



Doctoral Thesis

Entropic Lattice Boltzmann Method for Two-Phase Flows

Author(s):

Moqaddam, Ali Mazloomi

Publication Date:

2016

Permanent Link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-010809769> →

Rights / License:

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#) →

This page was generated automatically upon download from the [ETH Zurich Research Collection](#). For more information please consult the [Terms of use](#).

DISS. ETH NO. 23905

Entropic Lattice Boltzmann Method for Two-Phase Flows

A thesis submitted to attain the degree of
DOCTOR OF SCIENCES of ETH ZURICH

(Dr. sc. ETH Zurich)

presented by

Ali Mazloomi Moqaddam
MSc in Mechanical Engineering,
Sharif University of Technology

born on 08.07.1988
citizen of Iran

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Ilya V. Karlin, examiner
Dr. Shyam S. Chikatamarla, co-examiner
Prof. Dr. Dimos Poulikakos, co-examiner
Prof. Dr. David Quéré, co-examiner

2016

Abstract

Numerical simulation of multiphase flows often represents a challenging task for classical Computational Fluid Dynamics (CFD) schemes based on the macroscopic description of the fluid state leading to the Navier-Stokes equations. The reason lays in the fact that these flows are often driven by phenomena originating at meso- or micro-scales which need to be modeled into macroscopic equations. Unlike conventional CFD methods, the lattice Boltzmann method (LBM) is based on microscopic models and mesoscopic kinetic equations in which dynamics is evolved by the movement of fictitious clusters of particles on a fixed lattice. Due to this kinetic nature, the LBM has been found to be particularly useful in applications involving interfacial dynamics and complex boundaries, e.g. multiphase or multicomponent flows. However, despite of many attempts to model multiphase flows using LBM, the current approaches are still unable to address complex dynamical effects in an efficient and a quantitative fashion.

In this dissertation, firstly, a thermodynamically consistent lattice Boltzmann model that enables complex simulations of dynamics two-phase flows is proposed. The key innovation is the application of the entropic lattice Boltzmann stabilization mechanism to effectively control and stabilize the numerical artifacts that might arise at the interface of a liquid-vapor system. The former together with a polynomial regularization of known equation of states bring about a substantial increase in the operating range of multiphase simulations and thus allowing us to carry out simulations of

two-phase problems at high Weber and Reynolds numbers with sufficiently large liquid-vapor density ratio.

Secondly, thermodynamic consistency of the models is verified by simulating the liquid-vapor coexistence curve, Laplace's law, speed of sound measurements and density profile across the liquid-vapor interface.

The proposed model, is applied to study the problem of binary droplet collisions. Using an extensive numerical simulation, it is shown that the proposed approach is capable of accurately capturing the dynamics and complexities of droplet collision. Comparison with theoretical predictions of the boundaries between different types of the collision outcomes are made and good agreement found. Moreover, the evolution of the shape of stable lamella film is successfully simulated and an excellent comparison between simulation and experiments was shown.

Furthermore, our proposed entropic lattice Boltzmann method (ELBM) for multiphase flows, is extensively employed towards simulation of dynamic vapor-liquid-solid interface problems or droplet wall interaction problems. A wide range of applications from capillary filling to liquid drop impact onto both flat and particularly macrot textured surfaces are studied in detail. We begin by comparing ELBM results with large number of theoretical and experimental findings, which clearly demonstrate the promising potential of the proposed methodology for simulation of complex dynamic phenomena of multiphase flows. Next we investigate numerically, the textured superhydrophobic surfaces that are capable of reducing the contact time of an impacting liquid drop. Using numerical simulations it is first demonstrated that the ELBM can accurately predict the dynamics of a liquid drop impacting a macrot textured surface. Also, from the simulation results obtained for the existing macrot textured surfaces, we shed light on the physics involved in contact time reduction, by uncovering the role of hydrodynamics and interfacial dynamics both of which play a crucial role in droplet wall interactions. This information is further utilized in analyzing the performance of existing surfaces in terms of parameter range and also in designing of novel surface textures that can employ various modes of droplet rebound.

Lastly, the accomplishments of this study are summarized and future directions of research and short coming of the present model are discussed.

Zusammenfassung

Numerische Simulationen von Mehrphasenströmungen sind häufig eine herausfordernde Aufgabe für die klassischen Berechnungsmethoden der Strömungsmechanik (CFD) welche durch eine makroskopischen Zustandsbeschreibung von Fluiden auf die Navier-Stokes Gleichungen führen. Der Grund dafür ist, dass diese Strömungen oft von Phänomenen im mesoskopischen und mikroskopischen Bereich angetrieben werden. Diese Phänomene müssen dann allerdings in makroskopischen Gleichungen beschrieben werden. Im Gegensatz zu den konventionellen CFD Methoden beruht die Lattice-Boltzmann Methode (LBM) auf mikroskopischen Modellen und mesoskopischen kinetischen Gleichungen in welchen die Dynamik sich aus der Bewegung von fiktiven Gruppierungen von Partikeln auf einem festen Gitter entwickelt. Aufgrund dieser kinetischen Natur hat sich herausgestellt, dass die LBM insbesondere in Anwendungen der Grenzflächendynamiken und komplexen Grenzflächen, sprich Mehrphasen oder Mehrkomponentenströmung, sich als nützlich erwiesen hat. Doch trotz vieler Versuche Mehrphasenströmungen mit der LBM zu modellieren sind die derzeitigen Ansätze immer noch nicht in der Lage komplexe dynamische Effekte effizient und quantitativ anzugehen.

In dieser Dissertation wird zuerst ein thermodynamisch konsistentes Lattice-Boltzmann Modell vorgestellt welches komplexe Simulationen von dynamischen Zweiphasenströmungen ermöglicht. Die wichtigste Neueinführung ist die Einbindung des entropischen Lattice-Boltzmann Stabilisieru-

ngsmechanismus um effektiv numerische Artefakte zu kontrollieren und zu stabilisieren, welche möglicherweise an den Grenzflächen eines Flüssigkeit-Gas-Systems auftreten. Dies zusammen mit einer polynomialen Darstellung von bekannten Zustandsgleichungen bringt eine beträchtliche Erweiterung des Einsatzbereichs. Dadurch werden Simulationen von Zweiphasenproblemen bei hoher Weber und Reynoldszahl mit ausreichend grossem Dichteverhältnis zwischen Flüssigkeit und Gas durchführbar.

Zweitens wird durch Simulationen der Flüssigkeit-Gas-Koexistenzkurve, der Laplace-Gleichung, der Messung der Schallgeschwindigkeit und des Dichteprofiles entlang der Flüssigkeit-Gas Grenzfläche die thermodynamische Bestimmtheit des Modells nachgewiesen.

Das vorgestellte Modell wird angewandt um das Problem der binären Tropfenkollision zu untersuchen. Mithilfe einer umfassenden numerischen Simulation wird gezeigt, dass der vorgestellte Ansatz die Dynamik und Komplexität von Tropfenkollisionen genau einfängt. Vergleiche mit theoretischen Vorhersagen der Bereichsgrenzen zwischen verschiedenen Arten von Kollisionsergebnissen wurden gemacht und eine gute Übereinstimmung wurde gefunden. Des Weiteren wird die Entwicklung der Form eines stabilen lamellaren Films erfolgreich simuliert und die Übereinstimmung zwischen Simulation und Experiment ist exzellent.

Zusätzlich wird unsere vorgestellte entropische Lattice-Boltzmann Methode (ELBM) für Mehrphasenströmungen ausgiebig in Simulationen von dynamischen Gas-Flüssigkeit-Fest Grenzflächenproblemen und Tropfen-Wand Interaktionsproblemen zum Einsatz gebracht. Eine grosse Anwendungsvielfalt von Kapillarfüllung zu Tropfenaufschlag auf sowohl flacher wie auch spezifisch makrotexturierten Oberflächen werden ausführlich untersucht. Wir beginnen indem wir die Ergebnisse der ELBM mit vielen theoretischen und experimentellen Ergebnissen vergleichen. Dies zeigt klar das vielversprechende Potential der vorgestellten Methodik für Simulationen von komplexen Phänomenen der Mehrphasenströmungen. Daraufhin untersuchen wir numerisch texturierte superhydrophobische Oberflächen die imstande sind die Kontaktzeit eines aufprallenden Flüssigkeitstropfen zu verringern.

Durch numerische Simulationen wird erst gezeigt, dass die ELBM die Dynamik des Aufpralls eines Tropfens auf einer makrotexturierten Oberfläche genau vorhersagen kann. Mit Hilfe der Simulationsergebnisse einer existierenden makrotexturierten Oberfläche erläutern wir die Physik die hinter der Kontaktzeitreduktion liegt indem wir die Rolle der Hydrodynamik und Grenzflächendynamik darlegen, welche beide eine bedeutende Rolle in Tropfen-Wand-Interaktionen spielen. Diese Information wird dann weiter benutzt um die Leistungsfähigkeit existierender Oberflächen in Bezug auf Parameterbereiche zu analysieren und auch im Design von neuartigen Oberflächentexturen die verschiedene Moden des Zurückspringens von Tropfen erlauben.

Zuletzt werden die Leistungen dieser Arbeit zusammengefasst und zukünftige Richtungen dieser Forschung sowie Nachteile des aktuellen Modells präsentiert.