a Ph.D. dissertation on

Nonlinear Acoustic Waves in Complex Media

Noé Jiménez



dissertation directors
F. Camarena
J. Redondo

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

June 2015



Nonlinear Acoustic Waves in Complex Media

Noé Jiménez

Instituto para la Gestión Integrada de Zonas Costeras

Universitat Politècnica de València

A thesis submitted in partial fulfillment of the requirements of the degree of

Doctor of Philosophy

June 23, 2015

Dissertation directors:

Francisco Camarena	Universitat Politècnica de València, Spain
Javier Redondo	Universitat Politècnica de València, Spain

Dissertation jury:

Georgios L. Theocharis	Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS), France
Carlos Fritsch	Consejo Superior de Investigaciones Cientificas (CSIC), Spain
Enrique Riera	Consejo Superior de Investigaciones Cientificas (CSIC), Spain
Yiu Way Lam	University of Salford, UK
Germán J. de Valcárcel	Universidad de Valencia, Spain

Le savant n'étudie pas la nature parce que cela est utile;
il l'étudie parce qu'il y prend plaisir et il
y prend plaisir parce qu'elle est belle.

Henri Poincaré

El científico no estudia la naturaleza por la utilidad que le pueda reportar;
la estudia por el gozo que le proporciona,
y este gozo se debe a la belleza que hay en ella.

Acknowledgements

While finishing my MSc studies on acoustics, Javier Redondo and Paco Camarena gave me the opportunity to collaborate with them in Gandía, firstly to investigate the ultrasonic dynamics of orange fruits. When I started my PhD, founded by a grant from the Polytechnic University of Valencia (UPV), I continued with their studies on nonlinear ultrasound applying them to nonlinear propagation in biological media. Building a lab from scratch is a very challenging task, and almost impossible under the actual founding conditions. I acknowledge the outstanding work of Paco and Javi, and his efforts for maintaining student founding as a priority. With them, I learned all I know about simulations and nonlinear ultrasound propagation in soft-tissues. As a result of his effort, I moved to the Columbia University in New York City for an astonishing stay in the UEIL laboratory directed by Elisa E. Konofagou, leading to the results of Part III.

I appreciate my PhD directors for their patience and for giving me freedom to explore other areas, that has enriched my work with a global view of many other acoustic topics. The interchange of ideas in the lab and the curiosity for test unknown things, triggered my collaboration with many other people. I want to acknowledge to Víctor Sánchez-Morcillo, not only for the opportunity to work in other interesting areas, but also for his contagious passion for science and its pleasure of understanding the nature. Because of him, I worked closely to many other researchers that have contributed to the present work, as Juan F.R. Archilla (Universidad de Sevilla, Spain), Lluis M. García-Raffi (UPV) and Yuriy Kosevich (Moscow University, Russia). With they, we developed the work summarized in Chapter 1, we organized a conference (Quodons in mica 2013) in Altea, Spain, and we are currently editing a book, among other publications.

Many other people has deeply contributed also to the contents of this thesis as Vicent Romero-García (LAUM, France), Rubén Picó (UPV) and El Mokhtar Hamham (Abdelmalek Essaadi University, Morocco) who is the major author of Chapter 3. Also, always inspiring were the collaborations with the people of Terrasa (Universitat Politénica de Catalunya, Spain) and specially with Kestutis Staliunas (iCREA) who deeply contributed to the contents of this Thesis. Even, I'm pleased also with the enlightening collaborations in other subjects that are not included in this document, as our works in microbubbles and nonlinear coupled oscillator rings with Serge Dos Santos and Ayache Bouakaz (Université Francois Rabelais, France), and their students Jennifer Chaline and Loïc Maurin.

Beyond these exciting professional collaborations, working in Gandía was strongly gratifying due to friendships there, not only with the seniors, but also with the oompa loompas of science, Jandri, Patri, Vicent, Silvia, Ester, María, and also in the last years Pablo, Ahmed and Luis.

También agradezco a mis padres y a mi familia su apoyo incondicional, incluso durante mis primeros años rebeldes.

A Mariajo, por todo el tiempo que le he usurpado.

Abstract

Nature is nonlinear. The linear description of physical phenomena is useful for explain observations with the simplest mathematical models, but they are only accurate for a limited range of input values. In the case of intense acoustics waves, linear models obviate a wide range of physical phenomena that are necessary for accurately describe such high-amplitude waves, indispensable for explain other exotic acoustic waves and mandatory for developing new applied techniques based on nonlinear processes. In this Thesis we study the interactions between nonlinearity and other basic wave phenomena such as non-classical attenuation, anisotropic dispersion and periodicity, and diffraction in specific configurations.

First, we present intense strain waves in a chain of cations coupled by realistic interatomic potentials. Here, the nonlinear ionic interactions and lattice dispersion lead to the formation of supersonic kinks. These intrinsically-nonlinear localized dislocations travel long distances without changing its properties and explain the formation of dark traces in mica crystals. Then, we analyze nonlinear wave processes in a system composed of multilayered acoustic media. The rich nonlinear dynamics of this system is characterized by its strong dispersion. Here, harmonic generation processes and the relation with its band structure are presented, showing that the nonlinear processes can be enhanced, strongly minimized or simply modified by tuning the layer parameters. In this way, we show how the dynamics of intense monochromatic waves and acoustic solitons can be controlled by artificial layered materials.

In a second part, we include diffraction and analyze four types of singular beams. First, we study nonlinear beams in two dimensional sonic crystals. In this system, the inclusion of anisotropic dispersion is tuned for obtain simultaneous self-collimation for fundamental and second harmonic beams. The conditions for optimal second harmonic generation are presented. Secondly, we present limited diffraction beam generation using equispaced axisymmetric diffraction gratings. The obtained beams are truncated version of zero-th order Bessel beams. Third, the grating spacing can be modified to achieve focusing, where the generated nonlinear beams presents high gain, around 30 dB, with a focal width which is between the diffraction limit and the sub-wavelength regime, but with its characteristic high amplitude side lobes strongly reduced. Finally, we observe that waves diffracted by spiral-shaped gratings generate high-order Bessel beams, conforming nonlinear acoustic vortex. The conditions to obtain arbitrary-order Bessel beams by these passive elements are presented.

Finally, the interplay of nonlinearity and attenuation in biological media is studied in the context of medical ultrasound. First, a numerical method is developed. The method solves the constitutive relations for nonlinear acoustics and the frequency power law attenuation of biological media is modeled as a sum of relaxation processes. A new technique for reducing numerical dispersion based on

artificial relaxation is included. Second, this method is used to study the harmonic balance as a function of the power law, showing the role of weak dispersion and its impact on the efficiency of the harmonic generation in soft-tissues. Finally, the study concerns the nonlinear behavior of acoustic radiation forces in frequency power law attenuation media. We present how the interplay between nonlinearity and the specific frequency power law of biological media can modify the value for acoustic radiation forces. The relation of the nonlinear acoustic radiation force with thermal effects are also discussed.

The broad range of nonlinear processes analyzed in this Thesis contributes to understanding the behavior of intense acoustic waves traveling trough complex media, while its implications for enhancing existent applied acoustics techniques are presented.

Resumen

La Naturaleza es no lineal. La descripción lineal de los fenómenos físicos es de gran utilidad para explicar nuestras observaciones con modelos matemáticos simples, pero éstos sólo son precisos en un limitado rango de validez. En el caso de onda acústica de alta intensidad, los modelos lineales obvian un amplio rango de fenómenos físicos que son necesarios para describir con precisión las ondas de gran amplitud, pero además son necesarios para explicar otros procesos más exóticos e indispensables para desarrollar nuevas aplicaciones basadas en propagación no lineal. En esta Tesis, estudiamos las interacciones entre no linealidad y otros procesos complejos como atenuación no-clásica, dispersión anisotrópica y periodicidad, y difracción en configuraciones específicas.

En primer lugar, presentamos ondas de deformación en una cadena de cationes acoplados por potenciales realísticas. Aquí, las interacciones no lineales entre iones, producen la conformación de kinks supersónicos. Estas dislocaciones localizadas intrínsecamente no lineales viajan por la red largas distancias sin variar sus propiedades, y pueden explicar la formación de trazas en minerales como la mica. Aumentando la escala del problema, estudiamos los procesos acústicos no lineales en medios multicapa. La rica dinámica de estos medios está caracterizada por la fuerte dispersión debido a la periodicidad del sistema. Aquí, estudiamos los procesos de generación de harmónicos, mostrando como modificando la estructura podemos potenciar, minimizar, o simplemente modificar artificialmente la transferencia de energía entre las componentes espectrales, y de esta manera controlar la dinámica de las ondas y solitones en el interior de la estructura.

En la segunda parte, incluimos difracción y analizamos cuatro tipos de haces singulares. En primer lugar, analizamos haces ultrasónicos no lineales en cristales de sonido bidimensionales. En este sistema, las propiedades de anisotropía del medio son ajustadas para obtener la auto-colimación simultánea del primer y segundo harmónico. Así, se obtiene la propagación no difractiva para las dos componentes. En segundo lugar, presentamos haces de difracción limitada empleando rejillas de difracción axisimétricas. Por último, demostramos la generación de haces de Bessel de orden superior mediante estructuras en espiral.

En la última parte, estudiamos la competición entre no linealidad y la atenuación y dispersión observable en medios biológicos en el contexto de las aplicaciones de biomédicas de los ultrasonidos. En primer lugar desarrollamos un nuevo método computacional para la dependencia frecuencial en forma de ley de potencia de la absorción característica de los tejidos. Este método en dominio temporal es usado posteriormente para revisar los procesos básicos no lineales prestando especial interés en el paper de la dispersión del tejido. Por último, la resolución de las ecuaciones constitutivas nos permite abordar la descripción no lineal de la fuerza de radiación acústica producida en tejidos biológicos, y las implicaciones existentes con la deposición de energía y transferencia de momento para ondas

ultrasónicas de alta intensidad.

El amplio abanico de procesos no lineales analizados en esta tesis contribuye a una mejor comprensión de la dinámica de las ondas acústicas de alta intensidad en medios complejos, donde las implicaciones existentes en cuanto a la mejora de sus aplicaciones prácticas son puestas de manifiesto.

Resum

La Naturalesa és no lineal. La descripció lineal dels fenòmens físics és de gran utilitat per a explicar les nostres observacions amb models matemàtics simples, però aquests sol són precisos en un limitat rang de validesa. En el cas d'ona acústica d'alta intensitat, els models lineals obvien un ampli rang de fenòmens físics que són necessaris per a descriure amb precisió les ones de gran amplitud, però a més són necessaris per a explicar altres processos més exòtics i indispensables per a desenvolupar noves aplicacions basades en propagació no lineal. En aquesta Tesi, estudiem les interaccions entre no-linealitat i altres processos complexos com atenuació no-clàssica, dispersió anisotròpica i periodicitat, i difracció en configuracions específiques.

En primer lloc, presentem ones de deformació en una cadena de cations acoblats per potencials realistes. Ací, les interaccions no lineals entre ions, produeixen la conformació de kinks supersònics. Aquestes dislocacions localitzades intrínsecament no lineals viatgen per la xarxa llargues distàncies sense variar les seues propietats, i poden explicar la formació de traces en minerals com la mica. Augmentant l'escala del problema, estudiem els processos acústics no lineals en mitjans multicapa. La rica dinàmica d'aquests mitjans es caracteritza per la forta dispersió a causa de la periodicitat del sistema. Ací, estudiem els processos de generació d'harmònics, mostrant com modificant l'estructura podem potenciar, minimitzar, o simplement modificar artificialment la transferència d'energia entre les components espectrals, i d'aquesta manera controlar la dinàmica de les ones i solitons a l'interior de l'estructura.

En la segona part, incloem difracció i analitzem quatre tipus de feixos singulars. En primer lloc, analitzem feixos ultrasònics no lineals en cristalls de so bidimensionals. En aquest sistema, les propietats d'anisotropia del medi són ajustades per a obtenir l'acte-col·limació simultània del primer i segon harmònic. Així, s'obté la propagació no difractiva per a les dues components. En segon lloc, presentem feixos de difracció limitada emprant reixetes de difracció axisimètriques. Per últim, vam demostrar la generació de feixos de Bessel d'ordre superior mitjançant estructures en espiral. En l'última part, estudiem la competició entre no linealitat i l'atenuació i dispersió observable en medis biològics en el context de les aplicacions biomèdiques dels ultrasons. En primer lloc desenvolupem un nou mètode computacional per a la dependència freqüencial en forma de llei de potència de l'absorció característica dels teixits biològics. Aquest mètode en domini temporal és usat posteriorment per a revisar els processos bàsics no lineals prestant especial interés en el paper de la dispersió del teixit. Per últim, la resolució de les equacions constitutives ens permet abordar la descripció no lineal de la força de radiació acústica produïda en teixits biològics, i les implicacions existents amb la deposició d'energia i transferència de moment per a ones ultrasòniques d'alta intensitat.

L'ampli ventall de processos no lineals analitzats en aquesta tesi contribueix a una millor comprensió de la dinàmica de les ones acústiques d'alta intensitat en medis complexos, on les implicacions existents quant a la millora de les seues aplicacions practiques són posades de manifest.

Contents

Page

Part I Nonlinear Waves in Lattices 1

Chapter 1 Localized nonlinear waves in lattices 3
1.1 Motivation: dynamics of potassium ions in layered silicates 4
1.2 Minimal model with realistic potentials 7
1.3 Tail analysis 10
1.4 Supersonic ultra-discrete kinks 13
1.5 Interaction with several neighbours 23
1.6 The effect of nuclear repulsion: kinks with short–range ZBL potential . . 26
1.7 The effect of the substrate potential: lattice kinks or crowdions 28
1.8 Some numerical simulations with ultradiscrete kinks or crowdions 37
1.9 Conclusions 40

Chapter 2 Nonlinear acoustic waves in layered media 45
2.1 Introduction 46
2.2 Dispersion relations 47
2.3 Full-wave model 50
2.4 Harmonic generation in layered media 57
2.5 Nonlinear acoustic field management 72
2.6 Dispersion managed acoustic solitons 90
2.7 Conclusions 99

Part II Nonlinear Singular Beams 103

Chapter 3 Nonlinear self-collimated sound beams in periodic media 105
3.1 Introduction 106
3.2 Nonlinear sound beam propagation model 108
3.3 Self-collimation of intense acoustic beams 110
3.4 Numerical simulation. 114
3.5 Conclusions and Remarks 116

Chapter 4 Acoustic Bessel beams generated by axisymmetric gratings **121**
4.1 Introduction . . . 122
4.2 Generation of Zero th-order Bessel beams by axisymmetric gratings . . . 123
4.3 Experimental validation. . . . 126
4.4 Conclusions . . . 129

Chapter 5 Nonlinear focused beams by axisymmetric gratings **133**
5.1 Introduction . . . 134
5.2 Axisymmetric diffraction grating design . . . 137
5.3 Small amplitude focusing. . . . 138
5.4 Transition from linear-to-nonlinear focusing . . . 144
5.5 High intensity regime . . . 145
5.6 Conclusions . . . 150

Chapter 6 Chiral beams generated by spiral gratings **153**
6.1 Introduction . . . 154
6.2 From axisymmetric to chiral beams . . . 155
6.3 Chiral beams generated by spiral gratings. . . . 158
6.4 High order Bessel beams generated by n-arm spirals . . . 169
6.5 Weakly nonlinear chiral beams. . . . 180
6.6 Conclusions . . . 184

PART III NONLINEAR ACOUSTIC WAVES IN BIOLOGICAL MEDIA 189

Chapter 7 Time-domain nonlinear acoustic wave modelling of soft-tissue media **191**
7.1 Introduction . . . 192
7.2 Generalized nonlinear acoustics model for multiple relaxation media . . . 197
7.3 Numerical solution by finite differences in time domain . . . 200
7.4 Validation. . . . 206
7.5 Results . . . 210
7.6 Summary . . . 222

Chapter 8 Nonlinear plane waves in frequency power law attenuation media **229**
8.1 Introduction . . . 230
8.2 Nonlinear coherence length . . . 233
8.3 Competition between nonlinearity and power law attenuation and dispersion . . . 236
8.4 Plane wave simulations in power law media . . . 238
8.5 Nonlinear efficiency . . . 242

8.6 Phase changes induced by dispersion 244
8.7 Conclusions 247

Chapter 9 Nonlinear acoustic radiation forces in biological media **251**
9.1 Introduction 252
9.2 One dimensional acoustic radiation force 254
9.3 Nonlinear radiation force in tissue-like media 258
9.4 Power law dependence 262
9.5 Relation of nonlinear absorption and tissue heating rate 263
9.6 Conclusions 269

Index of terms **272**



Part I

Nonlinear Waves in Lattices

