

# Física II

Jordi Bonastre Muñoz  
Marc Figueras Atienza  
Antoni Pérez Navarro  
Xavier Xirgu Aleixandre

PID\_00146908

Material docent de la UOC


**Jordi Bonastre Muñoz**

Enginyer electrònic per la Universitat de Barcelona (UB). Des del 2005 és membre del Departament de Física de la Universitat de Girona (UdG), primer com a investigador en formació i després com a professor associat. Imparteix classes de Ciència de materials i de Física general a l'Escola Politècnica Superior (EPS) de la mateixa universitat. Actualment escriu la seva tesi doctoral sobre aliatges nanocristal·lins ferromagnètics tous.


**Marc Figueras Atienza**

Doctor en Ciències Físiques per la Universitat Autònoma de Barcelona (UAB). Ha fet treballs de recerca en òptica, sistemes dinàmics i caos, i va ser professor al Departament de Física de la UAB entre els anys 1996 i 2002. Entre el 2002 i el 2004 va treballar com a editor de textos científics a l'Editorial Planeta i entre el 2003 i el 2005 va ser professor al Departament de Física i Enginyeria Nuclear de la Universitat Politècnica de Catalunya. Actualment combina les tasques docents a la Universitat Pompeu Fabra amb treballs com a autònom de traducció, revisió i edició de textos científics i tècnics.


**Xavier Xirgu Aleixandre**

Gestor promotor del grup Tecnio TIG de la Universitat de Girona. És llicenciat en Ciències Físiques per la Universitat de Barcelona, enginyer electrònic superior per la Universitat Ramon Llull, i té un màster de Gestió de projectes (MPM). Ha participat com a investigador científic a la Universitat de Barcelona dins el projecte internacional del Gran Col·lisionador d'Hadrons per al CERN, i com a desenvolupador de busos de comunicacions militar a la plataforma LISA Pathfinder, projecte de l'Agència Espacial Europea (ESA). Ha estat assessor tècnic del projecte DES (Dark Energy Survey), gestor del projecte Programa Platino i també del projecte SIDE (Super IFU Deployable Experiment), projecte internacional per al Gran Telescopi de Canàries. Actualment realitza tasques de gestió de transferència de tecnologia amb empreses i d'enllaç amb les plataformes Prometeo, INES, eVIA, AETIC i NESSI, entre d'altres.


**Antoni Pérez Navarro**

Doctor en Ciències Físiques per la Universitat Autònoma de Barcelona (UAB). Va ser professor d'electromagnetisme al Departament de Física de la UAB entre els anys 1996 i 2000. Entre els anys 2000 i 2005 va treballar a AURENSIS (SYSIGSA), en projectes de sistemes d'informació geogràfica (SIG). Des del 2003 col·labora amb la UOC, primer com a consultor i, des de 2005, com a professor propi dels Estudis d'Informàtica, Multimèdia i Telecomunicació, on és responsable de les assignatures de física i SIG, i coordinador de postgrau dels Estudis d'Informàtica, Multimèdia i Telecomunicació. Des del 2007 col·labora també amb l'Escola Universitària Salesiana de Sarrià com a professor de Física.

L'encàrrec i la creació d'aquest material docent han estat coordinats pel professor: Antoni Pérez Navarro (2012)

Primera edició: febrer 2012

© Jordi Bonastre Muñoz, Marc Figueras Atienza, Antoni Pérez Navarro, Xavier Xirgu Aleixandre

Tots els drets reservats

© d'aquesta edició, FUOC, 2012

Av. Tibidabo, 39-43, 08035 Barcelona

Disseny: Manel Andreu

Realització editorial: Eureka Media, SL

Dipòsit legal: B-1.009-2012

ISBN: 978-84-693-4295-4



*Els textos i imatges publicats en aquesta obra estan subjectes –llevat que s'indiqui el contrari– a una llicència de Reconeixement-Compartir igual (BY-SA) v.3.0 Espanya de Creative Commons. Podeu modificar l'obra, reproduir-la, distribuir-la o comunicar-la públicament sempre que en citeu l'autor i la font (FUOC. Fundació per a la Universitat Oberta de Catalunya), i sempre que l'obra derivada quedi subjecta a la mateixa llicència que el material original. La llicència completa es pot consultar a <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/es/legalcode.ca>*

## Introducció

A aquestes alçades de la titulació ja teniu una idea de les bases de la física: de dinàmica, d'ones, d'electromagnetisme i de termodinàmica. En aquesta assignatura ens centrarem en la segona part: la que correspon a les ones i a l'electromagnetisme, que és la més important per a la titulació que esteu cursant.

A l'assignatura es tracta el tema de les ones des de diversos punts de vista, tot i que el gruix principal està en les ones electromagnètiques. Farem una aproximació que va del més general, les ones; al més particular, que seria com es propaga una ona electromagnètica en una línia de transmissió o com en podem generar una amb un "objecte" que s'anomena *dipol elèctric oscil·lant*. Per veure-ho més específicament, tot seguit us mostrem què tracta cadascun dels set mòduls en què s'estructura l'assignatura:

- **Mòdul 1:** al primer mòdul s'introdueixen les ones en general. Veurem quins tipus d'ona hi ha, com es descriuen matemàticament i quines propietats tenen. Ens centrarem en un tipus d'ona alhora molt concret i molt útil, que són les ones harmòniques, i veurem què passa quan interaccionen dues ones harmòniques, cosa que es coneix com a *interferència*. Tot seguit veurem què passa quan l'ona incideix en un canvi de medi, la qual cosa donarà peu als fenòmens de la reflexió i la refracció, però també al de les ones estacionàries. A continuació veurem que una de les propietats de l'ona, la freqüència, varia segons si l'emissor de l'ona o el receptor estan en moviment o no: és l'efecte Doppler. I acabarem el mòdul explicant quina és l'energia d'una ona.
- **Mòdul 2:** un cop introduïdes les ones en general us en presentarem un cas particular: les ones acústiques. Aquestes pertanyen a les ones longitudinals i expliquen, per exemple, com es propaga el so. De fet, el so serà un dels principals objectius del mòdul, i l'explicarem amb força detall. Ara bé, el so no seria res si no el poguéssim percebre, i és per això que també introduïrem en aquest mòdul com funciona l'òrgan que ens permet percebre'l: l'orella. I acabarem el mòdul fent un petit apunt a una de les "aplicacions" més importants del so: la música.
- **Mòdul 3:** aquest mòdul està dedicat a l'òptica geomètrica, i serà l'únic mòdul que no tractarà d'ones. Com és possible que el mòdul que tracta d'òptica, que és la ciència que estudia la llum i el seu comportament, no tracti d'ones, si la llum és una ona? Doncs això és precisament el que us explicarem aquí. La naturalesa de la llum no va estar clara fins fa relativament poc temps (i de fet podríem dir que, segons com, encara no ho està) i durant molts segles es va pensar que la llum eren un feix de partícules. De fet, hi

ha tot un conjunt de fenòmens que es poden explicar si es considera d'aquesta manera. Són aquests els fenòmens que estudiarem en aquest mòdul: la reflexió, la refracció i la formació d'imatges amb lents i quins problemes tenen aquestes imatges. Veurem també en aquest mòdul algunes aplicacions dels conceptes estudiats, com ara el microscopi, el telescopi o la fibra òptica. Per acabar, com en el cas de l'orella, estudiarem la fisiologia de l'òrgan que permet rebre la llum: l'ull.

- **Mòdul 4:** fins aquest mòdul haurem vist les ones en general i els casos particulars del so i la llum (tot i que en aquest cas, sense considerar-la com a ona). En aquest mòdul ens endinsarem en l'àmbit de les ones que més ens interessin: les ones electromagnètiques. Abans de fer-ho, però, repassarem les lleis de Maxwell, que ja hauríeu de conèixer. L'única novetat en aquest repàs serà que escriurem algunes expressions en funció d'un operador nou, l'operador nabla,  $\vec{\nabla}$ , que, tot i que ja haurem introduït al mòdul d'ones, serà aquí on el treballarem realment. El mòdul acabarà presentant-vos les ones electromagnètiques. Aquest hauria de ser un mòdul que hauríeu de llegir força de pressa perquè la majoria de conceptes són coneguts.
- **Mòdul 5:** un cop presentades les ones electromagnètiques, veurem com es propaguen i quines en són les característiques i propietats. Aquest mòdul podríem dir que és el mòdul germà del mòdul 3, d'òptica geomètrica, ja que mostrarà els mateixos resultats però, ara sí, considerant la llum com una ona electromagnètica i no com un feix de partícules, amb la qual cosa els resultats que obtindrem seran vàlids per a qualsevol ona electromagnètica. Tornarem a veure la refracció i la reflexió, però ara farem servir un tractament ondulatori. Aquest tractament ens permetrà determinar no només en quina direcció sortirà la llum reflectida, sinó també quina n'és la intensitat. També podrem explicar nous fenòmens com ara que en determinats casos no hi ha ona reflectida. Acabarem el mòdul explicant per què en un túnel no se sent la ràdio (les guies d'ona) i què passa dins el microones (caixes ressonants).
- **Mòdul 6:** quan arribeu en aquest mòdul ja hauríeu de tenir una idea bastant clara de què són les ones electromagnètiques i de les seves propietats. Fixeu-vos que hem anat del més general, les ones, al més particular, les ones electromagnètiques, i amb aquest mòdul seguim en aquesta línia i en el que afecta directament un enginyer de telecomunicació: la transmissió d'una ona a través d'una línia de transmissió. Veurem que no totes les ones es poden propagar per una línia de transmissió i que la teoria de circuits que hem fet servir fins ara no sempre és vàlida. Al mòdul us mostrarem també, a títol informatiu, una llista de línies perquè les conegueu.
- **Mòdul 7:** finalment, a l'últim mòdul, tractarem un tema que a aquestes alçades encara està pendent: com generar ones electromagnètiques. Al mòdul d'ones havíem vist com generar una ona en un estany (amb una pedra)

o com produir so (només heu de fer un crit), però una ona electromagnètica? Això és precisament el que tractarem en aquest mòdul. Això sí, ho farem només en un cas molt particular i resoldrem només el cas del que es coneix com *dipol elèctric oscil·lant*. Veureu què és la radiació i què són les antenes, i veureu també quin procediment cal seguir per a calcular la radiació generada per l'esmentat dipol elèctric, que no és més que un tipus d'antena.

Potser us espanta veure tant de temari, però no hauríeu de patir: d'una banda, alguns apartats són més divulgatius i només persegueixen ajudar-vos a entendre i consolidar conceptes vistos en apartats anteriors; de l'altra, s'ha intentat, en la mesura del possible, prescindir de demostracions. Aquestes només s'han mantingut quan ha estat necessari des d'un punt de vista pedagògic (perquè la demostració ajuda a entendre el concepte); o bé quan la demostració inclou alguna tècnica que pot ser útil en altres situacions. Per tant, aneu fent tot seguint la planificació del curs, sense por i sense espantar-vos.

## Com seria convenient estudiar?

Per tal d'assolir les competències de l'assignatura, teniu estructurats els mòduls en les parts següents :

- Introducció: s'indica de què tractarà el mòdul.
- Objectius: es posa de manifest què es pretén aconseguir amb aquell mòdul.
- Cos del mòdul: és el nucli del mòdul i de les explicacions.
- Problemes resolts: selecció de problemes resolts.
- Resum del mòdul.
- Exercicis d'autoavaluació: conjunt de preguntes amb la solució.
- Glossari: es recullen les definicions de paraules clau del mòdul.
- Bibliografia: es recullen diversos llibres i adreces web que us poden ajudar a estudiar.

El que hauríeu de fer és començar per llegir la introducció i els objectius. Això us permetrà situar-vos en el mòdul. A partir d'aquí aneu llegint i avançant en el mòdul intentant entendre el que llegiu. Si no ho enteneu a la primera, no hi fa res. Continueu llegint i potser més endavant, en algun altre apartat, podreu entendre aquell concepte que se us havia resistit. No us desanimeu mai: segur que necessitareu diverses lectures per entendre tot el que llegiu, però això és normal en el procés d'aprenentatge.

D'altra banda, al llarg del mòdul trobareu petits exercicis i activitats que podeu anar fent. En principi no són imprescindibles per a seguir la lectura, així que els podeu obviar en una primera lectura i intentar resoldre'ls, en una segona. Convé que els intenteu resoldre sense mirar-ne la resolució, i mirar-la només com a últim recurs. Tingueu sempre ben present que s'aprèn més amb un problema que no surt que amb 50 que surten.

També hi trobareu enllaços amb simulacions que us poden facilitar la comprensió dels conceptes implicats.

L'últim apartat de cada mòdul, previ al resum, és de problemes resolts: convé que els feu abans de passar al mòdul següent ja que aquests problemes us ajudaran a assentar els coneixements. A més, cada mòdul fa servir conceptes que s'han explicat en mòduls anteriors (llevat del d'acústica, que fa servir el con-

cepte d'ones però després cap altre mòdul no fa servir el que s'ha estudiat a acústica). La idea dels problemes resolts és que intenteu fer-los sense mirar-ne la solució: només així adquirireu l'habilitat i les competències necessàries per a resoldre'ls. Per ajudar-vos en aquest sentit us hem posat les solucions separades dels enunciats.

Després teniu el resum. No us el prengueu només com un resum del mòdul, sinó com una mena de llista de temes que hauríeu de conèixer quan hàgiu acabat el mòdul. Si alguna afirmació del resum o algun comentari us sorprèn, voldrà dir que allò no ha quedat clar i convé que ho repasseu.

Com a tancament de la part docent del mòdul hi ha els exercicis d'autoavaluació. Feu-los quan el cos teòric i els exemples i els problemes resolts estiguin ja estudiats. Feu-ho només al final: les preguntes d'autoavaluació haurien de servir, més que no pas per a saber què heu après, per a detectar petits conceptes que se us han escapat, o per a detectar detalls als quals no havíeu donat prou importància, o també per a corregir alguns malentesos. Un cop més, si alguna resposta us sorprèn, investigueu-ne les possibles solucions i intenteu entendre per què és aquella la resposta; i sobretot, no deixeu passar el mòdul sense entendre el perquè de totes les solucions. Les que no quedin clares, pregunteu-les al fòrum de l'aula.

A banda d'aquests apartats teniu el glossari i la bibliografia. El glossari us pot servir de consulta ràpida per a seguir la lectura del mòdul quan aparegui algun concepte que no tingueu clar. Pel que fa a la bibliografia, no espereu al final per mirar-vos-la: allà teniu un conjunt de llibres i enllaços que us poden resultar molt útils.

Un consell important, ja abans de començar: aneu amb molt de compte amb la notació, especialment en allò referent a les magnituds vectorials i als eixos de coordenades. Si sou curiosos en el seu tractament (si no us deixeu les "fletxes" que indiquen vectors), si penseu tots els problemes tridimensionalment (o bidimensionalment, si així us ho indiquen) tindreu molt de guanyat a l'hora d'avançar en l'estudi.

I compteu també que aquests mòduls tenen la seva complementarietat en, per una banda, la figura del consultor, que us aclarirà qualsevol dubte que us sorgeixi sobre qualsevol concepte teòric, problema o activitat; i, per una altra, en la bibliografia que us proporcionem, que us permetrà ampliar els conceptes donats, o bé estudiar-los des d'una perspectiva diferent, cosa que també enriquirà els vostres coneixements.

La tasca que us espera no és senzilla, però tampoc ha de ser necessàriament complexa: la trampa, el "truc", és la constància. Que tingueu una molt bona assignatura!

## Objectius

A part dels objectius específics de cada mòdul, aquesta assignatura té uns objectius generals. Aquests objectius, dels quals us fem una llista a sota, emmarquen aquesta assignatura en el conjunt de la titulació i doten de sentit aquesta assignatura:

1. Saber què és una ona i quines característiques defineixen el moviment ondulatori.
2. Conèixer els diferents tipus d'ones i les seves característiques definitòries.
3. Saber com es pot descriure matemàticament una ona per poder identificar els paràmetres bàsics de qualsevol ona harmònica en diverses situacions.
4. Saber operar amb l'expressió matemàtica de l'ona.
5. Conèixer i comprendre els fenòmens propis de les ones com la difracció o la interferència.
6. Conèixer els fonaments de l'acústica.
7. Conèixer els fonaments de l'òptica geomètrica i, en particular, les lleis de la refracció i la reflexió.
8. Conèixer algunes aplicacions de l'òptica geomètrica, com ara el microscopi, el telescopi i, sobretot, la fibra òptica.
9. Conèixer les lleis de Maxwell en forma diferencial.
10. Saber què és una ona electromagnètica i com es propaga.
11. Ser capaços d'obtenir les lleis de l'òptica a partir de les ones electromagnètiques i comprendre que són vàlides per a qualsevol ona electromagnètica.
12. Saber quins nous fenòmens es poden explicar amb les ones electromagnètiques que no es podien explicar amb l'òptica geomètrica.
13. Saber com es comporten les ones electromagnètiques en guies d'ona, en una caixa ressonant i una línia de transmissió.
14. Conèixer el concepte de *radiació* i saber com es poden generar ones electromagnètiques.



## Continguts

Mòdul didàctic 1

### **Ones. Introducció als fenòmens ondulatoris**

Marc Figueras Atienza

1. Les ones
2. Descripció matemàtica de les ones
3. Ones harmòniques
4. Superposició d'ones
5. Ones i condicions de contorn
6. Moviment relatiu d'emissor i observador. L'efecte Doppler
7. Transport d'energia en les ones
8. Problemes resolts

Mòdul didàctic 2

### **Acústica. Ones mecàniques i so**

Marc Figueras Atienza

1. Acústica
2. Percepció d'estímuls físics
3. Problemes resolts

Mòdul didàctic 3

### **Òptica geomètrica. L'òptica sense ones**

Marc Figueras Atienza

1. La llum i el seu estudi: l'òptica
2. L'òptica geomètrica
3. Sistemes òptics i formació d'imatges
4. Percepció de la llum
5. Problemes resolts

Mòdul didàctic 4

### **Lleis de Maxwell**

Jordi Bonastre Muñoz

1. Repàs d'electromagnetisme: electrostàtica
2. Repàs d'electromagnetisme: magnetostàtica i inducció
3. Lleis de Maxwell
4. Ones electromagnètiques
5. Problemes resolts

Mòdul didàctic 5

### **Propagació d'ones electromagnètiques**

Jordi Bonastre Muñoz

1. Propagació d'ones electromagnètiques en un medi
2. Polarització

3. Reflexió i transmissió d'ones planes en un canvi de medi
4. Reflexió i transmissió per una capa prima: interferència
5. Guies d'ona
6. Cavitats ressonants
7. Problemes resolts

Mòdul didàctic 6

### **Línies de transmissió**

Xavier Xirgu Aleixandre

1. Línies de transmissió
2. Exemples de circuits
3. Transmissió de senyals sinusoidals
4. La carta d'Smith
5. Adaptació d'impedàncies
6. Tipus de línies de transmissió
7. Problemes resolts

Mòdul didàctic 7

### **Radiació. Radiació d'un dipol**

Antoni Pérez Navarro

1. Origen de la radiació
2. Radiació emesa per un dipol elèctric oscil·lant
3. Problemes resolts

## Bibliografia

**Alonso, M.; Finn, E. J.** (1998). "Campos y ondas" (vol. 2). *Física*. Mèxic: Editorial Addison Wesley Logman.

**Casas, J.** (1980). *Óptica*. Saragossa: Universidad de Zaragoza.

**Dios, F.; Artigas, D.; Recolons, J.; Comerón, J.; Canal, F.** (1998). *Campos electromagnéticos*. Barcelona: Edicions UPC.

**Feynman, R. P.; Leighton, R. B.; Sands, M.** (1963). *The Feynman lectures on Physics*. Reading: Addison Wesley. [Ed. en castellà: **Feynman, R. P.; Leighton, R. B.; Sands, M.** (1987). "Electromagnetismo y materia" (vol. II). *Física*. Pearson Addison Wesley.]

**Reitz, J. R.; Milford, F. J.** (2001). *Fundamentos de la teoría electromagnética* (1a. ed.). Mèxic: Editorial Alhambra Mexicana.

**Serway, R. A.** (1989). *Física*. McGraw-Hill.

**Tipler, P. A.; Mosca, G.** (2005). *Física para la ciencia y la tecnología* (5a. ed., vol. 1B). Barcelona: Editorial Reverté.

**Chabay, R.; Sherwood, B.** (1995). *Electric & Magnetic Interations*. John Wiley & Sons, Inc.

**Tipler, P. A.; Mosca, G.** (2005). *Física para la ciencia y la tecnología* (5a. ed., vol. 1B). Barcelona: Editorial Reverté.

**Coll, P.; Pretel, C.; Cortés, G.** (2003). *Tecnología energètica* (temes 0 al 4). Barcelona: CPDA-ETSEIB.

**Ortega, X.; Batet, Ll.; Coll, P.** (2003). *Tecnología energètica* (temes 5 al 8). Barcelona: CPDA-ETSEIB.

### Enllaços:

viikipedia [última consulta: 7 de març de 2010]  
<<http://ca.wikipedia.org>>

wikipedia [última consulta: 7 de març de 2010]  
<<http://en.wikipedia.org>>

Pàgina web de David Harrison

<[http://www.meet-physics.net/David-Harrison/index\\_cat.html](http://www.meet-physics.net/David-Harrison/index_cat.html)>

European Schoolnet (EUN)

<[http://ca.inspire.eun.org/index.php/Pagina\\_principal](http://ca.inspire.eun.org/index.php/Pagina_principal)>