

Úvod, základy CUDA

Jiří Filipovič

podzim 2014

Co se budeme učit?

Předmět se zabývá návrhem algoritmů a programováním **obecných výpočtů** na vektorových multiprocесorech.

Co se budeme učit?

Předmět se zabývá návrhem algoritmů a programováním **obecných výpočtů** na vektorových multiprocesorech.

Primárně se zaměříme na CUDA GPU

- GPU jsou zajímavé z hlediska rychlosti a rozšířenosti
- C for CUDA vhodné k výuce (jednoduché API, množství materiálů, zdrojových kódů, odladěnost prostředí)
- omezení na GPU od nVidie a x86 CPU

Co se budeme učit?

Předmět se zabývá návrhem algoritmů a programováním **obecných výpočtů** na vektorových multiprocesech.

Primárně se zaměříme na CUDA GPU

- GPU jsou zajímavé z hlediska rychlosti a rozšířenosti
- C for CUDA vhodné k výuce (jednoduché API, množství materiálů, zdrojových kódů, odladěnost prostředí)
- omezení na GPU od nVidie a x86 CPU

Ukážeme si také základy OpenCL

- z CUDA poměrně snadný přechod
- kompilovatelné pro nVidia a AMD GPU, x86 CPU i Cell
- probereme specifika optimalizace pro AMD GPU a x86 CPU

Co se budeme učit?

Předmět se zabývá návrhem algoritmů a programováním **obecných výpočtů** na vektorových multiprocesech.

Primárně se zaměříme na CUDA GPU

- GPU jsou zajímavé z hlediska rychlosti a rozšířenosti
- C for CUDA vhodné k výuce (jednoduché API, množství materiálů, zdrojových kódů, odladěnost prostředí)
- omezení na GPU od nVidie a x86 CPU

Ukážeme si také základy OpenCL

- z CUDA poměrně snadný přechod
- kompilovatelné pro nVidia a AMD GPU, x86 CPU i Cell
- probereme specifika optimalizace pro AMD GPU a x86 CPU

Předmět je prakticky orientován – paralelní výpočet je na jednom procesoru konstantně-krát rychlejší než sekvenční, vedle časové složitosti nás tedy zajímá, jak napsat **efektivní kód**.

Co se budeme učit?

Budeme probírat:

- návrh datově-paralelních algoritmů s důrazem na užití v GPU

Co se budeme učit?

Budeme probírat:

- návrh datově-paralelních algoritmů s důrazem na užití v GPU
- architekturu GPU založených na CUDA

Co se budeme učit?

Budeme probírat:

- návrh datově-paralelních algoritmů s důrazem na užití v GPU
- architekturu GPU založených na CUDA
- programování v C for CUDA

Co se budeme učit?

Budeme probírat:

- návrh datově-paralelních algoritmů s důrazem na užití v GPU
- architekturu GPU založených na CUDA
- programování v C for CUDA
- nástroje a knihovny

Co se budeme učit?

Budeme probírat:

- návrh datově-paralelních algoritmů s důrazem na užití v GPU
- architekturu GPU založených na CUDA
- programování v C for CUDA
- nástroje a knihovny
- optimalizaci kódu pro GPU

Co se budeme učit?

Budeme probírat:

- návrh datově-paralelních algoritmů s důrazem na užití v GPU
- architekturu GPU založených na CUDA
- programování v C for CUDA
- nástroje a knihovny
- optimalizaci kódu pro GPU
- přechod k OpenCL

Co se budeme učit?

Budeme probírat:

- návrh datově-paralelních algoritmů s důrazem na užití v GPU
- architekturu GPU založených na CUDA
- programování v C for CUDA
- nástroje a knihovny
- optimalizaci kódu pro GPU
- přechod k OpenCL
- specifika optimalizace pro AMD Evergreen, Southern Islands a Intel/AMD x86

Co se budeme učit?

Budeme probírat:

- návrh datově-paralelních algoritmů s důrazem na užití v GPU
- architekturu GPU založených na CUDA
- programování v C for CUDA
- nástroje a knihovny
- optimalizaci kódu pro GPU
- přechod k OpenCL
- specifika optimalizace pro AMD Evergreen, Southern Islands a Intel/AMD x86
- případové studie

Co od vás budeme vyžadovat

Během semestru budete vypracovávat prakticky orientovaný projekt

- významný podíl na výsledném hodnocení
- jednotné zadání, budeme srovnávat rychlost implementací
- celkem 50 + 30 bodů z výsledné známky
 - funkční kód: 25 bodů
 - efektivní implementace: 25 bodů
 - umístění ve srovnání se spolužáky: 20 bodů (pouze ke zlepšení známky)

Zkouška (ústní či písemná dle počtu studentů)

- 50 bodů

Hodnocení

Zakončení zkouškou

- A: 92-100
- B: 86-91
- C: 78-85
- D: 72-77
- E: 66-71
- F: 0 - 65 bodů

Zakončení kolokviem

- 50 bodů

Materiály – CUDA

CUDA dokumentace (instalována s CUDA Toolkit, ke stažení na *developer.nvidia.com*)

- CUDA C Programming Guide (nejdůležitější vlastnosti CUDA)
- CUDA C Best Practices Guide (detailnější zaměření na optimalizace)
- CUDA Reference Manual (kompletní popis C for CUDA API)
- další užitečné dokumenty (manuál k nvcc, popis PTX jazyka, manuály knihoven, ...)

Série článků CUDA, Supercomputing for the Masses

- <http://www.ddj.com/cpp/207200659>

Materiály – OpenCL

- OpenCL 1.1 Specification
- AMD Accelerated Parallel Processing Programming Guide
- Intel OpenCL SDK Programming Guide
- Writing Optimal OpenCL Code with Intel OpenCL SDK

Materiály – paralelní programování

- Ben-Ari M., Principles of Concurrent and Distributed Programming, 2nd Ed. Addison-Wesley, 2006
- Timothy G. Mattson, Beverly A. Sanders, Berna L. Massingill, Patterns for Parallel Programming, Addison-Wesley, 2004

Motivace – Moorův zákon

Moorův zákon

Počet tranzistorů na jednom čipu se přibližně každých 18 měsíců **zdvojnásobí**.

Motivace – Moorův zákon

Moorův zákon

Počet tranzistorů na jednom čipu se přibližně každých 18 měsíců **zdvojnásobí**.

Adekvátní růst výkonu je zajištěn:

- **dříve** zvyšováním frekvence, instrukčním paralelismem, out-of-order spouštěním instrukcí, vyrovnávacími paměťmi atd.
- **dnes** vektorovými instrukcemi, zmnožováním jader

Motivace – změna paradigmatu

Důsledky Moorova zákona:

- **dříve:** rychlost zpracování programového vlákna procesorem se každých 18 měsíců zdvojnásobí
 - změny ovlivňují především návrh kompilátoru, aplikační programátor se jimi nemusí zabývat
- **dnes:** rychlost zpracování **dostatečného počtu** programových vláken se každých 18 měsíců zdvojnásobí
 - pro využití výkonu dnešních procesorů je zapotřebí paralelizovat algoritmy
 - paralelizace vyžaduje nalezení souběžnosti v řešeném problému, což je (stále) úkol pro programátora, nikoliv kompilátor

Motivace – vektorové procesory

Úlohový paralelismus

- problém je dekomponován na úlohy, které mohou být prováděny souběžně
- úlohy jsou zpravidla komplexnější, mohou provádět různou činnost
- vhodný pro menší počet výkonných jader
- zpravidla častější (a složitější) synchronizace

Datový paralelismus

- souběžnost na úrovni datových struktur
- zpravidla prováděna stejná operace nad mnoha prvky datové struktury
- jemnější paralelismus umožňuje konstrukci jednodušších procesorů

Motivace – vektorové procesory

Z pohledu programátora

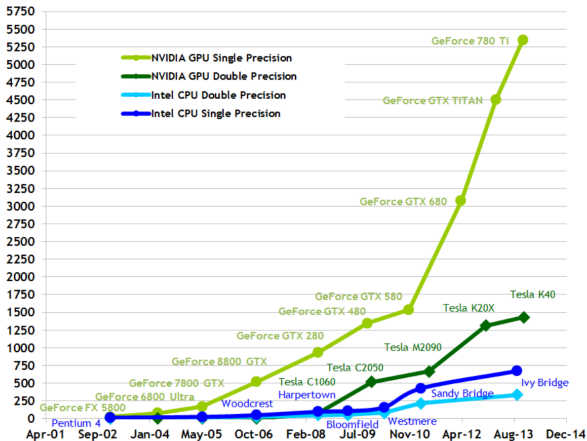
- rozdílné paradigma znamená rozdílný pohled na návrh algoritmů
- některé problémy jsou spíše datově paralelní, některé úlohově

Z pohledu vývojáře hardware

- procesory pro datově paralelní úlohy mohou být **jednodušší**
- při stejném počtu tranzistorů lze dosáhnout **vyššího aritmetického výkonu**
- jednodušší vzory přístupu do paměti umožňují konstrukci HW s **vysohou paměťovou propustností**

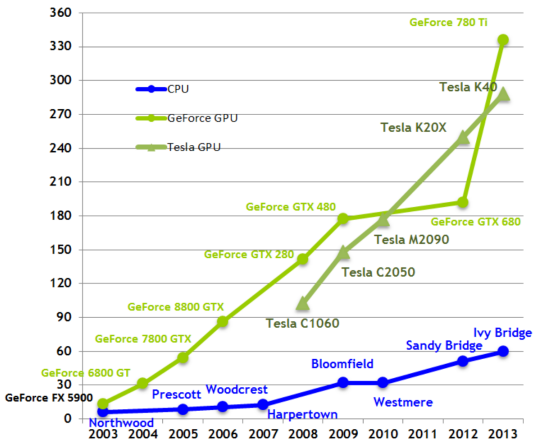
Motivace – výkon GPU

Theoretical GFLOP/s



Motivace – výkon GPU

Theoretical GB/s



Motivace – výkon CPU

Dnešní CPU mají více jader a vektorové instrukce.

Intel Penryn

- 4 jádra, SSE instrukce (128-bitové vektory)
- sekvenční výpočet $16\times$ pomalejší než vektorový vícevláknový

Intel Sandy Bridge

- 8 jader, AVX instrukce (256-bitové vektory)
- sekvenční výpočet až $64\times$ pomalejší než vektorový vícevláknový

Motivace – shrnutí

GPU jsou výkonné

- řádový nárůst výkonu již stojí za studium nového programovacího modelu

Pro plné využití moderních GPU i CPU je třeba programovat paralelně

- desetinásobky rychlosti při plném využití CPU, stonásobky při akceleraci na GPU
- paralelizace pro GPU je obecně podobně náročná jako paralelizace a vektorizace pro CPU

GPU jsou široce rozšířené

- jsou levné
- má smysl akcelarovat i uživatelské aplikace

Motivace – uplatnění

Využití akcelerace je dynamicky se rozvíjející oblast s širokou škálou aplikací

Motivace – uplatnění

Využití akcelerace je dynamicky se rozvíjející oblast s širokou škálou aplikací

- vysoce náročné vědecké výpočty
 - výpočetní chemie
 - fyzikální simulace
 - zpracování obrazu
 - a mnohé další...

Motivace – uplatnění

Využití akcelerace je dynamicky se rozvíjející oblast s širokou škálou aplikací

- vysoce náročné vědecké výpočty
 - výpočetní chemie
 - fyzikální simulace
 - zpracování obrazu
 - a mnohé další...
- výpočetně náročné aplikace pro domácí uživatele
 - kódování a dekódování multimediálních dat
 - herní fyzika
 - úprava obrázků, 3D rendering
 - atd...

Motivace – uplatnění

Vývojáři SW jsou stále ještě nedostatkovým zbožím...

Motivace – uplatnění

Vývojáři SW jsou stále ještě nedostatkovým zbožím...

Vývojáři schopní psát paralelní SW jsou extrémně nedostatkovým zbožím!

Motivace – uplatnění

Vývojáři SW jsou stále ještě nedostatkovým zbožím...

Vývojáři schopní psát paralelní SW jsou extrémně nedostatkovým zbožím!

Obrovské množství existujícího software není paralelní.

- pro zajištění růstu výkonu je jej třeba paralelizovat
- někdo to musí udělat :-)

Historická exkurze

- SIMD model od 60. let
 - projekt Solomon u firmy Westinghouse na začátku 60. let
 - posléze předán na University of Illinois jako ILLIAC IV
 - separátní ALU pro každý datový element – masivně paralelní
 - původní plán: 256 ALUs, 1 GFLOPS
 - dokončen v r. 1972, 64 ALUs, 100–150 MFLOPS
- v 80.–90. letech: běžné vektorové superpočítače, TOP500
- v dnešních CPU: SSE (x86), ActiVec (PowerPC)
- Cg: programování vertex a pixel shaderů na grafických kartách (cca 2003)
- CUDA: obecné programování GPU, SIMT model (uvolněno poprvé 15. února 2007)
- budoucnost??
 - OpenCL
 - vyšší programovací jazyky, automatická paralelizace

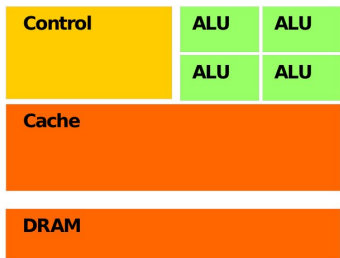
Architektura GPU

CPU vs. GPU

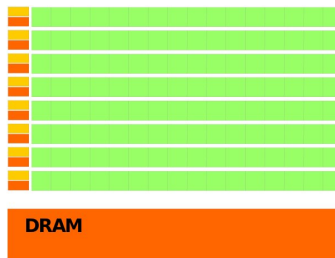
- jednotky jader vs. **desítky multiprocesorů**
- out of order vs. **in order**
- MIMD, SIMD pro krátké vektory vs. **SIMT pro dlouhé vektory**
- velká cache vs. **malá cache, často pouze pro čtení**

GPU používá více tranzistorů pro výpočetní jednotky než pro cache a řízení běhu => vyšší výkon, méně univerzální

Architektura GPU



CPU



GPU

Architektura GPU

V rámci systému:

- koprocesor s dedikovanou pamětí
- asynchronní běh instrukcí
- připojen k systému přes PCI-E

Processor G80

G80

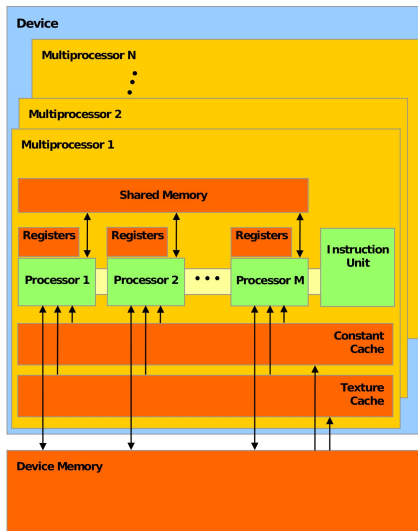
- první CUDA procesor
- obsahuje 16 multiprocessorů
- multiprocessor
 - 8 skalárních procesorů
 - 2 jednotky pro speciální funkce
 - až 768 threadů
 - HW přepínání a plánování threadů
 - thready organizovány po 32 do warpů
 - SIMT
 - nativní synchronizace v rámci multiprocessoru

Paměťový model G80

Paměťový model

- 8192 registrů sdílených mezi všemi thready multiprocesoru
- 16 KB sdílené paměti
 - lokální v rámci multiprocesoru
 - stejně rychlá jako registry (za dodržení určitých podmínek)
- paměť konstant
 - cacheovaná, pouze pro čtení
- paměť pro textury
 - cacheovaná, 2D prostorová lokalita, pouze pro čtení
- globální paměť
 - pro čtení i zápis, necacheovaná
- přenosy mezi systémovou a grafickou pamětí přes PCI-E

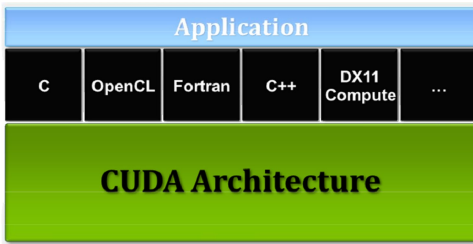
Processor G80



CUDA

CUDA (Compute Unified Device Architecture)

- architektura pro paralelní výpočty vyvinutá firmou NVIDIA
- poskytuje nový programovací model, který umožňuje efektivní implementaci obecných výpočtů na GPU
- je možné použít ji s více programovacími jazyky



C for CUDA

C for CUDA přináší rozšíření jazyka C pro paralelní výpočty

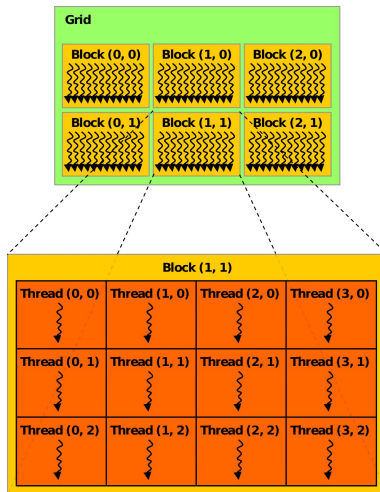
- explicitně oddělen host (CPU) a device (GPU) kód
- hierarchie vláken
- hierarchie pamětí
- synchronizační mechanismy
- API

Hierarchie vláken

Hierarchie vláken

- vlákna jsou organizována do bloků
- bloky tvoří mřížku
- problém je dekomponován na podproblémy, které mohou být prováděny nezávisle paralelně (bloky)
- jednotlivé podproblémy jsou rozděleny do malých částí, které mohou být prováděny kooperativně paralelně (thready)
- dobře škáluje

Hierarchie vláken

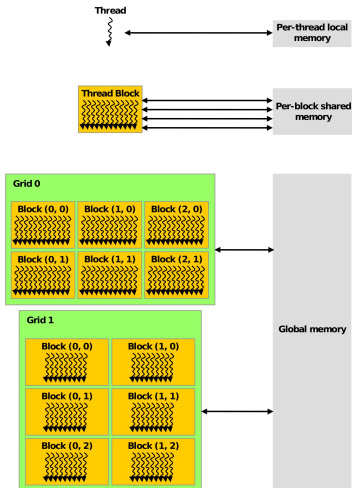


Hierarchie pamětí

Více druhů pamětí

- rozdílná viditelnost
- rozdílný čas života
- rozdílné rychlosti a chování
- přináší dobrou škálovatelnost

Hierarchie paměť



Příklad – součet vektorů

Chceme sečíst vektory a a b a výsledek uložit do vektoru c .

Příklad – součet vektorů

Chceme sečíst vektory a a b a výsledek uložit do vektoru c .
Je třeba najít v problému paralelismus.

Příklad – součet vektorů

Chceme sečíst vektory a a b a výsledek uložit do vektoru c .

Je třeba najít v problému paralelismus.

Sériový součet vektorů:

```
for (int i = 0; i < N; i++)  
    c[i] = a[i] + b[i];
```

Příklad – součet vektorů

Chceme sečíst vektory a a b a výsledek uložit do vektoru c .

Je třeba najít v problému paralelismus.

Sériový součet vektorů:

```
for (int i = 0; i < N; i++)  
    c[i] = a[i] + b[i];
```

Jednotlivé iterace cyklu jsou na sobě nezávislé – lze je paralelizovat, škáluje s velikostí vektoru.

Příklad – součet vektorů

Chceme sečíst vektory a a b a výsledek uložit do vektoru c .

Je třeba najít v problému paralelismus.

Sériový součet vektorů:

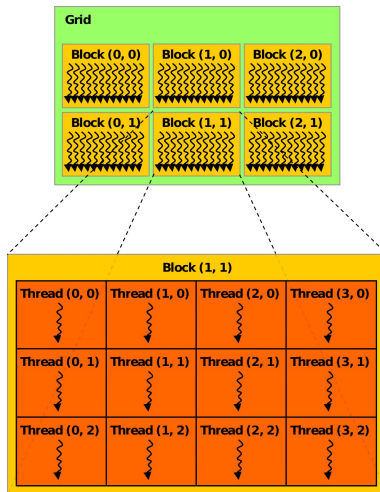
```
for (int i = 0; i < N; i++)  
    c[i] = a[i] + b[i];
```

Jednotlivé iterace cyklu jsou na sobě nezávislé – lze je paralelizovat, škáluje s velikostí vektoru.
 i -tý thread sečte i -té složky vektorů:

```
c[i] = a[i] + b[i];
```

Jak zjistíme, kolikátý jsme thread?

Hierarchie vláken



Identifikace vlákna a bloku

C for CUDA obsahuje zabudované proměnné:

- **threadIdx.**{x, y, z} udává pozici threadu v rámci bloku
- **blockDim.**{x, y, z} udává velikost bloku
- **blockIdx.**{x, y, z} udává pozici bloku v rámci mřížky (z je vždy 1)
- **gridDim.**{x, y, z} udává velikost mřížky (z je vždy 1)

Příklad – součet vektorů

Vypočítáme tedy globální pozici threadu (mřížka i bloky jsou jednorozměrné):

Příklad – součet vektorů

Vypočítáme tedy globální pozici threadu (mřížka i bloky jsou jednorozměrné):

```
int i = blockIdx.x*blockDim.x + threadIdx.x;
```

Příklad – součet vektorů

Vypočítáme tedy globální pozici threadu (mřížka i bloky jsou jednorozměrné):

```
int i = blockIdx.x*blockDim.x + threadIdx.x;
```

Celá funkce pro paralelní součet vektorů:

```
__global__ void addvec(float *a, float *b, float *c){  
    int i = blockIdx.x*blockDim.x + threadIdx.x;  
    c[i] = a[i] + b[i];  
}
```


Příklad – součet vektorů

Vypočítáme tedy globální pozici threadu (mřížka i bloky jsou jednorozměrné):

```
int i = blockIdx.x*blockDim.x + threadIdx.x;
```

Celá funkce pro paralelní součet vektorů:

```
__global__ void addvec(float *a, float *b, float *c){  
    int i = blockIdx.x*blockDim.x + threadIdx.x;  
    c[i] = a[i] + b[i];  
}
```

Funkce definuje tzv. kernel, při volání určíme, kolik threadů a v jakém uspořádání bude spuštěno.

Kvantifikátory typů funkcí

Syntaxe C je rozšířena o kvantifikátory, určující, kde se bude kód provádět a odkud půjde volat:

- **__device__** funkce je spouštěna na device (GPU), lze volat jen z device kódu
- **__global__** funkce je spouštěna na device, lze volat jen z host (CPU) kódu
- **__host__** funkce je spouštěna na host, lze ji volat jen z host
- kvantifikátory **__host__** a **__device__** lze kombinovat, funkce je pak kompilována pro obojí

Ke kompletnímu výpočtu je třeba:

Ke kompletnímu výpočtu je třeba:

- alokovat paměť pro vektory, naplnit je daty

Ke kompletnímu výpočtu je třeba:

- alokovat paměť pro vektory, naplnit je daty
- *alokovat paměť na GPU*

Ke kompletnímu výpočtu je třeba:

- alokovat paměť pro vektory, naplnit je daty
- *alokovat paměť na GPU*
- *zkopírovat vektory a a b na GPU*

Ke kompletnímu výpočtu je třeba:

- alokovat paměť pro vektory, naplnit je daty
- *alokovat paměť na GPU*
- *zkopírovat vektory a a b na GPU*
- **spočítat vektorový součet na GPU**

Ke kompletnímu výpočtu je třeba:

- alokovat paměť pro vektory, naplnit je daty
- *alokovat paměť na GPU*
- *zkopírovat vektory a a b na GPU*
- **spočítat vektorový součet na GPU**
- *uložit výsledek z GPU paměti do c*

Ke kompletnímu výpočtu je třeba:

- alokovat paměť pro vektory, naplnit je daty
- *alokovat paměť na GPU*
- *zkopírovat vektory a a b na GPU*
- **spočítat vektorový součet na GPU**
- *uložit výsledek z GPU paměti do c*
- použít výsledek v c :-)

Při použití managed memory (od compute capability 3.0, CUDA 6.0) není třeba explicitně provádět kroky psané kurzívou.

Příklad – součet vektorů

CPU kód naplní a a b , vypíše c :

```
#include <stdio.h>
#define N 64
int main(){
    float *a, *b, *c;
    cudaMallocManaged(&a, N*sizeof(*a));
    cudaMallocManaged(&b, N*sizeof(*b));
    cudaMallocManaged(&c, N*sizeof(*c));

    for (int i = 0; i < N; i++)
        a[i] = i; b[i] = i*2;

    // zde bude kód provádějící výpočet na GPU

    for (int i = 0; i < N; i++)
        printf("%f, ", c[i]);

    cudaFree(a); cudaFree(b); cudaFree(c);

    return 0;
}
```

Správa GPU paměti

Použili jsme managed paměť, CUDA se automaticky stará o přesuny mezi CPU a GPU.

- koherence je automaticky zajištěna
- k paměti nelze přistupovat, pokud běží CUDA kernel (i když ji nepoužívá)

Lze použít také explicitní alokaci:

```
cudaMalloc(void** devPtr, size_t count);  
cudaFree(void* devPtr);  
cudaMemcpy(void* dst, const void* src, size_t count,  
           enum cudaMemcpyKind kind);
```

Příklad – součet vektorů

Spuštění kernelu:

- kernel voláme jako funkci, mezi její jméno a argumenty vkládáme do trojitých špičatých závorek velikost mřížky a bloku
- potřebujeme znát velikost bloků a jejich počet
- použijeme 1D blok i mřížku, blok bude pevné velikosti
- velikost mřížky vypočteme tak, aby byl vyřešen celý problém násobení vektorů

Pro vektory velikosti dělitelné 32:

```
#define BLOCK 32
addvec<<<N/BLOCK, BLOCK>>>(d_a, d_b, d_c);
cudaDeviceSynchronize();
```

Synchronizace za voláním kernelu zajistí, že výpis hodnoty v c bude proveden až po dokončení kernelu.

Příklad – součet vektorů

Jak řešit problém pro obecnou velikost vektoru?

Upravíme kód kernelu:

```
__global__ void addvec(float *a, float *b, float *c, int n){
    int i = blockIdx.x*blockDim.x + threadIdx.x;
    if (i < n) c[i] = a[i] + b[i];
}
```

A zavoláme kernel s dostatečným počtem vláken:

```
addvec<<<N/BLOCK + 1, BLOCK>>>(d_a, d_b, d_c, N);
```

Příklad – spuštění

Nyní už zbývá jen kompilace :-).

```
nvcc -o vecadd vecadd.cu
```

Kde s CUDA pracovat?

- ke vzdálenému připojení: airacuda.fi.muni.cz, snad i kudu.cerit-sc.cz, účty budou vytvořeny
- vlastní stroj: stáhněte a nainstalujte CUDA toolkit a SDK z developer.nvidia.com

Dnes jsme si ukázali

- k čemu je dobré znát CUDA
- v čem jsou GPU jiná
- základy programování v C for CUDA

Dnes jsme si ukázali

- k čemu je dobré znát CUDA
- v čem jsou GPU jiná
- základy programování v C for CUDA

Příště se zaměříme na

- podrobnější seznámení s GPU z hardwarevého hlediska
- paralelismus, který nám GPU poskytuje
- paměti dostupné pro GPU
- ukážeme si složitější příklad GPU implementace

Dnes jsme si ukázali

- k čemu je dobré znát CUDA
- v čem jsou GPU jiná
- základy programování v C for CUDA

Příště se zaměříme na

- podrobnější seznámení s GPU z hardwarevého hlediska
- paralelismus, který nám GPU poskytuje
- paměti dostupné pro GPU
- ukážeme si složitější příklad GPU implementace

K samostatné práci

- zkuste si přeložit první CUDA program
- máte-li chuť, experimentujte s ním!