

## Albert Fert: de l'espí a l'espintrònica

per  
Josep Fontcuberta

Excelentíssima i Magnífica Rectora, Il·lustríssims Vicerectors, Degans, Directors de Departament, membres del Claustre i de la comunitat científica, senyores i senyors, amics i amigues

Una aparent dicotomia plana permanentment sobre quina és la recerca que cal estimular en els nostres centres i les nostres facultats. Em refereixo al permanent debat sobre la recerca fonamental i la recerca aplicada o, dit d'altre manera, entre ciència bàsica i tecnologia. Molts veuen en aquesta contraposició, respostes diferents als reptes que la societat planteja.

Aquesta dialèctica, massa sovint es planteja com si entre ambdues visions hi hagués una contradicció excloent. Aquesta contraposició simplista, reflecteix, al meu parer, una visió limitada dels processos de creació de coneixement i no reconeix que la recerca sovint ens porta per camins i solucions insospitats i obre sempre portes que sols el temps i amb ell les noves necessitats, s'encarregaran de valoritzar.

Voldria presentar a Albert Fert com exemple de que aquesta aparent dicotomia entre ciència bàsica i ciència aplicada no és certa. O més encara, voldria il·lustrar, amb la seva pròpia trajectòria científica, com aquests dos aspectes de la recerca estan íntimament relacionats i han donat fruits que, en molts aspectes han canviat la nostra manera de comunicar-nos i per extensió, les nostres vides.

Quan escoltem la nostra cançó preferida, seleccionant-la entre centenes guardades en el disc de memòria d'un petit iPod, quan repassem la nostra vida emmagatzemada en un ordinador, quan cerquem aquella informació amagada a la 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 dos científics Albert Fert, que avui tenim entre nosaltres, i Peter Grunberg havien fet, de manera simultània i independent, tan sols nou anys abans (1988). Per aquest descobriment, anomenat “Magnetoresistència Gegant (GMR)” ambdòs van rebre el Premi Nobel de Física el 2007.

**La informació** en un disc dur està emmagatzemada en forma de petits imants distribuïts en pistes concèntriques en el disc. L'orientació d'aquest imants, nord o sud, correspon a les unitats d'informació binària (bit): “1” i “0”. **Per a 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 a poder tenir discs durs amb capacitat de guardar més informació i que siguin més petits cal que els bit (recordem-ho: el petit imant que guarda la informació) sigui més petit. Però al mateix temps, cal que tinguem un sensor adequat: més sensible i més petit per poder llegir bits més petits!. **Això** és el que ha fet possible la troballa d'Albert Fert i

Peter Grünberg. Ells van descobrir que certs apilaments de metalls diferents tenen una resistència elèctrica que varia fortament 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 5 bilions i el seu ús ha permès arribat als discs durs actuals de més de 100 Gbits.

Aquest pas tan ràpid, des de la descoberta d'un nou efecte físic fins 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 les tecnologies de fabricació de materials a la nanoescala, l'han fet possible. Però encara més: el descobriment de la GMR ha obert tot un nou camp en la ciència i en la tecnologia que, seguint la proposta d'Albert Fert, es coneix com *espintrònica* i que avui atrau l'esforç i l'interès d'investigadors i empreses arreu del món i que pot significar el relleu a l'electrònica actual.

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

Però no em referiré ara a l'impacte de la descoberta d'Albert Fert. La concessió del Nobel 2007 el reflecteix prou clarament aquest impacte i honestament, no hi podria afegir res. M'agradaria però ressaltar aquí altres aspectes que em semblen rellevants. Crec que és molt instructiu repassar el camí que va portar al descobriment de la Magnetoresistència Gegant i veurem que és el fruit d'un llarg i obstinant esforç per a poder comprendre en detall els mecanismes de transport d'electrons i la dependència en l'orientació de l'espí.

Albert Fert, en aquest sentit, és un artista de la ciència: va saber recollir les contribucions anteriors, integrar-les en un nou edifici intel·lectual, i tenir els ulls ben oberts per a usar les noves tecnologies per a dissenyar i fabricar uns materials "artificials" que explotessin de manera òptima les idees que al llarg dels anys havia forjat. De la mateixa manera que l'art ens transcendeix, ens porta més enllà del que veiem, trencant els límits que posa lo existent, l'artista Albert Fert, imagina i construeix nous materials que trenquen les limitacions dels materials coneguts fins llavors i li permetran d'explotar de forma extraordinària les seves propietats de transport elèctric dependent de l'espí.

Deixeu-me doncs fer un breu repàs per l'història del transport elèctric en metalls.

#### **a) Magnetoresistència i transport elèctric dependent de l'espí.**

La magnetoresistència (MR) és el canvi en la resistència elèctrica d'un conductor quan el col·loquem a l'interior d'un camp magnètic. Alguns metalls com el ferro, el cobalt o el níquel són ells mateixos imants (metalls ferromagnètics) és a dir: tenen una imantació

espontània. **William Thomson**, conegut també amb el nom de Lord Kelvin, va observar que la resistència elèctrica d'una barreta de ferro era diferent segons si l'imantava paral·lela o perpendicularment a la direcció del corrent. Aquesta variació de resistència, coneguda amb el nom de Magnetoresistència Anisòtropa (AMR) és feble, de l'ordre de  $\sim 1\%$ . Malgrat que aquesta variació és petita, aquest efecte es pot fer servir per a detectar la presència de camps magnètics i l'AMR ha tingut – i té – una enorme importància tecnològica particularment com a sensor de camp magnètic en aplicacions industrials, i ha sigut el capçal de lectura dels discs durs d'ordinador entre els anys 1992 fins el 1997 quan van arribar els capçals GMR.

**És interessant notar** que Lord Kelvin va fer aquesta observació l'any 1857, just 150 anys abans de la concessió del Nobel a Albert Fert. La raó física de l'AMR rau en l'acoblament del moment magnètic d'espí (**S**) i el moment orbital (**L**) (anomenat: acoblament espí-òrbita) dels àtoms. No ha d'estranyar però que passessin molt anys abans de ser compresa la magnetoresistència anisòtropa observada per Lord Kelvin al 1857, ja que els ingredients necessaris havien de tardar molt encara en arribar:

- ✓ al 1897, l'observació dels electrons (Josep John Thomson)
- ✓ al 1913, els àtoms i els seus estats orbitals (Neils Bohr)
- ✓ i l'espí dels electrons força anys després entre 1925-1930 (Ralph Kronig, 1925, Walfrang Pauli, 1925 i Paul Dirac, 1930).

**Certament la comprensió** de l'estructura de l'àtom i l'espí de l'electró son ingredients necessaris però no son suficients per a entendre les propietats dels sòlids. L'estudi de la resistivitat elèctrica en metalls ferromagnètics era objecte d'estudi a finals dels anys 1930. Sir Nevil Mott va proposar (1936) que la conductivitat elèctrica dels metalls de transició (... Co, Fe, Ni, Cu,...) vindria determinada pels electrons 4s i els processos de dispersió amb els electrons 3d. N. Mott també va proposar que en ells metalls ferromagnètics el canvi de conductivitat amb la temperatura es podria explicar pensant que hi ha dos canals de conducció en paral·lel, un per als electrons espí-*amunt* i un altre per electrons espí-*avall*.

**Calia però verificar** la hipòtesis i l'estudi dels mecanismes de transport en aliatges de Fe i Ni va ser el tema de recerca que Ian Campbell va proposar, l'any 1966 a Albert Fert com a tema de Tesis Doctoral. Albert Fert va sintetitzar aliatges d'un gran nombre de metalls i ben aviat (1967,8) A. Fert i I. Campbell van poder verificar experimentalment la proposta de Mott. Encara més important, A. Fert va poder demostrar que la resistivitat ( $\rho_0$ ) de cada canal pot ser molt diferents en metalls dopats amb diferent impureses metàl·liques. Dit amb altres paraules, diferent elements tenien un efecte molt diferent sobre la dispersió dels electrons amb espí-*amunt* o -*avall* i per tant els valors de  $\rho_0^{\downarrow}/\rho_0^{\uparrow}$  depenen del metall dopant. Al quocient  $\rho_0^{\downarrow}/\rho_0^{\uparrow} = \alpha$  se l'anomena asimetria d'espí. L'asimetria d'espí pot ser  $\alpha < 1$  o  $\alpha > 1$ , és a dir en un cas és el canal espí-*amunt* el que té dispersió més gran i en l'altre és el canal espí-*avall*.

En un treball sistemàtic de mesura i comparació de resultats entre un gran nombre d'aliatges i amb l'ajut d'un model fenomenològic de dos canals de conducció basat en les idees de Mott, Albert Fert va poder determinar l'asimetria d'espí per a un gran nombre de metalls. Tan sols vull recordar aquí que per al Fe i el Cr aquesta asimetria és marcadament diferent :  $\alpha(\text{Fe}) \approx 20$ , mentre que  $\alpha(\text{Cr}) \approx 0.3$ . Això vol dir que en un metall dopat amb Fe és el canal d'espí-*avall* el que té la resistivitat més gran i si el dopem amb Cr és el canal d'espí-*amunt* el que té resistivitat més gran.

**Per a comprendre** els mecanismes microscòpics que expliquen l'asimetria d'espí, A. Fert va haver d'explotar idees que altres investigadors de l'època estaven elaborant. Particularment útils van ser les idees de Jaques Friedel (1967) que, per a descriure la variació de la resistivitat en aliatges tal com  $Ni_{1-x}M'_x$  (on  $M'$  és un metall de transició) va introduir el concepte dels estats "lligats ressonants virtuals".

**Albert Fert** seguí treballant en aliatges metàl·lics. Va observar que en aliatges ternaris tals com  $Ni(Co_{1-x}Rh_x)$  la resistivitat no segueix la variació lineal que caldria esperar de la coneguda regla de Matthiessen, si no que era més alta. Els resultats observats són consistents amb el fet que Co i Rh tenen asimetries d'espí de signe oposat i per tant les impureses dispersen fortament tan els electrons espí-*avall* com els espí-*amunt*

**Aquestes** observacions podrien haver ja anticipat el descobriment de la GMR. En efecte, caldria fer un aliatge molt especial: si en lloc de dispersar un metall A i B en una matriu, es pogués fer un apilament de dues capes: A i B imantades paral·lelament ( $\mathbf{M}_A // \mathbf{M}_B$ ) o antiparal·lelament ( $\mathbf{M}_A // -\mathbf{M}_B$ ), llavors el transport de càrrega al llarg de la bicapa AB en el cas  $\mathbf{M}_A // -\mathbf{M}_B$  serà comparable al cas  $Ni(Co_{1-x}Rh_x)$  descrit abans i per tant d'alta resistivitat; al contrari, el cas  $\mathbf{M}_A // \mathbf{M}_B$  serà de baixa resistivitat. Si fóssim capaços de fer aquesta estructura i de fer 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: magnetoresistència.

**Així doncs** per fer aquest experiment calen dos ingredients:

- a) obtenir bicapes AB amb la magnetització antiparal·lela i invertible i
- b) tenir la capacitat de fer les bicapes AB amb un control del seu gruix a l'escala del nanòmetre, ja que els electrons perden la memòria de la seva orientació d'espí després de viatjar una distància de l'ordre d'alguns nanòmetres.

#### **a) Acoblament magnètic entre làmines magnètiques.**

**Als anys 1960** es desconeixien en detall els mecanismes d'acoblament magnètic entre làmines magnètiques. En aquestes circumstàncies, Peter Grünberg va arribar a Julich (1972) per a estudiar les propietats magnètiques d'un òxid ferromagnètic i semiconductor, el EuO i va centrar els seus esforços en estudiar les ones d'espí en EuO usant una tècnica anomenada Brillouin Scattering (BLS). Aviat P. Grünberg va poder identificar (1977) un mode particular que corresponia a una ona d'espí de superfície. Era clar que una ona de superfície es propagaria de manera molt diferent segons si tingués a prop un altre material magnètic o segons si aquest estigués imantat paral·lelament o antiparal·lelament. Per tant, Grünberg tenia a les mans una nova eina experimental per a estudiar en detall l'acoblament magnètic entre capes ferromagnètiques com no s'havia pogut fer mai fins llavors. No va desaprovechar l'ocasió i va a mirar la resposta de tricapes Fe/Cr/Fe.

**P. Grünberg**, va tenir l'oportunitat de fer una estada als Argonne National Labs als USA on tenien experiència en créixer les làmines Fe/Cr/Fe. Ben aviat (1986) va obtenir els espectres BLS de tricapes Fe/Cr/Fe per a diferents gruixos del separador (Cr) i va observar, per primera vegada, que l'acoblament podia ser antiferromagnètic. El primer pas per a explotar l'asimetria d'espí estava donat.

#### **b) Creixement de multicapes metàl·liques.**

**D'ençà de principis** dels anys 70, s'havien anat desenvolupant noves tècniques de fabricació de materials. Fent servir el que s'anomenà el "creixement epitaxial" es van poder fer materials artificials apilant capes atòmiques de materials diferents.

L'any 1985, A. Fert estava al laboratori de Physique des Solides d'Orsay i Alain Friederich dirigia un grup de recerca al laboratori de Thomson a Paris, on havien posat a punt la tècnica de MBE (Molecular Beam Epitaxy) per al creixement de pel·lícules de semiconductors. Es van posar d'acord per a llençar una acció de creixement de multicapes magnètiques. A. Fert era conscient dels descobriments de l'acoblament antiferromagnètic en multicapes Fe/Cr/Fe demostrat per P. Grünberg i per tant era ja possible intentar extrapolar els resultats obtinguts 10 anys abans en aliatges metàl·lics i intentar reproduir-los en multicapes.

### **El descobriment de la Magneto resistència Gegant (GMR)**

**A. Fert i els seus** estudiants Frédéric Van Dau, Agnès Barthélémy i Frédéric Petroff, van iniciar la fabricació de multicapes nanomètriques de Fe/Cr/Fe. Aviat (1988) van observar que la seva resistència elèctrica variava fins a un 80% en aplicar a la multicapa una camp magnètic. Aquest valor de magneto resistència era molt més gran del que mai s'havia obtingut. Van donar el nom de "Magneto resistència Gegant" al seu descobriment. En l'article seminal de 1988, A. Fert ja anticipa el potencial tecnològic del descobriment. **Un efecte similar**, va ser descobert pràcticament simultàniament per P. Grünberg a Jülich.

S. Parkin a IBM, va reproduir i optimitzar els materials i processos. La seva contribució tindria un impacte capital en el procés d'industrialització de la GMR que IBM va liderar.

El primer model microscòpic amb una descripció mecano-quàntica de la GMR va ser fruit de la col·laboració d'A. Fert amb P.M. Levy i S. Zhang (1990).

### **El naixement de l'espintrònica**

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 del seu espí. És el **naixement de l'espintrònica**.

**El fet de que per** la seva pròpia construcció, el GMR tingui dimensions d'alguns pocs nanòmetres i la seva sensibilitat explica el seu ràpid desenvolupament i la seva implantació com a capçals de lectura de discs durs dels ordinadors de major densitat.

L'evolució ha continuat amb el desenvolupament de una nova família de sensors magnètics en el que les dues làmines ferromagnètiques estan separades per una fina capa aïllant. En aquestes, el corrent elèctric circula entre els dos elèctrodes ferromagnètics mitjançant el que s'anomena un procés túnel i així aquests sensor s'anomenen unions túnel magnètiques (MTJ) i poden emmagatzemar informació no-volàtil en forma d'estats de resistència diferent. Aquestes unions túnel magnètiques, constitueixen les memòries magnètiques MRAM. Aquest són uns primers exemples de dispositius que exploten l'espí de l'electró per a obtenir noves funcionalitats. Els dispositius GMR i les MTJ que hem descrit són els primers dispositius espintrònics i ben 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 aquesta glosa**, hem recorregut el llarg camí que científics i tecnòlegs han fet per arribar a comprendre i manipular el transport electrònic amb l'espí. És un petit

homenatge a la capacitat d'Albert Fert d'integrar, després d'una llarga i perseverant tasca personal, les peces d'un trencaclosques que molts científics al llarg de molts anys, han anat creant per a comprendre el transport elèctric en metalls magnètics. Crec que és també un reconeixement a la continuada contribució dels científics, fonamentalment europeus, a la comprensió del transport elèctric en sòlids.

En últim extrem, el descobriment de la GMR i el naixement de l'espintrònica, dels que Albert n'és pare, són el símbol del bon maridatge de la ciència bàsica i la tecnologia. Difícilment als anys 60, mentre Albert Fert preparava aliatges "massius" de metalls i analitzava les seves propietats amb tècniques "macroscòpiques", podia pensar en l'arribada de noves tecnologies de preparació de materials a l'escala nanomètrica que obririen les portes al transport depenent d l'espí que impactaria tan profundament les nostres vides.

**No podria** acabar aquesta Laudatio, sense remarcar la generositat i mestratge del doctorand. Generositat que l'ha portat a col·laborar amb investigadors d'arreu i molt especialment d'Universitats i centres de recerca catalans, a acollir investigadors joves al Laboratori que dirigeix a Palaiseau (Unité Mixte CNRS-Thales), a codirigir Tesis doctorals i participar en projectes de recerca amb centres del nostre entorn. El meu centre, l'Institut de Ciència de Materials de Barcelona, integrat al Nanocluster del Parc de Recerca de la UAB, és un exemple d'aquesta col·laboració, però no n'és l'únic. L'Albert Fert té una forta i vital vinculació amb Catalunya que tal vegada arrenca del seu enamorament per les nostres terres i molt especialment per les Alberes, que tantes vegades ha recorregut a peu mirant un mar sobre el que li agrada navegar. Aquesta vinculació però ben segur té una arrel més profunda, als carrers de Carcassona on va néixer i des d'on ha sentit proper el batec de la nostre cultura que és també seva.

**És per** tot això, que tinc l'honor i el privilegi de demanar en nom de la Facultat de Ciències i de l'Institut de Ciència de Materials de Barcelona del Consell Superior de Investigacions Científiques, a l'Excelentíssima i Magnífica Rectora de la Universitat de Barcelona, que se atorgui el grau de Doctor Honoris Causa al Prof. Albert Fert.