



Universidad de Cantabria

Facultad de Ciencias

**ON LIGHT SCATTERING BY NANOPARTICLES WITH
CONVENTIONAL AND NON-CONVENTIONAL
OPTICAL PROPERTIES**

PH.D. THESIS

Braulio García-Cámara

Santander, July 2010

DEPARTAMENTO DE FÍSICA APLICADA
FACULTAD DE CIENCIAS
UNIVERSIDAD DE CANTABRIA

PH.D. THESIS

**ON LIGHT SCATTERING BY NANOPARTICLES WITH
CONVENTIONAL AND NON-CONVENTIONAL OPTICAL
PROPERTIES**

Author:

Braulio García-Cámara

Advisor:

Fernando Moreno

Professor of Optics
Universidad de Cantabria

Francisco González

Professor of Optics
Universidad de Cantabria

Santander, July 2010

Prof. Fernando Moreno Gracia, Catedrático de Óptica de la Universidad de Cantabria y Prof. Francisco González Fernández, Catedrático de Óptica de la Universidad de Cantabria, certifican:

Que la presente Memoria, titulada “**Sobre la Difusión de la Luz por Nanopartículas con Propiedades Ópticas Convencionales y No Convencionales**”, ha sido realizada, bajo nuestra dirección, por **Braulio García-Cámara**, y constituye su Tesis para optar al grado de Doctor por la Universidad de Cantabria. Asimismo emitimos nuestra conformidad para que dicha memoria sea presentada y tenga lugar, posteriormente, la correspondiente lectura.

Santander, a 24 de Julio de 2010

Fdo.: Prof. Fernando Moreno Gracia

Fdo.: Prof. Francisco González Fernández

*Well I don't know what I'm looking for but I know that I just
wanna look some more.
— Brendan Benson.*

Acknowledgements

*"Mientras el río corra, los montes hagan sombra
y en el cielo haya estrellas, debe durar la
memoria del beneficio recibido en la mente del
hombre agradecido"*
— Virgilio, 70-19 a.C., poeta romano

En primer lugar me gustaría mostrar mi más sincero agradecimiento a todos y cada uno de los miembros del Grupo de Óptica de la Universidad de Cantabria por acogerme durante estos años, por su ayuda y por el ambiente de trabajo generado. En particular, mi agradecimiento a los directores de esta tesis doctoral, los profesores Fernando Moreno y Francisco González, así como al profesor José María Sáiz, por brindarme esta oportunidad, por guiarme y aconsejarme en cada tema tratado a lo largo de este trabajo.

Al profesor Gordon Videen del Army Research Laboratory (ARL) por sus ideas y comentarios que han servido de incentivo en muchas ocasiones.

A los profesores Vahid Sangdoghdar, Gonçal Badenes y Olivier Martin por permitirme formar parte de sus grupos durante unos meses y poder aprender tantas cosas, tanto a nivel profesional como personal, durante mis estancias en Suiza y Barcelona.

A dos grandes amigos y grandes profesionales, Olivier Merchiers y José Luis Ayala, por su constante ayuda en la realización de esta memoria, por enseñarme y abrirme nuevos campos de investigación, así como por poder contar con su amistad.

A la Universidad de Cantabria y en particular al Vicerrectorado de Investigación por financiar este trabajo a través de la beca predoctoral.

A José Manuel por su continua disponibilidad a la hora de resolver cualquier trámite burocrático.

A todos y cada uno de los compañeros que he tenido a lo largo de estos años, tanto en Santander como en Zürich, Lausanne y Casteldefells por su continua ayuda y los buenos momentos que han hecho más agradable el trabajo duro.

Y por último y no menos importante, a mi familia y amigos que han tenido que soportar mi presencia y mis ausencias.

Contents

Contents	9
1 Introduction	13
1.1 Plasmonics	15
1.1.1 Surface Plasmon Resonances (SPRs). Planar Substrates	16
1.1.2 Metallic Nanoparticles. Localized Surface Plasmon Resonances . .	18
1.2 Systems with Magnetic Response	19
1.3 Objective and Overview of this Thesis	24
1.3.1 Objective	24
1.3.2 Overview of the Thesis	26
2 Theoretical Overview	29
2.1 Introduction	29
2.2 The Light Scattering Problem	29
2.3 Mie Theory for Light Scattering by a Sphere	30
2.3.1 Solutions to the Wave Equation	30
2.3.2 Incident and Scattered Fields	33
2.3.3 Scattering, Absorption and Extinction Cross Sections	36
2.3.4 Scattered Intensity	38
2.4 Scattering by Small Particles	40

2.4.1	Scattering by Dipole-Like Particles	40
2.5	Second Order Approximation of Mie Theory	42
I	Study of the Scattering Properties of an Isolated Particle	47
3	Light Scattering Resonances by Small Particles with Electric and Magnetic Prop- erties	49
3.1	Introduction	49
3.2	Mie Resonances	50
3.3	Dependence of Mie Resonances with the Optical Properties	52
3.4	Dependence of Mie Resonances with the Particle Size	57
3.5	Scattering Diagrams for Resonant Situations	61
3.6	Conclusions	65
4	Directionality of the Scattered Light by an Isolated Particle	67
4.1	Introduction	67
4.2	Kerker's Theory	68
4.2.1	Zero-Backward Scattering	68
4.2.2	Zero-Forward Scattering	70
4.2.3	Zero-Forward Scattering and the Optical Theorem	71
4.2.4	Identity TM-TE polarization under Kerker's Conditions	72
4.3	Exception to the Zero-Forward-Scattering Theory	73
4.4	Size effects on the Kerker's Conditions	75
4.4.1	Influence of Particle Size on the Backward Direction	77
4.4.2	Influence of Particle Size on the Forward Direction	78
4.5	Generalization of the Minimum Light Scattering	83
4.6	Conclusions	88
5	Dependence of the Directional Conditions: From the Near to the Far-Field	91
5.1	Introduction	91
5.2	Theoretical Overview	93
5.3	Evolution of the Scattered Intensity	97
5.3.1	Influence of Particle Size	103
5.4	Conclusions	104

II Study of the Scattering Properties of Agglomerates of Nanoparticles 107

6 Dimers of Nanoparticles with Directional Behaviors: Far- and Near-Field Calculations	109
6.1 Introduction	109
6.2 Coupled Electric and Magnetic Dipole Method	110
6.3 Surface Integral Equations for 3D Nanostructures	113
6.4 Far-field Scattering by an Aggregate	113
6.4.1 Particles with Minimum Forward Scattering	114
6.4.2 Particles with Minimum Backward Scattering	117
6.4.3 Combined Configuration: Particles with Different Optical Constants	117
6.5 Near-Field by a Dimer of Nanoparticles	121
6.6 Conclusions	125
7 Design of a Negative-Refractive-Index (NRI) System	129
7.1 Introduction	129
7.2 Description of the System	130
7.2.1 Dependence on the Particle Distance	135
7.2.2 Dependence on Possible Rotations of the System	135
7.3 Extension of the Alternate-Array	139
7.3.1 Sensitivity of the Array to Mistakes in the Arrangement	141
7.3.2 Stacks of Arrays	143
7.4 Conclusions	145

III Study of Light Scattering by a Nanoparticle Above a Substrate 147

8 Interaction of Nanoparticles with Substrates: Effects on the Dipolar Behavior of the Particles.	149
8.1 Introduction	149
8.2 Comparison between 2D and 3D Geometries	150
8.3 Particle Above a Dielectric Substrate	156
8.4 Particle Above a Metallic Substrate	163
8.5 Conclusions	166

9 Conclusions and Further Ideas	169
9.1 Summary and Conclusions	169
9.2 Further Ideas	171
Resumen en castellano	176
Publications and Conferences	182
Bibliography	183