

ELS PREMIS NOBEL

DE L'ANY 2007

SOBRE EL

PREMI NOBEL DE FÍSICA

CONCEDIT A

ALBERT FERT I PETER GRÜNBERG,

A CÀRREC DE JOSEP FONTCUBERTA,

DE L'INSTITUT DE CIÈNCIA DE MATERIALS

DE BARCELONA (ICMAB-CSIC)

RESUM

Albert Fert i Peter Grünberg han estat guardonats amb el Premi Nobel de Física de l'any 2007 pel descobriment de la magnetoresistència gegant. En aquest article recorrerem el llarg camí que els científics i tecnòlegs han fet per arribar a comprendre i manipular la dependència del transport electrònic amb l'espín. El premi que han rebut Albert Fert i Peter Grünberg és el reconeixement a la seva capacitat d'integrar, després d'una llarga i perseverant tasca personal, les peces d'aquest trencaclosques i convertir-lo en la base d'una nova ciència i tecnologia que ha canviat moltes coses de les nostres vides.

PARAULES CLAU: magnetoresistència gegant, espín (*spin*), camp magnètic, espintrònica, nanotecnologia.

14

ABSTRACT

Albert Fert and Peter Grünberg have been received the Nobel Laureate on Physics 2007 for their discovery of the «giant magnetoresistance». In this article, we will explore the long way that scientists have made to achieve understanding and the ability to manipulate the spin-dependent electron transport in solids. The price that Albert Fert and Peter Grünberg have gained is also the recognition to their ability to integrate, following long and deep personal contributions, the pieces of a complex puzzle to convert it in a new science and technology that has changed our lives in many aspects.

KEYWORDS: giant magnetoresistance, spin, magnetic field, spintronics, nanotechnology.

L'any 2007, el Premi Nobel de Física ha estat concedit a Albert Fert i Peter Grünberg pel seu descobriment del que s'anomena la *magneto resistència gegant* (GMR). Aquest fenomen i les seves aplicacions han contribuït a un canvi radical en la societat de la informació i han alterat molts aspectes de la nostra vida i la manera de relacionar-nos.

Quan escoltem la nostra cançó preferida, seleccionant-la entre les centenars que tenim guardades en el disc de memòria d'un petit iPod; quan repassem la nostra vida emmagatzemada en un ordinador; quan cerquem aquella informació amagada al web, o quan gravem aquell instant efímer en una càmera fotogràfica, estem gaudint d'una tecnologia que va néixer —com a producte comercial— l'any 1997, fruit dels descobriments que els dos científics premiats aquest any havien fet, de manera simultània i independent, tan sols nou anys abans (1988).

La informació en un disc dur està emmagatzemada en forma de petits imants repartits en pistes concèntriques en el disc. L'orientació d'aquests imants, nord o sud, correspon a les unitats d'informació binària (bits): «1» i «0». Per llegir aquesta informació, els capçals de lectura dels discos durs passen per la superfície del disc un petit sensor que és capaç de detectar l'orientació dels diferents bits i, per tant, el seu valor «1» o «0». Per poder tenir discos durs amb més densitat d'informació guardada i més petits, que càpiguen en un telèfon mòbil, un MP3, un iPod o un PC portàtil, per exemple, cal que el bit (recordem-ho: el petit imant que guarda la informació) sigui més petit. Però al mateix temps, per poder-lo llegir, cal que tinguem el sensor adequat: més sensible i més petit per llegir bits més petits. Això és el que ha fet possible la troballa d'Albert Fert i Peter Grünberg. Ells van descobrir que alguns apilaments de metalls diferents tenen una resistència elèctrica

que varia notablement en apropar-hi un petit imant, i van comprendre les raons d'aquest fenomen. Era el primer pas cap a sensors més sensibles: els capçals de lectura magnètica GMR. Des d'aleshores, se n'han posat al mercat més de cinc bilions i el seu ús ha permès arribar als discos durs actuals, de més de 100 Gb, amb 200 Gb per polzada quadrada de densitat d'informació.

Aquest pas tan ràpid, des de la descoberta d'un nou efecte físic fins a la seva aplicació, és remarcable. Avui, la GMR es pot considerar la primera aplicació a gran escala de les noves nanotecnologies. El coneixement profund dels mecanismes físics subjacents, el desenvolupament instrumental de noves eines de caracterització i el progrés en la fabricació i el control de materials a la nanoescala l'han fet possible. I encara més que això: el descobriment de la GMR ha obert tot un nou camp en la ciència i en la tecnologia, conegut com a *espintrònica*, que avui concentra els esforços i l'interès d'investigadors i empreses arreu del món i que pot significar el relleu de l'electrònica que coneixem avui.

Per a aquells que no estan gaire familiaritzats amb aquest camp, cal dir que els electrons són partícules carregades elèctricament, constituents dels àtoms i que en els metalls transporten la càrrega elèctrica. Cadascun d'aquests electrons té associat un petit imant, com una brúixola, que anomenem *espín* (o *spin*). Ho podem imaginar com si l'electró girés sobre si mateix. Aquesta brúixola pot tenir dues orientacions en l'espai: l'electró pot girar en sentit horari o antihorari. Així, direm que l'electró té l'espín *cap amunt* o l'espín *cap avall*. Tota l'electrònica que coneixem està basada en dispositius (transistors) que regulen el flux de càrrega elèctrica i no prenen en compte l'espín (figura 1a). L'espintrònica explota la càrrega de l'electró i l'orientació de l'espín (figura 1b) per obtenir dispositius més eficaços, més petits i amb noves funcionalitats.

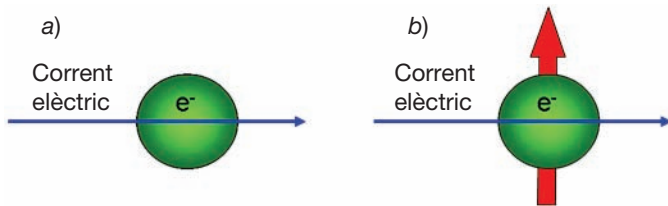


FIGURA 1. a) Transport elèctric independent de l'espín (electrònica convencional) i b) transport elèctric dependent de l'espín, representat per una fletxa vermella (espintrònica).

En les pàgines que segueixen, repassarem el llarg camí que va portar al descobriment de la magnetoresistència gegant i veurem que, d'alguna manera, aquest premi és el reconeixement a un llarg esforç per poder comprendre en detall els mecanismes de transport d'electrons i la dependència en l'orientació de l'espín.

17

LA MAGNETORESISTÈNCIA ANISÒTROPA

La *magnetoresistència* (MR) és el canvi en la resistència elèctrica d'un conductor quan el col·loquem a l'interior d'un camp magnètic, ja sigui creat per un imant o per una bobina que transporta corrent elèctric. Alguns metalls, com el ferro, el cobalt i el níquel, són ells mateixos imants (metalls ferromagnètics), és a dir, tenen una imantació espontània. La podem representar per un vector M . En aquests materials, la resistència elèctrica depèn de l'angle que forma el corrent elèctric (j) amb la imantació. Així, si posem aquest material en el si d'un camp magnètic (B), aquest farà orientar la imantació M , tal com ho fa un imant amb les llimadures de ferro, i la seva resistència elèctrica variarà. William Thomson, conegut també amb el nom de Lord Kelvin, va fer aquesta observació experimental

l'any 1857, just cent cinquanta anys abans de la concessió del Premi Nobel a Albert Fert i Peter Grünberg. William Thomson va observar que la resistència elèctrica d'una barreta de ferro canviava de valor segons si el camp magnètic B era paral·lel o perpendicular a la direcció del corrent. Aquesta variació de resistència, anomenada *magneto-resistència anisòtropa* (AMR), és feble, de prop de l'1 %.

La raó física de l'AMR rau en l'acoblament del moment magnètic d'espín (S) i el moment orbital (L) —anomenat *acoblament espín-òrbita*— dels àtoms que formen el metall i que fa que hàgim de representar el moment angular total amb J ($J = S + L$). En aplicar un camp magnètic B a un material ferromagnètic, la imantació M , que és paral·lela a J , gira per alinear-se amb el camp extern, de manera que M i J estiguin en la direcció de B . A causa de l'acoblament espín-òrbita, si J gira, també ho ha de fer L , i, per tant, les òrbites dels electrons lligats en l'àtom giren en l'espai. En aquestes condicions, un corrent d'electrons que s'apropi a l'àtom sentirà una repulsió electrostàtica i serà dispersat de manera diferent segons l'orientació de les òrbites corresponents (figura 2). En definitiva, la resistència elèctrica variarà segons l'angle format per la imantació i el corrent elèctric.

Malgrat que aquesta variació és petita, aquest efecte es pot fer servir per detectar la presència de camps magnètics i

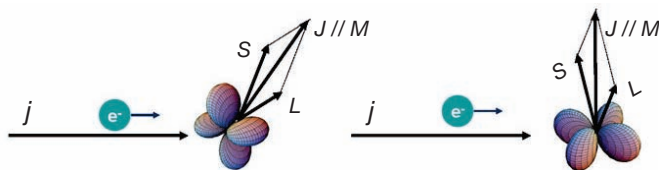


FIGURA 2. Representació de com l'orientació de les òrbites electròniques (L) acoblades a l'espín (S), determinada per un camp magnètic extern, modifica la secció eficaç de dispersió d'un corrent d'electrons (j) i origina la magneto-resistència anisòtropa (AMR).

l'AMR ha tingut, i té, una enorme importància tecnològica, particularment com a sensor de camp magnètic en nombroses aplicacions industrials —incloent-hi l'automoció— i també com a capçal de lectura dels discos durs d'ordinador entre els anys 1992 i 1997, quan van arribar els capçals GMR. De fet, la comunitat científica havia avançat poc des del descobriment de Lord Kelvin i el millor material que s'havia descobert, l'aliatge $\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{80}$ (conegut com a *permalloy*), presentava valors d'AMR propers al 2 % i no era possible, doncs, millorar la sensibilitat dels sensors disponibles.

Per acabar, voldria remarcar que no ha d'estranyar que es tardés molts anys a comprendre la magnetoresistència anisòtropa observada per Lord Kelvin el 1857, ja que l'observació dels electrons (Joseph John Thomson, 1897), els seus estats orbitals (Niels Bohr, 1913) i l'espín dels electrons (Ralph Kronig, 1925; Wolfgang Pauli, 1925; Paul Dirac, 1930) trigarien encara molt a arribar.

METALLS, METALLS FERROMAGNÈTICS I RESISTIVITAT ELÈCTRICA

En els metalls, alguns dels electrons dels àtoms que els constitueixen no es localitzen en els àtoms individuals, sinó que són compartits per tots els àtoms que formen el sòlid. Aquests electrons deslocalitzats estan distribuïts en estats d'energia molt propers entre si i formen bandes d'energia del sòlid. Aquestes bandes d'energia són reminiscents dels diferents estats (orbitals) de l'àtom lliure i els seus noms en el sòlid recorden la procedència atòmica. Així, parlarem, per exemple, de bandes $4s$ o $3d$, segons vinguin dels orbitals atòmics $4s$ o $3d$, respectivament. La propietat important per a la discussió que segueix és l'anomenada *densitat d'estats en la banda* $D(E)$. És la mesura de la densitat d'estats accessibles per als electrons en el metall, i ens dona el nombre d'estats per unitat

d'energia. Els electrons del metall ocupen tots els estats disponibles, des de l'energia més baixa (al fons de la banda corresponent) fins a un valor màxim, que és determinat pel nombre total d'electrons al sistema. Aquesta energia màxima s'anomena *energia de Fermi*.

En la figura 3a es mostra l'estructura de bandes típica d'un metall de transició 3d paramagnètic (com ho són el Cu o el Au). S'hi pot apreciar que les bandes 3d i 4s arriben al nivell de Fermi i que les densitats d'estats al nivell de Fermi per als electrons amb espín cap amunt o espín cap avall (els dos estats possibles per a l'espín d'un electró) són idèntiques: $D^\uparrow(E) = D^\downarrow(E)$. De fet, com que la forma de les bandes 3d i 4s no és igual, hauríem de distingir entre les densitats d'estats en la banda 4s i la 3d: $D_s^\uparrow(E) = D_s^\downarrow(E)$ i $D_d^\uparrow(E) = D_d^\downarrow(E)$. És important observar en les figures 3a i 3b que la densitat d'estats $D_s(E)$ és més baixa que la $D_d(E)$, ja que els orbitals 4s s'estenen més en l'espai que els 3d.

Entre els elements de la taula periòdica que són metalls de transició 3d (Sc-Cu), o 4d (Y-Ag), o 5d o els lantànids 4fd

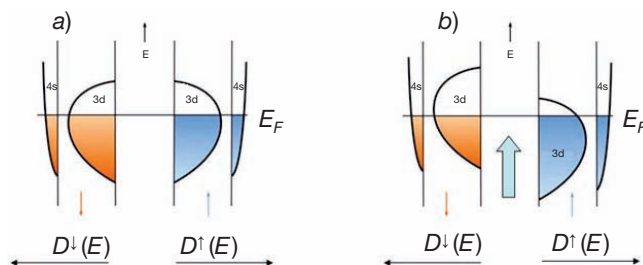


FIGURA 3. Esquema de la densitat d'estats electrònics d'un metall de transició. Els estats ocupats per sota del nivell de Fermi (E_F) s'indiquen en color. En vermell i en blau es mostren les bandes per a l'espín cap avall i l'espín cap amunt, respectivament. A l'esquerra (a) es mostra el diagrama d'un metall no magnètic; a la dreta (b), l'equivalent per a un metall ferromagnètic. La direcció de la polarització d'espín neta es mostra amb la fletxa de color.

(Lu-Au), alguns (Fe, Ni, Co, Gd, etc.) són ferromagnètics. Això vol dir que una de les subbandes d'espín, la d'espín cap amunt en la figura 3, està més plena que l'altra, de manera que hi ha un espín net diferent de zero. Això vol dir que el metall és un material ferromagnètic, és a dir, un imant. Tal com es pot apreciar en la figura 3b, ara $D^\uparrow(E) \neq D^\downarrow(E)$, o millor $D_s^\uparrow(E) \neq D_s^\downarrow(E)$ i $D_d^\uparrow(E) \neq D_d^\downarrow(E)$.

En aplicar-se un camp elèctric extern al metall, els electrons són accelerats, adquireixen més energia, canvien d'estat i contribueixen al corrent elèctric. Només els electrons que tenen l'energia més alta i que tenen estats d'energia desocupats propers, és a dir, els electrons propers al nivell de Fermi (E_F), poden guanyar energia del camp extern i canviar d'estat. Són, doncs, els únics que participen en el transport elèctric. En la major part dels materials —l'excepció en són els materials superconductors—, el transport elèctric sofreix una certa resistència R . Les raons en són diverses. D'una banda, assenyalem que els àtoms en un sòlid vibren a l'entorn de les seves posicions d'equilibri (*dispersió electró-fonó*) i, per tant, dispersen els electrons que viatgen per la xarxa. Aquesta contribució és la que fa que, en els metalls, la resistència elèctrica augmenti quan s'incrementa la temperatura. D'altra banda, els xocs amb impureses o defectes de la xarxa cristal·lina contribueixen també a la dispersió d'un flux de càrrega i, per tant, a la resistivitat del metall (ρ).

En un metall paramagnètic, com que $D^\uparrow(E_F) = D^\downarrow(E_F)$, els electrons amb espín cap amunt i els electrons amb espín cap avall contribueixen igualment al transport elèctric. En canvi, en els materials ferromagnètics, com que $D^\uparrow(E_F) \neq D^\downarrow(E_F)$ (figura 3b), els electrons amb espín cap amunt i amb espín cap avall contribueixen de manera diferent al transport elèctric.

La resistivitat elèctrica en els metalls ferromagnètics ja era objecte d'estudi a final dels anys trenta. De fet, Sir Nevill Mott (Premi Nobel de l'any 1977) va proposar (1936) que la

conductivitat elèctrica dels metalls de transició 3d era determinada pels electrons 4s, ja que estan en una banda molt ampla i, per tant, la densitat d'estats $D_s(E_F)$ és petita, i en conseqüència tenen menys repulsió electrostàtica entre si i la seva mobilitat és més gran. Per un altre costat, el procés de dispersió (*scattering*) que contribueix a la resistivitat elèctrica estaria determinat pels electrons 3d i la seva $D_d(E_F)$. Com que en aquests electrons la densitat d'estats és molt alta, això vol dir que tenen molts estats accessibles a energies properes i que poden canviar fàcilment d'estat. Així doncs, un electró 4s podrà intercanviar energia fàcilment amb els 3d. Per a un valor donat de $D_s(E_F)$, la resistivitat serà més gran com més elevada sigui $D_d(E_F)$. Si comparem l'estructura electrònica del Ni i el Cu (l'àtom de Cu segueix el Ni en la taula periòdica i té un electró més), podem comprendre la diferència de resistivitats d'aquests metalls. En el Cu, els orbitals 3d estan tots plens d'electrons i tenen menys energia que els 4s, de manera que $D_d(E_F) < D_s(E_F)$; en conseqüència, els electrons 4s del Cu tindran una baixa probabilitat de dispersió i, per tant, una baixa resistència elèctrica.

Mott també va proposar que en els metalls ferromagnètics el canvi de conductivitat amb la temperatura —i, més precisament, els canvis que s'observen quan s'arriba a la temperatura d'ordre ferromagnètic— es podria explicar assumint que hi ha dos canals de conducció en paral·lel: un per als electrons amb espín cap amunt i un altre per als electrons amb espín cap avall. En la figura 4 s'il·lustra el model de dos canals de conducció per a les dues famílies d'electrons.

L'estudi dels mecanismes de transport en aliatges de Fe i Ni va ser la recerca que Ian Campbell va proposar, l'any 1966, a Albert Fert com a tema de la seva tesi doctoral. Ben aviat, els anys 1967 i 1968, Albert Fert i Ian Campbell van poder verificar experimentalment la proposta de Mott. I encara més important: Albert Fert va poder demostrar que la

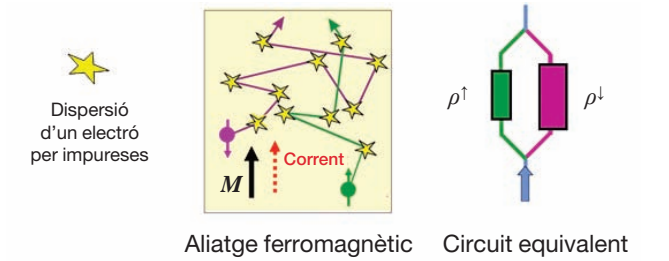


FIGURA 4. Model de dos canals per a la dispersió d'electrons amb espín cap amunt i espín cap avall en un metall.

resistivitat (ρ_0) de cada canal pot ser molt diferent en metalls dopats amb diferents impureses metàl·liques. Dit amb altres paraules: diferents elements tenien un efecte molt distint sobre la dispersió dels electrons amb espín cap amunt o espín cap avall, i, per tant, els valors de $\rho_0^\downarrow/\rho_0^\uparrow$ depenien del metall dopant. Al quocient $\rho_0^\downarrow/\rho_0^\uparrow = a$ se l'anomena *asimetria d'espín*. En la figura 5 es mostren els valors de ρ_0^\uparrow i ρ_0^\downarrow del níquel dopat amb un 1 % de diferents metalls.

23

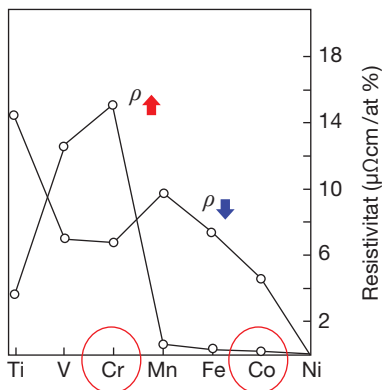


FIGURA 5. Resistivitat d'impureses de diversos nombres atòmics en el níquel per a cada orientació d'espín.

És molt rellevant adonar-se que l'asimetria d'espín pot ser $\alpha < 1$ o $\alpha > 1$, és a dir, en un cas és el canal d'espín cap amunt el que té la dispersió més gran i en l'altre és el canal d'espín cap avall. En el cas del Cr ($\alpha = 0,3$), això vol dir que en el Ni dopat amb Cr els electrons amb espín cap avall tenen una dispersió molt més elevada que els electrons amb espín cap amunt. Per al cas del Co, aquesta asimetria és encara més gran ($\alpha = 20$) i de signe contrari.

Per comprendre els mecanismes microscòpics que expliquen l'asimetria d'espín, Albert Fert va haver d'explotar idees que altres investigadors de l'època estaven elaborant. Particularment útils van ser les idees de Jacques Friedel (1967), que, per descriure la variació de la resistivitat en aliatges com $\text{Ni}_{1-x}\text{M}'_x$ (on M' és un metall de transició), va introduir la idea dels *estats lligats ressonants virtuals*. Breument: els estats electrònics d'un àtom impureza M' es combinen amb els de la matriu M i formen el que s'anomena un *estat localitzat ressonant*, localitzat prop de l'àtom impureza. Si aquest estat ressonant és proper al nivell de Fermi de la matriu M , els electrons de conducció de M sofriran una elevada dispersió i la resistivitat de l'aliatge augmentarà. En la figura 6 s'il·lustra la formació d'un estat ressonant virtual (figura 6a) i la variació de la seva posició segons el nombre atòmic de la impureza M' (figura 6b).

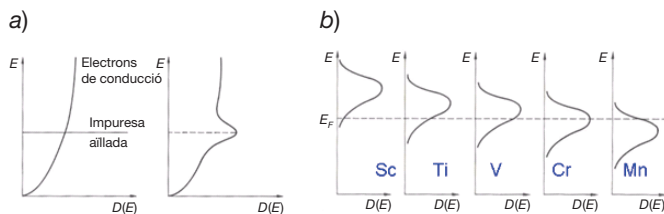


FIGURA 6. a) Formació d'un estat ressonant virtual associat a una impureza en un metall i b) variació de la posició de l'estat ressonant virtual a l'alumini dopat amb impureses de diferent nombre atòmic.

La variació de la resistivitat de l'aliatge AlM' (1 %) segons el nombre atòmic de l'element dopant M' es mostra en la figura 7. Com es pot veure, el nivell de Fermi del Al coincideix amb la posició de l'estat ressonant del Cr i això provoca que la resistivitat de AlCr sigui la més gran al llarg de la sèrie. Aquesta idea va ser explotada per Albert Fert, que la va aplicar al transport en els metalls ferromagnètics, introduint simplement la idea que en els metalls ferromagnètics hi ha un estat ressonant diferent per a l'espín cap amunt i per a l'espín cap avall, amb la qual cosa va donar una explicació microscòpica a l'asimetria d'espín.

En la figura 8 es mostra la resistivitat mesurada en aliatges ternaris de Ni amb altres elements: $Ni(Co_{1-x}Rh_x)$ i $Ni(Au_{1-x}Co_x)$. Com es pot veure, la resistivitat de $Ni(Co_{1-x}Rh_x)$, en composicions intermèdies, no segueix la variació lineal que caldria esperar de la coneguda regla de Matthiessen, mentre que aquesta regla sí que es verifica en $Ni(Au_{1-x}Co_x)$. Els resultats observats són coherents amb el fet que les impureses del

25

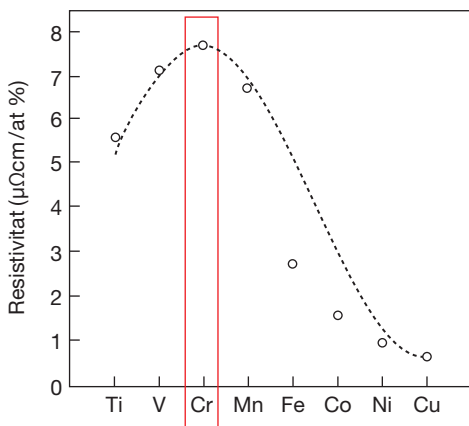


FIGURA 7. Variació de la resistivitat de l'alumini amb el dopatge (1 %) de diferents impureses metàl·liques.

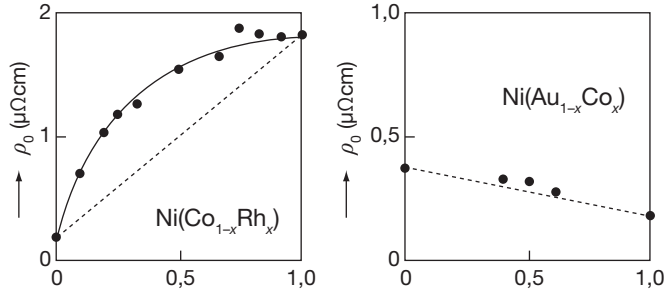


FIGURA 8. Variació de la resistivitat de dos aliatges ternaris de níquel.

26

Co i el Au ($\alpha > 1$) dispersen notablement els electrons amb espín cap avall, mentre que el Rh dispersa majoritàriament els electrons amb espín cap amunt ($\alpha < 1$). És evident que en les composicions intermèdies en $\text{Ni}(\text{Co}_{1-x}\text{Rh}_x)$ tots dos canals de conducció (cap amunt i cap avall) són dispersats considerablement i la resistència és més alta que la que caldria esperar d'una dilució en la qual el transport no depengués de l'espín. En el cas del $\text{Ni}(\text{Au}_{1-x}\text{Co}_x)$, sols un únic canal d'espín (cap amunt) és dispersat notablement, mentre que l'altre canal (cap avall) no sofreix dispersió, i, per tant, la resistivitat de les composicions intermèdies és més baixa.

Com veurem més endavant, aquestes observacions ja podrien haver anticipat el descobriment de la GMR. En efecte, caldria fer un aliatge molt especial: si en lloc de dispersar un metall A i un metall B en una matriu, es pogués fer un apilament de dues capes, A i B , imantades paral·lelament ($M_A // M_B$) o antiparal·lelament ($M_A // -M_B$), aleshores el transport de càrrega al llarg de la bicapa AB en el cas $M_A // -M_B$ seria comparable al cas $\text{Ni}(\text{Co}_{1-x}\text{Rh}_x)$ descrit abans, i, per tant, d'alta resistivitat; al contrari, el cas $M_A // M_B$ seria equivalent a $\text{Ni}(\text{Au}_{1-x}\text{Co}_x)$ i de baixa resistivitat. Si fóssim capaços de fer aquesta estructura i de canviar l'orientació de la imantació de

les capes de paral·lela a antiparal·lela aplicant un camp magnètic adequat, mesurariem un canvi de resistència: la magnetoresistència.

Una dada és important: els electrons perden la memòria de la seva orientació d'espín després de recórrer una certa distància (recorregut lliure mitjà), entorn d'alguns nanòmetres. Això vol dir que, per poder fer l'experiment indicat, cal fer bicapes AB amb gruixos de pocs nanòmetres. Així doncs, per fer aquest experiment calen dos elements: *a*) obtenir bicapes AB amb la magnetització antiparal·lela i invertible i *b*) tenir la capacitat de fer les bicapes AB controlant-ne el gruix i les interfases a l'escala del nanòmetre.

Acoblament magnètic entre làmines magnètiques

Als anys seixanta no es coneixien en detall els mecanismes d'acoblament magnètic entre làmines magnètiques. Es creia que l'acoblament entre dues làmines magnètiques separades per un separador no magnètic era degut a l'existència de ponts nanomètrics ferromagnètics a través del separador. Tal com va demostrar Louis Néel, aquest acoblament també podia ser causat per la rugositat de les intercares (es coneix aquest mecanisme com a *orange-peel*). D'altra banda, hi podia haver un acoblament antiferromagnètic si hi havia un acoblament dipolar a causa d'efectes de vores. Es desconeixia si podien existir altres mecanismes intrínsecs d'interacció magnètica (tal vegada ni s'havia formulat la pregunta en aquests termes), com els que s'observen en els mateixos metalls (com, per exemple, el bescanvi indirecte per mitjà dels electrons de conducció [RKKY]). Veurem més endavant que just això és el que succeeix.

En aquestes circumstàncies, Peter Grünberg va arribar a Jülich el 1972 per estudiar les propietats magnètiques d'un

òxid ferromagnètic i semiconductor, el EuO. Grünberg estava particularment interessat a usar tècniques de dispersió de llum per a l'estudi de materials (aquest havia estat el tema de la seva tesi doctoral, presentada a Darmstadt el 1969), de manera que va centrar els seus esforços a estudiar les ones d'espín en EuO usant una tècnica anomenada *dispersió de Brillouin* (*Brillouin scattering*, BLS). En un material ferromagnètic a temperatura 0, tots els moments magnètics dels àtoms estan orientats en la mateixa direcció. Quan la temperatura augmenta, aquest ordre perfecte es pertorba i els moments magnètics dels àtoms s'inclinen els uns respecte dels altres i formen ones anomenades *ones d'espín*. Aquesta pertorbació és la responsable que la imantació dels materials ferromagnètics disminueixi quan augmenta la temperatura. Aquestes ones poden ser excitades amb llum de la freqüència apropiada, i per tant, absorbint una part de la radiació incident. Aquesta és la base de la dispersió de Brillouin per a l'estudi de les ones d'espín.

A principi dels anys setanta, J. A. Sandercock (Zuric) havia inventat unes millores importants en els espectròmetres usats en la dispersió de Brillouin. Grünberg va tenir la fortuna que el seu laboratori a Jülich decidís adquirir un espectròmetre de darrera generació. Amb aquest va començar a estudiar les ones d'espín en EuO.

En la part superior de la figura 9 es mostra un espectre de Brillouin del EuO. Els dos pics de color verd, ja se sabia que reflectien l'absorció/emissió d'una ona d'espín. Res de nou, doncs. La intriga és en el pic addicional vermell que es veu exclusivament a l'esquerra. D'on surt? Per què no apareix també a la dreta com els de les ones d'espín? Una vegada més, la fortuna somriu a qui té els ulls oberts. Una avaria en l'electroïmant utilitzat per fer l'experiment va obligar a desmuntar-lo i tornar-lo a muntar. Un error en la connexió dels cables va fer que el camp magnètic generat per l'electroïmant canviés la

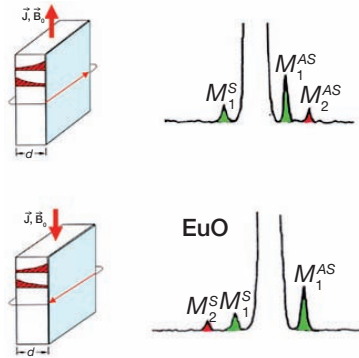


FIGURA 9. Espectres de Brillouin d'un cristall de EuO. Les ones d'espín del material s'indiquen en verd (M_1^S i M_1^{AS}). Les ones d'espín de superfície s'indiquen en vermell (M_2). En la figura superior i la inferior el camp magnètic ha estat invertit.

polaritat nord/sud. La sorpresa és que el pic anòmal (vermell) en l'espectre de Brillouin va canviar de costat (figura 9, en la part inferior). Aquest resultat era absolutament sorprenent, ja que se sabia que les ones d'espín d'un sòlid massiu no depenen de la polaritat del camp magnètic aplicat, i, per tant, no en podien ser la causa.

Peter Grünberg va poder identificar, el 1977, basant-se en resultats previs d'absorció de microones en materials ferromagnètics i prediccions teòriques (M. G. Cottam, 1976), aquesta ressonància com un mode d'una ona d'espín de superfície. Aquests modes es coneixen com a *modes Damon Eshbach* (DE). És una ona d'espín que es propaga per la superfície en sentit horari o antihorari segons la polaritat del camp aplicat (figura 9). La part de l'ona que viatja per la cara oposada a la que rep la llum incident no es veu en l'espectre de Brillouin simplement perquè el cristall de EuO usat era molt més gruixut que la penetració d'aquesta ona de superfície en el material (~ 10 nm). Experiments posteriors en làmines

ferromagnètiques (Fe) més fines van confirmar que es podien veure les dues branques d'una ona d'espín de superfície.

La dinàmica dels modes magnètics en làmines es podia abordar a partir de les equacions de Landau-Lifshitz, i això és el que el mateix Grünberg (1985) i d'altres (J. F. Cochram i J. R. Dutcher, 1988) van fer per calcular la resposta de les ones de superfície en espectres de Brillouin de làmines magnètiques acoblades magnèticament. Era clar que una ona de superfície es propagaria de manera molt diferent segons si tingués a prop un altre material magnètic o si aquest estigués imantat paral·lelament o antiparal·lelament. Era evident que Grünberg tenia a les mans les eines experimentals i teòriques per estudiar en detall l'acoblament magnètic entre capes ferromagnètiques com no s'havia pogut fer mai fins llavors. No va desaproveïtar l'oportunitat i va mirar la resposta de tricapes de Fe/Cr/Fe.

Els motius de l'elecció del Cr com a separador de les làmines ferromagnètiques de Fe van ser que el Cr és en si mateix un metall antiferromagnètic i que es podia esperar que l'acoblament entre les làmines de Fe depengués molt del gruix del Cr. D'altra banda, l'estructura cristal·logràfica del Cr s'assembla força a la del Fe (tots dos són cúbics, centrats a les cares i amb paràmetres de malla similars), de manera que es podia esperar que el creixement d'un metall sobre l'altre donés interfases abruptes. No em consta que Grünberg fos conscient, en aquell moment, de les implicacions que la diferent asimetria d'espín del Cr i el Fe, que Fert havia descobert anys abans (1967), podia tenir sobre les propietats de transport de la tricapa. Malauradament, però, els primers intents a Jülich sempre van mostrar un acoblament ferromagnètic entre les capes de Fe, a causa de la qualitat insuficient de les capes fabricades i la presència de microforats ferromagnètics que connectaven una capa amb l'altra.

Grünberg va tenir l'oportunitat de fer una estada al Laboratori Nacional Argonne, als Estats Units d'Amèrica.

Allà, M. Brodsky tenia experiència a fer créixer les làmines de Fe/Cr/Fe sobre substrats monocristal·lins de NaCl i els dos científics van començar de seguida els experiments. Per establir una comparació, van fer créixer també làmines de Fe/Au/Fe.

En la figura 10a es mostren els resultats dels experiments publicats el 1986, en els quals es comparen els espectres de Brillouin de les tricapes de Fe/Cr/Fe i Fe/Au/Fe amb diferents gruixos (d_0) del separador (Cr o Au). L'espectre amb $d_0 = 0$ és equivalent al mesurat per a una única capa de Fe. Els espectres per als gruixos més grans del separador (Au i Cr) corresponen a l'acoblament dipolar de les capes de Fe. Però l'espectre obtingut amb $d_0 = 0,8$ nm és clarament diferent i és just l'espectre que s'espera d'un acoblament antiferromagnètic entre capes. Per primera vegada s'observava que l'acoblament podia ser antiferromagnètic i que oscil·lava entre

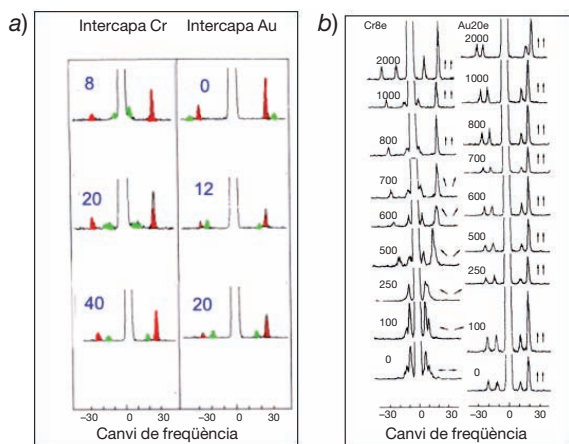


FIGURA 10. *a)* Espectres de Brillouin de tricapes de Fe/X/Fe, on $X = \text{Cr}$ (esquerra) i $X = \text{Au}$ (dreta), de diferents gruixos i *b)* espectres de Brillouin de tricapes de Fe/X/Fe, on $X = \text{Cr}$ (esquerra) i $X = \text{Au}$ (dreta), mesurats sota diferents camps magnètics. Les fletxes en les figures indiquen l'orientació de la magnetització de les capes de Fe.

ferromagnètic-antiferromagnètic-ferromagnètic en funció del gruix del separador. En la figura 10b es reproduïxen els espectres mesurats en funció d'un camp magnètic aplicat i s'il·lustren els canvis en l'espectre de Brillouin quan es passa d'un acoblament antiferromagnètic (a baix) a un de ferromagnètic (a dalt).

L'explicació microscòpica de l'acoblament ferromagnètic oscil·latori rau en el fet que el material ferromagnètic induïx una polarització oscil·latòria de l'espín (indueix un ordre magnètic) en els electrons de la capa separadora. Aleshores, depenent de la distància a què es troba la segona capa, l'acoblament és ferromagnètic o antiferromagnètic. Aquest mecanisme és essencialment el mateix que explica el ferromagnetisme en els metalls. Els electrons lliures en la capa separadora són la clau de l'acoblament.

Així doncs, ja es podrien fabricar capes ferromagnètiques acoblades antiferromagnèticament: $M_1 // -M_2$. Es podia preveure que, en aplicar-hi un camp magnètic prou gran, es podria canviar l'orientació de la magnetització d'una de les capes de tal manera que la magnetització de les dues capes fos paral·lela ($M_1 // M_2$). El primer pas per explorar l'asimetria d'espín ja s'havia fet. Grünberg, en un desig d'obtenir tricapes de més qualitat, va deixar els substrats de NaCl i va començar a utilitzar substrats de GaAs, que tot just començaven a estar disponibles.

Creixement de multicapes metàl·liques

D'ençà de principi dels anys setanta, les noves troballes en física, química i materials havien possibilitat el desenvolupament de noves tècniques experimentals que van permetre als científics la fabricació de materials completament nous. Fent servir el que s'anomenà *creixement epitaxial* es van poder fer

materials artificials apilant capes atòmiques de materials diferents. Tècniques com la polvorització catòdica, la deposició química de vapor o l'epitàxia de feixos moleculars (MBE) es van començar a desenvolupar en aquells anys. De fet, la MBE ja es feia servir des dels anys seixanta per al creixement de semiconductors. A final dels anys setanta, ja es podien fer capes metàl·liques nanomètriques.

L'any 1985, Fert era al Laboratori de Física de Sòlids d'Orsay i Alain Friederich dirigia un grup de recerca al laboratori de Thomson a París, on havien posat a punt la tècnica de la MBE per al creixement de pel·lícules de semiconductors. Fert i Friederich es van posar d'acord per llençar una acció de creixement de multicapes magnètiques. Fert era conscient de les implicacions del descobriment de l'acoblament antiferromagnètic en multicapes de Fe/Cr/Fe demostrat per Grünberg; per tant, ja era possible intentar extrapolar els resultats obtinguts deu anys abans en aliatges metàl·lics i intentar reproduir-los en multicapes.

33

EL DESCOBRIMENT DE LA MAGNETORESISTÈNCIA GEGANT (GMR)

Albert Fert, Patrick Etienne i els estudiants Frédéric Van Dau, Agnès Barthélémy i Frédéric Petroff van iniciar la fabricació de multicapes nanomètriques de Fe/Cr/Fe. El 1988 van observar que la resistència elèctrica de les multicapes variava fins a un 80 % quan se'ls aplicava un camp magnètic (figura 11a). Aquest valor de magnetoresistència era molt més gran que el que s'havia obtingut mai. Van donar el nom de *magnetoresistència gegant* (GMR) al seu descobriment. En l'article seminal del 1988, Fert ja anticipava el potencial tecnològic del descobriment. Un efecte similar va ser descobert pràcticament alhora per Peter Grünberg a Jülich (figura 11b). Grünberg, també conscient de la transcendència del descobriment i anti-

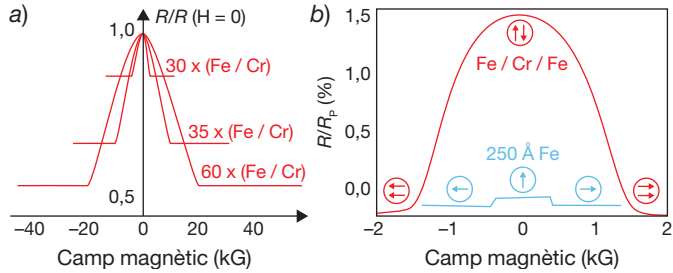


FIGURA 11. a) Magnetoresistència a 4,2 K d'una multicapa de Fe/Cr/Fe (A. Fert) i b) magnetoresistència a temperatura ambient d'una tricapa de Fe/Cr/Fe (P. Grünberg).

34

cipant moltes de les aplicacions actuals de la GMR, el va patentar el 1988, abans de publicar-lo el 1989, i donà el nom *vàlvula d'espín* al dispositiu format per dues capes ferromagnètiques acoblades antiferromagnèticament i separades per una capa no magnètica. Stuart Parkin, d'IBM, s'interessà immediatament pels resultats i estudià de manera sistemàtica la dependència de l'acoblament magnètic entre capes en funció del gruix del separador (1990) i els valors de la magnetoresistència. Les seves multicapes, fabricades per polvorització catòdica, amb una tècnica molt més versàtil i escalable industrialment que la MBE, tindrien un impacte capital en el procés d'industrialització de la GMR.

La interpretació de l'efecte observat, en estreta analogia amb el que els resultats dels aliatges ternaris podien haver anticipat, es mostra esquemàticament en la figura 12 i la descriurem en cert detall a continuació. Considerem una estructura formada per dues capes metàl·liques ferromagnètiques separades per una fina capa (aproximadament d'1 nm) d'un material no magnètic. Dues situacions són possibles: les dues capes poden tenir les magnetitzacions paral·leles o antiparal·leles. En una situació ideal, imaginem que els electrons amb

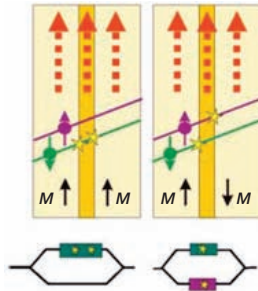


FIGURA 12. Model descriptiu de la GMR amb el corrent elèctric paral·lel a les làmines.

espín paral·lel al sentit de la imantació —que és el mateix en els dos elèctrodes— no sofreixen cap procés de dispersió en el camí. Aquests electrons faran un curtcircuit entre els dos elèctrodes ferromagnètics i la resistència elèctrica serà baixa. Aquest curtcircuit desapareix quan invertim la imantació d'una de les capes. Ara, els electrons amb espín paral·lel a la imantació de la primera capa sofreixen dispersió a la segona. Naturalment tots dos tipus d'electrons sofreixen dispersió, però tan sols cal que els uns en tinguin més que els altres perquè el dispositiu funcioni. L'estat de baixa resistència desapareix, doncs, en la configuració antiparal·lela dels elèctrodes. Així, en canviar la magnetització de paral·lela a antiparal·lela, la resistència augmenta. És, doncs, un sensor magnètic.

El primer model clàssic de la GMR en multicapes va ser elaborat per R. E. Camley i J. Barnas el 1989. En el moment del descobriment eren de visita a Jülich i van publicar el seu model just un any després (1989). El primer model microscòpic amb una descripció quàntica de la GMR va ser fruit de la col·laboració de Fert amb P. M. Levy i S. Zhang (1990).

El descobriment de la GMR va posar de manifest que es podien dissenyar dispositius que explotessin les propietats de transport dels electrons lligades a l'orientació de l'espín. El fet que, per la seva construcció, el sensor GMR tingui unes dimensions d'uns quants nanòmetres i una gran sensibilitat (fixem-nos que els canvis de resistència arriben al 80 %, mentre que en els sensors AMR «antics» la variació era de tan sols ~2 %) explica el seu ràpid desenvolupament, la implantació com a capçal de lectura de discos durs dels ordinadors i el paper determinant a l'hora d'augmentar la densitat dels discos. En el dispositiu que hem descrit, el corrent elèctric circula paral·lelament a les làmines (CIP), i aquesta és l'estructura de milions de sensors GMR instal·lats en ordinadors. Es pot millorar encara més la resposta del dispositiu amb una configuració lleugerament diferent, en la qual el corrent elèctric circula perpendicularment a les capes (CPP). Són, aleshores, els sensors CPP-GMR.

L'evolució ha continuat amb el desenvolupament d'una nova família de sensors magnètics en què les dues làmines ferromagnètiques estan separades per una fina capa aïllant. En aquests, el corrent elèctric circula entre els dos elèctrodes ferromagnètics mitjançant el que s'anomena un *procés túnel*, i, per això, aquests sensors s'anomenen *unions túnel magnètiques* (MTJ). Quan els dos elèctrodes tenen la imantació paral·lela, el corrent que hi circula és alt, i és baix quan els elèctrodes estan imantats antiparal·lelament. Els dos estats de resistència diferent els podem considerar com a estats lògics «1» i «0». És important adonar-se que, com que en un material ferromagnètic la imantació no varia apreciablement amb el temps, una MTJ podrà emmagatzemar informació no volàtil en forma d'estats de resistència diferents. Aquestes unions túnel magnètiques constitueixen memòries magnètiques MRAM

que ja han trobat aplicacions. Són uns primers exemples de dispositius que exploten l'espín de l'electró per obtenir noves funcionalitats.

Els dispositius GMR que hem descrit són els primers dispositius espintrònics i de segur que no seran els darrers. Avui l'espintrònica és una activa àrea de recerca i desenvolupament arreu del món i és un exemple de com la nanotecnologia pot estimular i fer possibles progressos i canvis radicals en el nostre dia a dia.

En aquest article hem recorregut el llarg camí que han fet científics i tecnòlegs per arribar a comprendre i manipular la dependència del transport electrònic amb l'espín. El guardó que han rebut Albert Fert i Peter Grünberg és el premi a la capacitat d'integrar, després d'una llarga i perseverant tasca personal, les peces d'aquest trencaclosques que molts científics, al llarg de molts anys, han anat creant per comprendre el transport elèctric en els metalls magnètics. Però crec que és també un premi a la continuada contribució dels científics, fonamentalment europeus, a la comprensió del transport elèctric en els sòlids. En últim extrem, aquests premis Nobel són també el premi als fruits del bon maridatge de la ciència bàsica i la tecnologia.

L'Institut de Ciència de Materials de Barcelona (ICMAB-CSIC) no és aliè a aquesta cursa. Albert Fert ha codirigit tesis doctorals i ha participat en jurats de tesis elaborades en aquest centre; el laboratori de la Unitat Mixta de Física CNRS-Thales, que ha dirigit durant molts anys, ha acollit nombrosos estudiants de l'ICMAB-CSIC; fins i tot, alguns d'ells han estat posteriorment contractats en aquell laboratori, que, en el marc de diferents projectes, manté una estreta col·laboració científica amb l'ICMAB-CSIC.¹

1. La continuada col·laboració d'Albert Fert amb científics i institucions científiques i universitàries catalans ha estat reconeguda amb

Des d'aquí, doncs, manifestem la nostra més efusiva felicitació a Albert Fert i Peter Grünberg, guardonats per un descobriment que ha marcat un pas decisiu en la ciència i la tecnologia de final del segle XX i en les nostres vides professionals i personals.

AGRAÏMENTS

No vull acabar sense agrair a Albert Fert i altres científics de la Unitat Mixta de Física CNRS-Thales, molt especialment a Agnès Barthélémy, el seu suport al llarg d'aquests anys de col·laboració. No seria just, però, que no recordés i agrais aquí també la dedicació dels estudiants M. Bibes, U. Lüders, M. Gajek, J. Navarro, G. Herranz, D. Rubí, I. C. Infante, X. Martí, F. Rigato, N. Dix i J. M. Caicedo, que, en el marc de les seves tesis doctorals, han materialitzat aquesta col·laboració i m'han estimulat a aprendre i comprendre millor aquest àmbit de la ciència dels materials.

38

NOTA

Algunes de les figures usades en aquest article són adaptacions de les contingudes en les referències bibliogràfiques i en *The electrical properties of metals and alloys*, de J. S. Dugdale, editat el 1977 per Edward Arnold Publisher.

el seu nomenament com a doctor *honoris causa* per la Universitat Autònoma de Barcelona, el 2008.

BIBLIOGRAFIA

- FERT, A. (2007). *The origin, development and future of spintronics*. Discurs de recepció del Premi Nobel (8 desembre 2007). A: *Nobelprize.org* [en línia]. <http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2007/fert_lecture.pdf>.
- GRÜNBERG, P. A. (2007). *From spinwaves to giant magnetoresistance (GMR) and beyond*. Discurs de recepció del Premi Nobel (8 desembre 2007). A: *Nobelprize.org* [en línia]. <http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2007/grunberg_lecture.pdf>.
- THE ROYAL SWEDISH ACADEMY OF SCIENCES (2007a). *The discovery of giant magnetoresistance: Scientific background on the Nobel Prize in Physics 2007*. A: *Nobelprize.org* [en línia]. <http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2007/advanced-physicsprize2007.pdf>.
- (2007b). *The Nobel Prize in Physics 2007*. Informació general. A: *Nobelprize.org* [en línia]. <http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2007/popular-physicsprize2007.pdf>.