3МОСКОВСКИЙ АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

Факультет прикладной математики и физики
Кафедра вычислительной математики и программирования

**Лабораторная работа №7 (1)**
**по курсу «Параллельная Обработка Данных»**

# Message Passing Interface (MPI)

Выполнил: Иларионов Д.А.
Группа: М8О-408Б-17
Преподаватели: Крашенинников К.Г.,
Морозов А.Ю.

Москва, 2020

## Условие

Знакомство с технологией MPI. Реализация метода Якоби.
Решение задачи Дирихле для уравнения Лапласа в трехмерной области с граничными условиями первого рода.

Математическая постановка:

$$\frac{d^2u(x,y,z)}{dx^2} + \frac{d^2u(x,y,z)}{dy^2} + \frac{d^2u(x,y,z)}{dz^2} = 0,$$

$$u(x \le 0, y, z) = u_{left},$$
$$u(x \ge l_x, y, z) = u_{right},$$
$$u(x,\ y \le 0, z) = u_{front},$$
$$u(x,\ y \ge l_y, z) = u_{back},$$
$$u(x,\ y,\ z \le 0) = u_{down},$$
$$u(x,\ y,\ z \ge l_z) = u_{up}.$$

Над пространством строится регулярная сетка. С каждой ячейкой сопоставляется значение функции $u$ в точке соответствующей центру ячейки. Граничные условия реализуются через виртуальные ячейки, которые окружают рассматриваемую область.

Поиск решения сводится к итерационному процессу:

$$u_{i,j,k}^{(k+1)} = \frac{\left(u_{i+1,j,k}^{(k)} + u_{i-1,j,k}^{(k)}\right)h_x^{-2} + \left(u_{i,j+1,k}^{(k)} + u_{i,j-1,k}^{(k)}\right)h_y^{-2} + \left(u_{i,j,k+1}^{(k)} + u_{i,j,k-1}^{(k)}\right)h_z^{-2}}{2\left(h_x^{-2} + h_y^{-2} + h_z^{-2}\right)},$$

Запись результатов в файл должна осуществляться одним процессом.
Необходимо использовать последовательную пересылку данных по частям на пишущий процесс.

**Вариант 4. обмен граничными слоями через isend/irecv, контроль сходимости allgather**

## Программное и аппаратное обеспечение

**GPU:**

- Name: GeForce GTX 1060
- Compute capability: 6.1
- Частота видеопроцессора: 1404 – 1670 (Boost) МГц
- Частота памяти: 8000 МГц
- Графическая память: 6144 МБ
- Разделяемая память: отсутствует
- Количество регистров на блок: 65536
- Максимальное количество блоков: (2147483647, 65535, 65535)
- Максимальное количество нитей: (1024, 1024, 64)
- Количество мультипроцессоров: 10

**Сведения о системе:**

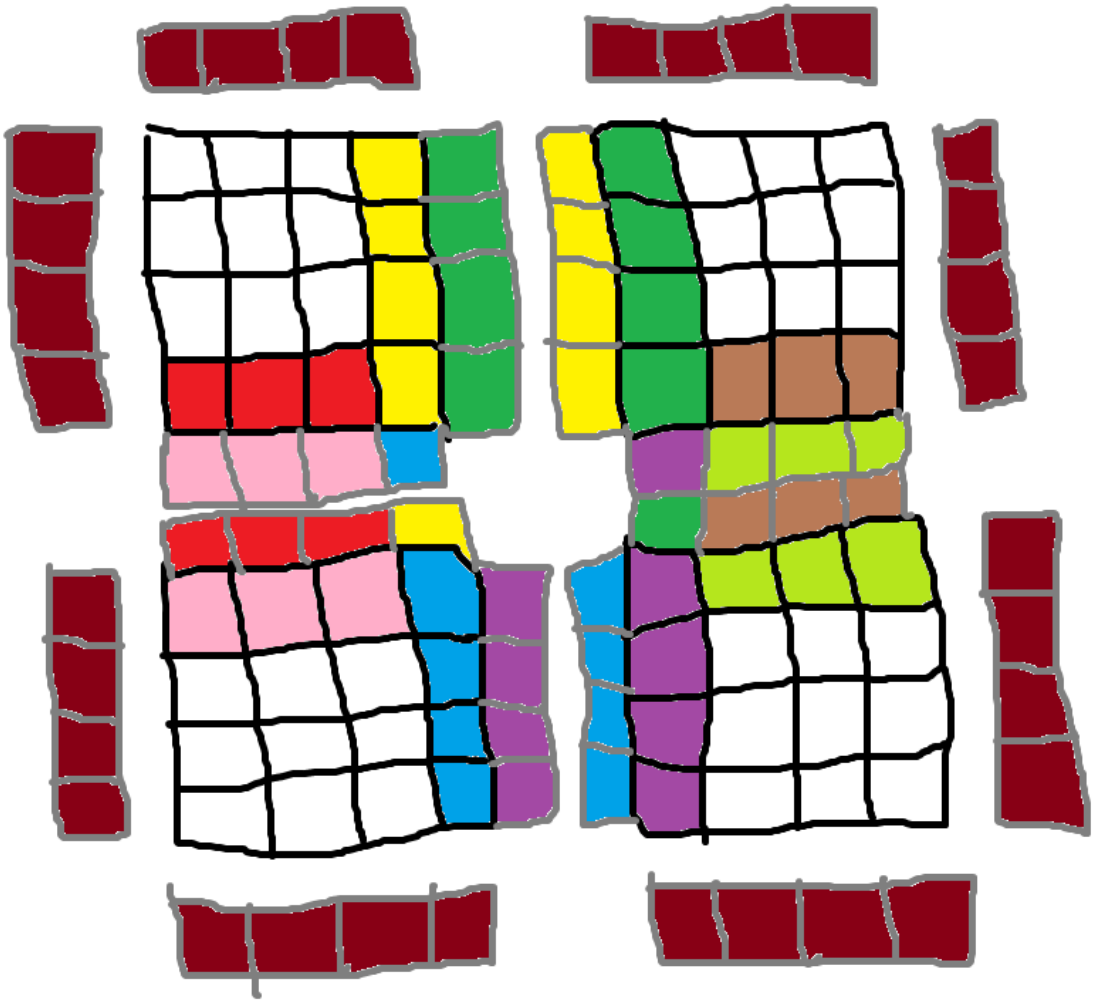
- Процессор: Intel Core i7-8750H 2.20GHz x 6
- Оперативная память: 16 ГБ
- SSD: 128 ГБ
- HDD: 1000 ГБ

**Программное обеспечение:**

- OS: Windows 10
- IDE: Visual Studio 2019
- Компилятор: nvcc

## Метод решения

Для удобства, я использовал макросы, с помощью которых можно определить текущую позицию элемента по x, y, z, или наоборот – его номер. У нас есть один длинный массив, в котором хранятся данные. Он одномерный, поэтому, обратиться к элементу можно только по формуле, чем и помогают макросы. Для каждого блока процесса у нас данные разные. Поэтому, сначала мы инициализируем MPI, вводим данные, если у нас нулевой (главный) процесс. Передаем их всем остальным процессам с помощью BCast. В некоторых местах ставим барьеры, чтобы процессы не опережали другие и не делали то, что еще рано делать. Потом идет цикл, до тех пор, пока у нас разница больше eps. Если количество процессов, задаваемых в аргументах не равно произведению блоков, то программа выводит, что неправильные данные и прекращает свою работу. В цикле мы сначала передаем данные – буфера граничных элементов, которые нужны нам для расчетов. В качестве такого буфера выступает двумерная сетка – передняя и задняя сторона блока, левая и правая. Верхняя и нижняя. Так как трехмерную визуализацию нарисовать трудно, я покажу на двухмерном примере.



В пэинте получилось довольно плохо, надо было Adobe Animate использовать.. Но ладно. Одинаковыми цветами (кроме белого и бордового) обозначены одинаковые группы элементов. То есть – буфера, граничные элементы. В файле они тоже присутствуют, поэтому к размеру блока по каждому измерению прибавляется 2. Макросом индексация таких элементов (-1 и N). N – размерность блока по опред. измерению. И суть самой программы и MPI в целом состоит как раз в передаче таких вот стенок. Сначала идет передача всех элементов для определенных процессов. Далее, чтобы не терять время – вычисляем внутренность блока – то есть элементы, для которых нам в вычислении не нужны граничные элементы. А вот ожидание и принятие идет в 2 этапа. Тк если сразу все стороны вычислять, то почему-то программа виснет на 30 тесте при размере сетки 2x2x2 и блоков 200x200x200. Не знаю честно, чем это вызвано, но заметил, что это происходит, когда одновременно принимаются и четные и нечетные элементы. Поэтому, я сделал так. Сначала мы принимаем все четные стороны (правая, нижняя, задняя). Кладем в data. Если нет блока по соседству (бордовые элементы), то эти элементы нам даны в начальном условии. Потом уже, мы принимаем нечетные элементы, и довычисляем наш блок. Ищем края (в 3 этапа – передняя и задняя стенка, затем – верхняя и нижнаяя, и потом левая и правая) – элементы для одного измерения – 1 и N-1. После этого, с помощью Allgather собираем все ошибки, ищем максимальную по всем процессам и продолжаем наш цикл во всех процессах, пока ошибка не будем меньше eps. Затем – отсылаем построчно наши элементы и выводим их в файл. Затем – finalize и освобождаем память.

## Описание программы

**Файл main.cpp**

```
1.          #include <stdio.h>
2.          #include <stdlib.h>
3.          #include <time.h>
4.          #include <mpi.h>
5.          #include <iostream>
6.          #include <string>
7.          #include <algorithm>
8.
9.          using namespace std;
10.
11.         int p1, p2, p3;
12.         int g1, g2, g3;
13.
14.         // Index inside the block
15.         #define _i(i, j, k) ((k + 1) * ((g2 + 2) * (g1 + 2)) + (j + 1) * (g1 + 2) + i + 1)
16.         #define _ix(id) (((id) % (g1 + 2)) - 1)
17.         #define _iy(id) ((((id) % ((g1 + 2) * (g2 + 2))) / (g1 + 2)) - 1)
18.         #define _iz(id) (((id) / ((g1 + 2)*(g2 + 2))) - 1)
19.
20.         // Index by processes
21.         #define _ib(i, j, k) ((k) * (p1 * p2) + (j) * p1 + (i))
22.         #define _ibx(id) ((id) % p1)
23.         #define _iby(id) (((id) % (p1 * p2)) / p1)
24.         #define _ibz(id) ((id) / (p1 * p2))
25.
26.
27.         #define printf(...) fprintf(File, __VA_ARGS__)
28.
29.
30.         int main(int argc, char** argv) {
31.             std::ios::sync_with_stdio(false);
32.             string outFile;
33.
34.             int id;
35.             int ib, jb , kb;
```

```
36.             int i, j, k, iter;
37.             int numproc, proc_name_len;
38.             char proc_name[MPI_MAX_PROCESSOR_NAME];
39.
40.             double eps;
41.             double lx, ly, lz;
42.             double hx, hy, hz;
43.             double Udown, Uup, Uleft, Uright, Ufront, Uback;
44.             double U0;
45.             double *data, *temp, *next;
46.             double *bufferUPOut, *bufferRightOut, *bufferFrontOut;
47.             double* bufferUPIn, * bufferRightIn, * bufferFrontIn;
48.             double *bufferIString;
49.
50.             MPI_Status status;
51.
52.             MPI_Init(&argc, &argv);
53.             MPI_Comm_rank(MPI_COMM_WORLD, &id);
54.             MPI_Comm_size(MPI_COMM_WORLD, &numproc);
55.             MPI_Get_processor_name(proc_name, &proc_name_len);
56.
57.             MPI_Barrier(MPI_COMM_WORLD);
58.
59.             //input data for 0 process
60.             if (id == 0) {
61.
62.                 cin >> p1 >> p2 >> p3;
63.                 cin >> g1 >> g2 >> g3;
64.                 cin >> outFile;
65.                 cin >> eps;
66.                 cin >> lx >> ly >> lz;
67.                 cin >> Ufront >> Uback >> Uleft >> Uright >> Uup >> Udown;
68.                 cin >> U0;
69.
70.             }
71.
72.
73.             MPI_Barrier(MPI_COMM_WORLD);
74.
75.             //send data to all processes
76.             MPI_Bcast(&p1, 1, MPI_INT, 0, MPI_COMM_WORLD);
77.             MPI_Bcast(&p2, 1, MPI_INT, 0, MPI_COMM_WORLD);
78.             MPI_Bcast(&p3, 1, MPI_INT, 0, MPI_COMM_WORLD);
79.
80.             MPI_Bcast(&g1, 1, MPI_INT, 0, MPI_COMM_WORLD);
81.             MPI_Bcast(&g2, 1, MPI_INT, 0, MPI_COMM_WORLD);
82.             MPI_Bcast(&g3, 1, MPI_INT, 0, MPI_COMM_WORLD);
83.
84.             MPI_Bcast(&eps, 1, MPI_DOUBLE, 0, MPI_COMM_WORLD);
85.
86.             MPI_Bcast(&lx, 1, MPI_DOUBLE, 0, MPI_COMM_WORLD);
87.             MPI_Bcast(&ly, 1, MPI_DOUBLE, 0, MPI_COMM_WORLD);
88.             MPI_Bcast(&lz, 1, MPI_DOUBLE, 0, MPI_COMM_WORLD);
89.
90.             MPI_Bcast(&Udown, 1, MPI_DOUBLE, 0, MPI_COMM_WORLD);
91.             MPI_Bcast(&Uup, 1, MPI_DOUBLE, 0, MPI_COMM_WORLD);
92.             MPI_Bcast(&Uleft, 1, MPI_DOUBLE, 0, MPI_COMM_WORLD);
93.             MPI_Bcast(&Uright, 1, MPI_DOUBLE, 0, MPI_COMM_WORLD);
94.             MPI_Bcast(&Ufront, 1, MPI_DOUBLE, 0, MPI_COMM_WORLD);
95.             MPI_Bcast(&Uback, 1, MPI_DOUBLE, 0, MPI_COMM_WORLD);
96.             MPI_Bcast(&U0, 1, MPI_DOUBLE, 0, MPI_COMM_WORLD);
97.
98.
99.
100.            if (p1 * p2 * p3 != numproc) {
101.                MPI_Finalize();
102.                if (id == 0) {
103.                    cout << "ERROR: proc.grid != processes\n";
104.                }
105.
106.                return -1;
107.            }
```

```
108.
109.
110.
111.            //block id by coordinates
112.            ib = _ibx(id);
113.            jb = _iby(id);
114.            kb = _ibz(id);
115.
116.            iter = 0;
117.
118.            //find hs
119.            hx = lx / ((double)p1 * (double)g1);
120.            hy = ly / ((double)p2 * (double)g2);
121.            hz = lz / ((double)p3 * (double)g3);
122.
123.
124.            data = (double*)malloc(sizeof(double) * (g1 + 2) * (g2 + 2) * (g3 + 2));
125.            next = (double*)malloc(sizeof(double) * (g1 + 2) * (g2 + 2) * (g3 + 2));
126.
127.            bufferFrontOut = (double*)malloc(sizeof(double) * (g1 + 2) * (g2 + 2));  // wall1
128.            bufferRightOut = (double*)malloc(sizeof(double) * (g2 + 2) * (g3 + 2));  // wall2
129.            bufferUPOut = (double*)malloc(sizeof(double) * (g1 + 2) * (g3 + 2));  // wall3
130.
131.            bufferFrontIn = (double*)malloc(sizeof(double) * (g1 + 2) * (g2 + 2));  // wall1
132.            bufferRightIn = (double*)malloc(sizeof(double) * (g2 + 2) * (g3 + 2));  // wall2
133.            bufferUPIn = (double*)malloc(sizeof(double) * (g1 + 2) * (g3 + 2));  // wall3
134.
135.            bufferIString = (double*)malloc(sizeof(double) * g1);  // wall3
136.
137.            //make buffer
138.
139.            int buffer_size;
140.
141.            MPI_Pack_size((g1 + 2) * (g2 + 2) * (g3 + 2), MPI_DOUBLE, MPI_COMM_WORLD, &buffer_size);
142.
143.            buffer_size = 2 * (buffer_size + MPI_BSEND_OVERHEAD); //6 edges
144.
145.
146.            double* buffer = (double*)malloc(buffer_size);
147.
148.            MPI_Buffer_attach(buffer, buffer_size);
149.
150.            //block init
151.            for (int a = 0; a < g1; ++a) {
152.                for (int b = 0; b < g2; ++b) {
153.                    for (int c = 0; c < g3; ++c) {
154.                        data[_i(a, b, c)] = U0;
155.                    }
156.                }
157.            }
158.            //requests
159.            MPI_Request send_request1, recv_request1; //output
160.
161.            MPI_Request send_request1_1, recv_request1_1;
162.            MPI_Request send_request2_1, recv_request2_1;
163.            MPI_Request send_request3_1, recv_request3_1;
164.
165.            MPI_Request send_request1_2, recv_request1_2;
166.            MPI_Request send_request2_2, recv_request2_2;
167.            MPI_Request send_request3_2, recv_request3_2;
168.
169.
170.            double* errors;
171.            errors = (double*)malloc(numproc * sizeof(double));
172.
173.            //string debug_name = "process_debug" + to_string(id) + ".txt";
174.
175.
176.
177.            double maxErr = 0;
178.            do  {
179.                //send and get data
```

```
180.                 MPI_Barrier(MPI_COMM_WORLD);
181.
182.
183.                 if (ib > 0 && ib + 1 < p1) { //both left and right
184.                     for (k = 0; k < g3; ++k) {
185.                         for (j = 0; j < g2; ++j) {
186.                             bufferRightIn[j + k * g2] = data[_i(0, j, k)];
187.                             bufferRightOut[j + k * g2] = data[_i(g1 - 1, j, k)];
188.                         }
189.                     }
190.                     MPI_Isend(bufferRightIn, g2* g3, MPI_DOUBLE, _ib(ib - 1, jb, kb), 0,
            MPI_COMM_WORLD, &send_request1_1);
191.                     MPI_Isend(bufferRightOut, g2* g3, MPI_DOUBLE, _ib(ib + 1, jb, kb), 0,
            MPI_COMM_WORLD, &send_request1_2);
192.                 }
193.                 else if (ib > 0) { //only left side
194.                     for (k = 0; k < g3; ++k) {
195.                         for (j = 0; j < g2; ++j) {
196.                             bufferRightIn[j + k * g2] = data[_i(0, j, k)];
197.                         }
198.                     }
199.                     MPI_Isend(bufferRightIn, g2 * g3, MPI_DOUBLE, _ib(ib - 1, jb, kb), 0,
            MPI_COMM_WORLD, &send_request1_1);
200.                 }
201.                 else if (ib + 1 < p1) { //only right side
202.                     for (k = 0; k < g3; ++k) {
203.                         for (j = 0; j < g2; ++j) {
204.                             bufferRightOut[j + k * g2] = data[_i(g1 - 1, j, k)];
205.                         }
206.                     }
207.                     MPI_Isend(bufferRightOut, g2 * g3, MPI_DOUBLE, _ib(ib + 1, jb, kb), 0,
            MPI_COMM_WORLD, &send_request1_2);
208.                 }
209.
210.
211.                 if (jb + 1 < p2 && jb > 0) { //both down and up
212.                     for (k = 0; k < g3; ++k) {
213.                         for (i = 0; i < g1; ++i) {
214.                             bufferUPIn[i + k * g1] = data[_i(i, 0, k)];
215.                             bufferUPOut[i + k * g1] = data[_i(i, g2 - 1, k)];
216.                         }
217.                     }
218.                     MPI_Isend(bufferUPIn, g1* g3, MPI_DOUBLE, _ib(ib, jb - 1, kb), 0, MPI_COMM_WORLD,
            &send_request2_2);
219.                     MPI_Isend(bufferUPOut, g1* g3, MPI_DOUBLE, _ib(ib, jb + 1, kb), 0,
            MPI_COMM_WORLD, &send_request2_1);
220.                 }
221.                 else if (jb > 0) { //only up side
222.                     for (k = 0; k < g3; ++k) {
223.                         for (i = 0; i < g1; ++i) {
224.                             bufferUPIn[i + k * g1] = data[_i(i, 0, k)];
225.                         }
226.                     }
227.                     MPI_Isend(bufferUPIn, g1 * g3, MPI_DOUBLE, _ib(ib, jb - 1, kb), 0,
            MPI_COMM_WORLD, &send_request2_2);
228.                 }
229.                 else if (jb + 1 < p2) { //only down side
230.                     for (k = 0; k < g3; ++k) {
231.                         for (i = 0; i < g1; ++i) {
232.                             bufferUPOut[i + k * g1] = data[_i(i, g2 - 1, k)];
233.                         }
234.                     }
235.                     MPI_Isend(bufferUPOut, g1* g3, MPI_DOUBLE, _ib(ib, jb + 1, kb), 0,
            MPI_COMM_WORLD, &send_request2_1);
236.                 }
237.
238.
239.                 if (kb + 1 < p3 && kb > 0) { //both back and front
240.                     for (j = 0; j < g2; ++j) {
241.                         for (i = 0; i < g1; ++i) {
242.                             bufferFrontIn[i + j * g1] = data[_i(i, j, 0)];
243.                             bufferFrontOut[i + j * g1] = data[_i(i, j, g3 - 1)];
```

```
244.                         }
245.                     }
246.                     MPI_Isend(bufferFrontIn, g1* g2, MPI_DOUBLE, _ib(ib, jb, kb - 1), 0,
        MPI_COMM_WORLD, &send_request3_2);
247.                     MPI_Isend(bufferFrontOut, g1* g2, MPI_DOUBLE, _ib(ib, jb, kb + 1), 0,
        MPI_COMM_WORLD, &send_request3_1);
248.                 }
249.                 else if (kb > 0) { //only front side
250.                     for (j = 0; j < g2; ++j) {
251.                         for (i = 0; i < g1; ++i) {
252.                             bufferFrontIn[i + j * g1] = data[_i(i, j, 0)];
253.                         }
254.                     }
255.                     MPI_Isend(bufferFrontIn, g1* g2, MPI_DOUBLE, _ib(ib, jb, kb - 1), 0,
        MPI_COMM_WORLD, &send_request3_2);
256.                 }
257.                 else if (kb + 1 < p3) { //only back side
258.                     for (j = 0; j < g2; ++j) {
259.                         for (i = 0; i < g1; ++i) {
260.                             bufferFrontOut[i + j * g1] = data[_i(i, j, g3 - 1)];
261.                         }
262.                     }
263.                     MPI_Isend(bufferFrontOut, g1 * g2, MPI_DOUBLE, _ib(ib, jb, kb + 1), 0,
        MPI_COMM_WORLD, &send_request3_1);
264.                 }
265.
266.
267.                 //while wait for data
268.
269.                 //iterational function
270.                 double epsTemp[1];
271.                 epsTemp[0] = 0;
272.
273.                 for (k = 1; k < g3 - 1; ++k) {
274.                     for (j = 1; j < g2 - 1; ++j) {
275.                         for (i = 1; i < g1 - 1; ++i) {
276.                             next[_i(i, j, k)] = 0.5 * ((data[_i(i + 1, j, k)] + data[_i(i - 1, j,
        k)]) / (hx * hx) +
277.                                 (data[_i(i, j + 1, k)] + data[_i(i, j - 1, k)]) / (hy * hy) +
278.                                 (data[_i(i, j, k + 1)] + data[_i(i, j, k - 1)]) / (hz * hz)) /
279.                                 (1.0 / (hx * hx) + 1.0 / (hy * hy) + 1.0 / (hz * hz));
280.                             epsTemp[0] = max(epsTemp[0], abs(next[_i(i, j, k)] - data[_i(i, j, k)]));
281.                         }
282.                     }
283.                 }
284.
285.                 //wait for data
286.
287.                 if (ib > 0) { //only left side
288.                     MPI_Wait(&send_request1_1, &status);
289.                 }
290.
291.                 if (jb > 0) { //only up side
292.                     MPI_Wait(&send_request2_2, &status);
293.                 }
294.
295.                 if (kb > 0) { //only front side
296.                     MPI_Wait(&send_request3_2, &status);
297.                 }
298.
299.
300.
301.                 //set new data
302.
303.                 if (ib + 1 < p1) { //get right side
304.                     MPI_Irecv(bufferRightIn, g2 * g3, MPI_DOUBLE, _ib(ib + 1, jb, kb), 0,
        MPI_COMM_WORLD, &recv_request1_2);
305.                     MPI_Wait(&recv_request1_2, &status);
306.                     for (k = 0; k < g3; ++k) {
307.                         for (j = 0; j < g2; ++j) {
308.                             data[_i(g1, j, k)] = bufferRightIn[j + k * g2];
309.                         }
```

```
                    }
                }
                else {
                    for (k = 0; k < g3; ++k) {
                        for (j = 0; j < g2; ++j) {
                            data[_i(g1, j, k)] = Uright;
                            next[_i(g1, j, k)] = Uright;
                        }
                    }
                }

                if (jb + 1 < p2) { //get down side
                    MPI_Irecv(bufferUPIn, g1 * g3, MPI_DOUBLE, _ib(ib, jb + 1, kb), 0,
        MPI_COMM_WORLD, &recv_request2_1);
                    MPI_Wait(&recv_request2_1, &status);
                    for (k = 0; k < g3; ++k) {
                        for (i = 0; i < g1; ++i) {
                            data[_i(i, g2, k)] = bufferUPIn[i + k * g1];
                        }
                    }
                }
                else {
                    for (k = 0; k < g3; ++k) {
                        for (i = 0; i < g1; ++i) {
                            data[_i(i, g2, k)] = Udown;
                            next[_i(i, g2, k)] = Udown;
                        }
                    }
                }


                if (kb + 1 < p3) { //get back side
                    MPI_Irecv(bufferFrontIn, g1 * g2, MPI_DOUBLE, _ib(ib, jb, kb + 1), 0,
        MPI_COMM_WORLD, &recv_request3_1);
                    MPI_Wait(&recv_request3_1, &status);
                    for (j = 0; j < g2; ++j) {
                        for (i = 0; i < g1; ++i) {
                            data[_i(i, j, g3)] = bufferFrontIn[i + j * g1];
                        }
                    }
                }
                else {
                    for (j = 0; j < g2; ++j) {
                        for (i = 0; i < g1; ++i) {
                            data[_i(i, j, g3)] = Uback;
                            next[_i(i, j, g3)] = Uback;
                        }
                    }
                }


                if (ib + 1 < p1) { //only right side
                    MPI_Wait(&send_request1_2, &status);
                }
                if (jb + 1 < p2) { //only down side
                    MPI_Wait(&send_request2_1, &status);
                }
                if (kb + 1 < p3) { //only back side
                    MPI_Wait(&send_request3_1, &status);
                }


                if (ib > 0) { //get left side
                    MPI_Irecv(bufferRightOut, g2* g3, MPI_DOUBLE, _ib(ib - 1, jb, kb), 0,
        MPI_COMM_WORLD, &recv_request1_1);
                    MPI_Wait(&recv_request1_1, &status);
                    for (k = 0; k < g3; ++k) {
                        for (j = 0; j < g2; ++j) {
                            data[_i(-1, j, k)] = bufferRightOut[j + k * g2];
                        }
```

```
379.                     }
380.                 }
381.                 else {
382.                     for (k = 0; k < g3; ++k) {
383.                         for (j = 0; j < g2; ++j) {
384.                             data[_i(-1, j, k)] = Uleft;
385.                             next[_i(-1, j, k)] = Uleft;
386.                         }
387.                     }
388.                 }
389.
390.
391.                 if (jb > 0) { //get up side
392.                     MPI_Irecv(bufferUPOut, g1* g3, MPI_DOUBLE, _ib(ib, jb - 1, kb), 0,
            MPI_COMM_WORLD, &recv_request2_2);
393.                     MPI_Wait(&recv_request2_2, &status);
394.                     for (k = 0; k < g3; ++k) {
395.                         for (i = 0; i < g1; ++i) {
396.                             data[_i(i, -1, k)] = bufferUPOut[i + k * g1];
397.                         }
398.                     }
399.                 }
400.                 else {
401.                     for (k = 0; k < g3; ++k) {
402.                         for (i = 0; i < g1; ++i) {
403.                             data[_i(i, -1, k)] = Uup;
404.                             next[_i(i, -1, k)] = Uup;
405.                         }
406.                     }
407.                 }
408.
409.
410.                 if (kb > 0) { //get front side
411.                     MPI_Irecv(bufferFrontOut, g1* g2, MPI_DOUBLE, _ib(ib, jb, kb - 1), 0,
            MPI_COMM_WORLD, &recv_request3_2);
412.                     MPI_Wait(&recv_request3_2, &status);
413.                     for (j = 0; j < g2; ++j) {
414.                         for (i = 0; i < g1; ++i) {
415.                             data[_i(i, j, -1)] = bufferFrontOut[i + j * g1];
416.                         }
417.                     }
418.                 }
419.                 else {
420.                     for (j = 0; j < g2; ++j) {
421.                         for (i = 0; i < g1; ++i) {
422.                             data[_i(i, j, -1)] = Ufront;
423.                             next[_i(i, j, -1)] = Ufront;
424.                         }
425.                     }
426.                 }
427.
428.
429.                 //MPI_Barrier(MPI_COMM_WORLD);
430.
431.                 //for edges
432.
433.                 int* i_start, * j_start, * k_start;
434.
435.                 k_start = (int*)malloc(sizeof(int) * 2);
436.                 k_start[0] = 0;
437.                 k_start[1] = g3 - 1;
438.
439.                 j_start = (int*)malloc(sizeof(int) * 2);
440.                 j_start[0] = 0;
441.                 j_start[1] = g2 - 1;
442.
443.                 i_start = (int*)malloc(sizeof(int) * 2);
444.                 i_start[0] = 0;
445.                 i_start[1] = g1 - 1;
446.
447.                 //k-edges
448.                 for (int k_s = 0; k_s < 2; ++k_s) {
```

```
449.                     k = k_start[k_s];
450.                     for (j = 0; j < g2; ++j) {
451.                         for (i = 0; i < g1; ++i) {
452.                             next[_i(i, j, k)] = 0.5 * ((data[_i(i + 1, j, k)] + data[_i(i - 1, j,
        k)]) / (hx * hx) +
453.                                 (data[_i(i, j + 1, k)] + data[_i(i, j - 1, k)]) / (hy * hy) +
454.                                 (data[_i(i, j, k + 1)] + data[_i(i, j, k - 1)]) / (hz * hz)) /
455.                                 (1.0 / (hx * hx) + 1.0 / (hy * hy) + 1.0 / (hz * hz));
456.                             epsTemp[0] = max(epsTemp[0], abs(next[_i(i, j, k)] - data[_i(i, j, k)]));
457.                         }
458.                     }
459.                 }
460.
461.
462.
463.                 //j-edges
464.                 for (k = 0; k < g3; ++k) {
465.                     for (int j_s = 0; j_s < 2; ++j_s) {
466.                         j = j_start[j_s];
467.                         for (i = 0; i < g1; ++i) {
468.                             next[_i(i, j, k)] = 0.5 * ((data[_i(i + 1, j, k)] + data[_i(i - 1, j,
        k)]) / (hx * hx) +
469.                                 (data[_i(i, j + 1, k)] + data[_i(i, j - 1, k)]) / (hy * hy) +
470.                                 (data[_i(i, j, k + 1)] + data[_i(i, j, k - 1)]) / (hz * hz)) /
471.                                 (1.0 / (hx * hx) + 1.0 / (hy * hy) + 1.0 / (hz * hz));
472.                             epsTemp[0] = max(epsTemp[0], abs(next[_i(i, j, k)] - data[_i(i, j, k)]));
473.                         }
474.                     }
475.                 }
476.
477.
478.                 //i-edges
479.                 for (k = 0; k < g3; ++k) {
480.                     for (j = 0; j < g2; ++j) {
481.                         for (int i_s = 0; i_s < 2; ++i_s) {
482.                             i = i_start[i_s];
483.                             next[_i(i, j, k)] = 0.5 * ((data[_i(i + 1, j, k)] + data[_i(i - 1, j,
        k)]) / (hx * hx) +
484.                                 (data[_i(i, j + 1, k)] + data[_i(i, j - 1, k)]) / (hy * hy) +
485.                                 (data[_i(i, j, k + 1)] + data[_i(i, j, k - 1)]) / (hz * hz)) /
486.                                 (1.0 / (hx * hx) + 1.0 / (hy * hy) + 1.0 / (hz * hz));
487.                             epsTemp[0] = max(epsTemp[0], abs(next[_i(i, j, k)] - data[_i(i, j, k)]));
488.                         }
489.                     }
490.                 }
491.
492.
493.                 MPI_Allgather(epsTemp, 1, MPI_DOUBLE, errors, 1, MPI_DOUBLE, MPI_COMM_WORLD);
494.                 epsTemp[0] = 0;
495.                 for (i = 0; i < numproc; ++i) {
496.                     epsTemp[0] = max(epsTemp[0], errors[i]);
497.                 }
498.
499.                 temp = next;
500.                 next = data;
501.                 data = temp;
502.
503.                 maxErr = epsTemp[0];
504.
505.                 iter += 1;
506.
507.             }while (maxErr >= eps);
508.
509.
510.             MPI_Barrier(MPI_COMM_WORLD);
511.
512.             if (id != 0) {
513.                 for (k = 0 ; k < g3 ; ++k) {
514.                     for (j = 0; j < g2; ++j) {
515.                         for (i = 0; i < g1; ++i) {
516.                             bufferIString[i] = data[_i(i, j, k)];
517.                         }
```

```
518.                         MPI_Isend(bufferIString, g1, MPI_DOUBLE, 0, id, MPI_COMM_WORLD,
        &send_request1);
519.                         MPI_Wait(&send_request1, &status);
520.                     }
521.                 }
522.             }
523.             else {
524.                 cerr << "Process GRID: " << p1 << "x" << p2 << "x" << p3 << "\n";
525.                 cerr << "Num GRID: " << g1 << "x" << g2 << "x" << g3 << "\n";
526.                 cerr << "Eps: " << eps << "\n";
527.                 cerr << "lx: " << lx << " ly: " << ly << " lz: " << lz << "\n";
528.                 cerr << "Us: " << Ufront << " , " << Uback << " , " << Uleft << " , " << Uright << "
        , " << Uup << " , " << Udown << "\n";
529.                 cerr << "U0: " << U0 << "\n";
530.                 cerr << "Iterations: " << iter << "\n";
531.
532.                 FILE* File = fopen(outFile.c_str(), "w+");
533.
534.                 for (kb = 0; kb < p3; ++kb) {
535.                     for (k = 0; k < g3; ++k) {
536.                         for (jb = 0; jb < p2; ++jb) {
537.                             for (j = 0; j < g2; ++j) {
538.                                 for (ib = 0; ib < p1; ++ib) {
539.                                     if (_ib(ib, jb, kb) == 0) {
540.                                         for (i = 0; i < g1; ++i) {
541.                                             bufferIString[i] = data[_i(i, j, k)];
542.                                             printf("%.6e ", bufferIString[i]);
543.                                         }
544.                                         if (ib + 1 == p1) {
545.                                             printf("\n");
546.                                             if (j + 1 == g2) {
547.                                                 printf("\n");
548.                                             }
549.                                         }
550.                                     }
551.                                     else {
552.                                         MPI_Irecv(bufferIString, g1, MPI_DOUBLE, _ib(ib, jb, kb),
        _ib(ib, jb, kb), MPI_COMM_WORLD, &recv_request1);
553.                                         MPI_Wait(&recv_request1, &status);
554.                                         for (i = 0; i < g1; ++i) {
555.                                             printf("%.6e ", bufferIString[i]);
556.                                         }
557.                                         if (ib + 1 == p1) {
558.                                             printf("\n");
559.                                             if (j + 1 == g2) {
560.                                                 printf("\n");
561.                                             }
562.                                         }
563.                                     }
564.                                 }
565.                             }
566.                         }
567.                     }
568.                 }
569.                 fclose(File);
570.             }
571.
572.
573.
574.             MPI_Buffer_detach(buffer, &buffer_size);
575.             MPI_Finalize();
576.
577.             free(bufferRightIn);
578.             free(bufferUPIn);
579.             free(bufferFrontIn);
580.
581.             free(bufferRightOut);
582.             free(bufferUPOut);
583.             free(bufferFrontOut);
584.
585.             free(data);
586.             free(next);
```

```
587.            free(buffer);
588.
589.            return 0;
590.        }
```

## Результаты

Как-то так.

Размерность учитывается общая, то есть размеры блоков поделены на количество процессов (eps 1e-3)

| Разм / Проц | 1x1x1 | CPU (1x1x1) | 1x1x2 | 1x2x2 | 2x2x2 | 2x2x5 | 2x5x5 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 10x10x10 | 0.01478 | 0.01309 | 0.02094 | 0.02031 | 0.01814 | 4.42374 | 32.3297 |
| 20x20x20 | 0.18774 | 0.20482 | 0.10972 | 0.06897 | 0.06047 | 12.3675 | 102.186 |
| 50x50x50 | 8.96422 | 9.00067 | 4.73802 | 2.63155 | 2.1569 | 50.4081 | 332.556 |
| 100x100x100 | 127.123 | 127.757 | 64.5818 | 37.0962 | 29.4352 | 144.84 | 739.977 |
| 200x200x200 | 1028.76 | 1080.22 | 523.996 | 353.169 | 293.215 | 255.162 | 1036.46 |

Заметим, что при большом количестве процессов MPI, программа начинает падать в производительности. Дело в том, что уходит очень много времени на обмен граничными слоями. Поэтому, необходимо найти баланс. Лучше всего в целом программа работает про конфигурации ядра 2x2x2. То есть, 8 процессов. Однако, MPI намного превосходит в производительности обычную программу без этой технологии. Особенно при больших данных, однако, слишком много процессов использовать не стоит.

## Выводы

Сущий ад. Серьезно. Такое ощущение, как будто я делал целую курсовую. Если честно, то некоторые курсовые были даже легче. С данной лабораторной я возился целые две недели. И постоянно она не проходила на каких-то тестах. Были проблемы и с тем, что неправильно переносил элементы. Но чаще всего – проблема в том, что процессы не успевали копировать все данные, и в итоге граничные элементы заполнялись всяким мусором. В итоге, и выходило намного больше итераций, и ответ не совпадал совсем, потому что с других элементов шло приближение.

Почему она висла при конфигурации 2x2x2, 200x200x200, я честно до сих пор не понимаю. Может, снова, не успевало все копировать. Но как-то раз ко мне пришла идея поделить на четные и нечетные и получать их раздельно, и вот чудо, она прошла! Еще мне однокурсник посоветовал сначала вычислять внутренность блока, а затем края – это немного должно повысить производительность. Пока идет передача элементов, мы не теряем время и вычисляем большую часть значений (ну если куб не 3x3x3 или 5x5x5 или еще меньше). Короче, убил оочень много нервов с этой лабой, однако, я узнал некоторые новые вещи. Научился распараллеливать программу, при 8 процессах идет намного быстрее, чем при одном. Еще дело было в моем варианте – Isend – неблокирующая передача, поэтому приходилось ставить постоянно Wait, с которым очень легко запутаться. При обычном BSend, у меня бы таких проблем не возникло. Но я очень рад, что эта седьмая лаба уже позади, и мне осталось ее только защитить. Вот только теперь траблы с 8-ой лабой (с 9 не было так сложно). Думаю, что похожая технология может пригодиться при вычислении математических задач с огромными данными (как эта). Кстати, огромное спасибо преподавателю за то, что

посоветовал мне cerr. Могу теперь смотреть на каких тестах не проходит, и именно это мне помогло найти ошибки.