Risonanza magnetica nucleare: i dispositivi per la risonanza magnetica nucleare (NMR, MRI) si sono rivelati l'aspetto commercialmente più interessante del mercato della superconduttività, poiché sono stati installati in molti ospedali e rappresentano l'unica fonte di reddito costante e sicura delle aziende di questo settore. In questa applicazione il campo magnetico deve essere estremamente uniforme, sia nello spazio che nel tempo in una regione sferica di circa 60 dm^3. L'uniformità nel tempo può essere ottenuta molto facilmente operando nel cosiddetto "modo persistente", ovvero facendo circolare la corrente in un loop chiuso senza generatori inseriti come nel caso già visto degli SMES.

Fig 27 Magnete per MRI (criostato)

Fig 28 Magnete per MRI (vista esterna)

Fusione nucleare: i magneti per il confinamento del plasma progettati negli ultimi anni per le applicazioni di ricerca scientifica sulla fusione nucleare sono generalmente superconduttivi. Anche in questo caso la necessità di creare campi magnetici elevati in regioni di spazio notevolmente estese rende indispensabile l'utilizzo della superconduttività. Le perdite Joule in avvolgimenti di rame sarebbero infatti molto elevate.

17. LA LEVITAZIONE MAGNETICA

Le applicazioni viste finora sono basate sulle caratteristiche elettriche dei materiali superconduttori; la levitazione magnetica è invece fondata su quelle magnetiche. Si possono distinguere due tipi di levitazione magnetica realizzata con magneti superconduttori, legata alla differenza di comportamento magnetico tra i superconduttori di tipo I e quelli di tipo II.

Levitazione del I tipo o di tipo Meissner: l'origine fisica della forza repulsiva è l'interazione tra il campo magnetico e le supercorrenti che sorgono sulla superficie del corpo superconduttore e che tendono a mantenere nullo il campo magnetico al suo interno, come prima dell'avvicinamento del magnete. A qualunque distanza dal corpo superconduttore la forza di interazione è **repulsiva**, poiché il superconduttore tende a reagire riportando il campo al suo interno esattamente nella condizione iniziale, in cui esso era nullo per via della distanza infinita del magnete.

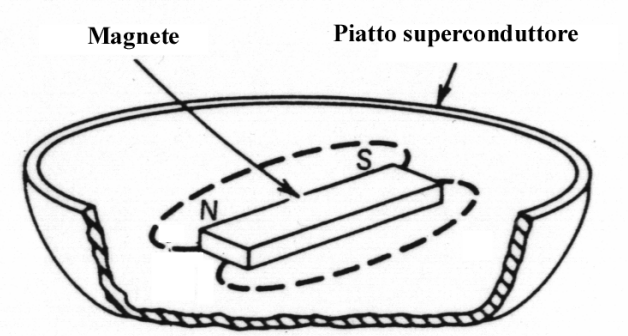

Fig.29 Schema di principio del galleggiamento stabile di un magnete su un piatto superconduttore del I tipo concavo.

Se il superconduttore viene raffreddato quando il magnete si trova a distanza finita, per cui il campo è penetrato all'interno del materiale, l'espulsione totale del campo magnetico dall'interno del materiale tende a portare il magnete esterno nella posizione in cui esso ha minore tendenza ad alterare il campo magnetico nullo all'interno, ovvero all'infinito. È quindi possibile fare galleggiare stabilmente un magnete sopra un piatto superconduttore nella posizione di equilibrio tra la forza peso e la forza repulsiva (vedi schema di Fig. 29).

Levitazione del II tipo: per i superconduttori del II tipo la espulsione del campo magnetico non è totale. Se un magnete viene posto ad una certa distanza da un corpo superconduttore di tipo II, e in seguito il materiale viene raffreddato, esso non espelle completamente il campo magnetico, ma tende a mantenerlo "intrappolato", poiché i flussoidi sono ancorati ai centri di pinning. Qualunque spostamento del magnete dalla posizione iniziale determina una reazione tale da mantenere costante il campo interno e quindi da ricondurre il magnete in tale posizione. La forza agente sul magnete è quindi **attrattiva** o **repulsiva** a seconda della posizione del magnete rispetto alla posizione iniziale.

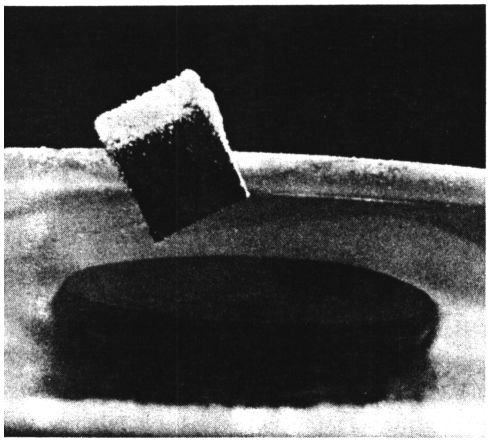

Fig. 30 Levitazione di un magnete Sm - Co su un disco superconduttore di $YBa_2Cu_3O_7$.

Nel caso della levitazione di I tipo è possibile ottenere una configurazione di equilibrio stabile solo se il piatto superconduttore è concavo. Se invece esso è piano di dimensione finita il magnete scivola verso l'esterno e non è possibile la levitazione stabile. Nel caso della levitazione del II tipo invece è possibile ottenere configurazioni stabili senza particolari forme del corpo superconduttore, e questo li rende preferibili per le applicazioni. L'aspetto più interessante della levitazione magnetica ottenuta mediante superconduttori rispetto a quella ottenibile con sistemi magnetici convenzionali è proprio la stabilità dell'equilibrio. Da un punto di vista fisico non è ancora stato chiarito il motivo per cui le forze magnetiche basate sulle interazioni con le supercorrenti possono produrre una levitazione stabile, mentre le forze magnetiche di interazione con i materiali ferromagnetici producono una levitazione instabile. Nella levitazione magnetica con magneti convenzionali (elettromagneti o magneti permanenti) è necessario, per ottenere un equilibrio stabile, aggiungere un sistema elettronico di regolazione del campo magnetico oppure limitazioni meccaniche che evitino gli spostamenti in particolari direzioni (ad esempio gli spostamenti laterali). Questi sistemi di levitazione sono detti attivi. Utilizzando invece magneti superconduttori si hanno sistemi intrinsecamente stabili, detti passivi.

In diversi settori industriali sono in atto progetti applicativi basati sulla levitazione magnetica. Il grande vantaggio della levitazione nelle applicazioni meccaniche consiste nella possibilità di eliminare l'usura dei materiali per contatti di sfregamento e l'attrito con le conseguenti dissipazioni di potenza. Illustriamo di seguito le principali applicazioni della levitazione magnetica:

Cuscinetti: sono già stati realizzati con magneti permanenti cuscinetti elettromagnetici per pompe, compressori centrifughi, sistemi rotanti per macchine di lavorazione dei materiali. Il cuscinetto superconduttivo, costituito da un magnete permanente levitante su una superficie superconduttiva, presenta rispetto a quelli classici il vantaggio di non richiedere il sistema di sensori e l'elettronica di controllo per correggere l'instabilità intrinseca, che, oltre ad essere costoso e complesso, dissipa energia diminuendo l'efficienza complessiva. Le maggiori difficoltà incontrate nello sviluppo di questi cuscinetti passivi sono rappresentate dal sistema criogenico e dalla modesta pressione di levitazione attualmente ottenibile con i superconduttori ceramici (10 N/cm^2). Recentemente sono stati intrappolati campi magnetici di oltre 10 T in campioni monocristallini di materiali ceramici e questo probabilmente consentirà di raggiungere pressioni di levitazione superiori a 100 N/cm^2.

Volani: i volani meccanici per l'accumulo di energia hanno teoricamente caratteristiche specifiche molto superiori alle batterie elettrochimiche: si potrebbero raggiungere capacità specifiche accumulate dell'ordine di 0.15 kWh/kg e potenze specifiche fino a 10 kW/kg, circa 70 volte la potenza specifica erogabile in una normale batteria piombo/acido. L'energia cinetica accumulata in un volano è pari a $E = J\omega^2/2$, dove J è il momento d'inerzia del volano e ω la sua velocità angolare. Per una data massa e geometria del volano, l'energia aumenta quadraticamente con ω, ma oltre un certo valore la forza centrifuga eccede le forze di coesione del materiale costituente il volano, causandone la rottura. Per non incorrere in questi problemi meccanici si prevede che la taglia media delle batterie a volani rotanti sia dell'ordine del kWh di capacità. I volani rotanti hanno molti dei vantaggi caratteristici dei sistemi SMES:

- la possibilità di rispondere con estrema rapidità a variazioni del carico;
- una lunga vita dovuta alla mancanza di degradazione dopo molti cicli;
- impatto ambientale praticamente inesistente.

I maggiori problemi tecnologici da risolvere in questi sistemi sono:

- la realizzazione di cuscinetti a basse perdite, a levitazione magnetica, anche per rotori di grandi dimensioni e peso
- la necessità di un sistema di vuoto miniaturizzato, in particolare per volani di piccole dimensioni, per non penalizzare le caratteristiche specifiche del sistema
- la progettazione del rotore in materiale composito di elevata resistenza meccanica per resistere alle alte velocità di rotazione
- il controllo della stabilità assiale del rotore in condizioni operative di movimento

I volani sono studiati, oltre che per l'accumulo di energia, per le applicazioni alla trazione automobilistica. In questo caso essi possono funzionare come sistema di accumulo dell'energia di frenata o come sistema ausiliario al motore elettrico per i picchi di alta potenza.

Treni a levitazione magnetica: con la sigla MAGLEV (MAGnetic LEVitation) si denomina l'intero settore di sviluppo dei treni a levitazione magnetica. Esistono vari tipi di sistemi per realizzare la levitazione. Un primo tipo di sistema, con levitazione repulsiva, è basato sul principio che campi di polarità opposta si respingono. Magneti superconduttori inducono correnti elettriche e, conseguentemente, un campo magnetico opposto in bobine convenzionali, poste lungo la linea, che guidano e mantengono sospeso il veicolo a circa 10 cm dal suolo, eliminando completamente il contatto con la rotaia. La propulsione è realizzata mediante un motore sincrono lineare. In un altro tipo di sistema, la sospensione del veicolo può essere ottenuta mediante un elettromagnete convenzionale, posto sul veicolo, che avvolge una rotaia ferromagnetica a forma di T. In questo caso è necessario un sistema elettronico attivo per il controllo della distanza tra la rotaia e l'elettromagnete. Indipendentemente dal tipo di sistema, questo tipo di propulsione presenta alcuni notevoli vantaggi, di seguito elencati.

- Velocità massima: nei treni convenzionali i motori fanno girare le ruote d'acciaio che spingono sui binari, per cui si ottiene la forza propulsiva. Quindi, la frizione tra ruote e rotaie è indispensabile. A basse velocità questa frizione è elevata, ma essa decresce con la velocità. D'altra parte, la forza di attrito dovuta alla resistenza dell'aria aumenta con la velocità, cosicché il treno non può accelerare oltre una certa velocità anche se è equipaggiato con motori molto potenti. La velocità critica dipende dalle condizioni delle rotaie, che possono essere asciutte o bagnate, sporche o pulite ecc. Nei treni a levitazione magnetica si può avere forza di propulsione a qualunque velocità, poiché essa è fornita senza contatto dal motore sincrono lineare. Questo consente di raggiungere facilmente velocità superiori a 500Km/h.
- Sicurezza: per la sua struttura guidata, è praticamente impossibile che un treno MAGLEV deragli. Dal momento che i veicoli MAGLEV sono sostenuti da molti avvolgimenti di levitazio-

ne agenti contemporaneamente, l'influenza dell'eventuale malfunzionamento di un avvolgimento è molto piccola.

- Manutenzione: a causa dell'assenza di contatto con le guide i costi di manutenzione sono molto limitati.

Nell'intenzione dei primi progettisti di questi sistemi di trasporto c'era anche la riduzione dell'inquinamento. In effetti un treno MAGLEV superconduttivo produce un minore inquinamento atmosferico rispetto ad automobili o aeroplani essendo ad elevata efficienza ed un minore inquinamento acustico dei treni elettrici ad alta velocità per via della notevole silenziosità. Tuttavia l'introduzione di norme più restrittive adottate in ambito internazionale in relazione all'inquinamento elettromagnetico, rende notevole il problema tecnologico di schermare gli elevati campi magnetici tra veicolo e rotaia su cui è basata questa applicazione. Un esempio di veicolo a levitazione magnetica è presentato nelle Figure 31 e 32.

Fig. 31 Veicolo a levitazione magnetica MLU002. Si possono osservare gli avvolgimenti degli elettromagneti posti sulla linea.

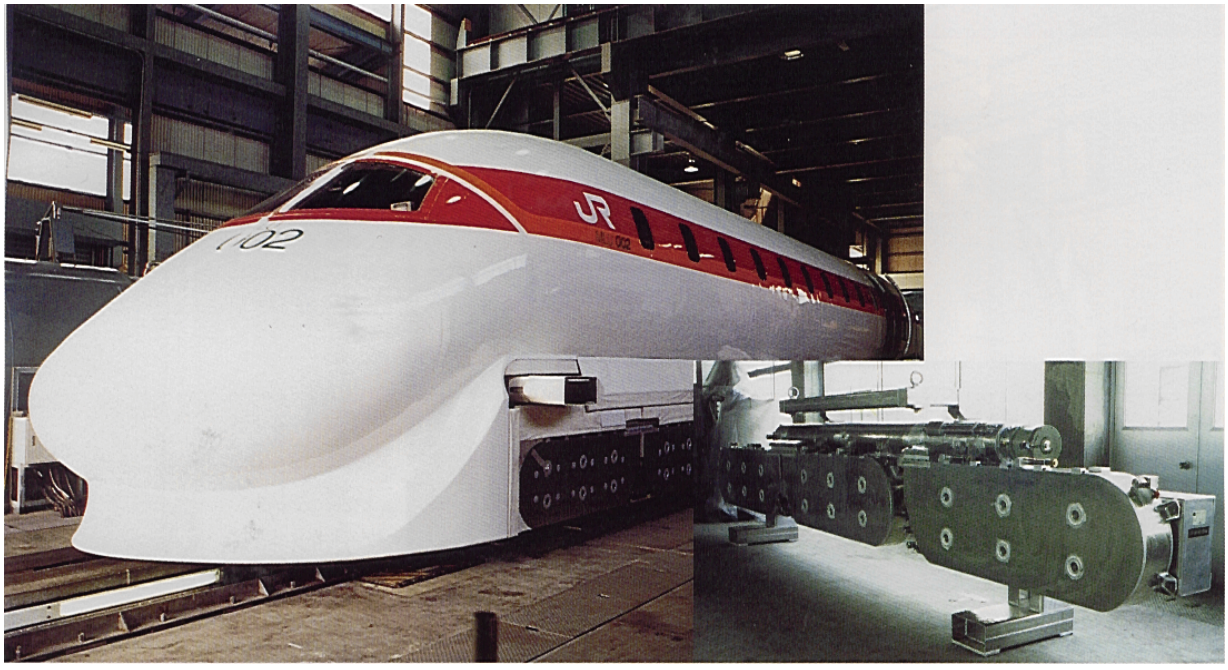

Fig. 32 Veicolo a levitazione magnetica MLU002. Nell'inserto si può osservare uno degli avvolgimenti superconduttori posti sul veicolo.