

ALBERT A. BARTLETT
Università del Colorado, Boulder

CHARLES W. HORD
*Laboratory for Atmospheric and Space Physics,
Università del Colorado*

DIDATTICA

L'effetto fionda: spiegazione e analogie*

Traduzione da The Physics Teacher, novembre 1985 a cura di B. Pecori Balandi, Dipartimento di Fisica, Bologna.

1. Introduzione

Gli scienziati che inviano navicelle spaziali sui silenziosi percorsi che attraversano il dominio del sistema solare (e anche oltre) utilizzano spesso "l'effetto fionda" dovuto al campo gravitazionale di un pianeta per aumentare o diminuire la velocità della navicella. In questo articolo vorremmo fornire una spiegazione semplice di questo effetto detto anche "appoggio gravitazionale".

2. Esempi

Le missioni dei Voyager forniscono esempi clamorosi dell'effetto fionda.

In un rapporto NASA si legge:

Il lancio avverrà nella tarda estate del 1977, le navicelle passeranno vicino a Giove nel 1979. Utilizzando l'altissima gravità del grande pianeta i (due) Voyager saranno accelerati lungo il loro percorso verso Saturno e lo raggiungeranno nel 1980 e nel 1981 (1).

Successivamente nello stesso rapporto si legge:

Gli scienziati e i controllori potrebbero decidere di scegliere un nuovo percorso, usando la gravità di Saturno per spingere il Voyager 2 verso Urano (1).

Nel sommario dell'articolo "Descrizione della Missione Voyager" si legge:

I passaggi ravvicinati al pianeta Giove sono utilizzati per ridurre l'energia di lancio richiesta per raggiungere Saturno. Verrà inoltre mantenuta aperta la possibilità per il secondo Voyager di utilizzare la gravità di Saturno per proseguire fino ad Urano con arrivo previsto per il gennaio 1986 (2).

Nello stesso articolo:

Due sonde Voyager saranno lanciate durante un periodo favorevole della durata di un mese a partire dal 20 agosto 1977. Questa possibilità è stata individuata sulla base di un particolare allineamento dei pianeti esterni che permette alla sonda di uti-

lizzare più volte l'appoggio gravitazionale per andare da Giove a Saturno, ad Urano e, infine, a Nettuno (2).

L'appoggio gravitazionale è stato usato recentemente nella missione di un'altra navicella spaziale la cui traiettoria è rimasta più vicina alla Terra. Un articolo in un altro giornale riporta quanto segue: *Una navicella spaziale americana è stata guidata via radio tutt'intorno alla parte nascosta della Luna ed è stata immessa in una traiettoria che dovrebbe portare il piccolo osservatorio all'appuntamento con una cometa nel 1985 (3).*

Il racconto così prosegue:

L'International Sun-Earth Explorer 3, un osservatorio da 450 kg lanciato cinque anni fa per altri scopi ha ricevuto una spinta di origine gravitazionale da parte della Luna tale da metterlo su una traiettoria fra la Terra e il Sole che dovrebbe consentirgli di attraversare la coda della cometa Giacobini-Zinner l'11 settembre 1985 (3).

Il racconto riferisce anche che:

La manovra lunare non solo ha fatto balzare la navicella su una nuova traiettoria ma ha anche aumentato la velocità da 9.8×10^3 m/s a 2.3×10^4 m/s. La cometa e la navicella al momento dell'incontro si troveranno a 7.1×10^{10} m dalla Terra (3).

La complessa manovra di questa navicella per portarsi nel luogo dell'appuntamento con la cometa cominciò nel giugno 1982 e comportò in totale cinque avvicinamenti alla Luna (4).

(*) Nella seconda parte dell'articolo viene descritta la missione spaziale Galileo che è rimasta allo stadio di progetto in conseguenza del taglio drastico alle missioni spaziali americane dopo la tragedia del Challenger (gennaio 1986). Tuttavia, anche se non realizzato, il progetto rappresenta un documento interessante da conoscere ed un ottimo esempio di applicazione dell'effetto fionda. (n.d.t.)

3. Il problema

Questi resoconti sull'effetto fionda possono suscitare delle domande da parte dei nostri studenti. "Il campo gravitazionale è conservativo. Come può una sonda spaziale, ad una data distanza da un pianeta, avere un'energia cinetica maggiore quando se ne allontana di quella che aveva alla stessa distanza quando vi si stava avvicinando?"

4. Spiegazione qualitativa

La soluzione del problema è chiara (5) e può essere spiegata con un esempio semplice quale quello di figura 1. Una persona (che rappresenta la Ter-

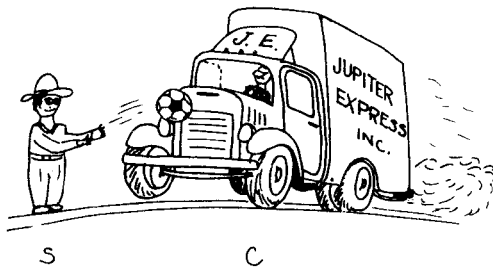


Fig. 1 - La persona S sul marciapiede lancia un pallone davanti ad un camion che si sta avvicinando a gran velocità. Il camion urta elasticamente il pallone. La persona S osserva che il pallone acquista molta energia cinetica nell'urto, il guidatore del camion C osserva che l'energia cinetica del pallone rimane invariata dopo l'urto.

ra) si trova lungo una strada con molto traffico (che rappresenta l'orbita di un pianeta che si avvicina). La persona lancia, con una velocità iniziale piccola, un pallone (che rappresenta la navicella spaziale) davanti al camion (che rappresenta il pianeta). Il pallone quasi fermo viene colpito dal camion e supponiamo si tratti di un urto elastico. Se la persona sul marciapiede effettua delle misure vedrà che l'energia cinetica acquistata dal pallone è uguale alla energia cinetica persa dal camion. L'aumento relativo dell'energia cinetica del pallone è molto grande mentre la perdita relativa di energia cinetica del grosso camion è molto piccola. Guardiamo ora l'urto dal sistema di riferimento del camion che, data la grande massa di quest'ultimo, coincide praticamente con il sistema di riferimento del centro di massa. Il conducente del camion vedrà il pallone avvicinarsi con velocità V_p

prima dell'urto e lo vedrà allontanarsi con velocità $V_a = V_p$ dopo l'urto e riferirà che l'energia cinetica del pallone prima e dopo l'urto è la stessa e che l'interazione fra il camion e il pallone può essere rappresentata con un campo di forze conservative. Per l'osservatore sul marciapiede invece l'interazione non apparirà descrivibile con un campo di forze conservativo. Una interazione elastica dunque può apparire governata da un campo conservativo o no a seconda del sistema di riferimento dal quale la si osserva.

Questo esempio è utile per ricordarci che in tutti i libri di testo la discussione dei campi conservativi riguarda sistemi di riferimento nei quali la sorgente di campo è in quiete, cioè si svolge sempre nel sistema di riferimento del conducente del camion.

È molto semplice trasferire questo esempio del pallone e del camion al caso dell'interazione fra la navicella e Giove. L'osservatore su Giove vedrà che la navicella, ad una data distanza dal centro di Giove, ha la stessa energia cinetica sia quando si avvicina sia quando si allontana da esso; egli descriverà quindi l'interazione con un campo di forze conservativo. Un osservatore sul Sole vedrà il pianeta Giove con la sua grande massa muoversi a grande velocità, "urtare" elasticamente una piccola navicella dotata di bassa energia cinetica ed infine la navicella che si allontana dal punto dello "scontro" con una velocità maggiore di quella di Giove; questo osservatore sarebbe tentato di affermare che l'interazione elastica non è governata da un campo conservativo di forze.

Vi è un aspetto importante nel quale l'interazione pallone-camion e quella navicella-Giove si differenziano: nel primo caso si tratta di una forza repulsiva mentre nel secondo caso di un campo attrattivo descritto dalla legge di gravitazione di Newton. Per ottenere un aumento dell'energia cinetica di un corpo di massa minore è necessario, nel caso del pallone, lanciargli davanti al camion, mentre è necessario lanciare la navicella dietro al pianeta Giove.

5. Schema di calcolo

Poiché i dettagli del calcolo dell'orbita e della traiettoria sono analiticamente complicati faremo un calcolo approssimato relativo ad una ipotetica interazione di una sonda Voyager con Giove. Otterremo l'angolo di deviazione del Voyager e la sua variazione di velocità, di quantità di moto e di energia. Per semplicità tratteremo l'interazione come un urto elastico in due dimensioni di due particelle puntiformi. Considereremo perciò le quantità di moto delle due particelle (Giove e la navicella) solo quando sono molto lontane fra loro, sia prima sia dopo l'"urto" in modo da poter ignorare la

complessità dell'orbita del Voyager nelle vicinanze di Giove.

Osserveremo l'urto da due sistemi di riferimento diversi: il sistema di riferimento C, in cui il centro di massa del sistema delle due particelle è in quiete e il sistema di riferimento S nel quale è in quiete il Sole.

In un urto elastico in due dimensioni fra particelle puntiformi di massa nota e costante e di velocità iniziale nota abbiamo quattro grandezze incognite dopo l'urto: modulo e direzione delle velocità delle due particelle. Le equazioni disponibili per la risoluzione del problema sono solo tre: la conservazione della componente X e quella della componente Y della quantità di moto, la conservazione dell'energia. Dobbiamo perciò assegnare un valore ad una delle grandezze incognite e determinare poi le altre tre risolvendo il sistema di tre equazioni. Per avere una descrizione completa dell'urto dobbiamo specificare, nel sistema di riferimento S, modulo e direzione della velocità con cui il Voyager si avvicina a Giove e modulo e direzione della velocità di Giove nello stesso riferimento; specificheremo poi nel riferimento C la direzione lungo la quale il Voyager si allontanerà da Giove.

6. Dati

Massa del Voyager	= 825 kg (2)
Massa di Giove	= 314.5xMassa della Terra $\cong 10^2 \pi \times$ Massa della Terra $= 1.88 \times 10^{27}$ kg
Distanza Sole-Giove	= 7.78×10^{11} m
Periodo di Giove	= 4332.6 giorni siderali $= 3.73 \times 10^8$ s

Assumendo che Giove si muova su di una orbita circolare attorno al Sole, la sua velocità è:

$$V_{GSP} = 1.31 \times 10^4 \text{ m/s}$$

Utilizzeremo d'ora in poi un indice triplice: il primo indica il corpo considerato (G per Giove e V per il Voyager); il secondo indica il sistema di riferimento (S per il Sole e C per il centro di massa) rispetto al quale è misurata la velocità; il terzo indica se si tratta di un valore della grandezza prima dell'urto (P) o dopo l'urto (D).

Poiché il tempo di interazione fra Giove e il Voyager è piccolo in confronto al periodo di rotazione di Giove attorno al Sole, trascureremo il fatto che si tratta di una traiettoria circolare e considereremo il moto di Giove rettilineo con velocità iniziale V_{GSP} .

7. Calcolo dettagliato

Assumiamo che

$$V_{VSP} = 1.00 \times 10^4 \text{ m/s}$$

sia nel verso positivo delle ordinate e che la velocità

$$V_{GSP} = 1.31 \times 10^4 \text{ m/s}$$

sia nel verso negativo delle ascisse. Individuiamo la direzione della velocità del Voyager dopo l'urto, \vec{V}_{VCD} , assumendo che \vec{V}_{VCP} e \vec{V}_{VCD} formino angoli uguali con la retta che passa per Giove ed è perpendicolare alla congiungente Giove e il Sole. Siamo ora in grado di calcolare la velocità V_{VSD} con cui il Voyager si allontana da Giove. In figura 2 sono riportati i vettori velocità del Voyager prima e dopo l'urto nel sistema di riferimento S e nel sistema di riferimento C.

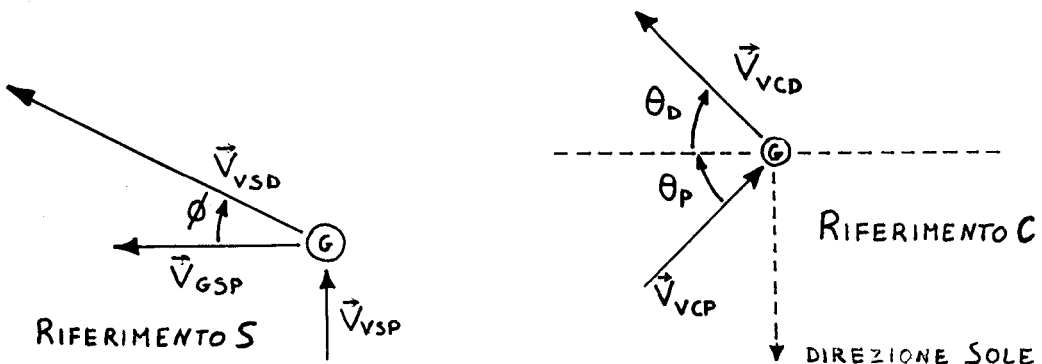


Fig. 2 - Il diagramma a sinistra mostra l'urto del Voyager e di Giove nel riferimento S, quello a destra mostra lo stesso urto nel riferimento C. Abbiamo scelto di considerare il caso in cui nel riferimento C si ha $\theta_D = \theta_P$.

1. Calcolo del rapporto fra le velocità nel riferimento C:

$$\frac{V_{GCP}}{V_{VCP}} = \frac{M_V}{M_G} = \frac{825}{1.88 \times 10^{27}} = 4.39 \times 10^{-25} \quad (1)$$

Questo rapporto è così piccolo che possiamo affermare di compiere un errore trascurabile assumendo che:

a. La velocità di Giove nel riferimento S è la velocità del centro di massa del sistema Giove-Voyager nello stesso riferimento.

b. La velocità di Giove non viene alterata dall'urto $V_{GSP} = V_{GSD}$.

2. Calcolo della velocità iniziale del Voyager nel riferimento C. Dalla figura 3 vediamo che

$$\vec{V}_{VSP} = \vec{V}_{GSP} + \vec{V}_{VCP} \quad (2)$$

La velocità del sistema di riferimento C rispetto a quello S (V_{GSP}) sommata con la velocità del Voyager nel riferimento C (V_{VCP}) dà la velocità del Voyager nel riferimento S (V_{VSP}).

$$V_{VSP} = 1.00 \times 10^4 \text{ m/s}$$

$$V_{GSP} = 1.31 \times 10^4 \text{ m/s}$$

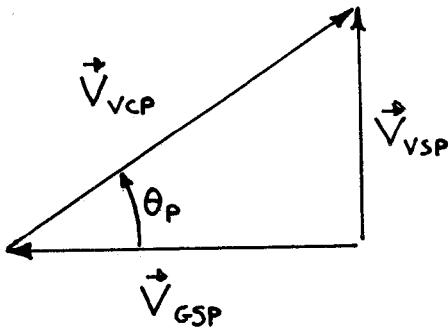


Fig. 3 - Nel riferimento S Giove si muove verso sinistra con velocità V_{GSP} che è anche la velocità del sistema di riferimento C nel riferimento S. La velocità del sistema di riferimento C più la velocità del Voyager misurata nel riferimento C dà la velocità del Voyager nel riferimento S.

Si calcola facilmente che

$$\begin{aligned} V_{VCP} &= 1.65 \times 10^4 \text{ m/s} \\ \vartheta_p &= 37.4^\circ \end{aligned} \quad (3)$$

3. Calcolo della velocità finale del Voyager nel riferimento C.

L'analisi dell'urto si basa sulla considerazione che, essendo l'urto elastico, nel sistema di riferimento C deve essere:

$$|\vec{V}_{VCP}| = |\vec{V}_{VCD}| \quad (4)$$

Questi vettori sono rappresentati nella figura 2 in cui si è tenuto conto dell'assunto, fatto in precedenza, che $\vartheta_p = \vartheta_D$. In questo sistema di riferimento sarà quindi:

$$|\vec{V}_{VCP}| = |\vec{V}_{VCD}| = 1.65 \times 10^4 \text{ m/s} \quad (5)$$

4. Calcolo della velocità finale del Voyager nel riferimento S. Nella figura 4 è rappresentata la composizione vettoriale

$$\vec{V}_{VSD} = \vec{V}_{GSD} + \vec{V}_{VCD}$$

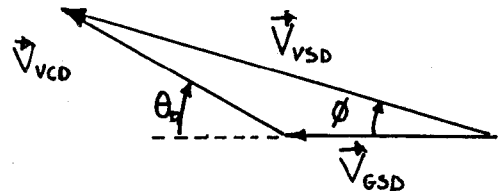


Fig. 4 - La velocità del sistema di riferimento C, V_{GSD} più la velocità del Voyager (dopo l'urto) misurata rispetto a C, dà la velocità del Voyager (dopo l'urto) nel riferimento S.

Essendo noti

$$V_{GSD} = 1.31 \times 10^4 \text{ m/s}$$

$$V_{VCD} = 1.65 \times 10^4 \text{ m/s}$$

$$\vartheta_D = 37.4^\circ$$

$$\varphi = 20.9^\circ$$

possiamo calcolare

$$V_{VSD} = 2.80 \times 10^4 \text{ m/s}$$

5. Calcolo dell'energia e della quantità di moto nel riferimento C.

Nel sistema di riferimento C, l'energia cinetica del Voyager e l'energia cinetica di Giove dopo l'ur-

to sono rispettivamente uguali all'energia cinetica che possedevano prima dell'urto. Anche i valori corrispondenti alle quantità di moto prima e dopo l'urto sono uguali in questo sistema di riferimento.

6. Calcolo dell'energia cinetica acquistata dal Voyager.

Nel sistema di riferimento S, il rapporto fra la velocità del Voyager prima e dopo l'urto vale:

$$\frac{|\vec{V}_{VSD}|}{|\vec{V}_{VSP}|} = \frac{2.80 \times 10^4}{1.00 \times 10^4} = 2.8$$

e il rapporto fra i corrispondenti valori dell'energia cinetica sarà quindi

$$\frac{EC_{VSD}}{EC_{VSP}} = 2.8^2 = 7.9 \quad (7)$$

Nel caso che stiamo esaminando, quindi, il Voyager si allontana da Giove con una energia cinetica 7.9 volte maggiore di quella che possedeva quando si avvicinava al pianeta.

L'energia cinetica iniziale del Voyager nel riferimento S vale

$$\frac{1}{2} \times 825 \times (1.0 \times 10^4)^2 = 4.13 \times 10^{10} \text{ J}$$

quella finale vale

$$\frac{1}{2} \times 825 \times (2.8 \times 10^4)^2 = 3.23 \times 10^{11} \text{ J}$$

Nel riferimento S il Voyager guadagna 2.82×10^{11} J di energia cinetica.

7. Calcolo della variazione di velocità di Giove.

In uno dei resoconti delle missioni Voyager si legge:

A circa un miliardo di chilometri da qui, il viaggio dei Voyager è appena cominciato. Il Voyager 1, dopo aver aumentato la propria energia cinetica rallentando impercettibilmente Giove, sta correndo verso Saturno. Dopo Saturno uscirà dal sistema solare ad una velocità costante di circa tre unità astronomiche all'anno.

Anche se abbiamo assunto che la velocità di Giove nel riferimento S sia rimasta inalterata, sappiamo che l'energia acquistata dal Voyager è uguale a quella persa da Giove: è quindi facile valutare la riduzione di velocità del pianeta dovuta all'urto.

L'energia cinetica di Giove nel riferimento S vale

$$EC_G = \frac{1}{2} M_G V_{GSP}^2 \quad (8)$$

La variazione di velocità di Giove dV_{GS} dipende dalla variazione di energia cinetica secondo una relazione che si ottiene differenziando l'equazione 8.

$$dV_{GS} = \frac{d(EC_G)}{M_G V_{GSP}}$$

Poiché l'urto è elastico, il guadagno di energia del Voyager è uguale alla perdita di energia di Giove, entrambe misurate nel sistema di riferimento S.

$$dV_{GS} = \frac{2.82 \times 10^{11}}{1.88 \times 10^{27} \times 1.31 \times 10^4} = 1.15 \times 10^{-20} \text{ m/s}$$

Si tratta di una variazione di velocità veramente trascurabile: essa porterebbe in un periodo di tempo di 10^9 anni ad uno scostamento di 3.6×10^{-4} m dalla precedente traiettoria!

8. L'ordine naturale delle cose

Alcuni ambientalisti hanno sollevato il problema dell'effetto che queste accelerazioni provocate dalle navicelle possono avere su Giove, basando le proprie considerazioni sul fatto che esse disturbano l'orbita di Giove e perciò alterano "l'ordine naturale delle cose". È pur vero che l'orbita di Giove viene disturbata dall'utilizzazione del suo campo gravitazionale ma, dobbiamo chiederci, "quanto e in confronto a che cosa?". La chiave del ragionamento sta nel rapporto tra le masse: la massa del Voyager è circa quella di una piccola automobile mentre la massa di Giove è circa 300 volte quella della Terra. Se una macchina accelerasse rispetto alla Terra tanto quanto il Voyager accelera rispetto a Giove, l'accelerazione di rinculo della Terra sarebbe 300 volte quella di Giove. Il moto della Terra viene disturbato di una entità non infinitesima ogni volta che una persona accelera camminando o guidando l'automobile; l'unico modo per evitare di disturbare "l'ordine naturale delle cose" è stare fermi, per sempre.

La superficie dei pianeti e dei satelliti è continuamente bombardata da particelle le cui masse vanno dai microgrammi alle migliaia di tonnellate e l'effetto di alcune di queste è notevolmente maggiore di quello dovuto all'accelerazione di una na-

vicella spaziale, ma questi impatti fanno parte dell'“ordine naturale delle cose”.

L'accelerazione che Giove subisce quando sfruttiamo l'appoggio gravitazionale è dunque confrontabile con le azioni che ciascuno di noi compie sulla Terra e trascurabile rispetto all'effetto dell'impatto degli asteroidi.

9. L'effetto fionda può ridurre la velocità

L'effetto fionda può essere usato sia per aumentare sia per ridurre la velocità di una sonda. Questo fatto può sorprendere perché di solito si pensa che le missioni nello spazio richiedano alte velocità al fine di coprire grandi distanze nel minor tempo possibile e con il minor consumo possibile di carburante; l'uso dell'effetto fionda per aumentare l'energia cinetica della sonda spaziale presenta quindi evidenti vantaggi. Si può però usare l'effetto fionda per rallentare la navicella allo scopo di metterla in orbita attorno ad un pianeta lontano.

10. L'energia potenziale gravitazionale

L'energia potenziale di Giove e del Voyager quando sono separati da una distanza r vale

$$EP = - G \frac{M_G M_V}{r}$$

Se M_V possiede una energia cinetica non trascurabile quando si trova a distanza infinita da M_G l'energia totale del sistema è positiva. Se invece M_V si trova su di un'orbita di raggio r attorno a M_G allora si ha

$$\frac{M_V V_V^2}{r} = G \frac{M_V M_G}{r^2}$$

In questo caso, come riportato in tutti i libri di fisica elementare, l'energia totale del sistema è negativa, di conseguenza una navicella spaziale con energia totale positiva non può trovarsi su di un'orbita stabile attorno ad un pianeta. Una navicella che si avvicina ad un pianeta provenendo da molto lontano deve dunque perdere molta energia cinetica per potersi immettere su un'orbita stabile attorno al pianeta. Si possono usare i motori per ottene-

re una spinta contraria al fine di ridurre la velocità e quindi l'energia totale della navicella, oppure, se si vuole risparmiare carburante si può usare l'effetto fionda in senso inverso.

Per poter far questo bisogna che il pianeta abbia dei satelliti: la navicella può avvicinarsi ad uno di essi lungo una traiettoria tale che la riduzione di velocità dovuta all'effetto fionda inverso renda negativa l'energia totale del sistema navicella-pianeta. La navicella viene per così dire “catturata” in un'orbita stabile attorno al pianeta e non potrà successivamente sfuggire a meno che non aumenti la sua energia cinetica e totale. Questo aumento richiederà di consumare carburante oppure, se possibile, di usare l'effetto fionda per guadagnare energia cinetica a spese di quella di un satellite del pianeta.

11. Un esempio numerico

L'effetto fionda inverso può essere visualizzato immaginando di proiettare all'indietro una ripresa del moto descritto nel paragrafo 7. Vedremmo allora il Voyager che passa davanti a Giove viaggiando ad una velocità di 2.8×10^4 m/s. Il risultato del sorpasso è che la velocità del Voyager si riduce a 1.0×10^4 m/s e la sua energia cinetica si riduce al 13% circa del valore iniziale.

12. Confronto fra i due tipi di effetto fionda

Confrontiamo i due tipi di effetto fionda considerati: se il Voyager attraversa l'orbita di Giove passandogli davanti, allora perde energia e Giove ne acquista; se il Voyager attraversa l'orbita di Giove passandogli dietro, allora acquista energia e Giove ne perde.

Un effetto analogo si può immaginare per il pallone e il camion che interagiscono tramite una forza repulsiva. Sia V la velocità del camion nel riferimento S , che coincide praticamente con la velocità del riferimento C rispetto al riferimento S . Appena il camion è passato la persona sul marciapiede tira il pallone con velocità $2V$ (nel riferimento S) dietro al camion.

Nel riferimento C il pallone si avvicina al Camion con velocità $2V - V = V$ e, dopo l'urto, rimbalza dal retro del camion con velocità V . Perciò l'osservatore sul marciapiede (fermo nel riferimento S) vede il pallone fermo dopo l'urto. Tutta l'energia del pallone è passata al camion. Dunque se l'interazione avviene dietro al camion il pallone

perde energia e il camion ne acquista, se avviene davanti al camion il pallone acquista energia e il camion ne perde. Nella tabella I sono riassunti i due tipi di interazione ed è specificata, per le forze attrattive e repulsive, la posizione dove deve avvenire l'interazione (davanti o dietro) affinché l'oggetto più piccolo guadagni o perda energia cinetica.

Tab. I - Questa tabella indica la posizione, davanti o dietro all'oggetto di massa grande, dove deve avvenire l'interazione (attrattiva o repulsiva) affinché l'oggetto di massa piccola (il Voyager o il pallone) acquisti o perda energia cinetica.

	Interazione Attrattiva (Giove-Voyager)	Interazione Repulsiva (camion-pallone)
il corpo di massa piccola acquista EC	dietro a Giove	davanti al camion
il corpo di massa piccola perde EC	davanti a Giove	dietro al camion

13. Altri esempi

Altri tipi di interazione, tra corpi e "riflettori" oppure tra radiazione e "riflettori", possono produrre effetti analoghi all'effetto fionda, come si può vedere esaminandoli nel riferimento C nel quale il riflettore è in quiete e in un riferimento S nel quale invece è in movimento. Come nel caso del pallone e del camion, un pallone che rimbalza su un muro fermo non subirà variazioni di energia cinetica, ma quando il fenomeno è visto da un sistema di riferimento in moto il pallone guadagnerà o perderà energia cinetica a seconda che l'urto avvenga dal davanti o dal di dietro. Analogamente succede in acustica: l'eco riflessa da un muro che si avvicina ha frequenza maggiore e maggiore densità di energia di un'eco riflessa da un muro fermo. La luce riflessa da uno specchio che avanza ha frequenza maggiore della luce riflessa da uno specchio fermo. Un corpo elettricamente carico "riflette" particelle con carica opposta; se il corpo si sta avvicinando alle particelle l'energia cinetica delle particelle dopo la "riflessione" sarà maggiore di prima. Chi pratica il *surf-board* va lentamente incontro all'onda oceanica che avanza e torna verso riva con una energia cinetica maggiore di prima.

Anche i campi magnetici possono "riflettere" particelle: l'urto rappresentato in figura 2, visto dal riferimento C, potrebbe rappresentare l'interazione di una particella carica con una limitata regione di campo magnetico perpendicolare al piano della figura. Poiché nel riferimento C la direzione del campo magnetico è sempre perpendicolare alla velocità della particella, esso non può far variare l'energia cinetica della particella, eppure nel riferimento S essa acquista o perde energia cinetica. Più in generale, quando una particella viaggia in un campo magnetico si muove lungo una spirale attorno alle linee del campo e se in questo moto va verso una regione in cui il campo è molto intenso, il vettore forza ha una componente parallela alle linee di campo e la particella viene "riflessa" dallo "specchio magnetico" senza variazione di energia cinetica. Se si guarda invece al fenomeno da un sistema di riferimento in moto le particelle appaiono acquistare o perdere energia esattamente come nel caso del pallone e del camion. Fermi suggerì che attraverso questo meccanismo venissero accelerati i raggi cosmici.

Il processo principale di accelerazione è dovuta all'interazione di particelle cosmiche (cariche) con campi magnetici vaganti... Tali campi hanno una notevole stabilità a causa delle grandi dimensioni (dell'ordine di grandezze di un anno luce) e la conducibilità elettrica relativamente alta caratteristica degli spazi interstellari (8).

Fermi fa notare che:

In un urto può esserci sia una perdita sia un guadagno di energia... perdite e guadagni tuttavia non si compensano completamente poiché gli urti frontali sono leggermente più probabili degli urti da dietro dato il valore più alto della velocità relativa.

La stessa cosa accade con un camion che si muove nell'aria: il camion cede più energia alle particelle che urta frontalmente di quanta ne guadagna dagli urti con molecole che lo colpiscono da dietro. Il camion pertanto perde energia passando attraverso l'aria.

14. Un'analogia termodinamica

Una certa quantità di un gas ideale si trova in un cilindro chiuso da un pistone, entrambi isolati adiabaticamente. Se il cilindro si muove in avanti comprimendo il gas, le molecole rimbalzeranno elasticamente sulla superficie del pistone che avanza, con una velocità maggiore di quella che possedevano prima dell'urto. La velocità media delle molecole diventerà maggiore e aumenterà la

temperatura. L'energia necessaria per ottenere un aumento dell'energia interna del gas deve essere stata fornita da un agente esterno che ha mantenuto in moto il pistone. Quando il pistone torna indietro si ottiene l'effetto inverso: le molecole del gas perdono energia, la temperatura del gas diminuisce e il gas compie lavoro per aumentare la velocità del pistone o contro l'agente esterno che ne ostacola il moto. Quando si usa l'effetto fionda per aumentare l'energia cinetica del Voyager è come se lo "scaldassimo" adiabaticamente, viceversa, se si usa l'effetto fionda per ridurre l'energia cinetica del Voyager, è come se lo stessi "raffreddando" adiabaticamente.

15. Esempio

La missione Galileo verso Giove ha in programma un lancio per la metà del 1986. I dettagli del progetto sono stati accuratamente studiati per ottimizzare le condizioni della missione. Ecco due criteri per la ricerca delle condizioni ottimali: (1) massimizzare le possibilità di osservazione ravvicinata di Giove e dei suoi satelliti; (2) minimizzare la variazione totale di velocità Δv da ottenersi mediante la combustione di carburante.

Tab. II (7) - Valutazione di possibili percorsi in termini di variazione di velocità da realizzare con consumo di carburante.

PERCORSO	Δv DET	Δv 90 STAT	Δv TOTALE
78-3	72	188	260
79-1	104	127	231
80-23	27	142	169
Δ VEGA	10	140	150
84-02	77	119	196
85-01*	57 (52)	132 (120)	189 (172)
85-02*	67 (61)	102 (93)	169 (154)
85-05*	70 (64)	128 (116)	198 (180)
85-06*	68 (62)	118 (107)	186 (169)

Nota: Tutte le traiettorie sono normalizzate a 11 avvicinamenti.

I valori tra parentesi corrispondono a 10 avvicinamenti. I valori contrassegnati con * sono valutazioni preliminari. È in corso una analisi dettagliata della traiettoria 85-01. Allo stato attuale il valore Δv assegnato è di 187 m/s per 10 avvicinamenti.

La tabella II mostra una valutazione relativa ad alcuni possibili percorsi attorno a Giove e attraverso le regioni occupate dai suoi satelliti (9); i numeri rappresentano le variazioni totali di velocità in metri al secondo che devono essere ottenute tramite consumo del carburante contenuto nella navicella

dopo il suo arrivo nelle vicinanze di Giove, affinché possa portare a termine 11 incontri con Giove e i suoi satelliti. Quello che si cerca di ottenere è un basso valore di Δv poiché la quantità di carburante necessaria cresce al crescere di Δv . La colonna di sinistra è calcolata in base all'assunto che i dati sulle effemeridi di Giove e dei suoi satelliti siano esatti, la colonna STAT contiene le correzioni necessarie per tener conto dell'incertezza sui dati relativi alle effemeridi e la somma delle due dà la variazione totale Δv . Le differenze fra i valori di Δv da una traiettoria all'altra dipendono in parte dalla misura in cui è possibile sfruttare il campo gravitazionale di Giove e dei suoi satelliti per accelerare o rallentare la navicella. Le figure 5, 6, 7 e 8 mostrano una possibile configurazione della missione. Come si può vedere il calcolo dettagliato delle traiettorie di una missione è un problema a più corpi estremamente complesso. Ogni "incontro" corrisponde ad un effetto fionda che, nel caso dei satelliti di Giove, comporta per lo più cambiamenti di direzione assai modesti.

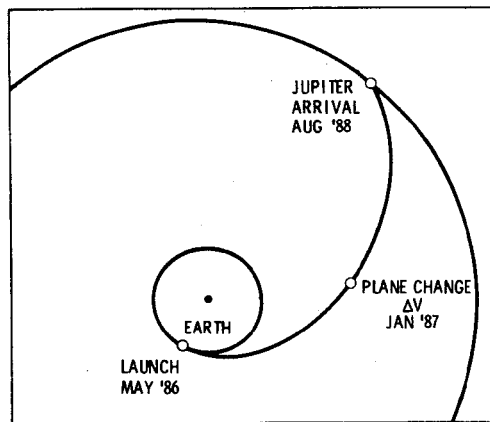


Fig. 5 - Traiettoria della navicella dalla Terra a Giove. Il sole è rappresentato dal puntino nero al centro dell'orbita della Terra. La velocità in senso antiorario caratteristica dell'orbita terrestre si somma alla velocità dovuta alla combustione del carburante del razzo. La navicella raggiungerà Giove nell'agosto 1988 (9).

16. Altre fonti di informazione

Un'esauriente rassegna della storia e della meccanica dell'appoggio gravitazionale è stata fatta da Nock e Uphoff (10), i quali puntualizzano che

Il Voyager usa il campo gravitazionale di Giove per variare la direzione del moto e aumentare la sua velocità per raggiungere Saturno. L'effetto è considerevole, equivalente a 11500 m/s e rappresenta di fatto una traiettoria di fuga dal sistema solare.

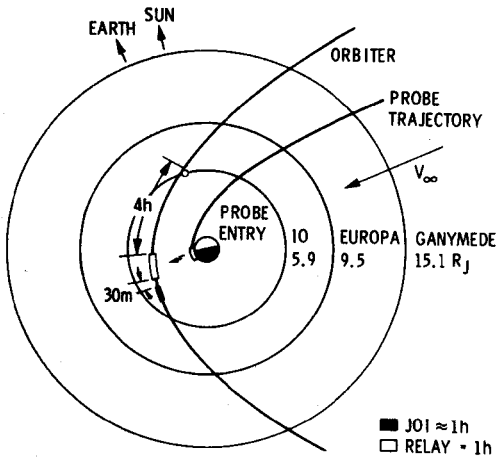


Fig. 6 - Quando la navicella arriva nelle vicinanze di Giove si separa in due parti: una sonda (Probe) che atterra sulla superficie del pianeta e un satellite che resterà in orbita accanto ai satelliti naturali. La velocità di Giove è diretta verso destra. In questo tratto della traiettoria la navicella, vista nel riferimento C, acquista energia avvicinandosi a Giove. Il rettangolino vuoto (RELAY) rappresenta il tratto in cui la sonda, vicina alla superficie o sulla superficie di Giove riferisce dati alla navicella perché siano trasmessi alla Terra. Il rettangolino pieno (JOI = Inserimento in Orbita attorno a Giove) rappresenta il tratto in cui viene consumato carburante per diminuire la velocità della navicella affinché sia "catturata" in un'orbita attorno a Giove (9).

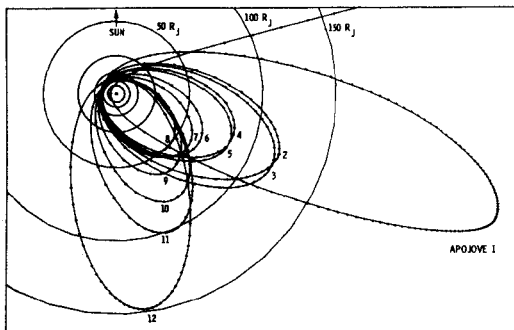


Fig. 7 - La navicella si avvicina a Giove lungo la traiettoria che entra in alto a destra, vicino al cerchio contrassegnato da $150 R_J$ (150 volte il raggio di Giove); passa vicino a Giove (il puntino nero) e qui viene consumato il carburante per ridurre la velocità; si muove poi lungo l'orbita chiamata APOJOVE 1. Dopo tale orbita la navicella gira intorno a Giove più volte, utilizzando ogni tanto piccole quantità di carburante per aggiustare la rotta in relazione ai passaggi presso i satelliti naturali di Giove (9).

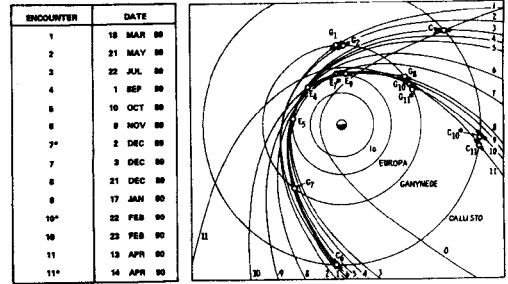


Fig. 8 - Dettagli delle orbite della navicella nelle vicinanze di Giove. Sono riportati undici "incontri" con Europa (E), Ganimede (G) e Callisto (C). I numeri sui margini in basso e a destra rappresentano la sequenza dei passaggi vicino a Giove, a partire da quello contrassegnato 0 in basso a destra (9).

Per quanto riguarda la cattura e messa in orbita, essi riferiscono che

Vicino a Giove la variazione di velocità necessaria per passare da un'orbita iperbolica ad una ellittica è dell'ordine di 1000 m/s o maggiore se si vogliono avere condizioni di avvicinamento favorevoli... Anche se il pianeta in sé non è in grado di catturare nella sua orbita la navicella, l'effetto fionda dovuto al campo gravitazionale di un grosso satellite (o di più satelliti) può essere utilizzato per ridurre il Δv necessario per la cattura.

Nock e Uphoff, che forniscono una rassegna storica dettagliata corredata da un'ampia bibliografia, mettono in evidenza che

Il primo riferimento bibliografico nel quale si parla dell'utilizzazione di un satellite per ridurre le necessità di carburante per la navigazione nei cieli è un manoscritto di Yu.V. Kondratvuk (dell'Unione Sovietica), datato circa 1918-19 (non pubblicato fino al 1964).

17. Conclusioni

L'effetto fionda può apparire sconcertante perché sembra contraddire il nostro modo di capire il comportamento di una particella in un campo di forze conservative. Per questo motivo si può giungere alla conclusione che l'effetto fionda è una cosa lontana, complessa e inaccessibile ad una spiegazione semplice. Abbiamo visto che gli strumenti della Fisica elementare sono sufficienti per mettere in grado gli studenti di comprendere questo effetto e le sue applicazioni. Dall'esame del compor-

tamento di Giove e del Voyager in condizioni asintotiche, quando si trovano lontani uno dall'altro, prima e dopo l'urto, ricaviamo che i dettagli dell'urto non sono rilevanti e che pertanto qualsiasi interazione che produca un urto elastico può essere sostituita a quella di natura gravitazionale. L'effetto fionda è dunque un effetto che si osserva quando un urto elastico viene visto da un sistema di riferimento diverso da quello del centro di massa.

Il rapporto NASA si conclude dicendo:

Anni dopo il lancio, ad una distanza pari forse a 30 volte la distanza tra la Terra e il Sole e dopo aver consumato tutto il carburante, i due Voyager non saranno più in grado di rispondere ai comandi di correzione di rotta provenienti dai padroni terrestri e le comunicazioni si affievoliranno per poi svanire mentre le navicelle se ne andranno alla deriva. Dopo aver portato a termine la loro missione di scoperta e di esplorazione i due vascelli continueranno a navigare per sempre (1).

Ringraziamenti

Desideriamo ringraziare Torrence V. Johnson che lavora al Galileo Project presso il Jet Propulsion Laboratory di Pasadena (California) per averci permesso di riprodurre le figure 5, 6, 7 e 8.

BIBLIOGRAFIA E NOTE

- (1) "Voyager-Journey to the Outer Planets", National Aeronautics and Space Administration JPL SP 43-39. NASA-JPL-COML, Los Angeles, CA, Contract No. NAS7-100, Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, CA, p. 2.
- (2) C.E. Kohlase, P.A. Penzo, *Space Science Reviews*, 21, 77-101, (1977).
- (3) W.E. Leary, Associated Press Story in *Boulder Daily Camera*, 23 (dicembre, 1983) p. 5B.
- (4) *Sky and Telescope*, 65, 135, (febbraio 1983).
- (5) L.C. Epstein, *Phys Teach*, 11, 299, (1983).
- (6) R.E. Edelson, B.W. Madsen, E.K. Davis, G.W. Garrison, *Science*, 204, 913, (1979).
- (7) Analogamente si usa la turbina di Pelton per trasformare l'energia cinetica di un getto di acqua ad alta velocità in energia cinetica di rotazione della ruota e del sistema al quale essa è attaccata. L'acqua rimbalza elasticamente sulle pale sagomate della turbina e se le pale arretrano con una velocità pari a metà di quella del getto d'acqua, l'acqua quando abbandona le pale è ferma e tutta l'energia cinetica del getto viene trasferita alla turbina.
- (8) E. Fermi, *Phys. Rev.*, 75, 1169, (1949).
- (9) Galileo; *Project Capability Review*, Part 1 JPL-D-2393 Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, CA, (21-22 maggio, 1985).
- (10) K.T. Nock e C.W. Uphoff del Technical Staff, Systems Division, Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, CA, "Satellite-Aided Orbit Capture," (Articolo 79-165 dagli Atti della AAS/AIAA Astrodynamics Specialist Conference, Provincetown, MAJ, 25-27 giugno, 1979).

Il marchio dell'A.I.F.

Il Consiglio Direttivo si sta preoccupando, soprattutto per interessamento del Consigliere P. Cerreta, di curare l'immagine dell'A.I.F. Ha pertanto approvato un marchio dell'Associazione che presentiamo qui sotto ai soci.



ASSOCIAZIONE
PER L'INSEGNAMENTO
DELLA FISICA