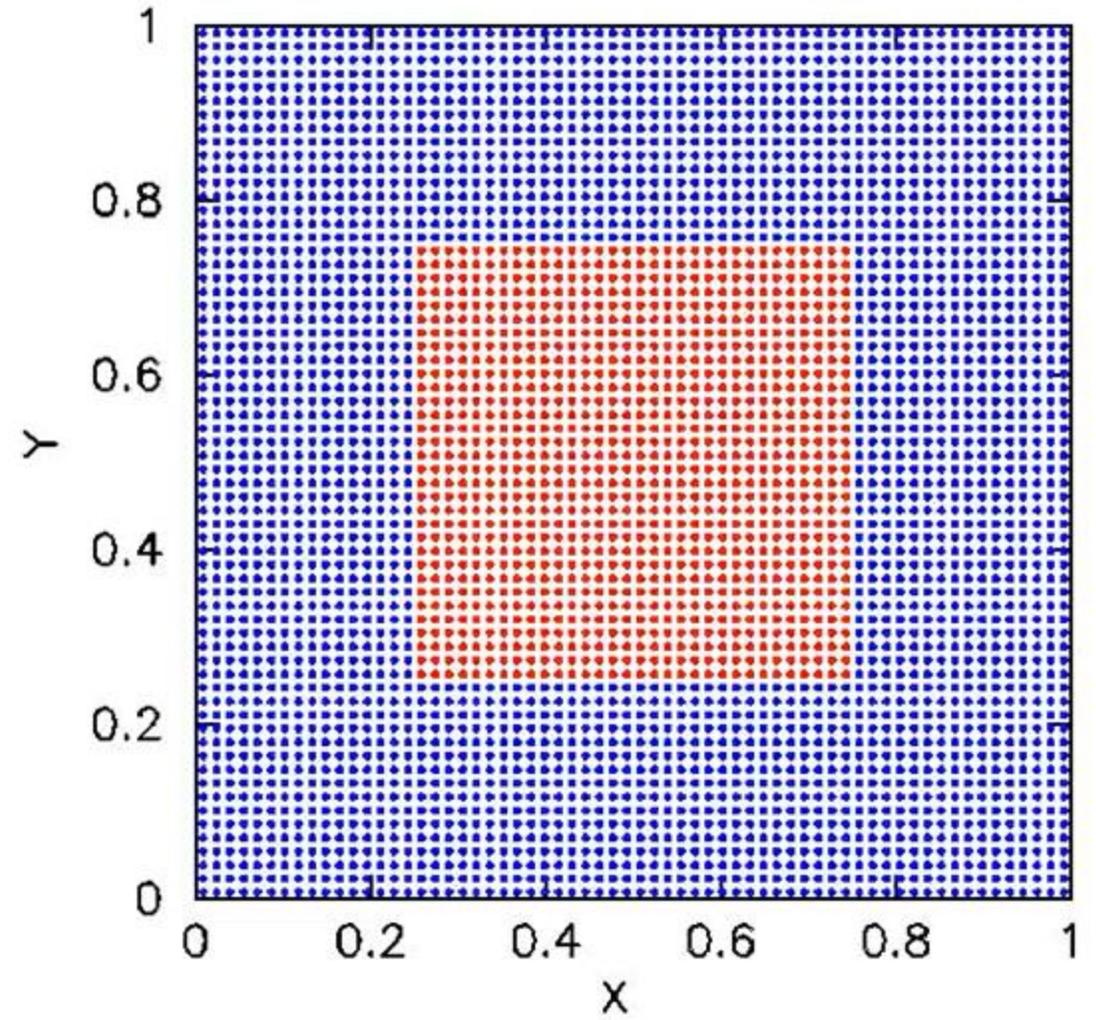
従来のSPH

$T = 0.00$



DISPH

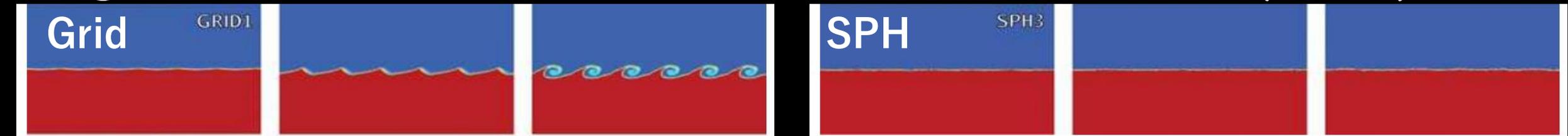
$T = 0.00$





DISPH 開発の切っ掛け

- 2010年4-5月バルセロナで行われた研究会に参加
- Agartz+2007 などに触発された話があった(はず)



- 一足先に帰る牧野さんから帰路のバルセロナ空港で書かれたメモが届く
 - 接触不連続面を扱うのに密度をスムーズだと仮定した定式化を使うのはおかしいのでは
 - 内部エネルギー(∞ 圧力)を定式化に用いた式が書かれていた
 - 研究室セミナーの資料：<https://jun-makino.sakura.ne.jp/talks/mitaka20100618.pdf>





ASURA とその仲間たち

- ASURA

- 2004年から開発を続けている N -body/SPHコード
- 平居さんの講演

- Nano-ASURA

- OpenMP 並列だけシンプルな実装に整理、学習・テスト用公開コード

- ASURA-BRIDGE

- 星団形成のために恒星の進化を高精度積分に置き換えたもの (BRIDGE/PeTar)
- 藤井さん、王さん、平居さんの講演

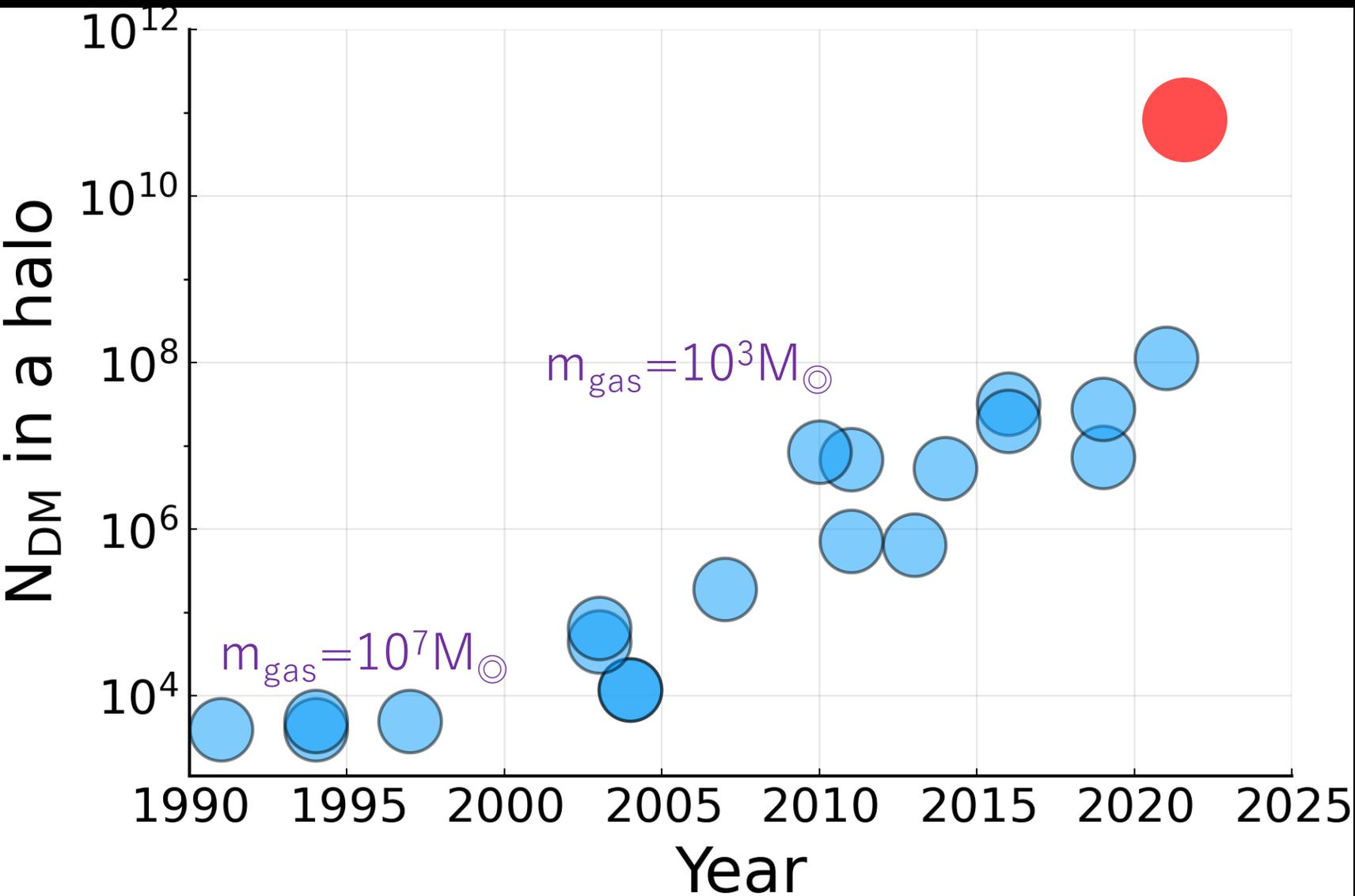
- ASURA-FDPS

- FDPSによる超並列化、ハミルトニアン分割、PIKGによる最適化カーネル構築、機械学習によるサブドメイン抽出などなど
- 藤井さん、平島さんの講演





MWサイズ銀河ハロー内のDM粒子数の増加



- 1990年代： $\sim 10^3$
 - Tree法、GRAPE
- 2000年代： $\sim 10^{4-5}$
 - Gadget/Gasoline など並列コード
- 2010年代： $\sim 10^{6-7}$
 - スキームの更新
 - 扱われる物理の増加
 - より複雑な subgrid-models
 - 数千コアで数ヶ月-数年
- 2020年代：



ASURA-FDPS (Under devel.)

• ASURA

- Hydrodynamics (DISPH)
- Rad. cooling/heating
- Star formation
- Feedbacks (SNII/Ia/AGB/NSMs)

• CELib

- Chemical evolution
- Star-by-star model

• FDPS

- Domain decomp.
- Interactions (PMMM/TreePM/P³T/SPH)
- Time integration
- Load balancer
- Memory management

• PIKG

- Auto gen. kernel

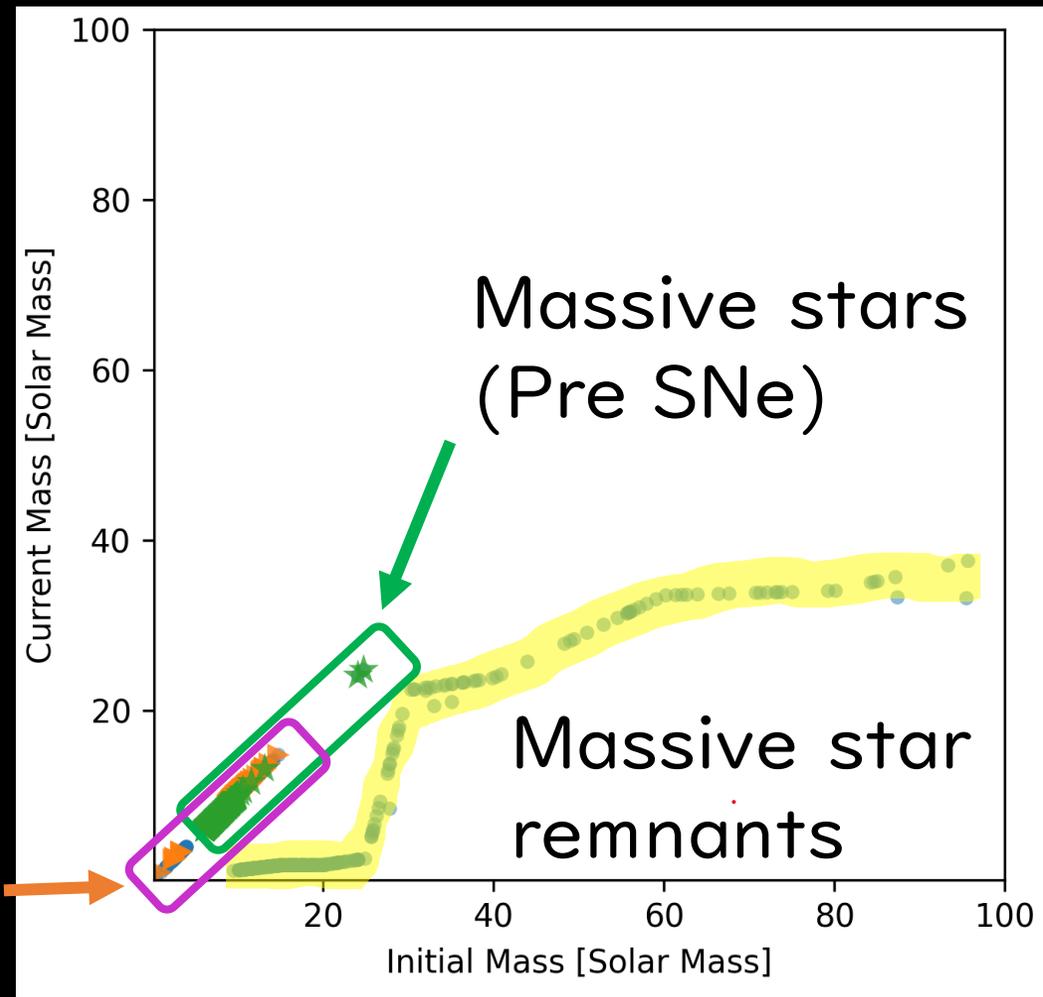


星形成モデル：IMF sampling model

- 冷たく密度の高いガスからの星形成
- IMF を仮定してサンプリング
- IMF を3つに分解
 - $0.1 \rightarrow 1.3 M_{\odot}$: SSP
 - $1.3 \rightarrow 6.0 M_{\odot}$: SSP/TypeIa/AGB
 - $>6.0 M_{\odot}$: ind. star/TypeII/NSM
- 粒子数の爆発的増加を抑えつつ、特に影響の大きい大質量星を分解

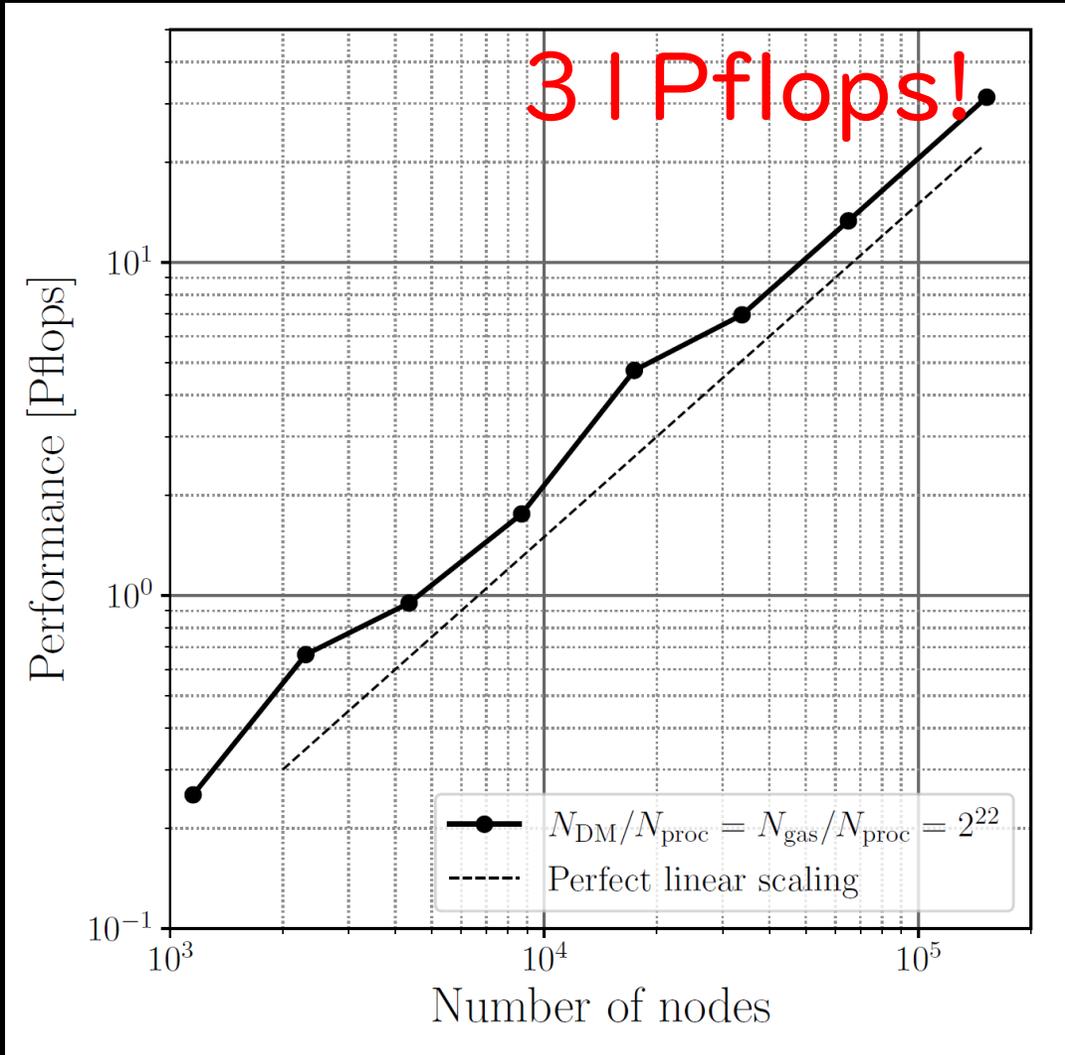
SIRIUS model に基づく
(Hirai, Saitoh, et. al. 2021;
Fujii, Saitoh et al. 2021 ab, 2022ab)

Low mass SSPs





Weak scaling test on Fugaku full system



- 2021年3月富岳全系
- メインで開発していた行方さん異動につき、初めてC++のコードを書いて実際の応用に向けて調整中
 - 星形成モデルは平居さん、BRIDGE 部分は藤井さん、機械学習は平島さんが主に担当

Eff=3.3-4.5%; ~1Gflops/W





MPI 使用メモリ@富岳

富岳1ノード:48コア

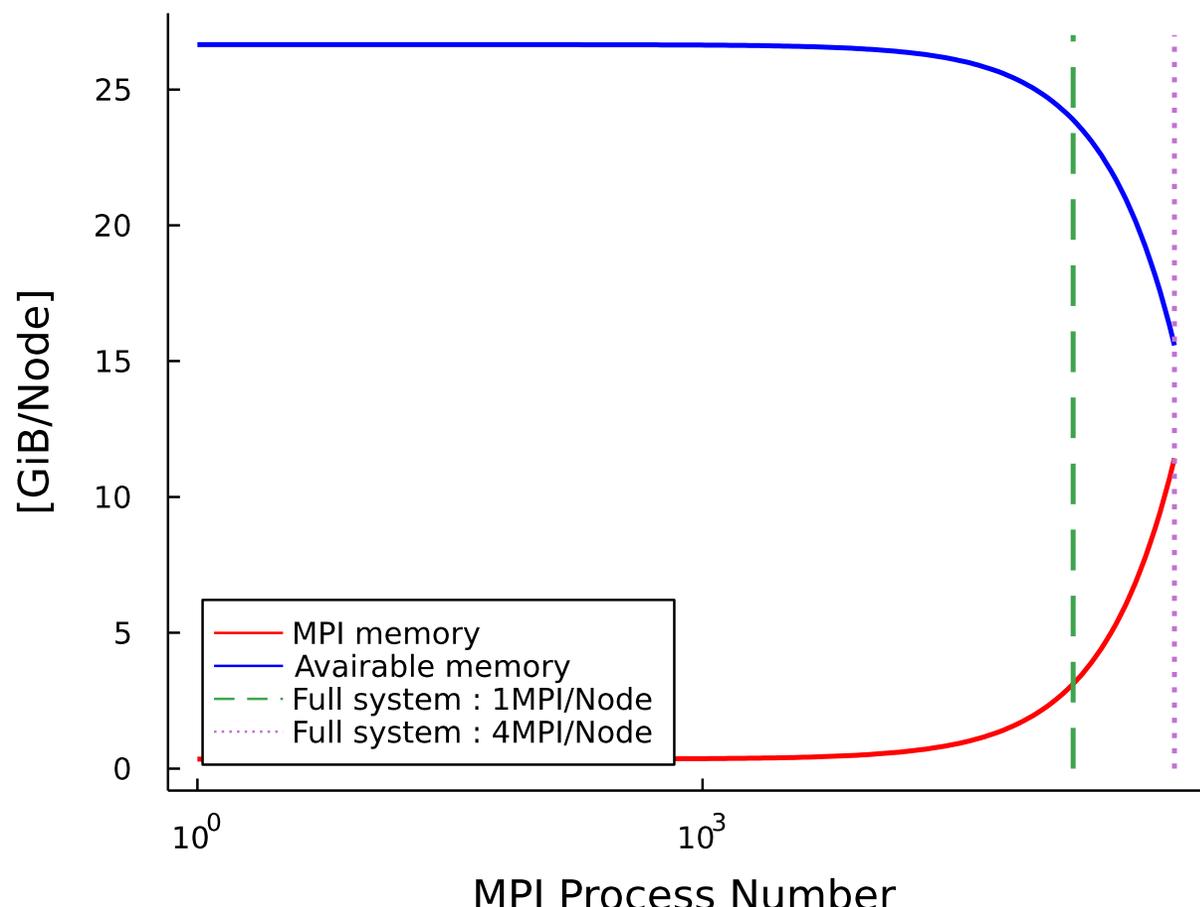
32GB

見積式:

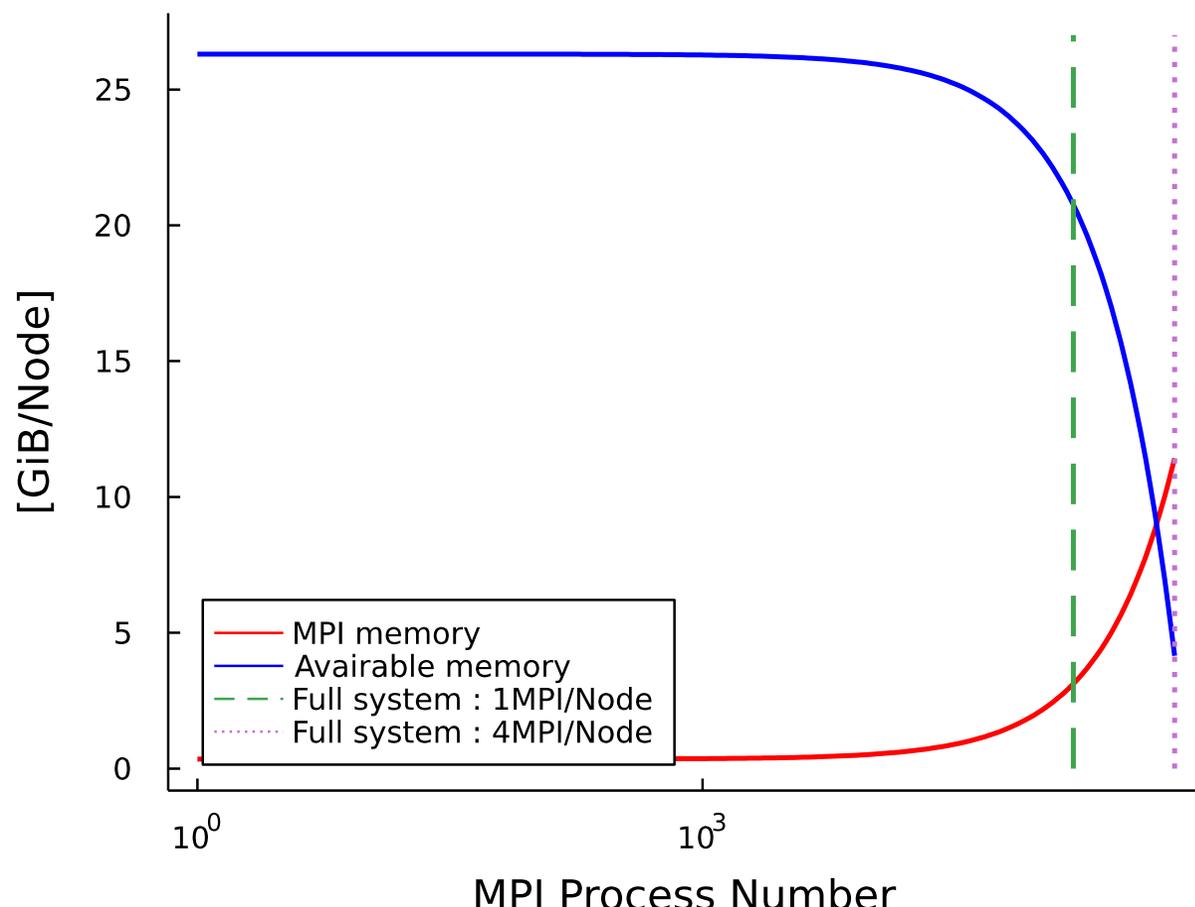
$$\begin{aligned} AM &= 32.0 - (MM \times 4 + SM) \\ MM &= 0.65565E-06 \times NP + 3.7E-06 \times NCP + 0.086914 \\ SM &= 5.0 \end{aligned}$$

AM : アプリケーションが利用できる1ノードあたりのメモリ量 (GiB)
MM : MPIの使用するメモリ量 (GiB)
SM : システムソフト使用メモリ量 (GiB)
NP : アプリケーションの総プロセス数
NCP : あるプロセスが集団通信以外で実際に通信するプロセスの数

No split



Split





やり残したこと

- ASURA-FDPS の大改修を終えてプロダクトラン
- CPHSF (Yamamoto & Makino 2017, 2019) を使いたい
 - 任意空間精度実現可能な圧縮性流体スキーム





CPHSF(Yamamoto & Maekino 2017)

- In CPHSF, physical quantities & their derivatives are evaluated through polynomial functions

- Consider \hat{f} which minimizes $\epsilon = \sum_j W_{ij} (\hat{f}(r_j) - f_j)^2$

- Practical form of \hat{f} is the Taylor expansion of f :

$$\hat{f}(r_j) = p_{ij} \cdot \delta f(r) \Big|_{r=r_i},$$
$$p_{ij} = (1, x_{ji}, y_{ji}, z_{ji}, x_{ji}^2, x_{ji}y_{ji}, y_{ji}^2, y_{ji}z_{ji}, z_{ji}^2, z_{ji}x_{ji}, \dots),$$
$$\delta = \left(1, \frac{\hat{\partial}}{\hat{\partial}x}, \frac{\hat{\partial}}{\hat{\partial}y}, \frac{\hat{\partial}}{\hat{\partial}z}, \dots \right)$$

- \hat{f} can be obtained by solving

$$\delta f(r) \Big|_{r=r_i} = B_i^{-1} \sum_j W_{ij} f_j p_{ij}; \quad B_i = \sum_j W_{ij} p_{ij} \otimes p_{ij}$$

- Thus, arbitrary space order scheme can be constructible





まとめ

- 牧野さん還暦おめでとうございます
- 専用計算機GRAPEシリーズ、天の川創成プロジェクトを通じて、研究のOSになる N-body/SPH コード ASURA を作って研究を進めています
- 珈琲を飲みながらの研究の議論をまたしたいです

