

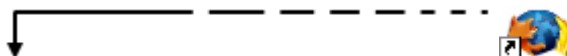


El racó obscur

EL RACÓ OBSCUR

Xavier Jaén

La intenció d'aquesta secció és anar aclarint tot aquells temes relacionats amb (la didàctica de) la física que, en el millor dels casos, provoquen polèmica i, en d'altres, irritacions infundades. Comencem amb les forces de l'inèrcia.



Les forces d'inèrcia, existeixen?

Introducció

La veritat és que és molt difícil convèncer els estudiants que el pessigolleig que senten quan pugen a les muntanyes russes és degut a unes forces que no existeixen. El problema sorgeix molt cops perquè el debat queda tallat amb aquesta negació existencial tan severa. El que podem fer és trobar explicacions a aquestes sensacions sense necessitat de carregar les tintes amb qüestions existencials. En tot cas l'existència o no d'aquestes forces dependrà de si les necessitem o no per explicar el que ens envolta. Com passa en altres casos, la força no és un concepte absolut.

Analitzem quan i com hem d'entendre els efectes de l'inèrcia. No podem dir simplement "la força centrífuga no existeix" i no atribuir a cap força les nostres "sensacions internes".

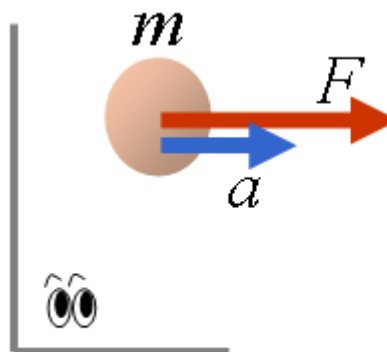


Fig 1: l'observador inercial veu com el cos s'accelera degut a la força F .

La llei de moviment de Newton

Una força sobre un objecte de massa m l'accelera segons

$$\vec{F} = m\vec{a}.$$

Aquesta relació és vàlida per a qualsevol observador situat en un sistema inercial S_I , és a dir quan el mateix observador no està accelerat. El que passa és que, quan les forces actuen sobre nosaltres mateixos, ens venen moltes ganes de fer d'observadors. Però en aquest cas no serem un observador inercial!

La llei de moviment de Newton per a un sistema no inercial S_{NI} , que es trasllada amb una acceleració (coneguda en funció del temps) $\vec{a}_S(t)$ respecte d'un sistema inercial, resulta ser

$$\vec{F} - \vec{F}_I = m\vec{a} \quad ; \quad \vec{F}_I = m\vec{a}_S$$

on $\vec{F}_I$ és la força d'inèrcia i $\vec{F}$ la força exterior. Si a més considerem observadors no inercial sotmesos a rotacions la llei de Newton s'embolica una mica més.

Sobre un cos actua una força $\vec{F}$ causant una acceleració $\vec{a}$, respecte d'un observador inercial. Si ens agafem a aquest cos i volem seguir fent d'observador, serem no inercials S_{NI} amb $\vec{a}_S = \vec{a}$.

Lògicament no observarem cap acceleració en el cos malgrat estar afectat per una força $\vec{F}$. També li actua la força d'inèrcia $\vec{F}_I$ (vegeu la figura 2)!

De tota manera, la $\vec{F}_I$ tampoc no ens soluciona res del nostre cas, com veurem d'aquí una mica. El problema no és aquest. **Som lliures de fer física des d'un observador inercial o des d'un de no inercial, sempre que escrivim bé les equacions.** Òbviament sempre és més senzill fer-ho utilitzant un observador inercial i és aquest el que convé que sigui sempre utilitzat per l'estudiantat. En aquest sentit no és aconsellable que un estudiant s'observi (*físicament*) a ell mateix mentre viatja per una muntanya russa! Malgrat tot, voldrà trobar una explicació a les sensacions rebudes... Podem donar aquesta explicació més fàcilment des d'un sistema inercial.

La relativitat del moviment

La trajectòria dels objectes és relativa a l'observador. Aquí en tenim un parell d'exemples. En el primer cas (figures 3 i 4), un camió viatja a velocitat constant. Es llença una pilota des del camió. Tant l'observador del camió com el del terra són inercials, però observen trajectòries notablement diferents.

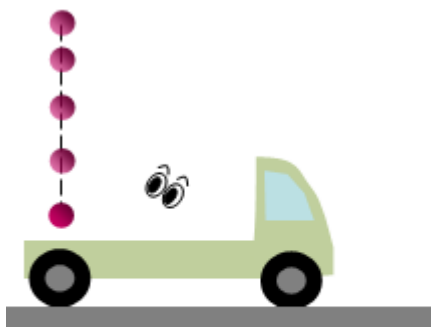


Fig 3: vist des del camió la trajectòria d'una pilota llançada verticalment és recta.

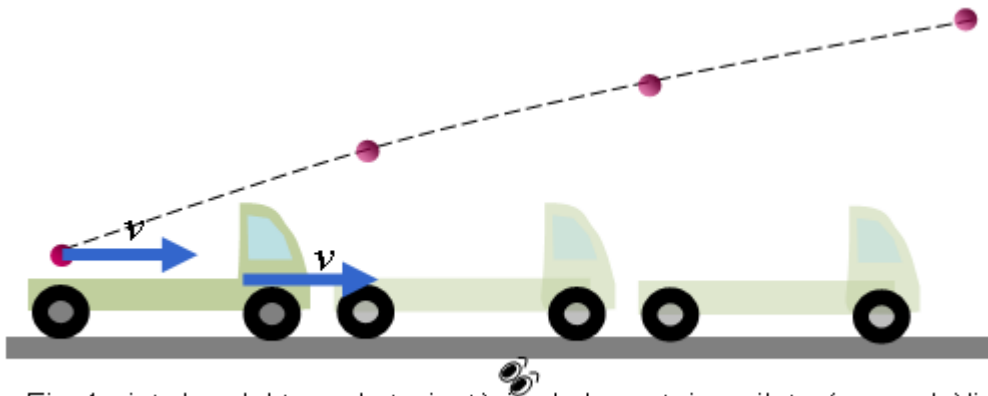


Fig 4: vist des del terra la trajectòria de la mateixa pilota és parabòlica.

En el segon cas (figura 5) un cotxe, després d'anar per una recta, pren un revolt a velocitat de mòdul constant. La casset que hi ha a sobre del tauler llisca respecte d'aquest. Segons l'observador del cotxe (no inercial), la casset fa una trajectòria més o menys recta i accelerada cap a la seva dreta. Una gavina vola en la direcció de la recta, s'atura un moment sobre la corba (observador inercial) i observa des de dalt (el cotxe és descapotable!) que la casset fa una trajectòria recta i amb velocitat uniforme.

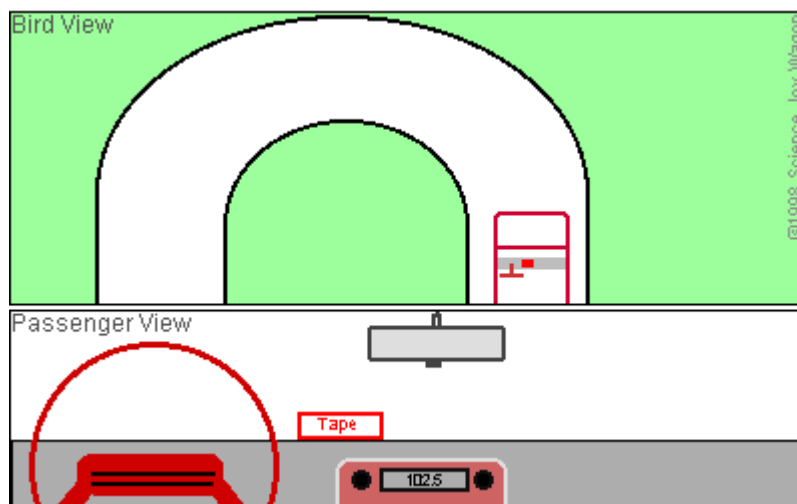


Fig 5: Un cotxe que pren un revolt. A sobre el tauler porta una casset.

El que és notable és que, en el primer cas, tan l'observador del camió com el de terra aplicaran la mateixa llei de moviment de Newton, $m\vec{g} = m\vec{a}$. Els dos observadors són inercials. En canvi, en el segon cas, l'observador del cotxe hauria d'aplicar una llei de moviment que tingués en compte que no es tracta d'un observador inercial. Aquest observador no només es trasllada sinó, que també gira. La seva llei de moviment (per a descriure el moviment horitzontal) serà francament enrevessada, encara que les forces externes (no inercials) siguin nul·les! Res a veure amb la senzillesa de la llei de moviment d'un observador inercial qualsevol, sobretot tenint en compte que les forces externes son nul·les: $0 = m\vec{a}$.

No és l'argument existencialista el que ens porta a fer servir sistemes inercials. L'argument és de senzillesa. A la física li costa molt discutir sobre temes absoluts. Li agrada mantenir-se en el debat constant. És així com sorgeixen noves idees. Tinguem en compte que hi ha un corrent de pensament (principi de Mach: http://en.wikipedia.org/wiki/Mach's_principle^W) que associa les forces de l'inèrcia a la interacció deguda al moviment relatiu respecte de la resta de l'univers. Vindria a dir que si no tinguéssim en compte la resta de l'univers, la casset de l'exemple anterior seguiria tranquil·lament al lloc on la deixat el conductor malgrat estigui en ple revolt! Què diria la gavina en aquest cas? Bé... sortosament tenim la resta de l'univers!

Un model de cos

Per poder continuar, construirem un model de cos (del nostre cos) que tingui prous elements com per analitzar el pessigolleig, tot mantenint un grau alt de simplicitat. En la figura 6 podem veure aquest model. Dues partícules estan unides per una molla. Cada partícula té una massa diferent, per si de cas. Una molla sense massa uneix aquestes dues partícules. Podem pensar que la molla modelitza el nostre estómac que l'uneix a la resta del cos.

La força que fa la molla sobre les partícules és (els signes estan referits a la figura 6)

$$F_k = -k(L - L_0)$$

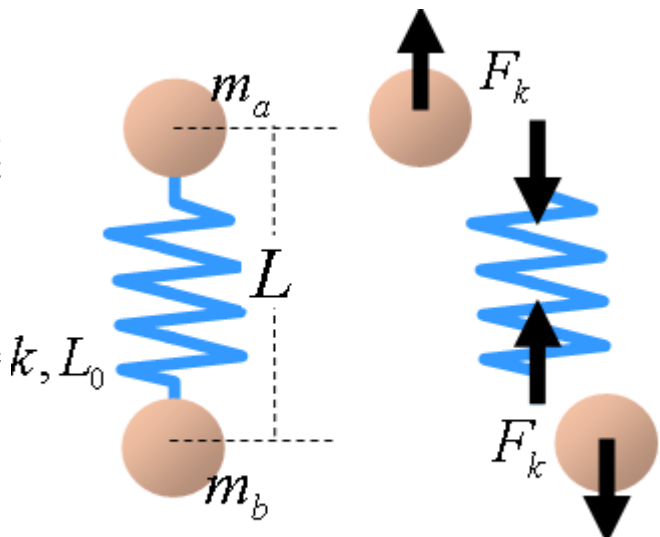


Fig 6: model de cos per analitzar les forces que l'afecten.

essent L_0 la seva longitud natural i k la constant elàstica. Per una molla amb massa aquesta llei val tan si la molla està en repòs o si està en moviment uniforme. També val si la molla es mou acceleradament i no te massa ! Això últim ens interessa per tal de simplificar el problema.

Aquest model de cos ens permetrà identificar les sensacions internes que sofrem amb les forces elàstiques (internes!) del nostre cos. Essencialment, en el nostre model, hem d'analitzar en cada cas la força de la molla, o si ho preferim, els canvis de llargada que sofreix. Les forces que molts cops atribuïm a l'inèrcia són les forces elàstiques que aguanten unes parts del cos amb les altres. Vegem alguns casos típics.

La situació "normal"

Per començar, simularem la situació en que ens trobem normalment quan toquem de peus a Terra (figura 7). És remarcable el fet que, en aquesta situació que anomenem normal, no només estem sotmesos a la força pes, sinó que també estem sotmesos a la normal!

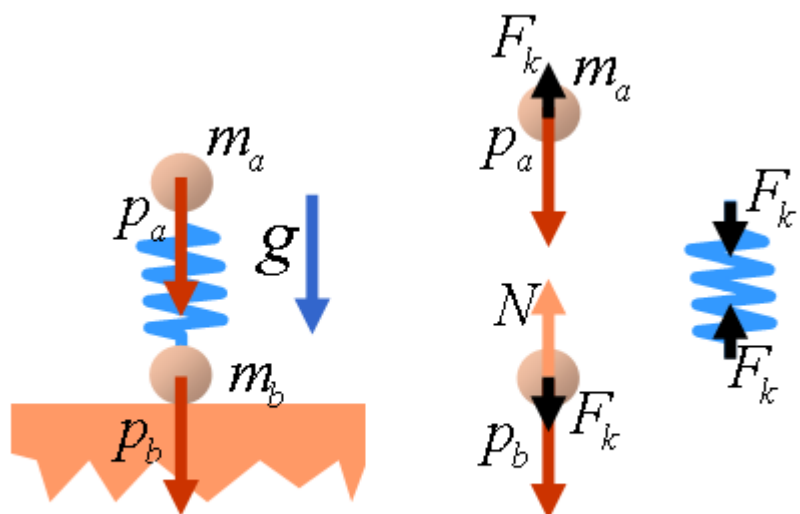


Fig 7: el model de cos a sobre un terra. Al costat les forces que actuen sobre cada part del model.

Vegem que la longitud de la molla no és la natural. Podem dir que "notem que pesem". Ara, com que hi estem tan acostumats, no li donem més importància.

$$F_k = p_a \Rightarrow L = L_0 - \frac{m_a g}{k}$$

Caic lliurement

Des del terra del cas anterior ens llencem en caiguda lliure, és a dir, ens desfem de la normal, tal com es veu en la figura 8. Pensem que inicialment la longitud de la molla és la del cas anterior. Per evitar complicacions innecessàries podem introduir un fregament viscos a la molla per tal que no vagi oscil·lant tota l'estona. Així al cap de ben poc d'iniciar la caiguda el cos sencer deixa de vibrar i es mou com un tot amb la mateixa acceleració g . És clar que ara

$$F_k = 0 \Rightarrow L = L_0$$

és a dir, notem "que no pesem" però que el nostre cos s'altera doncs a sofert un estirament respecte el cas anterior de

$$\Delta L = \frac{m_a g}{k}$$

Si no haguéssim passat per la situació "normal" no notaríem absolutament res: ens semblaria que no ens actua absolutament cap força sobre nosaltres!

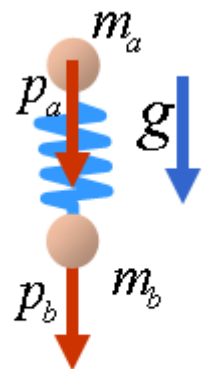


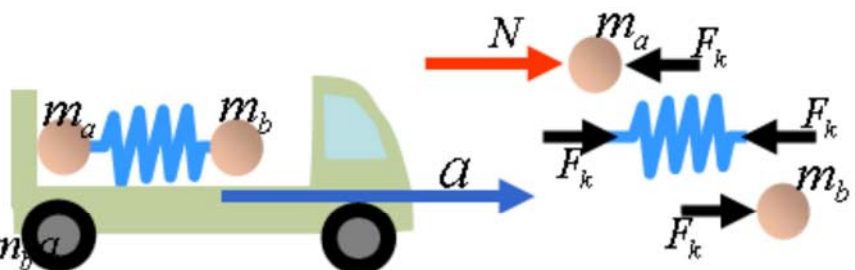
Fig 8: el model de cos en caiguda lliure.

M'acceleren...

Essencialment tenim dues maneres d'accelerar un cos: empènyer-lo per darrere o estirar-lo per davant.

M'empenyen

En aquest cas



$$F_k = m_b a \Rightarrow L = L_0 - \frac{m_b a}{k}$$

Fig 9: el model de cos és accelerat empès per un camió.

és a dir, ens encongim respecte de la longitud natural, $\Delta L = -\frac{m_b a}{k}$.

M'estiren

Ara

$$F_k = m_a a \Rightarrow L = L_0 + \frac{m_a a}{k}$$

Fig 10: el model de cos és accelerat estirat per un camió.

és a dir, ens estirem respecte de la longitud natural $\Delta L = \frac{m_a a}{k}$

Em fan voltar uniformement en absència de gravetat...

Novament, hi ha dues maneres de concebre aquest moviment

Amb una corda

$$\left. \begin{aligned} F_k &= m_b a_c \\ a_c &= R \omega^2 \end{aligned} \right\}$$

$$\Rightarrow L = L_0 + \frac{m_b R \omega^2}{k}$$

En aquest cas, i com podem esperar, el cos se'ns estira.

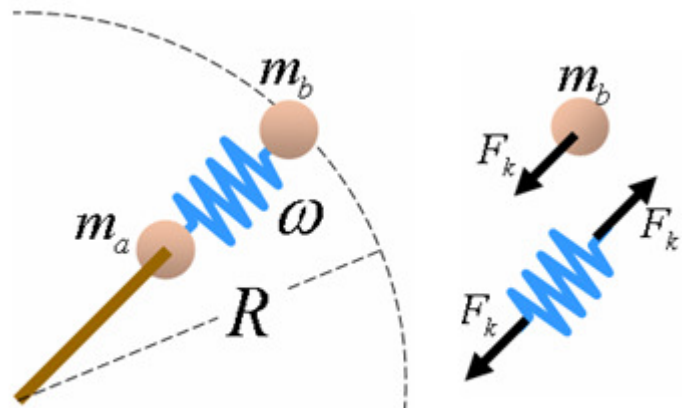


Fig 11: el model de cos en moviment circular uniforme.

Amb un terra

$$\left. \begin{aligned} F_k &= m_a a_c \\ a_c &= (R - L) \omega^2 \end{aligned} \right\}$$

$$\Rightarrow L = \frac{kL_0 - m_a R \omega^2}{k - m_a \omega^2}$$

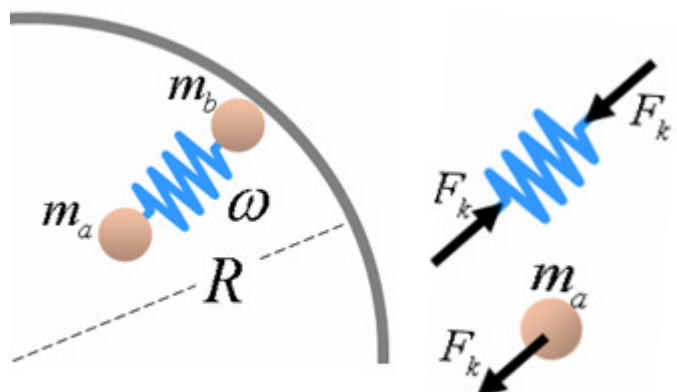


Fig 12: el model de cos en moviment circular uniforme ara el que el belluga és un terra circular

ara, és clar, ens encongim.



Xavier Jaén

Professor de física a l'ETSEIB de la Universitat
Politécnica de Catalunya(UPC).

Adreça electrònica: Xavier.Jaen@upc.edu

Pàgina web: <http://baldufa.upc.es/xjaen>