



Технології графічного процесінгу & розподілених обчислень

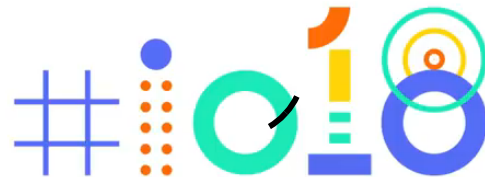
Лекція 2: Вступ до CUDA C

Кочура Юрій Петрович
iuriy.kochura@gmail.com
[@y_kochura](#)

Огляд

Сьогоднішні виклики обчислень

- Навички **виконання обчислень** є важливими для вивчення практично усіх дисциплін
- **Наука про дані** та **машинне навчання** стають основними навичками в більшості STEM
- Практично всі **процесори багатоядерні**, від мікроконтролерів до суперкомп'ютери
- Бізнес та наукові відкриття потребують **ШІ** та **прискорених обчислень**



0:00 / 21:32



The future of computing: a conversation with John Hennessy (Google I/O '18)

Пристрої

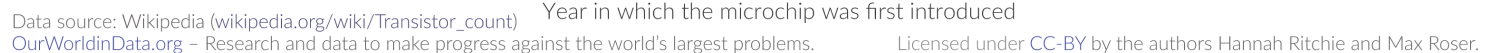
Device type	Device name	Transistor count	Date of introduction	Designer(s)	MOS process	Area	Transistor density, tr./mm ²
Deep learning engine / IPU[g]	Colossus GC2	23,600,000,000	2018	Graphcore	16 nm	~800 mm ²	29,500,000
Deep learning engine / IPU	Wafer Scale Engine	1,200,000,000,000	2019	Cerebras	16 nm	46,225 mm ²	25,960,000
Deep learning engine / IPU	Wafer Scale Engine 2	2,600,000,000,000	2020	Cerebras	7 nm	46,225 mm ²	56,250,000
Network switch	NVLink4 NVSwitch	25,100,000,000	2022	Nvidia	N4 (4 nm)	294 mm ²	85,370,000

—
IPU: Intelligence Processing Unit

Джерело слайду: en.wikipedia.org

Our World
in Data

Transistor count



Сьогодні

- Масштабованість та портативність у гетерогенних паралельних обчисленнях
- GPU-прискорені vs лише CPU програми
- Способи прискорення виконання програм
- Приклади паралельних обчислень
- Процес компіляції CUDA C/C++
- Ядра: функції GPU
- Ієрархія потоків
- Демо

Масштабованість та портативність у гетерогенних паралельних обчисленнях

Масштабованість

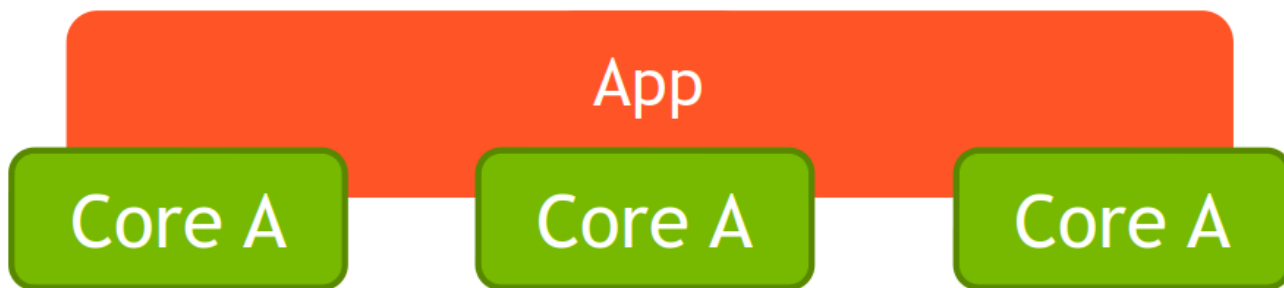


Масштабованість



Той самий додаток ефективно працює на нових поколіннях ядер.

Масштабованість



Той самий додаток ефективно працює на кількох однакових ядрах.

Портативність



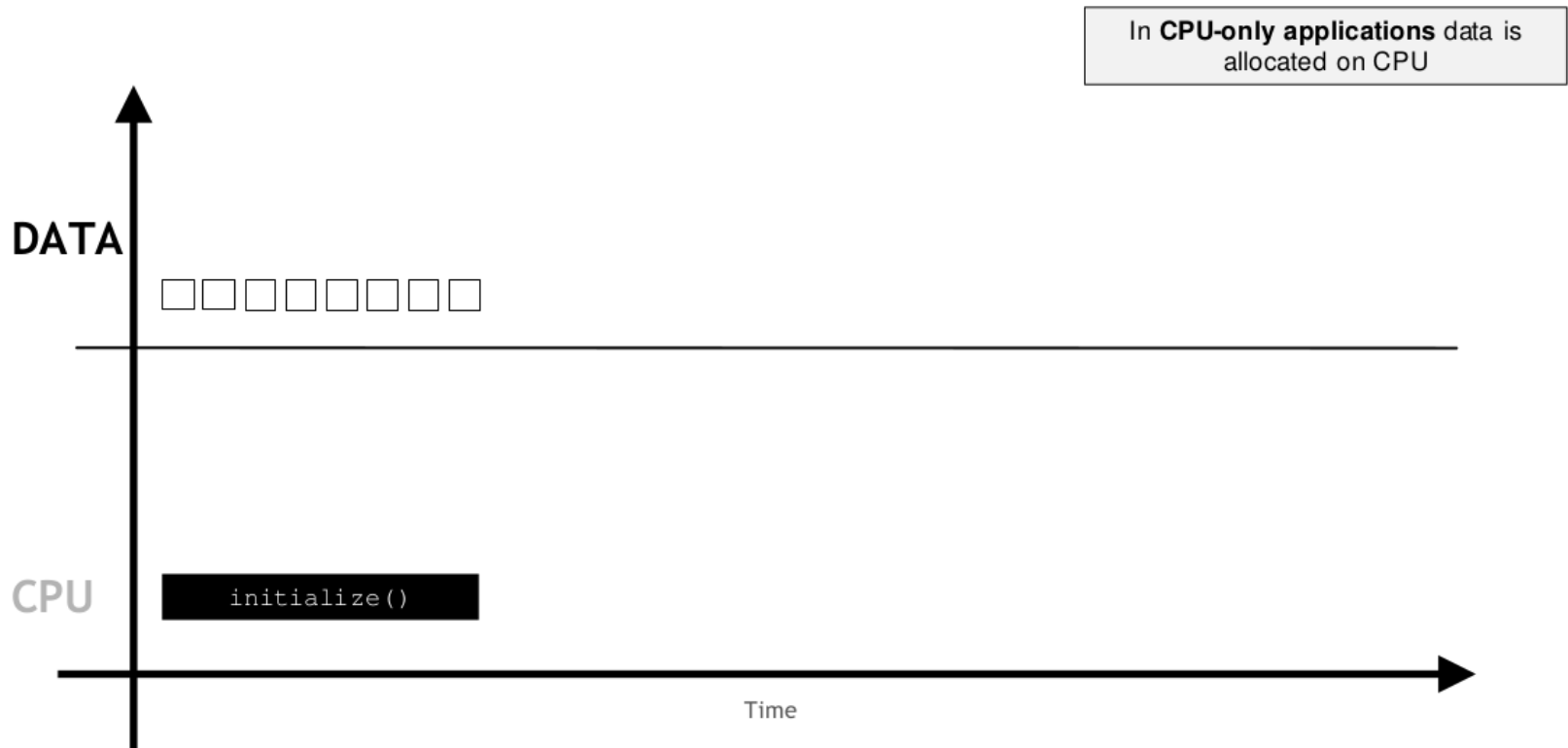
Той самий додаток ефективно працює на різних типах ядер.

Портативність

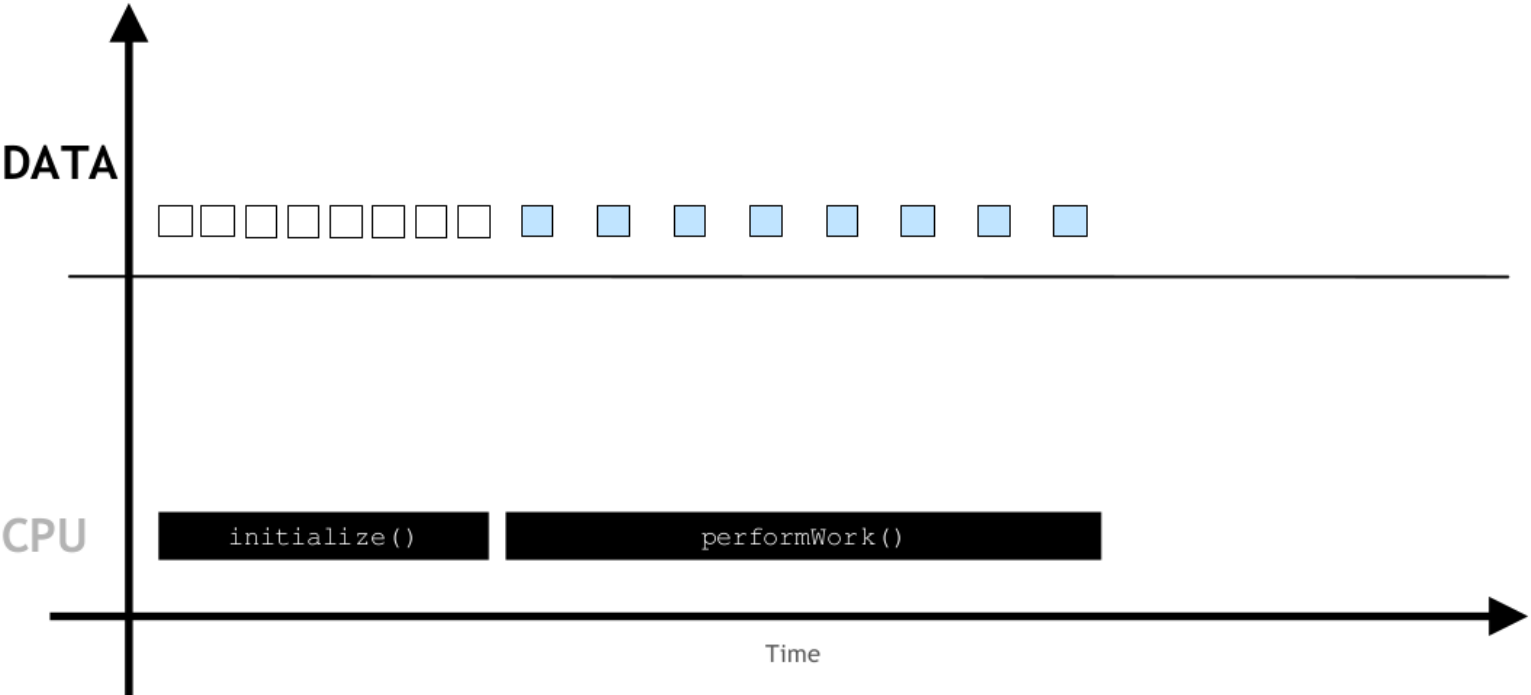


Той самий додаток ефективно працює в системах з різною організацією та інтерфейсами.

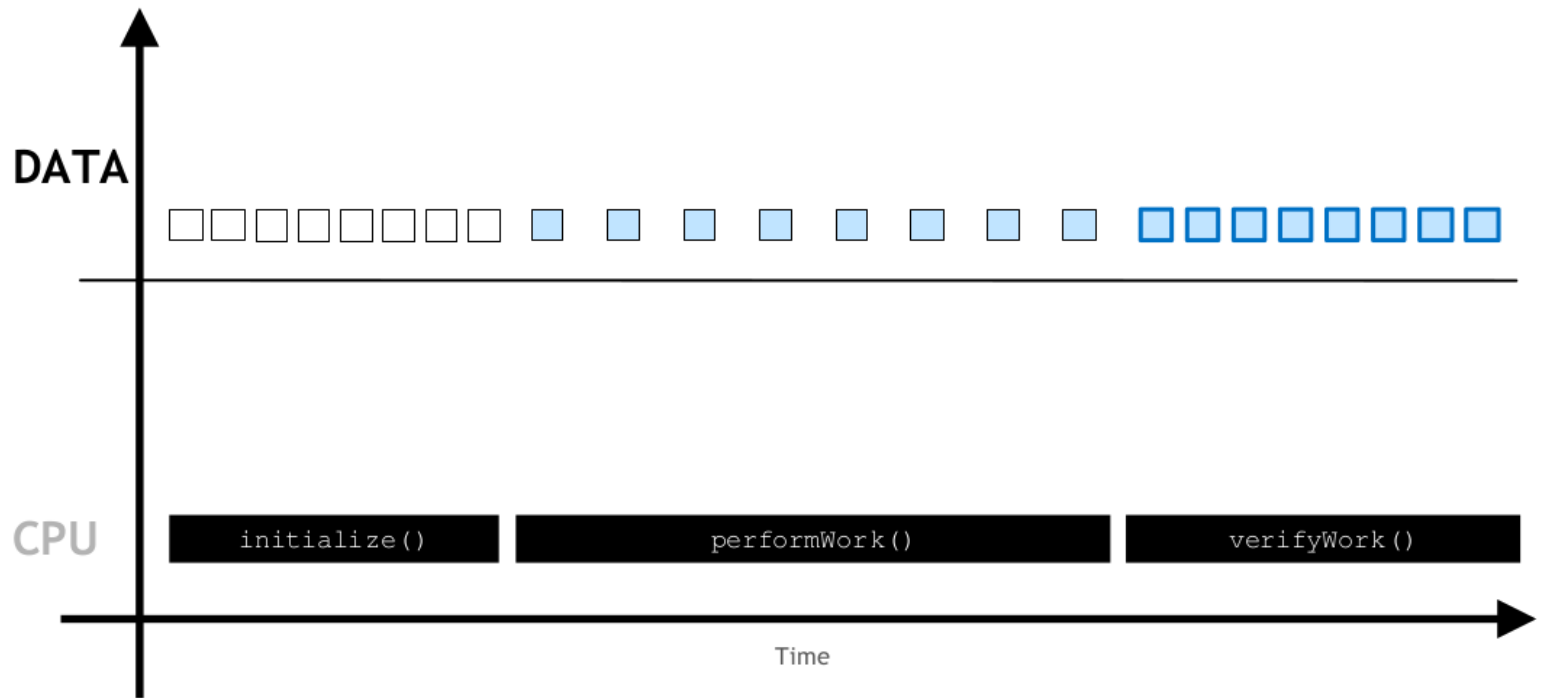
GPU-прискорені
vs
лише CPU програми

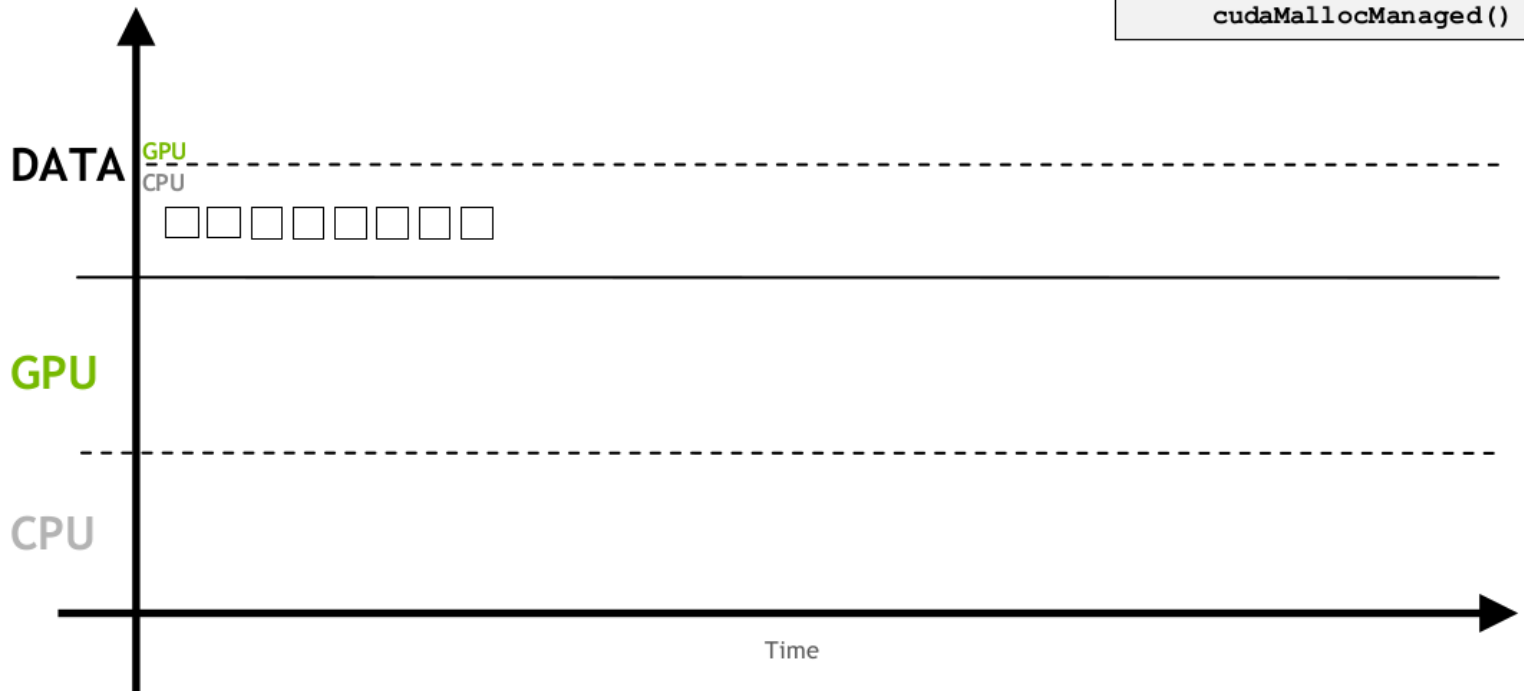


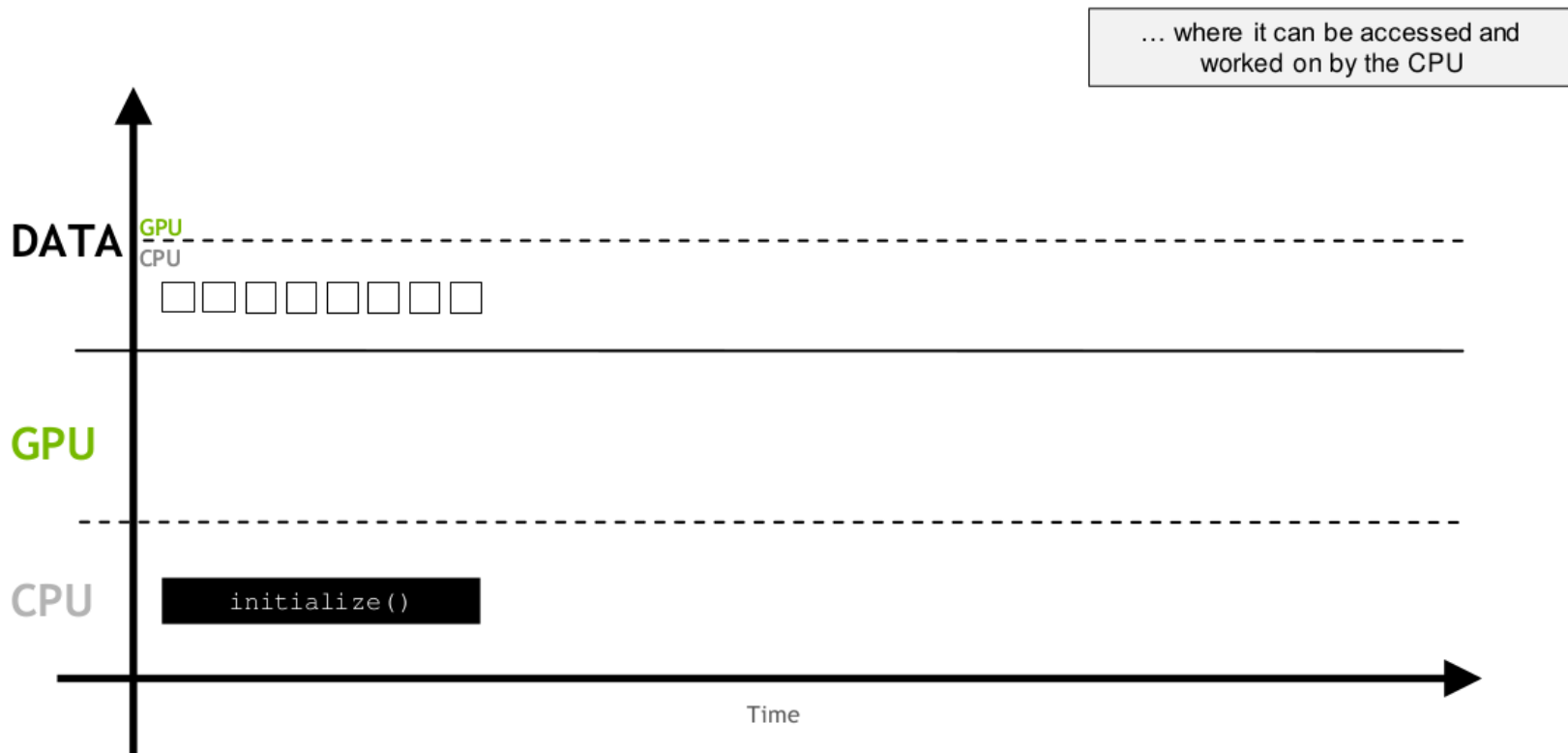
...and all work is performed on CPU

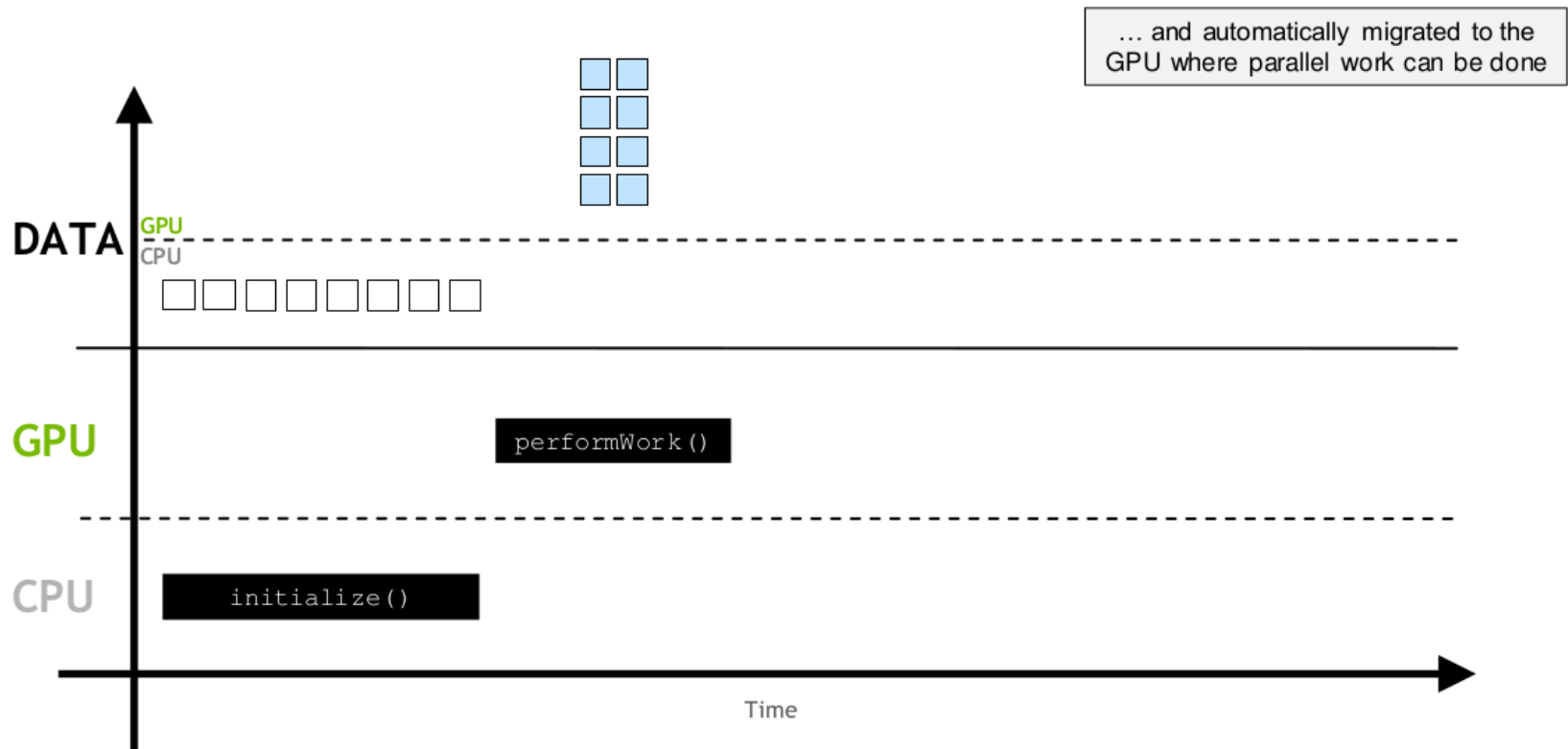


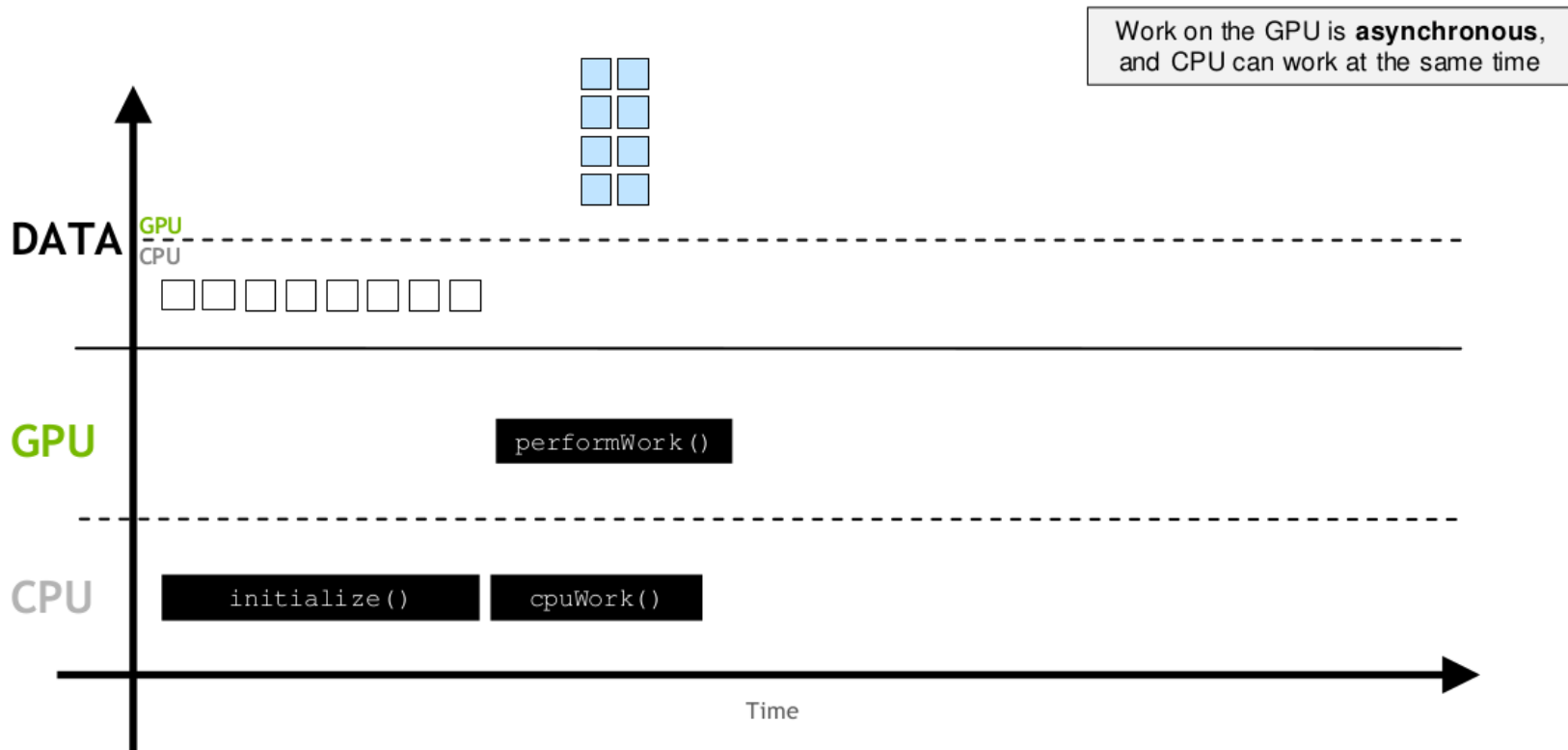
...and all work is performed on CPU

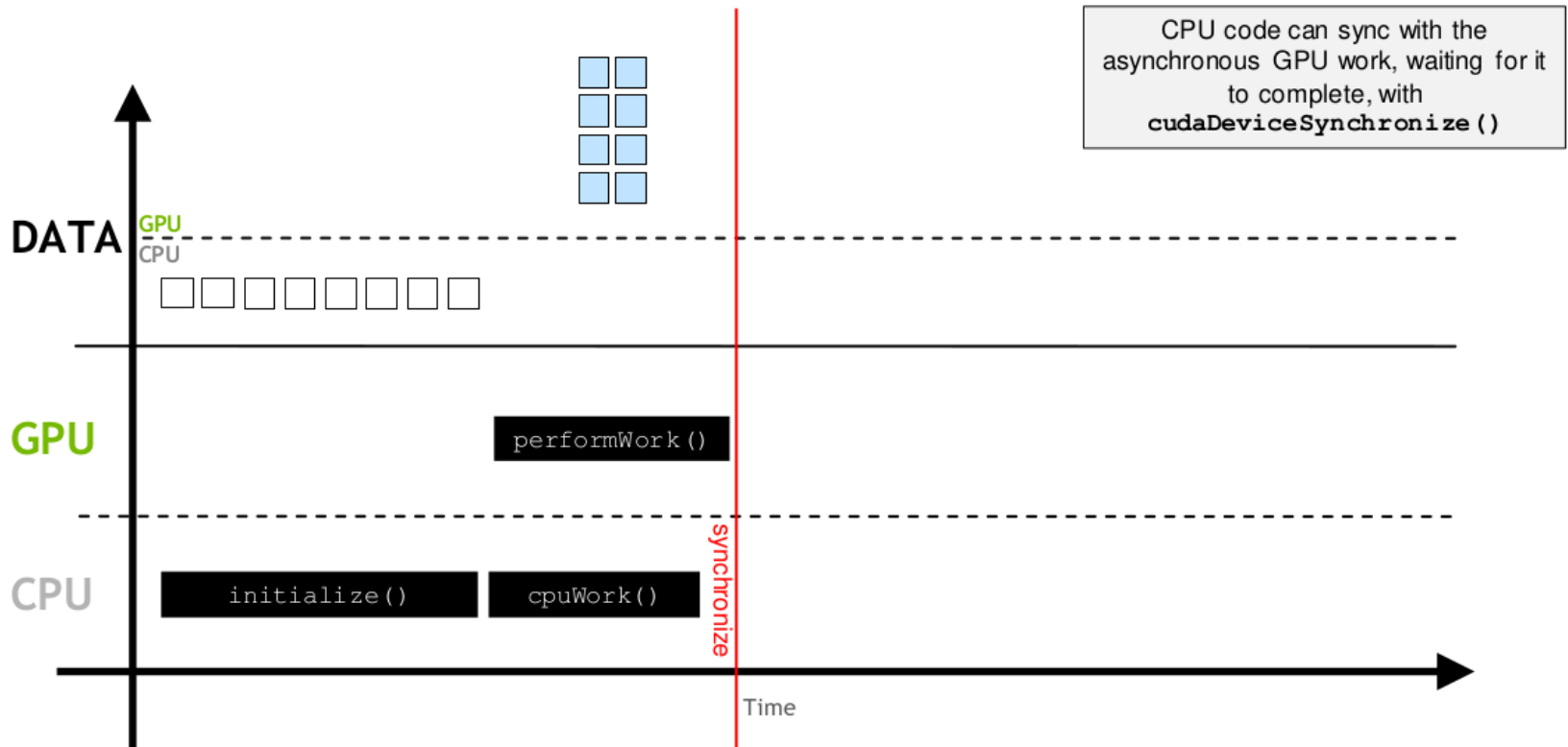


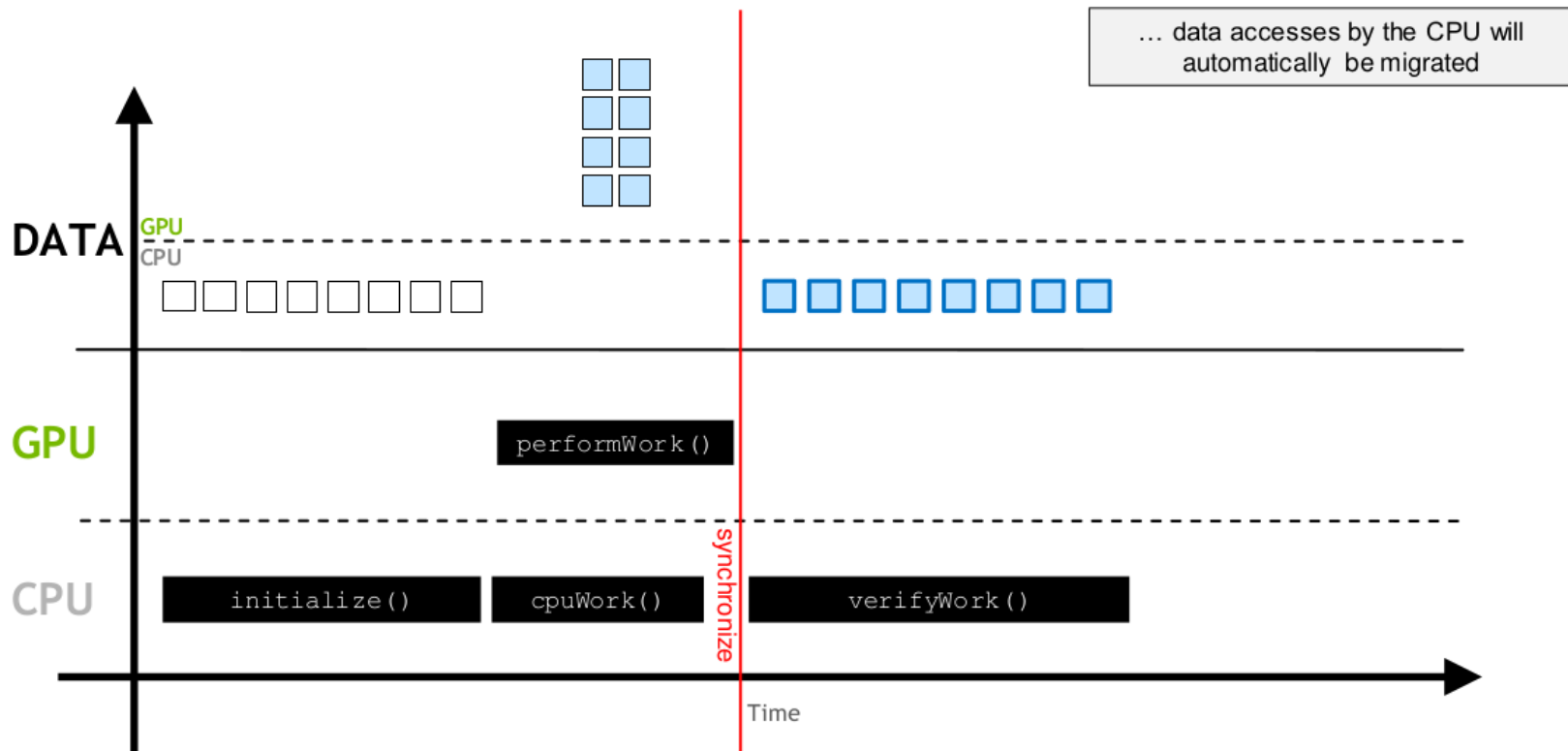












Способи прискорення виконання програм



Бібліотеки

Бібліотеки: проста, високо-якісне прискорення

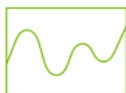
- **Простота використання:** використання бібліотек дозволяє прискорювати обчислень на GPU без поглиблених знань програмування GPU
- Багато бібліотек для прискорення обчислень на GPU дотримуються стандартних API, що дозволяє прискорювати роботу з мінімальними змінами коду
- **Якість:** бібліотеки пропонують високоякісні реалізації функцій, які зустрічаються у великій кількості додатків

Математичні бібліотеки



cuBLAS

GPU-accelerated basic linear algebra (BLAS) library



cuFFT

GPU-accelerated library for Fast Fourier Transforms



CUDA Math Library

GPU-accelerated standard mathematical function library



cuRAND

GPU-accelerated random number generation (RNG)



cuSOLVER

GPU-accelerated dense and sparse direct solvers



cuSPARSE

GPU-accelerated BLAS for sparse matrices



cuTENSOR

GPU-accelerated tensor linear algebra library



AmgX

GPU-accelerated linear solvers for simulations and implicit unstructured methods

Бібліотеки паралельних алгоритмів



Thrust

Бібліотека паралельних алгоритмів і структур даних C++ з GPU

Бібліотеки візуальної обробки

nvJPEG

High performance GPU-accelerated library for JPEG decoding

NVIDIA Performance Primitives

Provides GPU-accelerated image, video, and signal processing functions

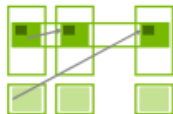
NVIDIA Video Codec SDK

A complete set of APIs, samples, and documentation for hardware-accelerated video encode and decode on Windows and Linux

NVIDIA Optical Flow SDK

Exposes the latest hardware capability of NVIDIA Turing™ GPUs dedicated to computing the relative motion of pixels between images

Бібліотеки комунікації



NVSHMEM

OpenSHMEM standard for GPU memory, with extensions for improved performance on GPUs.



NCCL

Open-source library for fast multi-GPU, multi-node communications that maximizes bandwidth while maintaining low latency.

Бібліотеки глибинного навчання

NVIDIA cuDNN

GPU-accelerated
library of primitives for
deep neural networks

NVIDIA TensorRT™

High-performance
deep learning
inference optimizer
and runtime for
production deployment

NVIDIA Riva

Platform for
developing engaging
and contextual AI-
powered conversation
apps

NVIDIA DeepStream SDK

Real-time streaming
analytics toolkit for AI-
based video
understanding and
multi-sensor
processing

NVIDIA DALI

Portable, open-source
library for decoding
and augmenting
images and videos to
accelerate deep
learning applications

Директиви компілятора

Директиви компілятора: проста, портативне прискорення

- **Простота використання:** Компілятор подбає про деталі керування паралелізмом і переміщенням даних
- **Портативність:** Код є загальним, не специфічним для будь-якого типу апаратного забезпечення та може бути розгорнутий на кількох мовах
- **Невизначеність:** Продуктивність коду може відрізнятися в різних версіях компілятора

OpenACC

- Директиви компілятора для C/C++ та Fortran

Приклад:

```
main()  
{  
    <serial code>  
    #pragma acc kernels  
    // automatically runs on GPU  
    {  
        <parallel code>  
    }  
}
```

Мови програмування

Мови програмування: висока продуктивність та гнучке прискорення

- **Продуктивність:** Програміст може найкраще контролювати паралельність та переміщення даних
- **Гнучкість:** Обчислення не потрібно пристосовувати до обмеженого набору бібліотечних шаблонів або типів директив
- **Багатослівність:** Програмісту часто потрібно виразити більше деталей

Мови програмування GPU

C ▶

CUDA C

C++ ▶

CUDA C++

Python ▶

PyCUDA, Copperhead, Numba

Fortran ▶

CUDA Fortran

GPU Computing Applications

Libraries and Middleware

cuDNN TensorRT	cuFFT cuBLAS cuRAND cuSPARSE	CULA MAGMA	Thrust NPP	VSIPL SVM OpenCurrent	PhysX OptiX iRay	MATLAB Mathematica
-------------------	---------------------------------------	---------------	---------------	-----------------------------	------------------------	-----------------------

Programming Languages

C	C++	Fortran	Java Python Wrappers	DirectCompute	Directives (e.g. OpenACC)
---	-----	---------	----------------------------	---------------	------------------------------



CUDA-Enabled NVIDIA GPUs

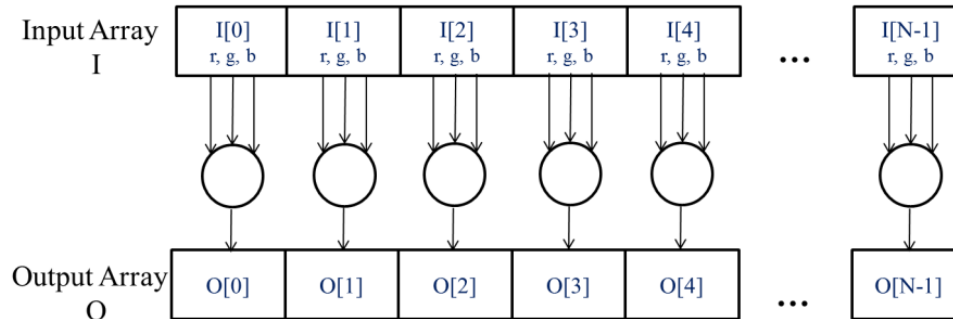
NVIDIA Ampere Architecture (compute capabilities 8.x)				Tesla A Series
NVIDIA Turing Architecture (compute capabilities 7.x)		GeForce 2000 Series	Quadro RTX Series	Tesla T Series
NVIDIA Volta Architecture (compute capabilities 7.x)	DRIVE/JETSON AGX Xavier		Quadro GV Series	Tesla V Series
NVIDIA Pascal Architecture (compute capabilities 6.x)	Tegra X2	GeForce 1000 Series	Quadro P Series	Tesla P Series
	 Embedded	 Consumer Desktop/Laptop	 Professional Workstation	 Data Center

Приклади паралельних обчислень

Перетворення **RGB** зображення у відтінки сірого

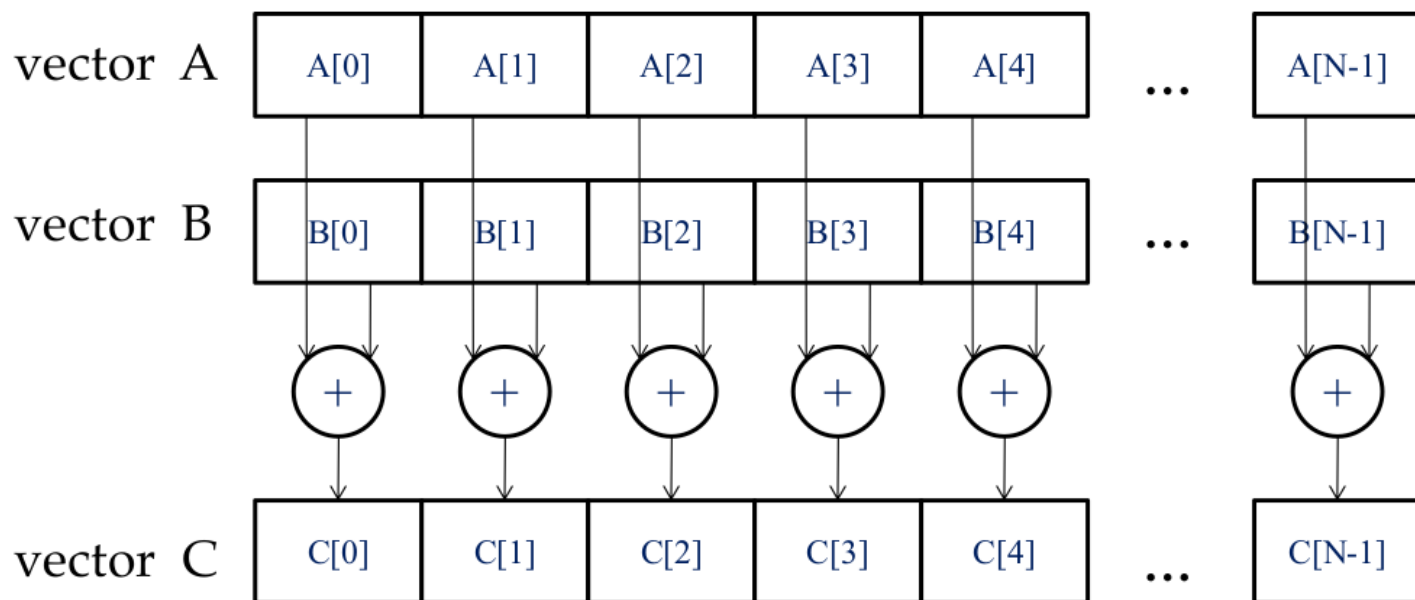


```
for each pixel {  
    pixel = gsConvert(pixel)  
}  
// Every pixel is independent  
// of every other pixel
```



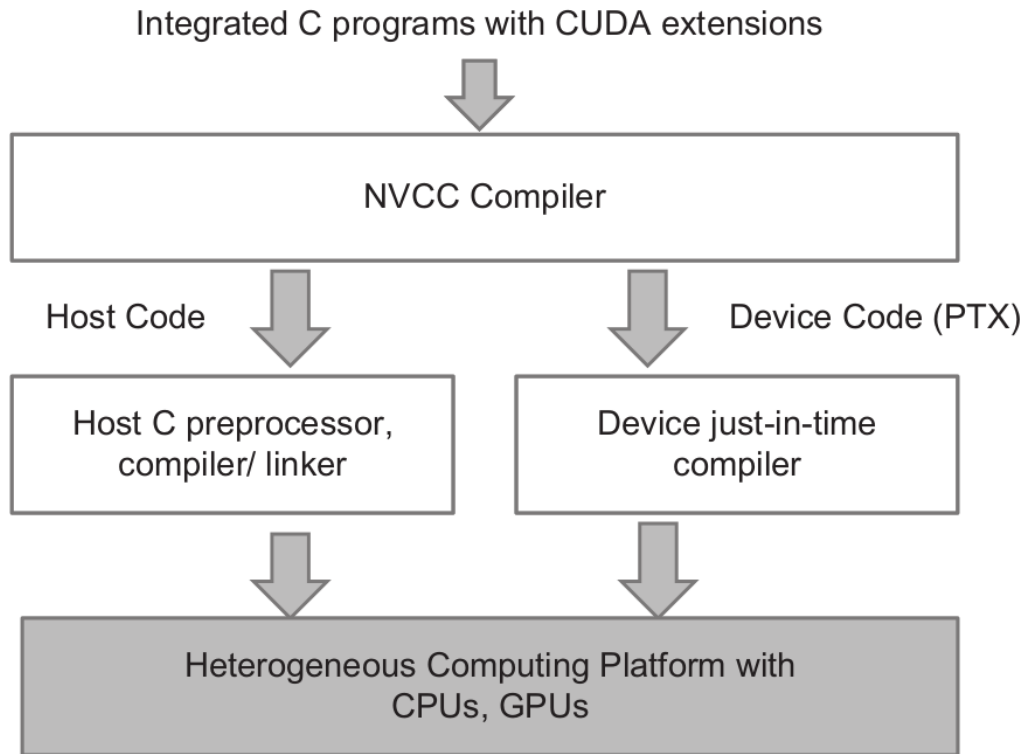
$$O = r \cdot 0.21 + g \cdot 0.72 + b \cdot 0.07$$

Додавання векторів



Процес компіляції **CUDA C/C++**

- Типовий код CUDA C/C++: **хост (CPU) + пристрій (GPU)**



CUDA/OpenCL — модель виконання

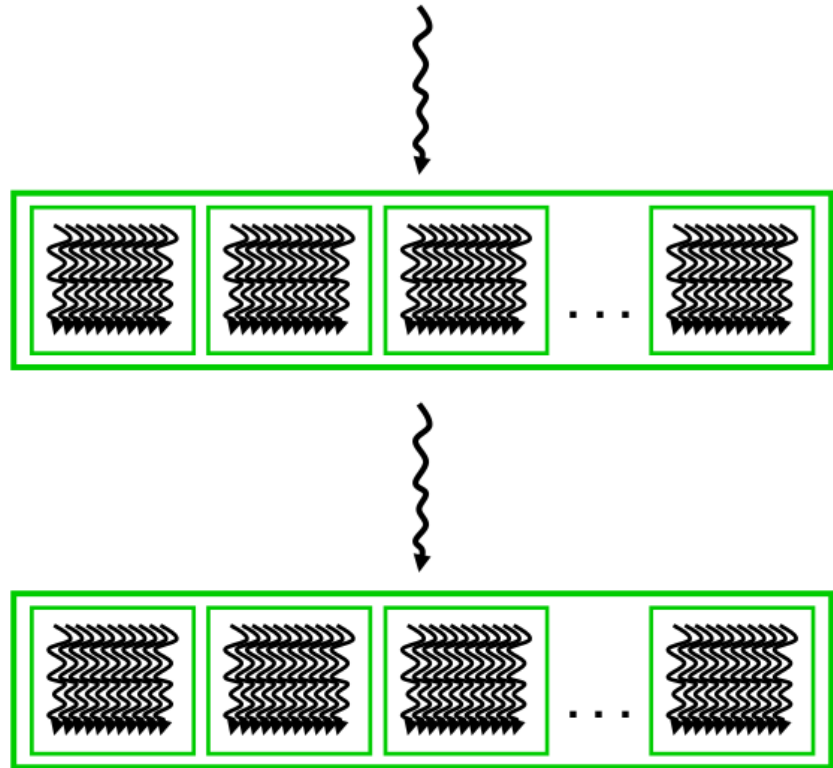
- Послідовні або помірно паралельні частини в коді, що виконуються **ХОСТОМ**
- Високо паралельні частини в коді, що виконуються **пристроєм**: ядро

Serial Code (host)

Parallel Kernel (device)

Serial Code (host)

Parallel Kernel (device)



Ядра (Kernels)

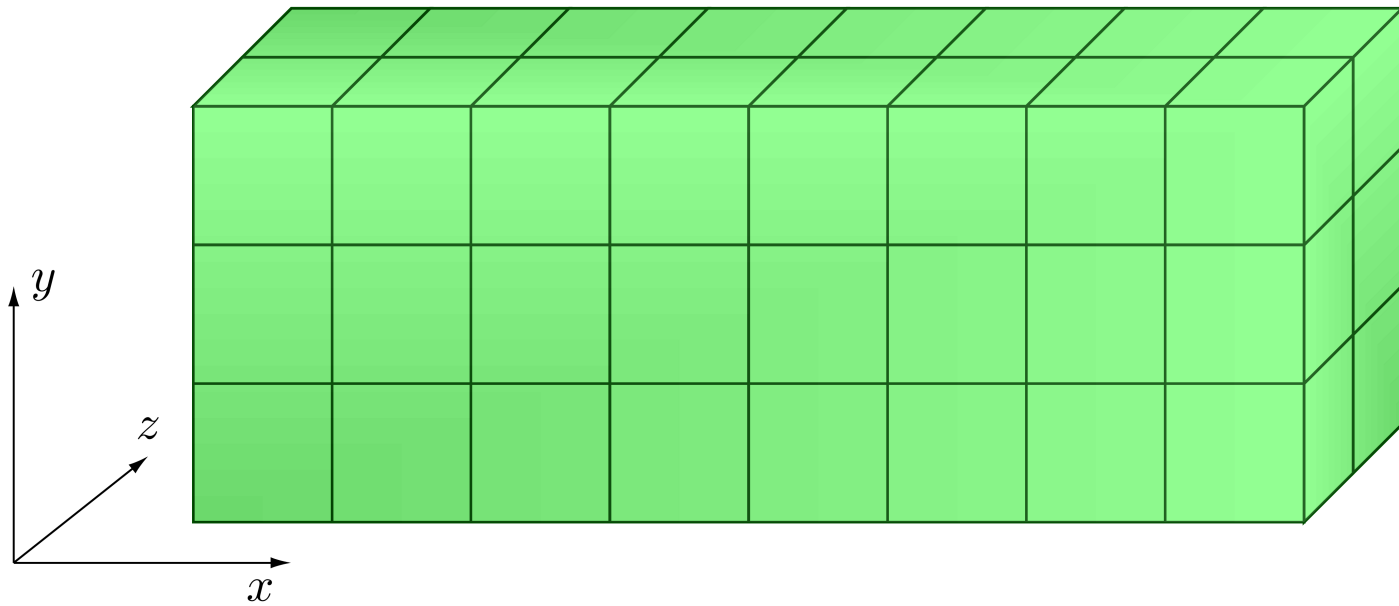
- Ядро визначається за допомогою специфікатора `__global__`

```
// Kernel definition
__global__ void VecAdd(float* A, float* B, float* C)
{
    int i = threadIdx.x;
    C[i] = A[i] + B[i];
}

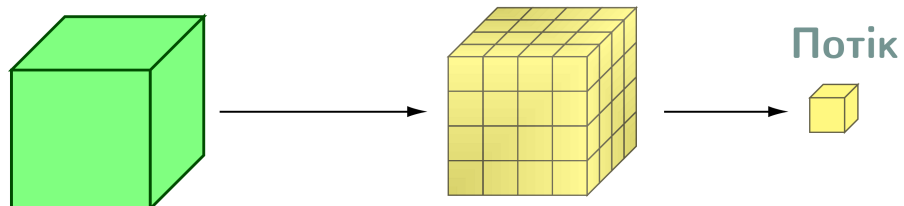
int main()
{
    ...
    // Kernel invocation with N threads
    VecAdd<<<1, N>>>(A, B, C);
    ...
}
```

Ієрархія потоків

Сітка: масив блоків



Блок: масив потоків

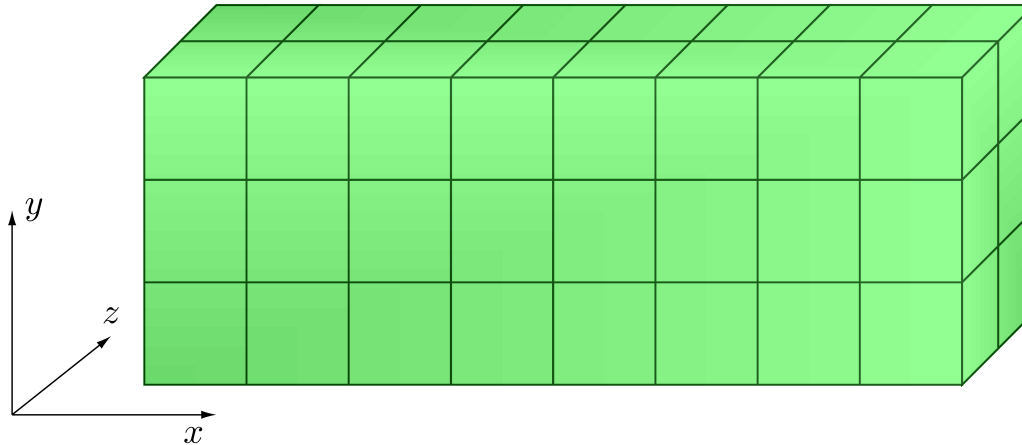


gridDim

Кількість блоків у кожному вимірі:

- `gridDim.x = 8`
- `gridDim.y = 3`
- `gridDim.z = 2`

Сітка: масив блоків

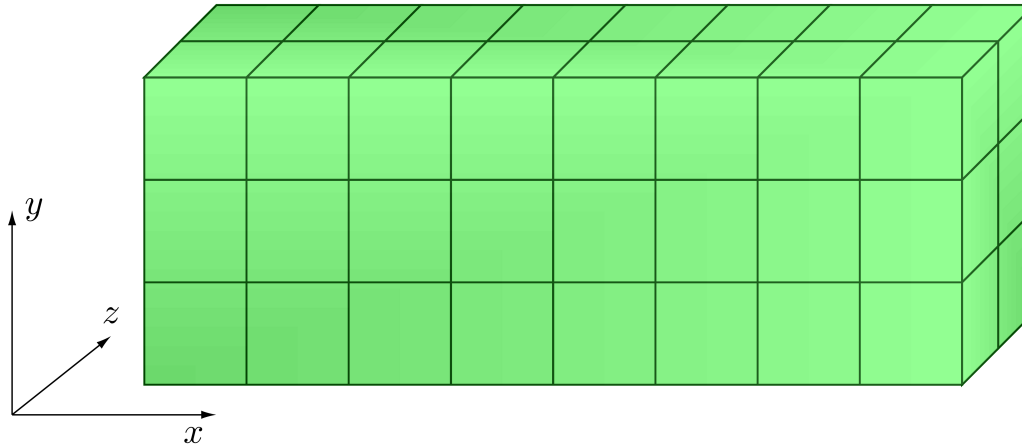


blockIdx

Кожен блок має унікальний індекс у сітці:

- `blockIdx.x` (від 0 до `gridDim.x - 1`)
- `blockIdx.y` (від 0 до `gridDim.y - 1`)
- `blockIdx.z` (від 0 до `gridDim.z - 1`)

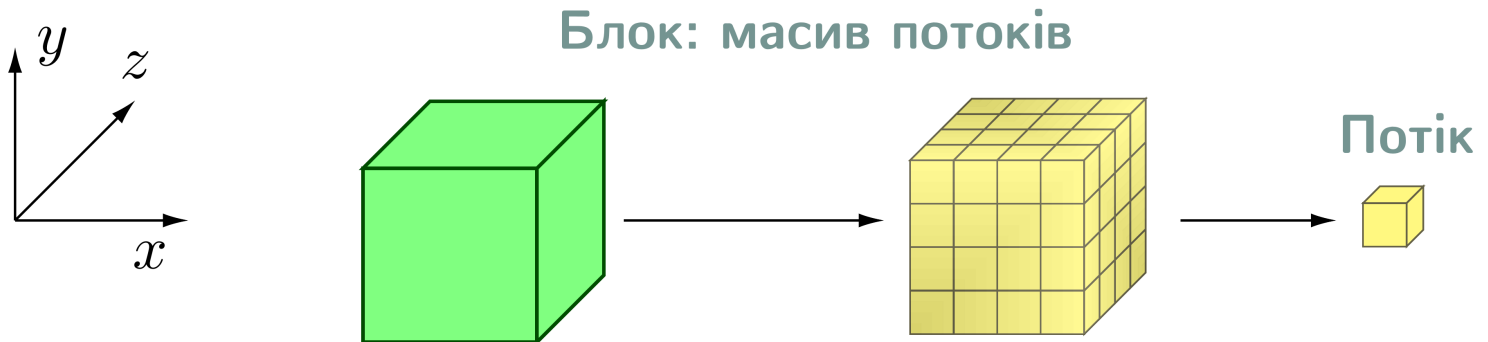
Сітка: масив блоків



blockDim

Кількість потоків у блоці:

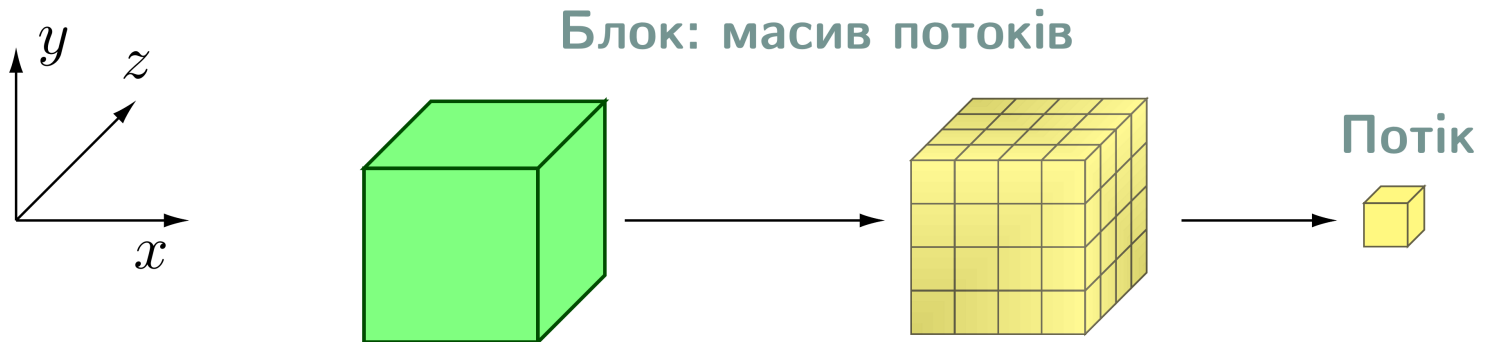
- `blockDim.x = 4`
- `blockDim.y = 4`
- `blockDim.z = 4`



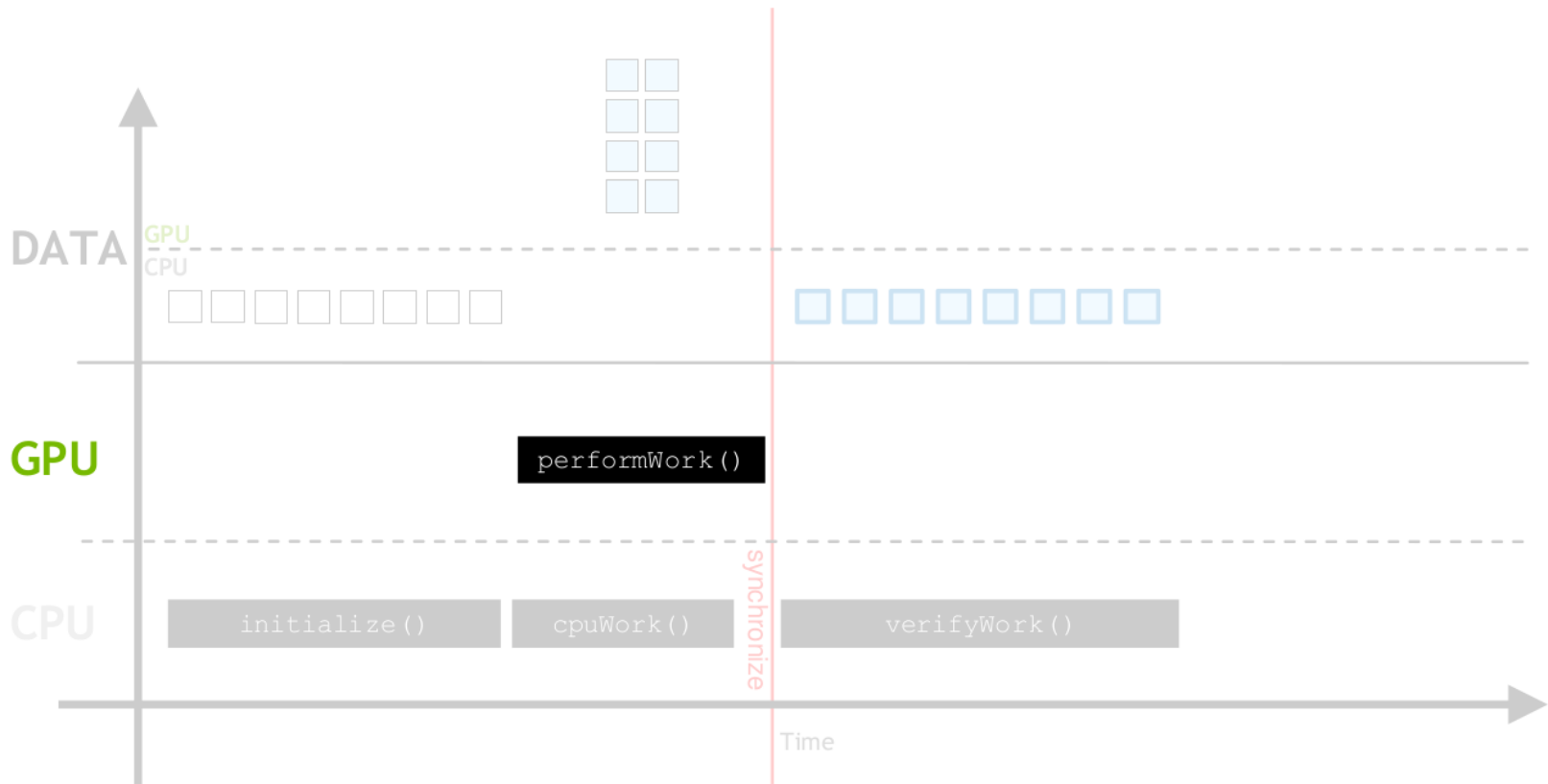
threadIdx

Кожен потік має унікальний індекс у блоці:

- `threadIdx.x` (від 0 до `blockDim.x - 1`)
- `threadIdx.y` (від 0 до `blockDim.y - 1`)
- `threadIdx.z` (від 0 до `blockDim.z - 1`)

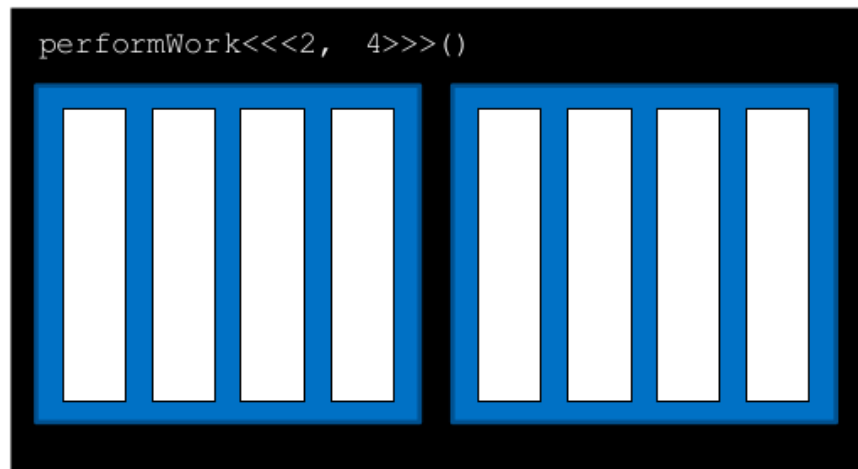


Приклад: одновимірний випадок



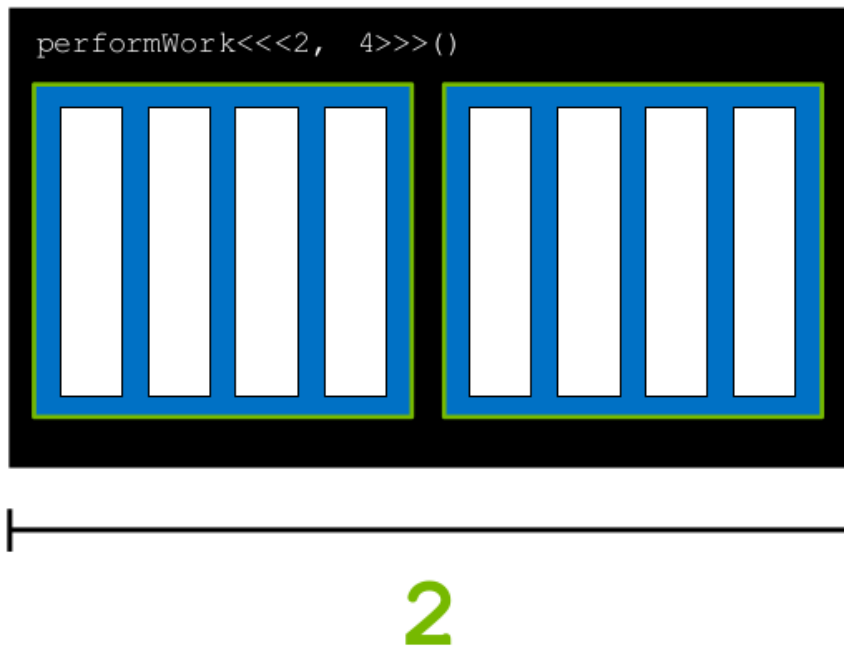
Для виконання ядра потрібно вказати **кількість блоків** та **кількість потоків** в одному блоці

GPU



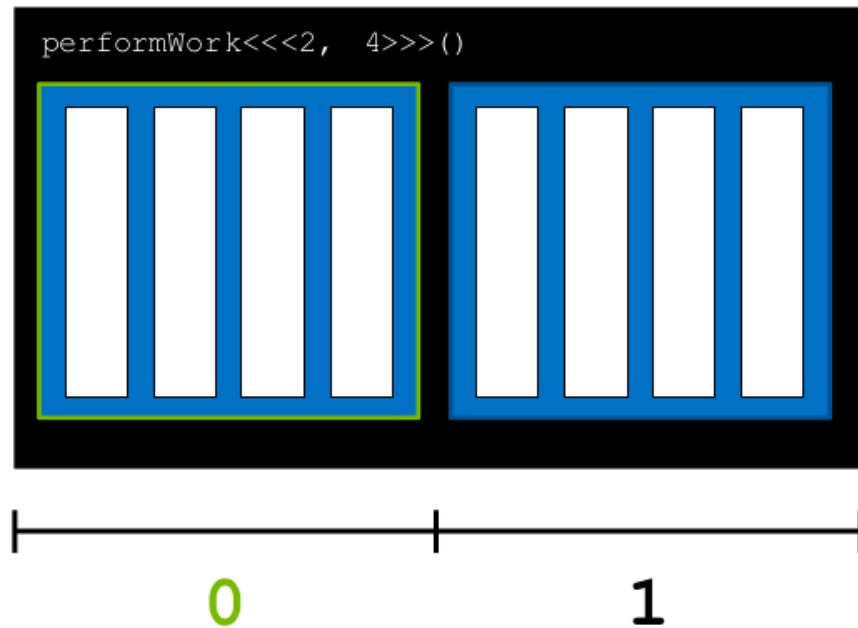
`gridDim.x` визначає кількість блоків у сітці, у цьому випадку `gridDim.x = 2`

GPU



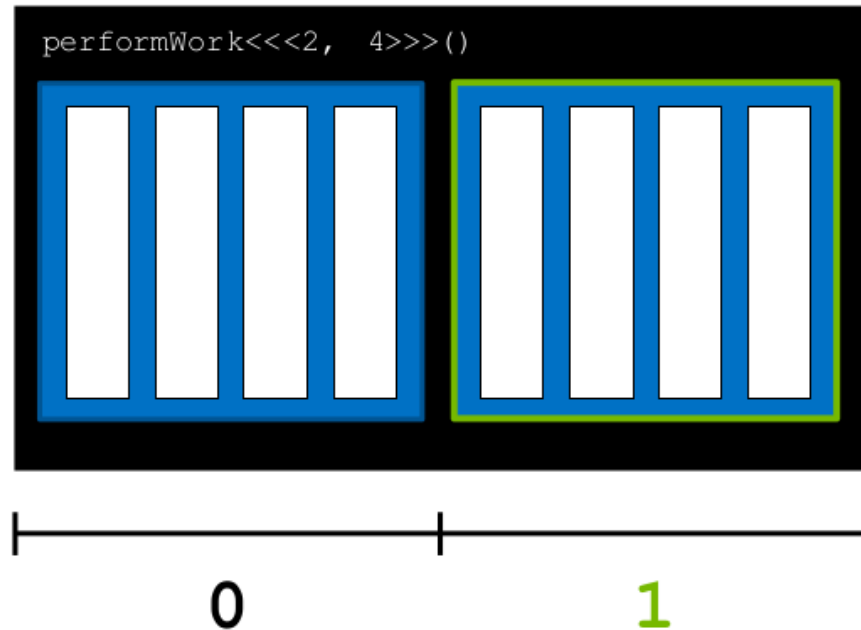
`blockIdx.x` визначає поточний індекс блоку у сітці, у цьому випадку `blockIdx.x = 0`

GPU



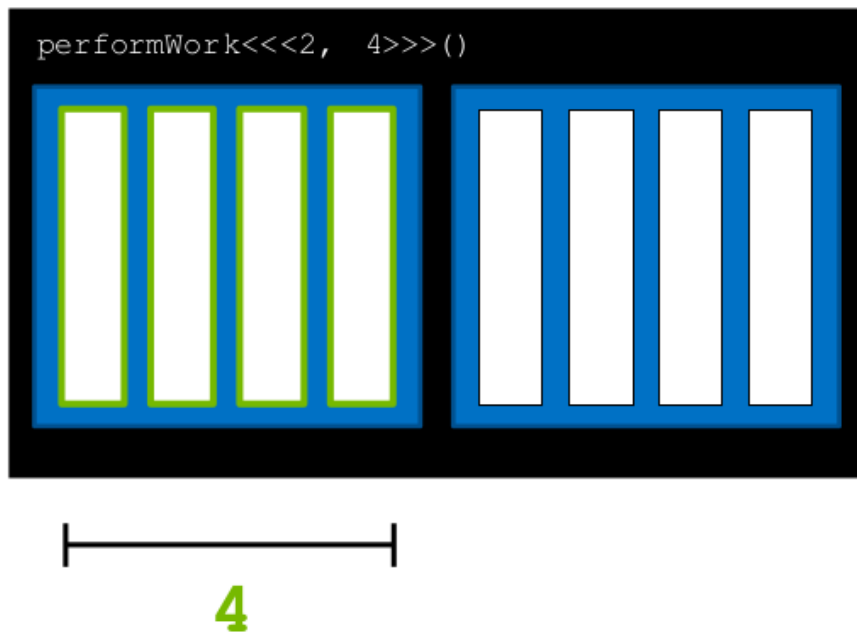
`blockIdx.x` визначає поточний індекс блоку у сітці, у цьому випадку `blockIdx.x = 1`

GPU



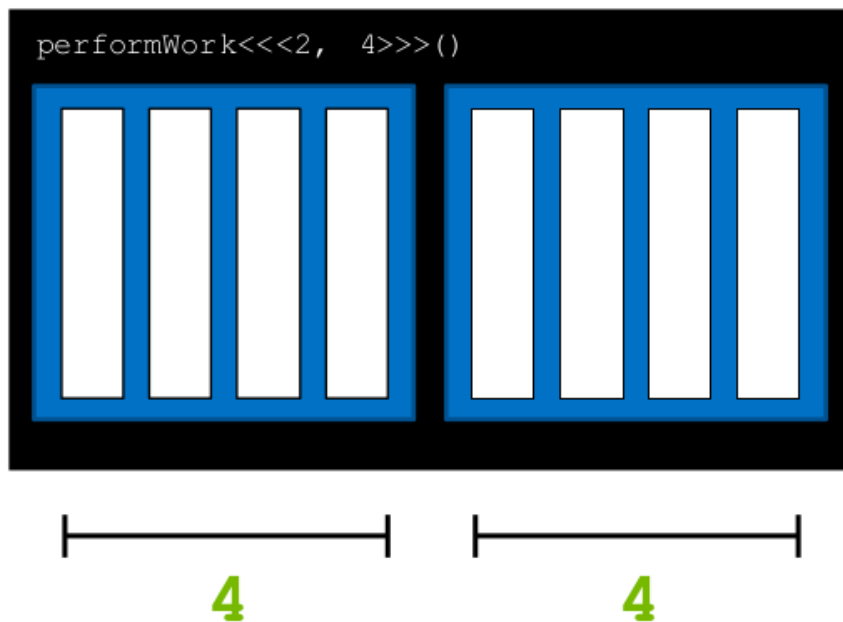
`blockDim.x` визначає кількість потоків у блоці, у цьому випадку `blockDim.x = 4`

GPU



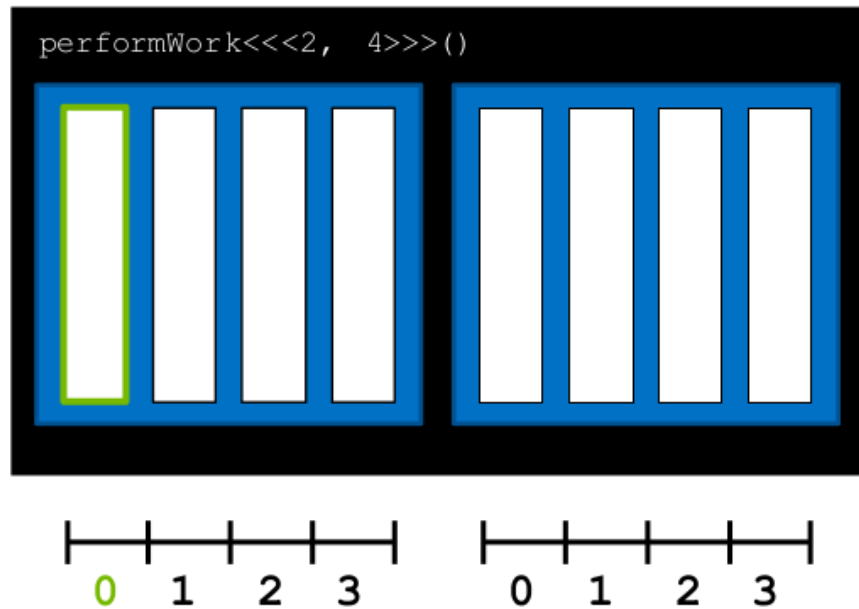
Усі блоки у сітці містять **однакову** кількість потоків

GPU



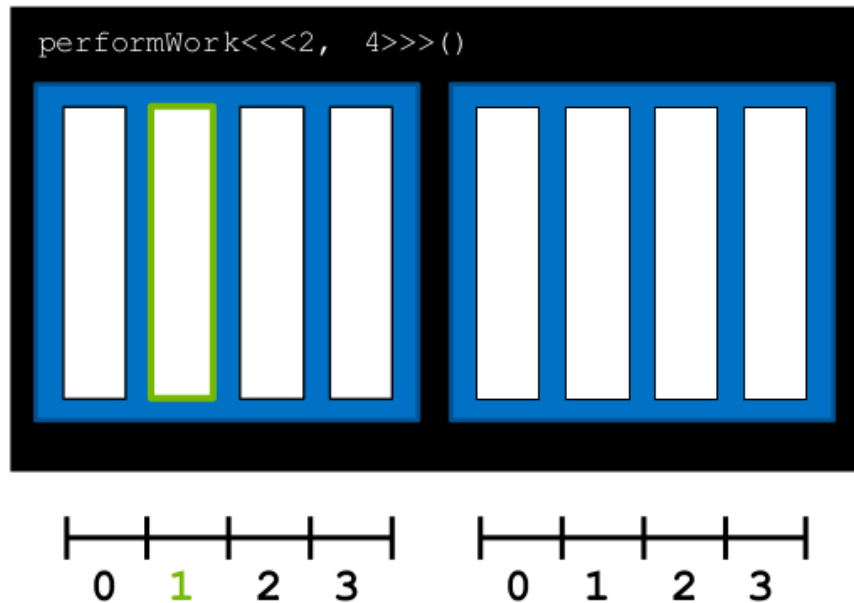
`threadIdx.x` визначає індекс потоку у межах одного блоку, у цьому випадку
`threadIdx.x = 0`

GPU



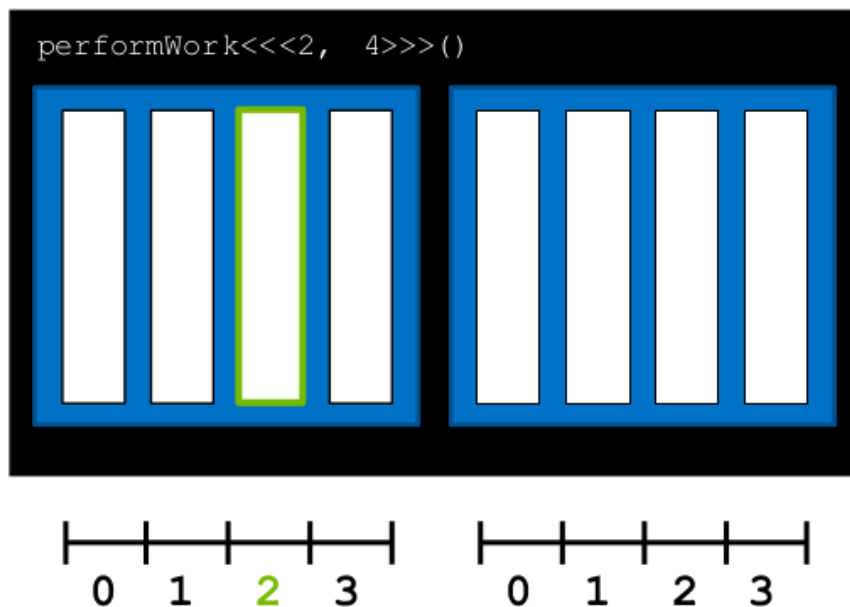
`threadIdx.x` визначає індекс потоку у межах одного блоку, у цьому випадку
`threadIdx.x = 1`

GPU



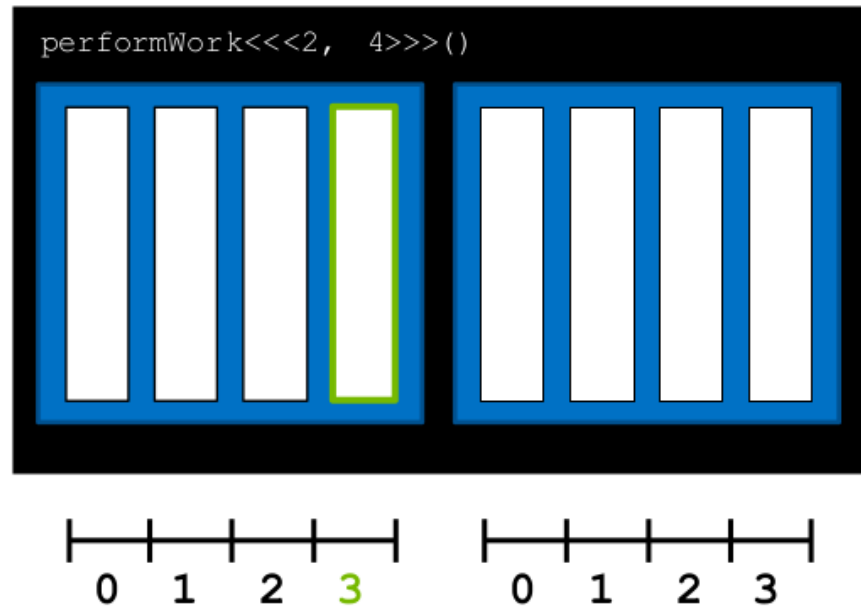
`threadIdx.x` визначає індекс потоку у межах одного блоку, у цьому випадку
`threadIdx.x = 2`

GPU



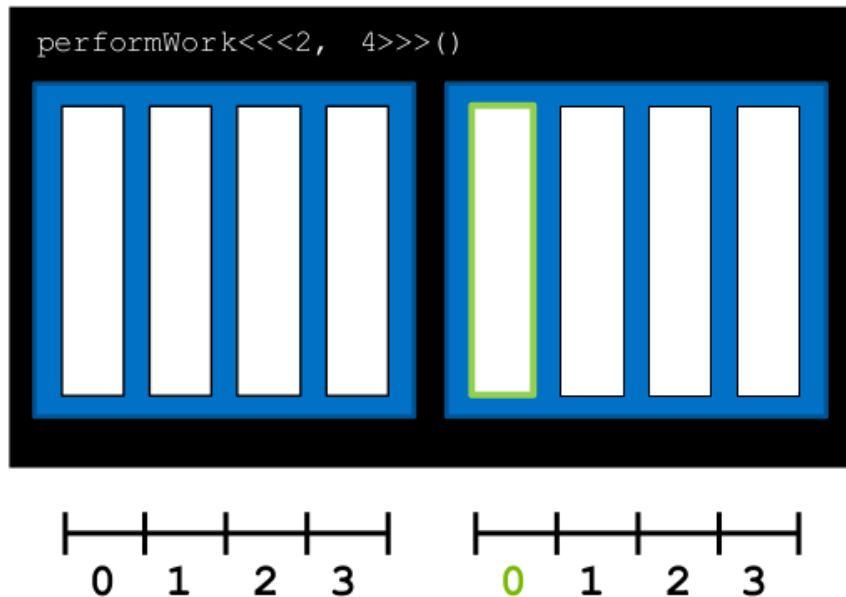
`threadIdx.x` визначає індекс потоку у межах одного блоку, у цьому випадку
`threadIdx.x = 3`

GPU



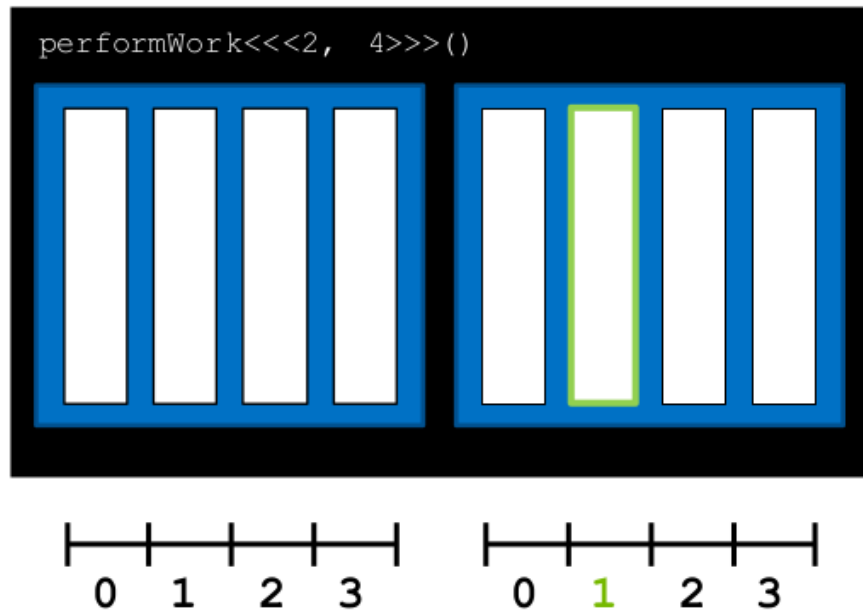
`threadIdx.x` визначає індекс потоку у межах одного блоку, у цьому випадку
`threadIdx.x = 0`

GPU



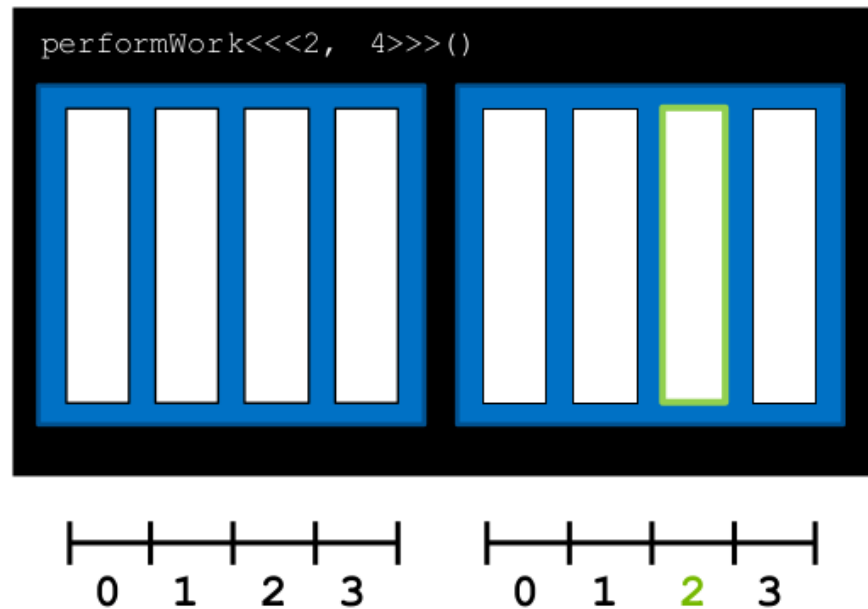
`threadIdx.x` визначає індекс потоку у межах одного блоку, у цьому випадку
`threadIdx.x = 1`

GPU



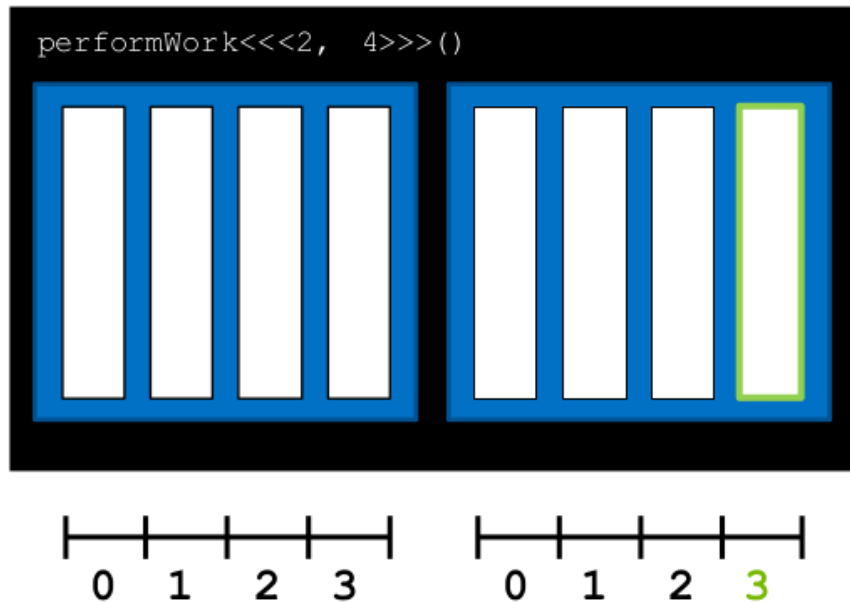
`threadIdx.x` визначає індекс потоку у межах одного блоку, у цьому випадку
`threadIdx.x = 2`

GPU



`threadIdx.x` визначає індекс потоку у межах одного блоку, у цьому випадку
`threadIdx.x = 3`

GPU



Демо: запрос устройю



Демо: додавання векторів



Додаток

- NVIDIA, [CUDA Quick Start Guide](#)

Кінець 