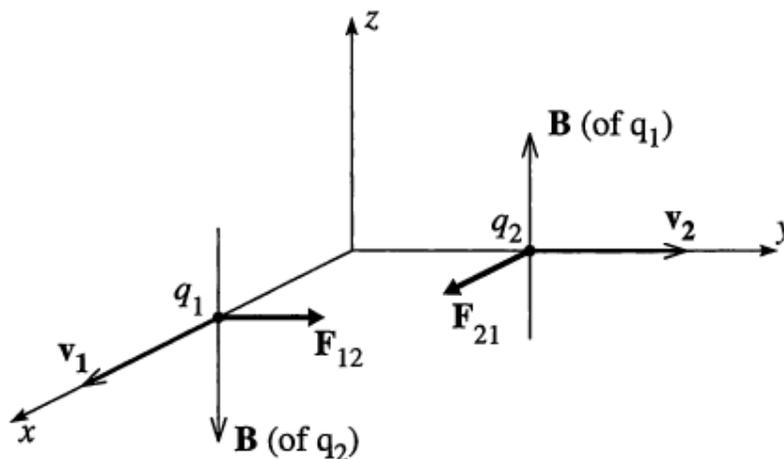


Leggi di conservazione e simmetrie

1) Leggi di conservazione e violazioni apparenti

Le leggi di conservazione di quantità di moto, energia, momento angolare e moto del centro di massa – 10 grandezze in totale – per un sistema isolato possono essere derivate dalle leggi di Newton, che vengono considerate valide per sistemi che soddisfano alcune ipotesi fondamentali: massa inerziale di ogni corpo costante e indipendente dal sistema di riferimento, invariabilità degli intervalli spaziali e temporali rispetto a cambiamento di sistema di riferimento, forze interne a due corpi e centrali. Nel caso delle forze magnetiche alcune di queste ipotesi vengono a cadere: per esse non vale il III principio, e inoltre esse non sono forze centrali. Un esempio famoso di questa strana caratteristica delle forze magnetiche è mostrato nella figura:



Se le cariche positive q_1 e q_2 si muovono lungo gli assi x e y come indicato, la forza magnetica che q_1 esercita su q_2 non è uguale e opposta a quella che q_2 esercita su q_1 . Come conseguenza, non vale più la legge di conservazione della quantità di moto *meccanica*: $m_1\mathbf{v}_1 + m_2\mathbf{v}_2 \neq \text{costante}$. Va notato che l'effetto è quantitativamente piccolo a basse velocità, trascurabile se confrontato con la *forza elettromagnetica totale* fra le due cariche, il cui contributo principale è di natura elettrica. Per motivi analoghi, anche il momento angolare *meccanico* non è conservato.

L'origine delle forze magnetiche è relativistica: d'altra parte, nessuna delle ipotesi citate sopra come premessa necessaria alle leggi di Newton può essere mantenuta valida nell'ambito della relatività ristretta, che –

apparentemente – fa quindi prevedere violazioni delle leggi di conservazione legate agli effetti delle trasformazioni di Lorentz, sia sugli intervalli spaziali e temporali e sulla dipendenza della massa inerziale dalla velocità, sia sulla relatività della simultaneità, che invalida i presupposti della terza legge. Sorprendentemente, gli effetti relativistici che invalidano le ipotesi alla base delle leggi di Newton si manifestano per le forze magnetiche nella perdita di validità del principio di azione e reazione – sia nella forma ‘forte’ (azione e reazione uguali e opposte, e *collineari*), sia nella forma ‘debole’ (azione e reazione uguali e opposte) – anche in regime di basse velocità, come nell’esempio citato.

2) Simmetrie, invarianza, conservazione

In realtà, tuttavia, le leggi di conservazione rimangono valide anche in ambito relativistico, nel quale le leggi di Newton perdono validità, in quanto conseguenza di *principi di simmetria* del tutto generali, indipendenti dalle leggi di Newton e validi per sistemi isolati. I suddetti principi di simmetria si manifestano matematicamente come *proprietà di invarianza* dell’interazione elettromagnetica rispetto a un insieme di trasformazioni di coordinate, noto come *gruppo di Poincaré*. Il legame matematico che lega proprietà di invarianza rispetto a un gruppo di trasformazioni e leggi di conservazione è noto come *teorema di Noether*, e sta alla base di tutta la fisica moderna: per il gruppo di Poincaré, si può dimostrare l’esistenza appunto di 10 quantità conservate, esattamente quelle elencate sopra. La non conservazione della quantità di moto, dell’energia, del momento angolare *totale* o della velocità del CM nei processi elettromagnetici è dunque solo apparente, in quanto nel bilancio viene trascurato il contributo alle rispettive grandezze contenuto nel *campo elettromagnetico*. Il contenuto di energia, quantità di moto e momento angolare del campo elettromagnetico è analogo a quello di un sistema di punti materiali, ma non si manifesta come proprietà meccanica localizzata. Un modo equivalente di descrivere questa situazione è quello di generalizzare la nozione di quantità di moto e di momento angolare di un punto materiale, introducendo i cosiddetti *momenti canonici*, lineare e angolare, che per particelle cariche ricevono contributi sia dai momenti meccanici, sia dal campo elettromagnetico: i momenti canonici sono le grandezze effettivamente conservate.

Le leggi di conservazione della dinamica dei sistemi sono pertanto assunte essere sempre valide anche nella descrizione teorica dei processi

elettromagnetici, conformemente all'evidenza sperimentale quando le osservazioni siano sufficientemente accurate e complete.