

9. *Campo magnetico prodotto dalla corrente che percorre un solenoide toroidale.* Il solenoide toroidale è costituito da un filo metallico avvolto a spirale sulla superficie di una ciambella internamente vuota (in fig.12 il cerchietto col punto centrale indica una corrente che esce dalla pagina verso il lettore, il cerchietto con la croce indica una corrente diretta in senso opposto). Se le spire sono sufficientemente serrate (piccola distanza tra spire contigue), il campo esterno è sensibilmente uguale a zero, mentre all'interno le linee di campo sono circonferenze situate in piani perpendicolari all'asse geometrico del toroide, col centro sull'asse stesso. È chiaro che, per ragioni di simmetria, lungo una qualsiasi di tali circonferenze il campo  $\vec{B}$  (diretto tangenzialmente, trattandosi di una linea di campo) ha modulo costante, per cui la circuitazione di  $\vec{B}$  lungo tale linea è data semplicemente dal modulo incognito di  $\vec{B}$  per la lunghezza della linea:  $C(\vec{B}) = 2\pi rB$  (dove  $r$  è il raggio della circonferenza considerata). Ma è anche, per la legge di Ampère,  $C(\vec{B}) = \mu_0 NI$ , dove  $N$  è il numero complessivo delle spire del solenoide e  $I$  è l'intensità di corrente nel solenoide. Per confronto otteniamo

$$[F] \quad B_0 = \frac{\mu_0 NI}{2\pi r}$$

il che significa che internamente al solenoide il campo magnetico è inversamente proporzionale alla distanza dall'asse geometrico del solenoide.

Si noti che la [F] potrebbe essere anche scritta nella forma della [E], e cioè nella forma  $B = \mu_0 nI$ , purché  $n$  indichi il numero  $N/2\pi r$  di spire per unità di lunghezza lungo la particolare linea di campo considerata (circonferenza di raggio  $R$ ). Se il raggio  $r$  delle spire è piccolo in rapporto al raggio delle linee di campo, il valore di  $B$  si può considerare praticamente uguale in tutto lo spazio interno al solenoide.

### 8.8 Critica alla legge di Ampère

La legge di Ampère è applicabile *solo a campi magnetici prodotti da correnti elettriche* – non da singole cariche in moto né, tanto meno, da campi elettrici in variazione – e *solo se le correnti percorrono circuiti privi di interruzioni*. Consideriamo infatti i seguenti casi particolari.

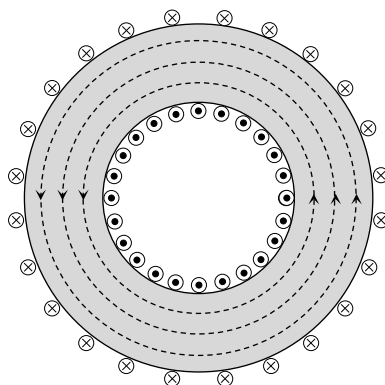


Fig. 12 – Sezione di un solenoide toroidale.

Primo caso (fig. 13/a): una carica elettrica  $q$  possiede a un dato istante velocità  $\vec{v}$ . Il percorso  $L$  della figura è una linea del campo prodotto da  $q$ , quindi la circuitazione magnetica lungo  $L$  è certamente diversa da zero: tuttavia, in contraddizione con la legge di Ampère, di correnti elettriche concatenate a  $L$  non ce ne sono.

Secondo caso (fig. 13/b): nei fili collegati alle armature di un condensatore circola una corrente elettrica (per esempio, durante il transitorio di carica o scarica). Come si può esprimere la circuitazione magnetica lungo una linea di campo come la linea  $L$  della figura? La corrente nel filo è o non è concatenata a  $L$ ? Sì, perché attraversa una superficie come la  $S_1$ . No, perché non attraversa una superficie come la  $S_2$ .

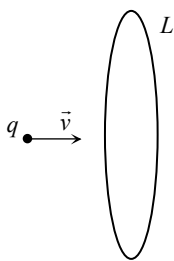


Fig. 13/a

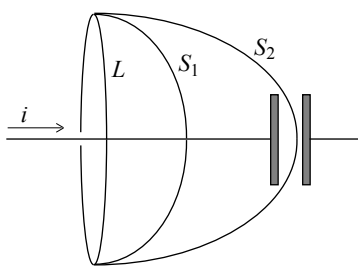


Fig. 13/b

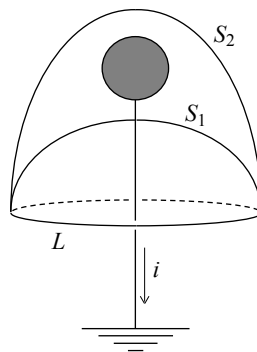


Fig. 13/c

Terzo caso (fig. 13/c): un conduttore carico viene collegato a terra mediante un filo metallico: nel filo circola per qualche istante una corrente di scarica. Se, nel campo prodotto da tale corrente, tentiamo di esprimere la circuitazione magnetica lungo la linea di campo  $L$  della figura, ci troviamo in una situazione di ambiguità: il percorso  $L$  è o non è concatenato alla corrente di scarica? Sì, dato che la corrente di scarica buca una superficie come la  $S_1$ . No, dato che la corrente di scarica non buca una superficie come la  $S_2$ .

Vedremo che queste difficoltà scompaiono se la legge di Ampère viene corretta tenendo conto, nel computo della corrente concatenata a  $L$ , non solo della corrente elettrica ma anche della cosiddetta «corrente di spostamento», vale a dire della grandezza  $\epsilon_0 d\Phi(\vec{E})/dt$ , dove  $\Phi(\vec{E})$  è il flusso elettrico che si concatena a  $L$ . Con tale integrazione la legge di Ampère diventa la legge di Ampère - Maxwell.

## 8.9 Il teorema di equivalenza

1. Se tra le sorgenti del campo magnetico ci sono dei magneti, nell'applicazione della legge di Ampère è necessario tener conto delle cosiddette **correnti amperiane**: le correnti che circolano sulla superfici – ed eventualmente all'interno – di un materia-