



Aprile 2026

# REPORT

del

## COORDINAMENTO INGEGNERI E TECNICI



Per contatti: [coordinamento.ingtec@gmail.com](mailto:coordinamento.ingtec@gmail.com)

# LA MATEMATIZZAZIONE NELLO STUDIO DELLE TERRE RARE





## NOTA INTRODUTTIVA

La *green economy* ha sviluppato una serie di innovazioni tecnologiche, facendo da apripista nella ricerca sui minerali critici e le terre rare. Lo sviluppo della ristrutturazione digitale e dell'intelligenza artificiale si sono aggiunti alla missione. Anche il nuovo ciclo di riarmo preme per avere la sua parte.

Da qui origina la forte domanda di terre rare che sta caratterizzando gli ultimi anni.

La tregua di Busan siglata tra Donald Trump e Xi Jinping il 30 ottobre del 2025 ha rappresentato una sospensione temporanea della guerra commerciale tra USA e Cina, un accordo che mirava a fermare l'escalation di dazi e ritorsioni. La leva negoziale cinese, delle limitazioni all'export proprio di terre rare ha avuto un ruolo decisivo. Sono materiali monopolizzati da Pechino soprattutto nel processo di raffinazione e sono essenziali per le nuove tecnologie civili e militari, a pieno titolo incarnano un tratto della contesa.

Nei recenti accordi commerciali tra UE e Mercosur e tra UE e Australia un ruolo importante ha rivestito anche la possibilità, con questi accordi, di diversificare l'approvvigionamento europeo delle terre rare e ridurre la dipendenza dalla Cina.

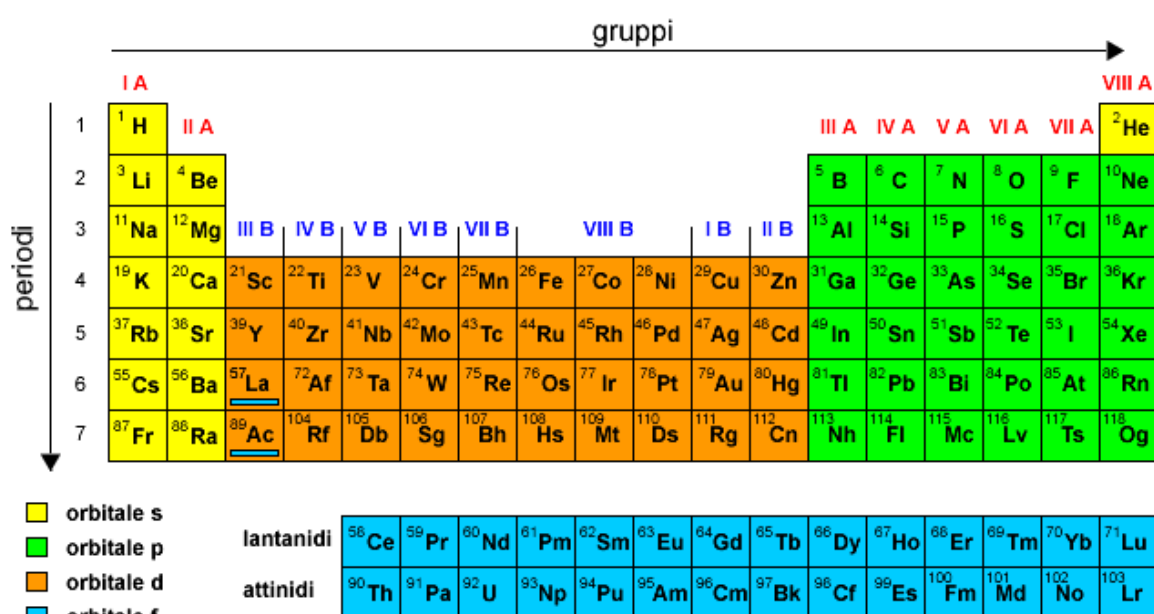
In questo report abbiamo deciso di approfondire la spiegazione fisica delle proprietà magnetiche delle terre rare.

## LA MATEMATIZZAZIONE NELLO STUDIO DELLE TERRE RARE

Le terre rare sono costituite dai lantanidi (lantanoide secondo la più recente nomenclatura IUPAC: Unione Internazionale di Chimica Pura e Applicata) con l'aggiunta di Ittrio e Scandio, che si trovano spesso nei loro minerali, anche se sono più leggeri.

Le caratteristiche chimico-fisiche sono determinate da stati energetici degli atomi in cui sono coinvolti gli **orbitali f**, che influenzano le proprietà per cui questi elementi sono importanti economicamente (proprietà **magnetiche, assorbimento e emissione di radiazione fra cui la luce visibile, proprietà catalitiche**).

Gli orbitali *f* sono 7. In ogni orbitale possono esserci 2 elettroni. 7 orbitali per 2 uguale 14 elementi, dal Cerio (Ce) al Lutezio (Lu) (prima riga blu nella figura 1). Il Lantanio, come l'Ittrio e lo Scandio, è considerato una terra rara anche se non ha orbitali *f* occupati<sup>1</sup>.



WWW.ANDREAMININI.ORG

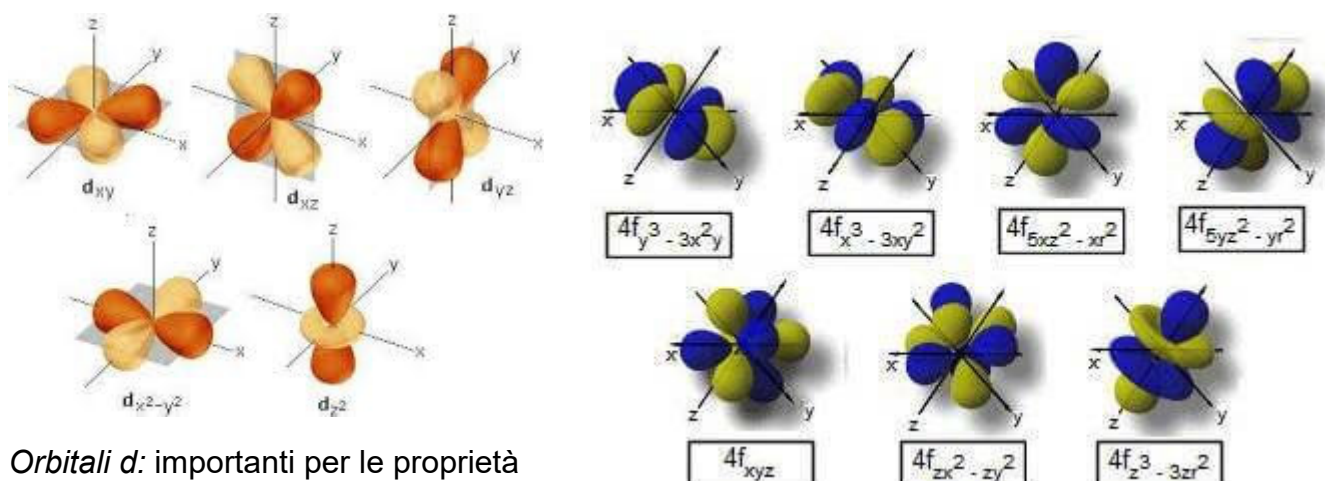
Fig 1. Tavola periodica degli elementi.

Le terre rare sono quindi 17. Il Promezio (Pm) è un metallo estremamente raro, prevalentemente prodotto artificialmente, poiché in natura si trova solo in tracce infinitesimali come prodotto di decadimento dell'Uranio. A causa della sua elevata radioattività e scarsità ha utilizzi specialistici e di nicchia.

Gli orbitali sono stati ricavati matematicamente dall'equazione di Schrödinger (1926), l'equazione alla base della nascita della meccanica quantistica che descrive il comportamento degli elettroni in un atomo. Sono delle funzioni matematiche che non hanno significato fisico.

**Il quadrato delle funzioni orbitali**, fra cui gli orbitali *f*, dà la densità di probabilità di trovare l'elettrone in un determinato spazio ed è dunque proporzionale alla **densità elettronica**.

Quest'ultima grandezza **ha significato fisico**: è qualcosa di reale che si può misurare sperimentalmente. Gli schemi degli orbitali riportati nelle figure di sotto, assomigliano a delle "nuvolette" e sono rappresentati da delle superfici al cui interno c'è una probabilità al 90% di trovare l'elettrone (qualche volta si rappresenta il 95%).



**Orbitali d:** importanti per le proprietà chimico-fisiche dei metalli di transizione come Nichel, Cobalto, Ferro, Manganese

**Orbitali f:** sono quelli importanti per i lantanidi. Il colore rappresenta il segno della funzione orbitale una volta resa reale

Gli orbitali *f* hanno specifiche caratteristiche che influenzano molte delle proprietà di questi elementi. In primo luogo, descrivono una densità elettronica interna, che poco influenza i gusci più esterni, che sono coinvolti nella formazione dei legami chimici. Ne consegue che tutti i lantanidi hanno gusci esterni e comportamento chimico molto simile.

Inoltre, gli orbitali *f* hanno delle proprietà (tecnicamente si dice che sono meno schermanti) che determinano un fenomeno di progressiva riduzione del raggio atomico chiamato **contrazione lantanidica**<sup>2</sup>.

Questo fenomeno determina due aspetti:

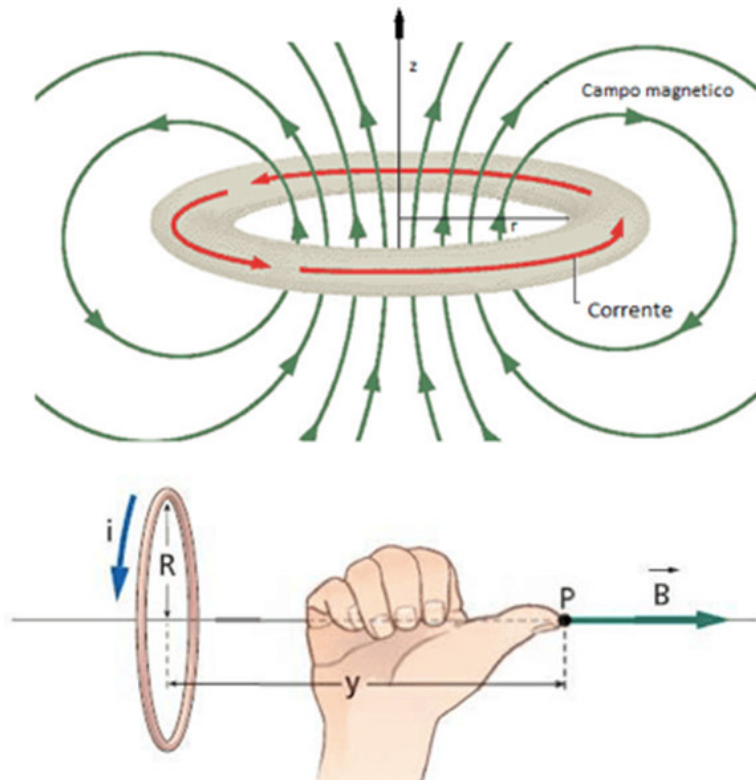
Primo) la grande similitudine del comportamento chimico dei lantanidi dovuto alla somiglianza delle loro dimensioni e alla valenza +3. Da qui discende la caratteristica più ostica dal punto di vista economico: **la difficoltà di separazione e raffinazione**.

Secondo) il fatto che ogni lantanide in ogni caso differisce, seppur di poco, rispetto a quello a lui vicino nella tavola periodica: questo comporta la **possibilità di modulazione** nei loro composti<sup>3</sup>.

### ASPETTI TEORICI

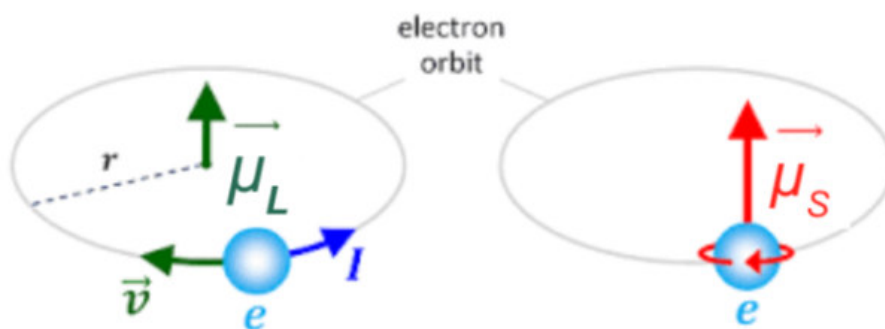
Per capire in maniera un po' più profonda come funziona il magnetismo nelle terre rare bisogna usare i concetti della meccanica quantistica. Non è lo scopo di questo lavoro ma un minimo di idee vanno introdotte.

Le proprietà magnetiche della materia sono dovute al moto degli elettroni (carichi negativamente) intorno al nucleo (carico positivamente). Nel moto dell'elettrone intorno al nucleo esso ha un **momento angolare orbitale (L)**. Siccome è carico negativamente è come se fosse una **spira di corrente** che produce conseguentemente un **momento magnetico angolare** (si indica di solito con  $\mu_L$ , figura 3), che genera un **campo magnetico**.



**Fig 2.** Una spira di corrente produce un campo magnetico rivolto verso l'alto (vettore in verde) se il verso della corrente è antiorario (vettore in rosso) oppure verso il basso se il verso della corrente è orario

Inoltre, oltre al moto attorno al nucleo, l'elettrone è dotato di un **momento angolare intrinseco o di spin**, si comporta come se ruotasse su sé stesso come una trottola, anche se secondo la meccanica quantistica, non è una rotazione vera e propria.



**Fig.3.** Il momento magnetico angolare a sinistra e il momento magnetico di spin a destra.

Semplificando molto, poiché l'elettrone è una particella carica, possiamo immaginare come se fosse una **“mini spira”** dove la corrente corre lungo la “circonferenza massima della sfera dell'elettrone” e quindi ha un **momento magnetico di spin** ( $\mu_s$ , figura 3).

Nella figura 4,  $m_s$  è formalmente il numero quantico di spin che, secondo la meccanica quantistica può avere solo due valori, o è rivolto schematicamente verso l'alto ( $+ \frac{1}{2} \uparrow$ ) o verso il basso ( $- \frac{1}{2} \downarrow$ ). Avremo quindi **un altro conseguente campo magnetico generato dallo spin.**

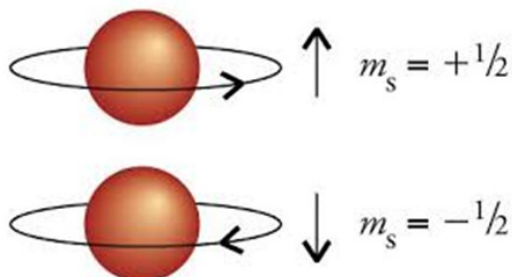


Fig.4a

In realtà non è che l'elettrone gira su sé stesso come una trottola: questa è **una schematizzazione della meccanica classica**, cioè antecedente alle concettualizzazioni della meccanica quantistica. Bisogna immaginarlo in realtà non come una pallina ma come **una nube delocalizzata**, come visto sopra negli schemi degli orbitali. Le misure sperimentali registrano che c'è una qualche forma di rotazione dell'elettrone intorno al nucleo e un dipolo magnetico intrinseco di spin associato all'elettrone come se esso fosse una sua proprietà fondamentale.

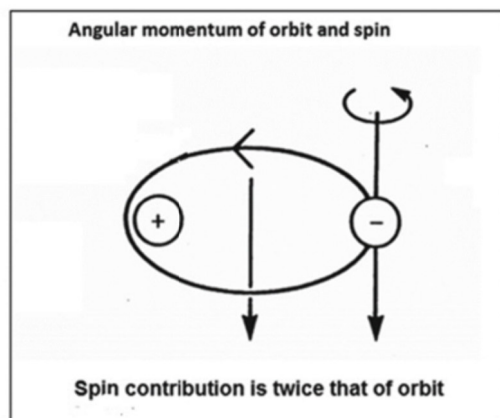
I due dipoli magnetici generati dallo spin elettronico e dal suo moto attorno al nucleo interagiscono tra di loro e fanno sì che il moto dell'elettrone non sia determinato solo dal suo momento angolare orbitale, ma da un **momento angolare totale  $J$**  nato dall'accoppiamento tra i momenti angolari  $L$  e  $S$ , detto anche **accoppiamento spin-orbita**. Si può dimostrare che questi due momenti angolari si combinano tra loro in un modo che ricorda la regola del parallelogramma (con cui nella fisica classica si combinano le grandezze vettoriali come la forza o la velocità), anche se questo confronto non può essere esteso strettamente poiché nella meccanica quantistica questi momenti angolari possono assumere solo precisi valori discreti, poiché sono quantizzati, e solo una delle tre componenti cartesiane di questi vettori può essere conosciuta per il principio di indeterminazione di Heisenberg.

A questo momento totale  $J$  è associato un momento magnetico totale (si indica con  $\mu_J$ ) e un conseguente campo magnetico.

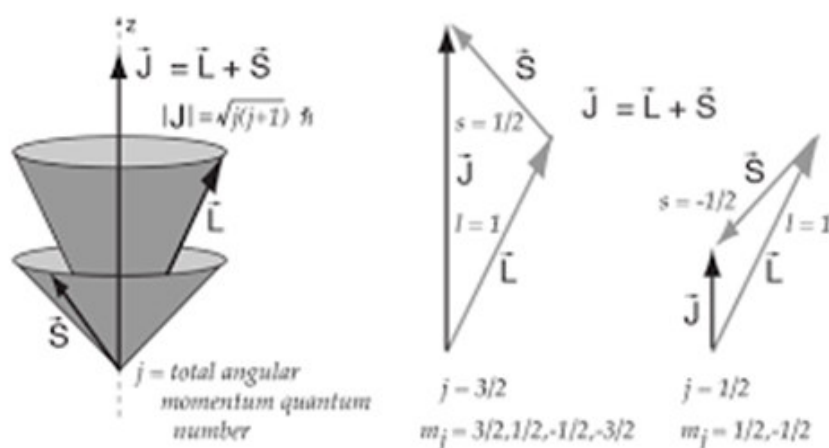
**Il campo magnetico risultante associato a un singolo elettrone dipende quindi da questo momento totale  $J$ .**

Negli atomi polielettronici (con più elettroni) come le terre rare, tutti i contributi derivanti dai singoli elettroni si combinano in modo simile ai vettori, dando un unico momento angolare totale  $J$  valido per tutto l'atomo. Nelle notazioni dei testi scientifici, quando si parla di momenti angolari (siano essi orbitale, di spin, o totale) associati a un singolo elettrone si usano le lettere minuscole, quando si parla di vettori che valgono per tutto l'atomo si usano le lettere maiuscole.

Negli atomi leggeri (numero atomico  $<30$ ) prima si accoppiano fra di loro tutti i momenti angolari orbitali dei singoli elettroni dando un unico momento angolare totale  $L$ , poi si accoppiano tutti i momenti di spin dando un unico momento totale di spin  $S$ ; a questo punto  $L$  si somma con  $S$  dando un unico momento totale  $J$ . Questo schema di accoppiamento vale per gli atomi leggeri e si chiama accoppiamento Russell-Saunders.



**Fig 4b.** Rappresentazione dello spin e del momento angolare di un elettrone. Il momento angolare di spin è due volte quello del momento angolare orbitale.



**Fig. 5.** Schema dell'accoppiamento L-S

Negli atomi pesanti, come le terre rare, l'interazione spin-orbita è molto forte e  $l$  e  $s$  non possono essere trattati separatamente. Per ogni elettrone si sommano  $l$  e  $s$  dando un momento totale  $j$  valido per il singolo elettrone. Soltanto dopo si sommano tutti i momenti  $j$  dei singoli elettroni dando un unico momento totale  $J$ . Questo schema di accoppiamento si chiama accoppiamento  $jj$ .

A onor di completezza, nel linguaggio matematico della meccanica quantistica si dice che l'operatore  $J$  commuta con la funzione di Hamilton mentre  $L$  e  $S$  non commutano. Solo per gli atomi leggeri, dove l'accoppiamento spin-orbita è debole, si può dire che anche  $L$  e  $S$  in prima approssimazione commutano con l'Hamiltoniana.

**Nelle terre rare  $J$  di solito è molto alto, sia poiché l'interazione spin-orbita è molto forte e sia perché i momenti angolari  $l$  ed  $s$  possono assumere valori molto alti. Di conseguenza anche il campo magnetico associato a questo momento totale sarà grande: questa è la prima parte dell'origine del loro magnetismo<sup>4</sup>.**

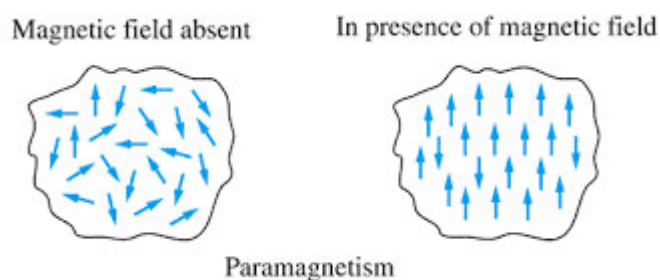
La **seconda parte** è data dal carattere **ferromagnetico** dei composti delle terre rare. Per capire questo concetto bisogna fare una piccola e sommaria rassegna<sup>5</sup>.

**Diamagnetismo:** La gran parte delle sostanze sono diamagnetiche: se sottoposte a un campo magnetico esterno, questo perturba il moto degli elettroni generando un campo magnetico opposto a quello esterno, anche se spesso esso è debole.

**Paramagnetismo** si ha quando abbiamo elementi o molecole con **elettroni esterni spaiati** cioè un elettrone per un solo orbitale. In un orbitale ci possono stare fino a due elettroni con spin opposti (quindi i loro momenti di spin si annullano). Gli orbitali *f* sono 7 e quindi, nei lantanidi, ci possono essere fino a 7 elettroni spaiati, situazione che si verifica per il **gadolinio**: questo elemento è molto paramagnetico e si usa nelle risonanze magnetiche in medicina (imaging) (**gadolinium based contrast agent**)

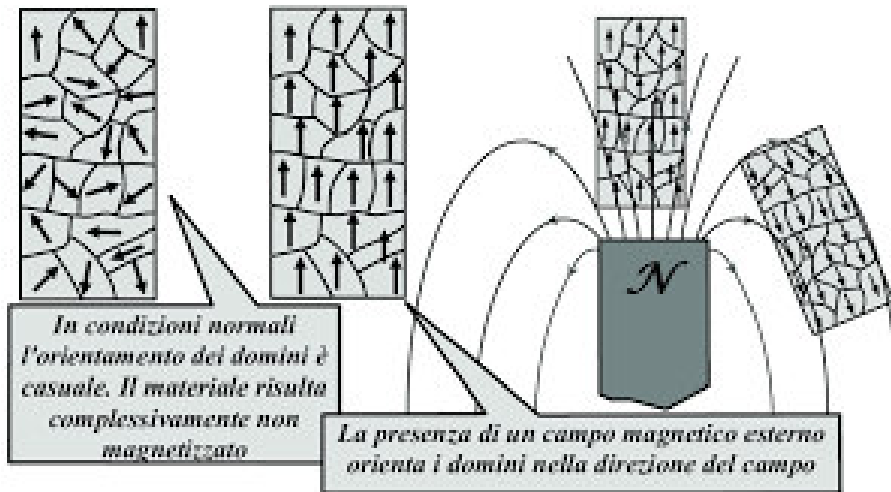
Un campo magnetico esterno tende a orientare tutti questi momenti magnetici di spin (tutti questi “magnetini”, questi magneti microscopici) in un'unica direzione e quindi i loro contributi si sommano e si crea un campo magnetico totale di grande intensità, che spesso è allineato con il campo magnetico esterno (fig. 6). Fra tutti i momenti magnetici dell'atomo si possono considerare solo quelli derivanti dallo spin degli elettroni spaiati, soprattutto quando si parla della prima serie dei metalli di transizione (Ferro, Cobalto, Nichel)<sup>6</sup>. Nelle terre rare come visto sopra è il vettore *J* da considerare complessivamente e per questo è più corretto in generale parlare di dipoli magnetici.

**IMPORTANTE:** quando viene tolto il campo magnetico esterno nei materiali paramagnetici i “magnetini” si disallineano e si ritorna a una materiale diamagnetico (in verità la componente diamagnetica c'è sempre anche nei materiali paramagnetici ma il contributo paramagnetico è molto più forte e la sovrasta).



**Fig. 6.** Paramagnetismo.

**Ferromagnetismo:** In alcuni materiali i momenti magnetici di un numero grande di atomi sono tutti accoppiati e già orientati in una direzione in particolari regioni (**domini magnetici**) dando già dei campi magnetici cumulativi ma tutti orientati in direzioni diverse, quindi con risultante nulla. Quando si applica il campo magnetico esterno questi domini si allineano fra di loro e si crea un campo magnetico forte. Questo effetto di amplificazione dei domini magnetici può far sì che i campi magnetici generati siano anche centinaia di volte più intensi di quelli dovuti al paramagnetismo. Per di più **QUANDO IL CAMPO MAGNETICO ESTERNO VIENE TOLTO TUTTI I DIPOLI MAGNETICI RIMANGONO ALLINEATI E IL CAMPO MAGNETICO RIMANE!** Si è formato un **magnete permanente**<sup>7</sup>. (Fig.7)



**Fig 7** Ferromagnetismo.

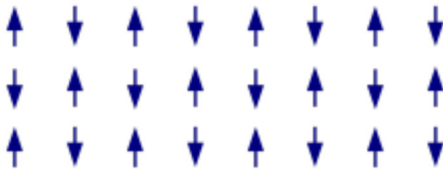
Questi magneti microscopici rimangono allineati, però se si aumenta la temperatura il moto termico comincia a disallinearli. Vi è una temperatura limite dove i domini si disallineano e il materiale perde completamente la magnetizzazione: **la temperatura di Curie**.

**LA TEMPERATURA DI CURIE E' IL CONCETTO PIU' IMPORTANTE PER CAPIRE L'UTILIZZO DEI MAGNETI DAL PUNTO DI VISTA ECONOMICO.**

Esistono altri due tipi di orientamento magnetico.

L'orientamento **antiferromagnetico** si ha quando i dipoli si allineano come due vettori che puntano lungo la stessa direzione ma in verso opposto. Quindi in maniera antiparallela.

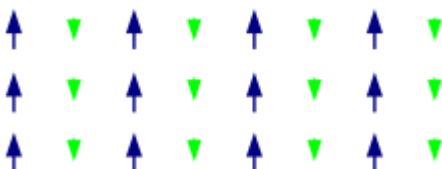
Il risultato netto è di avere un campo magnetico nullo perché i vettori si annullano:



**Fig 8.** Antiferromagnetismo.

I materiali antiferromagnetici a una certa temperatura diventano paramagnetici: questa temperatura di transizione si chiama temperatura di Néel.

L'orientamento **ferrimagnetico** (con la "i" al posto della "o") si ha quando i due vettori puntano in direzioni opposte ma hanno una lunghezza (si dice modulo) diversa, uno è più grande e l'altro è più piccolo. Quindi il risultato netto è un campo magnetico residuo. Questo è il caso della magnetite, il più comune magnete naturale, conosciuto fin dall'antichità, dove gli atomi di ferro orientano i loro dipoli in maniera ferrimagnetica.



**Fig. 9** Ferrimagnetismo.

## APPLICAZIONI PRATICHE

Le terre rare prese singolarmente non possono essere usate come magneti.

Come elementi puri hanno una temperatura di Curie bassa: quella massima è del Gadolinio che è 19 °C circa. Gli altri elementi sono abbondantemente sotto 0°C<sup>8</sup>.

Solo combinandoli insieme ai metalli di transizione (Cobalto e Ferro soprattutto) e formando delle leghe date da lantanide più metallo di transizione chiamate “intermetallics” abbiamo composti con alte prestazioni magnetiche<sup>9</sup>.

La prima lega è il **SmCo (Samarium-Cobalto, le fasi più comuni sono: SmCo<sub>5</sub> e Sm<sub>2</sub>Co<sub>17</sub>)** che ha una temperatura di Curie di 700-800 °C ed è stata scoperta nel laboratorio militare aeronautico di Dayton nel 1967 per lo sviluppo dei radar. Ha applicazioni militari importantissime proprio grazie alla sua alta temperatura di Curie: **dai radar alle tecnologie Stealth negli aerei F35, dal cosiddetto “jamming” cioè il disturbo dei segnali radar alla guerra elettronica dove trova applicazioni in tanti dispositivi**<sup>10</sup>.

La seconda lega è quella al **NdFeB (Neodimio-Ferro-Boro, Nd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B)**.

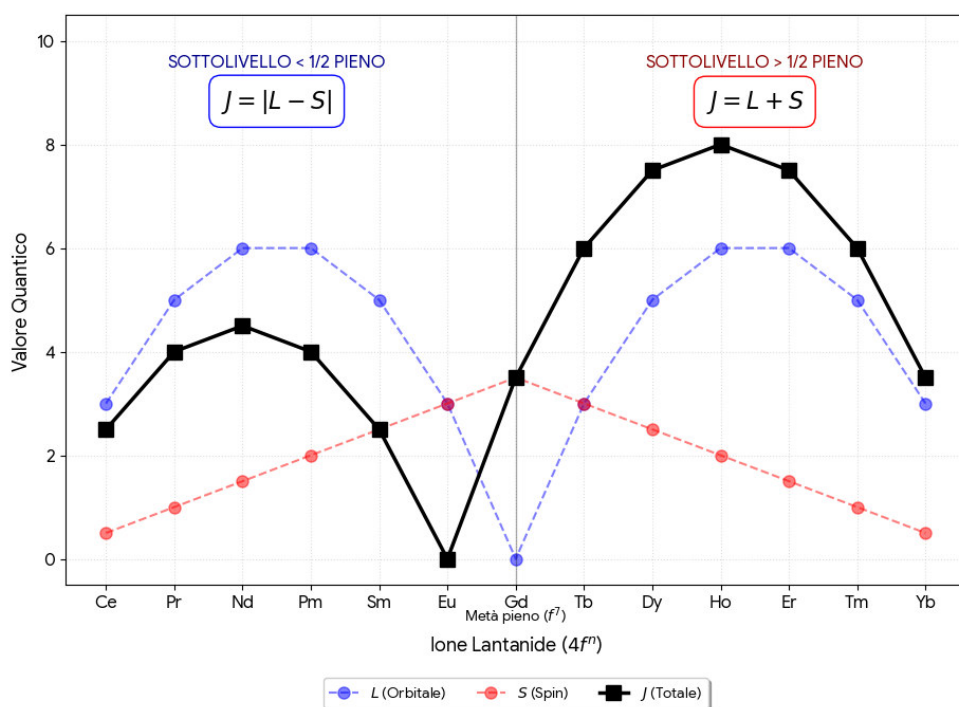
**La lega Neodimio-Ferro-Boro è il magnete permanente che si usa nei motori delle auto elettriche e nei generatori delle pale eoliche**<sup>11</sup>.

Il Boro ha la funzione di stabilizzare la lega. Ha una temperatura di Curie intorno ai 300 °C e può essere aumentata **con drogaggio di Disprosio e Terbio** che vengono inseriti in piccole quantità. **Senza il drogaggio questi magneti già a 80°C inizierebbero a perdere potenza e non sarebbero utilizzabili nelle auto perché devono resistere a campi magnetici opposti durante il funzionamento del motore elettrico, cioè in linguaggio tecnico devono avere una coercitività alle alte temperature, proprietà che vedremo più avanti.** La temperatura massima di utilizzo, in pratica, deve essere ben al di sotto della temperatura di Curie. Il Disprosio costa 500-600 dollari al chilo sia perché è difficile da estrarre (il suo nome in greco vuol dire proprio “difficile da ottenere”) sia perché è essenziale per aumentare la temperatura di Curie e la coercitività di questi magneti. Per confronto: il Neodimio costa 50 dollari, il Cerio 5 dollari al chilo.

Andiamo a vedere come funzionano più in profondità questi tipi di magneti. Nelle terre rare leggere, cioè quelle della prima metà della serie dei lantanidi (per esempio il Praseodimio e il Neodimio) l'accoppiamento spin-orbita da un momento totale  $J$  dato dalla **differenza** fra il momento angolare totale  $L$  e il momento di spin totale  $S$ ,  $J = |L - S|$ . Nella seconda metà delle terre rare, le cosiddette terre rare pesanti (heavy rare earth, per esempio il Terbio, il Disprosio, l'Olmio e l'Erbio)  $J$  è dato invece dalla **somma**  $J = L + S$  quindi, nel caso del Disprosio e dell'Olmio **la risultante  $J$  è maggiore** di quella del Neodimio. Questo fatto deriva dalla terza legge di Hund.

Friederich Hund era uno spettroscopista tedesco che aveva trovato tre leggi empiriche per interpretare gli spettri degli atomi. Semplicemente queste leggi aiutano a trovare gli stati fondamentali a più bassa energia, e quindi più stabili<sup>12</sup>.

Andamento di L, S e J: Applicazione della Terza Regola di Hund



**Fig.10.** In questo grafico si vede a sinistra che  $J$  per il Neodimio è più piccolo di quello del Disprozio a destra. Per il Neodimio,  $J$  è dato dalla differenza fra  $L$  e  $S$  ( $|L - S|$ ); per il Disprozio dalla somma ( $L + S$ ) per la terza legge di Hund. Tra l'altro, in questo grafico si vede un'altra cosa interessante: il vettore di spin è massimo per il Gadolinio che ha  $L = 0$ . Il vettore di spin massimo è conseguenza del fatto che ha 7 elettroni spaiati che sommano i loro contributi e per questo il Gadolinio è molto paramagnetico e viene utilizzato nella diagnostica medica. Il momento angolare totale  $L$  per il Gadolinio nello stato fondamentale è 0 perché i suoi sette elettroni sono distribuiti in maniera spaiata occupando ciascuno uno dei 7 orbitali, e il momento orbitale totale, dovuto alla somma dei contributi degli orbitali dei singoli elettroni si annulla. Quindi il Gadolinio ha momento angolare totale  $L = 0$ . Si vede anche che per lo stato fondamentale dell' $\text{Eu}^{3+}$  il momento totale  $J$  è zero.

Quindi ci si dovrebbe aspettare che per la classe dei composti Terra Rara-Ferro-Boro dovrebbe essere più utile il Disprozio, che ha il momento magnetico  $J$  fra i più grandi, come magnete più potente. **Invece no!**  
Perché?

Perché il momento  $J_{RE}$  della terra rara si accoppia con il momento  $J_{Fe}$  del metallo di transizione cioè il Ferro in questo caso.

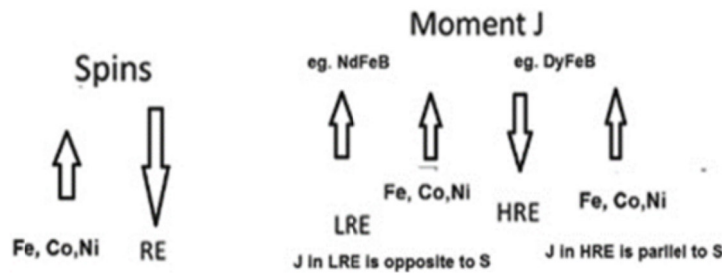
Siccome nel caso delle **terre rare leggere** l'accoppiamento è ferromagnetico ( $\uparrow\uparrow$  parallelo, concorde) le due frecce sono nella stessa direzione **il momento risultante si somma**. Questi composti sono ferromagnetici: i campi magnetici del Neodimio si accoppiano **ferromagneticamente** a quelli del Ferro. (vedere figura 11 e nota 13)

Invece nelle **terre rare pesanti** come per il Disprozio l'accoppiamento è **antiferromagnetico** ( $\uparrow\downarrow$  antiparallelo, discorde) quindi la **risultante è minore** rispetto a quella dei composti con le terre rare leggere.

Questo comportamento è spiegato da due teorie fisiche ad alto grado di matematizzazione, che nominiamo solamente: il modello di Campbell che agisce a corto raggio e il modello RKKY che agisce a lungo raggio. Alla base del modello di Campbell c'è l'interazione fra gli orbitali  $f$  e gli orbitali  $d$ , alla base del modello RKKY c'è l'interazione fra gli orbitali  $f$  e gli orbitali  $s$ .

L'essenziale che ci preme sottolineare è che anche in questo caso senza la teoria degli orbitali della meccanica quantistica questi fenomeni macroscopici del magnetismo non si possono spiegare<sup>14</sup>.

Quindi, l'alto momento magnetico del Disprosio e dell'Olmio non può essere sfruttato. Nella classe di composti ternari Terra Rara- Ferro- Boro **il massimo di magnetizzazione è quella con il Neodimio** e non poteva essere altrimenti!!



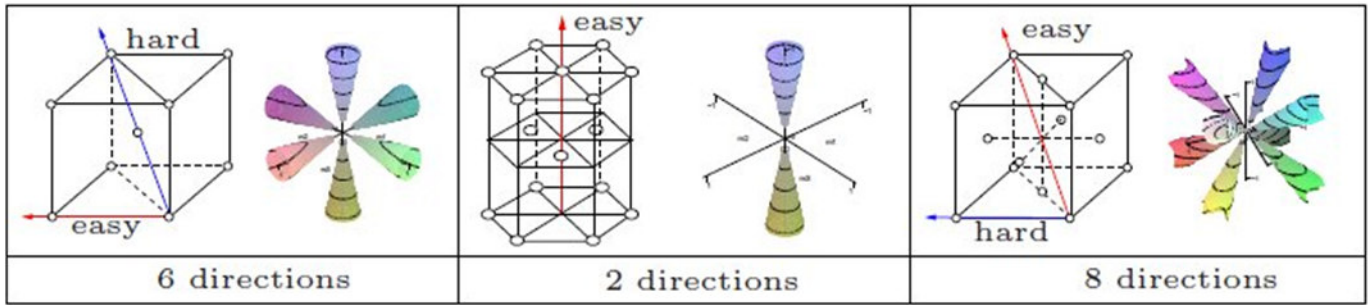
**Fig.11** Nella parte destra della figura sopra si vede: a sinistra accoppiamento fra il momento  $J$  delle LRE (light rare earth, terre rare leggere, per esempio Neodimio) e quello dei metalli di transizione (Ferro, Cobalto, Nichel) che è **concorde**; a destra l'accoppiamento fra il momento  $J$  delle HRE (heavy rare earth, terre rare pesanti, per esempio Disprosio) e quello del Ferro, Cobalto, Nichel che è **discorde**. Il risultato netto è che il momento magnetico totale  $J$  del NdFeB è **più grande** di quello del DyFeB. Notare che la freccia del momento  $J$  delle terre rare pesanti (HRE) è più **lunga** (perché l'accoppiamento per esempio nel Disprosio è la somma di  $L+S$ ) mentre la freccia del momento  $J$  nelle terre rare leggere (LRE) è più **corta** (perché l'accoppiamento nel Neodimio è la **differenza** fra  $L$  e  $S$ )

Ci sono quindi dei motivi matematici di composizione dei momenti angolari orbitali e di spin che permettono di spiegare razionalmente perché il magnete al Neodimio-Ferro-Boro è quello con la magnetizzazione più grande<sup>15</sup>.

Il **terzo concetto** per capire come funzionano questi magneti è l'**anisotropia**: vi è un asse dove la magnetizzazione è più facile da indurre e mantenere (di solito "l'asse c", viene chiamato anche **easy axis**, l'asse facile) e dove abbiamo una più elevata **coercitività**. **La coercitività è la proprietà di resistere alla smagnetizzazione di fronte a campi magnetici contrari, come avviene durante il funzionamento dei motori elettrici, proprietà che diminuisce all'aumentare della temperatura. Alla temperatura di Curie di un materiale la coercitività diventa zero.**

I magneti ad alta coercitività si dicono "duri" e sono quelli che si usano nei motori delle automobili. Quelli a bassa coercitività si dicono "dolci" e si usano per esempio nei trasformatori in elettrotecnica.

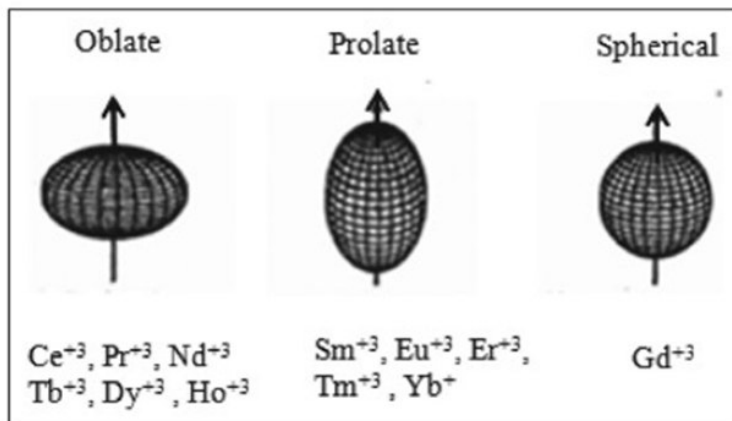
Tornando all'anisotropia, questo termine deriva dal greco e vuol dire "assenza di direzioni indistinguibili" cioè presenza di una o più direzioni privilegiate.



**Fig 12:** Rappresentazione dell'easy axis (in rosso), l'asse privilegiato del cristallo dove si ha maggiore coercitività.

**E' interessante che sono sempre le proprietà degli orbitali  $f$  che permettono questo fenomeno perché sono funzioni d'onda per loro natura anisotropiche**, cioè "puntano" in direzioni specifiche<sup>16,17</sup>.

Osservando la figura 13 si può intuire qualitativamente questo concetto: la distribuzione di carica complessiva  $4f$  non è uniforme in tutte le direzioni tranne che per il Gadolinio, per tutti gli altri essa assume forme simili a un "disco" (oblata) o a "pallone da rugby" (prolata). Da notare che nella forma oblata ci sono le "terre rare magnetiche" viste sopra: Praseodimio, Neodimio, Terbio, Disprosio, (Pr,Nd,Tb,Dy).



**Fig 13.** Forma della distribuzione di carica  $4f$  per i vari ioni delle terre rare

Riportiamo per intero il passo della pubblicazione "Anisotropy of rare earth" citata sopra alla nota 17 dove si spiega soprattutto il ruolo del Disprosio nel drogaggio dei magneti per aumentare la coercitività.

*"Un buon esempio è il  $Nd_2Fe_{14}B$ . La figura sopra [Figura 13] mostra che alcune terre rare, come il Praseodimio (Pr) e il Disprosio (Dy), hanno la stessa prolaticità del Neodimio (Nd) e possono essere perciò sostituite al Neodimio senza distruggere l'anisotropia. Nello specifico, risulta che il **Disprosio aumenta la coercitività alle alte temperature (la resistenza alla smagnetizzazione)** mentre il Praseodimio rende il materiale più economico. La riduzione del prezzo è ottenuta, perché la lega "mischmetal" Pr-Nd è più facile da produrre che i due elementi separati (vedi Raccolta del Bollettino Ingegneri e Tecnici, pag 191).*

**Questa è una costrizione industriale piuttosto che scientifica ma sottolinea come strettamente la ricerca sui magneti permanenti sia legata a considerazioni strategiche.**

***In effetti, la Cina ora domina il mercato mondiale dei magneti delle terre rare e dei magneti permanenti, e la disponibilità limitata di elementi come Nd e soprattutto Dy ha implicazioni di vasta portata per altre applicazioni delle terre rare.***

È interessante che si dica che “c’è una costrizione industriale più che scientifica” e poi che “la ricerca sui magneti permanenti sia legata a considerazioni strategiche”. Quindi la ricerca non è libera nel capitalismo a detta degli scienziati stessi! È notevole che questo si scriva in una rivista scientifica che si occupa di questioni teoriche nelle Scienze dei Materiali, il “Journal of Rare Earths” che è una rivista della Società Cinese delle Terre Rare; i due autori R. Skomski e D. J. Sellmyer sono due importanti fisici americani dello stato solido, dell’Università del Nebraska, che si sono occupati di magnetismo.

Sostanzialmente, è la somiglianza geometrica nella distribuzione elettronica degli orbitali 4f oblata che rende il Praseodimio, il Disprosio e il Terbio interscambiabili con il Neodimio, ottenendo delle leghe ora più economiche, con drogaggio di Praseodimio, ora con coercitività alle alte temperature, fondamentale per i motori elettrici delle auto (con drogaggio di Terbio e soprattutto Disprosio).

Anche in questo caso sono quindi dei **motivi razionali, ben precisi, matematici e geometrici** per le caratteristiche di questi elementi dovuto alla loro struttura atomica interna e a come si legano con i metalli di transizione. **In questo ambito nulla è per caso.**

L’elemento di caso è dato solo dalla temperatura: l’agitazione termica oltre una certa temperatura disallinea i magneti microscopici e il materiale perde le proprietà magnetiche.

Sia il Samario-Cobalto sia il Neodimio-Ferro-Boro hanno una forte anisotropia magnetocristallina, cioè che si origina dalle proprietà geometriche del cristallo, sintetizzando dei composti *ad hoc* ed hanno per questo una elevata coercitività.

I nuovi materiali in sviluppo, con elementi più disponibili rispetto alle terre rare, per esempio i Nitruri di Ferro (composti da Ferro e Azoto molto abbondanti in natura), non sono, per ora, degni sostituti ai tradizionali magneti permanenti al Neodimio e al Samario. Nonostante abbiano un’alta magnetizzazione, quasi doppia rispetto a quella dei magneti al Neodimio, hanno una coercitività inferiore e resistono di meno ai campi magnetici opposti. Il composto più promettente è una fase particolare del Nitruro di Ferro,  $\alpha'$ -Fe<sub>16</sub>N<sub>2</sub>. Ci sono molti investimenti all’azienda americana Niron per produrre magneti senza terre rare con l’obiettivo dichiarato di eliminare la dipendenza dalla Cina: per esempio basta leggere solo il titolo del documento del Council of Foreign Relations degli Stati Uniti “**Leapfrogging China’s critical minerals dominance: how innovation can secure U.S. Supply Chains**”, (traduzione: “Oltrepassare il dominio della Cina sui minerali critici: come l’innovazione può rendere più sicure le catene di fornitura degli Stati Uniti”).

Purtroppo per gli scienziati questa fase del Nitruro di Ferro è anche una fase metastabile, come del resto molte altre fasi a base di Ferro e tende a decomporsi chimicamente sopra i 200°C e per ora si possono fare solo piccoli magneti. Ci sono grossi investimenti di Stellantis e General Motors (come è riportato nel Bollettino Ingegneri e Tecnici di Gennaio 2026, nell’articolo “*Electric motors and rare earths*”). La Niron sta lavorando a tecniche di produzione innovative per tentare di generare magneti più grandi per il mercato automobilistico.

## CONCLUSIONI

Si può fare un parallelismo con il processo di matematizzazione agli esordi della teoria elettromagnetica, come è scritto su Lotta Comunista, dove si sottolinea il ruolo della sintesi teorica delle equazioni di Maxwell per comprendere la trasmissione telegrafica lungo dei cavi sottomarini.

*“Con Lord Kelvin la matematica astratta viene convertita in apparecchi ingegneristici, i principi della termodinamica si traducono in efficienza delle macchine a vapore, la matematizzazione dell’elettricità si concretizza nella trasmissione sotto l’oceano di messaggi, la scienza diventa una forza produttiva del capitale”*<sup>18</sup>

Ancora, per vedere l’importanza dei concetti matematici astratti nella scienza pratica, per esempio nell’elettrificazione, basti pensare al ruolo dei numeri complessi per lo studio della corrente alternata: *“A Steinmetz si deve la trasformazione della corrente alternata in un codice di formule matematiche che utilizzano la radice dei numeri negativi, come  $\sqrt{-1}$ , o numeri immaginari, chiamati così da Cartesio perché non hanno una corrispondenza diretta con il mondo reale [si può fare un’analogia con le funzioni orbitali che sono funzioni matematiche che non hanno significato fisico in sé, ma lo ha solo il loro modulo quadrato come visto sopra]. Steinmetz era un genio matematico con una mente equivalente a quella di Nikola Tesla: quando elaborò la sua teoria, solo un paio d’ingegneri al mondo potevano capire pienamente le sue formule, ma in esse c’era il segreto della corrente alternata; a lui si deve la progettazione del brillante sistema trifase, che tuttora si usa in tutto il mondo nella produzione, distribuzione e utilizzo della corrente alternata”*<sup>19</sup>

Lo sviluppo della chimica e della fisica dello stato solido è iniziato con la rivoluzione industriale.

*“La rivoluzione industriale spostò l’ottica delle scienze fisiche e matematiche dal Cosmo, che mantenne la sua importanza, alla Terra. Per rispondere alle esigenze delle industrie chimiche, metallurgiche ed elettrotecniche, gli scienziati si dedicarono in modo crescente ai materiali e alla loro manipolazione, sino ad allora campo esclusivo della pratica empirica. Si indagò alla struttura della materia e sulle diverse forme di energia. Nel XIX secolo la chimica, l’elettromagnetismo e la termodinamica posero le basi della grande sintesi scientifica di Einstein del 1905: con  $E=mc^2$  (energia uguale a massa per la velocità della luce al quadrato: la materia come forma di energia) iniziò l’attuale era dell’energia nucleare.”*<sup>20</sup>

Le esigenze della Seconda Guerra Mondiale e della Guerra Fredda hanno portato all’approfondimento dello studio scientifico dei materiali. Il primo dipartimento di Scienze dei Materiali è stato quello della Northwest University in Illinois, fondato da Morris Eugene Fine che aveva lavorato al progetto Manhattan, contribuendo a studiare la fase *delta* del Plutonio per le bombe atomiche ad implosione. Poi dagli anni ‘50 il settore si è sviluppato sempre di più con il progredire dell’elettronica dei semiconduttori, per non parlare delle materie plastiche e dei polimeri. Nel 1964 sono stati scoperti i magneti al Samario-Cobalto e nel 1983-1985 sono stati progettati i nuovi magneti al Neodimio. La matematizzazione era già presente nella chimica e nella fisica dei materiali. Ha permesso di interpretare i risultati e di progettare nuovi materiali dove le conoscenze fisico-matematiche sono essenziali per non andare a caso. Oggi saranno interessanti le applicazioni dell’intelligenza artificiale nelle Scienze dei Materiali<sup>21</sup>

Oggi chimici, fisici e ingegneri dei materiali si dedicano al settore strategico dei magneti permanenti e delle terre rare.

Dalle formule astratte dell'equazione di Schrödinger, **introdotta cento anni fa**, si ottengono le funzioni corrispondenti agli orbitali  $f$ , indispensabili per capire e interpretare le proprietà delle terre rare.

Bisogna conoscere le proprietà degli orbitali  $f$  per capire i fenomeni tipici dei composti con le terre rare: contrazione lantanidica, minore proprietà schermanti (quindi numero di valenza 3, difficoltà di separazione, modulabilità nei composti), elettroni spaiati, ferromagnetismo e anisotropia magnetocristallina.

Inoltre, i momenti magnetici dei lantanidi e dei metalli di transizione nei composti delle terre rare si accoppiano seguendo gli schemi simili a quelli del calcolo vettoriale, e le forme geometriche delle distribuzioni elettroniche degli orbitali  $f$  sono fondamentali per capire quali elementi possiamo sostituire con altri nei magneti al Neodimio-Ferro-Boro.

Questi pochi esempi dovrebbero bastare a poter affermare che siamo oggi **alla matematizzazione nello studio delle terre rare**.

Dagli orbitali  $f$  ricavati da equazioni differenziali alle derivate parziali, alle molecole per la risonanza magnetica medica e ai radar militari. Dalla medicina ai caccia F35: anche nell'ambito delle terre rare **lo studio più teorico è al servizio della società capitalistica caotica e contraddittoria**.

La meccanica quantistica sviluppata dai grandi scienziati nei primi trent'anni del Novecento, da Heisenberg, Schrödinger, Planck, Einstein, Bohr, Pauli, Dirac e tanti altri fisici e chimici teorici e sperimentali è **un grande risultato dell'ingegno umano e uno dei suoi più alti frutti**. Senza il loro contributo oggi non si potrebbe capire il comportamento delle terre rare. Facevano parte di una comunità internazionale e i loro risultati sono un patrimonio collettivo dell'umanità.

Franco Palumberi, nel libro "La Bomba" scrive:

*"All'inizio della Prima [Guerra] nel 1914, la gran parte degli scienziati si considerava membro di una classe sovranazionale, una repubblica della cultura nella quale la nazionalità era meno importante dei risultati scientifici. In assenza di una coscienza internazionalista, quando l'ideologia sovranazionale si scontrò con la realtà della guerra, questa repubblica illusoria si ruppe immediatamente e venne sostituita velocemente dal nazionalismo. I fisici non erano più fisici in generale, ma erano fisici tedeschi, fisici francesi, fisici austriaci, fisici britannici, fisici sovietici."* <sup>22</sup>

**Oggi gli scienziati stanno ritornando a essere americani, cinesi, russi, europei e così via.**

Tutti i settori, dal più teorico al più pratico, dal fisico all'informatico, è afferrato dalle esigenze della società capitalistica e dal confronto delle potenze.

Nessuno scienziato teorico o sperimentale ne è esente.

Non è un problema di responsabilità morale degli scienziati ma della società capitalistica nel suo complesso.

Qualsiasi ricerca scientifica nel capitalismo ha un uso duale.

**La Scienza e la Tecnica sempre di più sono soggiogate alla competizione delle aziende nel mercato capitalistico che si intreccia con la competizione geopolitica fra le potenze.**

**L'applicazione delle scienze fisiche, chimiche e matematiche allo studio dei materiali, potrà essere al servizio dei bisogni dell'umanità, a cui appartiene la Scienza nel suo complesso, solo superando il capitalismo per una società superiore, liberata dai conflitti fra le classi e fra gli Stati. Questo è il compito degli ingegneri e tecnici internazionalisti.**

## FONTI, NOTE ED ESTRATTI

- 1) Sulla posizione del Lantanio c'è discussione e i giudizi non sono equanimi: vedere Greenwood Earnshaw; Chimica degli elementi vol II pag 1461; oppure Shriver, Atkins; Inorganic Chemistry pag 579.
- 2) Ad ogni incremento del numero atomico passando da un lantanide all'altro, la carica nucleare effettiva sentita da ogni elettrone  $4f$  aumenta, causando così **una riduzione** nella dimensione dell'intero guscio  $f$ . L'accumulazione di queste contrazioni è la contrazione lantanidica nel suo complesso. (Cotton Wilkinson, Advanced Inorganic Chemistry, pag 1058). Gli orbitali  $f$  sono più interni rispetto agli orbitali  $4s$  e  $5d$ . In questi elementi gli orbitali  $4s$  (che hanno 2 elettroni) e  $5d$  (che in questi elementi di solito hanno un elettrone) sono più esterni, hanno in totale 3 elettroni. Sono quelli di valenza, cioè quelli che vengono usati nei legami chimici o metallici, i primi ad essere persi dando ioni +3. La conseguenza macroscopica di questa struttura microscopica è che i lantanidi hanno dimensioni quasi simili tra loro e valenza uguale (+3) e questo fa sì che questi elementi abbiano proprietà chimiche simili e quindi siano difficilmente separabili. **DA QUI NASCE IL PROBLEMA PIU' GRANDE DAL PUNTO DI VISTA ECONOMICO: LA LORO DIFFICILE SEPARABILITÀ E RAFFINAZIONE.**  
Uranio e Torio sono attinidi e appartengono al settimo periodo caratterizzato dagli orbitali  $5f$ . Hanno anche loro valenza +3 e spesso si trovano in natura negli stessi minerali delle terre rare. Per la loro presenza le acque di lisciviazione e di lavorazione delle terre rare sono radioattive. Il Torio è uno ione +3 e si trova spesso nei minerali delle terre rare (soprattutto monazite; altro minerale ricco di terre rare ma senza il Torio è la bastnaesite) Il Torio è debolmente radioattivo ma è sempre contaminato da elementi "figli" più attivi, quali il  $^{228}\text{Ra}$  (un isotopo radioattivo del Radio): la lavorazione della monazite richiede quindi delle cautele, complicazione che non si ha nella lavorazione della bastnaesite (vedi Greenwood Earnshaw, pag 1464)
- 3) *"I lantanoidi sono tutti metalli elettropositivi con una rimarchevole uniformità di proprietà chimiche. La differenza significativa fra due lantanoidi è spesso solo nel loro raggio atomico o ionico, e l'abilità di scegliere un lantanoide di una particolare forma spesso permette di 'modulare' (tuning) le proprietà dei loro composti. Per esempio, le proprietà magnetiche ed elettroniche dei metalli spesso dipendono dalla esatta separazione degli atomi presenti e dal grado di sovrapposizione dei vari orbitali atomici. Scegliendo un lantanoide di un appropriato raggio atomico la separazione può essere controllata, con conseguenze per la sua conduttività elettrica o temperatura di transizione magnetica (temperatura di Curie)"; estratto da Shriver, Atkins, Inorganic Chemistry; pag 581.*

Table 1 — Lattice Parameter, Density and Magnetic Properties of  $R_2Fe_{14}B$  Compounds

Compound	Lattice Parameter		D (Mg/m <sup>3</sup> )	$I_s$ (T)	M (us/F.U.)	$H_a$ (MA/m)	$T_c$ (K)
	$a_0$	$c_0$					
Ce <sub>2</sub> Fe <sub>14</sub> B	0.877	1.211	7.81	1.16	22.7	3.7	424
Pr <sub>2</sub> Fe <sub>14</sub> B	0.882	1.225	7.47	1.43	29.3	10	564
Nd <sub>2</sub> Fe <sub>14</sub> B	0.882	1.224	7.55	1.57	32.1	12	585
Sm <sub>2</sub> Fe <sub>14</sub> B	0.880	1.2,15	7.73	1.33	26.7	basal	612
Gd <sub>2</sub> Fe <sub>14</sub> B	0.879	1.209	7.85	0.86	17.3	6.1	661
Tb <sub>2</sub> Fe <sub>14</sub> B	0.877	1.205	7.93	0.64	12.7	28	639
Dy <sub>2</sub> Fe <sub>14</sub> B	0.875	1.200	8.02	0.65	12.8	25	602
Ho <sub>2</sub> Fe <sub>14</sub> B	0.875	1.199	8.05	0.86	17.0	20	576
Er <sub>2</sub> Fe <sub>14</sub> B	0.874	1.196	8.24	0.93	18.1	basal	554
Tm <sub>2</sub> Fe <sub>14</sub> B	0.874	1.195	8.13	1.09	21.6	basal	541
Y <sub>2</sub> Fe <sub>14</sub> B	0.874	1.204	6.98	1.28	25.3	3.1	565

**Tab.1** Parametri del reticolo cristallino, densità e proprietà magnetiche dei composti Lantanide-Ferro-Boro; Permanent Magnet Materials based on Rare Earth-Iron-Boron Tetragonal Compounds; Masato Sagawa e altri, 1984.

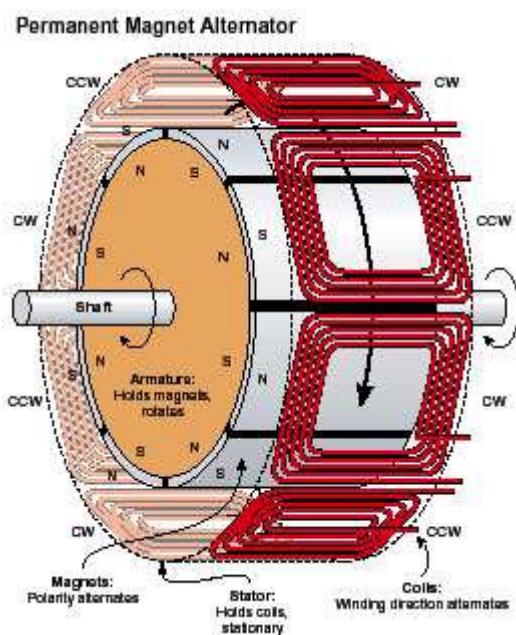
In questa tabella si vede tutta la famiglia dei composti del magnete Nd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B, che poi vedremo meglio. E' un bel esempio di modulabilità ottenuta cambiando la terra rara: Ce (Cerio), Pr(Praseodimio), Nd(Neodimio) ecc fino all'Y (Ittrio). Prendendo la colonna M che sta per magnetizzazione, si nota come quella del composto al Neodimio (Nd) è quella più alta (32.1). Si vede come questo valore vari un po' lungo la colonna da un composto all'altro, così come altre grandezze.

- 4) *“the origin of the magnetic carried by the rare earth ions is the spin and orbital momenta of the unpaired 4f electrons...both spin and orbital motion contribute to the magnetic moment. This is one of the major differences between the magnetic properties of the 3d transition metals and the rare earths”*. Estratto da John J. Croat, John Ormerod, Modern Permanent Magnets, pag 38.

Traduzione: “L'origine del magnetismo portato dagli ioni delle terre rare è il momento di spin e orbitale degli elettroni 4f spaiati...sia lo spin sia il moto orbitale contribuisce al momento magnetico. Questa è la maggiore differenza fra le proprietà magnetiche dei metalli di transizione 3d e le terre rare.”

- 5) Premesso che è uno schema grossolano, perché il magnetismo è un fenomeno interpretabile con il formalismo matematico complesso della meccanica quantistica. La prima teoria quantistica del magnetismo è del 1928 formulata da Werner Heisenberg. Entra in gioco una proprietà quantistica che si chiama “energia di scambio” fra gli elettroni, che non ha un corrispettivo nella fisica classica. Si traduce in una formula matematica che si chiama “integrale di scambio”, un ulteriore argomento di come la matematizzazione nelle Scienze dei Materiali sia fondamentale per la ricerca sui magneti. Per approfondimenti vedere: Kittel, Introduction to Solid State Physics, cap 12, pag 323-326, ottava edizione.

- 6) Huheey, Chimica Inorganica, Principi Strutture Reattività; pag 483
- 7) John J. Croat, John Ormerod, Modern Permanent Magnets, pag 39-42
- 8) *“nonostante queste importanti caratteristiche i metalli puri delle terre rare non sono mai stati considerati seri candidati per lo sviluppo dei magneti permanenti perché la loro temperatura di Curie è sotto la temperatura ambiente. Il Gadolinio ha la più alta temperatura di Curie di 19.35 °C e l’Olmio e l’Erbio hanno temperature di Curie di -263°C. Le basse temperature di Curie sono la conseguenza di deboli interazioni 4f-4f fra gli ioni delle terre rare vicini.”* Modern Permanent Magnets, pag 39.
- 9) *“l’unica via affinché le temperature di Curie delle terre rare possano essere incrementate è quella di legarli con uno dei metalli di transizione 3d come Ferro e Cobalto, che hanno una più alta temperatura critica dovuta alle loro forti interazioni 3d-3d.”* Modern Permanent Magnets pag 39
- 10) *“...samario, disprosio e terbio. Si tratta di tre “terre rare pesanti” senza le quali è sostanzialmente impossibile fabbricare magneti ad alta coercitività (una caratteristica importante per poter essere assemblati alle condizioni fisiche estreme in cui operano gli F35...)”;* Alberto Prina Cerai, Materie prime critiche: la vulnerabilità strutturale della difesa occidentale”; ISPI 9 gennaio 2026
- 11) Se un magnete gira intorno ad un solenoide produce una corrente elettrica.



**Fig.14**

Questo l’origine della conversione del moto meccanico rotatorio in energia elettrica nelle pale eoliche. Viceversa nelle auto si realizza che l’elettricità nelle batterie viene trasformata in moto meccanico, l’intermezzo è sempre il magnete, nei motori sincroni. Vedere “Electric motors and rare earths, Bollettino Ingegneri e Tecnici di Gennaio 2026.

Oggi la transizione energetica ha bisogno di questi magneti in quantità enorme. Non si vedono a breve sostituiti ai magneti al Neodimio-Ferro-Boro o Samario-Cobalto, se non i magneti al Nitrato di Ferro senza terre rare. In ogni caso le basi teoriche per lo sviluppo di nuovi magneti sono viste in queste note.

- 12) Franco Checcacci, Fondamenti di Fisica Atomica e Quantistica, pag 503-505.
- 13) Permanent Magnet Materials based on Rare Earth-Iron-Boron Tetragonal Compounds; Masato Sagawa e altri, 1984; la frase esatta tecnicamente è: *“la magnetizzazione del sottoreticolo del Neodimio si accoppia ferromagneticamente alla magnetizzazione del sottoreticolo del metallo di transizione (del Ferro)”*.
- 14) Hong-Shuo Li, Y.P.Li e J.M.D. Coey, R-T and R-R exchange interactions in the rare earth (R)-transition metal(T) intermetallics: an evaluation from relativistic atomic calculations. “The Rkky Interaction”, University of Liverpool. Vedere anche W.E.Wallace Rare Earth Intermetallics, 1973, pag 9 e seguenti; J.M.D. Coey, Magnetism and magnetic materials, 2009, pag 141 -142.
- 15) Riportiamo tutta la discussione tecnica: *“A causa dello schema di accoppiamento Russel-Saunders, la magnetizzazione dei sottoreticoli della terra rara (R) e del metallo di transizione (T) si accoppia parallelamente per la prima metà della serie 4f [cioè per Neodimio, Praseodimio e Samario, terre rare leggere dove  $J = |L - S|$ , quindi più piccolo rispetto a  $J=L+S$ ] e antiparallelo per le terre rare pesanti [cioè della seconda metà della serie dove  $J=L+S$ , per Disprosio, Terbio, Olmio ed Erbio]. **Perciò i grandi momenti portati dalle terre rare pesanti non si traducono corrispondentemente in grandi momenti nei composti terre rare-metalli di transizione.** A causa di questo allineamento lungo ogni data serie di composti intermetallici terra rara-ferro (R-Fe) e terra rara-cobalto (R-Co), la magnetizzazione sarà **massima** per i composti con il **Praseodimio** e con il **Neodimio** e **minima** per i composti al **Disprosio** e al **Terbio**”*. (Modern Permanent Magnets, pag. 40; vedere anche J.M.D. Coey, op.cit. Pag 141 -142)

Tuttavia Il Disprosio è molto importante perché se inserito in piccole quantità nella lega NdFeB aumenta la coercitività, cioè la resistenza alla smagnetizzazione. Senza il Disprosio, i magneti al Neodimio-Ferro-Boro perderebbero la magnetizzazione verso gli 80° C, temperatura che troviamo nei motori elettrici delle auto. Con il Disprosio resistono fino ai 200°C.

*“La forza coercitiva dei magneti al Neodimio-Fe-B può essere incrementata con l’aggiunta di terre rare pesanti come il Terbio e il Disprosio”*. Permanent Magnet Materials based on Rare Earth-Iron-Boron Tetragonal Compounds; Masato Sagawa e altri, 1984, pag 7.

*“Il Disprosio è molte volte più costoso del Neodimio, ma si dimostra **indispensabile** per i magneti che si usano nei **motori delle auto elettriche**”*; J.M.D. Coey, op. cit. pag 471.

Per questo il Neodimio, il Disprosio, il Terbio insieme al Praseodimio con il quale si fanno magneti tipo  $\text{Pr}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$  sono considerate le terre rare “magnetiche” come è riportato in Lotta Comunista numero 463 “Dazi e metalli nella contesa globale”

- 16) *Si dice spesso che questi magneti [i magneti all’  $\text{YCo}_5$  (Ittrio-Cobalto), scoperti prima di quelli al Samario-Cobalto dal prof. Strnat nel 1967 nella base aerea di Dayton] sono stati i primi veri magneti moderni, grazie alle loro molto più alte energie magnetiche e perché l’origine della coercitività è l’anisotropia magnetocristallina degli ioni delle terre rare. Per le terre rare con elettroni 4f spaiati, l’accoppiamento spin-orbita si traduce in ampie funzioni d’onda anisotropiche. Riguardo ai magneti permanenti, queste funzioni d’onda sono le più importanti caratteristiche delle terre rare, poiché sono l’origine della forza coercitiva nei composti delle terre rare-metalli di transizione.* Modern Permanent Magnets pag 12.
- 17) *per le terre rare con elettroni 4f spaiati, l’accoppiamento spin-orbita si traduce in una funzione d’onda altamente anisotropica (funzioni d’onda cioè espressioni matematiche) e nei composti di metalli di transizione delle terre rare è il campo elettrico o cristallino degli elettroni che circondano gli ioni delle terre rare che blocca l’orientamento di questi orbitali altamente anisotropici in certe direzioni preferite;* Modern

Permanent Magnets pag.44; vedere anche Anisotropy of rare-earth magnets; Skomski,Sellmyer; Journal of Rare Earth., ottobre 2008. Detto in altri termini: l'origine di questo fenomeno risiede nell'accoppiamento spin-orbita. Lo spin dell'elettrone tende ad allinearsi al campo magnetico esterno; tuttavia lo spin nelle terre rare è accoppiato al momento orbitale dell'elettrone, cioè alla forma e all'orientamento del suo orbitale. Poiché gli orbitali *f* sono fortemente anisotropi, cioè hanno lobi orientati in direzioni precise dello spazio, sono "incastrati" nel reticolo cristallino e resistono alla rotazione. Di conseguenza, per far ruotare lo spin in una direzione "scomoda" per l'orbitale, bisogna spendere energia: l'energia di anisotropia.

Il Disproso si presta bene nell'aumentare la coercitività perché ha funzioni d'onda per gli orbitali *f* molto anisotropiche, molto direzionate. Oggi viene usato per drogare i magneti al Neodimio-Ferro-Boro e aumentarne la coercitività attraverso una tecnica che si chiama **Grain Boundary Diffusion Process**, brevettata da importanti gruppi cinesi come **JL MAG Rare-earth** e di cui ne ha fatto le fortune.

Il Disproso è stato uno degli "oggetti del contendere" nella crisi fra la Cina e Giappone del 2010, perché la "Cina controlla il 100% delle forniture di Disproso (cruciale per fabbricare magneti ad alta coercitività, in grado di resistere alla de-magnetizzazione in sistemi ad alto potenziale come i motori elettrici)"; Alberto Prina Cerai, "Terre rare e controlli sull'export, fact-checking sul ruolo della Cina"; Rienergia, Novembre 2023.

Questa anisotropia si può ottenere con metodi fisici (riscaldamento e raffreddamento) e con metodi chimici cioè progettando dei materiali *ad hoc* che hanno l'anisotropia generata dalle caratteristiche della cella elementare. (la cella elementare è l'unità più semplice che se ripetuta genera tutto il cristallo; un po' come la cellula negli organismi viventi). In questo caso si parla di **anisotropia magnetocristallina**.

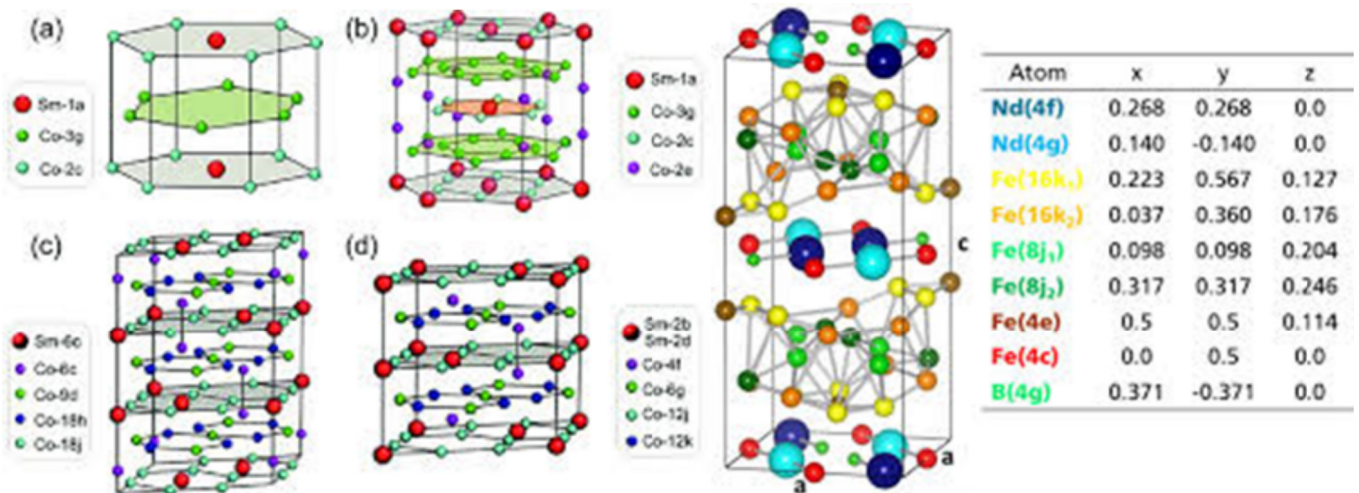


Fig 15. Celle elementari del SmCo a sinistra e del NdFeB a destra.

- 18) Lotta Comunista numero 471 "Il cavo atlantico sigillo della forza del capitalismo inglese";
- 19) Lotta Comunista numero 550 "La matematica dell'elettricità" sull'uso pratico dei numeri complessi nell'elettrotecnica
- 20) Lotta Comunista numero 466 "I presupposti del cavo transatlantico"
- 21) "The northeast materials database for magnetic materials"; Suman Itani, Yibo Zhang, Jiandong Zang, Nature Communication 16, 2025.
- 22) Franco Palumberi, La Bomba, industrializzazione della scienza e sterminio atomico; edizioni Lotta Comunista, pag 290.