



Rec. per a treballs
de recerca

CORBANT L'ESPAI-TEMPS AL SOTERRANI

John Walker

Basat en un treball de John Walker en que s'explica com podem observar directament l'atracció gravitatòria entre masses d'escala humana, Ramon Sala (professor de física i matemàtiques de batxillerat a l'escola Súnion de Barcelona, correu: rsala@sunion.net) n'ha fet una traducció adaptada.

Introducció

Aquesta és una adaptació del recurs *Bending Spacetime in the Basement* (de l'autor John Walker, lloc <http://www.fourmilab.ch/gravitation/foobar>, visitat el 16 de febrer de 2007), on, amb una clara voluntat divulgativa i no exempta de sentit de d'humor, s'explica una experiència per observar la gravitació entre cossos "petits". En traduïm una part, la que fa referència a la reproducció de l'experiència de Cavendish amb la balança de torsió, pel seu interès i per la senzillesa de la seva realització.

Deixem de banda, en la traducció, la part d'introducció sobre la gravitació, altrament força interessant. Sobre la mateixa experiència de Cavendish, ens centrem en la realització de l'experiència concreta.

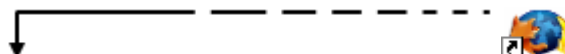
Comentaris al recurs

Com es podrà comprovar, aquesta experiència és fàcilment reproduïble pel fet que tant els recursos materials com el disseny experimental són extremadament senzills d'assolir. La seva simplicitat la determina el fet que no pretén fer mesures, sinó només observar el fenomen gravitatori entre "petits cossos". Aquest fet ens sembla important atesa la dificultat conceptual que suposa entendre que la gravitació afecta tots els cossos i no només és un fenomen que es produeix entre la Terra i objectes propers o entre planetes i estels. De ben segur que qualsevol professor de batxillerat sabrà adaptar-la a la seva realitat i ampliar-ne les funcionalitats.

Per les característiques esmentades anteriorment és un recurs altament interessant per proposar-lo com a tema de treball de recerca al batxillerat.

Nivell educatiu

En principi a 2n de batxillerat per a física. Però és una experiència que podria realitzar-se en qualsevol nivell d'ESO on es faci una introducció a la força de la gravetat.



Assumptes de gravetat

Aquesta pàgina presenta un experiment de "ciència de soterrani" que mostra la universalitat de la gravitació tot demostrant l'atracció gravitacional entre objectes palpables a escala humana. L'experiment només utilitza deliberadament objectes d'ús comú de manera que qualsevol persona interessada pugui fer-lo. La teoria general de la relativitat d'Einstein, publicada el 1915, explica la gravitació com una curvatura de l'espai-temps creada per la matèria i l'energia. Per tant, en comprovar que qualsevol objecte de l'univers atrau qualsevol altre, estarem corbant l'espai temps al soterrani.

La balança de torsió

El que estem buscant és un dispositiu que respongui només a les diferències d'atracció gravitatòria cancel·lant la més intensa atracció gravitatòria de la Terra. No cal anar gaire lluny; només cal tenir una versió modificada del mateix dispositiu utilitzat per Henry Cavendish el 1798 per fer el primer

mesurament de la constant de la gravitació universal, G . Des d'aleshores la balança de torsió ha estat l'eina primària per a mesurar la constant de la gravitació universal i també el principi d'equivalència, que estableix que tots els cossos experimenten la mateixa força gravitatòria independentment de la seva composició. La teoria general de la relativitat d'Einstein mostra que això és una conseqüència fonamental de l'estructura de l'espai-temps.

Les versions més depurades de les balances de torsió han mesurat la constant de la gravitació universal amb una precisió d'una part per milió i han confirmat el principi d'equivalència amb una precisió d'11 xifres. Això requereix un extraordinàriament refinat i delicat aparell de laboratori i un disseny experimental acurat en el qual els múltiples efectes subtils puguin ser compensats o cancel·lats. Nosaltres, però, no pretenem mesurar res; només estem interessats en observar la gravitació universal. Això ens permet de simplificar la balança de torsió de manera que puguem muntar-la al soterrani.

El principi de la balança de torsió és extremadament senzill. Cal penjar un braç de balança horitzontal d'una fibra elàstica vertical. A cada extrem del braç cal situar-hi masses molt més denses que el material de què està fet el braç i que respondran a la força gravitatòria. Quan tot plegat està muntat, la força de gravitació cap avall (el pes) actua de la mateixa manera sobre cada component. El braç de balança és aleshores lliure per a rodar sense cap impediment provocat per l'atracció gravitatòria de la Terra. El sistema està limitat només per la fricció de l'aire i per la força de torsió de la fibra de suport (la resistència a ser torçat). Aleshores podem situar masses test prop dels extrems del braç de la balança i observar si l'atracció gravitacional entre aquestes i les dues masses al braç provoquen que el braç es mogui. Quan es mesura la constant de la gravitació cal calibrar amb precisió la força de torsió de la fibra, però per observar el fenomen només cal garantir que la fibra sigui prou flexible com per permetre que la força de la gravitació pugui superar la resistència a la torsió.

A la pràctica, el braç de balança és tan lliure per moure's que una vegada qualsevol força el posa en moviment, oscil·la amb un període molt llarg, girant i girant o rebotant endavant i endarrere si topa amb algun objecte. Per evitar això caldrà amortir el sistema de manera que l'energia cinètica adquirida per la barra sigui ràpidament dissipada. Bé, no hi ha res més amortidor que l'aigua, i per tant afegirem un fre d'aigua al braç que girarà dins d'un dipòsit fix. La fricció resultant del moviment de la balança és més gran que la resistència de l'aire i que les pèrdues per fricció a la fibra, i això reduirà les oscil·lacions a un grau tolerable.

La balança gravitacional

*“El temps ha passat” digué el Hacker,
“per a parlar de massa coses:
de l'escuma de plàstic, i de les llaunes de tonyina,
dels blocs de plom i de la corda.
I com la força de la gravetat farà que la balança balli.”*

Bé, aquí tenim el sofisticat aparell d'alta tecnologia i de “gran ciència” que farem servir per a observar la subtil curvatura de l'espai-temps (fig 1). Una escala d'alumini serveix de suport sobre el qual es penjarà la balança. Un fil de niló de pescar és nuat a la meitat d'una de les barres de suport de la part del darrere de l'escala. Utilitzar una escala d'alumini o un estri movable similar, ens permetrà de situar la balança de torsió al mig de l'habitació on fem l'experiència. Això és important ja que



nosaltres intentem flexionar l'espai-temps al soterrani, en aquest cas en un magatzem situat per sota del nivell del carrer. El nivell del terra està situat **45 cm** per sobre de la finestra de ventilació, que es pot veure a la part superior dreta de la figura. Una habitació al soterrani és ideal ja que minimitza les variacions de temperatura i les vibracions que podrien pertorbar el braç de la balança. Les dues parets de l'habitació que es veuen a la figura són de sòlida pedra calcària, de tal manera que, si situem la balança prop de les parets, el camp gravitatori de tota la roca pot emmascarar el de les dues masses de prova i la balança quedarà afectada pel gradient gravitatori quan una de les masses de la balança apunti cap a una de les parets i, en conseqüència, la balança quedaria menys afectada per les masses test. Amb la barra al mig de l'habitació, la "influència de marea" de les masses de la paret i de la roca serà reduïda a un valor negligible. La canonada a la paret a la dreta és un radiador de calefacció. Va ser desactivat per evitar corrents d'aire que poguessin pertorbar el moviment del braç de la balança.

El braç de la balança i la baga de suport

El braç de la balança és fet d'una barra d'escuma de plàstic (material de molt baixa densitat i d'una certa resistència mecànica: porexpan o similar) de **5 × 5 × 30 cm**, tallada d'un bloc de **5 cm** de material d'embalar amb una navalla Swiss Army. La barra és mantinguda a la baga de suport per fricció i pel solc provocat pel pes de les masses col·locades als extrems. D'aquesta manera, és més senzill ajustar la barra que si estigués enganxada amb cola al suport.

La fibra del suport

La fibra de monofilament de niló que aguanta el braç es pot veure lleugerament a la part superior de la figura 2; està nuada a la baga de suport. El fil de pescar fabricat al Japó és molt bo (una capacitat de **3 kg** aproximadament). Un rotlle de 300 metres costa uns 9 dòlars aproximadament. Les masses que fan que la barra giri quan la força gravitacional hi actua, són ploms d'immersió utilitzats pels submarinistes, cadascun dels quals té una massa de **169 g**. Dos estan situats a cadascun dels extrems de la balança i fan un total de **676 g**. Cal assegurar-se de situar

les dues masses als dos extrems del braç simultàniament, perquè així no bolcarà; després cal ajustar la seva posició per aconseguir que el braç quedi horitzontal. El filament de niló és molt elàstic: quan col·loqueu les masses al braç, el filament s'estira i pot arribar molt a prop del terra. Potser us caldrà ajustar els nusos al suport o cargolar els fils de la baga tal com he fet jo mateix, per aconseguir l'alçada desitjada. Finalment, quan deixem el sistema en llibertat, cal un cert temps per deixar que la fibra es descargoli a causa del temps que ha passat torçada al rodet. És bo deixar que el braç pengi durant un parell de dies lliurement per permetre que aquestes tensions inicials desapareguin abans de començar l'experiment.

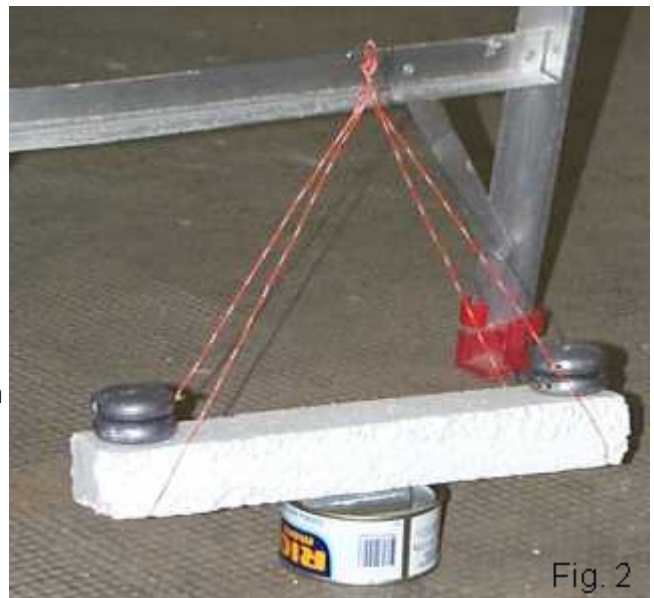


Fig. 2

El fre d'aigua

L'alçada del braç és important, ja que cal que encaixi adequadament amb el fre d'aigua. Cal un fre perquè, si deixem que el braç es mogui lliurement, només la fricció amb l'aire i les minúscules pèrdues amb la fibra pot amortir el moviment. Això provoca que el braç balancegi incessantment, cosa que emmascara la influència de la gravitació. L'aigua dissipa l'energia d'aquestes oscil·lacions indesitjades de la mateixa manera que ho fa un amortidor de xocs d'automoció. El moviment de la làmina fa treball sobre un líquid viscos, aigua en aquest cas, hi diposita energia i l'escalfa.



Fig. 3



Fig. 4

El fre d'aigua consisteix en una làmina que es projecta cap avall des de la part inferior del braç (en aquest cas, una peça d'alumini tallada amb tisores d'una safata de menjar preparat), adherida amb cola en un solc tallat a la part inferior del braç (fig. 3). La làmina es projecta dins d'un dipòsit (una llauna de tonyina) ple d'aigua (fig. 4). Com més viscos sigui el fluid, com l'oli d'amanir, més amortiment i menys oscil·lacions provoca que en el cas de l'aigua. Jo he optat per l'aigua perquè és més fàcil de netejar en cas d'inevitable bolcada.

Si hagués de tornar a construir el braç, utilitzaria una làmina més llarga i més estreta i/o un dipòsit d'aigua més gran i profund. Si la làmina és només lleugerament més petita que el diàmetre del dipòsit, cal anar amb compte que la làmina i el dipòsit estiguin centrats amb el braç. D'una altra manera la làmina tocaria les parets del dipòsit i congelaria el moviment del braç, ja que la força de fregament és molts ordres de magnitud més gran que la força que pretenem que faci moure el braç. El dipòsit d'aigua pot ser tan gran com es vulgui mentre no interfereixi en la situació de les masses de prova; com més gran sigui, menys caldrà preocupar-se pel fet que estigui centrat amb precisió.

Les masses de prova i els suports

Uns blocs de plàstic aguanten les masses de prova de manera que el seu centre de gravetat estigui a la mateixa altura que les masses dels extrems de la balança maximitzant-ne l'atracció. El plàstic també evita que les masses tendeixin a rodar. El rectangle negre, una estoreta de ratolí d'ordinador invertida, fa de fons per superposar-hi la mesura del temps amb la video-càmera fent-lo més llegible (fig. 5)



Fig. 5

Cal utilitzar els objectes més densos que es puguin obtenir per a les masses de prova i per a les masses als extrems de la balança: peces de plom de submarinisme, boles d'acer, semiesferes de plutoni, etc. La densitat és important, ja que la força de la gravetat depèn de la inversa del quadrat de la distància entre els centres de masses dels dos objectes. Amb una substància densa, el centre de masses és més a prop de la superfície i per tant es podrà aconseguir que les masses estiguin més a prop i augmentar, per tant, la seva influència gravitatòria. Per exemple, considereu dos parells d'esferes d'un quilogram, la primera feta de plom (densitat $11,3 \text{ g/cm}^3$) i l'altra de fusta de pi (densitat $0,43 \text{ g/cm}^3$ aproximadament), situades de manera que les superfícies de les dues esferes estiguin a una distància d'**1 cm**. L'esfera de plom té un radi de **2,76 cm**. Per tant, els centres de les masses estan separats per $1 + 2,76 \cdot 2$ és a dir **6,52 cm**. Una esfera d'**1 kg** de fusta de pi té un radi de **8,22 cm**, cosa que fa que la distància entre els dos centres de massa de les dues esferes de fusta seria de **17,44 cm**. Fent el quadrat de la relació d'aquestes distàncies es pot veure que la força de la gravetat entre les esferes de

plom és més de 7 vegades la de les esferes de fusta. Com que l'atracció és lineal amb la massa però inversament proporcional al quadrat de la distància, s'aconsegueixen millors resultats amb masses petites però d'elevada densitat que amb masses grans de menor densitat.

És millor utilitzar materials no magnètics, com per exemple el plom, per a les masses als extrems de la balança. Les forces amb què treballem són tan petites que si utilitzem, per exemple, boles d'acer, acabaríem reinventant la brúixola en comptes de detectar la força de la gravetat.

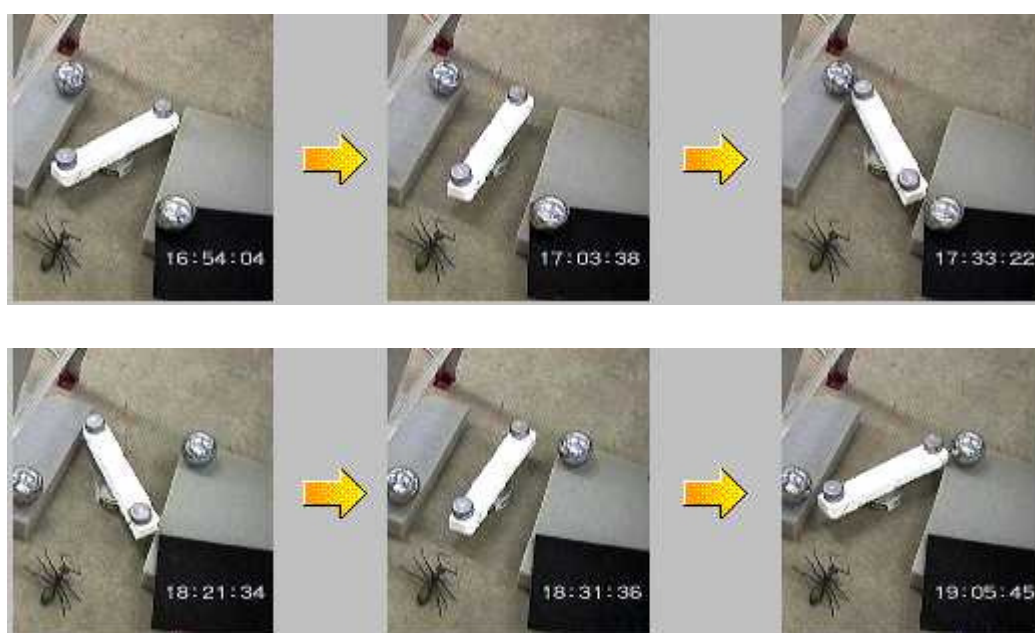
La càmera espia

Una càmera BSR model 500 de vigilància em permet observar l'experiment mentre està en funcionament. La càmera de vídeo Sony que faig servir habitualment no em genera un senyal de vídeo mentre està gravant; per tant, no puc fer servir aquest dispositiu per monitorar el què està passant. El moviment dins de l'habitació mentre l'experiment s'està desenvolupant, genera corrents d'aire en obrir i tancar la porta i en caminar que ens pot desmanegar les coses. La càmera BSR i un monitor permeten mantenir el control a distància del que està passant d'una manera no intrusiva. Vaig construir una interfície càmera-monitor amb un cable RJ-45, de manera que puc col·locar dues càmeres en qualsevol lloc i controlar-ho també des de qualsevol lloc.

La càmera és sensible a infraroig i inclou LED d'infraroig per il·luminar objectes propers; també té un micròfon connectat a l'altaveu del monitor. Això la fa ideal per a pares angoixats que volen controlar el son dels seus nadons. Als caçadors de l'espai-temps els permet de veure el moviment de la balança sense perturbacions tèrmiques degudes a la presència de làmpades incandescents o il·luminació directa del sol. El lloc on vaig fer l'experiment té il·luminació per fluorescents i no vaig observar efectes que perturbessin l'experiment quan el vaig fer amb il·luminació. Per descomptat, si l'habitació està equipada amb aquest miracle de baixa tecnologia anomenat finestra, no cal que us atabaleu amb tota aquesta complexitat.

Gravitació en acció

Els vídeos mostren la balança de torsió responnent al camp gravitatori generat per dues boles de petanca de **740 g**.



A la figura 5 podem veure l'angle de la càmera utilitzat en els dos vídeos. Tots dos comencen amb la balança estacionària en contacte amb una de les boles o del bloc de plàstic que les aguanta. Les boles són seguidament desplaçades a les cantonades oposades, des d'on atrauen les masses de plom situades als extrems del braç. El braç, aleshores, gira lentament al principi i després a velocitat creixent

a causa de l'augment d'atracció gravitacional provocat per la disminució de distància entre les masses. El braç oscil·la quan topa amb l'altre extrem i, finalment, després d'una sèrie de cada vegada més petites oscil·lacions perquè el fre d'aigua l'energia cinètica, arriba al repòs en contacte amb la bola o suport més propers. Aquest és l'estat de mínima energia al qual arriba sempre el braç al final de l'experiment.



John Walker

Creador de Fourmilab Switzerland

Pàgina web: <http://www.fourmilab.ch>