



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Villamosmérnöki és Informatikai Kar

Szélessávú Hírközlés és Villamosságtan Tanszék

# Poros plazma kísérletek támogatása multiprocesszoros környezetben

DIPLOMA

*Készítette*

Bakró Nagy István

*Konzulens*

Hartmann Péter

Reichardt András

2014. december 9.

# Tartalomjegyzék

<b>Feladatkiírás</b>	<b>v</b>
<b>Kivonat</b>	<b>vii</b>
<b>Abstract</b>	<b>ix</b>
<b>1. A poros plazma kísérlet</b>	<b>1</b>
1.1. A kísérlet . . . . .	2
1.2. A mérendő mennyiségek és a származtatott értékek . . . . .	4
<b>2. A részecskék detektálása</b>	<b>7</b>
2.1. Detektálási módszerek . . . . .	7
2.1.1. Küszöb módszer . . . . .	7
2.1.2. Küszöb módszer szűréssel . . . . .	7
2.1.3. Adaptív küszöb módszer szűréssel . . . . .	8
2.2. A részecskék pozíciójának számítása . . . . .	8
<b>3. A multiprocesszoros OpenCL környezet</b>	<b>13</b>
3.1. OpenCL architektúrája . . . . .	13
3.2. OpenCL programozási modell . . . . .	14
3.3. Futási környezet bemutatása . . . . .	16
<b>4. A host program bemutatása</b>	<b>19</b>
4.1. A host program párhuzamos felépítése . . . . .	19
4.2. main (producer) szál . . . . .	21
4.2.1. Inicializálás . . . . .	21
4.2.2. Kamera adatfolyamának fogadása . . . . .	21
4.3. Producer szál . . . . .	21
4.3.1. OpenCL inicializálás . . . . .	21
4.3.2. Kép feldolgozása . . . . .	21
4.4. Consumer szál . . . . .	21
4.4.1. OpenGL inicializáció . . . . .	21
4.4.2. OpenGL callback függvény . . . . .	21
<b>5. A kernel programok lépéseinek bemutatása</b>	<b>23</b>

5.1. Medián szűrés . . . . .	23
5.2. Átlagolás . . . . .	23
5.3. Detektálás . . . . .	24
<b>6. Összehasonlítás</b>	<b>25</b>
<b>7. Összegzés</b>	<b>27</b>
<b>A. Fejlesztőkörnyezet összeállítása</b>	<b>I</b>
<b>Ábrák jegyzéke</b>	<b>V</b>
<b>Táblázatok jegyzéke</b>	<b>VII</b>
<b>Irodalomjegyzék</b>	<b>X</b>

## HALLGATÓI NYILATKOZAT

Alulírott *Bakró Nagy István*, szigorló hallgató kijelentem, hogy ezt a diplomatervet meg nem engedett segítség nélkül, saját magam készítettem, csak a megadott forrásokat (szakirodalom, eszközök stb.) használtam fel. Minden olyan részt, melyet szó szerint, vagy azonos értelemben, de átfogalmazva más forrásból átvettem, egyértelműen, a forrás megadásával megjelöltem.

Hozzájárulok, hogy a jelen munkám alapadatait (szerző(k), cím, angol és magyar nyelvű tartalmi kivonat, készítés éve, konzulens(ek) neve) a BME VIK nyilvánosan hozzáférhető elektronikus formában, a munka teljes szövegét pedig az egyetem belső hálózatán keresztül (vagy autentikált felhasználók számára) közzétegye. Kijelentem, hogy a benyújtott munka és annak elektronikus verziója megegyezik. Dékáni engedéllyel titkosított diplomatervek esetén a dolgozat szövege csak 3 év eltelte után válik hozzáférhetővé.

Budapest, 2014. december 9.

---

*Bakró Nagy István*  
hallgató



# Feladatkiírás

A modern alacsony hőmérsékletű plazmafizikai kísérletek egy új, érdekes és izgalmas területe a poros plazmák kutatása. Egy elektromos gázkisülésbe helyezett apró (mikrométer méretű) szilárd szemcse a kisülési plazma atomi részecskéivel kölcsönhatva elektromosan feltöltődik. A sok töltött szemcséből kialakuló elrendezésben a szilárdtestfizikai jelenségek széles spektruma figyelhető meg, pl. kristályrács kialakulása, fázisátalakulás, diszlokációk dinamikája, transzport folyamatok, stb. Poros plazmákat jelenleg leginkább alapkutatásokban alkalmaznak, de jelentőségük az elektronikai gyártásban, fúziós reaktorok üzemeltetésében, Terahertz technológiában egyre inkább előtérbe kerül.

A kísérleti adatgyűjtés és feldolgozás nagyrésze részecske-követő velocimetrián (particle tracking velocimetry) alapul, vagyis első lépésben egy nagysebességű kamera segítségével nagyfelbontású képek készülnek, amely képek segítségével a porszemcsék pontos (a kamera felbontásánál pontosabb) koordinátáit kell meghatározni. A képek elemzése ezidáig csak a mérést követően, hosszú idő alatt volt megvalósítható a vizsgálandó nagy adatmennyiség miatt. A multiprocesszoros környezetek segítségével a feldolgozás gyorsítása lehetséges akár több nagyságrenddel is.

A jelölt feladata, hogy a meglévő kísérleti elrendezés, amely az MTA Wigner Fizikai Kutatóközpont Szilárdtestfizikai és Optikai Intézetben található, kiegészítésével a mérés közbeni feldolgozással a mérést segítő analízist hajtson végre. Ennek eredményével a mérés előkészítése és elvégzése lényegesen gyorsulhatnak.

## A jelölt feladata

- Mutassa be a mérési elrendezést és elemezze a kapott adatokat! (Mutassa be a mérést!)
- Elemezze a lehetséges multiprocesszoros környezeteket, a feladat szempontjából lényeges paraméterek és feladatvégrehajtási elvárások szempontjából!
- Készítsen programot, amely az azonnali (valós idejű) analízisben résztvevő paramétereket számítja ki, a multiprocesszoros környezet kihasználása nélkül!
- Készítsen programot, amely a mérési környezetbe illeszkedve a mérésnél valós időben képes a vizsgált paraméterek megjelenítésére! Mutassa be és elemezze az elkészített programot!
- Hasonlítsa össze a multiprocesszoros és a nem-multiprocesszoros környezetre elkészített programokat erőforrás igény illetve egyéb paraméterek szempontjából!

**Irodalom:**

- [1] Hartmann P, et. al. ; “Crystallization Dynamics of a Single Layer Complex Plasma”; Phys. Rev. Lett., 105 (2010) 115004
- [2] Hartmann P, et. al. ; “Magnetoplasmons in Rotating Dusty Plasmas”, Phys. Rev. Lett. 111, 155002 (2013)
- [3] Hartmann P, Donkó I, Donkó Z; “Single exposure three-dimensional imaging of dusty plasma clusters”; Rev. Sci. Instrum., 84 (2013) 023501/1-5;

**Tanszéki konzulens:** Reichardt András, egy. tanársegéd

**Külső konzulens:** Hartmann Péter, PhD., tud. főmunkatárs (MTA Wigner FK, SZFKI)

Budapest, 2014.03.10.

# Kivonat

hablaty





# Abstract

what? what? in the butt

## 1. fejezet

# A poros plazma kísérlet

A poros plazma kísérlet ionizált nemesgáz és az abba szórt porrészecskék megfigyeléséből áll. Adott alacsony nyomású gáz terében elhelyezett elektródákra kapcsolt váltakozó feszültséggel lehetséges plazmát létrehozni. A váltakozó villamos tér a töltéssel rendelkező elektronokra olyan erővel hat, hogy azok leszakadnak az atomról ezzel ionizálva azokat. A leszakadó elektronok a térben szabadon a ráható erőknek megfelelően mozognak. Ez makroszkópikus skálán a gáz vezetővé válását jelenti. A szabad elektronok mozgásának során az ionizált atomokon szóródnak, ami ködfénykisüléshez vezet.

A kísérlet során az előbb ismertett plazma terébe porrészecskéket szórunk. A porrészecskék alatt  $10\text{nm} - 100\mu\text{m}$  nagyságú részecskéket értünk, például  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  vagy melamine-formaldehide-t. A porrészecskék a plazmával interakcióba lépve negatívan fel-töltődnek. A porrészecskék töltésének és tömegének hányadosa a szabad elektronokhoz és az ionokhoz képest sokkal kisebb, ezáltal a mozgására való hatása elhanyagolható.

A porrészecskék transzportjának megértéséhez szükséges a ráható erők azonosítása. A különféle erők nagysága a porrészecskék nagyságától különféleképpen skálázódik. Elhanyagolásokat ennek megfelelően tehetünk.

**Gravitációs  $F_g$  erő:** Mikrogravitációban végzett kísérletek és nanométer nagyságú részecskék esetén elhanyagolhatóak, de a jelen esetben használt mikrométer nagyságú részecskék esetén dominánsak,

**Villamos tér keltette  $F_e$  erő:** A porrészecske töltésével és a villamos tér nagyságával arányos. A megfelelően irányított villamos térrel lehetséges a részecskék levitációja,

**Háttératomon való szóródás  $F_n$ :** A porrészecske driftje során a háttératomokkal való szóródásának makroszkópikus erőként való számításba vétele,

**Hőmérséklet gradiensi  $F_{th}$  erő:** A gáz hőmérsékletének gradiense okozta gázatomok diffúzív jellegű mozgása által okozott indirekt erőhatás,

**Ion sodrási  $F_i$  erő:** Az ionokra ható villamos tér okozta erőnek indirekt hatása a porrészecskékre.

A poros plazma analízise során fontos szerepet játszik a porrészecskék csatolása. A csatolást gyengének és erősnek kategorizáljuk aszerint, hogy a részecskék szomszédja általi

átlagos potenciális energia az átlagos termikus (kinetikus) energiájához képest kisebb vagy nagyobb. A csatolást a Coulomb csatolási paraméterrel ( $\Gamma$ ) lehet számosítani, ami a szomszédos részecskék Coulomb potenciáljának és termikus energiájának hatványa:

$$\Gamma = \frac{Q^2/4\pi\epsilon_0 d}{kT_d} \quad (1.1)$$

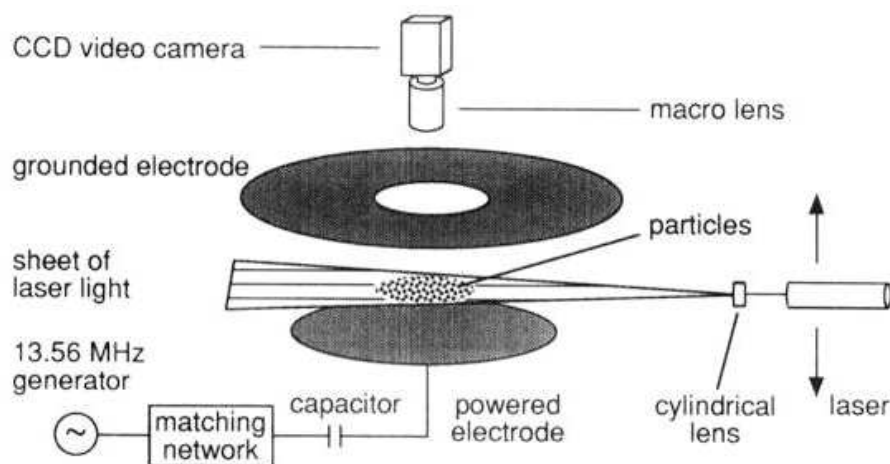
ahol  $Q$  a részecskék töltése,  $d$  az átlagos részecske távolság és a  $T_d$  a por hőmérséklete. Ha a  $\Gamma$  értéke egy kritikus érték fölé  $\Gamma > 150$  növekszik, akkor Ikawa jóslata szerint a porrészecskék Coulomb kristályszerkezetbe rendeződik.

Az iparban anyag porlasztására és mintázat maratására használják. Továbbá szennyeződés-ként a VLSI áramkörök gyártásakor jelentkezik, ami a kihozatal csökkenését és a teljesítmény csökkenéséhez vezet. Laboratóriumi környezetben kristály halmazállapot változását, viszkozitását lehet kutatni.

## 1.1. A kísérlet

A kísérlet lebonyolítására egy speciális kamrára van szükség, amiben lehetséges a plazma létrehozása, a porrészecskék szórása illetve a megfelelő villamos tér létrehozása. A kamrának hermetikusan jól zártnak kell lennie, hogy csak a kívánt gázt tartalmazza. A közép-vákuumú működéshez kétlépéses vákuumszivattyút kell alkalmazni.

A kamra sematikus ábrája a 1.1. ábrán látható. A porrészecskék levitációjáért a villamos tér felelős. A síkba való zárás parabolikus potenciállal lehetséges. Az ilyen tér létrehozása a következő elektróda elrendezéssel lehetséges: alul elhelyezett korong alakú elektróda, ami felett egy gyűrű alakú elektróda helyezkedik el. Az ilyen elektródarendszerre kapcsolt váltakozó feszültség a beszórt porrészecskéket lebegtetni tudja. Továbbá a részecskék követéséhez azokat lézerrel megvilágítjuk és nagysebességű kamerával felvételt készítünk róla.



1.1. ábra. A mérési elrendezés sematikus ábrája (forrás: [4])

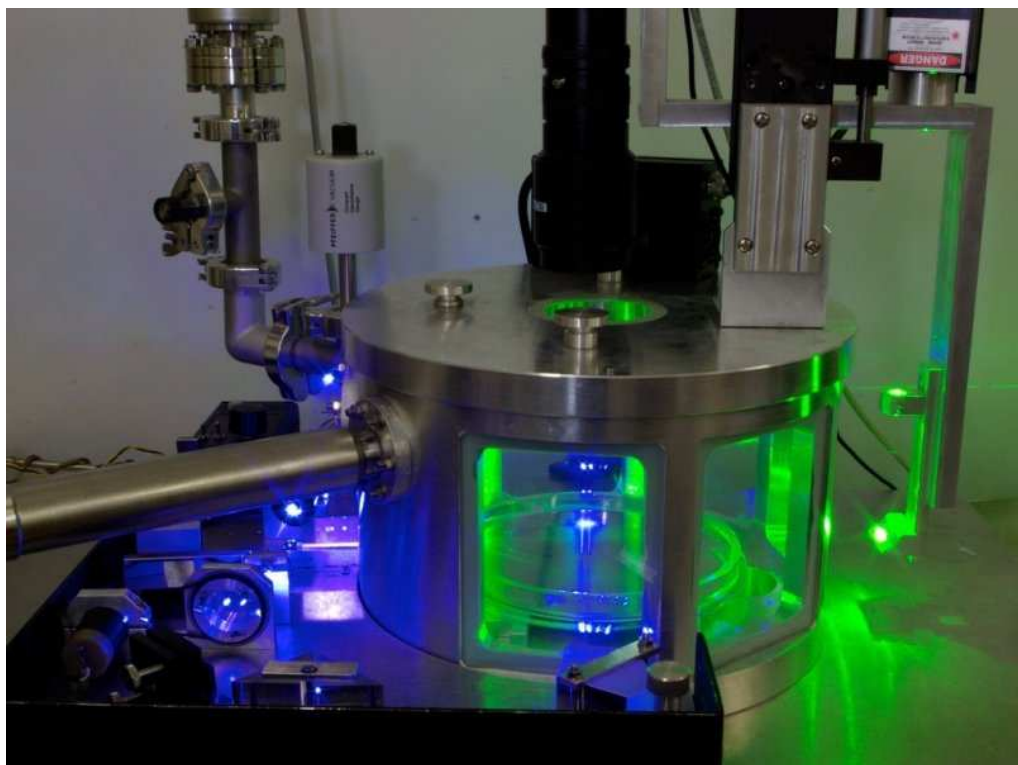
A kamrát (1.2. ábra) Hartmann Péter külső konzulensem építette és a MTA Wigner

FK SZFI Gázkisülési Laboratóriumában található.

A paraméterei:

- Kamra belső átmérője:  $25cm$
- Kamra belső magassága:  $18cm$
- Alsó elektróda átmérője:  $18cm$
- Felső gyűrű elektróda belső átmérője:  $15cm$
- Felső elektróda távolsága az alsótól:  $13cm$
- Argon gáz nyomása:  $1.2 \pm 0.05 Pa$
- Gáz átfolyása:  $\sim 0.01 CPM$
- RF gerjesztés:  $7W @ 13.56MHz$
- Porrészecske: melamine-formaldehyde
- Porrészecske átmérője:  $4.38 \pm 0.06 \mu m$
- Porrészecske tömege:  $6.64 \cdot 10^{-14} kg$
- Látható porrészecskék száma:  $\sim 2500$
- Megvilágító lézer:  $200mW @ 532nm$
- Kamera:  $1.4MPixel @ 100FPS$

A kamra alsó elektródáját lehetséges egy motorral forgásba hozni. Az elektróda felületének érdessége által a kamrában lévő gáz is forgásba jön. A gáz forgása az  $F_i$  ionsodrási erővel hat a porrészecskékre. A forgó rendszert nagy mágneses tér Lorentz erejének feleltethető meg.



**1.2. ábra.** A konkrét kamra működése közben

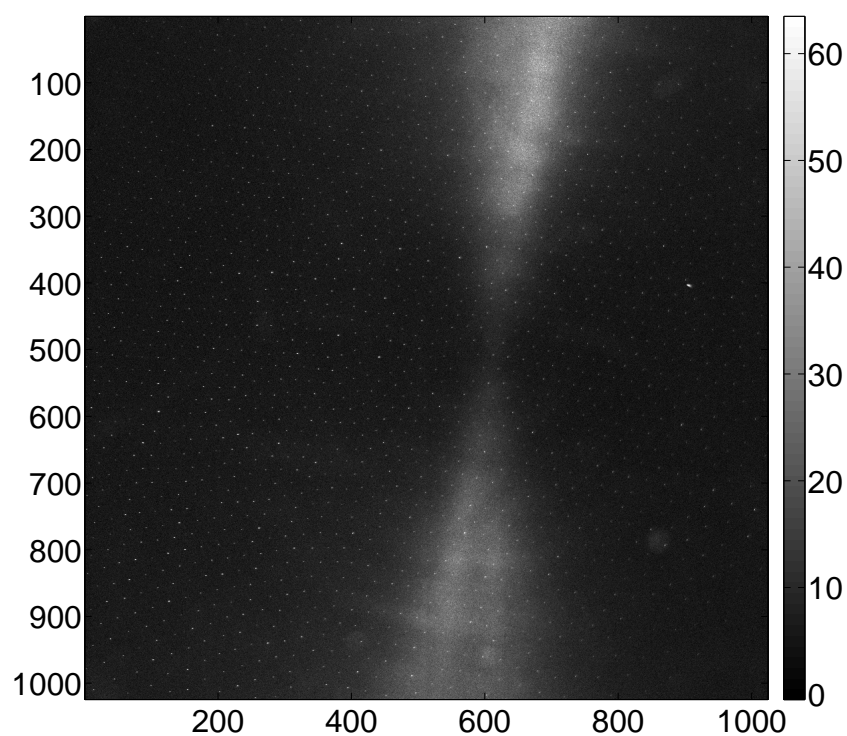
## 1.2. A mérendő mennyiségek és a származtatott értékek

A kísérlet előkészítése a következő lépésekből áll:

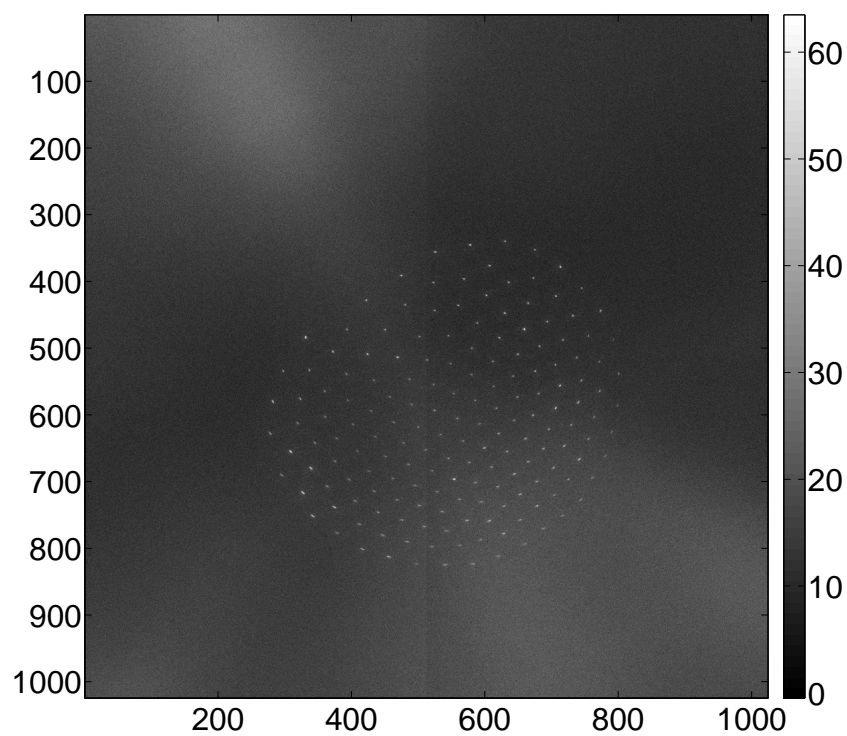
1. Elővákuum szivattyú bekapcsolása,
2. Középvákuum szivattyú bekapcsolása,
3. Argon palack megnyitása a megfelelő áramlás szintjére,
4. RF gerjesztés bekapcsolása,
5. Megvilágító lézer bekapcsolása,
6. Porrészecskék beszórása,
7. Kamera bekapcsolása és a megjelenítő szoftver futtatása,
8. Ha sok összetapadt porrészecske látható, illetve ha túl sok porrészecske látható, akkor az RF gerjesztés gyors ki-be kapcsolása után a 6.-tól való folytatása a folyamatnak.

A 1.3. ábrán látható álló és forgó alsó elektródájú kísérlet során a porrészecskékről készült kép.

A fényképek alapján a részecskék pozíciójára és időbeli eloszlására vagyunk kíváncsiak. A kamera objektíve által leképezett kép a függőleges irányú pozíciót nem tartalmazza. Mivel jelen kísérletek során az ezirányú mozgása a részecskéknek nem számottevő, így az  $x - y$  pozícióját jól lehet számítani a kép alapján. Nagy pontosság esetén szükséges a képek előzetes feldolgozása a perspektivikus torzítás kiküszöbölése végett. Természetesen ez lehetséges a pozíciók számítása után is, aminek a számításigénye kisebb is.



(a) Álló elektróda esetén sok ( $\sim 1500$ ) részecske



(b) Forgó elektróda esetén kevés ( $\sim 100$ ) részecske

**1.3. ábra.** Két különböző kísérlet során készült fénykép.





## 2. fejezet

# A részecskék detektálása

### 2.1. Detektálási módszerek

A korábban látható 1.3. ábrán látható ábrákhoz hasonló képekről kell a részecskéket felismerni és azoknak a koordinátáit exportálni. Erre több lehetőség adódik, amit a [5] részletez. A detektáló módszereket a számítás igényeiknek növekvő sorrendjében mutatom be.

#### 2.1.1. Küszöb módszer

Legkézenfekvőbb módszer, hogy a kép pixeleinek világosságát összehasonlítjuk egy küszöb értékkel és ha az nagyobb ennél, akkor ezeket megjelöljük, mivel ott részecskét feltételezünk. A módszer egyenletes háttér-világosság esetén jól működik és extra gyorsan számítható.

#### 2.1.2. Küszöb módszer szűréssel

A háttér világossága a 1.3a. ábrán jól láthatóan nem egyenletes. A korábban említett egyszerű küszöb módszer itt nem alkalmazható, mivel a világos és sötét területek más és más küszöbértéket kívánnának meg. A megoldása erre, mint megannyi villamosmérnöki mérési feladatra, hogy a jel helyett a differenciális jelet mérjük/számítjuk. Jelen esetben ez azt jelenti, hogy először előállítjuk a részecske nélküli háttérképét, majd a méréssel kapott képből kivonva ezt a differenciális képet megkapjuk. A differenciális képen a részecskéket a korábban említett küszöb módszerrel lehet detektálni a részecskéket.

Ehhez csupán a mérési képből kell szűréssel származtatni a háttérképet azaz eliminálni a részecskéket. A [5, 6] cikkekben és általában is erre véges Gauss szűrőt használnak, ami egy lineáris véges impulzusválaszú (FIR) aluláteresztő szűrő. A szűrés egy adott pixel környezetének súlyozott átlagolását jelenti. A súlyozás során szoroznunk kell, ami a bináris megvalósítás végett jóval lassabban történik, mint az összeadás avagy az összehasonlítás.

Mivel a részecskék mérete a képen véges és kis szórású, így a korábban említett FIR Gauss szűrő aránylag jól tudja a részecskéket eliminálni. Viszont a mérési képek 100 FPS sebességgel és  $1024 \times 1024$  mérettel érkeznek be. Ez 100 MByte/s adatfolyamot jelent. Ahhoz, hogy ezt közel real-time feltudjuk dolgozni a Gauss szűrés nem járható út. Hatékonyabb szűrőre van szükségünk! A megoldást a medián szűrőben látom, ami egy nemlineáris, de véges „impulzusválaszú” szűrő. A szűrő az adott pixel környezetének mediánjának szá-

mítását jelenti. A nemlinearitás jelen esetben nem okoz gondot, mivel csak detektálásra használjuk (a pozíció kinyerése az eredeti kép alapján készül, de ez később részletezve lesz.)

A Gauss szűrő  $N = n \times n$  környezet (ablak) esetén  $N^2$  szorzást és  $N^2 - 1$  összeadást jelent. Míg a medián szűrő  $N = n \times n$  ablak esetén: bubborék rendezés során  $O(N^2)$ , javított bubborék rendezés során  $O(N^2/2)$ , quicksort esetén  $O(N \log N)$  illetve kiválasztásos rendezés esetén  $O(N)$  összehasonlítást és cserét. Az összehasonlítás és a csere nagyságrendekkel gyorsabban végrehajtható, mint a szorzás és összeadás. A kedvező lépésszám és helybeli rendezés lehetősége végett a kiválasztásos rendezést választottam.

### 2.1.3. Adaptív küszöb módszer szűréssel

Látható a 1.3a. ábrán, hogy a sötétebb háttér kiterjedése nagyobb, ennek megfelelően az kamera expozíció szabályozója ezekre a területekre állítja be az expozíciót. Így a sötét területek részletesebbek, míg a világos területek részletszegények (túlexponáltak) lesznek. Számunkra ez azt jelenti, hogy a sötétebb területeken jobban megbízhatunk a részecskék kiugró értékében, míg a világosabb területeknél nem. Ezt a döntési küszöb értékének adaptációját jelenti a háttér világosságához. Az adaptív küszöböt a következő kifejezéssel határoztam meg:

$$K = \mathbf{E} \{ P - \hat{MP} \} + \delta \cdot \mathbf{STD} \{ P - \hat{MP} \} \cdot \left[ 1 + a \left( \frac{\hat{MP}}{\max \{ \hat{MP} \} - \min \{ \hat{MP} \}} \right)^b \right] \quad (2.1)$$

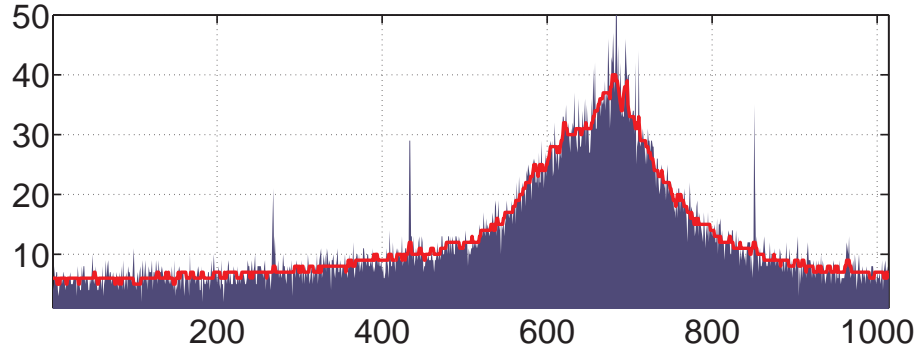
ahol  $P$  az eredeti kép,  $\hat{MP}$  a medián szűrt kép,  $\mathbf{E} \{ \}$ ,  $\mathbf{STD} \{ \}$  az átlag és a szórás számításának függvénye és az  $a, b, \delta$  három alakparaméter. <sup>1</sup>

A 2.1. ábrán látható a detektálási algoritmus működése közben. A 2.1a. ábrán a mérési kép ( $P$ ) látható kitöltött görbével, ami az 1.3a. ábrán látható mérési kép  $x = 40$  sora. Piros görbével látható a medián szűrt jelet ( $\hat{MP}$ ), amin jól érzékelhető a hirtelen változások eliminációja. A következő 2.1b. ábrán az eredeti és a szűrt különbsége azaz a differenciális kép ( $P - \hat{MP}$ ) látható a kék görbével. A zöld görbe a (2.1) szerinti döntési küszöb. Az utolsó 2.2b. ábrán a detektált részecskék figyelhetőek meg.

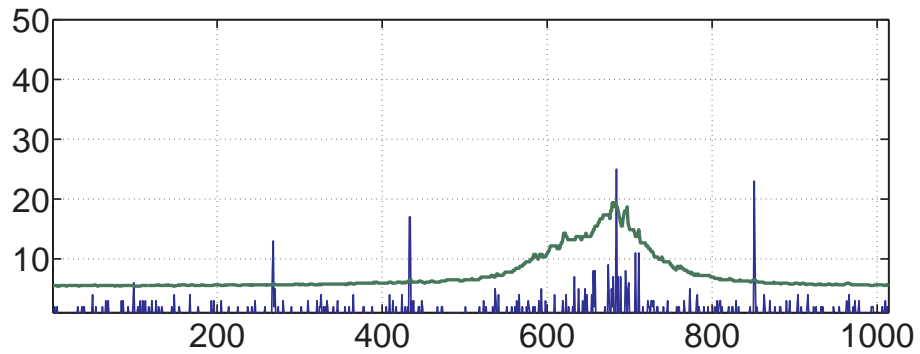
## 2.2. A részecskék pozíciójának számítása

Kis felbontású kamera illetve nagyon kis porrészecskék esetén előállhat, hogy a részecskék csupán egy pixelnyi területet foglalnak el a képen. Detektálás szempontjából ez kedvező viszont a pozíciómérés szempontjából nem, mivel ilyenkor a felbontásunk 1 pixelnyi. Ezen javítani a dithereléssel a következőképpen lehet: picit elállítjuk az élességet úgy, hogy egy részecske több pixel nagyságú „maszat” legyen, majd a korábban részletezett detektálást elvégezzük.

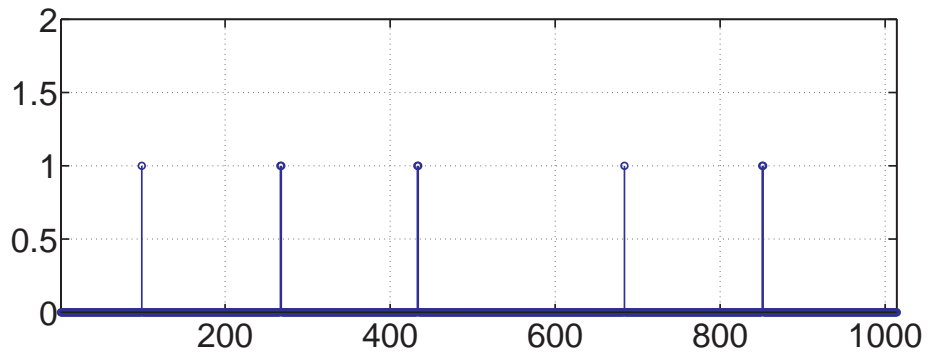
<sup>1</sup>Az adaptív döntést a mérési kép előzetes feldolgozásával is elérhettük volna, ha a Photoshop-ból ismert Curves tool-hoz hasonlóval módosítottunk volna rajta. (A tool a képre egy nemlineáris függvényvel hattat.)



(a) Eredeti (kitöltött) és a medián szűrt (folytonos) jel



(b) A differenciális jel (kék) és a döntési küszöb (zöld)



(c) Detektált részecskék

**2.1. ábra.** A medián szűrést alkalmazó adaptív küszöbvel részecskét detektáló algoritmus bemutatása az álló mérési kép (1.3a. ábra)  $x = 40$  során.

Ennek hatására egy részecske több pixelnyi felületet fog elfoglalni és a detektáló algoritmus is több pixelt fog megjelölni. A pozíció megtalálásához csoportosítani kell a megjelölt pixeleket. Az egy részecskéhez tartozó pixel-csoportot egy téglalap fogja határolni, amit region of interest-el (ROI) szokás illetni. Azonban a részecske detektálása után amorf formájú megjelölt pixeleink lesznek. Ezeket a könnyebb csoportosítás végett kiterjesztem pár pixellel az így kapott pixeleket flood-fill algoritmussal egybefüggővé teszem és ennek eredményeképp megkapom a ROI határoló koordinátáit, amit a következő két módszer felhasznál a részecske pozíciójának számítása során.

## Maximum keresés

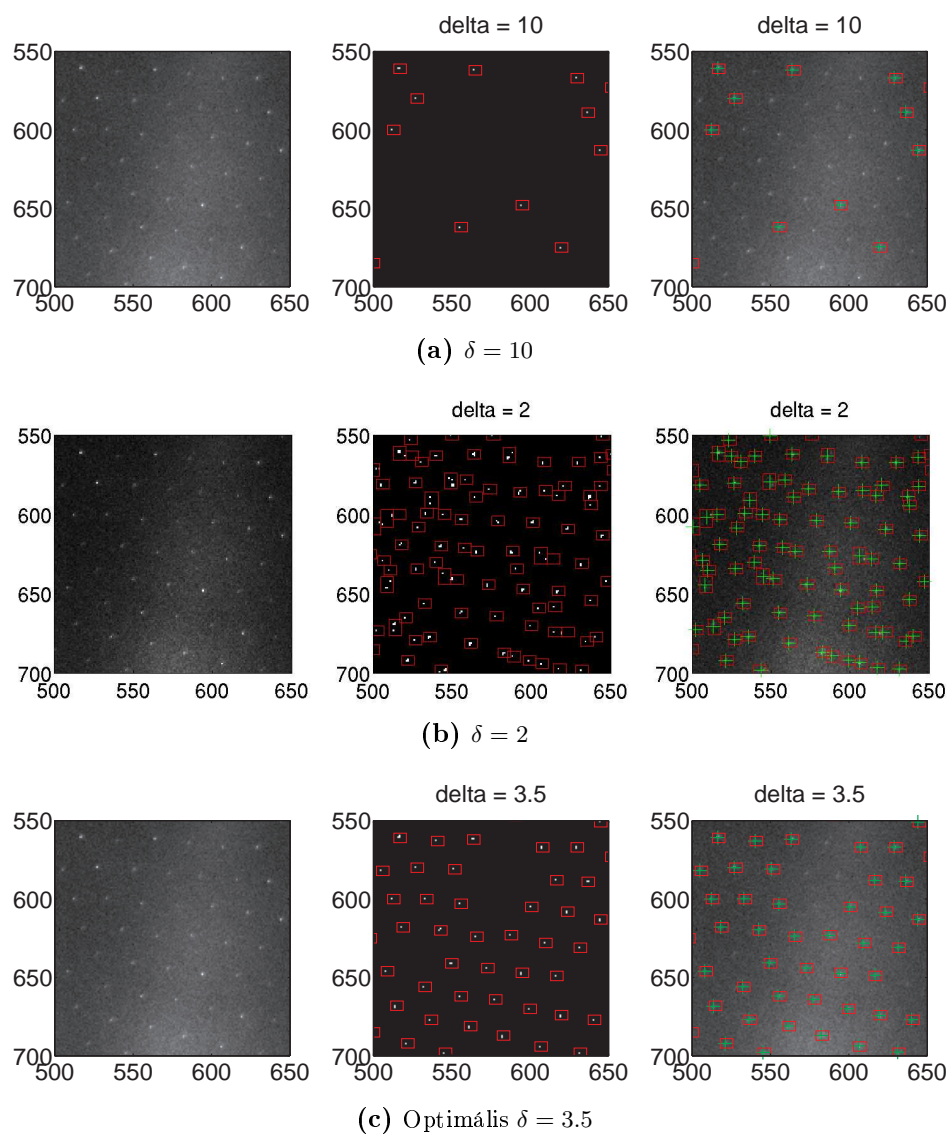
Legegyszerűbb eset, ha a ROI-n belül az eredeti pixelek közül a legvilágosabbat veszem a részecske pozíciójaként.

## Szubpixel felbontás momentum módszerrel

Szofisztikáltabb, ha a ROI-n belül az eredeti pixelek világosságát, mint tömegpont tömegének veszem és a ROI-által határolt test súlypontját megkeresem. A módszerre kritikusan hat az előbb említett kiterjesztés mértéke. Ha túl nagy a kiterjesztés, akkor azzal hibát viszek be pozíció mérésébe, míg ha túl kicsi akkor meg egy részecskének akár két képe/-pozíciója keletkezhet. Továbbá nem érünk el nagyobb pontosságot a maximumkereséshez képest.

Az algoritmus hatékonyságát különböző  $\delta$  érték mellett a következő 2.2. ábrán látható.

Az algoritmus jól párhuzamosítható, ami a nagyteljesítményű multiprocesszoros környezetben kedvező futási időt eredményezhet. A párhuzamos program létrehozásának segítségére az OpenCL keretrendszert választottam, aminek a bemutatása következik.



**2.2. ábra.** Az adaptív küszöb módszerrel detektált részecskék momentum módszerrel számított pozíciója. *Bal oszlopban* az eredeti mérési kép, *középső oszlopban* a detektálás eredménye és a ROI, az *utolsó oszlopban* az eredeti mérési képen a ROI és a detektált részecske pozícióját jelző kereszt.

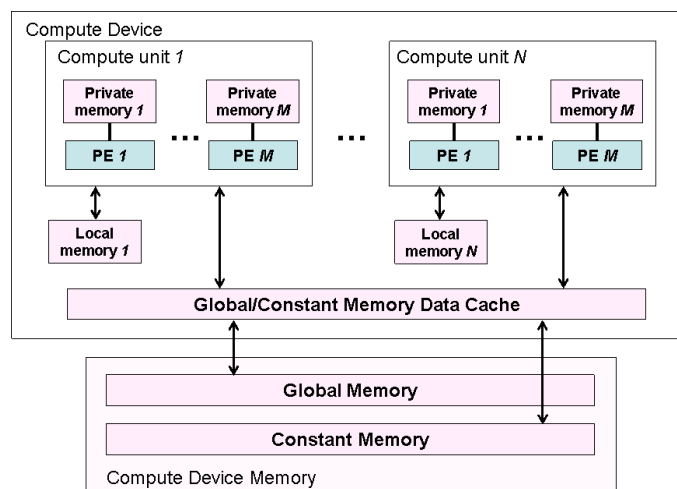


## 3. fejezet

# A multiprocesszoros OpenCL környezet

### 3.1. OpenCL architektúrája

Az Open Computing Language (OpenCL) keretrendszer [7] általános modellt, magas szintű programozási interfészt és hardware absztrakciót nyújt a fejlesztőknek adat- vagy feladat párhuzamos számítások gyorsítására különböző számítógépsímen (CPU, GPU, FPGA, DSP, ...). A hárdevgyártók implementálják az OpenCL szabványt, ami által saját platformot hoznak létre. Egy ilyen platformon belüli eszközök alatt főként GPU-kat, de CPU-kat és FPGA-t ... is értünk. OpenCL keretrendszerben történő programozás során két programot kell írunk. Az egyik a kernel, ami az eszközön futatott szála fog leképeződni. A másik a gazda processzoron (host-on) futó host-program, ami elvégzi az I/O műveleteket, a probléma összeállítását, a memória allokálást, az argumentumok beállítását illetve a kernel meghívását az eszközön. A kernel futása végeztével a host-program kiolvassa az eszközről a kívánt eredményt.



3.1. ábra. OpenCL device architektúra (forrás: [7])

Az eszközök multiprocesszoros architektúrával és ezek kiszolgálására képes memória architektúrával rendelkeznek, amit a 3.1 ábra vázol. Egy eszköz több compute unit-ot

(processzor-magot) tartalmaz. Az OpenCL négy memória szintet különböztet meg, amikre a következőképpen hivatkozik:

- *Regiszterek*: Private memory,
- *Chipen belüli memória (cache)*: Local memory,
- *Chipen kívüli memória*: Global memory és Constant Memory.

A regiszterek és lokális memória kis méretűnek és gyors elérésűnek mondható, míg a globális memória nagy, de lassú elérésűnek. A memóriákra megkötésként szolgál, hogy ki allokalhat, írhat és olvashat belőle. A 3.1. táblázatban látható ezen jogosultságok.

**3.1. táblázat.** *OpenCL memória szintek*

	Global memory	Constant mem.	Local mem.	Private mem.
Host	Dinamikusan R/W	Din. R/W	Din. R/W	
Kernel	R/W	Statikusan R	Statik. R/W	Statik. R/W
Sebesség	Lassú	Gyors	Gyors	Regiszter
Méret	1 Gbyte <	~ 64 Kbyte	~ 16 Kbyte	< 1 Kbyte

Ahhoz, hogy a rendszerben rejlő teljesítményt kihozzuk három fontos kérdést kell a szimulátor magjának implementálásakor megválaszolnunk:

- *Mennyit?* Tisztában kell lennünk az aktuális memória fogyasztással és a szükséges memóriamérettel.
- *Honnan-hova?* Fontos, hogy a lehető legközelebb legyen az adat a processzor-maghoz.
- *Mikor?* Mivel a memória művelet alatt a futtatott kernel nem dolgozik, így átadja a helyét egy másiknak. (Ez Direct Memory Access (DMA) blokk létezése alatt igaz). Ennek a megfelelő szinkronizációjával nagyobb kihasználtság érhető el (load balance).

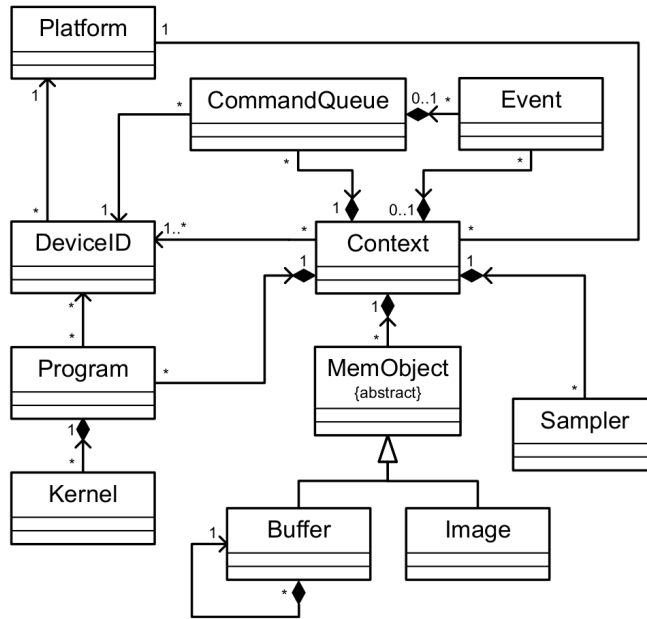
## 3.2. OpenCL programozási modell

A programozási modell középpontjában a kontextus áll, ami az OpenCL osztálydiagramm-ján (3.2. ábra) figyelhető meg. A futtatáshoz szükséges, hogy a kontextushoz platformot, majd azon belül eszközt, az eszközhöz programot (kernelt) és memóriát rendeljünk. Figyelembe kell vennünk azt a megkötést, hogy csak az egy platformon belüli eszközök programozhatóak heterogén módon. Például: Intel platform esetén lehetséges CPU-t, processzorkártyát és Intel-es GPU-t programozni.

A programozással megoldandó problémát kétféleképpen lehetséges a feldolgozó egységekhez (work-item) avagy processzorokhoz rendelni: adat parallel módon vagy taszk parallel módon.

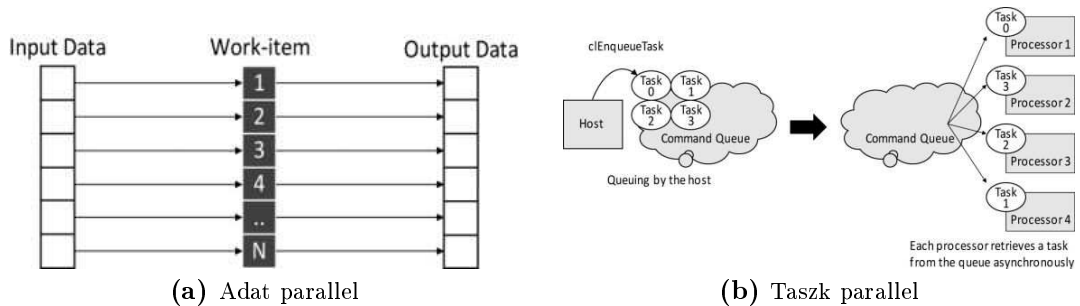
Adat parallel módon (3.3a ábra) a feldolgozandó adat egy részéhez rendelünk egy feldolgozó egységet. Fontos figyelembe venni az eszköz korlátos számú feldolgozó egységének számát. Ha nem elég a feldolgozó egysége akkor a feladat megfelelő partícionálásával lehetséges kordában tartani a szükséges erőforrás számát.





**3.2. ábra.** OpenCL context osztálydiagramja (forrás: [7])

Taszk parallel módot (3.3b ábra) olyan esetben célszerű használni, ha a bemenet dinamikus mérete a futási időben rendkívül változik illetve a végrehajtandó feladat lazán függenek össze.

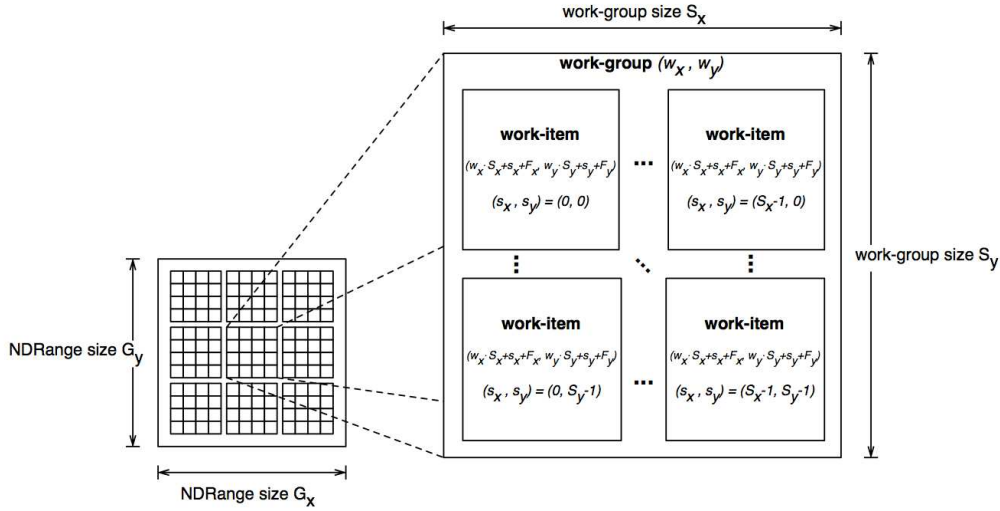


**3.3. ábra.** Feladat hozzárendelése work-item-hez (processzorhoz)

A processzor-magok megfelelő kihasználtságának elérése végett több ezer work-item virtuálisan osztozik rajta. Továbbá ezen work-item-eket work-group-okba rendezzük.

A work-itemeket jelen pillanatban az OpenCL specifikációja [7] szerint 3 dimenziós work-group-ba tudjuk rendezni. Egy példát láthatunk egy work-item indexének a globális és lokális megfelelőjére a következő 3.4. ábrán.

A work-group-okba rendezés a lokális memória jogosultsága miatt érdekes. Konkrétan az egy work-group-ba tartozó összes work-item azonos lokális memórián osztozik. Ennek a következménye az, hogy adat parallel módú feldolgozás esetén az egymásra ható adatokhoz tartozó work-item-eket egy work groupba kell rendelnünk. Ha ez nem lehetséges, akkor a globális memóriához kell fordulnunk. A globális memória avagy a bank szervezésű külső (off-chip) memóriák hozzáférési ideje relatíve nagy így ezek használatát lehetőleg el kell kerülni és a programozónak kell „cachelni” a lokális memóriába.



**3.4. ábra.** 2D-s work-item-ek work-group-ba rendezése és indexelése (forrás: [7])

Mivel a work-item-ek konkurrensen hajtódnak végre, így az általuk közösen elérhető memóriákra (globális, lokális) nézve versenyhelyzetben vannak. Az OpenCL ezt a problémát a laza memóriamodell használatával oldja meg. Az alkalmazott szinkronizáció egy korlátot tesz a programban, amit csak akkor léphet át, ha az összes többi work-item az azonos work-group-ban ezta a korlátot már elérte. Erre a `barrier(FLAG)` függvényhívás szolgál. Fontos megjegyezni, hogy ez a szinkronizáció csak egy adott work-group-on belül történik, a work-group-ok közötti szinkronizációra nincs lehetőség.

Összefoglalva: nagy hangsúlyt kell a memóriaszervezésre fordítani, hogy a processzormagok megfelelően legyenek az adatokkal táplálva.

### 3.3. Futási környezet bemutatása

A következő eszközök teljesítményét vizsgálom:

- A laptopomban található **Intel Core i5 M520** processzor,
- Asztali PC-ben található **Intel Xeon** processzor,
- Asztali PC-ben található **Intel Xeon Phi** co-processor [8, 9],
- Asztali PC-ben található **nVidia GTX 590** videokártya.

Ezen eszközök legjelentősebb paraméterei a 3.2 táblázat tartalmazza.

Az összehasonlíthatóság végett a legkisebb memóriájú eszközre fogom a problémát skálázni. Tehát maximálisan **32Kbyte** lokális memóriát fogok használni. A többi eszköz memóriája nagyobb, így a kód mindegyiken tud futni.

**3.2. táblázat.** *Használandó eszközök összehasonlítása*

	Intel Core i5	Intel Xeon	Xeon PHI	nVidia GTX 590
MAX COMPUTE UNITS	4	8	224	16
MAX CLOCK FREQUENCY	2400	3000	1100	1225
MAX WORK GROUP SIZE	8192	8192	8192	1024
GLOBAL MEM SIZE	$\sim 4Gbyte$	$8Gbyte$	$\sim 4.5Gbyte$	$\sim 1.5Gbyte$
MAX MEM ALLOC SIZE	$\sim 2Gbyte$	$\sim 8Gbyte$	$\sim 1.5Gbyte$	$\sim 0.4Gbyte$
LOCAL MEM SIZE	$32Kbyte$	$32Kbyte$	$32Kbyte$	$48Kbyte$



## 4. fejezet

# A host program bemutatása

A 100 FPS-el érkező képeket az eszköz globális memóriájának méretét figyelembe véve dolgozom fel. A megjelenítésnek nem fontos szigorúan real-time működésűnek lennie (soft real-time), adott fokú késleltetés megengedhető, a határidő elmulasztása nem jár súlyos következménnyel. A program ciklikusan a következő lépéseket hajtja végre:

1. Kép fogadása (gyűjtése) a kamerától GigE porton keresztül (beolvasása a host-memóriába),
2. Képek leküldése a host-memóriájából az eszköz globális memóriájába,
3. Eszközön futtatandó kernelek inicializálása, argumentumainak beállítása,
4. Kernelek futtatása az eszközön:
  - (a) Első kép medián szűrése és az adaptív detektálási szint előállítása,
  - (b) Az első és a fennmaradó képeken detektálás.
5. Kernelek futása után az eredmény az eszköz globális memóriájából a host-memóriájába való visszatöltése,
6. Posztprocesszálás, OpenGL megjelenítés.

A kernel megírása során a korábbi 3. fejezetben említetteket figyelembe kell venni. Főként a véges lokális és globális memóriát és a work-itemek számát. A kernelek adat-parallel módon lett megírva.

### 4.1. A host program párhuzamos felépítése

A korábban kitűzött késleltetéssel rendelkező, de a real-time viselkedésre több tényező rossz hatással van. Ezek a következők:

- A kamera GigE interfészének jittere,
- Operációs rendszer által futtatott további folyamatok,
- Feldolgozó (szűrő és detektáló) algoritmus futási idejének (ET = execution time) változatossága.

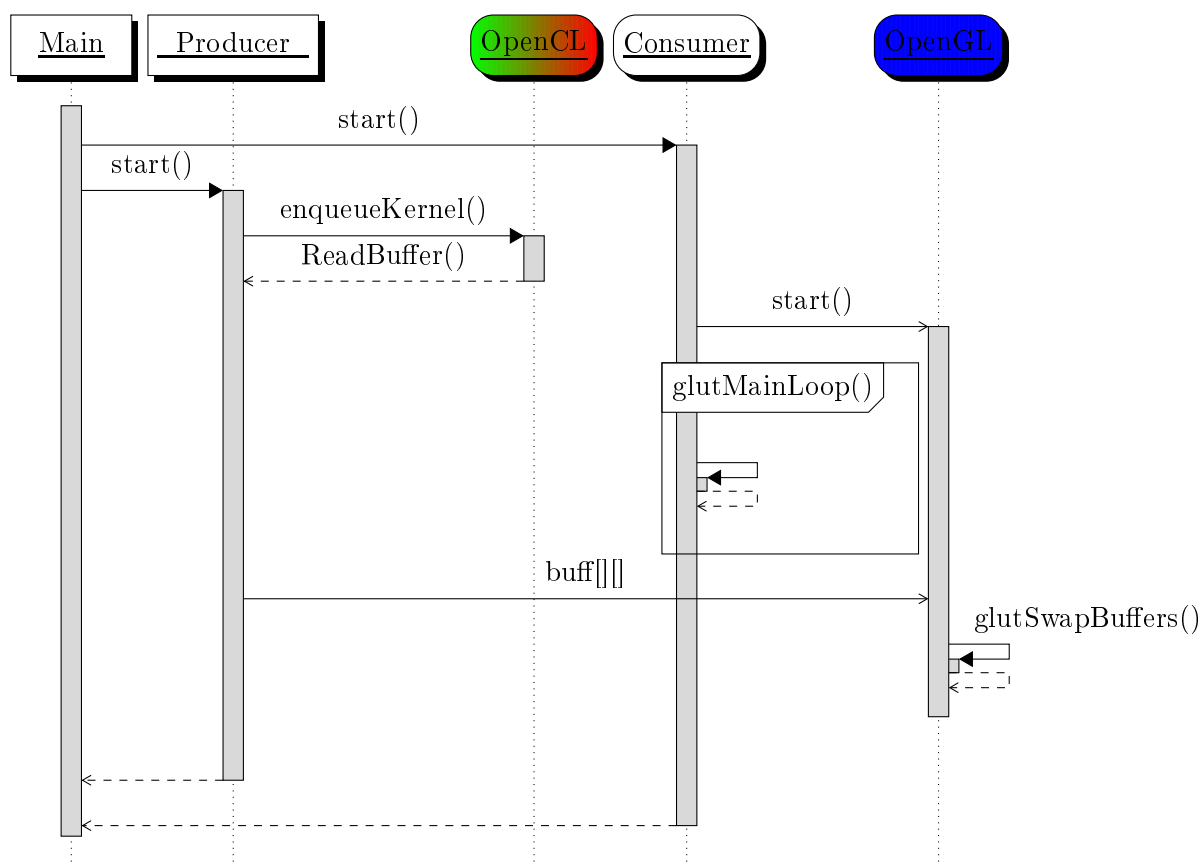
A kernelek közül a medián szűrő, ami elrontja a fix futási időt (Fix E. T.) és abba sztochasztikát visz. A változó futási időről elmondható, hogy a bemeneti kép értékeitől függ.

javítani...

Pontosabban a medián szűrő ablakain belül található pixelek rendezettségétől. A medián számításának worst case execeution time-ja (WCET), pontosabban wc. lépésszáma ismert alogritmuselméletből, ami korlátos és megegyezik - a bemenet  $N$  számossága esetén - a  $O(N \log N)$  értékkel.

Adódik, hogy a host programot több konkurens szála bontva kerüljön implementálásra az ismert Producer-Consumer [10] mintát alkalmazva. A szálak létrehozását és kezelését a *Boost C++ Libraries* [11] keretrendszer megfelelő függvényhívásai oldják meg. A keretrendszer parancssori argumentumkezelést, szálkezelést, szemafort, várakozási listát és atomi működésű operátorokkal rendelkező változókat nyújt a programozó számára. A szálak közötti adatkapcsolást FIFO típusú (single producer - single consumer) várakozási listával oldom meg.

Egy producer szálon kerül implementálásra a kamera képeinek fogadása és a várakozási sorba állítása. Következő consumer és egyben producer szálon a várakozási sorból egy kép elővétele majd feldolgozására kerül sor az OpenCL kernel által, aminek eredménye a megjelenítő OpenGL bufferébe kerül letárolásra. Az utolsó consumer szál az OpenGL-es megjelenítést végzi. Az implementálandó szálak „szekvencia diagrammja” a következő 4.1 ábrán látható.



4.1. ábra. Host program szekvencia diagrammja

## **4.2. main (producer) szál**

...

### **4.2.1. Inicializálás**

A korábban említett várakozási lista fix méretű a 100 FPS-el érkező képek 1 másodpercnyi feldolgozásához szükséges méretű.

### **4.2.2. Kamera adatfolyamának fogadása**

...

## **4.3. Producer szál**

...

### **4.3.1. OpenCL inicializálás**

- Infó lekérdezése
- Global mem. méret
- Local mem. méret

### **4.3.2. Kép kernelekkel történő feldolgozása**

...

## **4.4. Consumer szál**

...

### **4.4.1. OpenGL inicializáció**

...

### **4.4.2. OpenGL callback függvény**

...





## 5. fejezet

# A kernel programok lépéseinek bemutatása

A lokális memóriát két azonos nagyságú  $A$  és  $B$  bufferre osztottam fel.

### 5.1. Medián szűrés

A kernel program lépései a következők:

1. A work-item globális és lokális indexének meghatározása,
2. Medián szűrés:
3. A kép egy részének a globális memóriából a lokális  $A$  bufferbe való másolása,
4. Az összes work-item másolási folyamatának megvárása,
5. Medián szűrés az  $A$  bufferből a  $B$  bufferba,
6. Az  $A$  bufferba az eredeti ( $A$  buffer) és a szűrt ( $B$  buffer) különbségének az eredményét (differenciális kép) elhelyezni,
7. Döntési szint számítása és detektálás/megjelölés a  $B$  bufferba,
8. A  $B$  bufferben lévő eredmény a globális memóriába való kiírása hibakeresés biztosítása végett.

A kernel lefutása után az eszköz globális memóriájából az eredményeket a hoszt-memóriájába töltjük. A számításigényes szűrés, detektálás és momentum számítás az eszközön hajtódott végre. A részecskék pozíciójának eloszlásának számítása memóriaigényes, de nem számításigényes feladat, így az a host-programban került megvalósításra.

### 5.2. Átlagolás

...

1. A work-item globális és lokális indexének meghatározása,
2. Eredmény mentése a globális memóriába

### 5.3. Detektálás

...

1. A work-item globális és lokális indexének meghatározása,
2. Kiterjesztés és a flood-fill algoritmussal a ROI meghatározása:
  - (a) Megjelölt pixel keresése,
  - (b) Adott környezetére való kiterjesztése,
  - (c) A kiterjesztés során a két legtávolabbi pont lesz a ROI határpontjai.
3. Részecske pozíciójának számítása momentum módszerrel,
4. Eredmény mentése a globális memóriába

## 6. fejezet

# Összehasonlítás

A programot a különböző eszközökön futtatva a 6.1. táblázatban látható futási eredményeket produkálta. A táblázatban látható futási idők 100 futási idő átlaga. A táblázathoz felvettem egy fiktív mérőszámot (teljesítmény tényező) a különböző architektúra összehasonlítására. A mérőszám értéke minél kisebb, annál gyorsabban hajtódik végre egy utasítás.

**6.1. táblázat.** *Az eszközök erőforrásainak és a rajta futtatott programok futási idejének összehasonlítása.*

	Intel Core i5 M520	nVidia GT330M
MAX COMPUTE UNITS [1]	4	6
MAX CLOCK FREQUENCY [MHz]	2400	1265
MAX WORK GROUP_SIZE	8192	512
GLOBAL MEM SIZE	~ 4 GByte	~ 1 GByte
LOCAL MEM SIZE	32 KByte	16 KByte
Futási idő ( $T$ )	478.71 ms	191.94 ms
Teljesítmény tényező ( $P = \frac{1}{\text{UNITS} \times \text{FREQUENCY}}$ )	$104.16 \cdot 10^{-6}$	$131.75 \cdot 10^{-6}$
Fajlagos utasításszám ( $T/P$ )	$4.59 \cdot 10^3$	$1.45 \cdot 10^3$

Látható, hogy a GPU-n való futtatás közel  $3\times$  gyorsulást jelent. Ezt két dolognak tudom be:

- *Memória:* A CPU memóriája DDR3 @ 1066 MHz 64 bites busz szélességgel, míg a GPU memóriája GDDR3 @ 1066 MHz 128 bites busz szélességgel,
- *Processzor mag:* A CPU 4 compute unit-al rendelkezik, ami 4 szála, ami 2 processzormagra az Intel HyperThread technológiájával képeződik le, míg a GPU 6 compute unit-al rendelkezik, ami 48 CUDA core-ra képeződik le.

Továbbá figyelembe kell venni, hogy a program futása a többi programmal konkurrensen történik, CPU esetén az operációs rendszerrel, GPU esetén a megjelenítéssel.



## 7. fejezet

# Összegzés

Dolgozatomban bemutattam a poros plazma kísérletek apparátusát. A kísérlet során a kristályrácsba rendeződő részecskékről egy nagysebességű kamerával fényképek készülnek. A dolgozatomban ezen képeket, kellett feldolgoznom és a részecskék pozícióját detektálnom. A pozíciók a fizikai modell/szimuláció validálására szolgálnak.

Ismertettem a részecske detektálásának módszerét szűrés és adaptív döntési küszöb használatával. Az elterjedt FIR Gauss szűrő helyett a hatékonyabb medián szűrőt javasoltam és alkalmaztam. A pozíció számítására a momentum módszert implementáltam, ami nagyobb számítási energiát igényel, de szubpixeles felbontást tudtam vele elérni. Konstatáltam, hogy az így kialakult program masszívan párhuzamosítható.

Ezután áttekintettem az OpenCL keretrendszert, amit a párhuzamos program megírásának segítségére használtam. Az itt ismertetett megállapításokat figyelembe véve állítottam össze a párhuzamos program lépéseit, amit részleteztem is.

Végül az elkészült programot CPU-n és GPU-n is futtatva a futási idejüket összevettem és azonosítottam a gyorsulás forrását kitérve a processzormagra és a memóriájára.

### További feladatok:

- A host-program real-time mérésbe helyezése egy producer-consumer sémájú szál megoldás alkalmazásával,
- Az eredmény grafikus megjelenítése pl.: OpenGL használatával,
- Az OpenCL szabvány által specifikált vektor műveletek támogatásának kiaknázása, ami az Intel Xeon PHI processzorkártyában rejlő teljesítményt ki tudná aknázni.

## A. függelék

# Fejlesztőkörnyezet összeállítása

OpenCL kód fejlesztése történhet Windows alatt NVIDIA Nsight Visual Studio Edition [12] és Linux alatt GCC-vel [13]. Az Open Source fejlesztőrendszer ingyenessége és az általa generált program hordozhatósága végett a Linux alatti fejlesztés mellett döntöttem. Az OpenCL-t támogató hardverek legtöbbször CPU-k, GPU-k és az Intel MIC [9] kártyái. Ezekre való OpenCL kód fejlesztéséhez a gyártók biztosítanak Software Development Kit-et (SDK). Ezek telepítése szinte bármelyik Linux disztribúción sikerülhet a megfelelő követelmények előzetes telepítése után. A Linux disztrók közül a CentOS-re [14] esett a választás, ami csupán a fejlesztőkörnyezet egyszerűbb telepítése végett történt így.

### Software Development Kit-ek (SDK) telepítése

#### nVidia támogatás telepítése

A legtöbb mai Linux disztrók tartalmazznak drivert az nVidia videó kártyákhoz. Ez az open source Nouveau, ami még nem támogatja az OpenCL-t. Így a hivatalos nVidia drivert fel kell telepítenünk. Ehhez először le kell tiltanunk a Nouveau betöltését. Ezt két helyen is meg kell tennünk: egyrészt a `/etc/modprobe.d/blacklist.conf` fájlhoz hozzá kell adnunk a következő sort:

```
blacklist nouveau
```

majd újragenerálni az INITIAL RAM File System-et (initramfs), ami a rendszer inicializálásért felelős:

```
$ mv /boot/initramfs-$(uname -r).img /boot/initramfs-$(uname -r).img.bak
$ dracut -v /boot/initramfs-$(uname -r).img $(uname -r)
```

másrészt a rendszer indító GRand Unified Bootloader-ben (GRUB) is le kell tiltani a betöltését a kernel opció alábbi paranccsal való kiegészítésével:

```
nouveau.modeset=0
```

Továbbá a telepítéshez szükséges követelményeket a következő parancsokkal telepíthetjük:

```
$ yum groupinstall "Development Tools"
$ yum install kernel-devel kernel-headers dkms
```

Ekkor a rendszer újraindítása után készen állunk a hivatalos nVidia driver telepítésére. A drivert a következő linken lehet letölteni [15]. A grafikus felületet a telepítés idejére le kell

állítani az X grafikus kiszolgálót

```
$ init 3
```

paranccsal, majd a konzolban telepíthető a driver, ami a legtöbb munkát elvégzi helyettünk. Ezután az

```
$ init 5
```

paranccsal áttérhetünk a grafikus felületre, ahol a megfelelő környezeti változókat kiegészíthetjük. Legcélratosabb, ha a `~/.bashrc` fájlt módosítjuk és hozzáadjuk a következő sorokat:

```
PATH=$PATH:$HOME/bin:/usr/local/cuda/bin
export PATH

CUDA_INSTALL_PATH=/usr/local/cuda
export CUDA_INSTALL_PATH

LD_LIBRARY_PATH=/usr/local/cuda/lib64:/opt/intel/oneapi/bin
export LD_LIBRARY_PATH

NVSDKCOMPUTE_ROOT=/usr/local/cuda/lib64
export NVSDKCOMPUTE_ROOT

INTELOCLSDKROOT=/opt/intel/oneapi
export INTELOCLSDKROOT
```

Mivel az nVidia limitálja a kernel futási időt 5 másodpercben limitálja, hosszabb kernel futási idő esetén a rendszer lefagy. Ezt a korlátozást a `/etc/X11/xorg.conf` fájl `Device` részének a következővel való kiegészítésével érhetjük el:

```
Option "Interactive" "boolean"
```

Érvényre juttatásához az X újraindítása szükséges (CTRL+ALT+Backspace). Ezután nagyobb problémák esetén már nem fogja lefagyasztani a rendszert a watchdog.

## Intel támogatás telepítése

A következő oldalról letölthetjük az SDK-t [16]. A kicsomagolás után az `./install-cpu.sh` program futtatásával telepíthető. Ezután még szükséges a `LD_LIBRARY_PATH` beállítása.

## Eclipse – Integrated Development Environment

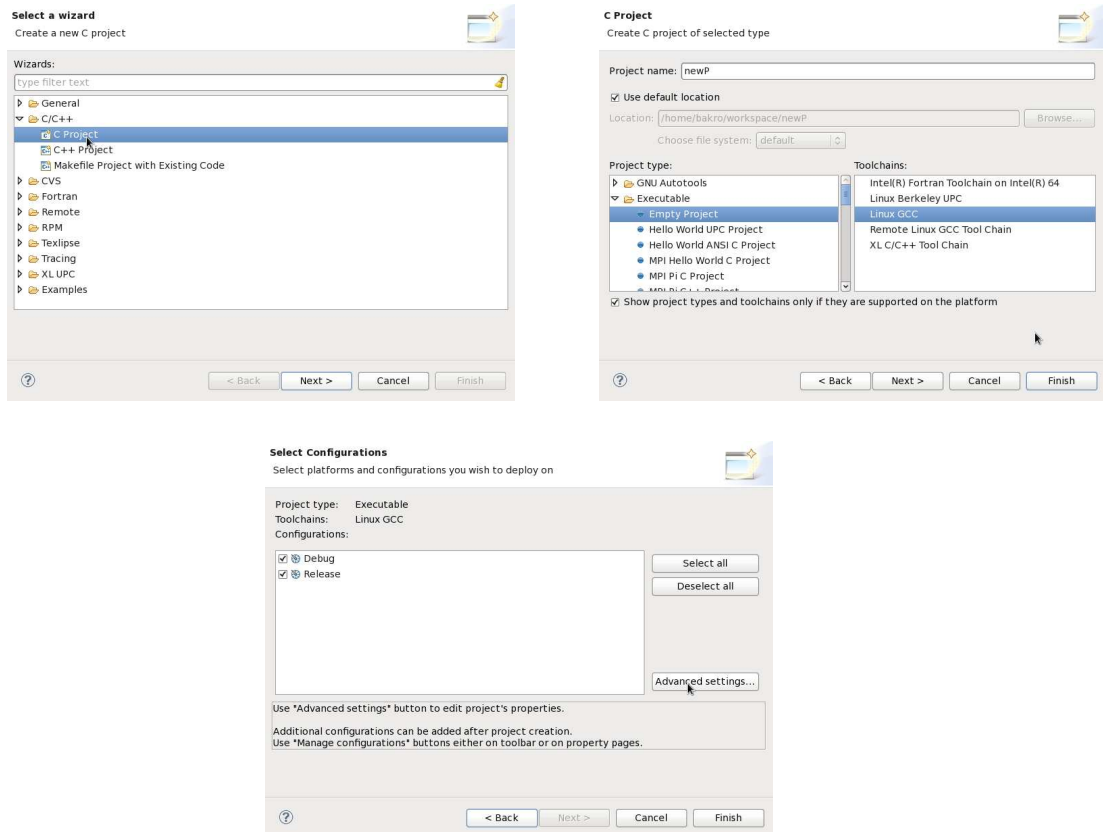
A fejlesztés és hibakeresés egy Integrated Development Environment (IDE) segítségével könnyebb. Az open source Eclipse [17] fejlesztőkörnyezet a különböző pluginjaival épp megfelelő erre a célra. Például a C-nyelv fejlesztését segítő C/C++ Development Tooling (CDT), a verziókövetést menedzselő EGit és a hibakeresést támogató GDT. A sok Eclipse változat közül az OpenCL fejlesztéshez legjobban az Eclipse for Parallel Application Developers verzió illik, mivel a korábban említett pluginokat már eleve tartalmazza.

## Új (Hello World) projekt létrehozása

Az OpenCL fejlesztését konyhanyelven bemutató OpenCL Programming Guide [18] könyvben szereplő Hello World programot a következő linken lehet letölteni [19]. A kód fordítása előtt egy Eclipse projektet létrehozunk és a fordításhoz szükséges beállításokat elvégezzük.

## Empty C project létrehozása

Először egy üres C projektet hozunk létre, ami folyamatát a A.1 ábrán látjuk. A korábban említettek szerint fordítónak a Linux GCC-t állítjuk be.



A.1. ábra. Új Eclipse projekt létrehozása

## Compiler beállítás

A létrehozott projektre jobb gombbal kattintva a tulajdonságára kattintva állíthatjuk be a fordítót a A.2 ábrának megfelelően. A beállítások kiterjednek a GNU-C99 nyelv szerinti fordításra és a korábbi részben telepített SDK-ban található include mappa beállítására.

## Linker beállítás

A linkert a A.3 ábra szerint állítjuk be.





# Ábrák jegyzéke

1.1. A mérési elrendezés sematikus ábrája . . . . .	2
1.2. A konkrét kamra működése közben . . . . .	3
1.3. Két különböző kísérlet során készült fénykép. . . . .	5
2.1. Adaptív küszöb bemutatása . . . . .	9
2.2. Pozíciómérés momentum módszerrel . . . . .	11
3.1. OpenCL device architektúra . . . . .	13
3.2. OpenCL context osztálydiagrammja . . . . .	15
3.3. Feladat hozzárendelése work-item-hez (processzorhoz) . . . . .	15
3.4. 2D-s work-item-ek work-group-ba rendezése és indexelése . . . . .	16
4.1. Host program szekvencia diagrammja . . . . .	20
A.1. Új Eclipse projekt létrehozása . . . . .	III
A.2. Compiler beállításai . . . . .	IV
A.3. Linker beállításai . . . . .	IV



# Táblázatok jegyzéke

3.1. OpenCL memória szintek . . . . .	14
3.2. Használandó eszközök összehasonlítása . . . . .	17
6.1. Eszközök futási idejének összehasonlítása . . . . .	25



# Irodalomjegyzék

- [1] P. Hartmann, A. Douglass, J. C. Reyes, L. S. Matthews, T. W. Hyde, A. Kovács, and Z. Donkó, „Crystallization dynamics of a single layer complex plasma,” *Phys. Rev. Lett.*, vol. 105, p. 115004, Sep 2010.
- [2] P. Hartmann, Z. Donkó, T. Ott, H. Kählert, and M. Bonitz, „Magnetoplasmons in rotating dusty plasmas,” *Phys. Rev. Lett.*, vol. 111, p. 155002, Oct 2013.
- [3] D. Z. Hartmann P, Donkó I, „Single exposure three-dimensional imaging of dusty plasma clusters,” *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 84, p. 023501, 2013.
- [4] R. L. Merlino, „Dusty plasmas and applications in space and industry,” *Plasma Physics Applied*, vol. 81, pp. 73–110, 2006.
- [5] Y. Feng, J. Goree, and B. Liu, „Accurate particle position measurement from images,” *Review of Scientific Instruments*, vol. 78, no. 5, pp. —, 2007.
- [6] *Tracking interacting dust: comparison of tracking and state estimation techniques for dusty plasmas*, vol. 7698, 2010.
- [7] The Khronos OpenCL Working Group, *The OpenCL Specification, version 1.0*, 6 August 2010.
- [8] Intel, „Intel® xeon phi™ product family.” <http://www.intel.com/content/www/us/en/processors>
- [9] „Intel® many integrated core architecture (intel® mic architecture).” <http://www.intel.com/content/www/us/en/architecture-and-technology/many-integrated-c>
- [10] E. W. Dijkstra, „Information streams sharing a finite buffer,” *Inf. Proc. Letters*, vol. 1, pp. 179–180, 1972.
- [11] „Boost c++ libraries.” <http://www.boost.org/>.
- [12] „Nvidia nsight visual studio edition.” <https://developer.nvidia.com/nvidia-nsight-visual-studio-edition>
- [13] „Gcc, the gnu compiler collection - gnu project - free software foundation (fsf).” <http://gcc.gnu.org/>.
- [14] „Centos project.” <http://www.centos.org/>.
- [15] „Nvidia drivers.” <http://www.nvidia.com/Download/index.aspx>.

- [16] „Intel opencl sdk.” <https://software.intel.com/en-us/vcsource/tools/opencl-sdk-xe>.
- [17] „Eclipse - the eclipse foundation open source community website.”  
<https://www.eclipse.org>.
- [18] A. Munshi, *OpenCL Programming Guide*. Addison-Wesley, 2011.
- [19] „Opencl programming guide - examples.” <https://code.google.com/p/opencl-book-samples/source/ch>