

Coarray Fortran в приложениях

Куликов Игорь

д.ф.-м.н., в.н.с.

**Лаборатория суперкомпьютерного
моделирования ИВМиМГ СО РАН**

13 октября 2022 года



О готовых программных кодах



Ограничения готовых решений

- Проблема черного ящика
- Проблема множества зависимостей
- Проблема ограничений

Ограничения готовых решений

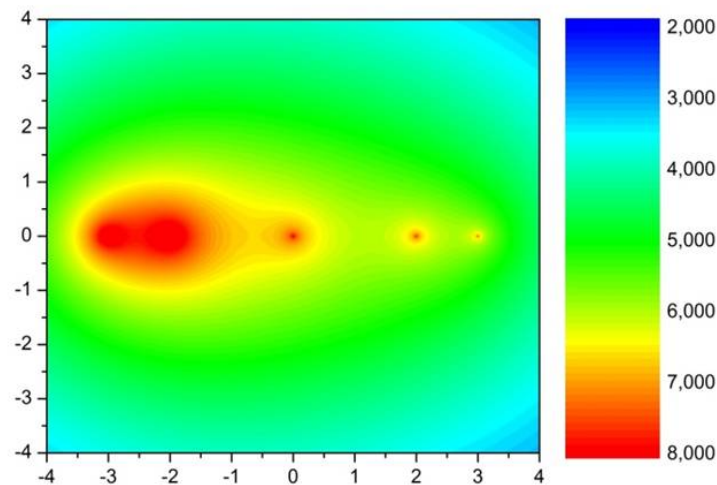
- Проблема черного ящика
 - Математика внутри черного ящика
 - Точность и корректность результата
 - Эффективность реализации

Ограничения готовых решений

➤ Проблема черного ящика

- Математика внутри черного ящика
- Точность и корректность результата
- Эффективность реализации

**Математический аппарат
спектральных портретов
как ответ
на некорректную задачу
о численном нахождении
собственных чисел
несимметричной матрицы**



Ограничения готовых решений

➤ Проблема черного ящика

- Математика внутри черного ящика
- Точность и корректность результата
- Эффективность реализации

This necessarily implies positive pressure and $v < 1$. Whenever a non-physical conserved state occurs, we floor the density to $\rho = 10^{-10}$ and the pressure to $P = 10^{-20}$. This occurs roughly once every 10^6 updates in our gamma-ray binary simulations. It occurs in the unshocked pulsar wind, where the density and pressure are lowest and the Lorentz factor the highest. It mostly occurs

Lamberts et al, A&A, 2013

Искусственная «ошибка» в массе и внутренней энергии в одной из миллиона ячеек в релятивистских джетах

Ограничения готовых решений

➤ Проблема черного ящика

- Математика внутри черного ящика
- Точность и корректность результата
- Эффективность реализации

Lamberts et al, A&A, 2013

Искусственная «ошибка» в массе и внутренней энергии в одной из миллиона ячеек в релятивистских джетах

- ✓ 16 «ошибочных» ячеек на одном временном шаге при сетке 256^3
- ✓ 100 шагов по времени «отравит» всю расчетную область (за 1 % расчетного времени)

Ограничения готовых решений

- **Проблема черного ящика**
 - Математика внутри черного ящика
 - **Точность и корректность результата**
 - Эффективность реализации

Lamberts et al, A&A, 2013

Искусственная «ошибка» в массе и внутренней энергии в одной из миллиона ячеек в релятивистских джетах

Помнит ли результат о начальных данных?

Ограничения готовых решений

➤ Проблема черного ящика

- Математика внутри черного ящика
- Точность и корректность результата
- Эффективность реализации

Доклады на Российских суперкомпьютерных днях:

- Petrushov. Advanced Genetic Algorithm in the Problem of Linear Solver Parameters Optimization (2021)
- Chernykh. The Impact of Compiler Level Optimization on the Performance of Iterative Poisson Solver for Numerical Modeling of Protostellar Disks (2021)
- Pershin. GPU Implementation of a Stencil Code with More Than 90% of the Peak Theoretical Performance (2019)
- Andreev. Solving of Eigenvalue and Singular Value Problems via Modified Householder Transformations on Shared Memory Parallel Computing Systems (2019)
- Zamarashkin. Block Lanczos-Montgomery Method over Large Prime Fields with GPU Accelerated Dense Operations (2018)
- Kropotina. Maximus: A Hybrid Particle-in-Cell Code for Microscopic Modeling of Collisionless Plasmas (2018)
- Chernykh. Advanced Vectorization of PPML Method for Intel® Xeon® Scalable Processors (2018)
- Stegailov. Deploying Elbrus VLIW CPU Ecosystem for Materials Science Calculations: Performance and Problems (2018)

Ограничения готовых решений

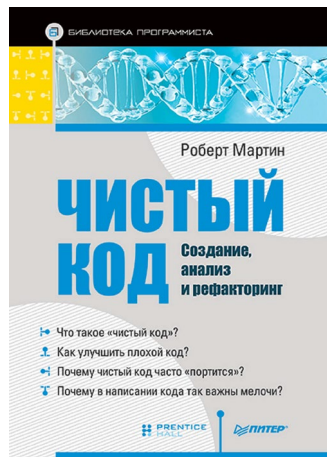
➤ Проблема черного ящика

- Математика внутри черного ящика
- Точность и корректность результата
- Эффективность реализации

Доклады на Российских суперкомпьютерных днях:

- Petrushov. Advanced Genetic Algorithm in the Problem of Linear Solver Parameters Optimization (2021)
- **Chernykh. The Impact of Compiler Level Optimization on the Performance of Iterative Poisson Solver for Numerical Modeling of Protostellar Disks (2021)**
- Pershin. GPU Implementation of a Stencil Code with More Than 90% of the Peak Theoretical Performance (2019)
- Andreev. Solving of Eigenvalue and Singular Value Problems via Modified Householder Transformations on Shared Memory Parallel Computing Systems (2019)
- Zamarashkin. Block Lanczos-Montgomery Method over Large Prime Fields with GPU Accelerated Dense Operations (2018)
- Kropotina. Maximus: A Hybrid Particle-in-Cell Code for Microscopic Modeling of Collisionless Plasmas (2018)
- Chernykh. Advanced Vectorization of PPML Method for Intel® Xeon® Scalable Processors (2018)
- Stegailov. Deploying Elbrus VLIW CPU Ecosystem for Materials Science Calculations: Performance and Problems (2018)

Книги по эффективной разработке кодов



2010



2002



1989



2007



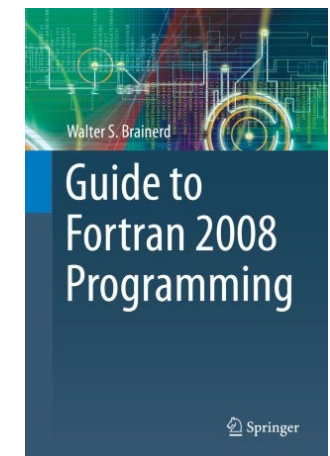
2003



2010



2007



2015

Ограничения готовых решений

- **Проблема множества зависимостей**
 - Все библиотеки в составе кода (RayLib)
 - Все библиотеки подключаются снаружи (XQuartz)

Ограничения готовых решений

- Проблема множества зависимостей
 - Все библиотеки в составе кода (RayLib)
 - Все библиотеки подключаются снаружи (XQuartz)

RayLib

GLFW

CGLTF

David
Reid

SDEFL

STB

VOX



Ограничения готовых решений

- Проблема множества зависимостей
 - Все библиотеки в составе кода (RayLib)
 - Все библиотеки подключаются снаружи (XQuartz)

XQuartz

Sparkle

Cairo

FreeGLUT

libpng

Mesa

X
Keyboard



Ограничения готовых решений

- Проблема ограничений
 - Испорченный программный код
 - Экспортные ограничения

Ограничения готовых решений

- Проблема ограничений
 - Испорченный программный код
 - Экспортные ограничения

Хабр



Автор `faker.js` и `colors.js` намеренно сломал свои пакеты

Разработка



Ограничения готовых решений

- Проблема ограничений
 - Испорченный программный код
 - Экспортные ограничения

Хабр



Qt Group ограничила доступ
для российских пользователей

Разработка



Решения ограничений готовых решений

➤ Проблема черного ящика

- Новые подходы к верификации результата
- Собственные разработки (из-за надежности)

➤ Проблема множества зависимостей

- Использование минимального числа библиотек
- Собственные разработки (из-за переносимости)

➤ Проблема ограничений

- Параллельный импорт
- Собственные разработки (из-за токсичности)

Вселенная – динамическая система с множеством взаимодействий



Топ 10 (июнь, 2022)

1. Frontier - AMD 3rd Generation EPYC 64C 2GHz, AMD Instinct 250X, HPE
2. Supercomputer Fugaku - A64FX 48C 2.2GHz, Fujitsu
3. LUMI - AMD 3rd Generation EPYC 64C 2GHz, AMD Instinct 250X, HPE
4. Summit - IBM POWER9 22C 3.07GHz, NVIDIA Volta GV100, IBM
5. Sierra - IBM POWER9 22C 3.1GHz, NVIDIA Volta GV100, IBM/NVIDIA
6. Sunway TaihuLight - Sunway SW26010 260C 1.45GHz, Sunway
7. Perlmutter - AMD EPYC 7763 64C 2.45GHz, NVIDIA A100, HPE
8. Selene - AMD EPYC 7742 64C 2.25GHz, NVIDIA A100, NVIDIA
9. Tianhe-2A - Intel Xeon E5-2692v2 12C 2.2GHz, Matrix-2000, Inspur
10. AdastrA - AMD 3rd Generation EPYC 64C 2GHz, AMD Instinct 250X, HPE

Топ 10 (июнь, 2022)

1. Frontier - AMD 3rd Generation EPYC 64C 2GHz, AMD Instinct 250X, HPE

2. Supercomputer Fugaku - A64FX 48C 2.2GHz, Fujitsu

3. LUMI - AMD 3rd Generation EPYC 64C 2GHz, AMD Instinct 250X, HPE

4. Summit - IBM POWER9 22C

5. Sierra - IBM POWER9 22C

6. Sunway TaihuLight - Sunway

7. Perlmutter - AMD EPYC 77

8. Selene - AMD EPYC 7742 64C 2.25GHz, NVIDIA A100, NVIDIA

9. Tianhe-2A - Intel Xeon E5-2692v2 12C 2.6GHz, Inspur

10. Adastral - AMD 3rd Generation EPYC 64C 2GHz, AMD Instinct 250X, HPE

SIMD-based суперЭВМ



26 апреля 2017 года

(Новосибирск, ССКЦ)

Параллельная реализация вычислительного ядра

Декомпозиция
расчетной области



Распределение областей
(MPI)



Распределение потоков
(OpenMP)



Векторизация
(AVX 512)

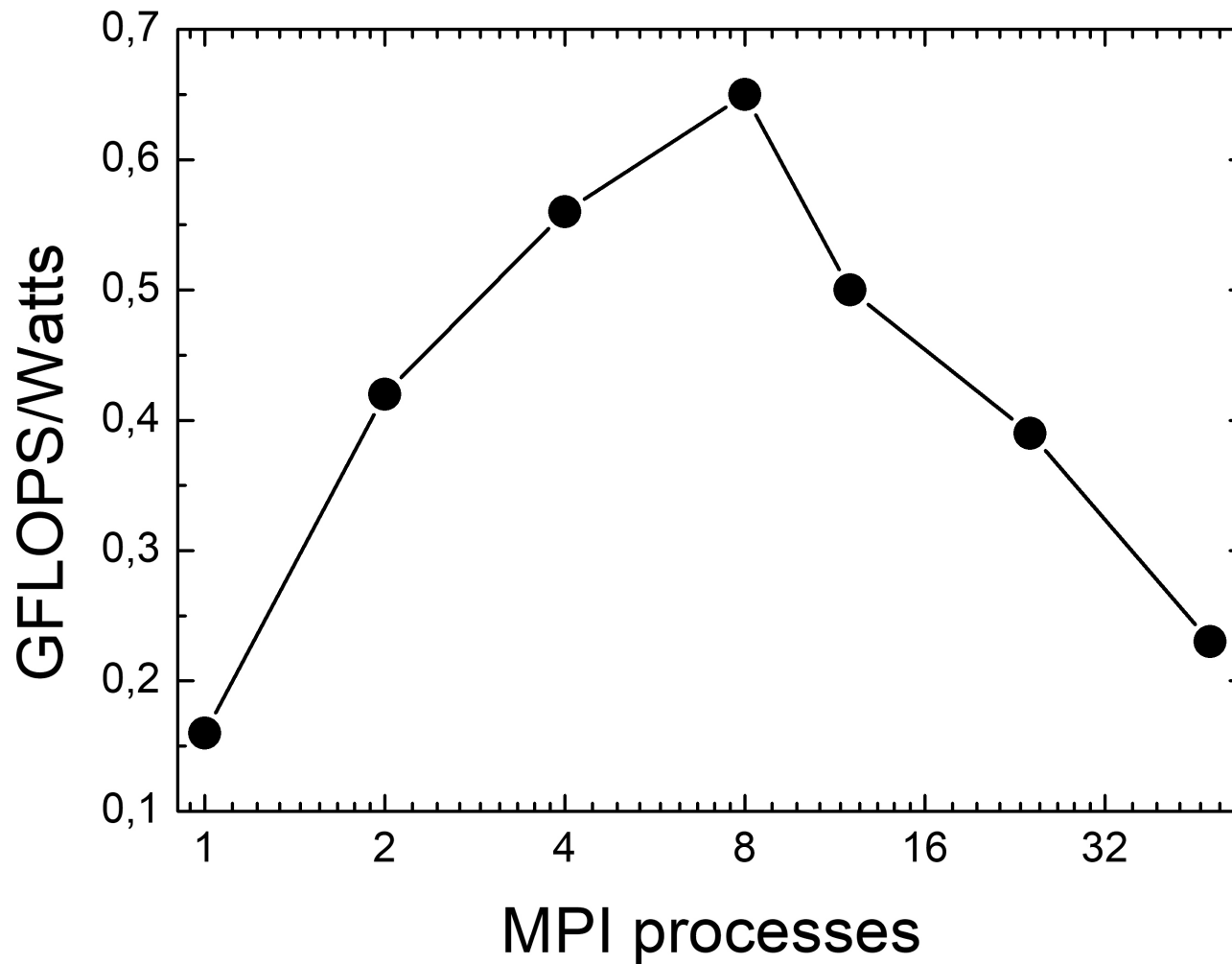
Вызовы векторных архитектур:

- организация вычислений 8-элементными векторами
- ассоциативность кэш памяти
- выравнивание данных
- распределение работ
- зависимость по данным

НКС-1П ССКЦ

48-кратное ускорение на узле
180 ГФЛОПС производительности
96% масштабируемость

CO₂ impact



7 GPU суперкомпьютеров в Топ 10

1. Frontier - **AMD 3rd Generation EPYC 64C 2GHz**, **AMD Instinct 250X**, HPE
2. Supercomputer Fugaku - A64FX 48C 2.2GHz, Fujitsu
3. LUMI - **AMD 3rd Generation EPYC 64C 2GHz**, **AMD Instinct 250X**, HPE
4. Summit - **IBM POWER9 22C 3.07GHz**, **NVIDIA Volta GV100**, IBM
5. Sierra - **IBM POWER9 22C 3.1GHz**, **NVIDIA Volta GV100**, IBM/NVIDIA
6. Sunway TaihuLight - Sunway SW26010 260C 1.45GHz, Sunway
7. Perlmutter - **AMD EPYC 7763 64C 2.45GHz**, **NVIDIA A100**, HPE
8. Selene - **AMD EPYC 7742 64C 2.25GHz**, **NVIDIA A100**, NVIDIA
9. Tianhe-2A - Intel Xeon E5-2692v2 12C 2.2GHz, Matrix-2000, Inspur
10. AdastrA - **AMD 3rd Generation EPYC 64C 2GHz**, **AMD Instinct 250X**, HPE

Новое поколение графических ускорителей AMD Instinct MI250X с 47 TFLOPS

AMD Instinct™ MI250X

GPU Specifications

GPU Architecture: CDNA2

Lithography: TSMC 6nm FinFET

Stream Processors: 14,080

Compute Units: 220

**Peak Half Precision (FP16)
Performance:**
383 TFLOPs

Peak Engine Clock: 1700 MHz

**Peak Single Precision Matrix
(FP32) Performance:**
95.7 TFLOPs

**Peak Double Precision Matrix
(FP64) Performance:**
95.7 TFLOPs

**Peak Single Precision (FP32)
Performance:**
47.9 TFLOPs

**Peak Double Precision (FP64)
Performance:**
47.9 TFLOPs

Peak INT4 Performance: 383 TOPs

Peak INT8 Performance: 383 TOPs

Peak bfloat16: 383 TFLOPs

OS Support: Linux x86_64

Новое поколение графических ускорителей Intel Ponte Vecchio с 45 TFLOPS

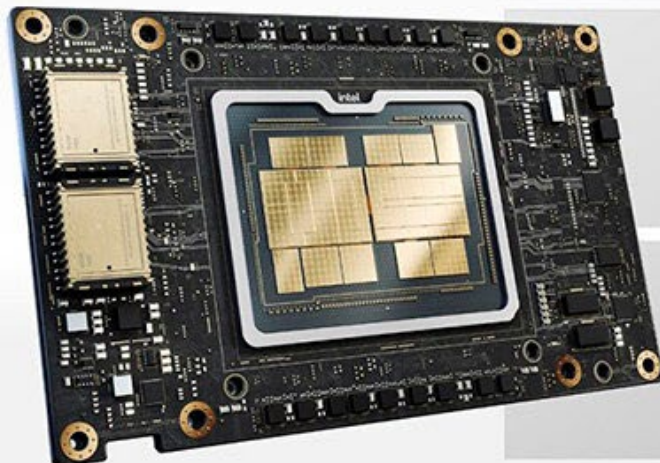
Ponte Vecchio

Execution Progress

A0 Silicon Current Status

> 45 TFLOPS

FP32 Throughput



> 5 TBps

Memory Fabric
Bandwidth

> 2 TBps

Connectivity
Bandwidth

For workloads and configurations visit www.intel.com/ArchDay21claims. Results may vary.

Вместо CUDA: OpenMP offloading & HIP

[Public]

(1) OPENMP TO HIP: SAXPY EXAMPLE

```
void example() {  
    float a = 2.0;  
    float * x;  
    float * y;
```

Allocate device memory for x and y, and specify directions of data transfers

```
#pragma omp target data map(to:x[0:count]) map(tofrom:y[0:count])  
{
```

```
    compute_1(n, x);  
    compute_2(n, y);
```

```
#pragma omp target update to(x[0:count])
```

```
    saxpy(n, a, x, y)
```

```
    compute_3(n, y);
```

```
}  
}
```

Let's assume that we want to implement the saxpy() function in a low-level language.

```
void saxpy(size_t n, float a,  
           float * x, float * y) {  
    #pragma omp target teams distribute \  
        parallel for ...  
    for (size_t i = 0; i < n; ++i) {  
        y[i] = a * x[i] + y[i];  
    }  
}
```

Вместо CUDA: Intel oneAPI

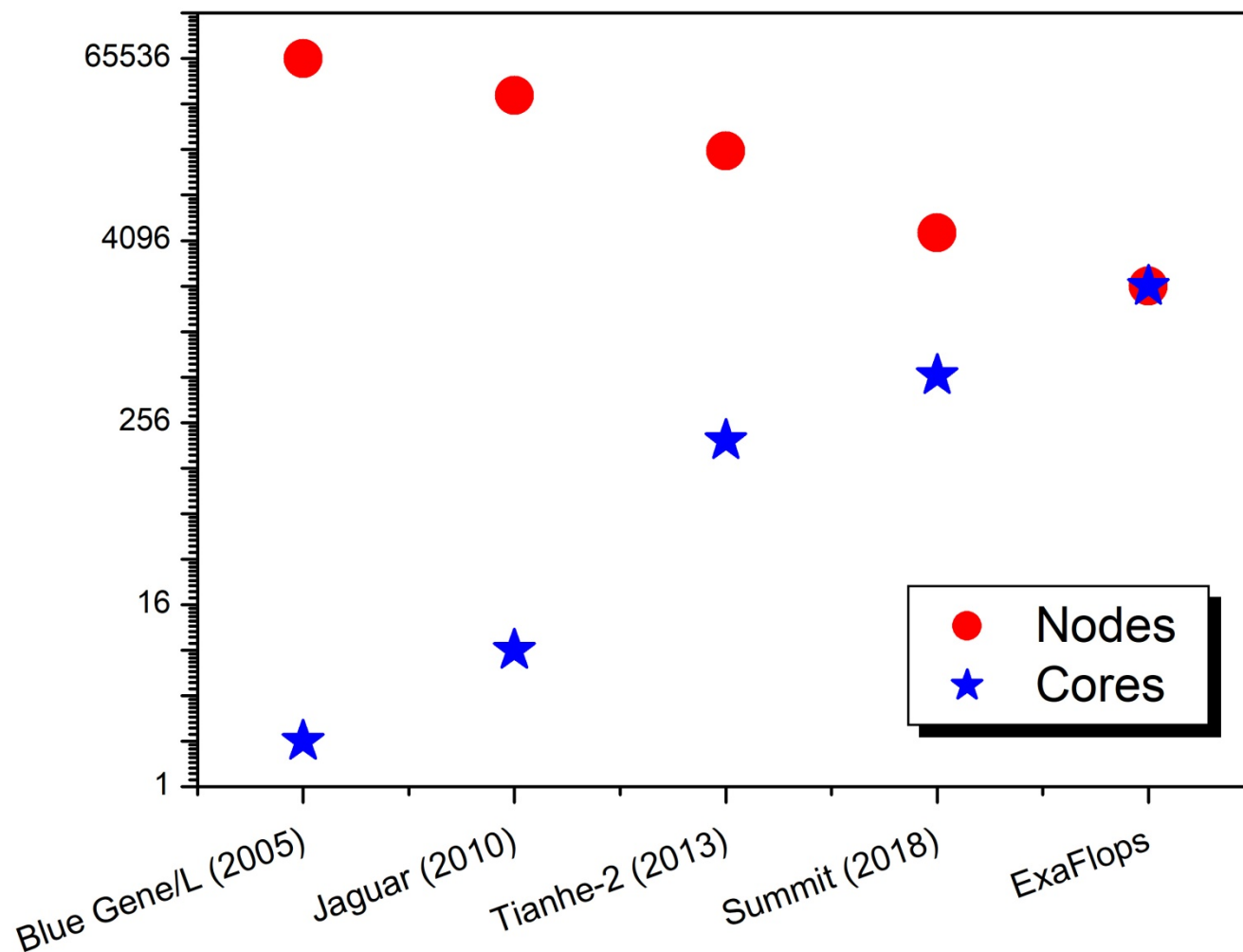
```
#pragma omp target parallel for reduction(+:dot) map(to: a,b)
for (int i = 0; i < N; i++)
    dot = dot + a[i] * b[i];
```

Задел: AstroPhi код

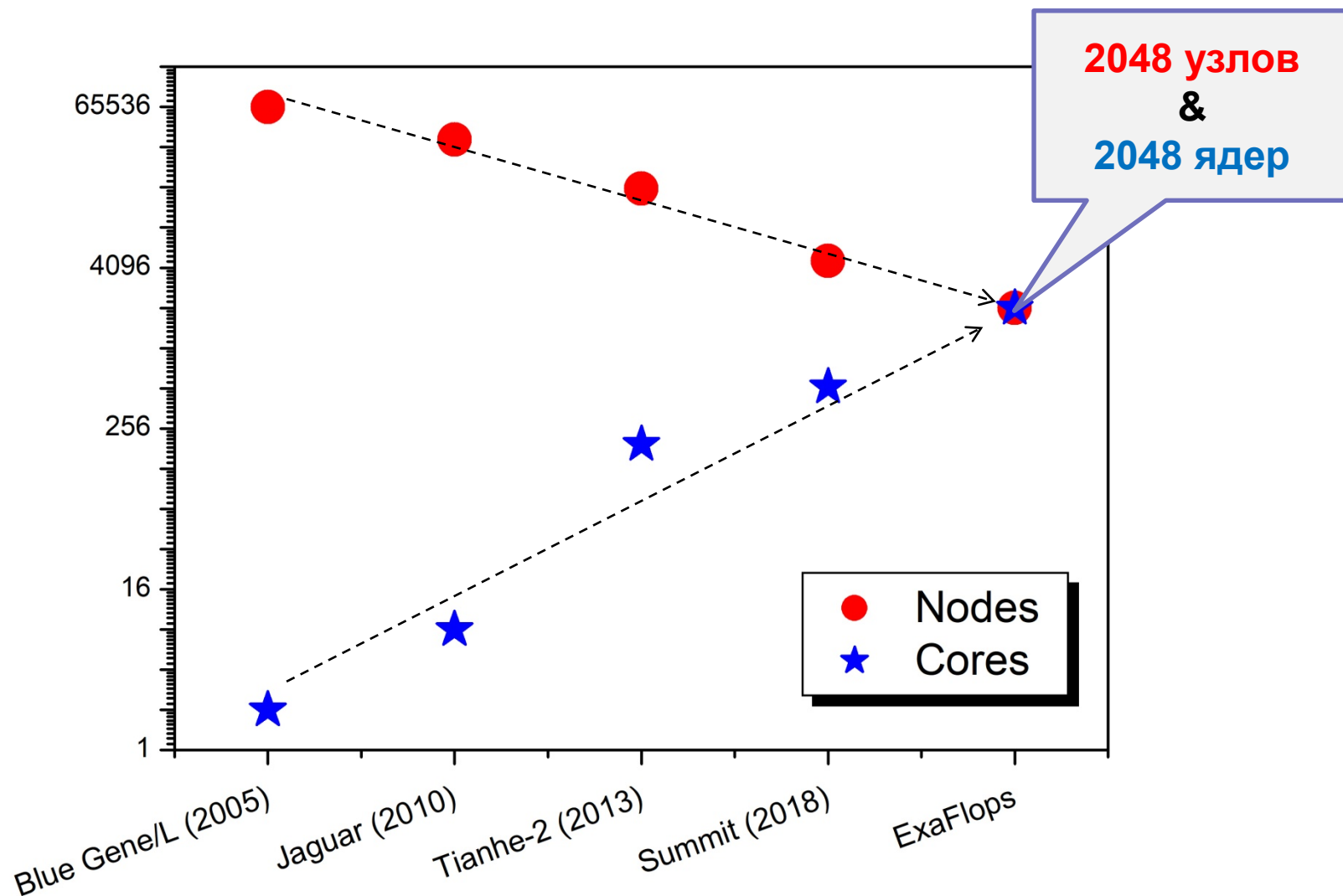
```
#pragma offload target (mic) in(a:length(N), b:length(N))
{
    #pragma omp parallel for reduction(+:dot)
    for (int i = 0; i < N; i++)
        dot = dot + a[i] * b[i];
}
```

Kulikov I.M., Chernykh I.G., Snytnikov A.V., Glinskiy B.M., Tutukov A.V.
AstroPhi: A code for complex simulation of dynamics of astrophysical
objects using hybrid supercomputers // **Computer Physics
Communications.** - 2015. - V. 186. - P. 71-80.

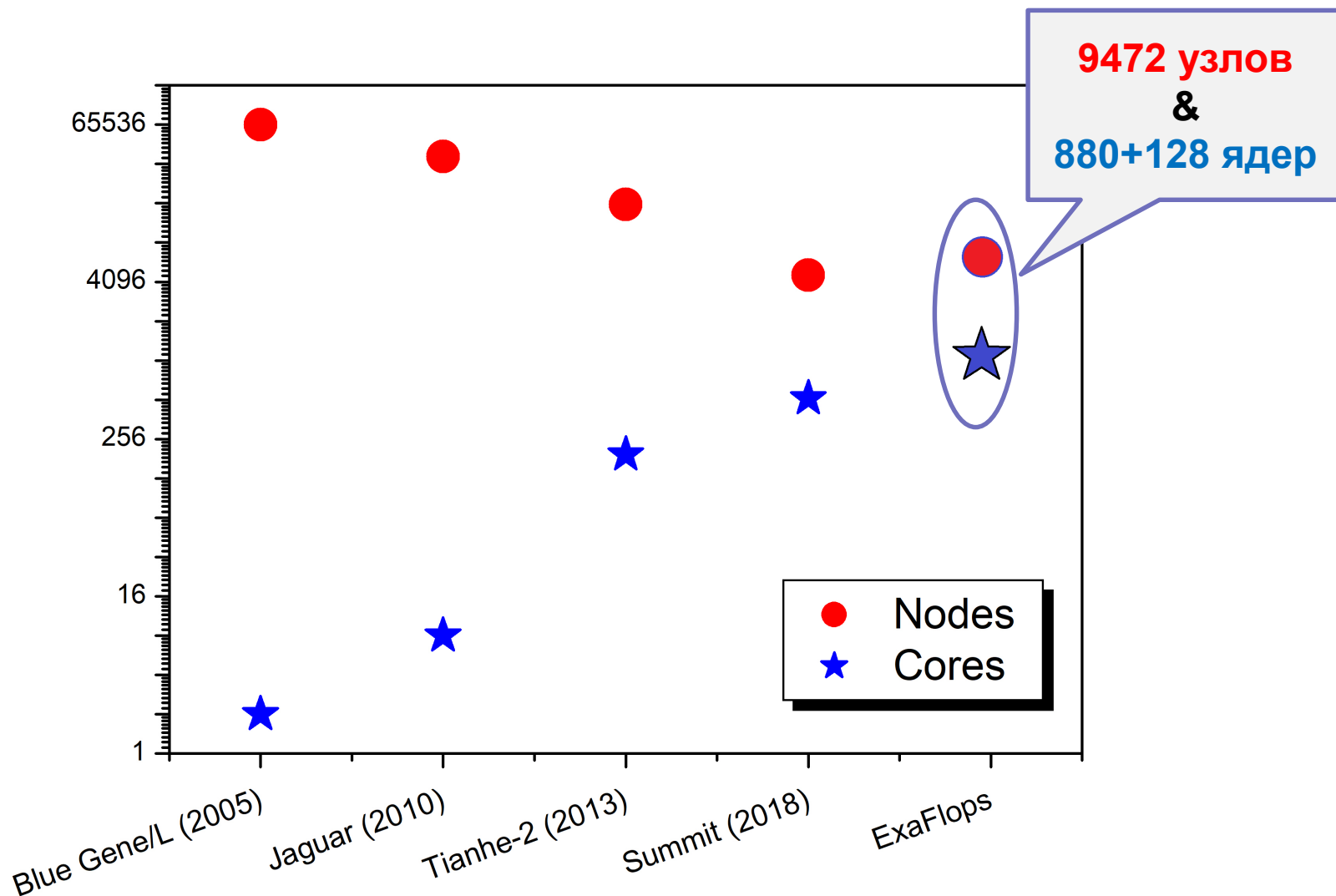
Архитектура суперЭВМ (AstroNum 2019)



Архитектура суперЭВМ (AstroNum 2019)



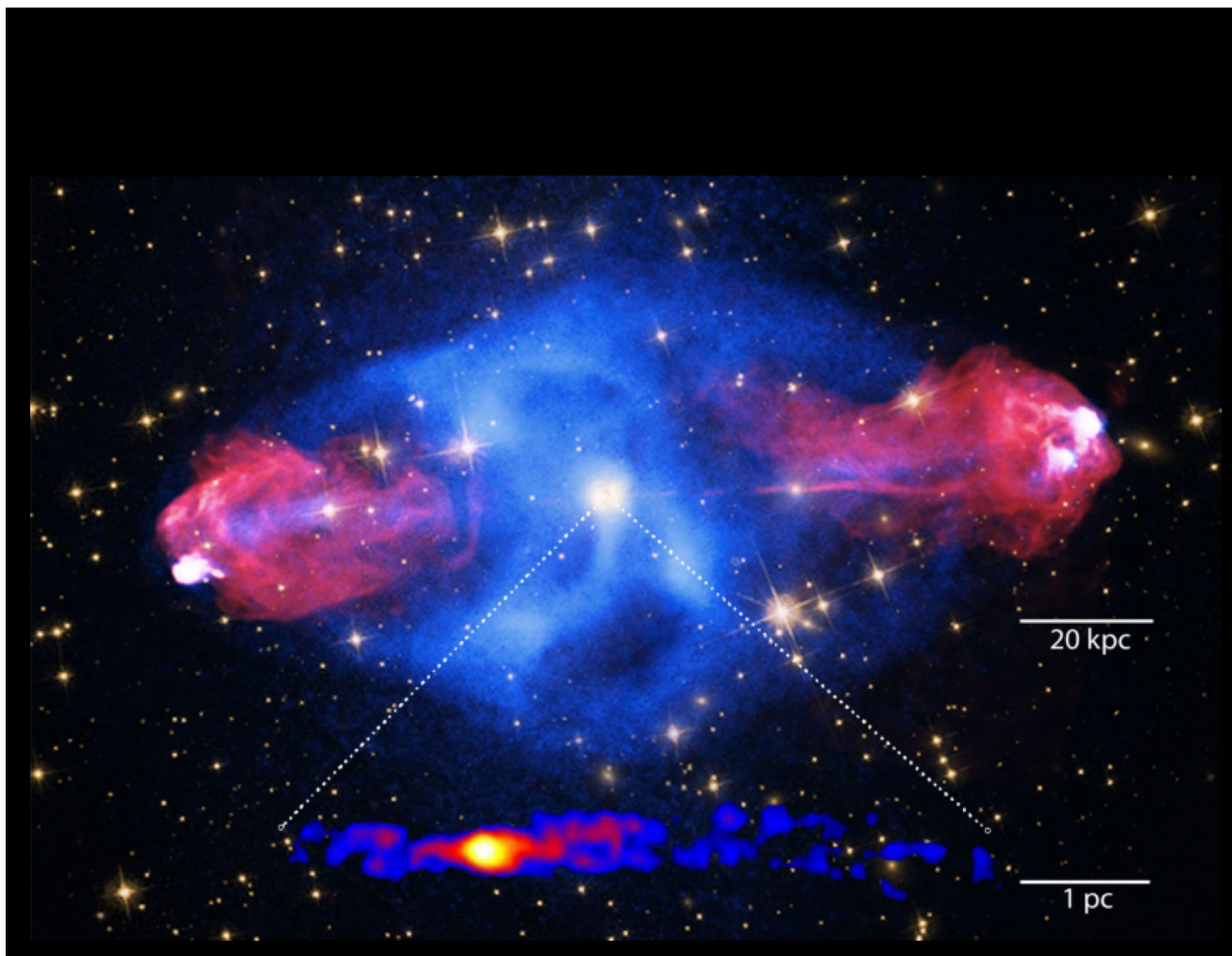
Архитектура суперЭВМ (реальность)



Стратегия разработки кодов

- Использование ускорителей и сопроцессоров
- Использование intrinsics-функций (язык Си)
- Использование векторных операций (Фортран)
- Использование OpenMP offload
- Возможная замена OpenMP на std::thread C++ 11
- Минимизация сетевых коммуникаций (**MPI 3 & CAF**)
- Достижения требований **“C++ or Fortran Only”**
- Архитектурно-ориентированные коды

Эволюция релятивистского внегалактического джета



Развитие неустойчивости и обратное течение в релятивистском джете

nature.com > nature communications > articles > article

MENU ▾

nature
COMMUNICATIONS

Article | **OPEN**

A galactic microquasar mimicking winged radio galaxies

Josep Martí , Pedro L. Luque-Escamilla, Valentí Bosch-Ramon & Josep M. Paredes

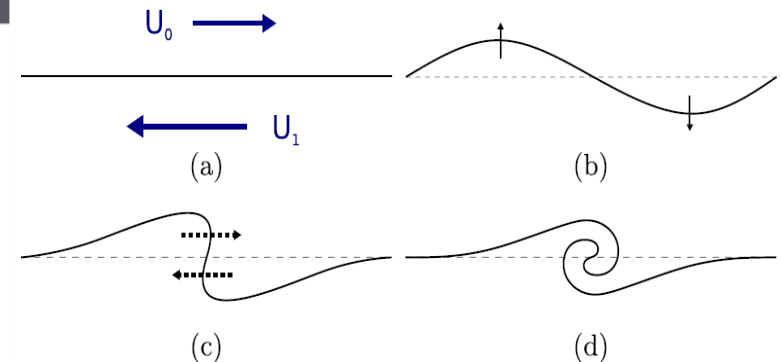
Nature Communications **8**,
Article number: 1757 (2017)
doi:10.1038/s41467-017-01976-5
[Download Citation](#)

Galaxies and clusters
High-energy astrophysics

Received: 17 April 2017
Accepted: 27 October 2017
Published online: 24 November 2017

We have thus a clear case of a relativistic jet impinging on the ISM. This renders the **hydrodynamic backflow** as the most plausible explanation of the very, very long secondary lobes of GRS 1758–258.

Martí et al. 2017, Nature Communications



Computational Challenges

Масштабы

- Размер внегалактического джета 100 кпк
- Фрагментация на уровне 10 пк
 - Разрешение $10\,000^3$
- Плотность межзвездной среды 1 см^{-3}
- Плотность фронта джета 10^5 см^{-3}
 - Контраст плотности 10^5
- Эволюция джета 10 Myr
- Прохождение звуковой волны через джет 1 Kyr
 - Необходимость 10^4 шагов по времени

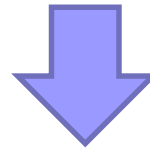
Physics Challenges

Физические процессы

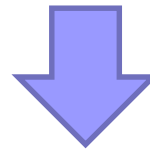
- Специальная релятивистская гидродинамика
- Сверхзвуковые течения с числом Маха ~ 3
- Лоренц-фактор ~ 100
- Нелинейная связь физических (примитивных) и консервативных переменных

Численный метод решения уравнений специальной релятивистской гидродинамики

$$\frac{\partial}{\partial t} \begin{pmatrix} \Gamma \rho \\ \Gamma^2 \rho h \vec{u} \\ \Gamma^2 \rho h - p \end{pmatrix} + \nabla \cdot \begin{pmatrix} \Gamma \rho \vec{u} \\ \Gamma^2 \rho h \vec{u} \vec{u} - p \\ \Gamma^2 \rho h \vec{u} \end{pmatrix} = 0 \quad h = 1 + \frac{\gamma}{\gamma - 1} \frac{p}{\rho} \quad \Gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - u^2}}$$



$$\frac{q_k^{n+1} - q_k^n}{\tau} + \frac{F_{k+1/2} - F_{k-1/2}}{h} = 0$$

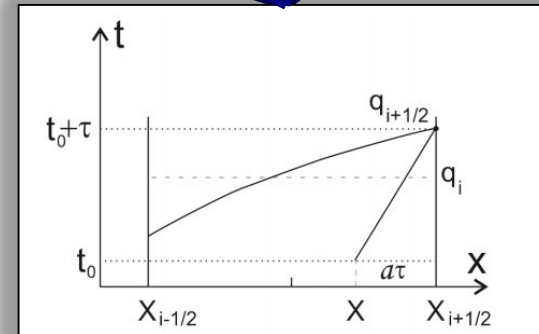


$$F_{k \pm 1/2} = \frac{F(-\lambda\tau) + F(\lambda\tau)}{2} + \frac{\mathfrak{I}(q)}{2} \times (q(-\lambda\tau) - q(\lambda\tau))$$

Численный метод решения уравнений специальной релятивистской гидродинамики

$$F_{k\pm 1/2} = \frac{F(-\lambda\tau) + F(\lambda\tau)}{2} + \frac{\mathfrak{I}(q)}{2} \times (q(-\lambda\tau) - q(\lambda\tau))$$

Кусочно-
параболическое
представление
решения



Ограничение скорости скоростью света.

Схема типа Лакса-Фридрихса

Принцип максимума для параболических уравнений (!)

Достигается на границе области
или в начальных данных

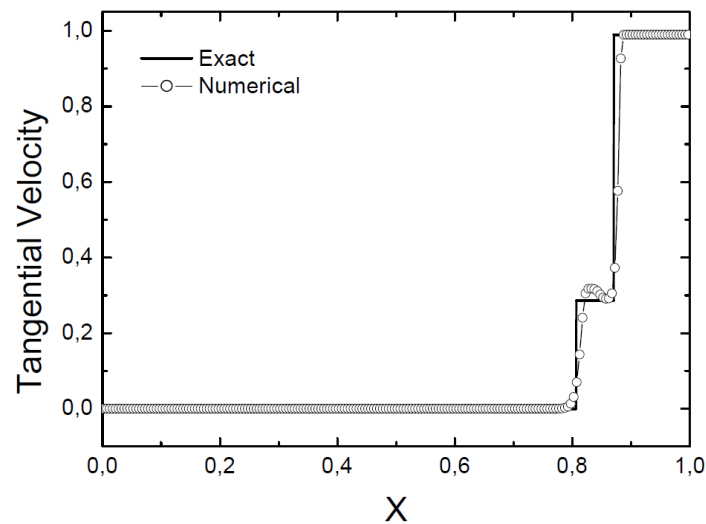
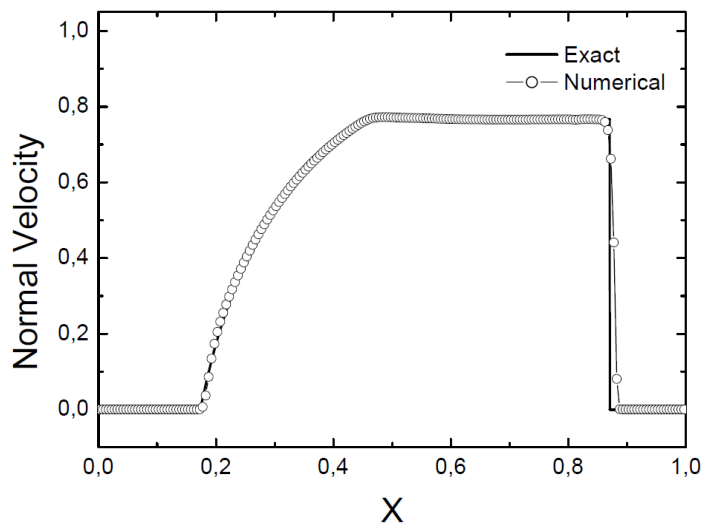
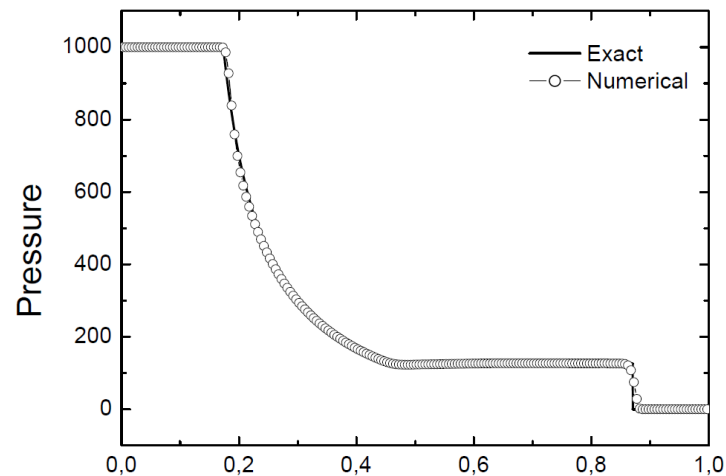
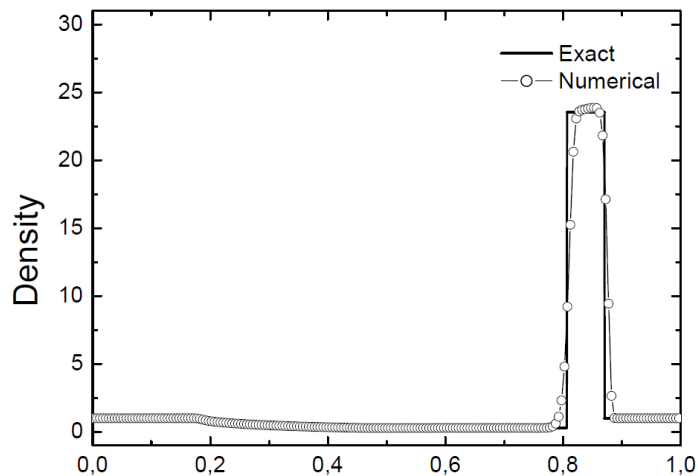
Физическое ограничения скорости
скоростью света $|v| \leq c = 1$

$$F_{k \pm 1/2} = \frac{F(-\lambda\tau) + F(\lambda\tau)}{2} + \frac{\mathfrak{I}(q)}{2} \times (q(-\lambda\tau) - q(\lambda\tau))$$



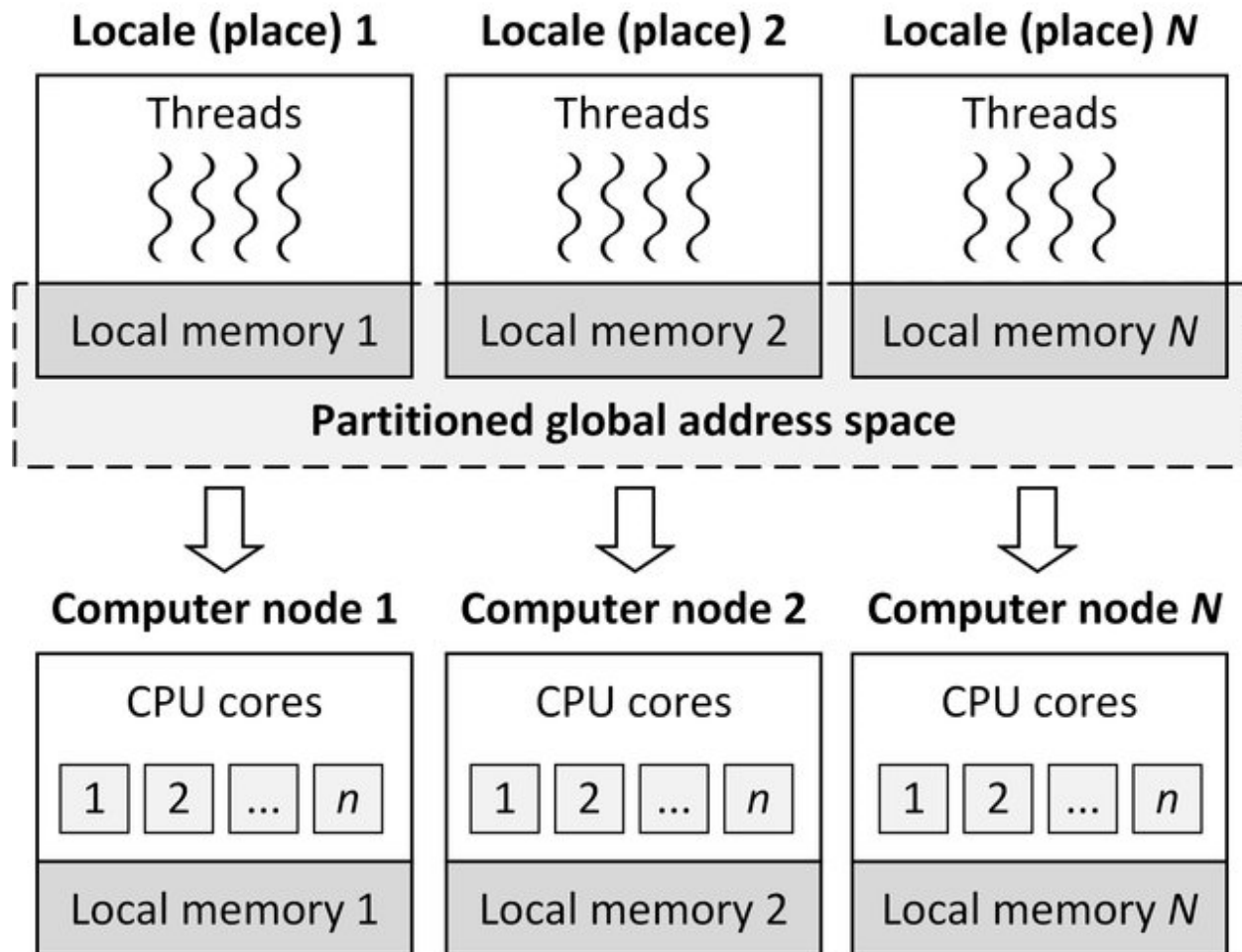
$$F_{k \pm 1/2} = \frac{F(-\lambda\tau) + F(\lambda\tau)}{2} + \frac{1}{2} \times (q(-\lambda\tau) - q(\lambda\tau))$$

Верификация численного метода



Технология PGAS

Partitioned Global Address Space



Реализация PGAS

- Coarray Fortran (стандарт Фортран 2008)
- Unified Parallel C (диалект стандарта ISO C)
- Chapel (параллельный язык Cray)
- X10 (параллельный язык IBM)
- Fortress (параллельный язык Sun)
- UPC++ (библиотека шаблонов)
 - Remote Memory Access
 - Remote Procedure Call
- Global Arrays (библиотека)

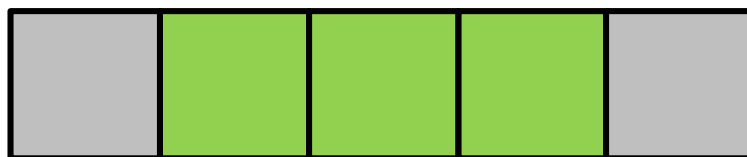
Использование классического МРІ



Использование классического MPI



(1) MPI_Send



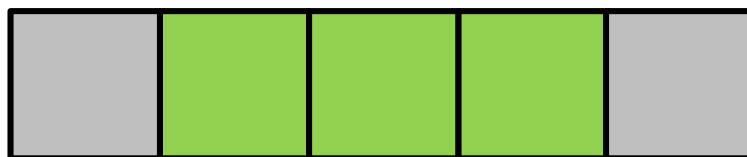
Использование классического MPI



(2) MPI_Recv



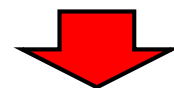
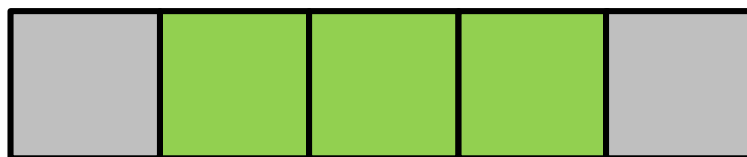
Использование классического MPI



(3) MPI_Send



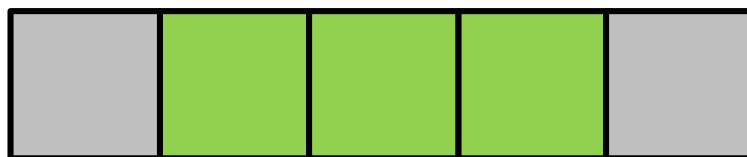
Использование классического MPI



(4) MPI_Recv



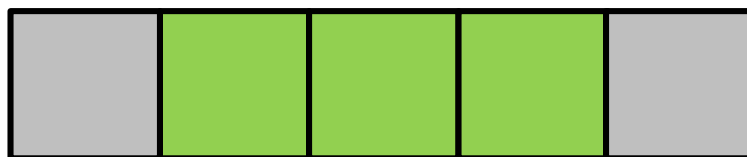
Использование классического MPI



(5) MPI_Send



Использование классического MPI



(6) MPI_Recv



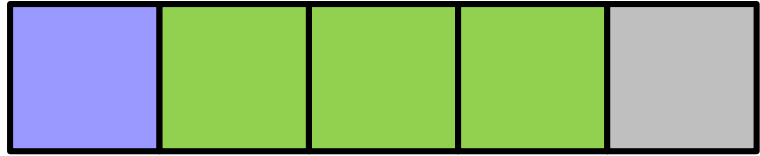
Использование классического MPI



(7) MPI_Send



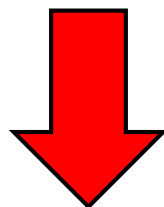
Использование классического MPI



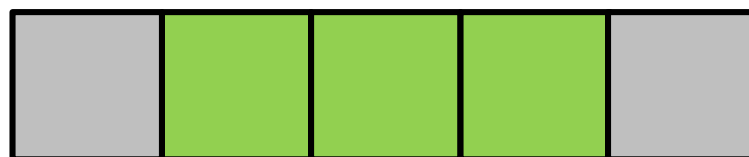
(8) MPI_Recv



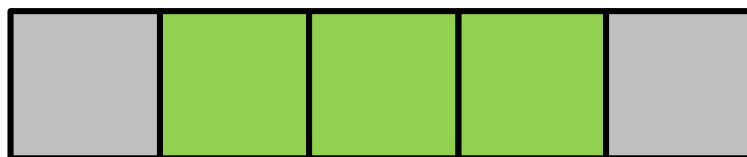
Оптимизация классического MPI



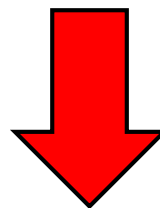
(1) MPI_Isend/MPI_Irecv



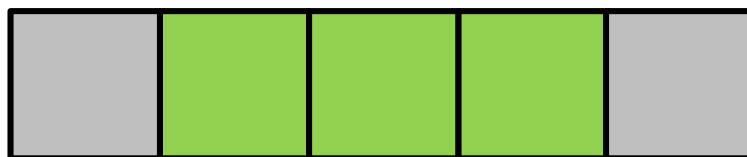
Оптимизация классического MPI



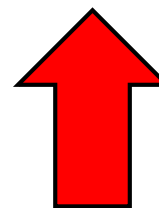
(2) MPI_Isend/MPI_Irecv



Оптимизация классического MPI



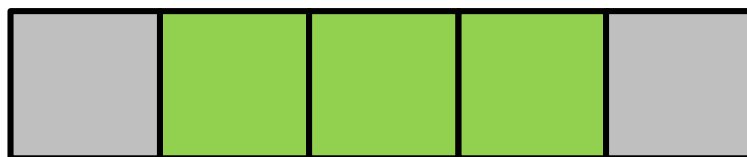
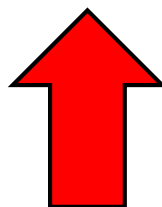
(3) MPI_Isend/MPI_Irecv



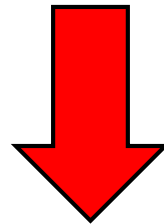
Оптимизация классического MPI



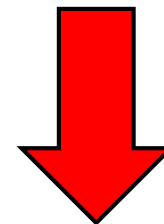
(4) MPI_Isend/MPI_Irecv



Использование MPI 3.0



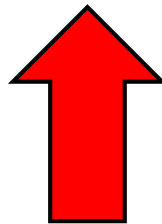
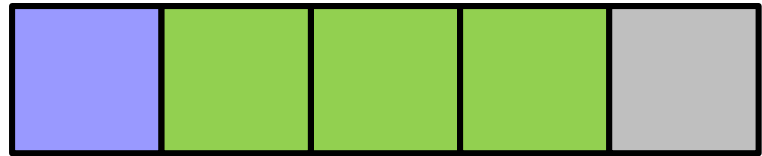
(1) MPI_Put



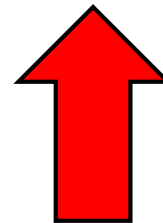
(1) MPI_Put



Использование MPI 3.0



(2) MPI_Get



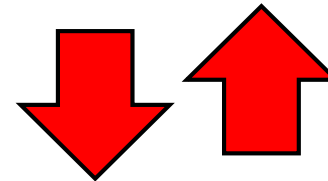
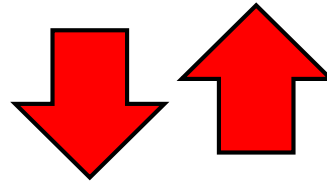
(2) MPI_Get



Обзор использования Coarray Fortran

- **Reshetova, Cheverda & Khachkova, LNCS 2019**
 - CAF превосходит производительность MPI и MPI+OpenMP при большом числе процессов
- **Reshetova, Cheverda & Khachkova, CCIS 2019**
 - CAF значительно проще в использовании, чем технология MPI в различных вариантах коммуникаций
- **Reshetova, Cheverda & Koinov, CCIS 2022**
 - CAF превосходит по производительности функции MPI_Isend/MPI_Irecv
- **Garain, Balsara & Reid, JCompPhys 2015**
 - CAF эквивалентна по производительности MPI 3.0
- **Shterenlikht & Cebamanos, Parallel Computing 2019**
 - Масштабируемость до 100 000 процессов

Использование Coarray Fortran

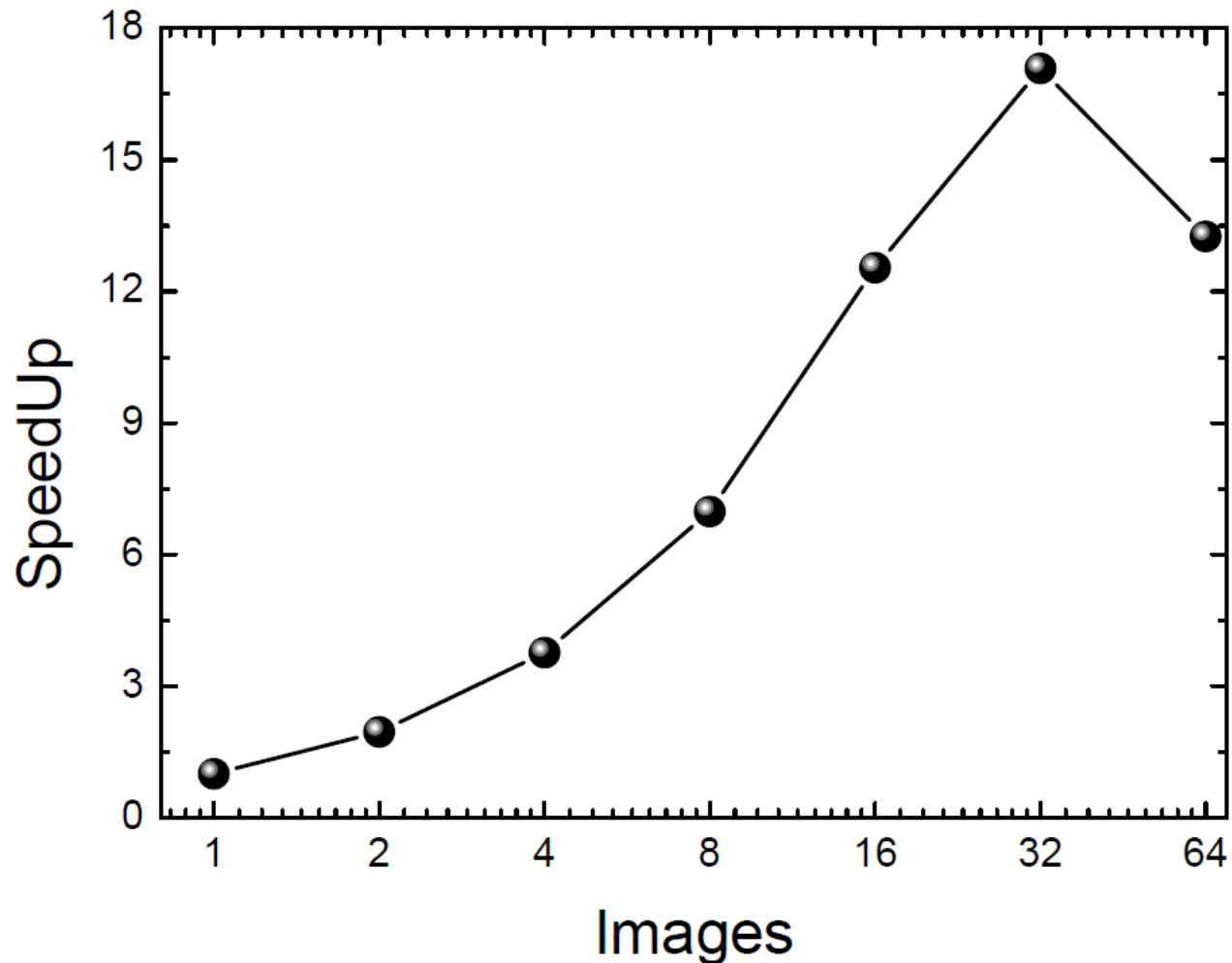


```
irank = this_image()  
isize = num_images()
```

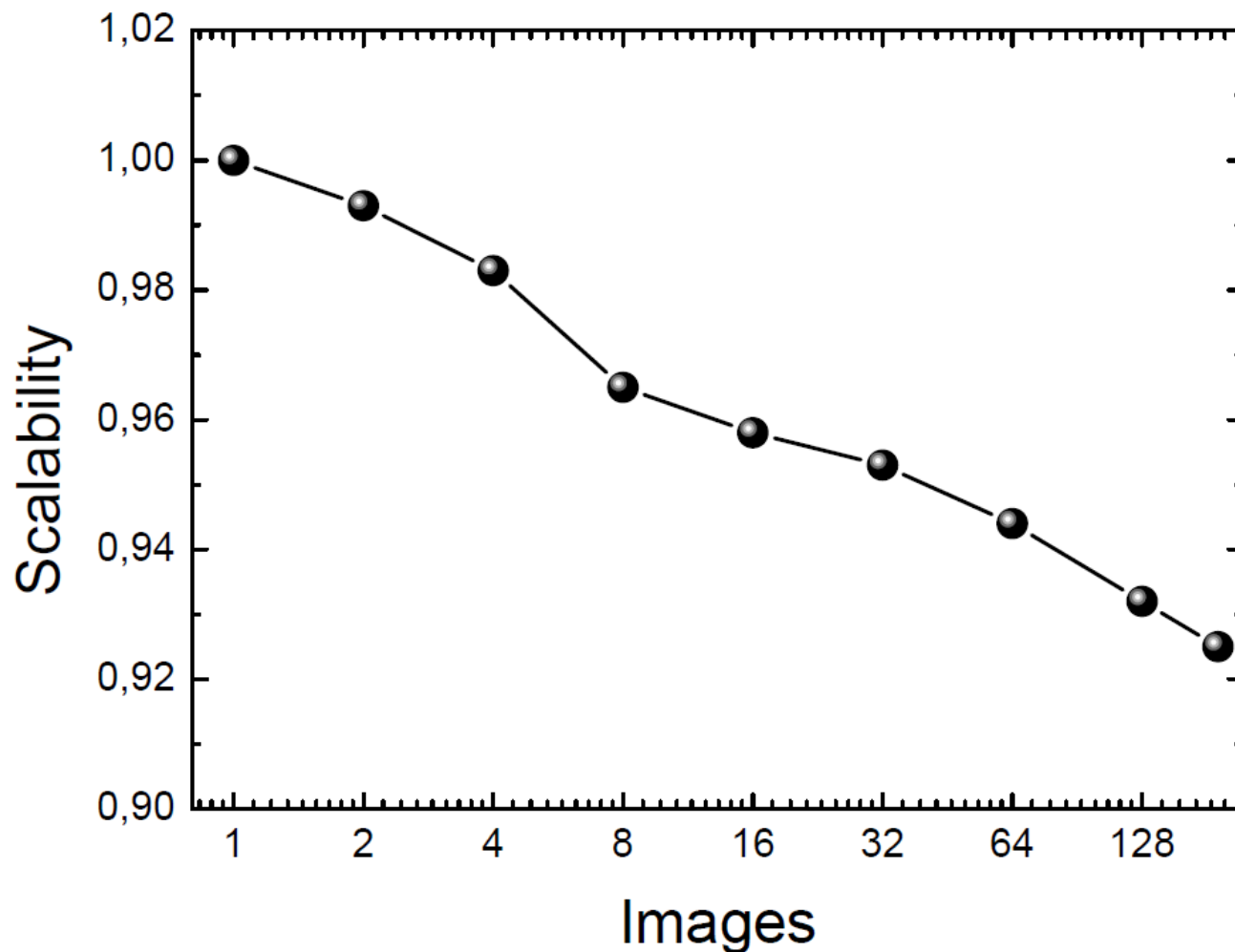
```
if(irank < isize) then  
  A(1)[irank+1] = A(Nlocal+1)  
  A(Nlocal+2) = A(2)[irank+1]  
endif
```

```
sync all
```

Ускорение Coarray Fortran кода



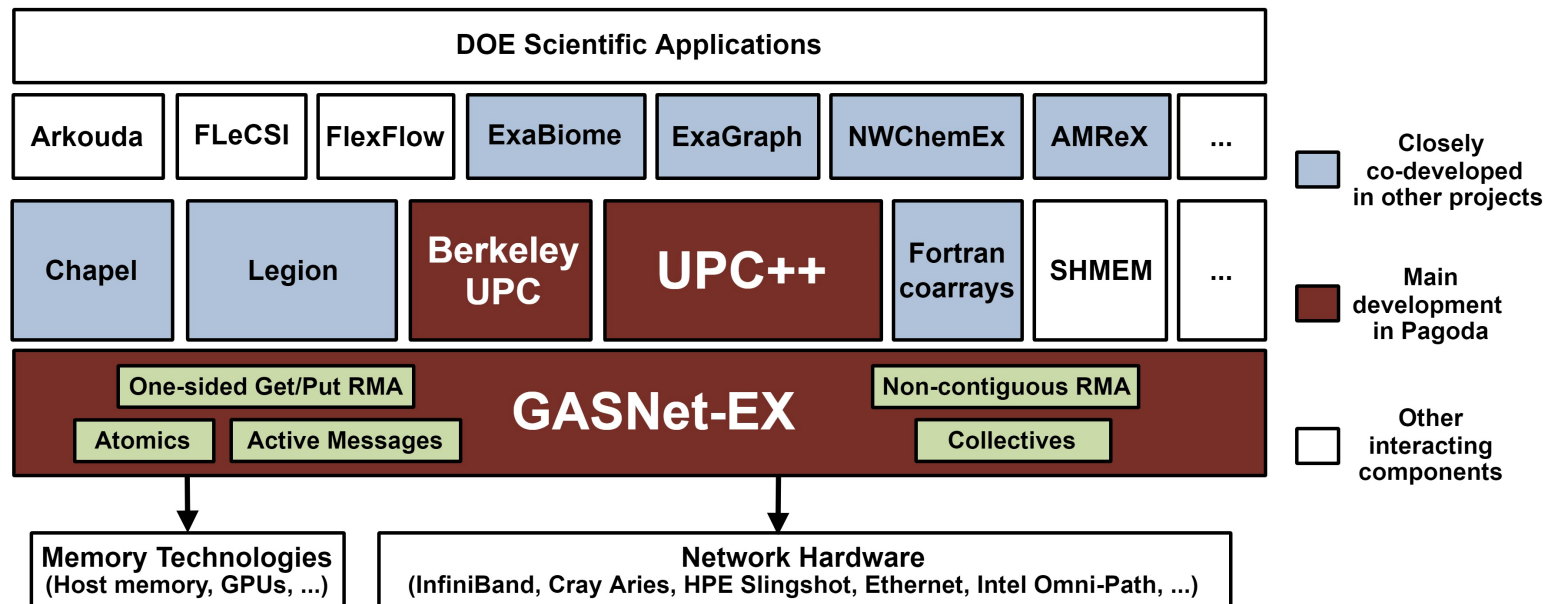
Масштабируемость Coarray Fortran кода



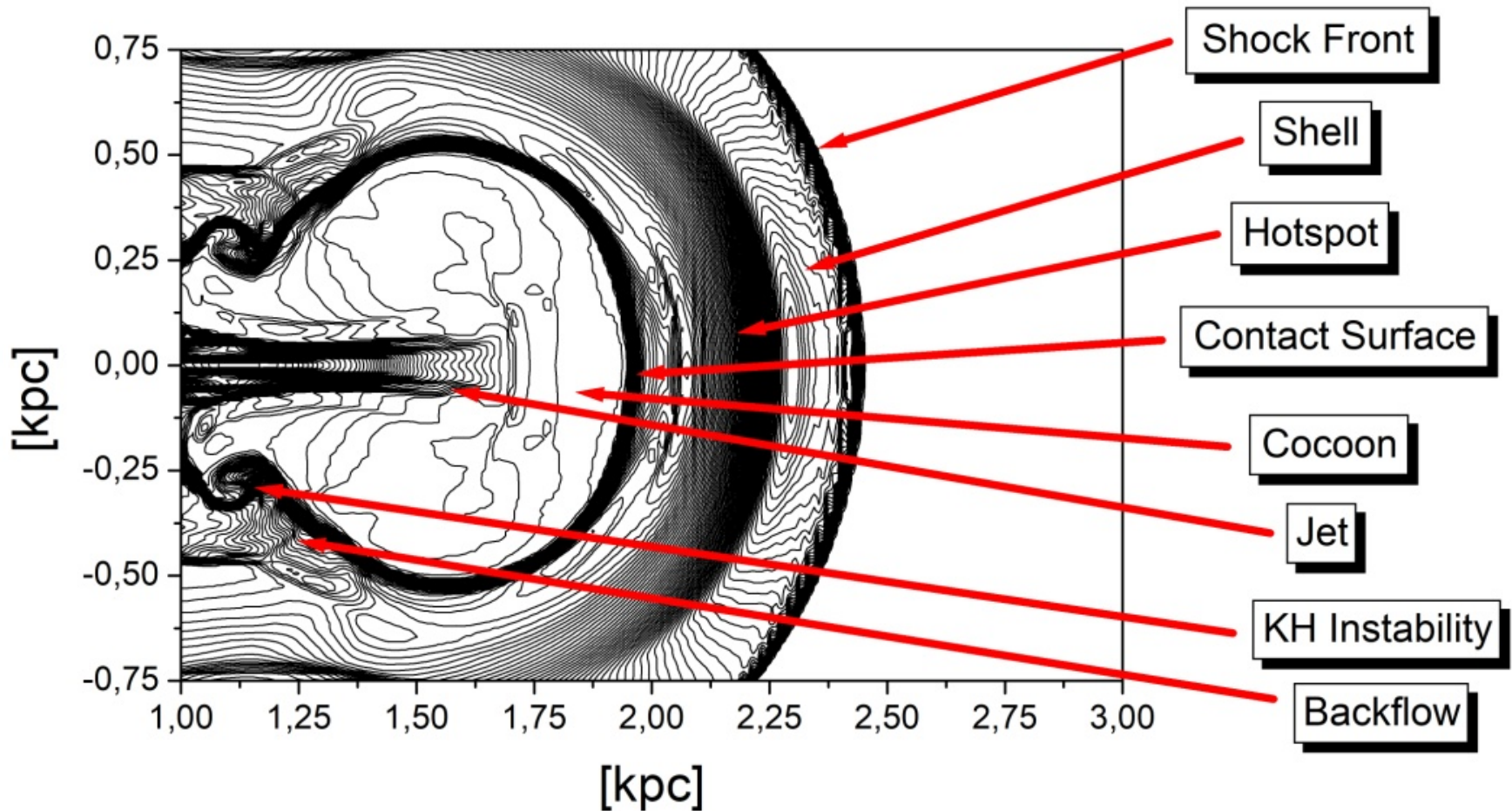
А ушли ли мы от MPI?

В компиляторе Intel используются технологии MPI 3.0 для реализации Coarray Fortran операций, но в части компиляторов GNU Fortran и OpenUH используется технология GASNet

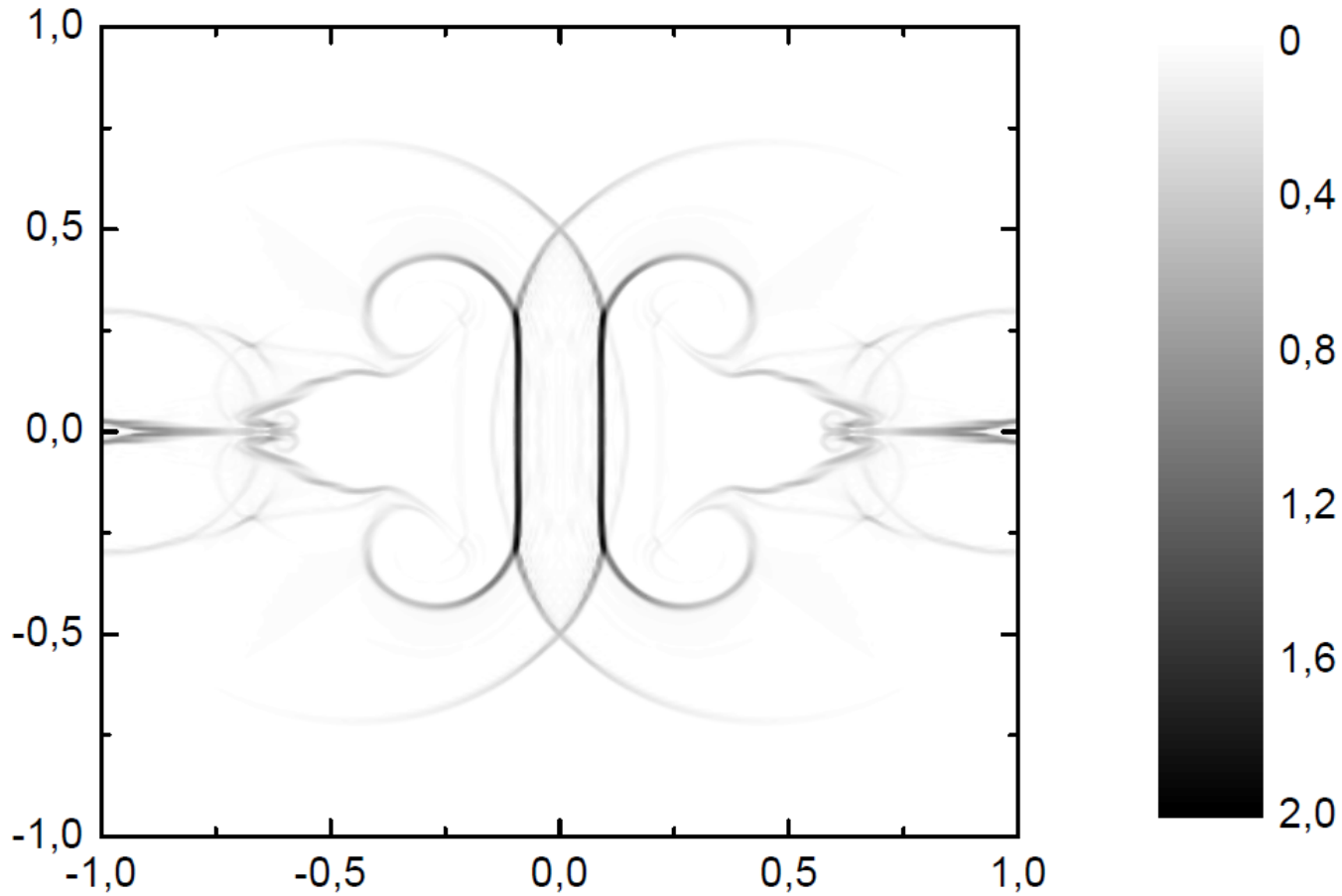
Технология GASNet как альтернатива MPI



Эволюция релятивистского джета



Взаимодействие релятивистских джетов

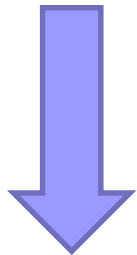
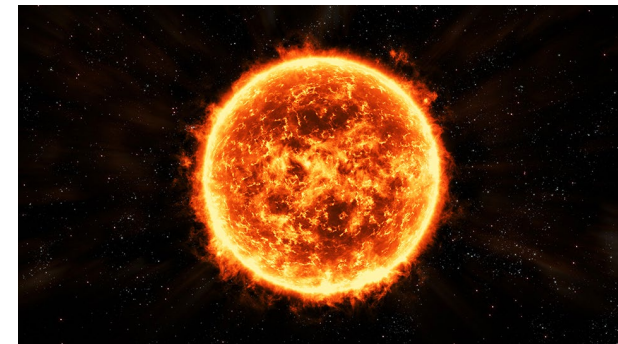
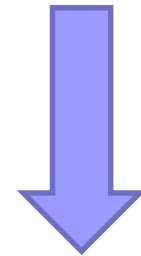


Звездообразование

Eduard Vorobyov (Вена)



Плотность
 $1 \text{ см}^{-3} \dots 10^{15} \text{ см}^{-3}$



Размер
 $10^4 \text{ A.E.} \dots R_{\odot}$

Computational Challenges

Масштабы

- Размер молекулярного облака 10 000 A.E.
- Размер звезды $R_{\odot}$
 - Разрешение 10 000 000³
- Плотность молекулярного облака 10⁻¹⁸ г/см⁻³
- Звездная плотность 10⁻³ г/см⁻³
 - Контраст плотности 10¹⁵
- Коллапс молекулярного облака 10 Myr
- Оборот звезды 1 месяц
 - Необходимость 10⁸ шагов по времени

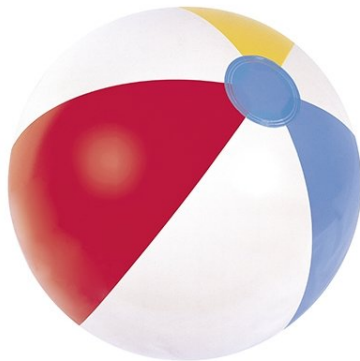
Physics Challenges

Физические процессы

- Уравнения эйлеровой гидродинамики
- Гравитация
- Звездное уравнение состояния
- Излучение (диффузионное приближение)
- Звездообразование как sink-particle
- Перераспределение углового момента
- Магнитное поле
- Химические и ядерные реакции до органики

Выбор сетки

Сферические координаты

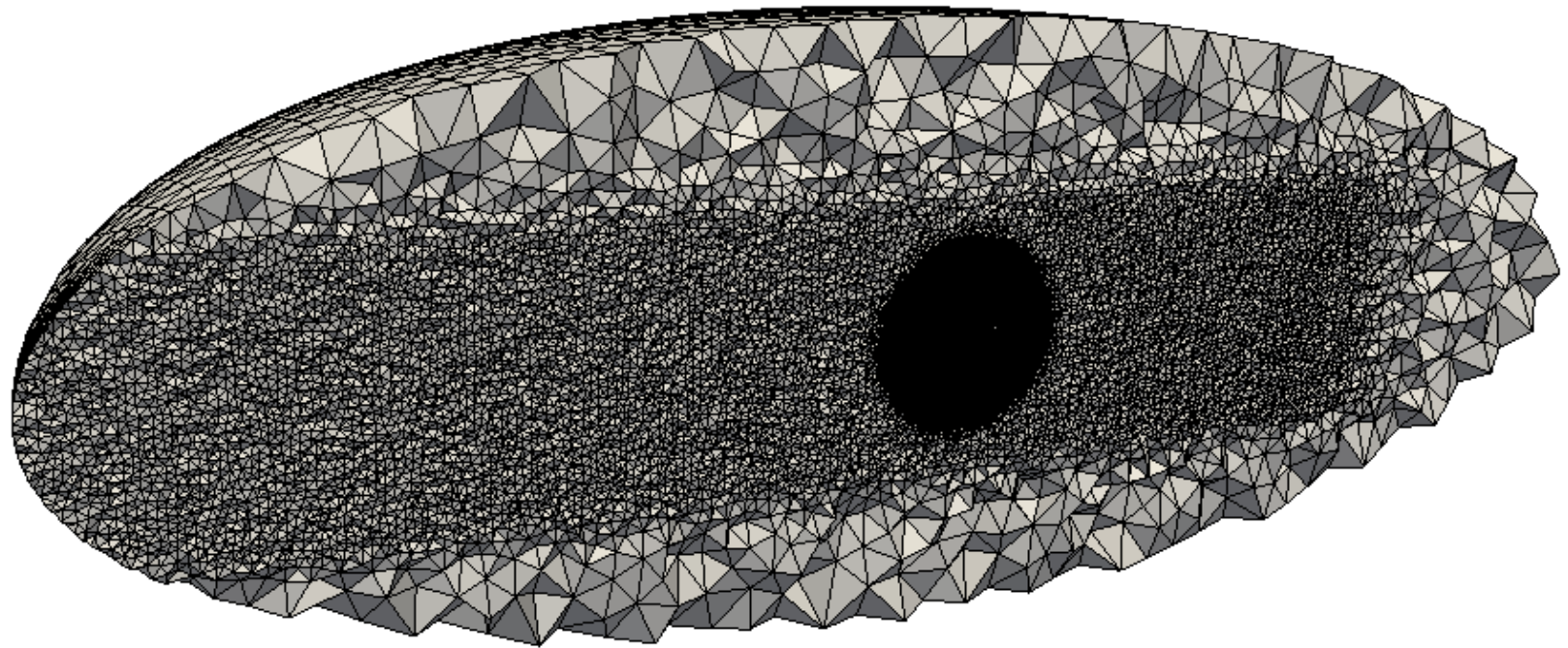


Геодезические координаты



Balsara D, Florinski V, Garain S., Subramanian S., Gurski K. Efficient, divergence-free, high-order MHD on 3D spherical meshes with optimal geodesic meshing // **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society.** - 2019. - V. 487. - P. 1283-1314.

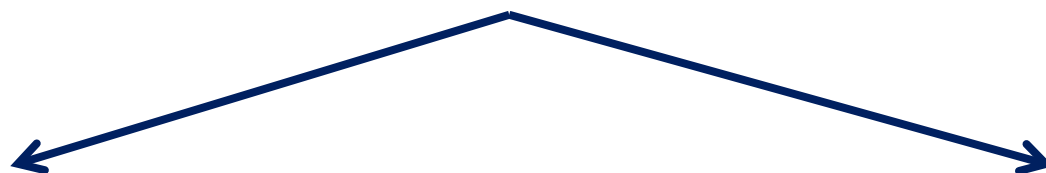
Тетраэдральные сетки (генератор NetGen)



Lukin V.V., Shakura N.I., Postnov K.A. Mathematical modeling of inclined accretion disks in cataclysmic variables // **Journal of Physics: Conference Series.** - 2020. - V. 1640. - Article Number 012024.

Подвижные сетки

$$\frac{\partial}{\partial t} \begin{pmatrix} \rho \\ \rho \vec{u} \\ \rho E \end{pmatrix} + \nabla \cdot \begin{pmatrix} \rho(\vec{u} + \vec{w} - \vec{w}) \\ \rho \vec{u}(\vec{u} + \vec{w} - \vec{w}) + P \\ [\rho E + p](\vec{u} + \vec{w} - \vec{w}) \end{pmatrix} = 0$$

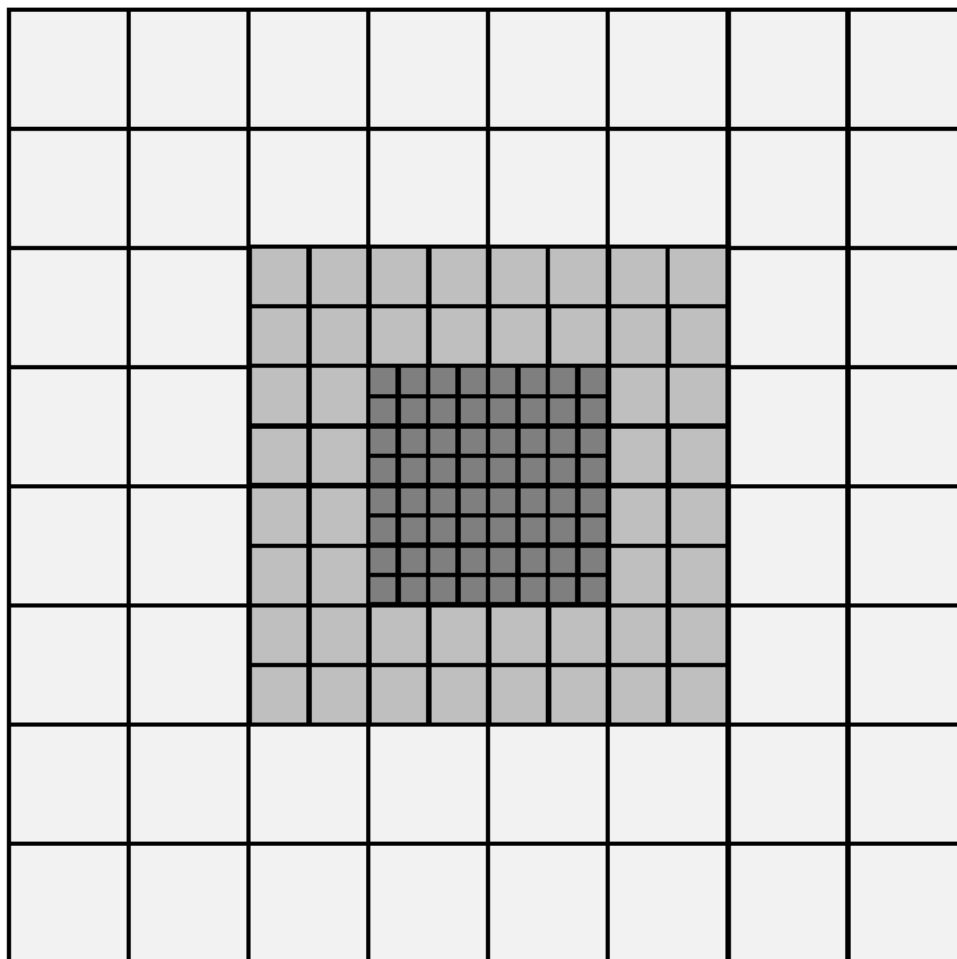


$$\frac{\partial}{\partial t} \begin{pmatrix} \rho \\ \rho \vec{u} \\ \rho E \end{pmatrix} + \nabla \cdot \begin{pmatrix} \rho \vec{v} \\ \rho \vec{u} \vec{v} + P \\ [\rho E + p] \vec{v} \end{pmatrix} = 0$$

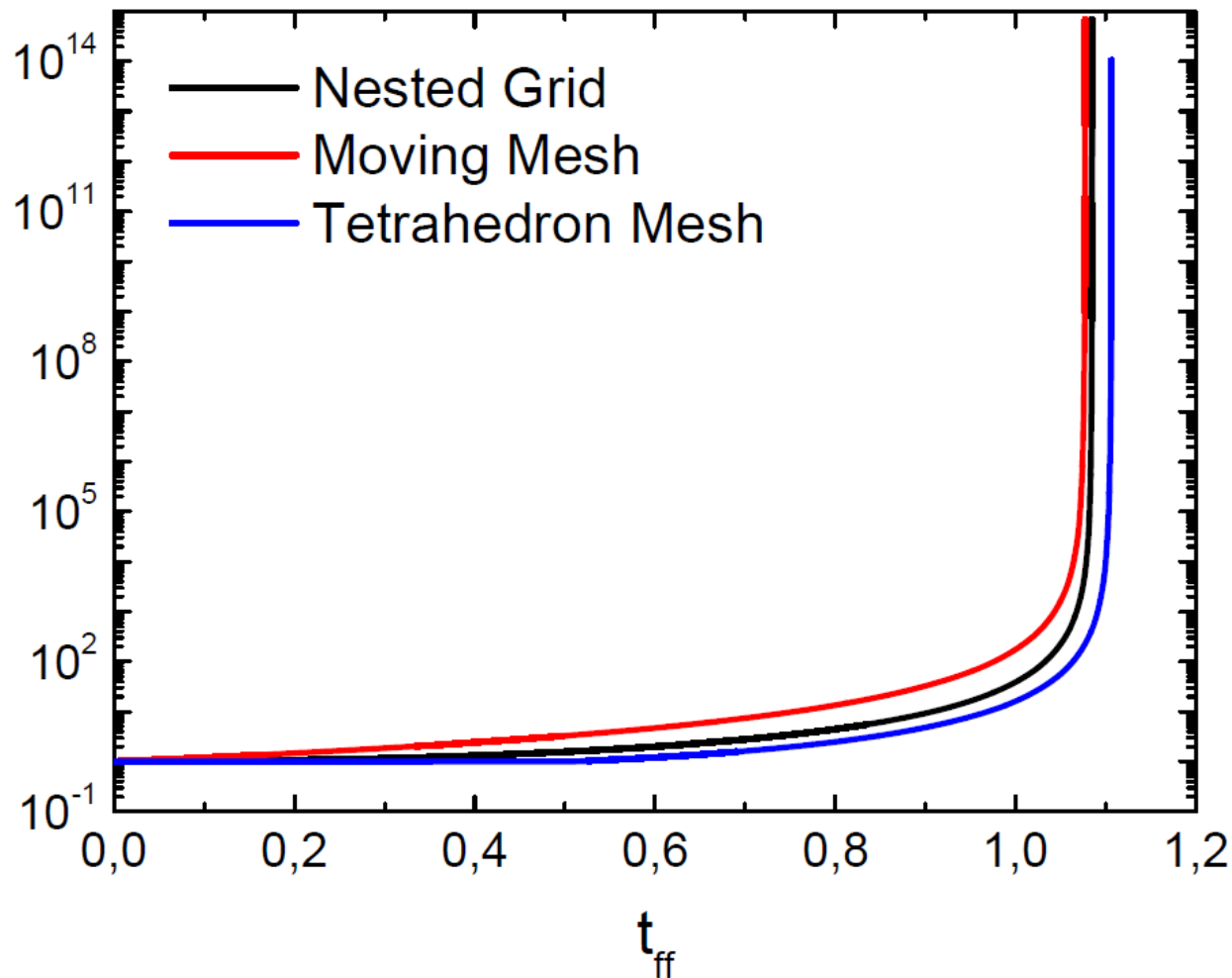
$$\frac{\partial}{\partial t} \begin{pmatrix} \rho \\ \rho \vec{u} \\ \rho E \end{pmatrix} + \nabla \cdot \begin{pmatrix} \rho \vec{w} \\ \rho \vec{u} \vec{w} \\ \rho E \vec{w} \end{pmatrix} = 0$$

$$\frac{d\vec{w}}{dt} \approx \nabla \Phi$$

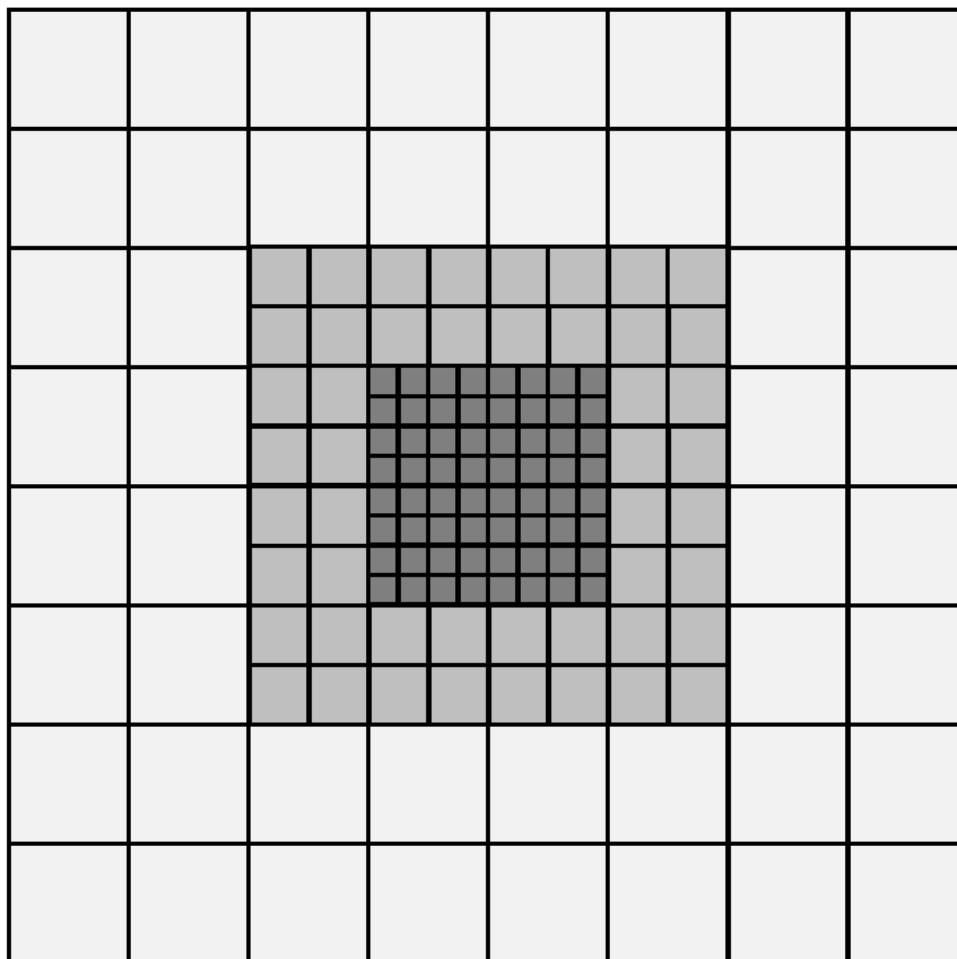
Экстремально глубокие вложенные сетки



Коллапс до звездной плотности (cm^{-3})



Экстремально глубокие вложенные сетки



Гравитация как ключевой фактор



Итерационный метод решения уравнения Пуассона на основе МСГ

$$\Delta\Phi = 4\pi\rho$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \times \nabla \cdot F = 4\pi\rho$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \nabla \cdot F = 4\pi \frac{\partial \rho}{\partial t} = -4\pi \nabla \cdot (\rho u)$$

$$\nabla \cdot \left(\frac{\partial F}{\partial t} \right) = -\nabla \cdot (4\pi \rho u)$$

$$\frac{\partial F}{\partial t} = \nabla \times A - 4\pi \rho u$$

Чуев, ЖВМиМФ, 2020

$$\frac{\partial F}{\partial t} \approx \nabla \times (F \times u) - 4\pi \rho u$$

$$\Phi_{ikl}^n$$



Представление $Ax = f$
в операторном виде на сетке
(без построения СЛАУ)



Запись всех конструкций через цикл
forall и операции над массивами



$$\Phi_{ikl,0}^{n+1}$$



80 GFLOPS

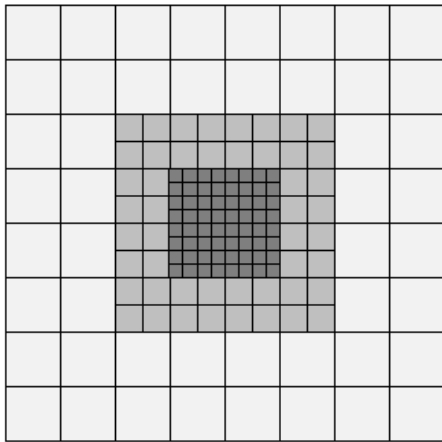
vs.

3x Intel MKL

$$O(n^{1+k}), k \ll 1$$

Декомпозиция вычислений для вложенных сеток

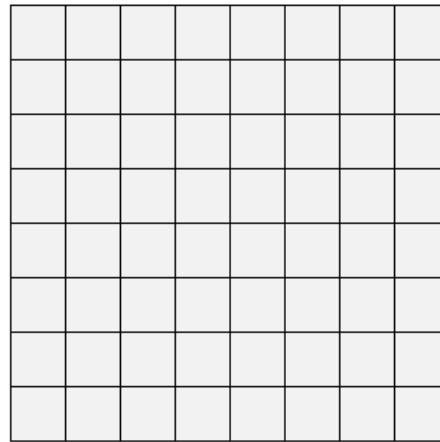
Coarray Fortran (CAF)



Nested Meshes

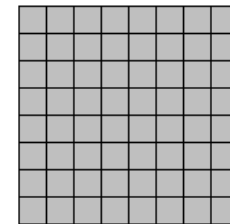


CAF Image 1

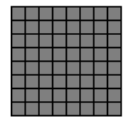


Level 1

CAF Image 2 CAF Image 3

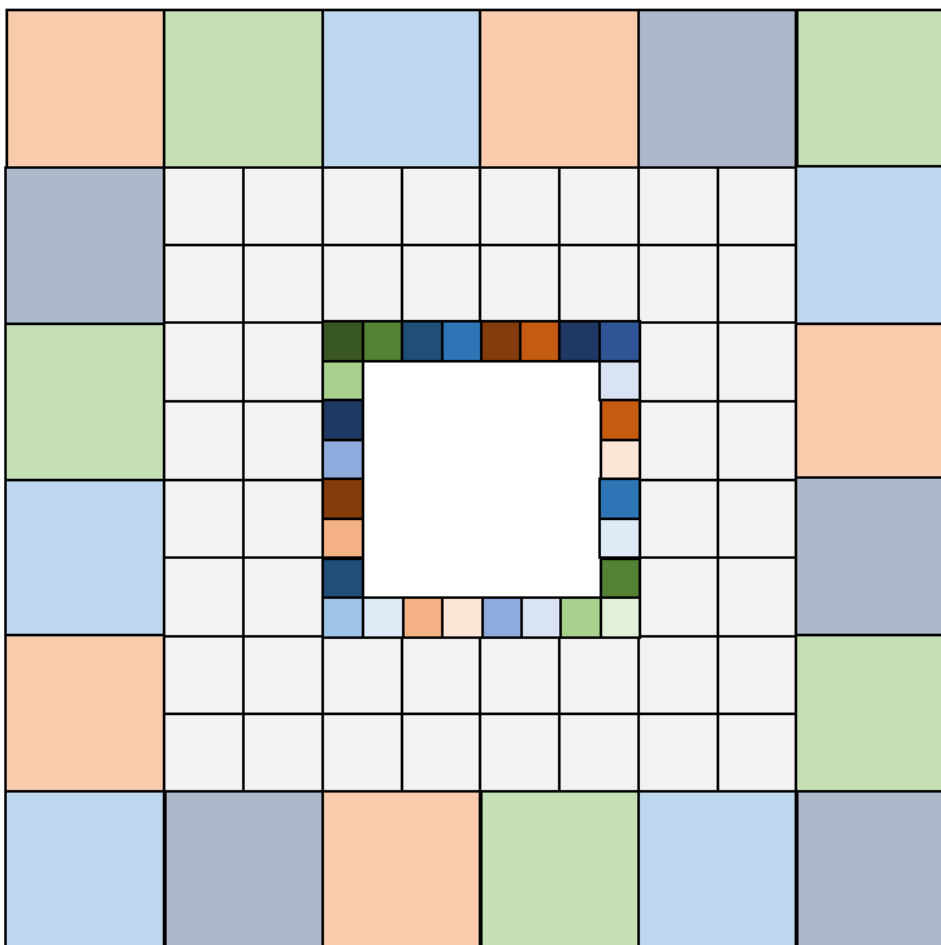


Level 2

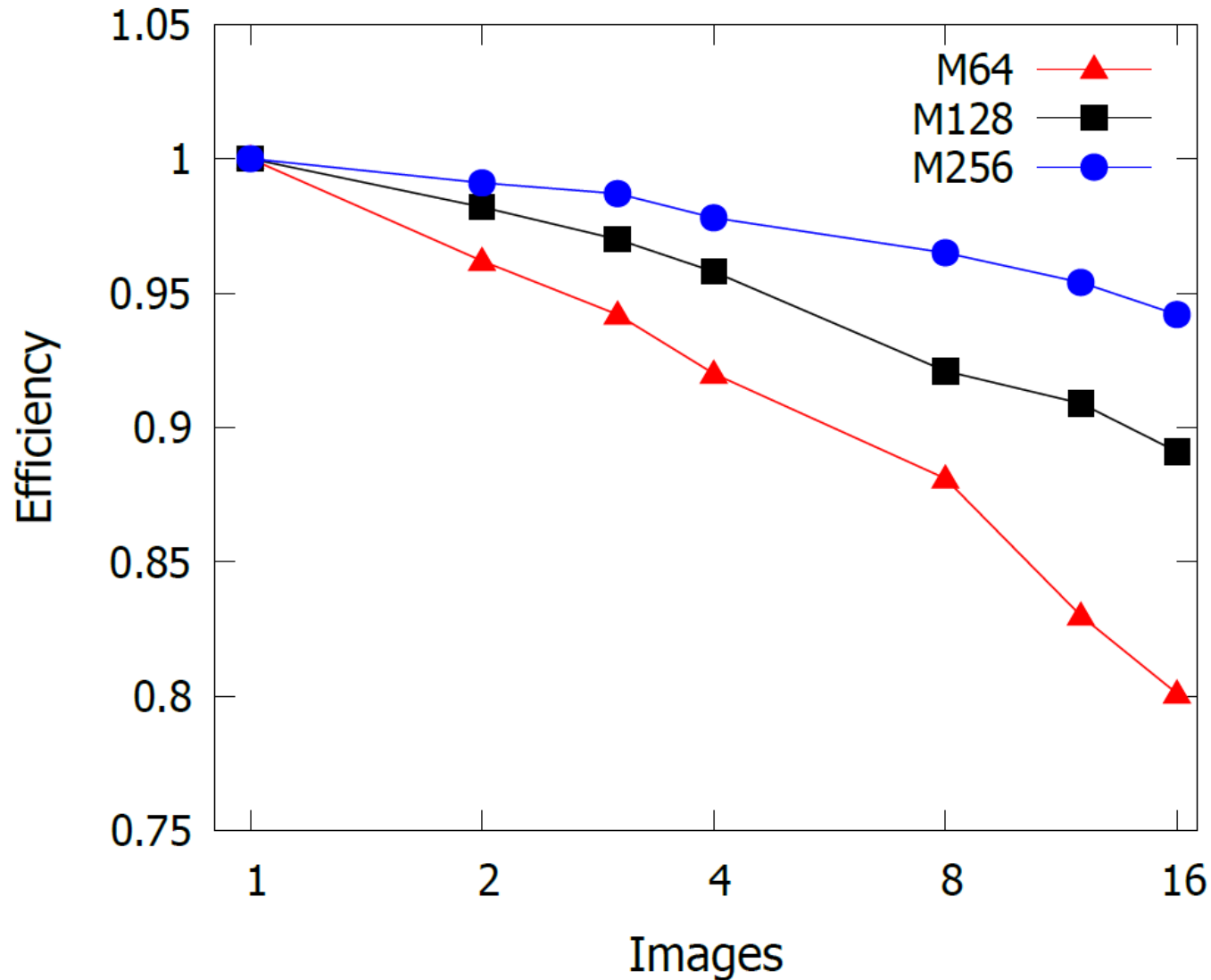


Level 3

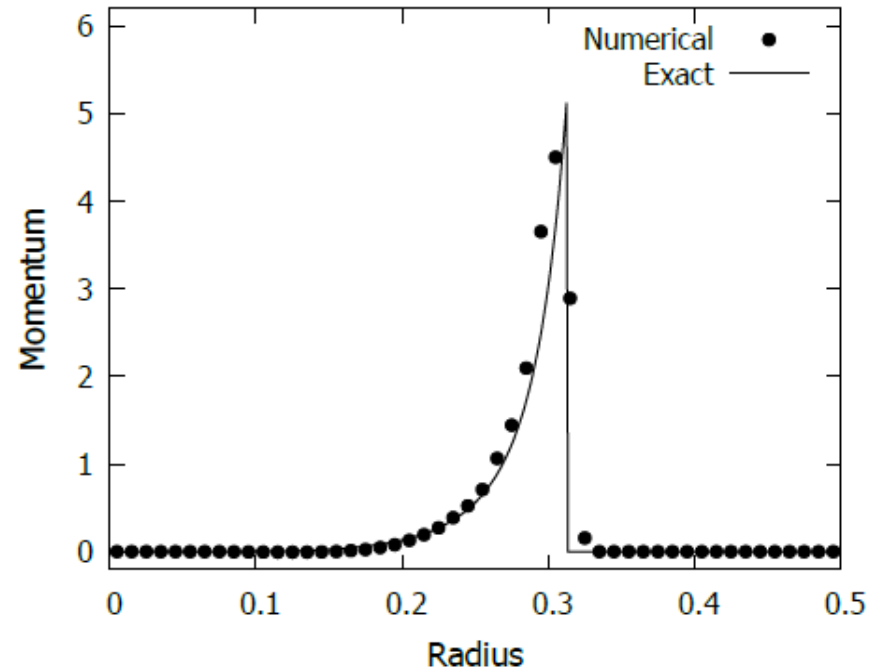
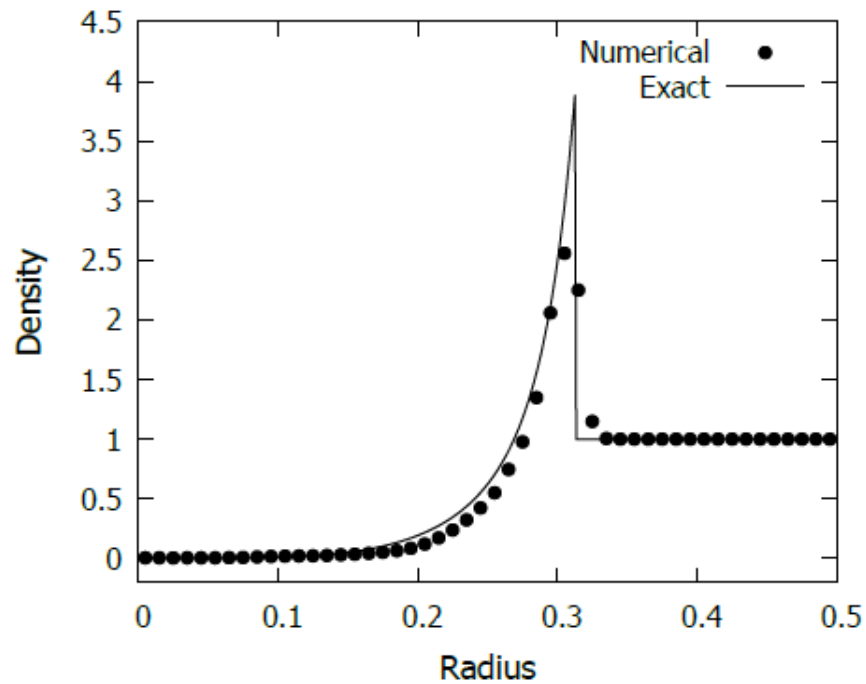
Учет областей перекрытия между сетками



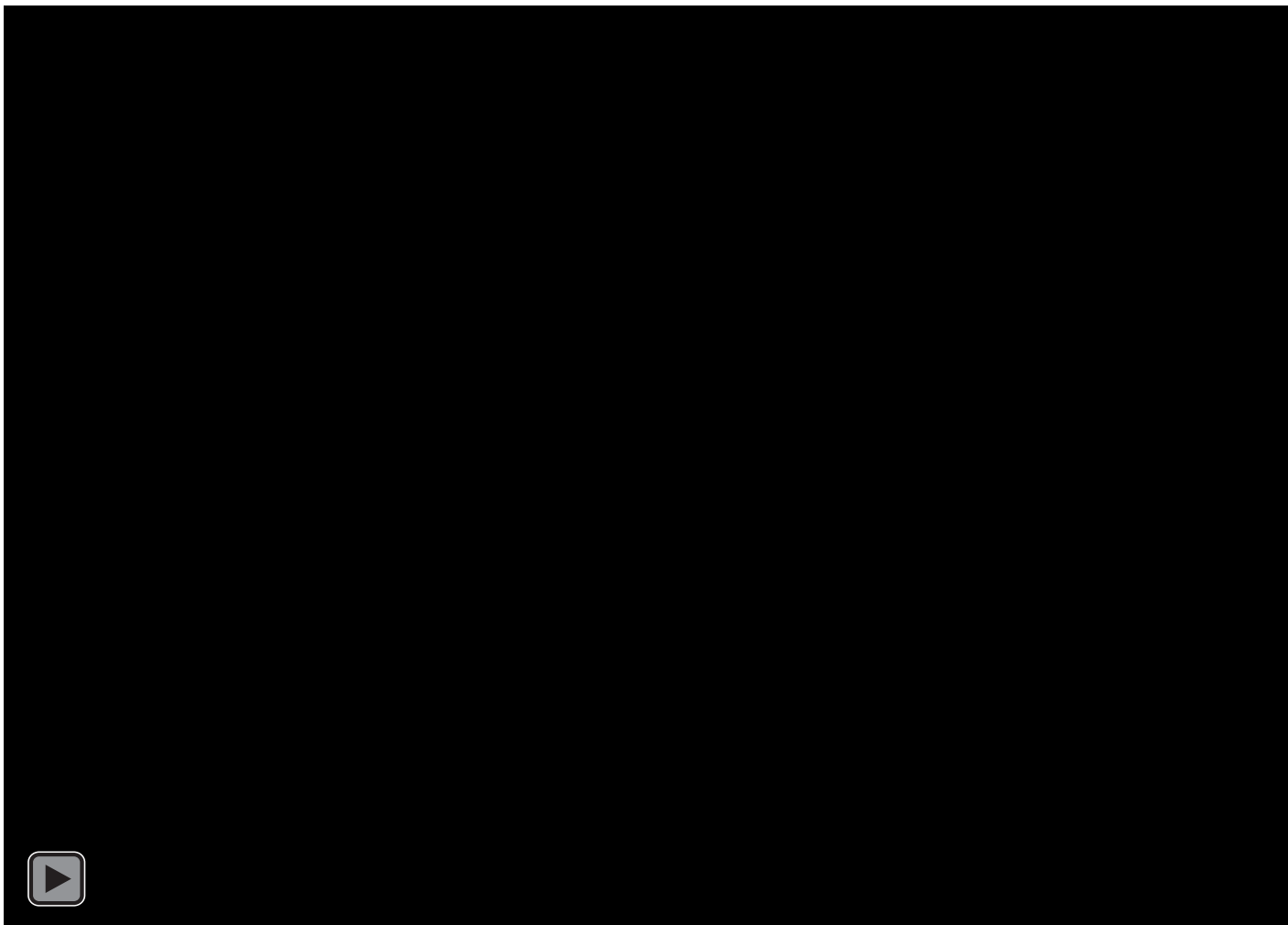
Масштабируемость Coarray Fortran кода



Задача Седова о точечном взрыве



Звездообразование



Публикации

1. **Kulikov I., Chernykh I., Tutukov A.** A new hydrodynamic code with explicit vectorization instructions optimizations, dedicated to the numerical simulation of astrophysical gas flow. I. Numerical method, tests and model problems // **The Astrophysical Journal Supplement Series.** – 2019. – V. 243. – Article Number 4.
2. **Kulikov I.** A new code for the numerical simulation of relativistic flows on supercomputers by means of a low-dissipation scheme // **Computer Physics Communications.** – 2020. – V. 257. – Article Number 107532.
3. **Chernykh I., Kulikov I., Tutukov A.** Hydrogen–helium chemical and nuclear galaxy collision: Hydrodynamic simulations on AVX-512 supercomputers // **Journal of Computational and Applied Mathematics.** – 2021. – V. 391. – Article Number 113395.
4. **Kulikov I., Chernykh I., Karavaev D., Prigarin V., Sapetina A., Ulyanichev I., Zavyalov O.** A New Parallel Code Based on a Simple Piecewise Parabolic Method for Numerical Modeling of Colliding Flows in Relativistic Hydrodynamics // **Mathematics.** – 2022. – Vol. 10 (11). – Article Number 1865.
5. **Vorobyov E., McKevitt J., Kulikov I., Elbakyan V.** Computing the gravitational potential on nested meshes using the convolution method // **Astronomy & Astrophysics.** – submitted.

Исходный код

<https://gitflic.ru/project/igorkulikov/rhd3dhllk>

 GitFlic

Поиск 

Войти

Проекты

Команды

Компании

igorkulikov / rhd3dhllk

Файлы Проблемы 0 Запросы на слияние 0 Коммиты Ветки 1 Теги 0 Релизы 0

master rhd3dhllk  Код

 igorkulikov	Initial commit	1 месяц назад	 История
 source	Initial commit	месяц назад	
 compile.bat	Initial commit	месяц назад	

Помогите людям, интересующимся этим репозиторием, понять ваш проект, добавив **README.md** файл.

Описание

Трёхмерный параллельный код на основе собственного численного метода решения уравнений специальной релятивистской гидродинамики, реализованный с использованием технологии параллельного программирования Coarray Fortran

Релизы

 Ter 0

Помощь

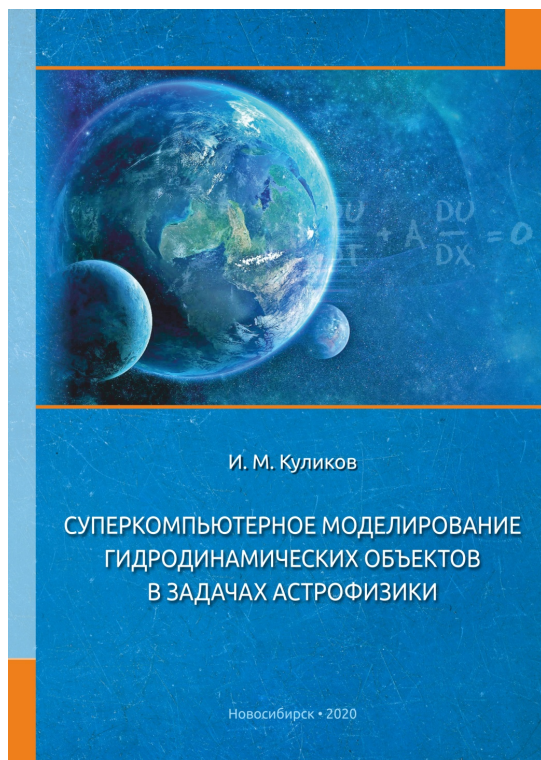
Зарегистрироваться

Войти

Дискуссия и заключение

- Нужно ли отказываться от готовых кодов и библиотек? Конечно нет! Их нужно использовать там, где это возможно
- Библиотека и код как «объект-инструмент-объект» исследования
- Требование к новым кодам «**language only**»
- Переход к технологиям PGAS с поддержкой операций Remote Memory Access (**RMA**) и Remote Procedure Call (**RPC**)

Спецкурс «Высокопроизводительные вычисления на языке Фортран». Весна 2023 года



- Базовые конструкции и работа с файлами
- Функции, подпрограммы, модули
- Операции с массивами
- Использование OpenMP
- Использование CUDA
- Использование MPI
- Использование Intel oneAPI
- Средства Coarray Fortran

Спасибо за внимание!