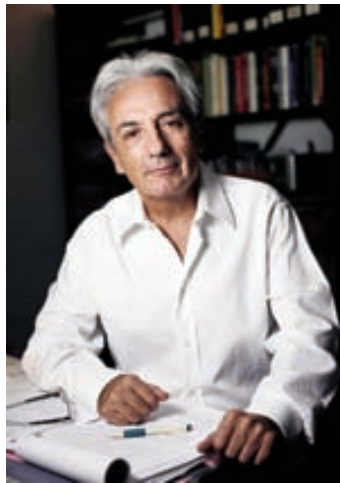


Doctor Honoris Causa

Albert Fert



UAB

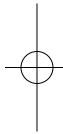
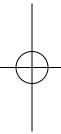
Universitat Autònoma de Barcelona

Doctor Honoris Causa
ALBERT FERT

Discurs llegit
a la cerimònia d'investidura
celebrada a la sala d'actes
de l'edifici del Rectorat
el dia 21 de maig
de l'any 2009

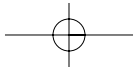
UAB

Universitat Autònoma de Barcelona

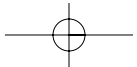
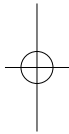
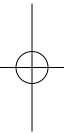


Editat i imprès
pel Servei de Publicacions
de la Universitat Autònoma de Barcelona
08193 Bellaterra (Barcelona)

Imprès a Catalunya



PRESENTACIÓ
D'ALBERT FERT
PER
JOSEP FONTCUBERTA
I JORDI BARTROLÍ



Albert Fert: de l'espín a l'espintrònica

Rectora Magnífica, vicerectors i vicerectores, degans i deganes, directors i directores de departament i membres del Claustre, col·legues, senyores i senyors.

Una aparent dicotomia plana permanentment sobre quina és la recerca que cal estimular en els nostres centres i les nostres facultats. Em refereixo al debat sobre la recerca bàsica i la recerca aplicada o, dit d'altra manera, entre ciència bàsica i tecnologia. Molts veuen, en aquesta contraposició, respostes diferents als reptes de la societat, que és qui majoritàriament, almenys en el nostre entorn immediat, finança la recerca i n'espera eines per aconseguir un coneixement i un benestar superiors.

Aquesta dialèctica massa sovint es planteja com si hi hagués una contradicció excloent entre les dues visions. Aquesta contraposició simplista reflecteix, segons el 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 aquest, les noves necessitats, s'encarregaran de valorar.

Voldria presentar Albert Fert com un exemple 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, que 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 de cançons guardades en el disc de memòria d'un petit iPod, quan repassem la nostra vida emmagatzemada en un ordinador, quan cerquem aquella informació amaga-

da 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 dos científics —Albert Fert, que avui tenim nosaltres, i Peter Grünberg— havien fet, de manera simultània i independent, tan sols nou anys abans (1988). Per aquest descobriment, anomenat *magnetoresistència gegant (GMR)* ambdós van rebre el premi Nobel de Física el 2007.

En un disc dur, la informació està emmagatzemada en forma de petits imants repartits al llarg de 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 per tal que càpiguen en un telèfon mòbil, un MP3, un iPod o un PC portàtil, cal que el 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 a poder llegir bits més petits! Això és el que ha fet possible la troballa de Fert i Grünberg. Ells van descobrir que determinats 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 cinc bilions i el seu ús ha permès arribar als discs durs actuals de més de 100 Gb amb 200 Gb/in² 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 les tecnologies de fabricació de materials a escala nanomètrica l'han fet possible. I encara va més enllà: 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 concentra els esforços i l'interès d'investigadors i empreses d'arreu del món i que pot significar el relleu de l'electrònica actual.

Per a qui no està gaire familiaritzat 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*. Ho podem imaginar com si l'electró girés sobre ell mateix. Aquesta brúixola pot tenir dues orientacions en l'espai: l'electró gira en sentit horari o antihorari. Així direm que l'electró té l'espín *amunt* o l'espín *avall*. Tota l'electrònica que coneixem està basada en dispositius (transistors) que regulen el flux de càrrega elèctrica i no aprofiten l'espín. L'espintrònica explo-

ta la càrrega de l'electró i l'orientació de l'espín 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 Fer. La concessió del Nobel 2007 el reflecteix prou clarament, aquest impacte, i honestament no hi podria afegir res. M'agradaria però remarcar aquí altres aspectes que em semblen rellevants. Crec que és molt instructiu repassar el camí que va portar al descobriment de la magnetoresistència gegant. Veurem que és el fruit d'un llarg i obstinant esforç per comprendre en detall els mecanismes de transport d'electrons i la dependència en l'orientació de l'espín.

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. Així com l'art transcendeix, ens porta més enllà del que veiem i trenca els límits del que existeix, l'artista Albert Fert imagina i construeix nous materials que trenquen les limitacions dels materials coneguts fins llavors i li permeten d'explotar de manera extraordinària les seves propietats de transport elèctric dependent de l'espín.

Deixeu-me doncs fer un breu repàs de la història del transport elèctric en metalls.

a) Magnetoresistència i transport elèctric dependent de l'espín

La magnetoresistència (MR) és el canvi en la resistència elèctrica d'un conductor quan el col·loquem a l'interior d'un camp magnètic creat per un imant o per una bobina que transporta corrent elèctric. Alguns metalls com ara el ferro, el cobalt o el níquel són ells mateixos imants (metalls ferromagnètics), és a dir, tenen una imantació espontània. W. 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·lelament o perpendicularment a la direcció del corrent. Aquesta variació de resistència, anomenada *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 importància tecnològica enorme, particularment com a sensor de camp magnètic en nombroses aplicacions industrials, i com a capçal de lectura dels discs durs d'ordinador entre els anys 1992 i 1997, abans que arribessin 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 *permalloy*) presentava valors d'AMR propers al 2% i no era, per tant, possible millorar la sensibilitat dels sensors disponibles.

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'espín (S) i el moment orbital (L), anomenat *acoblament espín-òrbita*. És doncs probablement el primer efecte espintrònic observat. No ha d'estranyar, però, que passessin molt anys abans que es comprenguéssin la magnetoresistència anisòtropa observada per Lord Kelvin el 1857, ja que els ingredients necessaris havien de tardar molt encara a arribar: el 1897 l'observació dels electrons (J. J. Thomson), el 1913 els àtoms i els seus estats orbitals (N. Bohr) i l'espín dels electrons força anys després (R. Kronig, 1925, W. Pauli, 1925, i P. Dirac, 1930).

Certament la comprensió de l'estructura de l'àtom i l'espín de l'electró és necessària però no suficient per a entendre les propietats dels sòlids. L'estudi de la resistivitat elèctrica en metalls ferromagnètics era objecte d'estudi al final dels anys trenta. Sir Nevil Mott va proposar, el 1936, que la conductivitat elèctrica dels metalls de transició (Co, Fe, Ni, Cu, etc.) seria determinada pels electrons $4s$ i els processos de dispersió amb els electrons $3d$. Aquesta simple idea va suposar un pas endavant, ja que va permetre comprendre les variacions observades de la resistivitat elèctrica en els metalls i explicar, per exemple, per què el Cu té una resistivitat elèctrica molt més baixa que el Ni, que és el seu antecessor en la taula periòdica. N. Mott també va proposar que, en els 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 espín cap amunt i un altre per electrons espín cap avall.

Calia, però, verificar la hipòtesi i l'estudi dels mecanismes de transport en aliatges de Fe i Ni. Aquest va ser el tema de recerca que Ian Campbell va proposar, l'any 1966, a Albert Fert per a la tesi doctoral. Albert Fert va sintetitzar aliatges d'un gran nombre de metalls i ben aviat (1967-1968) Fert i Campbell van poder verificar experimentalment la proposta de Mott. I, encara més important, Fert va poder demostrar que la 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 diferent sobre la dispersió dels electrons amb espín cap amunt o espín cap avall i per tant els valors de $\rho^{\downarrow}_0/\rho^{\uparrow}_0$ depenen del metall dopant. Al quocient $\rho^{\downarrow}_0/\rho^{\uparrow}_0 = \alpha$ l'anomena *asimetria d'espín*. L'asimetria d'espín pot ser $\alpha < 1$ o $\alpha > 1$, és a dir, en un cas és el canal espín cap amunt el que té dispersió més gran i en l'altre és el canal espín cap 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'espín 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'espín cap avall el que té la resistivitat més gran i si el dopem amb Cr és el canal d'espín cap amunt el que té resistivitat més gran.

Per a comprendre els mecanismes microscòpics que expliquen l'asimetria d'espín, Fert va haver d'explotar idees que altres investigadors de l'època estaven elaborant. Van ser particularment útils les idees de J. Friedel (1967), que, per a descriure la variació de la resistivitat en aliatges del tipus $Ni_{1-x}M'_x$ (on M' és un metall de transició) va introduir la idea dels estats lligats ressonants virtuals. Breument, els estats electrònics d'un àtom d'impuresa M' es combinen amb els de la matriu M , formant el que s'anomena un estat localitzat ressonant, localitzat prop de l'àtom d'impuresa. Si aquest estat ressonant es troba proper al nivell de fermi de la matriu M , llavors els electrons de conducció de M patiran una forta dispersió i la resistivitat del l'aliatge augmentarà.

Albert Fert va continuar treballant en aliatges metàl·lics. Van ser particularment aclaridors els aliatges ternaris, del tipus $Ni(Co_{1-x}Rh_x)$ i $Ni(Au_{1-x}Co_x)$. Va observar que la resistivitat de $Ni(Co_{1-x}Rh_x)$, per a composicions intermèdies, no segueix la variació lineal que caldria esperar de la coneguda regla de Matthiessen, mentre que aquesta regla sí que es verifica per $Ni(Au_{1-x}Co_x)$. Els resultats observats són consistents amb el fet que per les impureses de Co i Au ($\alpha > 1$) dispersen fortament els electrons espín cap avall i el Rh dispersa majoritàriament els electrons espín cap amunt ($\alpha < 1$). És evident que per a composicions intermèdies en $Ni(Co_{1-x}Rh_x)$ els dos canals de conducció (cap amunt i cap avall) són fortament dispersats. En el cas del $Ni(Au_{1-x}Co_x)$ sols un únic canal d'espín és fortament dispersat (cap amunt) mentre que l'altre canal (cap avall) no té dispersió i per tant la resistivitat de composicions intermèdies és més baixa.

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 ($M_A // M_B$) o antiparal·lelament ($M_A // -M_B$), llavors el transport de càrrega al llarg de la bicapa AB en el cas $M_A // -M_B$ serà comparable al cas $Ni(Co_{1-x}Rh_x)$ descrit abans i per tant d'alta resistivitat; al contrari, el cas $M_A // M_B$ serà equivalent a $Ni(Au_{1-x}Co_x)$ i 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: la 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 gruix i interfases a escala del nanòmetre, ja que els electrons perden la memòria de la seva orientació d'espín després de viatjar una certa distància (recorregut lliure mitjà) d'uns quants nanòmetres.

b) Acoblament magnètic entre làmines magnètiques

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

Els motius de l'elecció del Cr com a separador de les làmines ferromagnètiques de Fe fou que el Cr és un metall antiferromagnètic i es podia esperar que l'acoblament entre les làmines de Fe depengués molt del gruix de Cr. D'altra banda, l'estructura cristal·logràfica del Cr s'assembla força a la del Fe, de manera que es podia esperar que el creixement d'un metall sobre l'altre donés interfases abruptes. No em consta que P. Grünberg fos conscient, en aquell moment, de les implicacions que la diferència de l'asimetria d'espín del Cr i el Fe, que Fert havia descobert anys abans (1967), podien tenir sobre les propietats de transport de la tricapa.

P. Grünberg va tenir l'oportunitat de fer una estada als Argonne National Labs als EUA, on tenien experiència a fer créixer les làmines Fe/Cr/Fe. Ben aviat (1986) va publicar experiments amb els espectres BLS de les tricapes Fe/Cr/Fe per a diferents gruixos del separador (Cr). Per primera vegada s'observava que l'acoblament podia ser antiferromagnètic i que oscil·lava entre ferromagnètic-antiferromagnètic-ferromagnètic en funció del gruix del separador. 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 a explotar l'asimetria d'espín estava fet.

c) Creixement de multicapes metàl·liques

Des del començament dels anys setanta, els desenvolupaments en física, química i materials havien permès el desenvolupament de noves tècniques que van perme-

tre als científics la fabricació de materials completament nous. Fent servir el que s'anomenà el *creixement epitaxial* es van poder fer materials artificials apilant capes atòmiques de materials diferents. Tècniques com ara la polvorització catòdica, la deposició química en fase 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 i al 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 (*molecular beam epitaxy*, epitàxia de feixos moleculars) per al creixement de pel·lícules de semiconductors. Es van posar d'acord per a llançar una acció de creixement de multicapes magnètiques. 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 deu anys abans en aliatges metàl·lics i intentar reproduir-los en multicapes.

d) 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. Aviat, el 1988, van observar que la seva resistència elèctrica variava fins a un 80 % en aplicar a la multicapa una camp magnètic. Aquest valor de magnetoresistència era molt més gran del que mai s'havia obtingut. Van donar el nom de *magnetoresistència gegant* al seu descobriment. En l'article fundacional de 1988, Fert ja va anticipar el potencial tecnològic del descobriment. Un efecte similar va ser descobert pràcticament simultàniament per Grünberg a Jülich. S. 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 magnetoresistència. Les seves multicapes, fabricades per polvorització catòdica, una tècnica molt més versàtil i escalable industrialment que la MBE, tindrien un impacte capital en el procés d'industrialització de la GMR que IBM va liderar.

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

e) El naixement de l'espíntrònica

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 espín. El fet que, per la seva pròpia construcció, la GMR tingui dimensions de pocs nanòmetres i la seva 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 capçals de lectura de discs durs dels ordinadors i el paper determinant per poder augmentar la densitat dels discs.

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 aquestes, el corrent elèctric circula entre els dos elèctrodes ferromagnètics mitjançant el que s'anomena un *procés d'efecte túnel* i així aquest sensor s'anomenen *unions d'efecte túnel magnètic* (MTJ). Quan els dos elèctrodes tenen la imantació paral·lela, el corrent que circula entre ells és alt, i quan els elèctrodes estan imantats antiparal·lelament és baix. Els dos estats diferents de resistència els podem considerar com dos estats lògics 1 i 0. És important adonar-se que, atès 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 diferent. Aquestes unions d'efecte túnel magnètiques constitueixen memòries magnètiques MRAM per a les quals s'han trobat ja aplicacions. Aquests són uns primers exemples de dispositius que exploten l'espín 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 àrea de recerca i desenvolupament activa 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.

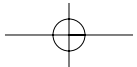
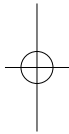
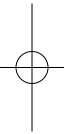
En aquest article hem recorregut el llarg camí que els científics i tecnòlegs han fet per a arribar a comprendre i manipular la dependència del transport electrònic amb l'espín. És un petit homenatge a la capacitat d'Albert Fert d'integrar, després d'una llarga i perseverant tasca personal, les peces 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 contribució continuada 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 quals Albert és pare, són el símbol del bon maridatge de la ciència bàsica i la tecnologia. Difícilment als anys seixanta, mentre Albert Fert amb perseverança preparava aliatges «massius» de metalls i analitzava les seves propietats amb tècniques

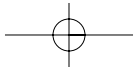
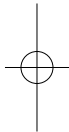
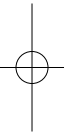
«macroscòpiques» podia pensar en l'arribada de noves tecnologies de preparació de materials a escala nanomètrica que obririen les portes al transport dependent de l'espín que impactaria tan profundament les nostres vides.

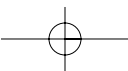
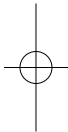
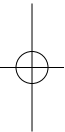
No podria acabar aquest presentació, sense remarcar la generositat i el mestratge del doctorand. Generositat que l'ha portat a col·laborar amb investigadors d'arreu i molt especialment d'universitats i centres de recerca catalans, a acollir investigadors joves al laboratori que dirigeix a Palaiseau (Unité Mixte CNRS - Thales), a codirigir tesis doctorals i a col·laborar en projectes de recerca amb centres del nostre entorn. El meu centre, l'Institut de Ciència de Materials de Barcelona (CSIC), integrat al clúster de nanotecnologia del Parc de Recerca de la UAB, és un exemple d'aquesta col·laboració, però no n'és l'únic. 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 qual li agrada navegar. Aquesta vinculació, però, ben segur que té una arrel més profunda, als carrers de Carcassona, on va néixer i des d'on ha sentit proper el batec de la nostra 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 d'Investigacions Científiques, a la Rectora Magnífica de la Universitat Autònoma de Barcelona, que s'atorgui el grau de doctor *honoris causa* al professor Albert Fert.



DISCURS
D'ALBERT FERT





Origin, Development and future of spintronics

Unité Mixte de Physique CNRS/Thales, 91767, Palaiseau,
and Université Paris-Sud, 91405, Orsay, France

Introduction

Spintronics, at the interface between magnetism and electronics, is a new field of research in considerable expansion. The basic concept of spintronics is the manipulation of spin currents, in contrast to mainstream electronics in which the spin of the electron is ignored. Adding the spin degree of freedom provides new effects, new capabilities and new functionalities. Everybody has already a spintronic device on their desktop, since the read heads of the hard disc drives of today use the giant magnetoresistance (GMR) phenomenon to read the magnetic information on the disc. The GMR, discovered at Orsay¹ and Jülich² in 1988, exploits the influence of the spin of the electrons on the electrical conduction in a magnetic multilayer composed of alternate ferromagnetic and nonmagnetic layers, Fe and Cr for example. The influence of the spin on the mobility of the electrons in ferromagnetic metals, first suggested by Mott³, had been experimentally demonstrated and theoretically described in early works⁴⁻⁵ more than ten years before the discovery of 1988. The GMR was the first step on the road of the utilization of the spin degree of freedom in magnetic nanostructures and triggered the development of an active field of research which has been called spintronics. Today this field is extending considerably, with very promising new axes like the phenomena of spin transfer, spintronics with semiconductors, molecular spintronics or single-electron spintronics.

From spin dependent conduction in ferromagnets to giant magnetoresistance

The roots of spintronics are in preceding researches on the influence of the spin on the electrical conduction in ferromagnetic metals³⁻⁵. The splitting between the energy band of the «majority spin» (spin up in the usual notation) and «minority spin» (spin down) directions, as shown in Fig. 1a, makes that the electrons at the Fermi level, which carry the electrical current, are in different states for opposite spin directions and exhibit different conduction properties. In first approximation, the conduction is by two channels in parallel (Fig. 1b). This spin dependent conduction, proposed by Mott³ in 1936 to explain some features of the resistivity of ferromagnetic metals at the Curie temperature, was experimentally demonstrated in the sixties⁴⁻⁵. In Fig. 1c I show an example of experimental results⁴ for Ni doped with different types of impurity. This led to the so-called «two current model» for the conduction in ferromagnets⁴⁻⁵. Some experiments⁴ with metals doped with two types of impurities (ternary alloys) were already anticipating the GMR concept but proceeding to the GMR of multilayers was requiring layer thicknesses in the nm range and was not possible at this time But the concept In the mid-eighties, with the development of

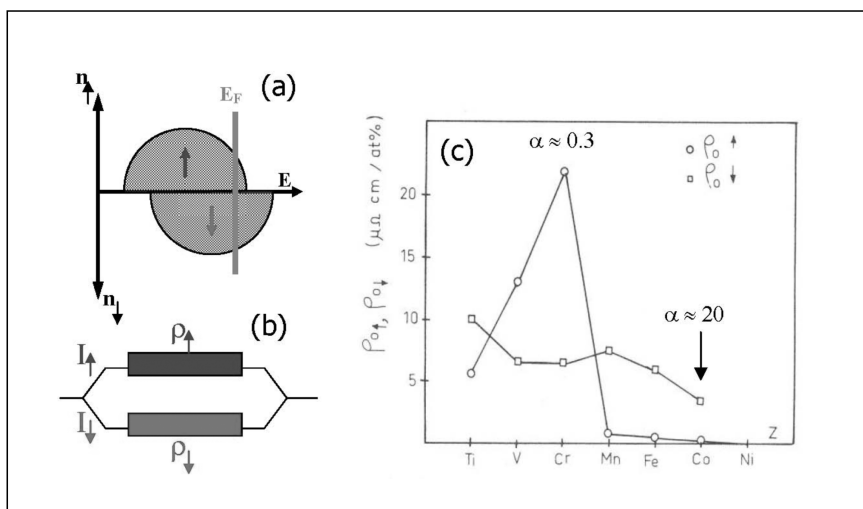


Figure 1. Basics of spintronics. (a) Schematic band structure of a ferromagnetic metal showing the energy band spin-splitting. (b) Schematic for spin dependent conduction through independent spin \downarrow and spin \uparrow channels in the limit of negligible spin mixing ($\rho_{\uparrow\downarrow} = 0$ in the formalism of Ref.[4]). (c) Resistivities of the spin up and spin down conduction channels for nickel doped with 1% of several types of impurity (measurements at 4.2 K)⁴. The ratio α between the resistivities $\rho_{0\downarrow}$ and $\rho_{0\uparrow}$ of the spin \downarrow and spin \uparrow channels can be as large as 20 (Co impurities) or, as well, smaller than one (Cr or V impurities).

techniques like the Molecular Beam Epitaxy (MBE), it became possible to fabricate multilayers composed of very thin individual layers and I could consider trying to extend my experiments on ternary alloys to multilayers. In addition, in 1986 Brillouin scattering experiments of Peter Grünberg and coworkers⁶ revealed the existence of antiferromagnetic interlayer exchange couplings in Fe/Cr multilayers. Fe/Cr appeared as a magnetic multilayered system in which it was possible to switch the relative orientation of the magnetization in adjacent magnetic layers from antiparallel to parallel by applying a magnetic field. We fabricated Fe/Cr multilayers and this led to our first observation¹ of GMR in 1988 (Fig.2a). Similar results were obtained practically at the same time by Peter Grünberg at Jülich² (Fig. 2b). The interpretation is illustrated in Fig. 2c. Rapidly, these results attracted attention for their fundamental interest as well as for the many possibilities of application to the detection of small magnetic fields. The first applications, magnetic sensors for the automotive industry, appeared in 1993. The application to the read heads of hard discs appeared in 1997 and led rapidly to a considerable increase of the density of information stored in discs (from 1 Gbit/in² to 200 Gbit/in² today).

During the first years of the research on GMR, the experiments were performed only with the current flowing along the layer planes, in the geometry we call now CIP (Current In Plane). It is only in 1993 that experiments of CPP-GMR began to be performed, that is experiments of GMR with the Current Perpendicular to the layer Planes. This was done⁷ either by sandwiching a magnetic multilayer between superconducting electrodes, and by electrodepositing the multilayer into the pores of a polycarbonate membrane. In the CPP-geometry, the GMR is not only definitely higher than in CIP, but also subsists in multilayers with relatively thick layers, up to the micron range⁷. In a theoretical paper with Valet⁸, I showed that, due to spin accumulation effects occurring in the CPP-geometry, the length scale of the spin transport becomes the long spin diffusion length in place of the mean free path for the CIP-geometry. Actually, the CPP-GMR has revealed the spin accumulation effects which govern the propagation of a spin-polarized current through a succession of magnetic and nonmagnetic materials and play an important role in all the present developments of spintronics.

Magnetic tunnel junctions and tunnelling magnetoresistance (TMR)

Another important phenomenon in spintronics is the Tunnelling Magnetoresistance (TMR) of the Magnetic Tunnel Junctions (MTJ) which are tunnel junctions with ferromagnetic electrodes. The resistance of MTJ is different for the parallel and antiparallel magnetic configurations of their electrodes. Some early observations of TMR effects, small and at low temperature, had been already reported by Jullière⁹ in 1975, but they were not easily reproducible and actually could not be really repro-

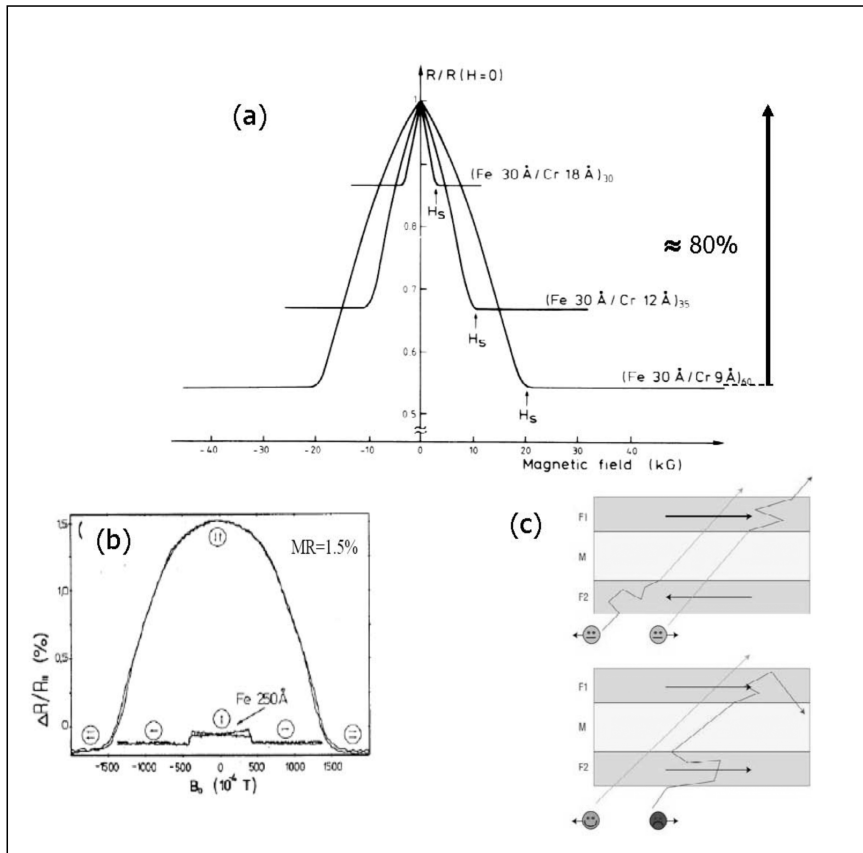


Figure 2. First observations of giant magnetoresistance. (a) Fe/Cr(001) multilayers¹ (with the current definition of the magnetoresistance ratio, $MR = 100(R_{AP} - R_P)/R_P$, $MR = 85\%$ for the (Fe 3nm/Cr 0.9nm) multilayer). (b) Fe/Cr/Fe trilayers². (c) Schematic of the mechanism of the GMR. In the parallel magnetic configuration (bottom), the electrons of one of the spin directions can go easily through all the magnetic layers and the short-circuit through this channel lead to a small resistance. In the antiparallel configuration (top), the electrons of each channel are slowed down every second magnetic layer and the resistance is high.

duced during 20 years. It is only in 1975 that large ($\approx 20\%$) and reproducible effects were obtained by Moodera's and Miyasaki's groups on MTJ with a tunnel barrier of amorphous alumina¹⁰. From a technological point of view, the interest of the MTJ with respect to the metallic spin valves comes from the vertical direction of the current and from the resulting possibility of a reduction of the lateral size to a

submicronic scale by lithographic techniques. The MTJ are at the basis of a new concept of magnetic memory called MRAM (Magnetic Random Access Memory) combining the short access time of the semiconductor-based RAM and the non-volatile character of the magnetic memories. In the first MRAM, put on the market in 2006, the memory cells are MTJ with an alumina barrier. The magnetic fields generated by «word» and «bit» lines are used to switch their magnetic configuration, see Fig. 3a. The next generation of MRAM, based on MgO tunnel junctions and a switching process by spin transfer, is expected to have a much stronger impact on the technology of computers.

The research on the TMR is currently very active and an important recent step was the transition from MTJ with amorphous tunnel barrier (alumina) to single crystal MTJ and especially MTJ with MgO barrier, see Fig. 3b. The first results on MTJ with epitaxial MgO barriers we obtained in 2001 in a collaboration with a Spanish group¹¹ were rapidly and greatly improved by two laboratories in 2004¹². A single crystal barrier filters the symmetry of the wave functions of the tunnelling electrons, so that the TMR depends on the spin polarization of the electrodes for the selected symmetry and can be very high. Today the research on TMR is still very active and tunneling through ferromagnetic, ferroelectric or multiferroic barriers is a promising direction of research¹³.

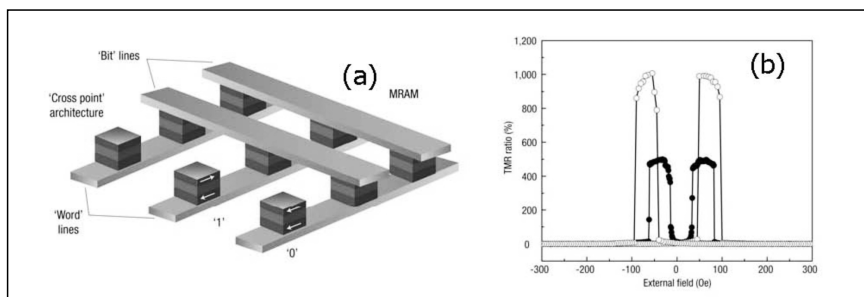


Figure 3. (a) Principle of the magnetic random access memory MRAM in the basic «cross point» architecture. The binary information «0» and «1» is recorded on the two opposite orientations of the magnetization of the free layer of magnetic tunnel junctions (MTJ), which are connected to the crossing points of two perpendicular arrays of parallel conducting lines. For writing, current pulses are sent through one line of each array, and only at the crossing point of these lines the resulting magnetic field is high enough to orient the magnetization of the free layer. For reading, one measures the resistance between the two lines connecting the addressed cell.. (b) High magnetoresistance, $TMR = (R_{max} - R_{min}) / R_{min}$, measured by Lee et al¹² for the magnetic stack: $(Co_{25}Fe_{75})_{80}B_{20}(4nm)/MgO(2.1nm)/(Co_{25}Fe_{75})_{80}B_{20}(4.3nm)$ annealed at 475°C after growth, measured at room temperature (black circles) and low temperature (open circles).

Magnetic switching and microwave generation by spin transfer

The study of the spin transfer phenomena is one of the most promising new directions in spintronics today. In spin transfer experiments, one manipulates the magnetic moment of a ferromagnetic body without applying any magnetic field but only by transfer of spin angular momentum from a spin-polarized current. The concept, which has been introduced by John Slonczewski¹⁴ and appears also in papers of Berger¹⁵, is illustrated in Fig.4. As described in the caption of the figure, the transfer of a transverse spin current to the «free» magnetic layer F₂ can be described by a torque acting on its magnetic moment. This torque can induce an irreversible switching of this magnetic moment or, in a second regime, generally in the presence of an applied field, it generates precessions of the moment in the microwave frequency range.

Most experiments are performed on pillar-shaped metallic trilayers (Fig.5a). In Fig.5b, I present examples of our experimental results in the low field regime of irre-

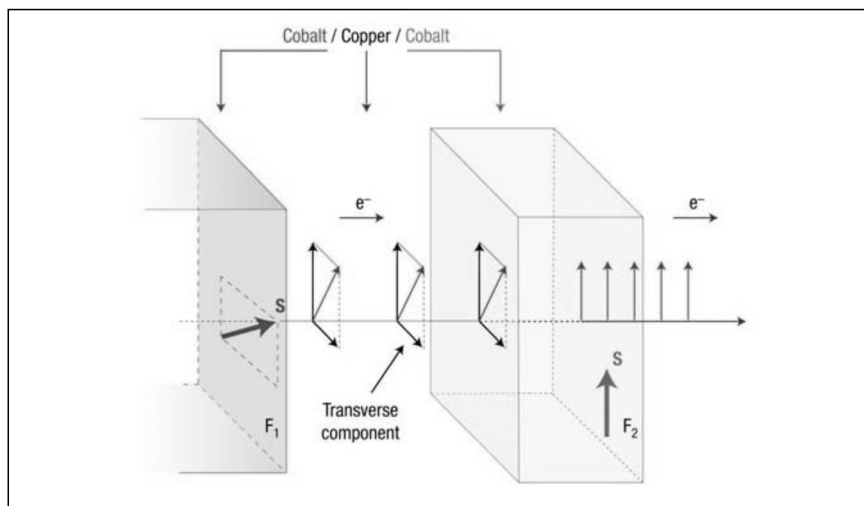


Figure 4: Illustration of the spin transfer concept introduced by John Slonczewski in 1996. A spin-polarized current is prepared by a first magnetic layer F₁ with an obliquely oriented spinpolarization with respect to the magnetization axis of a second layer F₂. When this current goes through F₂, the exchange interaction aligns its spin-polarization along the magnetization axis. As the exchange interaction is spin conserving, the transverse spin-polarization lost by the current has been transferred to the total spin of F₂, which can also be described by a spintransfer torque acting on F₂. This can lead to a magnetic switching of the F₂ layer or, depending on the experimental conditions, to magnetic oscillations in the microwave frequency range.

versible switching, for a metallic pillar and for a tunnel junctions with electrodes of the ferromagnetic semiconductor Ga $_{1-x}$ Mn $_x$ As. For metallic pillars or tunnel junctions with electrodes made of a dilute ferromagnetic transition metal like Co or Fe, the current density needed for switching is around 10^6 - 10^7 Amp/cm 2 , which is still slightly too high for applications, and an important challenge is the reduction of this current density. The switching time has been measured in other groups and can be as short as 100 ps, which is very attractive for the switching of MRAM. For the tunnel junction of Fig.5c, the switching current is only about 10^5 Amp./cm 2 and smaller than that of the metallic pillar by two orders of magnitude. This is because a smaller number of individual spins is required to switch the smaller total spin momentum of a dilute magnetic material.

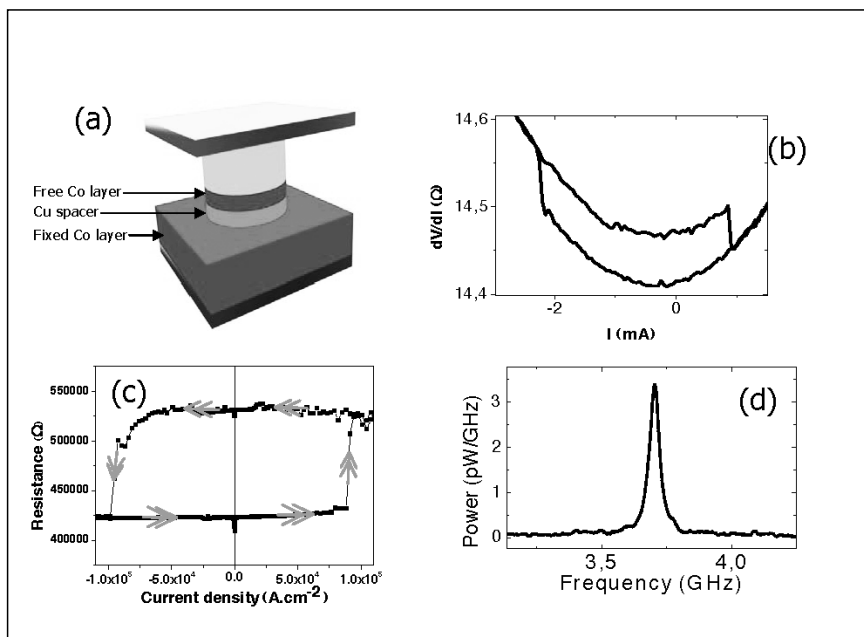


Figure 5: Experiments of magnetic switching and microwave generation induced by spin transfer from an electrical DC current in trilayered magnetic pillars. (a) Schematic of a trilayered magnetic pillar. (b) Switching by spin transfer between the parallel and antiparallel magnetic configurations of a Co/Cu/Co metallic pillar. The switching between parallel and antiparallel orientations of the magnetizations of the two magnetic layers of the trilayer is detected by irreversible jumps of the resistance at a critical value of the current. The critical current density is of the order of 10^7 A/cm 2 . (c) Switching by spin transfer of a pillar-shaped tunnel junction composed of electrodes of the dilute ferromagnetic semiconductor GaMnAs separated by a tunnel barrier of InGaAs. The critical current is about hundred times smaller than in the Py/Cu/Py pillar. (d) Typical microwave power spectrum of a Co/Cu/Py pillar (Py =permalloy).

In the presence of a large enough magnetic field, the regime of irreversible switching of the magnetization of the «free» magnetic layer in a trilayer is replaced by a regime of steady precessions of this free layer magnetization sustained by the spin transfer torque. As the angle between the magnetizations of the two magnetic layers varies periodically during the precession, the resistance of the trilayer oscillates as a function of time, which generates voltage oscillations in the microwave frequency range, see the record of the microwave power versus frequency in Fig.5d. In other conditions, the spin transfer torque can also be used to generate an oscillatory motion of a magnetic vortex.

The spin transfer phenomena will have certainly important applications. Switching by spin transfer will be used in the next generation of MRAM and will bring great advantages in terms of precise addressing and low energy consumption. The generation of oscillations in the microwave frequency range will lead to the design of Spin Transfer Oscillators (STOs). One of the main interests of the STOs is their agility, that is the possibility of changing rapidly their frequency by tuning a DC current. Their disadvantage is the very small microwave power of an individual STO, metallic pillar or tunnel junction. The solution is certainly the synchronization of a large number of STOs.

Spintronics with semiconductors

Spintronics with semiconductors is very attractive as it can combine the potential of semiconductors (control of current by gate, coupling with optics, etc) with the potential of the magnetic materials (control of current by spin manipulation, non-volatility, etc). It should be possible, for example, to gather storage, detection, logic and communication capabilities on a single chip that could replace several components. New concepts of components have also been proposed, for example the concept of Spin Field Effect Transistors (Spin FETs) based on spin transport in semiconductor lateral channels between spin-polarized source and drain with control of the spin transmission by a field effect gate¹⁷. Some nonmagnetic semiconductors have a definite advantage on metal in terms of spincoherence time and propagation of spin polarization on long distances. Spintronics with semiconductors is currently developed along several roads.

- i) The first road is by working on hybrid structures associating ferromagnetic metals with nonmagnetic semiconductors. Schmidt et al¹⁸ have raised the problem of «conductivity mismatch» to inject a spinpolarized current from a magnetic metal into a semiconductor. Solutions have been proposed by the theory¹⁹⁻²⁰ and one knows today that the injection/extraction of a spin-polarized current into/from a semiconductor can be achieved with a spin-dependent interface resistance,

typically a tunnel junction. Spin injection/extraction through a tunnel contact has been now demonstrated. in spin LEDs and magneto-optical experiments. However, in structures for lateral spin transport between spin-polarized sources and drains (typical structures for logic gate or transistor applications), only very modest results have been obtained up to now, the contrast between parallel and antiparallel magnetic configurations of the source and the drain never exceeding a few %.

- a. Another road for spintronics with semiconductors is based on the fabrication of ferromagnetic semiconductors. The ferromagnetic semiconductor $\text{Ga}_{1-x}\text{Mn}_x\text{As}$ ($x \approx$ a few %) has been discovered²¹ by the group of Ohno in Sendai in 1996, and, since this time, has revealed very interesting properties, namely the possibility of controlling the ferromagnetic properties with a gate voltage, and also large TMR and TAMR (Tunnelling Anisotropic Magnetoresistance) effects. However its Curie temperature has reached only 170 K, well below room temperature, which rules out most practical applications. Several room temperature ferromagnetic semiconductors have been announced but the situation is not clear on this front yet.
- ii) The research is now very active on a third road exploiting spin-polarized currents induced by spin-orbit effects, namely the Spin Hall, Rashba or Dresselhaus effects. In the Spin Hall Effect²¹, for example, spin-orbit interactions deflect the currents of the spin up and spin down channels in opposite transverse directions, thus inducing a transverse spin current, even in a nonmagnetic conductor. This could be used to create spin currents in structures composed of only nonmagnetic conductors.

Spintronics in carbon-based materials

Spintronics with carbon nanotubes, graphene or organic molecules is a very promising road. The advantage is the long spin lifetime due to the small spin-orbit coupling of carbon and also, for nanotubes or graphene, and also the very high electron velocity in nanotubes and graphene which makes that, for example, their dwell time in a long lateral channel can be shorter than the spin lifetime. In contrast with what is found for transport in devices based on semiconductors, experiments on carbon nanotubes have shown that the spin information can be transported to long distances and transformed in large electrical output signals. In Fig.6 we present an example of experimental result with a nanotube between LSMO electrodes²². This shows the potential of carbon-based electronics.

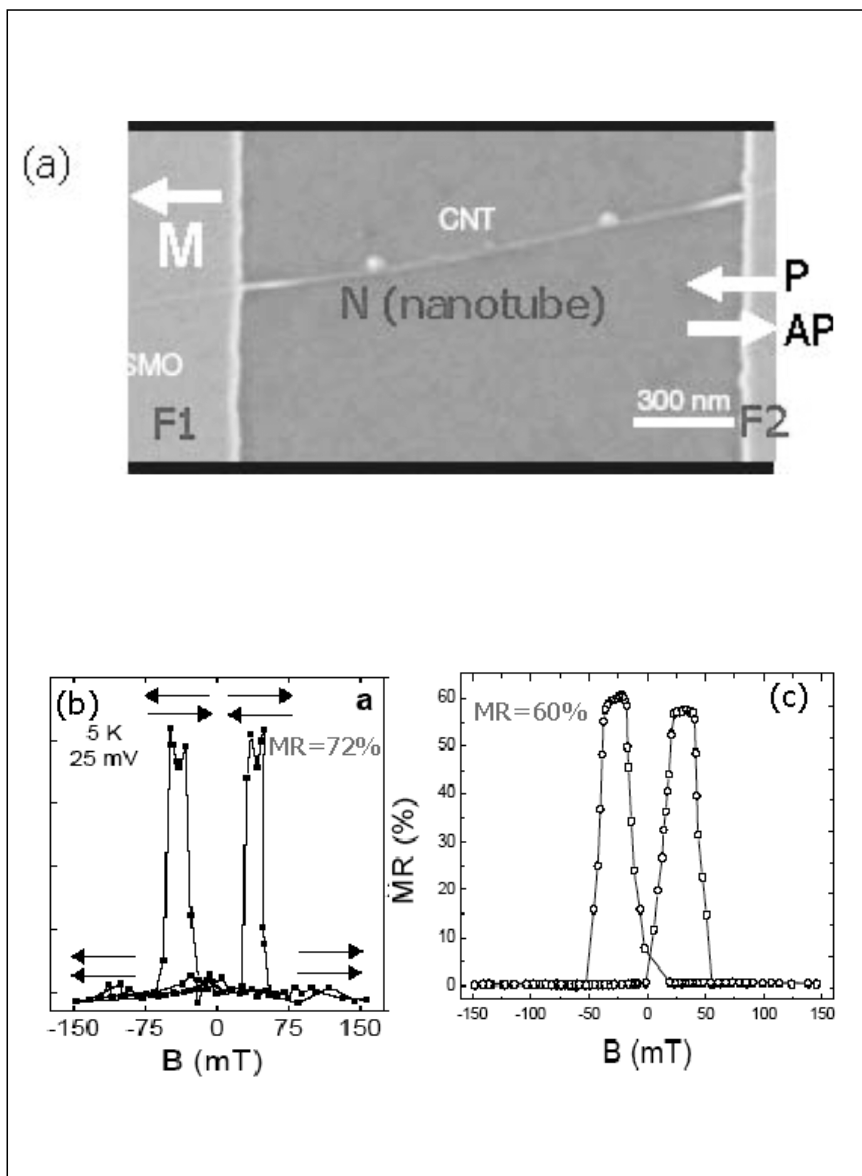


Figure 6. Spintronics with molecules illustrated by, (a): Electron microscopy image of a carbon nanotube between LSMO electrodes (LSMO = $\text{La}_{2/3}\text{Sr}_{1/3}\text{MnO}_3$). (b-c): Magnetoresistance experimental results²² at 4.2 K on carbon nanotubes between electrodes made of LSMO. A contrast of 72% and 60 % is obtained between the resistances for the parallel (high field) and antiparallel (peaks) magnetic configurations of the source and drain.

Conclusion

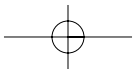
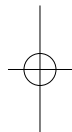
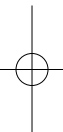
In less than twenty years, we have seen spintronics increasing considerably the capacity of our hard discs and getting ready to enter the RAM of our computers or the microwave emitters of our cell phones. Spintronics with semiconductors or molecules is very promising too. It can also be mentioned that another perspective, out of the scope of this lecture, might be the exploitation of the truly quantum mechanical nature of spin and the long spin coherence time in confined geometry for quantum computing in an even more revolutionary application. Spintronics should take an important place in the technology of our century.

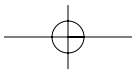
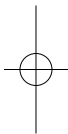
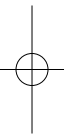
References

- [1] M.N. Baibich, J.M. Broto, A. Fert, F. Nguyen Van Dau, F. Petroff, P. Etienne, G. Creuzet, A. Friederich, and J. Chazelas, *Phys. Rev. Lett.* **61**, 2472 (1988).
- [2] G. Binash, P. Grünberg, F. Saurenbach, and W. Zinn, *Phys. Rev. B* **39**, 4828 (1989).
- [3] F. Mott, *Proc. Roy. Soc. A* **153**, 699 (1936). [4]; A. Fert and I. A. Campbell, *Phys. Rev. Lett.* **21**, 1190 (1968); A. Fert and I. A. Campbell, *J. Phys. F* **6**, 849 (1976).
- [5] B. Loegel and F. Gautier, *J. Phys. Chem. Sol.* **32**, 2723 (1971).
- [6] P. Grünberg, R. Schreiber, Y. Young, M. B. Brodsky, H. Sowers, *Phys. Rev. Lett.* **57**, 2442 (1986).
- [7] J. Bass and W. P. Pratt, *J. Magn. Magn. Mater.* **200**, 274 (1999); A. Fert and L. Piraux, *J. Magn. Magn. Mater.* **200**, 338 (1999).
- [8] T. Valet and A. Fert, *Phys. Rev. B* **48**, 7099 (1993).
- [9] Jullière, *Phys. Lett.* **54A**, 225 (1975).
- [10] J. S. Moodera, L. R. Kinder, T. M. Wong, R. Meservey, *Phys. Rev. Lett.* **74**, 3273 (1995); T. Miyazaki and N. Tezuka, *J. Magn. Magn. Mater.* **139** (1995) 231
- [11] M. Bowen, V. Cros, F. Petroff, A. Fert, A. Cebollada, F. Briones, *Appl. Phys. Lett.* **79**, 1655 (2001).

-
- [12] Yuasa et al, *Nature Mater.* **3**, 868 (2004); S. S. P. Parkin et al., *Nature Materials* **3**, 862 (2004); Y. M. Lee, J. Hayakawa, S. Ikeda, F. Matsukura, H. Ohno, *Appl. Phys. Lett.* **90**, 212507 (2007).
- [13] M. Gajek, M. Bibes, S. Fusil, K. Bouzehouane, J. Fontcuberta, A. Barthélémy, A. Fert, *Nature Materials* **6**, 296 (2007).
- [14] J. C. Slonczewski, *J. Magn. Mat.* **159**, L1 (1996)
- [15] L. Berger, *Phys. Rev. B* **54** 9353 (1996)
- [16] M.D. Stiles and J. Miltat in *Spin Dynamics in Confined Magnetic Structures, III*, edited by Hillebrands and A. Thiaville (Springer, Berlin, 2006).
- [17] S. Datta and B. Das, *Appl. Phys. Lett.* **56**, 665 (1990)
- [18] G. Schmidt et al, *Phys. Rev. B* **62**, 4790 (2000).
- [19] E. I. Rashba, *Phys. Rev. B* **62**, 16267 (2000).
- [20] A. Fert and H. Jaffrès, *Phys. Rev. B* **64**, 184420 (2001).
- [21] H. Ohno et al., *Appl. Phys. Lett.* **69**, 363 (1996).
- [22] S. Zhang, *Phys. Rev. Lett.* **85**, 393 (2000); L. Vila, T. Kijmura, Y. Otani, *Phys. Rev. Lett.* **99**, 226604 (2007).
- [23] L.E. Hueso, J.M. Pruneda, V. Ferrari, G. Burnell, J.P. Valdes-Herrera, B.D. Simmons, P. B. Littlewood, E. Artacho, A. Fert, N.D. Mathur, *Nature* **445**, 410 (2007).

CURRICULUM VITAE
D'ALBERT FERT





Formació acadèmica

- 1959 Llicenciatura de Matemàtiques (Escola Normal Superior de París).
- 1961 Llicenciatura de Física (Escola Normal Superior de París).
- 1970 Doctorat de Ciències Físiques (Universitat París - Sud), presentació de la tesi doctoral sobre les propietats de transport elèctric en níquel i ferro, sota la direcció de I. A. Campbell.

Dades professionals

- 1962-1964 Professor ajudant a la Universitat de Grenoble.
- 1965-1976 Professor ajudant a la Universitat París - Sud (Orsay, França).
(1971: investigador postdoctoral a la Universitat de Leeds, Regne Unit).
- Des de 1976 Professor de Física a la Universitat París - Sud (Orsay, França), professor emèrit des de 2006.

Recerca

- 1970-1995 Director del grup de recerca del Laboratori de Física de Sòlids (Orsay, França).
- Des de 1995 Director científic, Unité Mixte de Physique CNRS/Thales (Palaiseau, França). Recerca teòrica i experimental en física de la matèria condensada (metalls i aliatges, magnetisme, nanoestructures magnètiques, espintrònica).

1988 Descobriments de la magnetoresistència gegant (GMR).

Des de 1988 Nombroses contribucions al desenvolupament de l'espíntrònica i el nanomagnetisme.

Publicacions i conferències

Aproximadament 300 articles, amb col·laboracions en 7 llibres. Més d'11.000 citacions (l'article publicat el 1988 sobre el descobriment de la GMR, amb 2.455 citacions el març de 2003, ha ocupat el 6è lloc en el rànquing dels deu articles més citats de la revista *Physical Review Letters* des de la seva creació l'any 1953). Aproximadament 200 vegades ponent convidat en congressos internacionals.

Premis i distincions

1994 Premi internacional James C. McGroddy Prize for New Materials de la Societat Americana de Física (APS), amb P. Grünberg i S. S. P. Parkin.

1994 Premi de magnetisme de la IUPAP, amb P. Grünberg.

1994 Premi de física Jean Ricard de la Societat Francesa de Física (SFP).

1997 Premi Europhysics de la Societat Europea de Física (EPS), amb P. Grünberg i S. S. P. Parkin.

2003 Medalla d'or del Centre Nacional per a la Recerca Científica (CNRS).

2004 Escollit membre de l'Acadèmia de les Ciències de França.

2007 Premi Japan Prize de la Fundació de Ciència i Tecnologia del Japó (STFJ), amb P. Grünberg.

2007 Premi de física de la Wolf Foundation, amb P. Grünberg.

2007 Premi Nobel de Física, amb P. Grünberg.