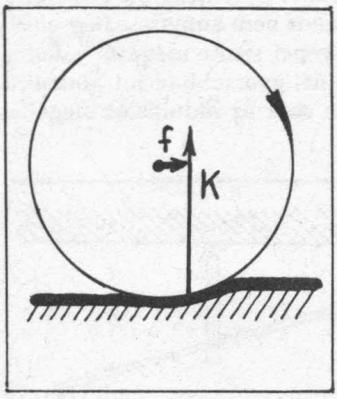
II.3. A kerékpározás fizikája

A kereket az emberiség ősidők óta használja. A fatörzseken gördített nehéz kőtömböktől a szekerek és hintók számtalan változatáig használjuk ki a gördülés súrlódást csökkentő hatását.



II.3.1. ábra

Vizsgáljuk meg a jelenség fizikai alapjait! A gördülő kerekekkel kapcsolatos problémák megoldása során általában úgy idealizálunk, hogy feltételezzük: a kerék csak egy pontban érintkezik az úttal. E pontban tapadási vagy csúszó súrlódás lép fel attól függően, hogy a kerék tisztán vagy csúszva gördül. Ez a szokásos leírás azonban nem ad számot a tiszta gördülés során fellépő gördülőellenállásról!

A gördülőellenállás magyarázatához úgy juthatunk el, ha figyelembe vesszük, hogy a gördülő kerék egy kissé mindig benyomja a talajt. A horpadáson a kényszererő aszimmetrikussá válik (II.3.1. ábra), ennek következtében $M = K \cdot f$ nyomatékkal lassítja a kerék forgását. Ha a kereket a tengelyénél fogva gyorsítjuk, akkor ennek az ellennyomatéknak a leküzdéséhez akkora F erő szükséges, hogy az

$$F_h \cdot r = K \cdot f$$

feltétel teljesüljön, azaz

$$F_h = K\frac{f}{r}$$

legyen.

A kapott eredmény jól tükrözi, hogy a sugár növekedésével a gördülő ellenállási erő egyre csökken. Az f hosszúság dimenziójú mennyiség, értéke század vagy ezred cm nagyságrendű, így érthető, hogy a kerekes járművek használatával a súrlódási veszteségek erősen csökkennek.

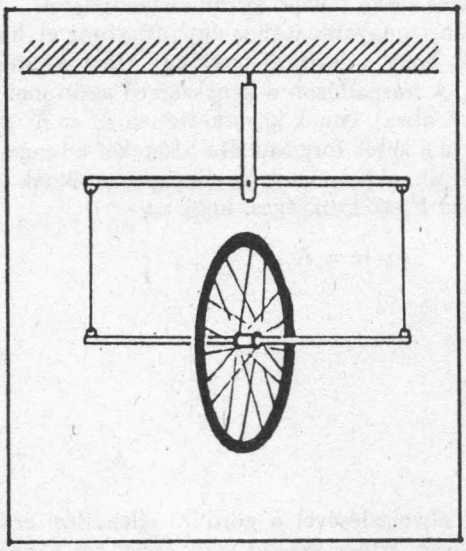
Igen érdekes azonban, hogy az emberi erővel hajtott kerekes jármű, a kerékpár a modern járművek kifejlesztésének korszakában, a múlt század végén kissé lemaradt a gépkocsik és a vasúti járművek mögött. A mai kerékpárok megalkotásában döntő lépést a coventryi Starley tette meg 1885-ben, amikor „biztonsági kerékpárján" egyforma méretű kerekeket alkalmazott, amelyek közül a hátsót láncáttétellel kellett meghajtani.

A Starley-féle kerékpárral Angliában, a modern versenysportok szülőhazájában hamarosan versenyeket kezdtek rendezni. Versenyre gyűltek össze 1889. május 18-án is Belfastban. Az abszolút esélyes Harvey du Cross dublini papírkereskedő volt, aki addig minden versenyt megnyert. Ezen a napon azonban bármennyire is igyekezett fakerekű kerékpárjával, a versenyt elveszítette. A vereség oka egy különleges kerékpár volt. A győztes gépén a belfasti John Boyd Dunlop által tervezett gumiabroncsok feszültek. Cross azonban a vereséget is saját hasznára fordította; a feltalálóval közösen részvénytársaságot alapított a gumiabroncsok forgalmazására. Ekkor vált a kerékpár milliók gyors és biztos közlekedési eszközévé.

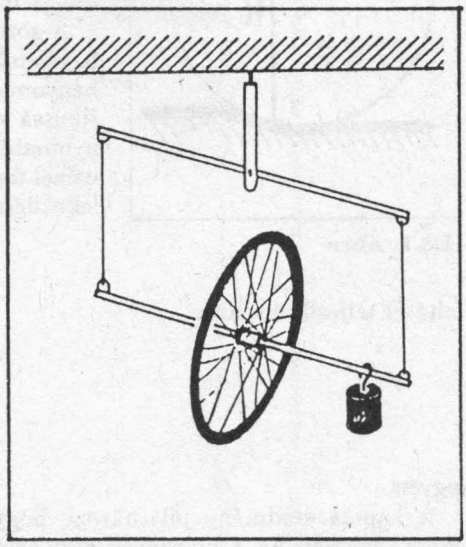
II.3.1. Akrobaták-e a kerékpárosok?

A ma már nevetséges kérdésre adott helytelen válasz sokáig hátráltatta a kerékpár kifejlesztését. Sokan még az 1880-as évek végén is a három vagy négykerekű „velocipéd" fejlesztésére biztatták az „újmódi kerekes vasparipák konstruktőreit", mert az egy- és kétkerekű járművek állandó egyensúlyozása szerintük csak a „gimnasztikában rendkívül jártasaknak okozhat örömet".

Ma, amikor hazánkban szinte minden egészséges felnőtt ember gyermekkora óta kerékpározik, tudjuk, hogy a biciklizés nem művészet, s elsajátításához nem annyira az egyensúlyozást, hanem inkább azt kell megtanulni, hogyan hagyjuk a gépet szinte magától haladni. A kezdő kerékpárosok hétköznapi tapasztalata az is, hogy minél gyorsabban fut alattuk a gép, annál könnyebb az egyensúlyt tartani; problémát igazán csak az indulás és megállás jelent.

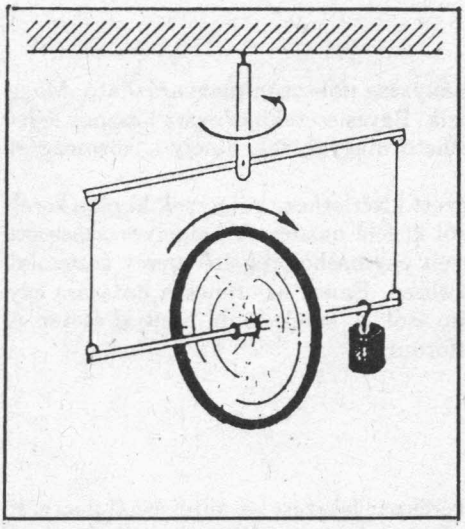


II.3.2. ábra



II.3.3. ábra

Mindezek mögött a forgó kerekek alapvető tulajdonsága rejlik. A mellékes hatásoktól függetlenítve egyszerűen tanulmányozhatjuk a forgó biciklikerék mozgását a II.3.2. ábrán látható elrendezésben; egy jól kiegyensúlyozott biciklikereket vízszintes tengellyel úgy függesztettünk fel, hogy a kereket tartó keret függőleges tengely körül elfordulhasson, ugyanakkor a kerék tengelye lebillenhessen. (A lebillenést a kereket tartó rudazat csuklói teszik lehetővé). A II.3.3. ábra azt mutatja, hogy a tengely egyik oldalára akasztott súly hatására a nyugvó kerék tengelye ferde állásba kerül. Megváltozik azonban a helyzet, ha a kereket először gyors forgásba hozzuk, s csak azután terheljük meg a tengelyt. Ekkor a kerék, ahelyett, hogy lebillenne, a tartó kerettel együtt lassú forgásba kezd a felfüggesztésen átmenő függőleges tengely körül. A forgásirányokat a II.3.4. ábra mutatja. Ha a kerék forgásirányát változatlanul hagyva a súlyt a tengely másik oldalára akasztjuk, a függőleges tengely körüli forgás iránya ellentétesre változik. A meglepő jelenséget tömören és szemléletesen úgy jellemezhetjük, hogy a forgó kerék tengelye a rá gyakorolt erő hatására mindig a nyugvó keréknél bekövetkező elmozdulás irányára merőlegesen fordul el.

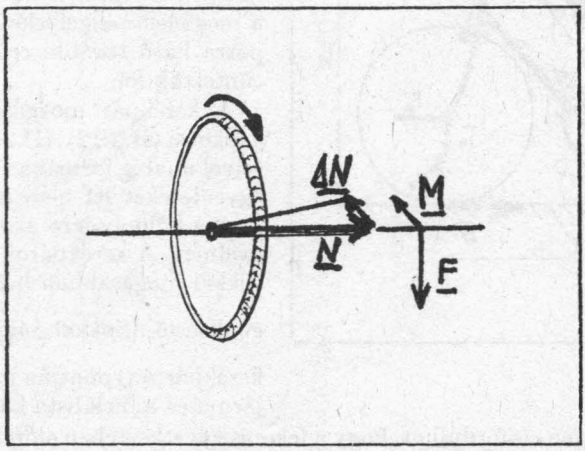


II.3.4. ábra

A jelenség mögött az egyik legalapvetőbb fizikai törvény, az impulzusmomentum-tétel rejlik. A megpörgetett kerék $\underline{N}$ impulzusmomentum-vektora a kerék tengelyének irányába mutat úgy, hogy a forgásiránnyal jobbrendszert alkosson. Az impulzusmomentum-tétel értelmében

$$\underline{M} = \frac{d\underline{N}}{dt},$$

ahol $\underline{M}$ a kerékre ható forgatónyomaték-vektor. A II.3.5. ábra szerint az $\underline{F}$ erő forgatónyomatéka a kerék síkjában van, és merőleges az impulzusmomentum-vektor irányára. Ez azt jelenti, hogy a tengelyre merőleges erő hatására az impulzusmomentum iránya változik meg. Az impulzusmomentum iránya azonban csak úgy változhat meg, ha a kerék elfordul. Ez a tengelyre merőleges erő hatására bekövetkező elfordulás kormányozza — ha hagyjuk érvényesülni — szinte helyettünk a biciklit. Abban a pillanatban, amint a gép valamelyik oldalra dől, a gyorsan forgó kerék a kormánnyal együtt a dőlés irányába fordul, s a kerékpár, ahelyett, hogy teljesen eldőlne, befordul. Ezt az önbeállító kormányzást talán legjobban az mutatja, hogy elengedett kormánnyal is könnyen biciklizhetünk, s ekkor a gépet súlypontunk ide-oda helyezésével kormányozhatjuk.



II.3.5. ábra

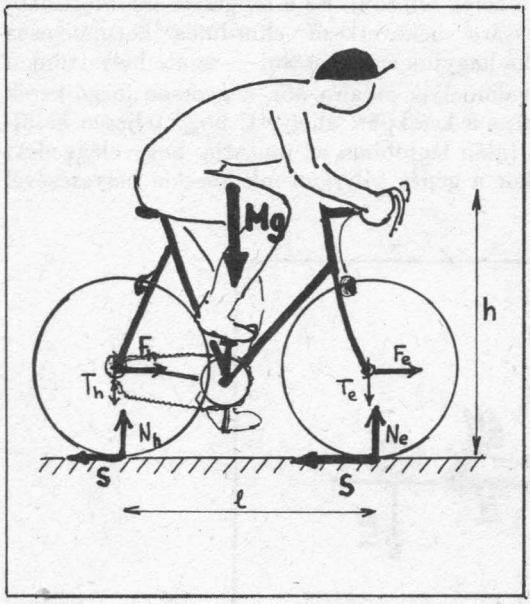
Látható tehát: a kerékpározáshoz valóban csak hagynunk kell, hogy a fizika törvényei érvényesüljenek!

II.3.1.1. Egy elemi magyarázat

Az impulzusmomentum-tétel alapján a bicikli kormányzása pontosan magyarázható. Maga a tétel azonban nehéz, bonyolult fogalmakkal dolgozik. Egyes esetekben ezért hasznos lehet a következő, kevésbé egzakt, de könnyebben követhető magyarázat, amely a körmozgást végző test tulajdonságain alapul.

Térjünk vissza ismét a felfüggesztett kerékkel végzett kísérlethez. Válasszuk ki pl. a kerék legfelső pontját, amely éppen a II.3.2. ábra síkjából ki felé mozog. A tengelyre akasztott terhelés hatására ebben a pontban a kerék részecskéit egymáshoz rögzítő merev kapcsolat miatt a sebességre merőleges, vízszintes irányú erő ébred. Ennek az erőnek a hatására egy magányos tömegpont pályája elhajlana eredeti irányától. A kerék többi pontjai esetén is érvényesülnek hasonló hatások, így a kerék síkja elfordul.

II.3.2. A fékezés



II.3.6. ábra

A kerékpár fékezése az autózásnál használt modellhez hasonló elképzelés alapján magyarázható. Vizsgálatainkat korlátozzuk a kézifékes gépekre, amelyeken a fékpofákat bowden segítségével szoríthatjuk a kerekek abroncsához. A fékerőt a fékkar erősebb, illetve gyengébb húzásával szabályozhatjuk. Legyen M_h a hátsó, M_e pedig az első kerékre ható fékező nyomaték, F_h és F_e pedig a megfelelő tengelyeken ható erő. A kerékpárra ható további erőket a II.3.6. ábrán tüntettük fel.

A kerékpár mozgásegyenletei a fékező gépkocsi (II.2.12)–(II.2.18) mozgásegyenleteivel analóg formában írhatók fel, ezért az egyenleteket itt nem ismételjük. Egyetlen fontos különbségre azonban felhívjuk a figyelmet. A kerékpárok súlypontja relatíve sokkal magasabban helyezkedik el, mint a gépkocsié. (Sokkal nagyobb a $\frac{h}{l}$ arány.) A kerékpár súlypontján most természetesen a jármű és a biciklista közös súlypontját értjük. Ezért igen könnyen előfordulhat, hogy a fékezés következtében előrebukó kerékpár teljes súlya az első kerékre nehezedik. Ekkor $N_h = 0$, $N_e = Mg$. Ha a lassulás igen nagy, akkor előfordulhat, hogy az $N_e = Mg$ erő nyomatéka nem tud egyensúlyt tartani a súrlódási erő nyomatékával, azaz

$$S_e \cdot h > Mg\frac{l}{2}. \qquad \text{(II.3.1)}$$

Ebben az esetben a kerékpár az első kerék és a talaj érintkezési pontja körül felborul.

A valóságban persze inkább az történik, hogy a kerékpáros nem képes a gépen tartani magát és átrepül a kormányon. A „borulási" lassulásra első közelítésben a (II.3.1) formula alapján adhatunk becslést. Ha feltételezzük, hogy a kerekek tömege a váz és a biciklista M tömegéhez képest kicsiny, akkor a (II.3.1)-ből adódóan

$$S_e > Mg\frac{l}{2h},$$

illetve

$$a > g\frac{l}{2h}$$

esetén a kerékpár az első keréken átborul, illetve a biciklista átrepül a kormányon.

A kormányon való átrepülés veszélye igen naggyá válik, ha a kerékpár első kerekét blokkolásig lefékezzük. Csúszás közben ugyanis az első kerék könnyen félrefordul, s ha az oldalirányban csúszó kerék gumija megtapad, akkor biztos a bukás, hiszen a csúszó mozgás nem tud tiszta gördülésre váltani. Ez az oka annak, hogy kerékpározáskor mindig a hátsó kereket kell erősebben fékezni, hiszen ebben az esetben a kifarolva megcsúszó gép még kormányozható marad.