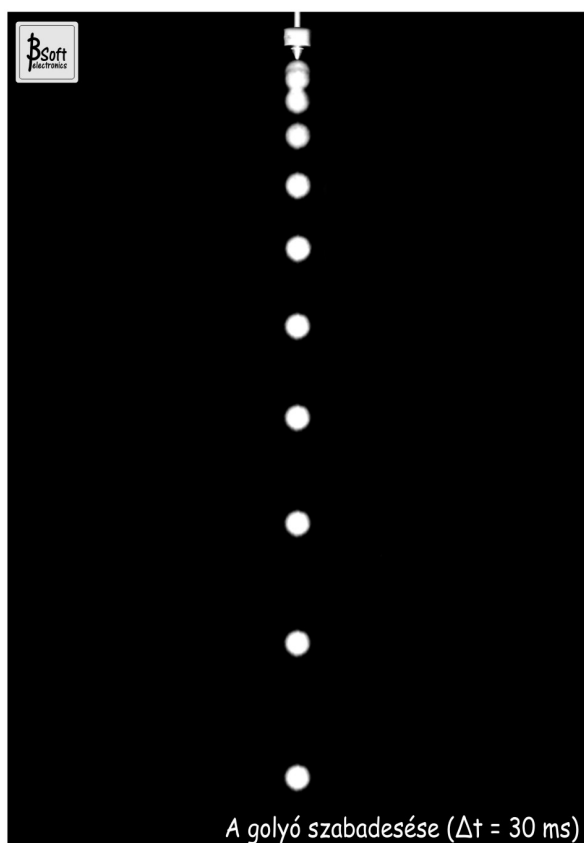


A szabadesés egy lehetséges kísérleti tanítása a nagyvárad ADY Endre Líceumban

Mottó: „A kísérletek nélküli fizika nem több, egy érthetetlen képletgyűjteménynél”.

Több évtizedes fizikatanári pályafutásom alatt mindig előnyben részesítettem az órákon végzett fizikai kísérleteket. Egy-egy fejezet mélyebb megértéséhez nélkülözhetetlen a témazáró, az egész osztály részvételével elvégzett laborgyakorlat. A gyakorlat befejezése után a diákok útbaigazítást kapnak a mérési eredmények értelmezéséhez, a referátum elkészítéséhez. A csak kézzel írt dolgozatok nemegyszer 15-20 oldalas tanulmányokká „dagadnak” és a tanár számára igazi élményt jelent az átnézésük, javításuk. Ezek a dolgozatok sokszorosan jobbak és egyedibbek, mint az osztályban írt témazáró ellenőrződolgozatok nagy része.

A kísérleti berendezés. A diákok már az elméleti órákon megismerkednek a számítógép-vezérelt stroboszkóppal és a segítségével létrehozott fényképekkel. Az igen komplikált



elektronikus berendezés lényege abban áll, hogy a számítógépen futó, assembly nyelvben írt program elindítja a jelenséget (a szabadon eső golyó esetében, a tejcseppnél kézzel indítunk), a teljesen elsötétített teremben, pedig egy nagy fényerejű villanólámpával (a továbbiakban **blitz**) egymásután, néhány ezredmásodperces (ms) időközökben, megvillantjuk a mozgó testet. A jelenség ideje alatt egy teljesen nyitott fényképezőgép a különböző helyzeteket ugyanazon a filmen rögzíti. Ezek a képek igen „beszédesen” mutatják a jelenség lényegét, de **hiányzik a diákok saját hozzájárulása, a kísérletezés élménye.**

Lényegében ugyanezt a kísérletet végezzük el a szabadesés tanulmányozása végén, csak a fényképezőgép helyett a néhány milliomod másodpercig megvilágított golyót a mi szemünkkel „fényképezzük le”. Az asztalokon elhelyezett magas állványokon egy elektromág-

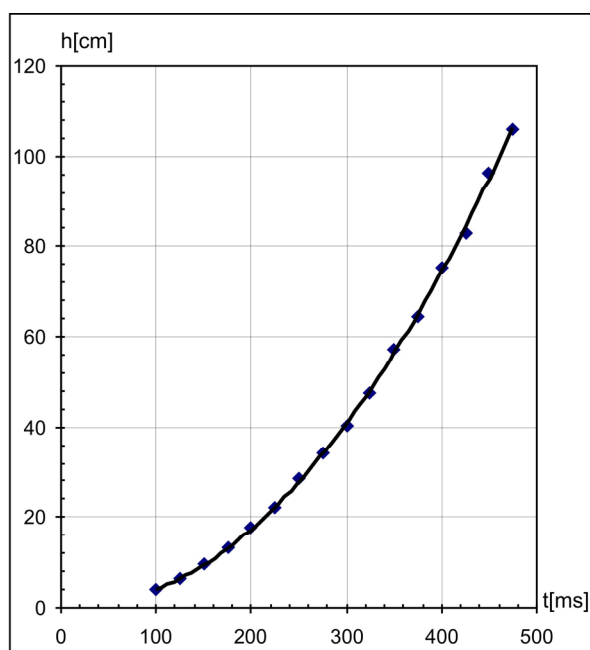
nes segítségével tartjuk a golyókat. A golyó indulási helyzetét egy rögzített helyzetjelzővel határozzuk meg. A kísérlet indításakor a számítógép kikapcsolja a teremvilágítást, majd egy 100 ms-os várakozás után kikapcsolja a golyót tartó elektromágnesek áramellátását, ezt azonnal (néhány μs) egy első felvillanással jelzi is. Egy előre meghatározott idő után (475 ms, ezt engedni meg az állványunk) a teljesen sötét teremben felvillantjuk a blitzet, a diákok pedig „lefényképezik” a golyó helyzetét. Egy másodperc elteltével a számítógép visszakapcsolja a teremvilágítást és az elektromágnesek áramellátását. A rendszer készen áll az újabb mérésekre. Néhány próbálkozás után, az emlékezetünkben maradt kép és egy másik, állítható helyzetjelző segítségével pontosan meghatározhatjuk a golyó helyzetét a második felvillanáskor. Ezután csökkentjük a golyó elengedése és a blitz második felvillantása közötti időt, majd meghatározzuk a golyó újabb helyzetét. A jól elsajátított kísérletezési technika birtokában a villanások közötti időt lecsökkenthetjük, egészen 100 ms-ig (25 ms-ként). Az elektromágnes áramának kikapcsolása és a második villanás közötti időintervallum pontossága $\pm 10 \mu\text{s}$, de csak 1 ms-os felbontásban hozzáférhető. A távolságokat a két helyzetjelző és egy mérőszalag segítségével $\pm 5 \text{ mm}$ pontossággal határozhatjuk meg.

Mérési eredmények. Ez a laborgyakorlat látszólag igen egyszerű, mindenki számára érthető mérési eredményeket ad. Alább látható egy tipikus mérési sorozat az egyik diák dol-

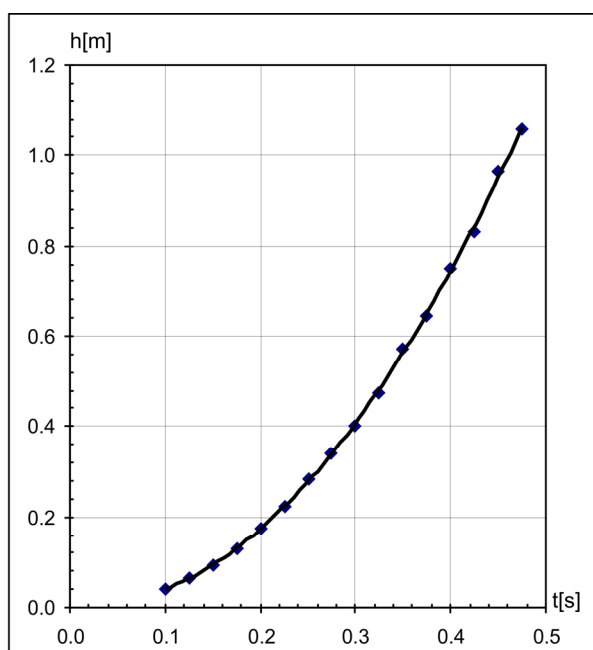
t[ms]	475	450	425	400	375	350	325	300	275	250	225	200	175	150	125	100
h[cm]	105.9	96.3	83.1	75.2	64.3	57.1	47.6	40.2	34.1	28.4	22.1	17.6	13.1	9.5	6.4	3.9
t[s]	0.475	0.450	0.425	0.400	0.375	0.350	0.325	0.300	0.275	0.250	0.225	0.200	0.175	0.150	0.125	0.100
t ² [s ²]	0.226	0.203	0.181	0.160	0.141	0.123	0.106	0.090	0.076	0.063	0.051	0.040	0.031	0.023	0.016	0.010
h[m]	1.059	0.963	0.831	0.752	0.643	0.571	0.476	0.402	0.341	0.284	0.221	0.176	0.131	0.095	0.064	0.039
$\sqrt{h}$	1.029	0.981	0.912	0.867	0.802	0.756	0.690	0.634	0.584	0.533	0.470	0.420	0.362	0.308	0.253	0.197

gozatából. Csak az első két sor jelenti a valódi mérési eredményeket, a többi az ábrázoláshoz szükséges, kiszámított adatokat tartalmazza.

A mérési eredmények értelmezése. A fizikus egy mérési sorozat elvégzése után ábrázolja a mérési eredményeket és megpróbálja értelmezni azokat. Mind a két ábrán jól látható



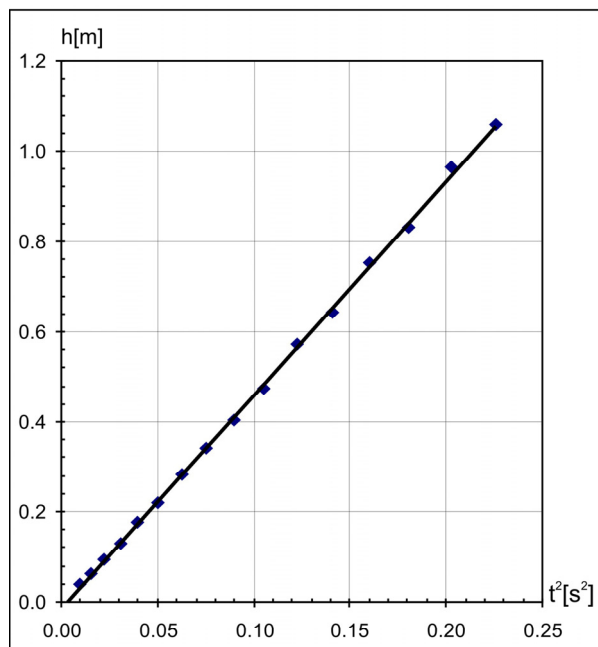
A szabadon eső golyó út-grafikonja



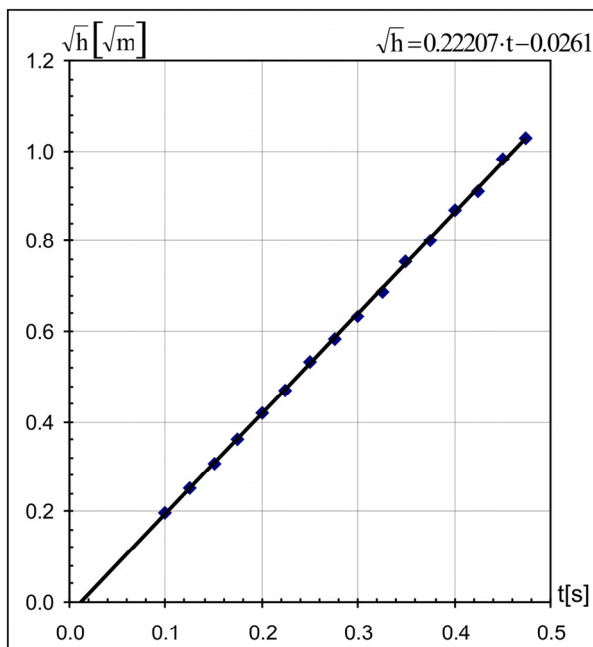
A szabadon eső golyó út-grafikonja SI-ben

a megtett út négyzetes függése az időtől. Ezen felületes megállapítás után be is fejezhetnénk a mérések értelmezését, hiszen igazoltnak látszik a jól ismert $h=gt^2/2$ törvény.

A továbbiakban azt fogjuk megvizsgálni, hogy tényleg egyszerű négyzetes összefüggésről van-e szó, vagy a valódi görbe alakjából más, szabad szemmel nem látható fizikai je-

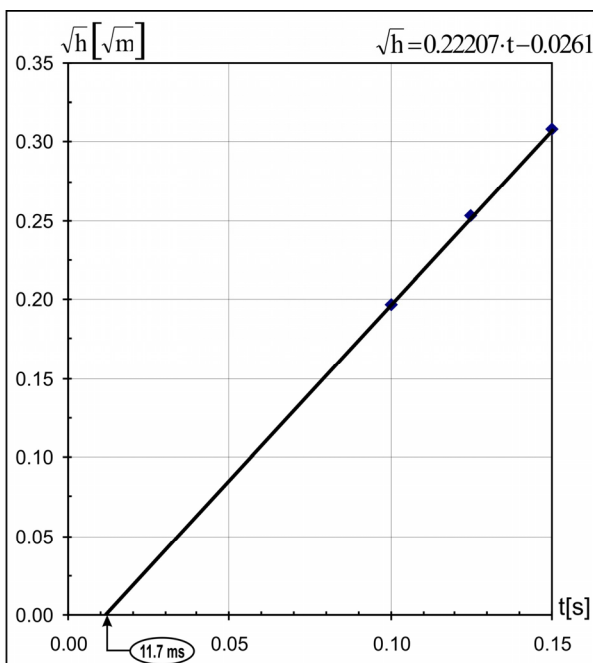


Az út grafikonja az idő négyzete függvényében



Az út négyzetgyöke grafikonja az idő függvényében (részlet)

lenségre is következtethetünk. Ha a látott jelenségre érvényes a $h=gt^2/2$ törvény, akkor a megtett út $h=f(t^2)$ grafikonja a mérési eredményekből ábrázolva az origón áthaladó egyenest kell adnia. Az egyenes irányításezője tartalmazza a mozgás gyorsulását, tehát meghatározhatjuk a gravitációs gyorsulást is. A fenti grafikonon jól látszik a feltételezett négyzetes összefüggés helyessége (a grafikon teljesen egyenes), de **nem megy át az origón!** Ez valójában azt jelenti, hogy a mozgás rövidebb ideig tart, mint azt mi elképzeltük, vagyis a mérési eredményeink helytelenek. Természetesen, a készülékek pontossági osztálya és az igen sok mérés ezt az utóbbi feltevést nem látszik igazolni. A mérések során a diákok észre szokták venni, hogy az igen kis időintervallumok esetén a mindenkinek egyformán elengedett golyó nem minden csoportban teszi meg ugyanazt az utat, ugyanannyi idő alatt (centiméternyi különbségek is adódnak). Ez lehetetlen, bizonyára az egyedi kísérleti eszközök különböznek egymástól. Az egyetlen lehetséges lényeges különbség az egyes elektromágnesek felépítésében lehet. Az áram kikapcsolása után az elektromágnes (a vas remanenciája miatt) még visszatartja a golyót, és ez okozza a néhány ms-ra becsült késést.



Az út négyzetgyöke grafikonja az idő függvényében (részlet)

Ha feltételezzük, hogy csak ez a jelenség áll a késés mögött, akkor a megadott, pontosnak hitt t időből le kell vonnunk a mindegyik elektromágnesre jellemző egyedi elengedési Δt_{egyedi} időt, így a mozgás valódi idejét t_v -vel jelölve felírhatjuk: $h = g t_v^2 / 2$ (1), ahol t_v időt visszaszámíthatjuk a mérési eredményeinkből. A $t_v = t - \Delta t_{\text{egyedi}}$ (2) helyettesítéssel az új függvényünk így alakul: $h = g(t - \Delta t_{\text{egyedi}})^2 / 2$ (3). Ennek ábrázolása és értelmezése lehetetlen, mert nem ismerjük a Δt_{egyedi} -t. Ha az előbbi egyenletből gyököt vonunk, akkor a következő kifejezéshez jutunk: $\sqrt{h} = \sqrt{g/2}(t - \Delta t_{\text{egyedi}})$ (4). Ezt a függvényt ábrázolva a fenti grafikont kapjuk, ahol jól látható az elektromágnes által okozott késleltetés. A következő, kinagyított grafikonon, az extrapolált görbe időtengelyével való metszéspontját is leolvashatjuk. A mérési eredményeket elemezve és felhasználva a legkisebb négyzetek elvét megkapjuk a jelenséget leíró elsőfokú görbe tapasztalati egyenletét: $\sqrt{h} = 2.2207 \cdot t - 0.0261 \text{ [}\sqrt{\text{m}}, \text{s]}$ (5).

A mérési eredmények értékelése, hibaforrások. Vessük össze az adatok feldolgozásából származó eredményeket a kísérlet fizikai adataival. A kísérletet leíró elsőfokú görbe tapasztalati egyenlete (5) és az elméleti meggondolás (4) egyenleteit összehasonlítva megkapjuk gravitációs gyorsulás értékét ebben a kísérletben: $g = 2 \cdot 2.2207^2 = 9.86 \text{ m/s}^2$, ami a kísérleti körülmények ismeretében igen jó eredménynek számít. Ezzel a módszerrel a meghatározás hibája jobb, mint $\pm 0.1 \text{ m/s}^2$ ($\pm 1.0\%$). A fő hibaforrást a távolság-meghatározás leolvasási pontatlansága jelenti, hiszen az időintervallumok pontatlansága nagyságrendekkel jobb ennél (kvarcetalonokkal ellenőriztük). Az elektromágnes visszatartási idejét a következő összefüggés adja: $\Delta t_{\text{egyedi}} = 0.0261 \cdot \sqrt{2/9.86} = 11.7 \text{ ms}$. Ez az érték is bőven belefér a szokásos értékhatárba, hiszen az elektromágnes általában 8-15 milliszekundumig tartja vissza a golyót (könnyen ellenőrizhetjük, ha a szabadesés törvényét ismertnek tekintjük, és elfogadjuk a nehézségi gyorsulás $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ értékét).

Következtetések. A fentiekben egy egész osztállyal elvégezhető kísérletet mutattunk be. Összegezve leírtakat, megállapíthatjuk a következőket:

- Ez a módszer lehetőséget nyújt a szabadesés úttörvényének igazolására, valamint az elektromágnes visszatartási idejének meghatározására.
- A legkisebb négyzetek elve alkalmazásával a megkapott úttörvény deriválásával eljutunk a pillanatnyi-sebesség törvényéhez, illetve az egymásmelletti mérések segítségével egy-egy pontban megkaphatjuk az átlagsebességet is.
- A nagy visszatartási idő miatt a gravitációs gyorsulás meghatározása egy mérésből lehetetlen az elektromágnes kikapcsolása és egy helyzetérzékelő alkalmazásával (*nálunk léteznek ilyenek ipari berendezések, csak „nem tudom” hogyan működnek*).
- A megfigyelési idő folytonos csökkentésével, feltételezve, hogy a visszatartási idő egy beállított elektromágnesnél lényegesen nem változik, a módszer lehetővé teszi a gravitációs gyorsulás elég jó meghatározását. Ez valójában azt jelenti, mintha igen sok helyzetérzékelőt alkalmaznánk, és eltekintenénk a visszatartási idő esetleges megváltozásától.
- Egy precíziós berendezés (*1500 mm-es tolómérő, 0.02 mm pontosságú helymeghatározás*) tervezése során ebből a nagy visszatartási időből indultunk ki, itt az elektro-

mágnes egyáltalán nem tartalmaz vasat (légmagos tekercs), a Lenz törvényből származó visszatartás elhanyagolhatósága érdekében pedig az elektromágnes áramát egy számvezérelt táp csökkenti igen lassan (kb. 2 s) addig, amíg a golyó le nem esik.



Nagyvárad, 2010. május 5.

dr. BARTOS-ELEKES István, ADY Endre Líceum, Nagyvárad