

CARRERA DEL INVESTIGADOR CIENTÍFICO Y TECNOLÓGICO

Informe Científico¹

PERIODO ²: 2015

1. DATOS PERSONALES

APELLIDO: Rinaldi

NOMBRES: Pablo

Dirección Particular: Calle: N°:

Localidad: Tandil CP: 7000 Tel:

*Dirección electrónica (donde desea recibir información, que no sea "Hotmail"):
rinaldipablo@gmail.com*

2. TEMA DE INVESTIGACION

Modelos de Simulación Lattice Boltzmann para la simulación de fluidos mediante Unidades de Procesamiento Gráfico (GPU)

3. DATOS RELATIVOS A INGRESO Y PROMOCIONES EN LA CARRERA

INGRESO: Categoría: Asistente Fecha: 7/2013

ACTUAL: Categoría: Asistente desde fecha: 7/2013

4. INSTITUCION DONDE DESARROLLA LA TAREA

Universidad y/o Centro: PLADEMA

Facultad:

Departamento:

Cátedra:

Otros:

Dirección: Calle: Pinto N°: 399

Localidad:Tandil CP: 7000

Cargo que ocupa: Investigador

5. DIRECTOR DE TRABAJOS. (En el caso que corresponda)

Apellido y Nombres: Venere Marcelo Javier

Dirección Particular: Calle: N°:

Localidad: Tandil CP: 7000 Tel:

Dirección electrónica: venerem@exa.unicen.edu.ar

¹ Art. 11; Inc. "e"; Ley 9688 (Carrera del Investigador Científico y Tecnológico).

² El informe deberá referenciar a años calendarios completos. Ej.: en el año 2014 deberá informar sobre la actividad del período 1°-01-2012 al 31-12-2013, para las presentaciones bianuales.

.....
Firma del Director (si corresponde)

.....
Firma del Investigador

6. RESUMEN DE LA LABOR QUE DESARROLLA

El Dr. Pablo Rafael Rinaldi es Investigador Asistente dentro del grupo PLADEMA Centro Asociado a la CIC ubicado en la Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires bajo la dirección del Dr Marcelo Vénere. Su área de investigación es la aplicación del procesamiento paralelo sobre GPUs a modelos de simulación computacional. El Dr. Rinaldi es también Profesor Adjunto en la Facultad de Ciencias Exactas y es actualmente el responsable y coordinador para la UNCPBA del convenio PIDSAE celebrado entre la CNEA y la UNCPBA para el desarrollo de software específico

7. EXPOSICION SINTETICA DE LA LABOR DESARROLLADA EN EL PERIODO.

El investigador Pablo Rinaldi forma parte como responsable y coordinador para la UNCPBA del convenio PIDSAE (Programa para el Desarrollo de Software para Aplicaciones Especiales) que se inició en 2014 y finaliza en 2016. Este proyecto incluye tres desarrollos principales: 1. La construcción de una CAVE (Competer Assisted Virtual Environment) en instalaciones de la CNEA y desarrollo de aplicaciones de soporte para el análisis de diseño funcional, operaciones y maniobras en el edificio de ASECQ-Atucha I; 2. El desarrollo de simuladores de flujos complejos como elementos finitos para la simulación de separación de isótopos, para inyección de flujo supersónico y para termohidráulica en reactores; y 3. El procesamiento de imágenes médicas.

Durante 2015, el investigador también participó como co-director de un proyecto financiado por la Secretaría de Políticas Universitarias para el desarrollo de Modelos de Elevación de precisión para grandes extensiones, comenzando con el partido de Necochea. Este proyecto aún no se ha finalizado pero algunos avances producidos ya fueron publicados en un congreso nacional. Este proyecto tiene su fundamental aplicación la simulación de procesos de inundaciones en la Provincia de Buenos Aires.

Durante el año 2015 el investigador continuó con su línea de trabajo en la evolución de modelos de simulación numérica de fluidos basados en autómatas de Lattice Boltzmann (LBM) especialmente adaptados para correr sobre unidades de procesamiento gráfico (GPU). En colaboración con otros investigadores del grupo PLADEMA se probaron diferentes métodos para la integración del algoritmo de frontera inmersa que permite representar superficies irregulares curvas, superficies móviles e inclusive medios porosos. La complejidad de esta integración de modelos reside en que el método de frontera inmersa es un algoritmo de tipo implícito y que requiere una estructura de datos adicional con una disposición no regular mientras que el modelo de Lattice Boltzmann desarrollado y optimizado para correr en GPU es totalmente explícito y con una estructura de datos regular. Los resultados están siendo aplicados en algunos trabajos de hemodinámica y han sido enviados para su publicación en una revista internacional.

8. TRABAJOS DE INVESTIGACION REALIZADOS O PUBLICADOS EN ESTE PERIODO.

8.1 PUBLICACIONES.

1. Amalia L. Thomas; Juan P. D'Amato; Pablo R. Rinaldi. Corrección de Modelos Digitales de Elevación con Imágenes Multi-Espectrales. Argentina. Junin. 2015. Congreso. XXI Congreso Argentino de Ciencias de la Computación - CACIC2015. REDUNCI – UNNOBA. *Abstract*: Se presenta una metodología extensiva para detectar áreas arboladas en zonas rurales de la provincia de Buenos Aires empleando imágenes satelitales multiespectrales *Landsat*. La máscara generada permite corregir las falencias de los Modelos Digitales de Elevación (MDE) radar como los *Shuttle Radar Topographic Mission* (SRTM). En estos modelos, la presencia de árboles genera errores en las mediciones ya que las ondas del radar no penetran la vegetación, dando valores de altura de terreno similares a las copas

de los árboles. Con base en imágenes Landsat se ajustaron funciones de umbralado independientes para cada espectro. Con la aplicación sucesiva de estos umbrales se logra una máscara que se proyecta sobre el MDE. La máscara luego es corregida evaluando los saltos de altura en las fronteras de la misma. Por último, se aplica un algoritmo de corrección al MDE. *Participación:* Dirección del proyecto DEM-SPU, diseño de los algoritmos, redacción del informe.

8.2 TRABAJOS EN PRENSA Y/O ACEPTADOS PARA SU PUBLICACIÓN.

8.3 TRABAJOS ENVIADOS Y AUN NO ACEPTADOS PARA SU PUBLICACION.

8.4 TRABAJOS TERMINADOS Y AUN NO ENVIADOS PARA SU PUBLICACION.

"Full GPU Implementation of Lattice-Boltzmann Method with Immersed Boundary Conditions for Fast Fluid Simulations." Gustavo A. Boroni, Javier Dottori, Pablo R. Rinaldi, Diego D. Dalponte. *Abstract:* The Lattice Boltzmann Method (LBM) has shown great potential in fluid simulations, but the performance issues and the difficulties to manage complex boundary conditions have hindered a wider application. The upcoming of Graphic Processing Units (GPU) Computing offered a possible solution for the performance issue, and methods like the Immersed Boundary (IB) algorithm proved to be a flexible solution to boundaries. Unfortunately, the implicit IB algorithm makes the LBM implementation in GPU a non-trivial task. The aim of this work is to present a fully parallel GPU implementation of LBM in combination with IB. The fluid-boundary interaction is implemented via GPU kernels, using execution configurations and data structures specifically designed to accelerate each code execution. The simulations were validated against experimental and analytical data showing good agreement and improving the computational time. Substantial reductions of the calculation rates were achieved, lowering down the time required to execute the same model in a CPU to near two magnitude orders.

8.5 COMUNICACIONES.

8.6 INFORMES Y MEMORIAS TECNICAS. *Incluir un listado y acompañar copia en papel de cada uno o referencia de la labor y del lugar de consulta cuando corresponda.*

9. TRABAJOS DE DESARROLLO DE TECNOLOGÍAS.

9.1 DESARROLLOS TECNOLÓGICOS.

Se desarrolló una metodología para la corrección de modelos digitales de elevación utilizando imágenes multiespectrales. El énfasis del trabajo está apuntado a corregir los MDE de zonas de llanura con pocos árboles como la provincia de Buenos Aires. Estos MDE corregidos son de utilidad para los simuladores de escurrimiento superficial que permiten estudiar los procesos de inundación. Este desarrollo se hizo gracias al convenio con la SPU.

El modelo de simulación de fluidos LBM con la integración de Frontera Inmersa está siendo utilizado por el grupo de Imágenes Médicas (Yatiris) dentro del Instituto PLADEMA para la simulación hemodinámica.

9.2 PATENTES O EQUIVALENTES. *Indicar los datos del registro, si han sido vendidos o licenciados los derechos y todo otro dato que permita evaluar su relevancia.*

9.3 PROYECTOS POTENCIALMENTE TRANSFERIBLES, NO CONCLUIDOS Y QUE ESTAN EN DESARROLLO. *Describir objetivos perseguidos, breve reseña de la labor realizada y grado de avance. Detallar instituciones, empresas y/o organismos solicitantes.*

9.4 OTRAS ACTIVIDADES TECNOLÓGICAS CUYOS RESULTADOS NO SEAN PUBLICABLES (desarrollo de equipamientos, montajes de laboratorios, etc.).

9.5 Dr. Alberto Lamagna, Gerente de la Unidad Investigación y Aplicaciones no nucleares, CNEA. (Convenio PIDSAE) alamagna@cnea.gov.ar.

Dr. Pablo Euillades, Director de la División de Imágenes Satelitales – CEDIAC – UNCuyo (Corrección MDEs) peuillades@cediac.uncu.edu.ar

10. SERVICIOS TECNOLÓGICOS. Indicar qué tipo de servicios ha realizado, el grado de complejidad de los mismos, qué porcentaje aproximado de su tiempo le demandan y los montos de facturación.

11. PUBLICACIONES Y DESARROLLOS EN:

11.1 DOCENCIA

Como docente a cargo de la materia GPU Computing conjuntamente con el Dr. Juan D'Amato se actualizó todo el material para la cátedra como diapositivas, templates y ejemplos de código así como el material de evaluación. Disponible en: <http://introgpuc.alumnos.exa.unicen.edu.ar/>.

Como Jefe de Trabajos prácticos de la cátedra de Estructuras de Almacenamientos (Ingeniería de Sistemas, UNCPBA) el Investigador trabajó con el resto del personal de la cátedra en la actualización de los prácticos de cursada y el enunciado para el trabajo especial de cátedra. Disponible en: <https://sites.google.com/site/estdatosunicen/>

11.2 DIVULGACIÓN

12. DIRECCION DE BECARIOS Y/O INVESTIGADORES. Indicar nombres de los dirigidos, Instituciones de dependencia, temas de investigación y períodos.

13. DIRECCION DE TESIS. Indicar nombres de los dirigidos y temas desarrollados y aclarar si las tesis son de maestría o de doctorado y si están en ejecución o han sido defendidas; en este último caso citar fecha.

14. PARTICIPACION EN REUNIONES CIENTIFICAS.

XXI Congreso Argentino de Ciencias de la Computación – CACIC2015-REDUNCI – UNNOBA, Junín, Pcia de Buenos Aires. Presentación del trabajo: *Corrección de Modelos Digitales de Elevación con Imágenes Multi-Espectrales*. Amalia L. Thomas; Juan P. D'Amato; Pablo R. Rinaldi

Segundo Congreso Internacional Científico y Tecnológico de la Pcia de Buenos Aires. La Plata 2015. Organizado por la CIC, Ministerio de Producción, Ciencia y Tecnología. Conjuntamente con otros investigadores y personal de apoyo del centro asociado PLADEMA se presentó el stand del Instituto con material audiovisual de las líneas de investigación.

15. CURSOS DE PERFECCIONAMIENTO, VIAJES DE ESTUDIO, ETC. Señalar características del curso o motivo del viaje, período, instituciones visitadas, etc.

16. SUBSIDIOS RECIBIDOS EN EL PERIODO.

CNEA. Programa Interinstitucional de Desarrollo de Software para Aplicaciones Especiales (PIDSAE) 9/2014 - 12/2017. Monto total actualizado: \$ 4.838.000. Monto correspondiente a 2015 \$ 1.838.000.

17. OTRAS FUENTES DE FINANCIAMIENTO.

18. DISTINCIONES O PREMIOS OBTENIDOS EN EL PERIODO.

19. ACTUACION EN ORGANISMOS DE PLANEAMIENTO, PROMOCION O EJECUCION CIENTIFICA Y TECNOLÓGICA. Miembro representante Docente Auxiliar del Honorable Consejo Académico Universidad Nacional del Centro de la Pcia. de Buenos Aires, Facultad de Ciencias Exactas período 2014-2015. Dedicación aproximada 8 horas mensuales, 4.5 % del tiempo total.

20. TAREAS DOCENTES DESARROLLADAS EN EL PERIODO. Jefe de Trabajos Prácticos Ordinario. Facultad de Ciencias Exactas Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires (UNCPBA). Cátedras: Ciencias de la Computación I, Estructuras de Almacenamiento de Datos e Introducción al de GPU Computing. Cursos de Posgrado: Nociones de GPU Computing. Dedicación simple, porcentaje total aproximado 10%.

21. OTROS ELEMENTOS DE JUICIO NO CONTEMPLADOS EN LOS TITULOS ANTERIORES. En diciembre de 2015, el Dr. Pablo Rinaldi fue evaluado para su promoción en Carrera Académica como parte del primer tercio de la FCEX UNCPBA, siendo promovido a Profesor Ordinario Semiexclusivo.

22. TITULO Y PLAN DE TRABAJO A REALIZAR EN EL PROXIMO PERIODO.

"Paralelización de algoritmos no triviales sobre placas gráficas GPU – Aplicación a la simulación de fluidos y el procesamiento de imágenes."

DEFINICIÓN DEL PROBLEMA:

GPU Computing: Las arquitecturas de hardware más recientes pueden mejorar notablemente la performance de algunos algoritmos a través del uso de procesadores multi-núcleo. Estas arquitecturas permiten que se ejecuten múltiples hilos de ejecución para resolver los cálculos en paralelo y reducir el tiempo total de ejecución del código. El uso de Unidades de Procesamiento Gráfico (GPU) para procesamiento de propósito general (denominado también GPU Computing o GPGPU) es el caso más extremo de este principio y surgió como una evolución del uso específico de estas placas. Los diseñadores de GPUs adoptaron la arquitectura multi-núcleo mucho antes que los diseñadores de CPU debido a la naturaleza trivialmente paralela del renderizado de gráficos [Thibault 2009].

Las GPUs se basan en la arquitectura de procesamiento de streams [Owens 2007] la cual es aplicable a tareas de cálculo intensivo altamente paralelizables [Nvidia 2008]. En la actualidad, existen placas gráficas específicamente diseñadas para ser utilizadas como procesadores de alta performance multi-núcleo y también lenguajes de programación adaptados a estas tecnologías como NVIDIA CUDA [Nvidia 2008] u OpenCL [OpenCL 2014].

Desde su surgimiento alrededor del 2006, el GPU Computing ha atraído a numerosos científicos de variadas disciplinas, como dinámica molecular [Anderson 2008] [Liu 2007] [Jfimtsev 2008], biología computacional [Schatz 2007], álgebra lineal [Barrachina 2008] [Castillo 2008], meteorología [Michalakes 2008], inteligencia artificial [Bleiweiss 2008] y dinámica de fluidos computacional (CFD). Particularmente en CFD

los modelos de autómatas celulares altamente paralelizables como el método de Lattice Boltzmann (LBM) han logrado grandes avances en performance [Zeiser 2008] [Mazzeo 2008] [Tölke 2010] [Rinaldi 2012].

Si bien en muchos casos los códigos GPU corren uno e incluso dos órdenes de magnitud más rápido que sus equivalentes en CPU, el uso de todo el potencial de esta case de hardware no es una tarea sencilla. Muchas veces es necesario reescribir y optimizar los códigos secuenciales existentes para aprovechar el 100% del poder de cómputo de las GPU. Además, la mayoría de estos trabajos se basan en algoritmos trivialmente paralelizables, que encajan perfectamente con el paradigma de GPU Computing. Estos algoritmos tienen en común ciertas características de ejecución y sobre todo en lo que respecta a las estructuras de datos necesarias.

Pero también existen muchos algoritmos que se sabe son la solución más eficiente a un número de problemas típicos que no cumplen con estas características y por lo tanto no tienen buen rendimiento sobre una GPU. Lee et al. [2010] reportan un aumento de velocidad promedio de 2,5 para varios algoritmos en la GPU vs. Códigos CPU optimizados, y trabajos como el de Vuduc et al. [2010] mencionan algoritmos memoria-intensivos que se desempeñan al mismo nivel en la GPU o incluso peor que en CPU. El desafío se encuentra entonces en lograr aceleraciones razonables para algoritmos no triviales y darle mayor aplicabilidad a códigos eficientes en GPU aunque esto sea a costa de perder algo de performance.

LBM y Simulación de Fluidos: En lo relativo a CFD, el método LBM ha sido implementado exitosamente en GPU brindando soluciones válidas para una gran variedad de escenarios en simulación de fluidos computacional [Zeiser 2008] [Mazzeo 2008] [Tölke 2010] [Rinaldi 2012]. Sin embargo, para que las simulaciones tengan aplicación real a problemas complejos se requiere mayor flexibilidad en las condiciones de contorno. Una solución posible es utilizarlo en combinación con otros métodos como el algoritmo de Frontera Inmersa (IB) [Peskin 2002]. Desarrollado inicialmente para lidiar con barreras flexibles en métodos de elementos finitos, en IB la frontera se representa por un conjunto de partículas sin masa acopladas entre sí y a la grilla principal por fuerzas elásticas. El fluido circundante en movimiento mueve al conjunto de partículas al mismo tiempo que la fuerza generada por la distorsión de la frontera se transfiere al fluido [Cheng 2010]. Cheng y Zhang [2010] propusieron acoplar LBM con el método de Frontera Inmersa para simular paredes curvas móviles en hemodinámica. La combinación LBM con el método de Frontera Inmersa (IB) permite interacciones fluido-sólido mucho más complejas manteniendo parte de la simplicidad de LBM [2013]. Sin embargo IB agrega complejidad y parámetros al LBM básico; el cálculo de la frontera requiere una iteración interna implícita, que no es trivial de implementar sobre GPU y que genera un desbalance de carga en los threads paralelos de la placa gráfica. Esto le quita performance y ventajas al GPU Computing. No obstante se han logrado buenos resultados en implementaciones recientes de este algoritmo combinado [Boroni 2014].

OBJETIVOS GENERALES Y OBJETIVOS PARTICULARES

Como objetivos generales se planea continuar en el desarrollo de modelos de simulación numérica de fluidos basados en autómatas de Lattice Boltzmann (LBM) sobre GPU evolucionando el modelo 3D desarrollado durante el doctorado y postdoctorado extendiendo su campo de aplicaciones mediante la integración del algoritmo de frontera inmersa. El modelo será aplicado a simulaciones complejas de fluidos como canales semiobstruidos o medios porosos y canales con paredes móviles en simulación hemodinámica que es una de las líneas principales actuales dentro del grupo PLADEMA.

Por otro lado, se pretende trabajar de manera conjunta con las demás líneas de investigación del grupo en la implementación sobre GPU de algoritmos específicos de alto costo computacional, más precisamente en el área de procesamiento de imágenes satelitales y modelos digitales de elevación.

Objetivos Particulares:

1. Desarrollar un modelo de simulación de fluidos combinando LBM 3D con Frontera Inmersa utilizando lenguaje CUDA para su ejecución en hardware de gráficos GPU.

2. Estudiar la aplicación de estos modelos a simulación de fluidos en hemodinámica. Particularmente en esquemas de grillas ralas con gran cantidad de nodos sin fluido.

3. Analizar la implementación de algoritmos de procesamiento de modelos de elevación sobre GPU. Puntualmente la segmentación y filtrado para la eliminación de zonas de vegetación en modelos SRTM en grandes áreas dentro del Proyecto DEMs de la SPU.

BIBLIOGRAFÍA

[Anderson 2008] Anderson, J., Lorenz, C. and Travesset, A., "General Purpose Molecular Dynamics Simulations Fully Implemented on Graphics Processing Units," *Journal of Computational Physics*, Vol. 227, No. 10, 2008, pp. 5342-5359.

[Barrachina 2008] Barrachina, S., Castillo, M., Igual, F. D., Mayo, R. and Quintana-Orti, E. S., "Solving Dense Linear Systems on Graphics Processors," Technical Report ICC 02-02-2008, Universidad Jaume I, Depto. de Ingenieria y Ciencia de Computadores, February 2008.

[Bleiweiss 2008] Bleiweiss, A., "GPU Accelerated Pathfinding," *Proceedings of the 23rd ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Graphics Hardware*, Eurographics Association, Aire-la-Ville, Switzerland, 2008, pp. 65-74.

[Boroni 2013] Boroni G, Dottori J, Dalponte D, Rinaldi P, Clause A (2013). An improved Immersed-Boundary algorithm for fluid-solid interaction in Lattice-Boltzmann simulations. *Latin American Applied Research*, accepted 2013

[Boroni 2014] Boroni G, Dottori J, Dalponte D, Rinaldi P (2014). GPU Implementation of Lattice-Boltzmann Method with Immersed Boundary Conditions for Fast Fluid Simulations. *Journal: Computers & Mathematics with Applications*. Manuscript Number: CAMWA-D-14-00357. Enviado 2014.

[Castillo 2008] Castillo, M., Chan, E., Igual, F. D., Mayo, R., Quintana-Orti, E.S., Quintana-Orti, G., van de Geijn, R. and Van Zee, F.G. Making Programming Synonymous with Programming for Linear Algebra Libraries", Technical Report, University of Texas at Austin, Department of Computer Science, Vol. 31, April 17, 2008, pp. 8-20.

[Cheng 2010] Cheng F, Zhang H (2010). Immersed boundary method and lattice Boltzmann method coupled FSI simulation of mitral leaflet flow. *Computers & Fluids* 39: 871-881.

[Jenkins 2011] Jenkins, J., Arkatkar, I., Owens, J. D., Choudhary, A., Samatova, N. F. (2011). Lessons Learned from Exploring the Backtracking Paradigm on the GPU. *Euro-Par 2011 Parallel Processing. Lecture Notes in Computer Science* 6853: 425-437.

[Jfimtsev 2008] Ufimtsev, I. and Martinez, T., "Quantum Chemistry on Graphical Processing Units. 1. Strategies for Two-electron Integral Evaluation," *Journal of Chemical Theory and Computation*, Vol. 4, No. 2, 2008, pp. 222-231.

[Lee et al 2010] V. W. Lee, C. Kim, et al. Debunking the 100X GPU vs. CPU myth: An evaluation of throughput computing on CPU and GPU. *Int'l Symposium on Computer Architecture*, pages 451-460, 2010.

[Liu 2007] Liu, W., Schmidt, B., Voss, G. and Muller-Wittig, W., "Molecular Dynamics Simulations on Commodity GPUs with CUDA," *Lecture Notes in Computer Science, High Performance Computing HiPC 2007*, Vol. 4873, Springer, New York, 2007, pp.185-196.

[Mazzeo 2008] Mazzeo MD, Coveney PV (2008). HemeLB: A high performance parallel lattice-Boltzmann code for large scale fluid flow in complex geometries. *Computer Physics Communications*. 178(12): 894-914.

[Michalakes 2008] Michalakes, J. and Vachharajani, M., "GPU Acceleration of Numerical Weather Prediction," *Proceedings of the IEEE International Symposium on Parallel and Distributed Processing*, IEEE Computer Society, Washington, DC, 2008.

[Nvidia 2008] NVIDIA, "NVIDIA CUDA Compute Unified Device Architecture Programming Guide, Version 2.0," 2008.

[OpenCL 2014] OpenCL: The open standard for parallel programming of heterogeneous systems <https://www.khronos.org/opencv/>.

[Owens 2007] Owens, J., Luebke, D., Govindaraju, N., Harris, M., Kruger, J., Lefohn, A. and Purcell, T. "A Survey of General-Purpose Computation on Graphics Hardware," Computer Graphics Forum, Vol. 26, No.1, 2007, pp. 80-113.

[Peskin 2002] Peskin C. S. The immersed boundary method. Acta Numer 11, 479–517. 2002.

[Rinaldi 2012] Rinaldi PR, Dari EA, Vénere MJ, Clause A (2012). A Lattice-Boltzmann solver for 3D fluid simulation on GPU. Simulation Modelling Practice and Theory 25: 163-171.

[Schatz 2007] Schatz, M. C. and Trapnell, C. Delcher, A. L. and Varshney, A., "High-throughput Sequence Alignment using Graphics Processing Units," BMC Bioinformatics, BioMed Central, 2007.

[Thibault 2009] CUDA Implementation of a Navier-Stokes Solver on Multi-GPU Desktop Platforms for Incompressible Flows Julien C. Thibault¹ and Inanc Senocak² Boise State University, Boise, Idaho, 83725.

[Tölke 2010] Tölke J (2010). Implementation of a lattice Boltzmann kernel using the compute unified device architecture developed by NVIDIA. Computing and Visualization in Science 13(1): 29–39.

[Vuduc et al 2010] 18. R. Vuduc, A. Chandramowlishwaran, J. Choi, M. Guney, and A. Shringarpure. On the limits of GPU acceleration. Hot Topics in Parallelism, 35(5), 2010.

[Zeiser 2008] Zeiser T, Wellein G, Nitsure A, Iglberger K, Rude U, Hager G. Introducing a parallel cache oblivious blocking approach for the lattice Boltzmann method. Progress in Computational Fluid Dynamics, an International Journal 8(1): 179-188. 2008.