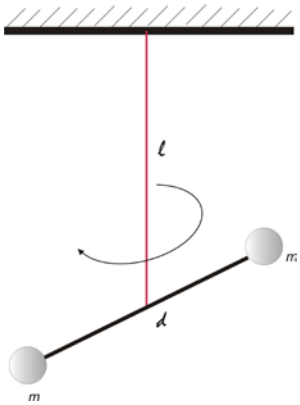
HENRY CAVENDISH
PRVÝ POUŽÍVATEĽ TORZNÝCH VÁH

Keď zavesíte na strunu malé závažie a trochu ním zatočíte, potom budete po jeho uvoľnení pozorovať, že struna sa bude periodicky krútiť na obe strany, a to veľmi dlho. Na jej krútenie stačí veľmi malá sila, ktorú jej dodáva počas pokusu zotrvačnosť roztočeného telesa. Moment sily vyvolávajúcej točenie klesá so štvrtou odmocninou z polomeru struny, preto je pri polomere struny rádovo v desatinách milimetra veľmi malý. Máme tak pred sebou najcitlivejšie mechanické zariadenie umožňujúce merať veľkosť i nepatrnej sily. Sú to **torzné váhy.**

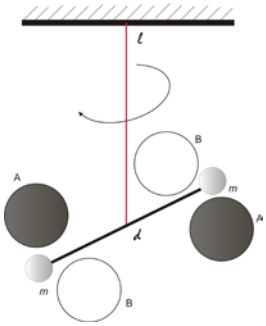


Torzné váhy. Na vychýlenie, prípadne rozkmitanie tyče s guľôčkami stačí veľmi malá sila.

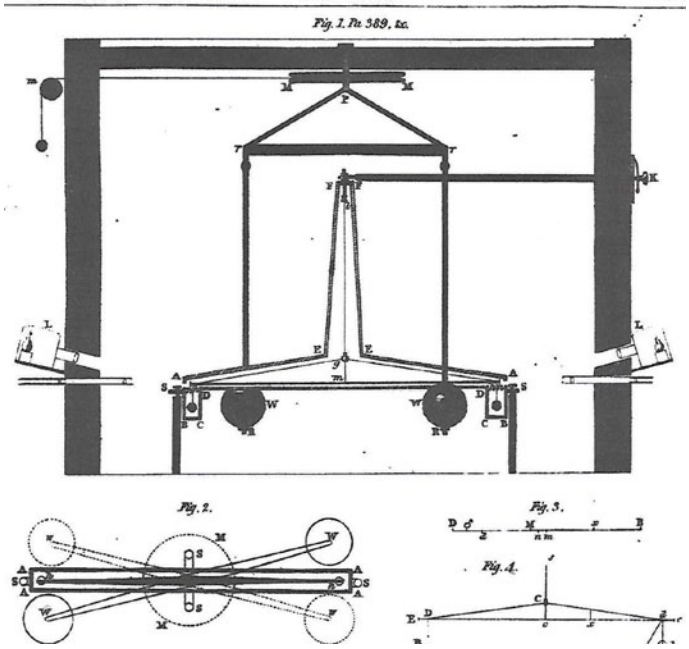
S myšlienkou merať veľkosť sily pomocou torzných váh prišiel anglický filozof a geológ John Michell (1723 – 1793). Na konce drevenej tyče zavesenej v strede na tenkom vlákne upevnil dve guľôčky a zistil, že ich možno vo vodorovnej rovine vychyľovať neuveriteľne malou silou, dnes by sme ju mohli vyjadriť hodnotou 10^{-7} tiaže guľôčok. K praktickému využitiu váh sa však už nedostal, pretože zomrel. Do histórie fyziky však váhy vstúpili pokusom, ktorý realizoval anglický fyzik **Henry Cavendish** (1731 – 1810) a ktorého hlavným výsledkom bolo určenie priemernej hustoty Zeme. Aj keď bol známy Newtonov zákon všeobecnej gravitácie, podľa ktorého je veľkosť gravitačnej sily priamo úmerná hmotnostiam telies a nepriamo úmerná druhej mocnine ich vzdialenosti, stále nebola známa veľkosť gravitačnej konštanty, ktorá matematický zápis tohto zákona dopĺňa.

Henry Cavendish (1731 – 1810)

Základná myšlienka pokusu, ktorý Cavendish pripravoval, spočívala v meraní príťažlivej sily medzi guľôčkami na priečnej tyči a dvoma ťažkými guľami (na obrázku vpravo). Pre zväčšenie uhla otočenia mali byť ťažké gule najprv umiestnené do polohy A a potom do polohy B. Najskôr však bolo nutné zistiť a kvantitatívne opísať mechanické vlastnosti torzných váh, najmä nájsť konštantu úmernosti medzi momentom síl pôsobiacich otočenie a uhlom pootočenia. Cavendish zavesil na tenké strieborné vlákno priečnu tyč dlhú asi 3 metre. Na jej konce umiestnil guľôčky s hmotnosťou 730 gramov, váhy rozkmital a porovnával dobu kmitu s dobou kmitu sekundového kyvadla, ktorá závisí od jeho dĺžky a tiažového zrýchlenia. Pri týchto pokusoch dostával hodnoty doby kmitu okolo 14 minút, pri inom závesnom vlákne približne 7 minút. Na základe výsledkov týchto pokusov začal merať príťažlivú silu medzi guľami podľa obrázka.



Do blízkosti malých guľôčok umiestnil dve olovené gule, každú s hmotnosťou 158 kg, tak, aby príťažlivá sila medzi koncami tyče a veľkými guľami vyvolala pootočenie tyče najprv v jednom smere (A) a pri premiestnení gulí i v opačnom smere (B). Na výpočet sily, ktorá vyvolala pootočenie „činky“, bolo nutné poznať zákonitosti deformácie krútením, ktorá pri pokuse v závesnom vlákne nastávala. Cavendish urobil 29 pokusov, pri ktorých meral čas kmitania torzných váh a pomocou znalostí mechanických vlastností závesu určil veľkosť pôsobiacej sily. Tu si uvedomme náročnosť pokusu: Veľkosť príťažlivej sily bola rádovo 10^{-7} N. Preto meracia aparatúra nevyzerala tak jednoducho ako na obrázku, ale oveľa zložitejšie.



Nákres Cavendishovej meracej aparatúry s vysvetľujúcimi obrázkami v článku z roku 1798

Model Cavendishovho zariadenia v Londýne

Bola umiestnená v tepelne izolovanej miestnosti bez najmenšieho prúdenia vzduchu a pozorovateľ z polohy L sledoval uhlovú výchylku ďalekohľadom. Cavendish hypoteticky nahradil olovené gule guľami vody s rovnakou hmotnosťou a s využitím veľkosti príťažlivej sily tohto telesa k Zemi určil pomer hustôt Zeme a vody ako 5,48 : 1. Zo znalosti zemského polomeru a priemernej hustoty Zeme sa určila jej hmotnosť.

Podrobný postup 29 pokusov, pomocou ktorých určil priemernú hustotu Zeme, publikoval Cavendish v roku 1798 v článku *Pokus vedúci k určeniu hustoty Zeme*. Svoje pokusy tam opisuje tak presne, že sa dajú i po mnohých rokoch presne zopakovať.

CONCLUSION.

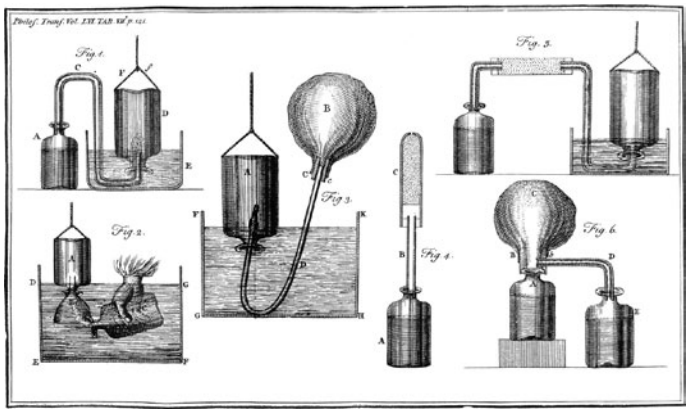
The following Table contains the Result of the Experiments.

Experiment.	Mot. weight.	Mot. arm.	Do. corr.	Time vib.	Do. corr.	Density.
1	m. to +	14.32	13.42	m. s.	.	5.50
	+ to m.	14.1	13.17	14.55	.	5.61
2	m. to +	15.87	14.69	.	.	4.88
	+ to m.	15.45	14.14	14.42	.	5.07
3	+ to m.	15.22	13.56	14.39	.	5.26
	m. to +	14.5	13.28	14.54	.	5.55
4	m. to +	3.1	2.95		6.54	5.56
	+ to −	6.18	.	7.1	.	5.29
	− to +	5.92	.	7.3	.	5.58
5	+ to −	5.9	.	7.5	.	5.65
	− to +	5.98	.	7.5	.	5.57
6	m. to −	3.03	2.9	.	.	5.53
	− to +	5.9	5.71	7.4	.	5.62
7	m. to −	3.15	3.03	by	6.57	5.29
	− to +	6.1	5.9	mean.		5.44
8	m. to −	3.13	3.00	.	.	5.34
	− to +	5.72	5.54	.	.	5.79
9	+ to −	6.32	.	6.58	.	5.10
10	+ to −	6.15	.	6.59	.	5.27
11	+ to −	6.07	.	7.1	.	5.39
12	− to +	6.09	.	7.3	.	5.42
13	− to +	6.12	.	7.6	.	5.47
	+ to −	5.97	.	7.7	.	5.63
14	− to +	6.27	.	7.6	.	5.34
	+ to −	6.13	.	7.6	.	5.46
15	− to +	6.34	.	7.7	.	5.30
16	− to +	6.1	.	7.16	.	5.75
17	− to +	5.78	.	7.2	.	5.68
	+ to −	5.64	.	7.3	.	5.85

Z Cavendishovho zistenia vyplynul ešte jeden významný dôsledok, ktorý v tej dobe zostal akosi v ústraní, a to veľkosť gravitačnej konštanty, ktorá je súčasťou zápisu Newtonovho zákona všeobecnej príťažlivosti. Z Cavendishových meraní by jej hodnota bola $6{,}754.10^{-11}$ $m^3.kg^{-1}.s^{-2}$, čo dnes uvádzanej hodnote $6{,}673.\ 10^{-11}$ $m^3.kg^{-1}.s^{-2}$ zodpovedá s veľkou presnosťou (líši sa len o 1,2 %).

Henry Cavendish bol synom lorda Charlesa Cavendisha žijúceho vo francúzskom meste Nice. Od 18 rokov študoval na univerzite v Cambridgei. Aj keď bol vynikajúcim študentom, najmä v matematike, fyzike a chémii, odišiel bez diplomu a s bratom sa vydal na cesty po Európe. Školu opustil preto, lebo sa nemohol zmieriť s povinnou skúškou z náboženstva. Zdalo by sa, že na tejto púti nadviazal početné kontakty, ba i priateľstvá s množstvom vedcov, ale opak je pravdou. Bol silným introvertom, samotárom, stránil sa žien a doma i služobníctva. Jedlo mu donášali do izby po predchádzajúcom výhradne písomnom odkaze. Aby sa vyhol i svojej gazdinej, jedlo si objednával písomne a z domu odchádzal vždy zadným schodiskom.

Cavendishova uzavretosť sa prejavovala i v jeho práci. Boli známe len dva jeho články v Philosophical Transaction vydané v rokoch 1771 až 1776. O svojich pokusoch, často veľmi unikátnych, si viedol dôkladné záznamy. Našťastie ich nevyhadzoval, a tak mal prekvapený J. C. Maxwell, keď sa pustil do usporiadania jeho pozostalosti, v rukách doklady o objavoch, ktoré boli urobené inými až neskôr a dodnes nesú ich meno. Trinásť rokov pred Coulombom zaznamenal zákon o silovom pôsobení medzi nabitými telesami, odvodil taktiež Ohmov zákon, zaviedol pojem kapacita, dokázal, že vnútri vodivej gule je elektrické pole nulové, čo neskôr objavil M. Faraday. Chemici vďačia Cavendishovi za objav vodíka i zloženia vody. To sú taktiež jedny z mála neutajených vecí, pretože Cavendish o vodíku písal v článku *O umelých plynoch* v roku 1766 ako o „zápalnom plyne“, ktorého spaľovaním vzniká voda. Pokus po Cavendishovi zopakoval francúzsky chemik Lavoisier a horiacemu plynu dal názov *hydrogène* – vodík.



Cavendishove obrázky k chemickým pokusom

V roku 1870 založil jeden z rodu Cavendishovcov, William, 7. vojvoda z Devonshiru (a taktiež kancelár cambridgeskej univerzity), nadáciu, ktorá mala financovať činnosť laboratória nesúceho dodnes Cavendishovo meno. Vybudované bolo podľa projektu J. C. Maxwella roku 1874 ako Cavendishovo laboratórium, a to čiastočne z príspevku 8 500 £ Williama Cavendisha a čiastočne Maxwellovým finančným vkladom. Najprv bolo súčasťou katedry experimentálnej fyziky univerzity v Cambridgei, avšak svojimi výsledkami sa stalo nielen dominantným vedeckým ústavom univerzity, ale i jedným z najprestížnejších vedeckých stredísk v Európe. Prvým jeho riaditeľom bol práve James Clark Maxwell. Pôvodne bolo toto miesto ponúknuté Williamovi Thomsonovi – lordovi Kelvinovi, ale ten odmietol opustiť svoje profesorské miesto na univerzite v Glasgowe. V tomto laboratóriu pracovalo mnoho známych vedcov, medzi ktorých patria J. J. Thomson, E. Rutherford, W. H. Bragg, Ch. G. Barkla, J. W. Strutt Rayleigh.

František Jáchim