8. Mechanika II. (Impulzus, forgómozgás)

Tartalom

1. Az impulzus-megmaradás tétel érzékeltetése "ágyús" kiskocsival 2
2. Ütközési kísérletek 3
   a) Rugalmatlan ütközés. Játékpisztoly-lövedék kezdősebességének mérése 3
   b) Ütközési kísérlet ingás golyósorral (Newton bölcsője) 4
   c) Impulzus-megmaradás szemléltetése kiskocsik ütközése során 5
3. Forgómozgás dinamikai vizsgálata abroncs-készülékkel (mérőkísérlet) 6
4. Kísérletek a centrifugális erőre 9
   a) Rugalmas abroncs forgásakor fellépő deformáció bemutatása kézi forgatógéppel 9
   b) Fordulatszám-szabályozó modell működtetése kézi forgatógéppel 10
   c) Forgó pohárban kialakuló folyadékfelszín megfigyelése 10
   d) Söröspohár függőleges síkú forgatása váll körül 11
5. Kísérletek az impulzusmomentum tételre 12
   a) Csuklós-karos forgó eszköz tehetetlenségi nyomatéka és impulzusmomentuma közötti összefüggés demonstrálása. ("Piruett eszköz") 12
   b) Forgózsámolyos kísérletek 12
6. Kísérletek erőmentes- és súlyos pörgettyűvel 14
   a) Erőmentes pörgettyű 14
   b) Súlyos pörgettyű 15

1. Az impulzus-megmaradás tétel érzékeltetése "ágyús" kiskocsival

A kísérlet célja

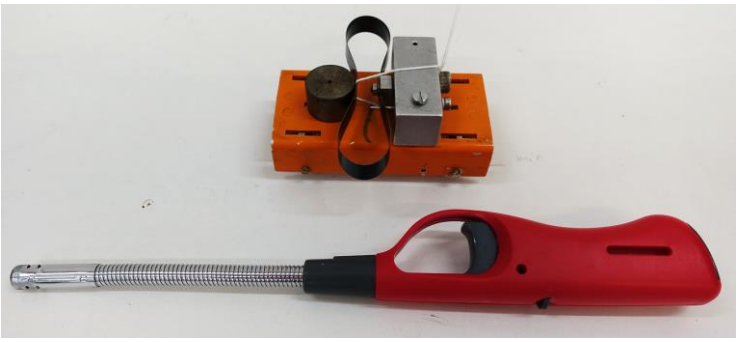
Impulzusmegmaradás egyszerű (bevezető) szemléltetése.

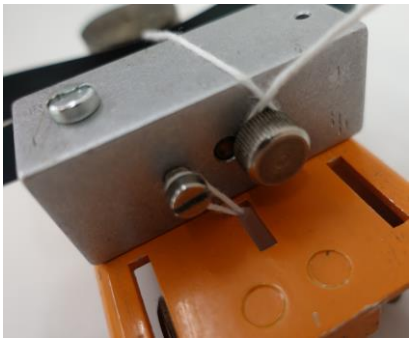
Szükséges anyagok, eszközök

- ágyú és lövedék (fémhenger)
- spárga vagy cérna
- elektromos öngyújtó (lsd. ábra)

Leírás

Ha a külső erők eredője zérus, akkor a rendszer impulzusa (lendülete) nem változik: állandó marad. A tételt könnyen guruló kiskocsira szerelt rugós kilövő (ágyú) segítségével szemléltethetjük.





Feszítsük meg a játékágyú rugóját, rögzítsük spárgával, töltsük be a lövedékként szolgáló fémhengert, és égessük el a spárgát. A 1övedék kirepül, a kocsi ellenkező irányba gördül. Figyeljünk a kilövésnél, hogy a kiskocsi, vagy a lövedék ne találjon el senkit, és ne essen le az asztalról.

Kísérlethez kapcsolódó kérdések

- Gyűjtsünk össze 1-2 hétköznapi jelenséget, vagy technikai alkalmazást, melyekben az impulzusmegmaradás fontos szerepet játszik.

Módszertani kiegészítések

- Érdemes a kísérlethez kapcsolódóan vicces” és/de szemléletes videókat bemutatni.

Ágyú és lövedék

Kezdő sportlövő

- Ha nem ál rendelkezésünkre az ágyús kiskocsi, akkor hasonló kísérlet végezhető el egy golyó és ruhacsipesz segítségével (lásd: 5.18)
- Általános iskolai szinten érdemesebb a kísérleti tapasztalatot Newton III., az erő-ellenerő törvényével magyarázni, mivel kevesebb absztrakciót igényel. Ez kellően pontos is, hiszen az impulzusmegmaradás törvényéhez ennek felhasználásával jutunk el.

2. Ütközési kísérletek

a) Rugalmatlan ütközés. Játékpisztoly-lövedék kezdősebességének mérése

A kísérlet célja

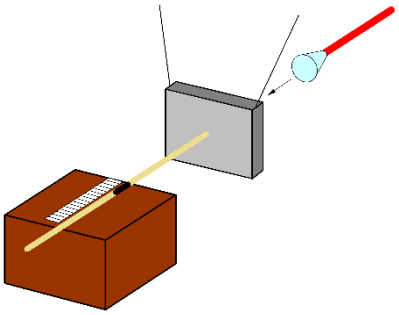
Tökéletesen rugalmatlan ütközés egy gyakorlati alkalmazásának bemutatása

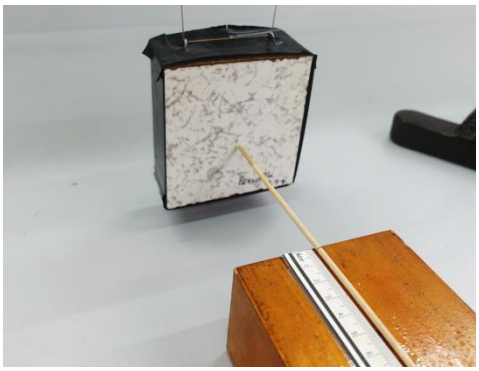
Szükséges anyagok, eszközök

- tapadókorongos műanyag játékpisztoly
- ismert tömegű, sima felületű inga, hosszú zsineggel bifilárisan állványra felfüggesztve
- hurkapálca filccel megjelölve az elmozdulás méréséhez
- megfelelő magasságú támasz (fahasáb), amin a hurkapálca akadálytalanul elcsúszhat, és amelyre mm-es beosztású papír mérőszalagot ragaszthatunk
- stopper

Leírás

A tapadókorongos játékpisztoly-lövedék — ha sima felületű tárgynak ütközik — rendszerint a tárgyra tapad. Ekkor a lövedék és a tárgy ütközése tökéletesen rugalmatlan. A lövedék sebességét „ballisztikus ingával" könnyen megmérhetjük. Esetünkben ballisztikus ingaként egy bifilárisan (két szállal) felfüggesztett fahasáb szolgál. A kísérleti összeállítást az ábra mutatja.





A bifilárisan felfüggesztett inga mögé néhány cm távolságba rakjuk le a támaszt, és erre fektessük a hurkapálcát úgy, hogy az hátulról éppen érintse az ingatest középpontját. A játékpisztollyal elölről, az inga lapjára merőlegesen lőjünk, a hasáb közepét (tömegközéppontját) érdemes megcélozni. (A célzáskor a pisztolyt tartsuk pár centiméterrel távolabb az ingától, mint amilyen hosszú a tapadókorongos lövedék szára!) Jó célzás esetén a tapadókorong megtapad az ingán, és az inga hátra lendül anélkül, hogy közben billegne.

Feladatok

- Mérjük le, mennyire tolta hátra a kilendülő ingatest a hurkapálcát a támaszon! A mérést ismételjük meg háromszor, és ezek átlagával számoljunk!
- Stopperrel mérjük meg az inga 10 lengésének idejét (a rátapadt lövedékkel együtt) és határozzuk meg a lengésidőt!
- A lengésidő és a maximális kilendülés mért értékeinek felhasználásával határozzuk meg a harmonikus lengés maximális sebességét! (A csekély mértékben kilendülő inga mozgása harmonikus rezgőmozgásnak tekinthető.)
- A rugalmatlan ütközésre érvényes lendületmegmaradási törvényt felhasználva számítsuk ki a tapadókorongos lövedék sebességét az ütközés előtt!

Kísérlethez kapcsolódó kérdések

- Miért kéri a feladat, hogy a rátapadt lövedékkel együtt mérjük a lengésidőt, hiszen egy inga lengésideje elvileg független a tömegtől (lásd. 5.26)?

Módszertani kiegészítések

- Érdemes ezt a feladatot egy problémafelvetéssel kezdeni. „Milyen ötletetek van, hogy lehetne megmérni egy kilőtt lövedék (pl. ennek a játékpisztoly tapadókorongjának) sebességét?” Természetesen ez a módszer nem fog a gyerekek eszébe jutni. Valószínűsíthető, hogy a video elemzést javasolják. Ekkor érdemes azt is elvégezni/megpróbálni.
- A kísérlet még látványosabb fajtája, amikor légpuska lövedékének sebességét határozzuk meg ezzel a módszerrel. Ha légpuska lövedékkel szeretnénk kivitelezni, akkor az ingatest tömegét és az inga hosszát érdemes megnövelni, valamint az ingatestre legalább 2 cm vastag parafa pogácsát rakni. Ha keményebb testre lőnénk, akkor a golyó könnyen lepattanhat, ami balesetveszélyes (ráadásul az elmélete is más).

b) Ütközési kísérlet ingás golyósorral (Newton bölcsője)

A kísérlet célja

Impulzus-megmaradás egyszerű, de mégis érzékletes bemutatása ingasorral.

Szükséges anyagok, eszközök

- ingás golyósor (Newton bölcsője)
- cellux

Leírás

Testek tökéletesen rugalmas ütközése esetén az impulzusmegmaradás tétel mellett a kinetikai energia megmaradásának tétele is érvényben van. Ennek szemléltetésére bifilárisan felfüggesztett acélgolyókból álló öttagú ingasort használunk.

Feladat

- Térítsük ki a balszélső ingát, és ütköztessük az ingasorral! Térítsünk ki együtt baloldalra két (vagy három, vagy négy) ingát és ütköztessük a többivel! Fogalmazzuk meg a tapasztalatokat!
- Celluxszal ragasszunk össze két golyót nagyon szorosan és ütköztessük a többivel. Fogalmazzuk meg és magyarázzuk a különbséget az előző kísérlethez képest!

Módszertani kiegészítések

- Diákoknak érdemes lehet feltenni azt az elgondolkoztató kérdést, hogy 2 vagy több golyó kitérítése esetén miért éppen ugyanannyi golyó lendül ki a másik oldalon, s nem kevesebb nagyobb sebességgel?

c) Impulzus-megmaradás szemléltetése kiskocsik ütközése során

A kísérlet célja

Az impulzusmegmaradás törvényének demonstrálása különböző tömegű mozgó és álló, rugókkal, ill. mágnesekkel felszerelt kiskocsik segítségével

Szükséges anyagok, eszközök

- 2 kiskocsi
- sín
- súlysorozat kiskocsikhoz (kék testek, a kocsikra helyezve rögzülnek)
- mágnesek (kis dugóval a kocsikhoz csatlakoztatható)
- laprugók (kis dugóval a kocsikhoz csatlakoztatható).

Leírás és feladatok

Két, tépőzárral ellátott, azonos tömegű kiskocsit helyezzünk el a sínen. Az egyiket álló helyzetben állítsuk a sín közepére, míg a másik kiskocsit lökjük neki az állónak. Figyeljük meg a jelenséget! Változtassuk a kiskocsik tömegét – további súlyok ráhelyezésével – 1:2 és 2:1 ill. 1:3 és 3:1 arányban és ismételjük meg a kísérletet. Figyeljük meg és magyarázzuk a tapasztalatokat.

Mindkét kiskocsit lássuk el laprugóval, majd egyiket helyezzük álló helyzetbe a sín közepére. A másik kiskocsit lökjük neki az állónak. Ismételjük meg a kísérletet 1:2 és 2:1 arányú tömegekkel is. Figyeljük meg és magyarázzuk a megfigyeléseket!

Kísérlethez kapcsolódó kérdések

- Milyen egyszerű magyarázatot adhatunk arra, hogy a tépőzárral összetapadt kiskocsik ütközése miért nem tekinthető teljesen rugalmasnak?
- Milyen megmaradási tételek vannak érvényben a tökéletesen rugalmas és rugalmatlan ütközések során?

Módszertani kiegészítések

- Az itt leírt kísérletsorozat csupán az impulzusmegmaradást szemlélteti. Egyszerű kvalitatív megállapításokat lehet leszűrni belőle. Ezek alapján az impulzusmegmaradást és tökéletesen rugalmas esetben a mechanikai energiamegmaradást be lehet vezetni. Ezt követően érdemes számítási feladatot elvégezni, majd a számítást kísérletileg ellenőrizni. Olyan esetet érdemes választani, melyben nem egyértelmű a kimenetel. Például ütköztessünk egyirányba haladó, laprugóval felszerelt kiskocsikat. A lassabb kétszeres tömegű kocsinak lökjünk neki egy sokkal gyorsabb egyszeres tömegűt. Miután kiszámoltuk az ütközés utáni sebességeket ellenőrizzük kísérlettel! Ha a számításból az jön ki, hogy a kisebb tömegű visszapattan és a kísérlet is azt mutatja, akkor az a diákok számára bizonyítja az elmélet helyességét, emellett az elmélet alkalmazása megmutatja, hogy a törvényeket nem öncélúan fogalmazzuk meg, hanem azért, hogy felhasználjuk jelenségek leírására, a kimenetel meghatározására.
- Számítógépes kiértékeléssel (fénykapu, vagy LabCamera, Tracker, stb) természetesen mérőkísérlet is kivitelezhető ebben a témában, ezáltal bizonyítva az impulzus megmaradást és tökéletesen rugalmas esetben a mechanikai energiamegmaradást. A demonstrációs labor honlapján rengeteg videóelemzésre alkalmas felvétel megtalálható.
- Bár a kiskocsik tömegének növelésére kiválóan alkalmas a készletben található vaslap, sokkal szemléletesebb, ha egymásra pakolunk kiskocsikat, és így növeljük meg tömegüket két- vagy háromszorosra.
- Az ütközés folyamatával nem szoktunk foglalkozni az ütközési kísérletek leírásakor, pedig sokszor megdöbbentő lehet a rugalmas deformáció is.

Golflabda ütközése fallal

Labda ütközése emberi arccal

3. Forgómozgás dinamikai vizsgálata abroncs-készülékkel (mérőkísérlet)

A kísérlet célja

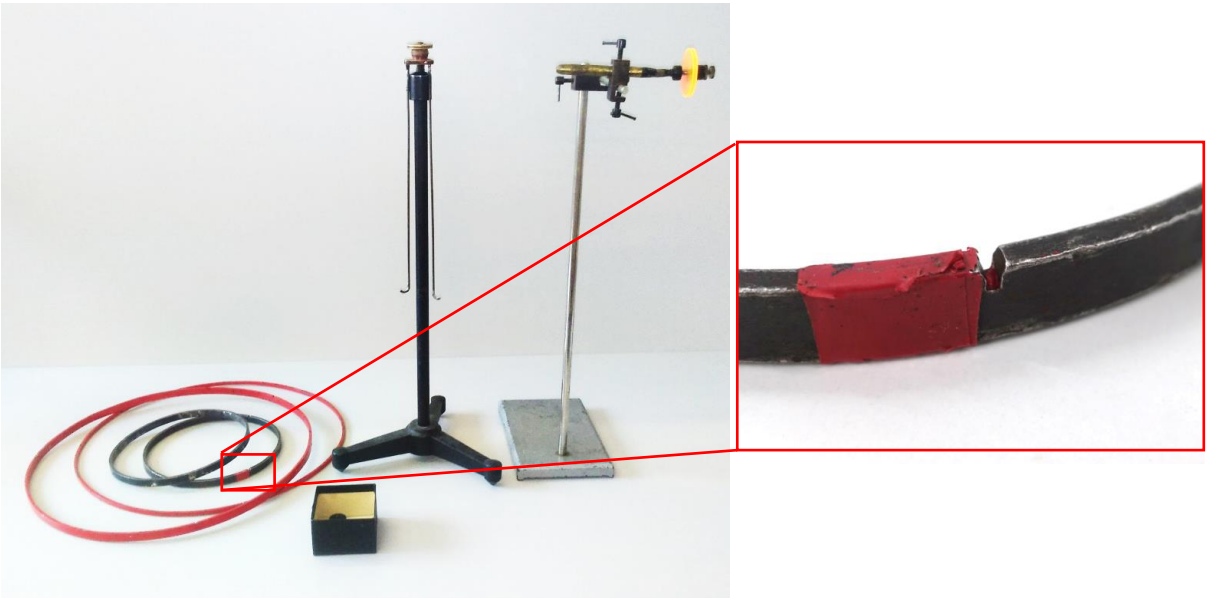
A kísérlet több céllal is rendelkezik. Egyszerűbb esetekben jól szemléltethetjük a forgatónyomaték gyorsító hatását különböző tehetetlenségi nyomatékú testeken. Összetettebb mérési kísérlethez is használhatjuk az összeállítást, ha mért és számított tehetetlenségi nyomaték értékeinket hasonlítjuk össze.

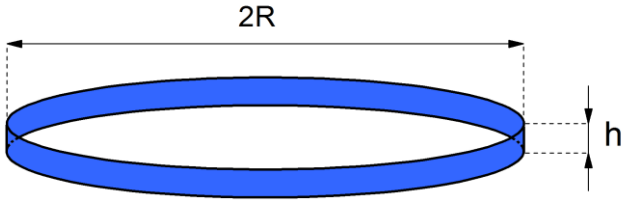
Szükséges anyagok, eszközök

- 4 darab különböző sugarú és tömegű abroncs (kis bevágásokkal)
- háromlábú állvány (tetején tengellyel)
- orsó 3 küllővel, cérnával
- állvány rögzített, könnyen forgó állócsigával
- súlyok (50 g)

Leírás

Az abroncskészülék függőleges tengely körül forgatható egyszerű szerkezet. Állványrúdjának tetején bemélyedés van, ebbe kúposra esztergált végű hengeres, *r* sugarú orsó ültethető. Az orsó peremére három, egymáshoz képest 120°-ban álló, csuklósan rögzített könnyű küllő csatlakozik. A küllőkre abroncs helyezhető.

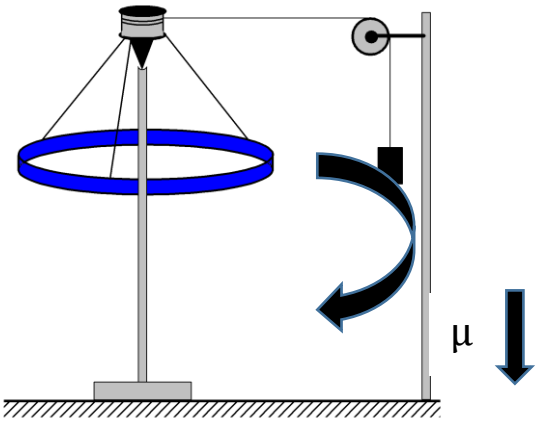




Az eszközhöz négy, azonos vastagságú laposvasból készített abroncs tartozik, melyeken a nagyított ábrán is láthatóan kis bevágások találhatók a küllők beakasztásához. Az abroncsok *R* sugarát, *h* szélességét, ezekből számítható *m* tömegét és *Θ* tehetetlenségi nyomatékát az alábbi táblázat foglalja össze.

	Sugár	Szélesség	Tömeg	Tehetetlenségi nyomaték
1. sz. abroncs	R	h	m	Θ
2. sz. abroncs	2R	h/2	m	4Θ
3. sz. abroncs	2R	h	2m	8Θ

A hengeres orsóra tekert, csigán átvetett fonálra akasztott, μ tömegű test ("nehezék") hatására az abroncs a függőleges tengely körül forgómozgást végez.



Kiegészítés: Az abroncsok belső- ill. külső átmérőjének különbsége kicsi az átmérőhöz képest, ezért szimmetriatengelyükre számított tehetetlenségi nyomatékuk a $\Theta = mR^2$ képlettel határozható meg.

Mérési feladatok

- Helyezzük az R sugarú abroncsot a küllőkre! Terheljük az r sugarú orsóra tekert fonál csigán átvetett végét y tömegű testtel, pl. 50 grammos nehezékkel! A nehezék szemmel láthatóan gyorsuló mozgással süllyed, az abroncs gyorsulva forog.
- Mutassuk meg, hogy a nehezék mozgása egyenletesen gyorsuló (ezáltal az abroncs forgása is egyenletesen gyorsuló)! Ehhez a nehezéket ideális esetben négy különböző s magasságból indítjuk. Magasságonként háromszor megmérjük a süllyedés t idejét, átlagolunk és kiszámítjuk az s/t^2hányadost. Ezek jó közelítéssel egyenlők, mely alátámasztja azt az ésszerű munkahipotézist, hogy a mozgás egyenletesen gyorsuló, a gyorsulás $a = 2s/t^2$. Az adatokat célszerű az alábbi táblázathoz hasonlóan kezelni.

	s (m)	t (s)			$t_{átlag}$(s)	$t^2_{átlag}$ (s^2)	$a = \frac{2s}{t^2}\left(\frac{m}{s^2}\right)$	$a_{átlag}\left(\frac{m}{s^2}\right)$
		1	2	3				
1								
2								

- Számítsuk ki az abroncs tehetetlenségi nyomatékát! Vegyük a gyorsulás átlagértékét ($a_{átlag}$), mely egyben az r sugarú orsó peremének a kerületi gyorsulása is. Ezért az orsó és a vele együtt forgó abroncs szöggyorsulása:

$$\beta = \frac{a}{r}.$$

A fonál végére akasztott nehezék μ tömegéből, az a gyorsulásból a fonalat feszítő F erő, továbbá az orsó r sugarának ismeretében a rendszerre ható M forgatónyomaték - ha a súrlódási erő fékező nyomatékától eltekintünk - kiszámítható:

$$F = \mu(g - a) ill. M = F \cdot r.$$

Végül a forgómozgás dinamikai alapegyenletének felhasználásával az abroncs tehetetlenségi nyomatékát mérési adatinkból kiszámíthatjuk:

$$\Theta = \frac{M}{\beta} = \frac{\mu(g-a)r^2}{a}.$$

Végül mérjük meg az abroncs tömegét és sugarát! Számítsuk ki ezekből az abroncs tehetetlenségi nyomatékát! Hasonlítsuk össze a dinamikai úton kapott eredménnyel!

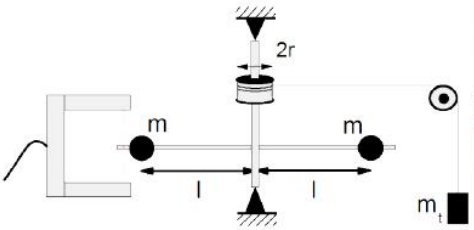
- Cseréljük ki az abroncsot a 2-es, majd a 3-as számúra! Igazoljuk, hogy a tehetetlenségi nyomatéka a 2-esnek 4-szeres, a 3-asnak 8-szoros. Ehhez elég egy magasságon a süllyedési időket lemérni!

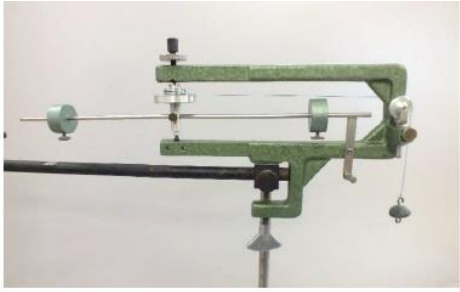
Kísérlethez kapcsolódó kérdések

- Milyen tényezők vezethettek a mért és számított tehetetlenségi nyomaték értékek közötti eltéréshez?

Módszertani kiegészítések

- Az alsó ábrán látható egy, a régi tanszer kereskedelemből jól ismert kísérleti eszköz. A fent leírt méréssorozat természetesen ezzel is elvégezhető. Azzal a különbséggel, hogy itt az m tömegű súlyok tengelytől mért távolságát lehet változtatni.





4. Kísérletek a centrifugális erőre

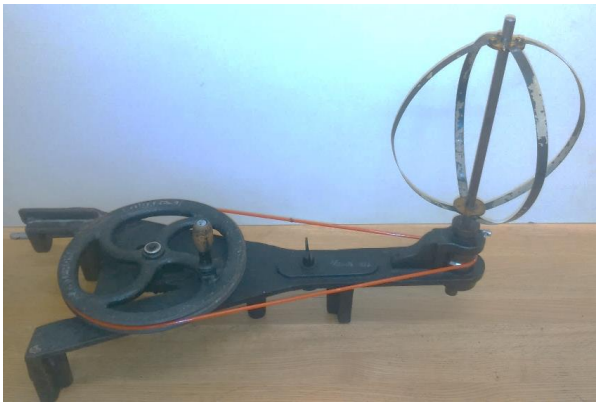
A kísérlet célja

Az alábbiakban egyszerűen szemléltethetjük a gyorsuló vonatkoztatási rendszerekben felírható centrifugális erő hatását. Fontos megjegyezni, hogy a diákok sokszor már kialakultnak hitt képpel rendelkeznek a centrifugális erőről, ezért nagyon fontos, hogy nagy figyelemmel oszlassuk el esetleges tévképzeteiket és alkossuk meg a helyes képet.

a) Rugalmas abroncs forgásakor fellépő deformáció bemutatása kézi forgatógéppel

Szükséges anyagok, eszközök

- kézi forgatógép
- rugalmas abroncs



Leírás

Rögzítsünk kézi forgatógépbe rugalmas abroncsot, és forgassuk meg! Az abroncs belapul. Az egyes tömegelemekre ható centrifugális erők ugyanis addig deformálják az abroncsot, amíg ennek következtében fellépő

rugalmas erők a centrifugális erőkkel egyensúlyt nem tartanak. (A magyarázathoz együtt forgó" koordináta-rendszert választottunk.)

Feladat

- Demonstrálja a leírásban bemutatott jelenséget!

Elméleti és módszertani kérdések

- Írja le jelenség magyarázatát nyugvó koordinátarendszerből szemlélve.

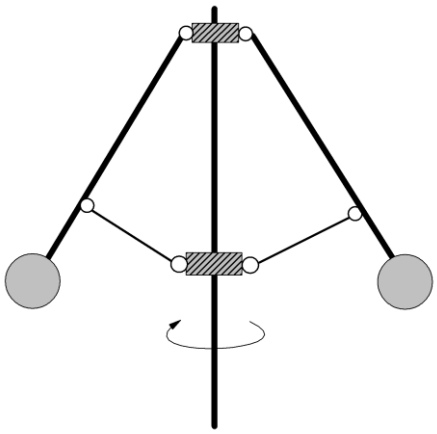
b) Fordulatszám-szabályozó modell működtetése kézi forgatógéppel

Szükséges anyagok, eszközök

- kézi forgatógép
- fordulatszám-szabályozó

Leírás

A forgatógépbe rögzített ω szögsebességgel forgó "centrifugál-szabályozó" modell l hosszúságú könnyű rúdjai akkora φ szöget zárnak be a tengellyel, amely mellett az m tömegű golyókra ható erők $mg \cdot \mathrm{tg}\varphi$ eredője a golyók körpályán mozgásához szükséges $m\omega^2 \cdot l \cdot \sin\varphi$ centripetális erővel lesz egyenlő. (A leírást most nyugvó koordinátarendszerből adtuk meg.)



Feladat

- Demonstrálja a leírásban bemutatott jelenséget!

Elméleti és módszertani kérdések

- Keressen olyan egyszerű alkalmazást, ahol ez az eszköz ténylegesen szabályozhatja az adott rendszer fordulatszámát!
- Írja le jelenség magyarázatát a szabályzóval együtt forgó koordinátarendszerből szemlélve.

c) Forgó pohárban kialakuló folyadékfelszín megfigyelése

Szükséges anyagok, eszközök

- kézi forgatógép

- befogóval rendelkező pohár

Leírás

A szimmetriatengelye körül forgó pohárban lévő víz felszíne forgási paraboloid alakot vesz fel. Ez abból következik, hogy a forgó koordináta-rendszerben nyilvánvalóan nyugalomban lévő folyadék felszínének mindenütt merőlegesnek kell lennie a rá ható erők (a nehézségi- és a centrifugális erők) eredőjére.

Feladat

Demonstrálja a leírásban bemutatott jelenséget!

Elméleti és módszertani kérések

- Készítsen oldalnézeti ábrát, melyben a vízfelszín egy adott kis darabjára berajzolja az
  a) gyorsuló és
  b) nyugvó vonatkoztatási rendszer szerint ható erőket!
  Magyarázza, miért különböző a két „erőrendszer”!

d) Söröspohár függőleges síkú forgatása váll körül

Szükséges eszközök

- műanyagpohár
- valamilyen veszélytelen folyadék (pl. víz)

Leírás

A műanyagpohárba töltsön kb. negyedéig vizet. Fogja meg a pohár száját öt ujjal felülről, majd a lehető legnagyobb sebességgel forgassa meg a poharat tartó karját a válla körül függőleges síkban – természetesen a pohárral együtt! A műveletet egy fizikakedvelő diák szemlélteti az alábbi videón, melyet a mellékelt QR-kód segítségével is be lehet tölteni. Ha minden jól sikerült, a kezdeti víz teljesen a pohárban maradt.

Fontos! *A biztonság kedvéért (hogy semmi ne legyen vizes) a kísérletet a folyosón végezze el, és a lehető leggyorsabban forgassa a karját!*

Elméleti és módszertani kérdések

- Adjon magyarázatot a jelenségre gyorsuló és nyugvó koordináta-rendszerben egyaránt!

Módszertani kiegészítések

- Középiskolában jelenleg még emelt szinten sem előírás a gyorsuló koordinátarendszer oktatása, így legtöbbször nem beszélünk például centrifugális erőről sem. Ennek megfelelően az ebben a fejezetben leírt kísérlteket mindenképpen fakultációra, vagy emelt szintű kiegészítésként ajánljuk. Természetesen tanítható, de ha nem kerül elő, akkor inkább kerüljük a használatát, mert a dinamika témakör kezdetén kialakítandó szemléletet rombolhatja. Ott azt igyekszünk megtanítani, hogy a kanyarodáshoz kell erő és nem a körpályáról való kirepüléshez. A gyorsításhoz-lassításhoz kell erő, s nem az egyenletes haladáshoz.

- A tehetetlenségi erőket azért vezetjük be gyorsuló koordináta rendszerek esetén, hogy a Newton II törvénye (a dinamika alaptörvénye) érvényben maradjon, tehát, például ha látunk egy nyugvó testet, akkor a rá ható erők eredője 0 legyen. Nem szabad elfeledkeznünk arról, hogy ezek fiktív, azaz nem konkrét kölcsönhatásból származó erők, valamint arról, hogy gyorsuló rendszerekben a tehetetlenség törvénye és a hatás-ellenhatás törvénye nem értelmezhető, még a tehetetlenségi erők bevezetésével sem. A jelenségek magyarázata mindig megadható nyugvó és forgó koordináta rendszerben is. Emellett sokszor nagyban leegyszerűsíti a megoldást a forgó koordináta rendszer használata.

5. Kísérletek az impulzusmomentum tételre

A kísérlet célja

Az impulzusmomentum (perdület) megmaradásának bemutatása.

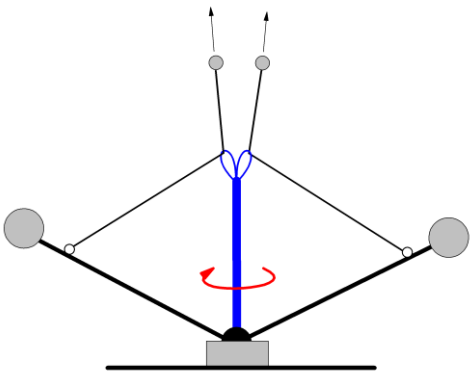
a) Csuklós-karos forgó eszköz tehetetlenségi nyomatéka és impulzusmomentuma közötti összefüggés demonstrálása. ("Piruett eszköz")

Szükséges anyagok, eszközök

- „Piruett eszköz”

Leírás és feladat

Az impulzusmomentum megmaradásának törvényét egyszerű csuklós karos forgó eszközzel („piruett eszköz”) meggyőzően érzékeltethetjük. Tartsuk az F fonalat függőlegesen, feszítsük lazán, úgy, hogy a két kar vízszintes legyen, majd gyenge mozdulattal lökjük meg az egyik kart! Az eszköz lassan forog. Húzzuk most felfelé a fonalat! A karok végén lévő nehezékek a forgástengelyhez közelebb kerülnek, a rendszer tehetetlenségi nyomatéka csökken, következésképpen szögsebessége nő. A nehezékeket lejjebb süllyesztve a szögsebesség csökken.



b) Forgózsámolyos kísérletek

Szükséges anyagok, eszközök

- forgózsámoly
- 2 kg tömegű súlyok

- ólmozott biciklikerék

Figyelem

A forgózsámolyos kísérletek balesetveszélyeseket lehetnek.

Leírás és feladatok

- A kísérletező személy vegyen kézbe egy-egy 2 kg-os súlyt és üljön fel a forgózsámolyra. Tartsa a súlyokat szorosan a testéhez. Kérje meg a gyakorlatvezetőt, hogy hozza forgásba a zsámolyt, vagy gyengéden lökje el magát. Ha ezután a súlyokat tartó karjait kinyújtja, akkor forgása lelassul. A súlyokat behúzva forgásának szögsebessége nő.
- A nyugalomban lévő forgózsámolyon ülő személy egyik kezében testéhez húzott 2 kg-os súlyt tart. Ha most karját előre nyújtja, majd vízszintes körív mentén oldalra lendíti, akkor a zsámollyal együtt a lendítés irányával ellentétesen elfordul. A súlyt behúzva, majd szorosan teste mellett eredeti helyzetébe hozva, az eljárás többszöri ismétlésével - csupán belső erők segítségével - akár körbe is foroghat.

- Tartson a forgózsámolyon ülő kísérletező függőleges tengelyű biciklikereket a kezében. Ha most a kereket megforgatja, akkor a zsámollyal együtt ellentétes irányú forgásba jön. A kerék forgását megállítva a zsámoly forgása is megszűnik. Vízszintesen tartott tengelyű kereket megforgatva a zsámoly nyugalomban marad. A ferdén tartott tengelyű forgó kerék impulzusmomentumának csak a függőleges komponense érvényesül.
- Adjunk a zsámolyon ülő személy kezébe függőleges tengely körül forgó kereket! A zsámoly - ha előzőleg nyugalomban volt - nyugalomban marad. Ha most a kísérletező a kerék tengelyét 180°-ka1 átfordítja, akkor a kerék forgásával egyező irányú forgásba jön. A kereket innen 90°-ka1 visszafordítva a forgás lelassul. A kereket visszafordítva a forgás megáll.

Módszertani kiegészítések

- A forgózsámolyos kísérletek során kritikus, hogy a zsámoly vízszintes legyen. Erről úgy győződhetünk meg, hogy ráülve nem jövünk forgásba (több különböző irányból is érdemes megpróbálni).
- Az első része a kísérletnek forgózsámoly nélkül is elvégezhető: vegyünk a két kezünkbe 5 kg-os súlyokat. A karunkat kitárva kezdjünk forgásba (mint egy balerina). A karunkat behúzva látványosan felgyorsul a forgásunk, kinyitva újra lelassul.

- Érdemes a kísérlethez kapcsolódóan az alábbi szemléletes videókat bemutatni.

Csillagok között – dokkolás jelenet

Műkorcsolya forgások

6. Kísérletek erőmentes- és súlyos pörgettyűvel

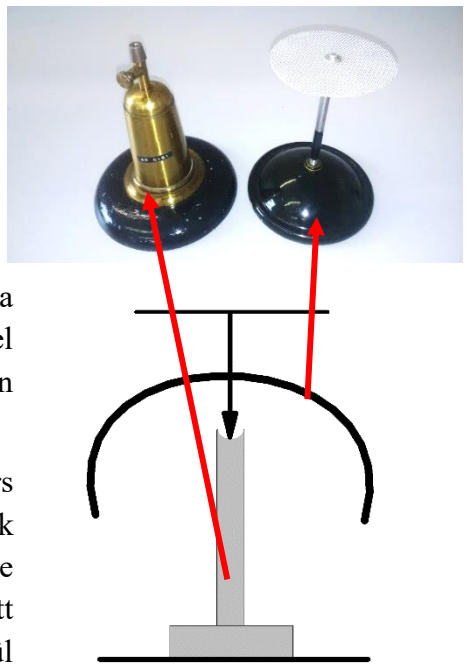
A kísérlet célja

Az erőmentes és súlyos pörgettyű megismerése. A nutáció és precesszió jelenségének demonstrálása.

a) Erőmentes pörgettyű

Szükséges anyagok, eszközök

- harang alakú pörgettyű papír koronggal
- alátámasztó állvány
- Fessel-féle giroszkóp



Leírás és feladatok

Demonstrációs célra alkalmas erőmentes pörgettyű egy a súlypontjában alátámasztott merev, harangszerű, tengellyel ellátott test. Ezt az állapotot a harangból kijövő tengelyen levő csavar állításával érhetjük el.

Hozzuk a pörgettyűt szimmetriatengelye körül gyors forgásba a rácsavart cérna megrántásával, és ültessük alátámasztó állványának fészkére! (A pörgettyű tengelye tetszőleges helyzetű lehet.) Az így magára hagyott pörgettyű a változatlan irányú szimmetriatengely körül forog. Ha előzőleg a pörgettyű tengelyére merőlegesen tárcsát, erre sakktábla mintázatú kockás füzetlapot erősítettünk, akkor megfigyelhetjük, hogy a pillanatnyi forgástengely egybeesik a változatlan helyzetű szimmetriatengellyel.

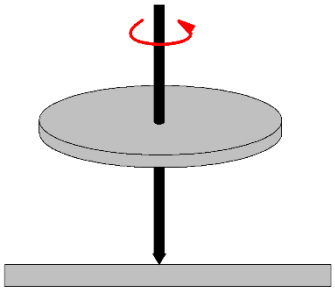
(A kocka- mintázat a szimmetriatenger körül koncentrikus köröket „rajzol”.) Az impulzusmomentum vektor (minthogy a pörgettyűre külső erő forgatónyomatéka nem hat) állandó irányú, a forgástengely (és most egyben a szimmetriatengely) egyenesébe esik.

Billentsük ki oldalirányú lökéssel a pörgettyű tengelyét! A kibillentés után a pörgettyű "kóválygó" mozgást végez. Megfigyelhetjük, hogy

1) a pörgettyű szimmetriatengelye egy állandó helyzetű egyenes (a változatlan impulzusmomentum vektor egyenese) körül kúpfelületen mozog. A szimmetriatengelynek ezt a mozgását *nutáció*nak nevezzük.
2) a pillanatnyi forgástengely is kúpfelületet ír le ugyanezen egyenes (az impulzusmomentum egyenese) körül. (Az éppen a pillanatnyi forgástengelyen lévő négyzet "áll" a papírlapon, a többi a gyors forgás miatt elmosódik. Az "álló" négyzet vándorol, az impulzusmomentum vektor papírlappal alkotott döféspontja körül körpályát ír le.)

Az erőmentes pörgettyű tengelyének nutációját (a bekezdés alatt látható) Fessel-féle giroszkóppal is bemutathatjuk. Állítsuk be az ellensúlyt úgy, hogy a giroszkóp erőmentes legyen. Hozzuk a pörgettyűt tengelyére tekert fonal lerántásával forgásba: szimmetria-tengelyének iránya állandó marad. A pörgettyűt meglökve létrejön a tengely nutációja.

b) Súlyos pörgettyű



Szükséges eszközök

- egyszerű pörgettyű vagy csiga
- biciklikerék
- Fessel-féle giroszkóp

Leírás és feladatok

A súlyos pörgettyű legismertebb formája a sematikus ábrán bemutatott játék-csiga. Hozzuk a csigát (tengelyére csavart spárga segítségével) gyors forgásba, és úgy tegyük le az asztalra (vagy fészkes állványra), hogy tengelye ne legyen függőleges. Úgy tűnik, hogy a pörgettyű

szimmetriatengelye a külső forgató-nyomaték hatására függőleges tengelyű körkúp palástja mentén mozog. A súlyos pörgettyűnek ezt a mozgását *precesszió*nak nevezzük.

Kis szögsebesség esetében már megfigyelhető, hogy a tengely körkúp menti mozgására egyfajta ingadozás szuperponálódik. Nagy szögsebesség mellett a tengely pszeudoreguláris (látszólag szabályos) precessziót végez.

Kényelmesen vizsgálhatjuk a súlyos pörgettyű precesszióját a Fessel-féle giroszkóppal, ha az ellensúlyt úgy állítjuk be, hogy az alátámasztási pontra forgatónyomatékot gyakoroljon. Ha egy precesszáló pörgettyű tengelyét meglökjük, akkor a precesszióra nutáció szuperponálódik.

Vizsgáljuk a súlyos pörgettyű mozgását abban az egyszerű esetben, amikor az impulzusmomentum és a forgatónyomaték merőleges egymásra! Ezt az esetet pl. úgy valósíthatjuk meg, hogy a vízszintes tengelyű pörgettyű egyik végét spárgára kötjük, és gyors forgásba hozzuk. Ha most a pörgettyűt elengedjük, nem billen le, hanem függőleges tengely körül vízszintes síkban precesszál.

Az előbbi demonstrációt vízszintes tengely körül megforgatott biciklikerékkel (lsd. forgózsámolyos kísérletek) végezhetjük el, melynek egyik fogantyújára kötelet erősítettünk. (A kísérlet balesetveszélyes, mert az impulzusmomentum növelésére a kereket ólomabronccsal láttuk el.) Vízszintes tengellyel tartsuk a kereket és forgassuk be (ha nem tudjuk egy kézzel megtartani, akkor kérjük a diákok segítségét). Ezt követően feszítsük ki függőlegesen a kötelet és tartsuk erősen. Engedjük el a biciklikerék tengelyét és figyeljük meg a mozgását!

Módszertani kiegészítések

- A középiskolában nagyon ritkán kerül szóba az óvodák egyik legnépszerűbb „oktatási” eszköze, a búgó-csiga és egyéb pörgettyűk. Ezen érdekes eszközök fizikai háttere sokszor nem a legegyszerűbb, így az iskolában maximum jelenség szinten tárgyaljuk. A jelenség viszont nagyon fontos, hiszen az égi mechanikában jelentős szerepe van. Ehhez nyújthatnak segítséget a bemutatott kísérletek, melynek elméleti hátterét is – viszonylag – részletesen bemutatjuk.
- Pörgettyűnek nevezzük általában az olyan merev testet, amely egy rögzített pont körül szabadon foroghat. Pörgettyűmozgást végez a merev test akkor is, ha rögzítetlen tömegközéppontja körül, de ennek mozgásától függetlenül forog. (Pörgettyűmozgást végez utóbbi értelemben pl. az elhajított diszkosz.) Kísérleteinkben szimmetrikus "lapos" pörgettyűkkel foglalkoztunk. Ezek súlypontja a szimmetriatengelyen van, és tehetetlenségi nyomatékuk erre a tengelyre nézve a legnagyobb. Megkülönböztetünk erőmentes- és súlyos pörgettyűt. Az erőmentes pörgettyű rögzített pontjára a külső erők nyomatéka zérus. Ezzel ellentétben a súlyos pörgettyű rögzítési pontjára a külső erők nyomatéka zérustól különböző.
- A jelenség említésénél fontos megemlíteni a föld precesszióját is, melyről sok érdekes szimuláció is található az interneten.