



PILLOLE di ASTRONAUTICA



IL PRINCIPIO DI EQUIVALENZA

a cura di Roberto Perenna

Come descritto in meccanica classica, se sottoponiamo un corpo ad una certa forza si verifica che esso acquista un'accelerazione direttamente proporzionale alla forza stessa (*seconda legge della dinamica o di Newton*). Definiamo questo fattore di proporzionalità come la **massa inerziale** del corpo in esame, la grandezza che misura l'inerzia del corpo, ossia la sua resistenza alle variazioni dello stato di moto.

Se consideriamo la *legge di gravitazione universale*, fra due corpi dotati di massa si esercita una forza attrattiva direttamente proporzionale al prodotto delle masse e inversamente proporzionale al quadrato della loro distanza. Definiamo in questo caso le grandezze in gioco di ogni singolo corpo come **massa gravitazionale**.

Si tratta di due concetti di massa che rispecchiano due caratteristiche dei corpi che teoricamente non hanno niente a che fare l'una con l'altra. Tuttavia, se misuriamo il rapporto tra le masse di due corpi sottoposti alla stessa spinta (rapporto fra masse inerziali) e se misuriamo il rapporto fra i rispettivi pesi (rapporto fra masse gravitazionali) otteniamo lo stesso valore, a meno dello scarto dovuto alla precisione e sensibilità degli apparati sperimentali. Misure sempre più accurate effettuate nello spazio continuano tutt'oggi a confermare l'equivalenza fra massa inerziale e massa gravitazionale.

Studiando la caduta dei gravi sia Newton che Galileo avevano formulato in tre modi diversi ma equivalenti uno stesso concetto fisico:

- (a) tutti i gravi cadono con la stessa accelerazione;
- (b) il rapporto tra la massa gravitazionale e massa inerziale rimane costante ed uguale per tutti i corpi;
- (c) in un riferimento in caduta libera la forza di gravità viene cancellata dalla forza apparente (ad es. la forza centrifuga).

Capovolgendo il punto di vista dei suoi predecessori, Einstein sostenne che la misteriosa proporzionalità tra massa gravitazionale e inerziale e l'esatta cancellazione delle forze gravitazionali e centrifuga in un sistema di riferimento in caduta libera non erano solo una fortuita coincidenza, una particolare caratteristica confermata dalle osservazioni, ma esprimevano la natura fondamentale della gravitazione.

Egli riassunse la situazione con un celebre *esperimento ideale*, noto come l'ascensore di Einstein.

In tale esperimento si considera un ascensore che, a causa della rottura delle funi di sostegno e in mancanza di freni e attriti di qualsiasi genere, si trova in caduta libera verticale, nel campo di attrazione gravitazionale della Terra.

Questo ascensore non è un riferimento inerziale, dal momento che è soggetto a una accelerazione **g** rivolta verso il basso. Quindi, su una pallina che si trovi all'interno dell'ascensore, oltre alla forza peso **P=mg** agisce anche la forza apparente **F=-ma**, dove **a** è l'accelerazione del riferimento. Essendo **a=g**, ne segue che le due forze sono uguali e opposte e la loro risultante è nulla, proprio come afferma la proposizione (c): in un ascensore in caduta libera, gli oggetti al suo interno sono senza peso, nel senso che, se si va a misurare con un dinamometro la forza applicata a un qualsiasi oggetto, si trova zero. Questo è l'enunciato di quello che in letteratura prende il nome di **Principio di Equivalenza Debole**.

Per Einstein, tuttavia, l'equivalenza tra i due riferimenti non si limita alle sole leggi della gravitazione. Egli enuncia un Principio di Equivalenza più generale, che prende il nome di **Principio di Equivalenza Forte**:

"In un laboratorio non ruotante, che sia schermato da forze elettromagnetiche e che si trovi in caduta libera, le leggi della fisica e il loro contenuto numerico sono indipendenti dalla posizione del laboratorio. In tale laboratorio, inoltre, tutte le particelle, che siano abbastanza piccole da poter trascurare su di loro le forze mareali e libere da forze non gravitazionali, si muovono senza accelerazioni."

L'importanza di questo principio per la teoria della gravitazione è enorme: come si trova alla base della meccanica classica il Principio di Relatività, che affermava che due sistemi di riferimento in moto traslatorio uniforme l'uno rispetto all'altro sono fisicamente equivalenti, alla base della teoria della gravitazione si trova il Principio di Equivalenza, che applica l'equivalenza dei riferimenti ad un sistema in caduta libera (e con questa espressione si intende un riferimento soggetto solo alla forza gravitazionale) confrontato con un riferimento inerziale.

La forza di gravità è l'unica ad avere questa proprietà e per cui valga tale equivalenza, perciò merita di essere studiata e analizzata singolarmente. Infatti, da quanto abbiamo appena visto segue che ci si può dimenticare della forza gravitazionale a patto di mettersi in particolari sistemi di riferimento, o, trasferendo le proprietà di questa forza alla geometria dello spazio, addirittura ci si può dimenticare della forza di gravità a patto di considerare uno spazio con particolari caratteristiche geometriche. Questo è il concetto su cui si fondano tutte le teorie metriche della relatività, presupposto importante dal quale partire per una comprensione della **Relatività Generale**. Per citare Einstein:

"la possibilità di spiegare l'uguaglianza numerica dell'inerzia e della gravitazione verificando la loro natura dà, secondo me, alla teoria generale della relatività una tale superiorità sulle concezioni della meccanica classica da far considerare, al paragone, piccole tutte le difficoltà incontrate nello sviluppo."

Tuttavia, se si considera una navicella spaziale che ruota attorno alla Terra, e che quindi sia in un riferimento in caduta libera, e si calcola la forza di gravità cui sono soggetti due punti massa distinti all'interno della navicella, ci si accorge immediatamente che essa non ha lo stesso modulo per entrambe a causa della diversa distanza dal centro della Terra. Un osservatore che si trovi all'interno della navicella, allora, dopo un certo tempo, vedrà che la prima massa si è spostata verso il basso mentre la seconda sarà salita. A causa degli effetti del gradiente della forza di gravità (cioè del fatto che questa forza non è uniforme nel laboratorio ma varia a seconda del punto che considero), lasciate libere due masse esse non rimangono ferme all'interno della navicella, ma anzi per tenerle ferme si dovrà applicare una forza. Ecco che allora il principio di equivalenza pare essere violato, poichè nell'ascensore si manifestano effetti che in un riferimento inerziale non si avrebbero.

Ma se le dimensioni della navicella sono piccole e il tempo dell'osservazione breve, lo spostamento tra le due masse è trascurabile. Esso, infatti, dipende dalla differenza tra le accelerazioni di gravità nei due punti considerati, dovute al fatto che il campo gravitazionale non è uniformemente costante ma ha una simmetria radiale, e dunque quanto più sono vicini i due punti tanto più è piccola questa differenza.