



Fakulta elektrotechnická

Katedra elektrotechniky a počítačového modelování

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

NÁVRH A REALIZACE EXPERIMENTŮ PRO VÝUKU
ELEKTROMAGNETISMU

Autor práce: David Krabec

Vedoucí práce: Ing. Jan Kaska

Plzeň 2023

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2022/2023

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **David KRABEC**
Osobní číslo: **E19B0096P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Téma práce: **Návrh a realizace experimentů pro výuku elektromagnetismu**
Zadávací katedra: **Katedra elektroniky a informačních technologií**

Zásady pro vypracování

1. Proveďte rešerši experimentů z oboru makroskopické teorie elektromagnetismu (zaměřte se především na experimenty, které lze realizovat bez složitějšího vybavení).
2. Navrhněte několik experimentů, detailně popište jejich fyzikální podstatu a možnosti jejich realizace.
3. Realizujte vybrané experimenty, porovnejte jejich chování s analytickým výpočtem či numerickým modelem.
4. Navrhněte, jak by mohly být tyto experimenty konkrétně implementovány do výuky a vytvořte výukový materiál.

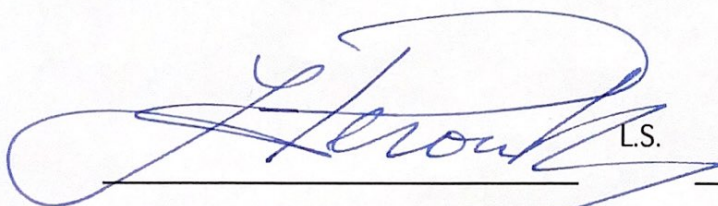
Rozsah bakalářské práce: **30 – 40**
Rozsah grafických prací:
Forma zpracování bakalářské práce: **elektronická**

Seznam doporučené literatury:

1. STEINLE, Friedrich. Exploratory Experiments: Ampère, Faraday, and the Origins of Electrodynamics. University of Pittsburgh Press 2016.
2. GRIFFITHS, David J. Introduction to electrodynamics (4th edition). Cambridge University Press 2017.

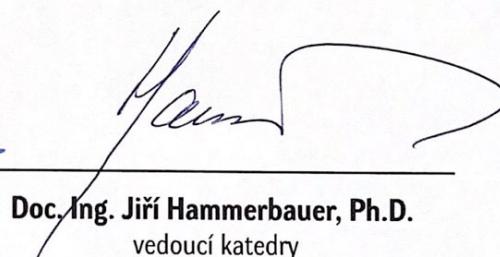
Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Jan Kaska**
Katedra elektrotechniky a počítačového modelování

Datum zadání bakalářské práce: **7. října 2022**
Termín odevzdání bakalářské práce: **26. května 2023**



L.S.

Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.
děkan



Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne 7. října 2022

Abstrakt

Bakalářská práce se zabývá experimenty a demonstracemi z oboru elektrostatiky a elektrodynamiky. Jednotlivé jevy jsou zasazeny do historického kontextu a je tak utvořen obraz vývoje teorie elektromagnetického pole. Následně jsou jevy vysvětleny dnešními pojmy. Dále jsou jevy představené v historickém úvodu zkonstruovány a zdokumentovány. Z realizovaných experimentů je navržen výukový materiál.

Klíčová slova

elektrostatika, elektrodynamika, experimenty

Abstract

The goal of this bachelor thesis is to present experiments and demonstrations of electrostatics and electrodynamics. Individual phenomena are set into historical context to form the whole picture of development of the theory of electromagnetism. These phenomena are then explained using present terminology. Then phenomena presented in historic introduction are constructed and documented. Teaching material is designed from the constructed experiments.

Keywords

electrostatics, electrodynamics, experiments

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této diplomové práce, je legální.

.....

podpis

V Plzni dne 26. května 2023

David Krabec

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval Ing. Janu Kaskovi za cenné profesionální rady, připomínky a podporu po celou dobu tvorby práce.

Obsah

Úvod	11
1 Historický vývoj chápání elektromagnetismu	12
1.1 William Gilbert (1544-1603)	12
1.1.1 Výzkum elektrických jevů	12
1.1.2 Země je magnet	14
1.2 Stephen Gray(1666-1736)	14
1.2.1 Elektrizace komunikací	15
1.2.2 Pokus se zavěšeným chlapcem	17
1.2.3 Rozložení volného náboje na povrchu vodiče	17
1.2.4 Zesílení elektrické přitažlivosti tvarem vodiče	18
1.3 Charles François de Cisternay Du Fay (1698-1739)	19
1.3.1 Elektrostatické odpuzování	19
1.3.2 Objev principu Attraction-Contact-Repulsion	20
1.3.3 Dva typy elektřiny (náboje)	20
1.4 Charles-Augustin de Coulomb (1736-1803)	21
1.4.1 Coulombova torzní váha	21
1.5 Hans Christian Ørsted (1777-1851)	23
1.5.1 Pohyb střílky kompasu v blízkosti proudovodiče	23
1.6 Dvojice Biot-Savart	24
1.6.1 Síla mezi magnetickou střílkou a přímým proudovodičem	25
1.7 André Maria Ampère (1775-1836)	28
1.7.1 První obecný fakt	28
1.7.2 Druhý obecný fakt	29
1.7.3 Třetí obecný fakt	30
1.8 Michael Faraday (1791-1867)	30
1.8.1 Elektromagnetická indukce	31
1.8.2 Magnetoelektrická indukce	32
2 Demontrace principů elektromagnetismu	33
2.1 Nástroje	33
2.1.1 Versorium	33
2.1.2 Elektrické kyvadlo	34
2.1.3 Elektroskop	34

2.2	Vodiče a izolanty	35
2.2.1	Podle elektroskopu	35
2.2.2	Podle rozsvícení LED	36
2.3	Nabíjení předmětů třením	37
2.4	Kladně a záporně nabitě těleso	39
2.4.1	Nabitý vodič	39
2.4.2	Intenzita elektrického pole v okolí hran vodiče	40
2.4.3	Přitahování-kontakt-odpuzování (ACR)	42
2.5	Chování materiálů ve vnějším elektrickém poli	43
2.5.1	Vodič ve vnějším elektrickém poli	44
2.5.2	Izolant ve vnějším elektrickém poli	46
2.5.3	Uzemněný vodič ve vnějším elektrickém poli	47
2.6	Působení proudovodiče na kompas	48
3	Závěr	49
	Seznam použité literatury	50
	Seznam obrázků	52
	Přílohy	54

Seznam použitých symbolů a zkratek

\mathbf{B}	[T]	magnetická indukce
\mathbf{E}	[V · m ⁻¹]	intenzita elektrického pole
\mathbf{F}	[N]	síla
i, I	[A]	elektrický proud
J	[kg · m ²]	moment setrvačnosti
q, Q	[C]	elektrický náboj
R	[Ω]	elektrický odpor
$\hat{\mathbf{r}}$	[m]	jednotkový vektor
u, U	[V]	elektrické napětí
ε	[rad · s ²]	úhlové zrychlení
ϵ_0	[F · m ⁻¹]	relativní permitivita vakua
ϕ	[Wb]	magnetický tok

Zkratky

ABS	acrylonitrile butadiene styrene	akrylonitrilbutadienstyren
ACR	attraction-contact-repulsion	přitahování-dotyk-odpuzování
PP		polypropylen
PVC		Polyvinylchlorid

Úvod

Hlavním cílem této práce je provést rešerši experimentů z oboru makroskopické teorie elektromagnetismu realizovatelné bez složitého vybavení. První kapitola se věnuje experimentům v historickém kontextu vývoje teorie elektromagnetismu. Důraz byl kladen na experimenty, které vedly k objevům základních jevů a vlastností elektrického a magnetického pole. Na historický objev navazuje teoretické vysvětlení dnešními pojmy, případně je doplněna později objevená správná interpretace jevu, v případě, že původní interpretace byla překonána.

Následuje popis a sestavení nástrojů používaných k detekci elektrického náboje pro demonstraci elektrostatických jevů. Důraz byl kladen na využití snadno dostupných běžných materiálů, se kterými se snadno a bezpečně pracuje. Popsané nástroje jsou dále použity pro popis jevů zmíněných v historické teoretické části. Pro pokus z oboru elektrodynamiky nebylo třeba žádný nástroj sestavovat, byly použity již hotové předměty.

Nakonec je vytvořen návrh výukového materiálu pro praktické cvičení.

1 Historický vývoj chápání elektromagnetismu

Přestože jsou první dochované zmínky o pozorování elektrostatických a magnetických jevů připisovány Thalétovi z Milétu (6. století př.n.l.), rigorózní zkoumání a vědecký přístup k popisování těchto jevů započal až v 16. století s prací Williama Gilberta. První empirické vztahy popisující elektrostatiku a magnetismus publikoval až Charles-Augustin de Coulomb v druhé polovině 18. století. Nalezení souvislosti mezi elektrickými a magnetickými jevy a jejich sjednocení pod elektromagnetismus přišlo s objevem Hanse Øersteda v roce 1820. [12]

První kapitola této práce zasazuje základní principy elektromagnetismu do historického kontextu. Jelikož se tato práce zabývá především elektrostatickými jevy, které lze snadno pozorovat působením předmětů nabitých třením, nevěnuje se řadě důležitých historických milníků např. sestavení elektrostatických generátorů, nebo vynálezu elektrického článku Alessandrem Voltou.

Dále jsou rozebrány počátky elektrodynamiky a jednoduché experimenty, které postupně vedly až k ucelené teorii elektromagnetického pole dneška.

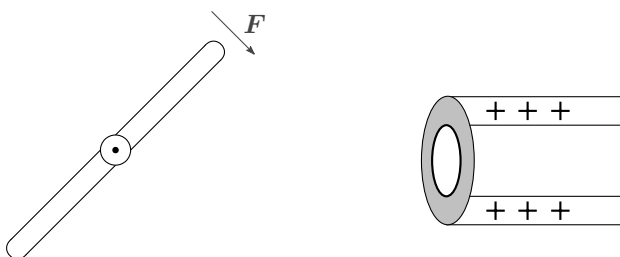
1.1 William Gilbert (1544-1603)

William Gilbert byl britský lékař a filozof, který se zabýval přírodními silami a zákony. Jeho výzkum byl inspirován prací G. Fracastora. Ve své vědecké práci *De Magnete*, vydané v roce 1600, popsal přes 600 experimentů z oboru magnetismu a elektrostatiky. Pro svůj rigorózní vědecký přístup, kterým se distancoval od mýtických představ o původu elektromagnetických sil, je považován za „otce elektřiny a magnetismu“. Jako první nastínil koncept elektrického náboje jako hmoty, která se mezi určitými předměty přenáší třením. Tato hmota měla být v předmětech pevně vázaná a samotným třením uvolňovaná. Elektrickou přitažlivost následně vysvětloval jako tendenci přenesené hmoty vrátit se do původního předmětu. [4][5][12][15]

1.1.1 Výzkum elektrických jevů

Ke zkoumání elektrických jevů používal nástroj zvaný versorium, elektrostatickou obdobu kompasu (sekce 2.1.1). S jeho využitím zkoumal elektrické vlastnosti dalších materiálů a po téměř dvou tisících letech rozšířil od dob starověkého Řecka známý seznam těch, které po nabití třením přitahují lehké předměty. Takové materiály nazval elektrickými, nebo také elektrika (z anglického *electrics*), materiály opačných vlastností nazval neelektrickými,

nebo také neelektrika (z anglického nonelectrics). Mezi elektrika zařadil sklo, síru, tvrdý vosk, diamant, safír, tvrzenou pryskyřici; mezi neelektrika zařadil jemu známé kovy, tvrdá dřeva, magnetovec, smaragd, mramor a kost. Jako první popsal elektrickou přitažlivost tekutin a zkoumal vliv teploty na elektrika. Pozoroval, že v blízkosti otevřeného plamene ztrácejí své přitažlivé schopnosti, což vysvětloval spálením elektrické hmoty plamenem. Dnes je vybití nabitého předmětu v blízkosti plamene vysvětlováno zvýšenou vodivostí ionizovaného vzduchu v okolí předmětu. [4][5][12][15]

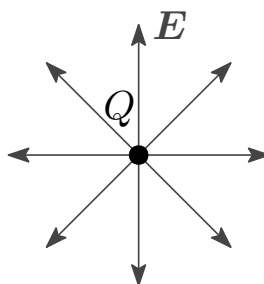


Obrázek 1.1: Orientace versoria směrem k nabitému tělesu.

Gilbertovo názvosloví pro rozdělení materiálů se do dnešního dne nezachovalo. V 18. století bylo překonáno po objevech S. Graye (sekce 1.2) a nahrazeno rozdělením materiálů na vodiče (Gilbertova neelektrika) a izolanty, též dielektrika (Gilbertova elektrika). Jiné Gilbertem zavedené termíny jsou používány dodnes, i když s jiným významem. Např. elektrina (z anglického electricity), název Gilbertem přiřazený schopnosti materiálů přitahovat lehké objekty odvozený podle latinského slova pro jantar (electron), dnes souhrnně označuje elektrostatiku, elektromagnetismus a elektrodynamiku. Nebo pojem elektrizace, Gilbertem používaný pro „předání“ přitažlivé síly předmětům třením byl postupně zobecnován a dnes obecně označuje proces nabití předmětu např. třením, elektrostatickou indukci nebo ionizací. [11]

Pojem elektromagnetismus zavedl H. C. Ørsted v roce 1820, pojmy elektrostatika a elektrodynamika zavedl A. M. Ampère v roce 1822. [4]

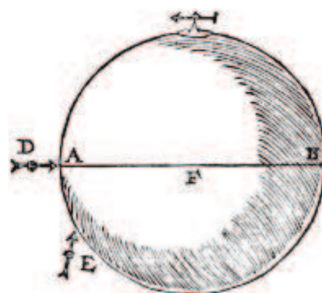
Elektrostatické pole je vyvoláno nepohyblivými náboji. Vlastnosti elektrostatického pole jsou popsány vektorem intenzity elektrického pole \mathbf{E} . Vektor intenzity elektrického pole je závislý na velikosti a vzájemné poloze elektrických nábojů. Elektrostatické pole v okolí bodového náboje je zobrazeno na Obrázku 1.2



Obrázek 1.2: Elektrické pole bodového náboje.

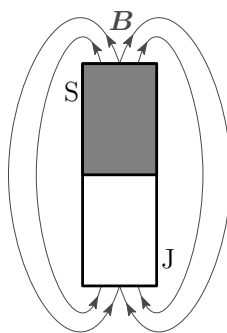
1.1.2 Země je magnet

Při pokusech s kulovým magnetem zkoumal inklinaci (úhel mezi vodorovinou a magnetickou siločárou) střelky kompasu a došel k závěru, že Země je též magnet. Původně bylo směřování střelky kompasu vysvětlováno „magnetickými horami“ na zeměpisných pólech Země, které měly získávat svou přitažlivost od Polárky na nebeském pólu. Gilbert tak pohyb střelky kompasu zahrnul do pravidla, že shodné póly magnetu se odpuzují a opačné póly se přitahují, které formuloval Petrus Peregrin, francouzský matematik a filosof 13. století. [4][14][12][7]



Obrázek 1.3: Gilbertův zmenšený model Země používaný k měření magnetické inklinace (převzato z [4]).

Magnetické pole permanentního magnetu je buzeno magnetickými dipóly. Magnetické dipóly vznikají působením elementárních proudů (pohyb elektronů v atomech). Vlastnosti magnetického pole jsou popsány vektorem magnetické indukce \mathbf{B} . Magnetická indukce odpovídá intenzitě elektrického pole \mathbf{E} v elektrickém poli. Magnetické indukční čáry permanentního magnetu vycházejí ze severního pólu magnetu, směřují k jižnímu pólu (Obrázek 1.4).



Obrázek 1.4: Magnetické pole permanentního magnetu.

1.2 Stephen Gray(1666-1736)

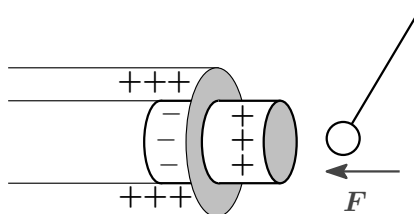
Stephen Gray byl britský amatérský fyzik, povoláním holič, který se zabýval elektřinou, magnetismem a optikou. Jeho práce byla inspirovaná Francisem Hauksbeem, brit-

ským fyzikem zabývajícím se elektrostatikou a konstruktérem prvního generátoru statické elektřiny. [4][15]

Výzkumu elektřiny se věnoval mezi lety 1729 a 1736. V letech 1731 a 1735 publikoval svou vědeckou práci v níž popsal řadu zásadních objevů. Zřejmě nejdůležitějším byl Grayův objev vodivosti. Gray také demonstroval a popsal řadu jevů, které byly prozkoumány a vysvětleny až jeho následovníky např. zákon zachování náboje pokusem se zavěšeným chlapcem, nebo rozložení volného náboje na povrchu vodiče. [4][15]

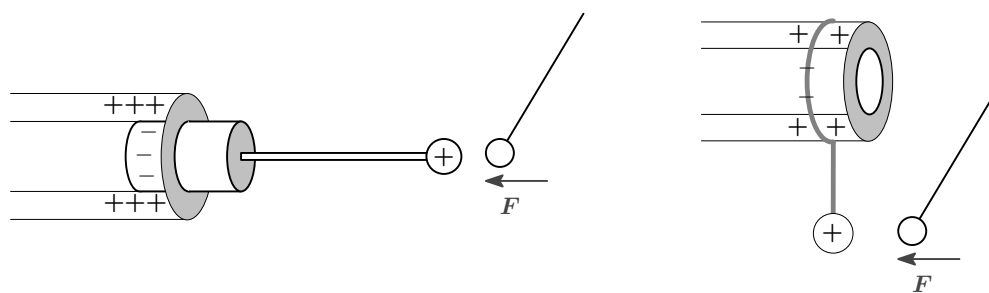
1.2.1 Elektrizace komunikací

K prvním pokusům používal skleněnou tubu na obou stranách utěsněnou korkovými špunty, aby nedocházelo k usazování prachu a vlhkosti na vnitřní stěně. Když se chtěl ujistit, že korkové ucpávky samotné neovlivňují přitažlivé vlastnosti nabitě skleněné tuby, všiml si, že po tření tuby je elektrické kyvadlo (nástroj určený ke sledování elektrostatických jevů, jedná se o lehký vodivý disk zavěšený tenkým vláknem na nevodivém rámu (sekce 2.1.2)) přitahováno i korkovými ucpávkami (Obrázek 1.5). Jelikož byl korek veden jako neelektrický materiál, podrobil jev důslednému zkoumání. Poté, co potvrdil přitažlivou sílu korku, začal zkoušet další neelektrika a byl tak prvním, komu se povedlo elektrizovat (nabít) neelektrika. Jevo nazval elektrizace komunikací (v originále electrification by communication). [5][12]



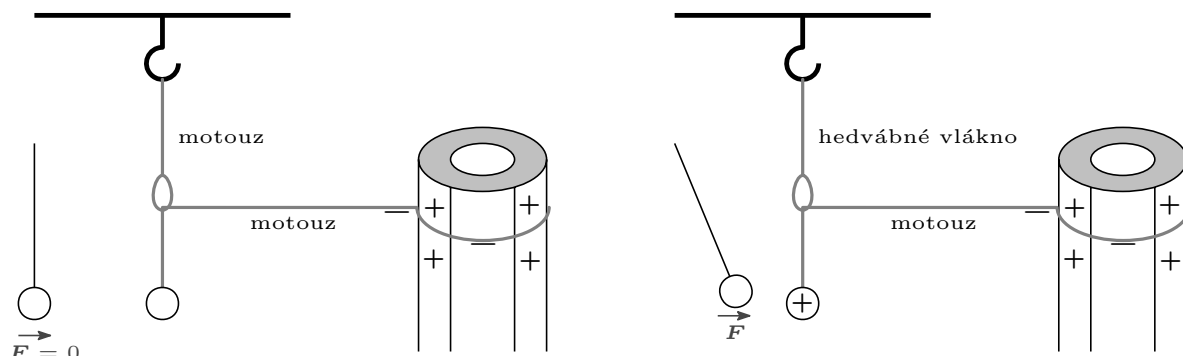
Obrázek 1.5: Dotykem nabitá korková zátka v otvoru na konci skleněné tuby.

Gray se pokoušel elektrický náboj (Gray používal pojem elektřina) přenést na stále větší vzdálenosti. Ke skleněné tubě připevnil devítimetrovou dřevěnou tyč, jejíž vzdálený konec byl po tření tuby nabit (Obrázek 1.6(a)). Kvůli silným vibracím však nemohl pokračovat s vedením elektrického náboje silnými tyčemi, začal proto používat jutový motouz s korkovou koulí na konci. V jednoduchém uspořádání, kdy vlákno spouštěl z okna, přenesl elektrický náboj na 10 metrů (Obrázek 1.6(b)). [5][12][15]



Obrázek 1.6: Přenos náboje kontaktem dřevěnou tyčí a jutovým motouzem.

Ve snaze dosáhnout delších vzdáleností vyrobil z motouzu závěsná oka pověšená na hřebíky zatlučené do stropních trámů (Obrázek 1.7(a)). Po tření tuby však korek nejevil nejmenší známky elektrické přitažlivosti. Usoudil, že elektrický náboj se cestou ke korku „ztrácí“ (náboj byl sveden závěsným motouzem do země). Jeho kolega G. Wheler navrhl použít k podpoře motouzu tenké hedvábné vlákno. Po výměně závěsů korek opět přitahoval disk elektrického kyvadla (Obrázek 1.7(b)), hedvábné vlákno má tedy mnohem nižší vodivost než jutový motouz a náboj není sveden do země. K dříve objevené vodivosti tak přibýly izolační vlastnosti některých předmětů. [5][12][15]

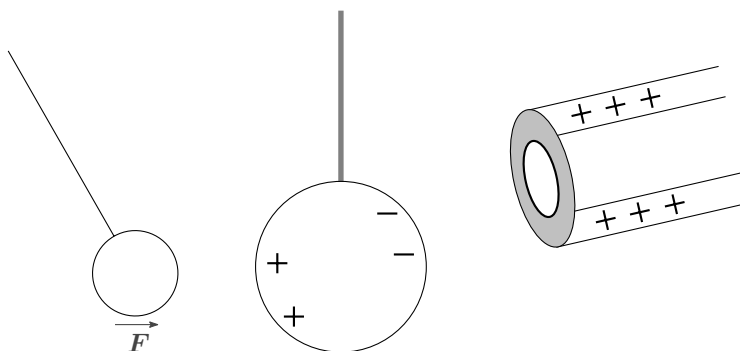


Obrázek 1.7: Grayův objev izolantů.

Gray se domníval, že schopnost přenášet náboj je dána rozměry vodiče, hedvábné vlákno bylo přibližně pětkrát tenčí než motouz. Tento pohled přehodnotil poté, co přenesl náboj kovovým drátem, který byl stejně silný jako hedvábné vlákno, na vzdálenost 270 metrů. Nakonec došel k závěru, že vodivost je dána intrinsickými vlastnostmi materiálů. Přestože sám nadále používal stávající rozdělení materiálů na elektrické a neelektrické, pouze elektrickým přiřadil novou vlastnost „nevodivost“, položil základy novému rozdělení materiálů na vodiče a izolanty, které je platné dodnes. [5][12][15]

V následujícím pokusu zavěsil olovené závaží na nevodivé vlákno a pozoroval, že závaží začalo přitahovat elektrické kyvadlo při pouhém přiblížení třené skleněné tuby (Obrázek 1.8). Objevil tak, že k elektrizaci komunikací není nutný dotyk mezi dotýčnými předměty. [5][12][15]

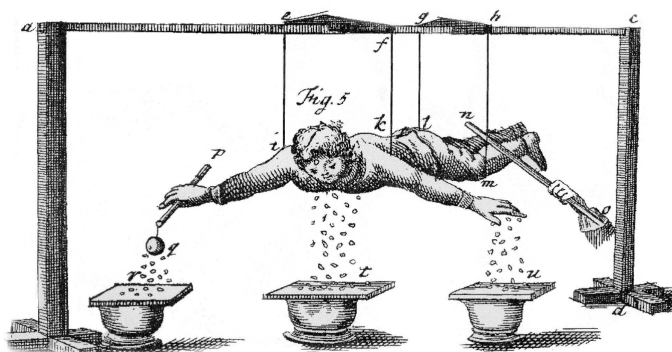
Dnes víme, že Grayem popsána elektrizace komunikací zahrnuje dva jevy, a to indukci náboje ve vodiči ve vnějším elektrickém poli (podrobně popsána v sekci 2.5.1) a polarizaci dielektrika ve vnějším elektrickém poli (podrobně popsána v sekci 2.5.2).



Obrázek 1.8: Grayův objev indukovaného náboje ve vnějším elektrickém poli.

1.2.2 Pokus se zavěšeným chlapcem

V roce 1731 provedl Gray experiment, který získal celosvětový ohlas. Elektricky nevodivými lankami zavěsil naležato malého chlapce. K jeho nohám na nevodivou podložku postavil jednoho kolegu, u chlapcovy hlavy stál druhý kolega s elektrickým kyvadlem. Když Gray k chlapci přiblížil nabitou skleněnou tyč, začal přitahovat elektrické kyvadlo. Poté, co izolovaný muž přiblížil ruku ke chlapcovým nohám, došlo mezi nimi k výboji, po němž chlapec ztratil znatelnou část své elektrické přitažlivosti, naopak izolovaný muž elektrickou přitažlivost nabyl. [5][12][15]



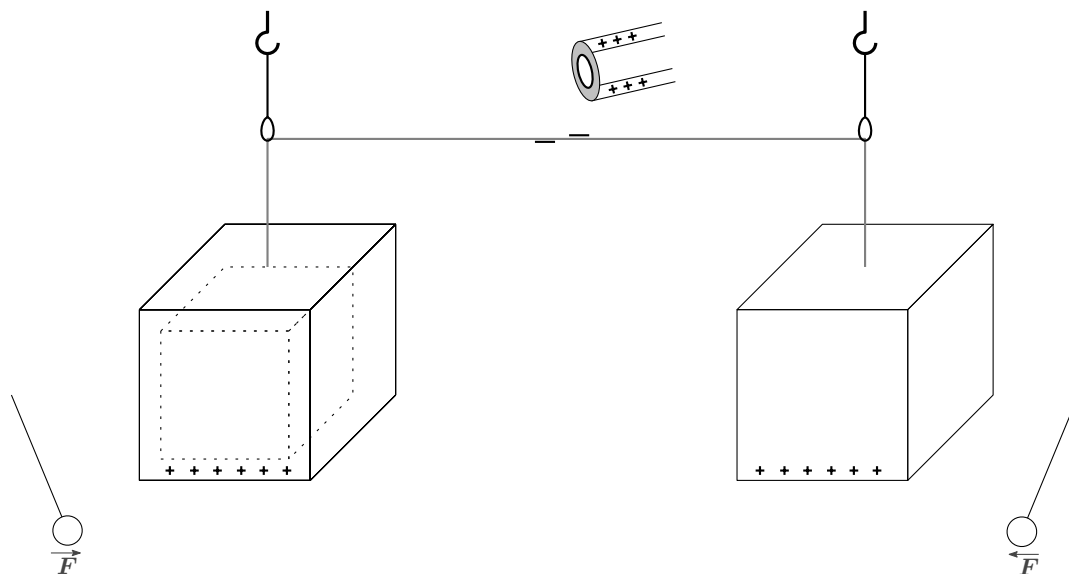
Obrázek 1.9: Dobový náčrtek Grayova pokusu se zavěšeným chlapcem (převzato z [5]).

Jednalo se o první demonstraci zákona zachování náboje, na jejímž základě se Gray domníval, že elektrická hmota třením nevzniká, ale je pouze předávána mezi jednotlivými předměty. Princip zachování náboje, tedy že elektrický náboj třením dvou předmětů nevzniká, ale je mezi předměty pouze předáván, v 18. století dále studoval a nakonec prosadil Benjamin Franklin, americký matematik, vynálezce a politik. [5][12][15]

1.2.3 Rozložení volného náboje na povrchu vodiče

Gray se dále zabýval otázkou, zda je intenzita elektrické přitažlivosti (Coulombova síla) závislá na objemu nabitě hmoty, podobně jako je hmotou dána síla gravitační. Proto zavěsil dvě dubové kostky stejných rozměrů, jednu dutou, jednu plnou, na nevodivá vlákna

několik metrů od sebe. Jak se můžeme přesvědčit v sekci 2.2, dřevo se v elektrostatických pokusech chová jako vodič. Kostky následně propojil kovovým drátem, ke kterému v polovině délky přiložil nabitou skleněnou tyč (Obrázek 1.10). Přitažlivou sílu obou kostek sledoval elektrickými kyvadly. Žádný rozdíl nepozoroval, a ač neměl přesná měřidla, usoudil, že na elektrické přitažlivosti se podílí jen plocha vodiče, ovšem dále věřil, že elektrická hmota prochází celým objemem tělesa. [5][12][15]

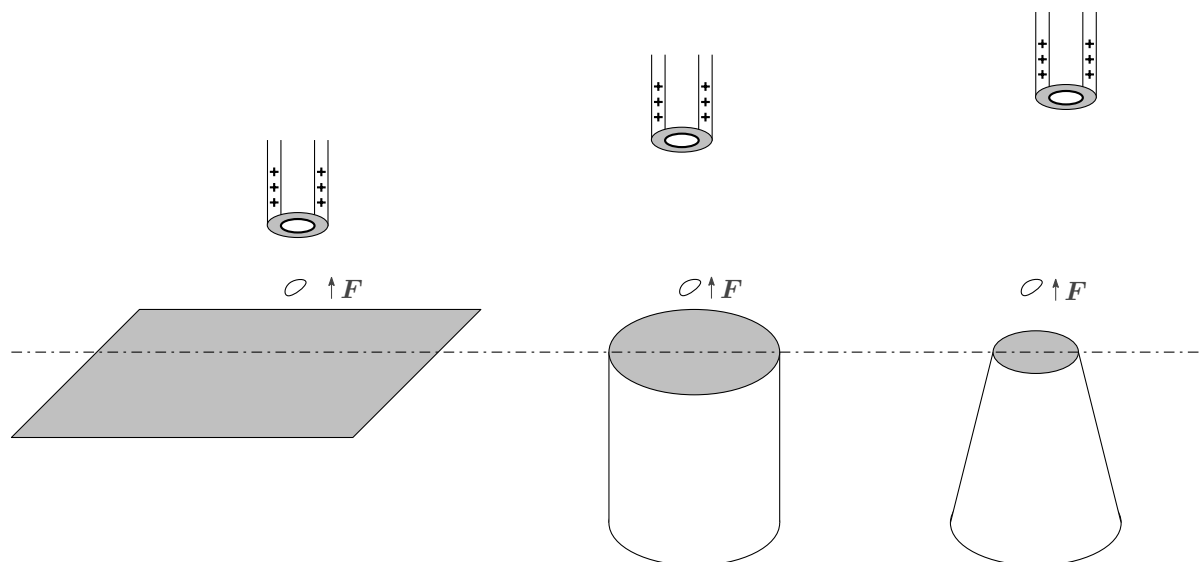


Obrázek 1.10: Demonstrace rozložení indukovaného náboje na povrchu vodiče porovnáním přitažlivosti duté a plné dřevěné kostky.

Demonstroval tak povrchové rozložení volného náboje na povrchu vodiče popsané v sekci 2.4.1

1.2.4 Zesílení elektrické přitažlivosti tvarem vodiče

Během následující série pokusů Gray pozoroval rozdíly v přitažlivé síle v závislosti na tvaru podstavce pro přitahované mosazné lístky. Rozdíl mezi deskou stolu a komolým kuželem byl až trojnásobný (Obrázek 1.11). [4]



Obrázek 1.11: Porovnání vzdálenosti potřebné k přitažení lístku v závislosti na použité podstavě.

Jedná se o první popis tzv. síly bodů (z anglického power of points), tedy větší intenzity elektrického pole v okolí ostrých a špičatých oblastí vodičů v porovnání s plochými a oblými (podrobně popsáno v sekci 2.4.2).

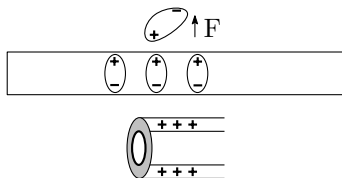
1.3 Charles François de Cisternay Du Fay (1698-1739)

Charles Du Fay byl francouzský fyzik a člen Francouzské Akademie věd. Výzkumu elektřiny se věnoval v letech 1733 a 1734. Vyvrátil obecně přijímané pravidlo, že veškeré materiály lze rozdělit na elektrické a neelektrické, a to tak, že popsal podmínku pro elektrizaci neelektrik (vodičů), izolaci tělesa od země. Spolu s J. Desagulierem zavedli nové rozdělení materiálů pod názvy vodiče a izolanty, kterému položil základy S. Gray. Při opakování pokusů Otto von Guericke, německého vědce a politika 17. století, pozoroval a popsal jednoduchý, přesto důležitý, mechanismus ACR (Attraction-Contact-Repulsion). Z pozorování výjimky z ACR, kdy i předmět nabitý kontaktem bylo možné přitahovat jiným nabitým předmětem, nakonec vzešel objev dvou druhů náboje, které, vzhledem k použitým materiálům, nazval „resinous“ (náboj pryskyřičných látek) a „vitreous“ (náboj průhledných látek), dnes nazývané pozitivní a negativní. [12][15]

1.3.1 Elektrostatické odpuzování

V roce 1733 byl Du Fay upozorněn na pokus se střelným prachem a nabitou voskovou tyčí, při kterém docházelo k odpuzování zrněk prachu. Ač bylo odpuzování mnohokrát pozorováno, bylo považováno za zdánlivý, případně druhotný, jev způsobený prouděním vzduchu, nebo přitahování jiným předmětem v okolí, který též nedopatřením obdržel elektrický náboj. Pro ověření Du Fay položil zlaté lístky na křemennou desku (Obrázek 1.12).

K desce zespodu přiblížil nabitou voskovou tyč, načež se lístky začaly z desky zvedat. V širším okolí nebylo žádných jiných předmětů, které by mohly na lístky jakkoli působit. Byl tak prvním, kdo popsal elektrické odpuzování jako samostatný jev, rovnocenný elektrickému přitahování. Oba jevy poté sjednotil pod elektrické působení. [4]



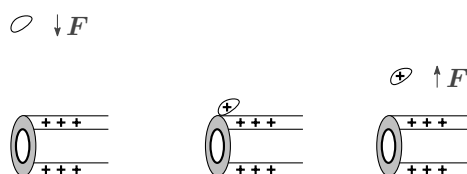
Obrázek 1.12: Odpuzování lístku z křemenné desky (na horní straně polarizované desky je odpuzován lístek s indukovaným nábojem stejné polarity).

1.3.2 Objev principu Attraction-Contact-Repulsion

V dalším pokusu vypustil zlatý lístek nad nabitou skleněnou tyčí. Lístek byl k tyči přitahován, až došlo k doteku, po němž začal být lístek odpuzován. Na základě toho formuloval jednoduché pravidlo:

„Elektrická tělesa přitahují všechna neelektrická, a to do chvíle, kdy se sama stanou elektrickými kontaktem, či přiblížením, s elektrickým tělesem.“ [4]

Objevenému jevu dal název ACR (Attraction-Contact-Repulsion).



Obrázek 1.13: ACR.

Po dotyku vodivého lístku s nabitou tyčí dojde k předání náboje a nabití lístku shodnou polaritou. Jelikož se náboje shodné polaritty odpuzují, začne lístek stoupat vzhůru.

1.3.3 Dva typy elektřiny (náboje)

Du Fay se domníval, že pravidlo ACR je platné obecně, pro ověření zkušel lístek nabitý skleněnou tyčí odpuzovat druhou, též nabitou skleněnou tyčí. I v tomto případě byl lístek odpuzován. Následně druhou skleněnou tyč nahradil tyčí z vosku. I přestože byl lístek odpuzován první skleněnou tyčí, k nabitě voskové tyči byl přitahován. Tato výjimka ho vedla k závěru, že existují dva druhy náboje. [12][15]

Pro různé druhy náboje (Du Fay používal název elektřina) formuloval pravidlo:

„Elektrifikovaná tělesa odpuzují ta, která obdržela stejný druh elektřiny a přitahují ta, která obdržela druh opačný.“ [15]



Obrázek 1.14: Du Fayův objev dvou nábojů pozorováním výjimky z ACR.

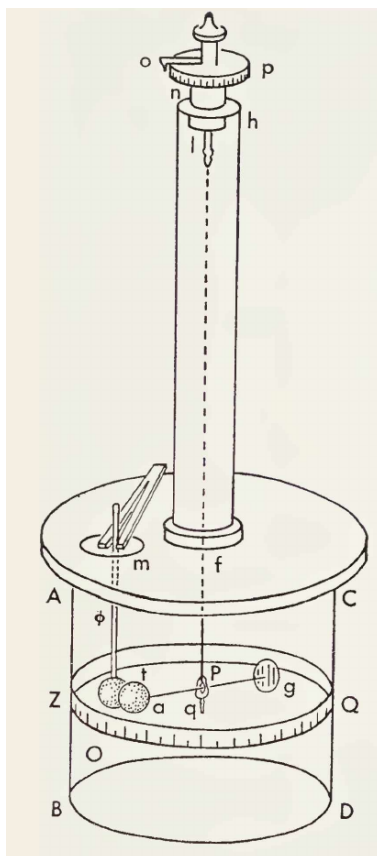
Domníval se, že každá látka může obdržet pouze jeden druh náboje nezávisle na materiálu, kterým byla třena. Pro ověření nabil několik materiálů z každé skupiny jak rukou, tak hedvábným hadříkem. Každá látka obdržela náboj odpovídající jejímu zařazení, a tak Du Fay usoudil, že jeho domněnka byla správná. Ač myšlenka dvou druhů elektřiny (dnes dvou nábojů) byla správná, jeho rozdělení bylo později překonáno. Jelikož může každá látka obdržet oba typy náboje, pozbylo rozdělení na „průhlednou“ a „pryskyřičnou“ elektřinu smyslu a bylo B. Franklinem nahrazeno pozitivním a negativním nábojem. [4][12]

1.4 Charles-Augustin de Coulomb (1736-1803)

Charles Coulomb byl francouzský matematik a fyzik. Coulombova vědecká práce byla založena na matematickém vyjádření zákonů elektrostatiky a magnetismu. Byl prvním, kdo využíval kvantitativní metody měření elektrických a magnetických sil, narozdíl od svých předchůdců, kteří se zaměřovali pouze na kvalitativní popis experimentů. [11][10]

1.4.1 Coulombova torzní váha

K měření elektrostatických sil Coulomb sestrojil tzv. torzní váhu (Obrázek 1.15). Zařízení se skládalo ze skleněného válce (ABCD) zakrytého skleněnou deskou se dvěma otvory. Nad první otvor (f) byla připevněna skleněná tuba s citlivým tenzometrem na vrchu (n). K tenzometru byla stříbrným vláknem (P) připevněna volně otočná střílnka s koulí z bezového dřeva (a) na jednom konci a papírovým diskem pro vyvážení a tlumení oscilací (g). Druhým otvorem poblíž obvodu desky (m) byla spuštěna druhá, nepohyblivá, bezová koule (t) stejných rozměrů jako koule zavěšená z tenzometru. Na obvodu skleněného válce byla zobrazena stupnice (ZQ), ze které byl odečítán úhel natočení střílnky. [12][10]



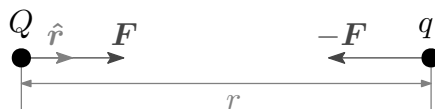
Obrázek 1.15: Coulombova torzní váha (převzato z [10]).

Výchozí polohu strelky upravil tak, aby se bezové koule dotýkaly. Poté kouli (t) vyjmul a nabil elektrickým nábojem. Když nabitou kouli vrátil do přístroje, dotykem se nabila i koule na strelce (a) a jelikož náboje shodné polarity odpuzují, začala se strelka otáčet. Ze stupnice (ZQ) zaznamenal úhel otočení strelky. Bezovou kouli (m) z přístroje vyjmul, aniž by ji vybil. Otočením tenzometru na vrchu tuby (n) upravil výchozí polohu strelky a zvětšil vzdálenost mezi koulemi. Nabitou kouli (m) opět vrátil do přístroje a zaznamenal úhel otočení strelky. Sílu poté spočítal ze součtu úhlů vychýlení a přednastavení tenzometru a ze známého kroutivého momentu potřebného k deformaci stříbrného vlákna. [10]

Z výsledků měření odvodil vztah pro elektrostatickou sílu působící mezi dvěma bodovými náboji – Coulombův zákon[12][10]:

$$\mathbf{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qQ}{r^2} \hat{\mathbf{r}}, \quad (1.1)$$

kde \mathbf{F} je síla, ϵ_0 je relativní permitivita vakua, q a Q jsou náboje, r je vzdálenost mezi středy nábojů a $\hat{\mathbf{r}}$ je jednotkový vektor udávající směr spojnice středů nábojů (Obrázek 1.16).



Obrázek 1.16: Síla mezi opačně nabitými náboji.

1.5 Hans Christian Ørsted (1777-1851)

Hans Christian Ørsted byl dánský profesor fyziky, zastával názor, že většina fyzikálních jevů má společný původ v jediné přírodní síle. Proto se zabýval souvislostmi mezi různými fyzikálními jevy např. mezi elektřinou a teplem (nezávisle na Seebeckovi objevil termoelektrický jev). [11]

Mnohem významnějším objevem byl vztah mezi vodičem připojeným ke zdroji elektrického napětí a magnetismem, který oznámil v roce 1820. Jev, dnes považovaný za samozřejmost, byl v té době převratný hned v několika směrech. Došlo ke sjednocení dvou větví vědeckého zkoumání, galvanických (dřívější název pro „elektřinu“ pocházející z Voltova galvanického článku; panovalo přesvědčení, že se liší od „elektřiny“ působící elektrostatické jevy) a magnetických jevů, do jedné. Dále z povahy pokusu plynulo, že objevil nový typ síly, totiž necentrální. Do té doby známé síly, gravitační a Coulombova, působí ve směru spojnice dvou ovlivňujících se hmotných bodů, jím objevená síla působila ve směru tečny ke kružnici se středem ve vodiči připojeném k napětí. [11][13]

V době jeho objevu nebyl definovaný pojem elektrický proud, to, spolu s chybějícím aparátem pro popis geometricky složitého uspořádání, zapříčinilo „kotrbatý“ popis jevu, ve kterém se, na jeho 4 stranách, navíc omezil pouze na kvalitativní stránku věci.

1.5.1 Pohyb střelky kompasu v blízkosti proudovodiče

Poprvé se o souvislosti elektřiny a magnetismu Ørsted zmínil v roce 1812, ale podrobné zkoumání začal až v červnu 1820. Během několika týdnů provedl řadu pokusů s vodičem připojeným k Voltově článku (první elektrický článek a zdroj stabilního stejnosměrného proudu sestavený Alessandrem Voltou v roce 1799) v blízkosti magnetky kompasu. Přestože se mu podařilo dokázat souvislost, jednoduché uspořádání pokusu vedlo k nespolehlivým výsledkům. To je také jeden z důvodů, proč se ani nepokoušel nalézt exaktní matematické vyjádření. Ovšem vyslovil hypotézu elektrického konfliktu, která se opírala o následující body [13][8][6]:

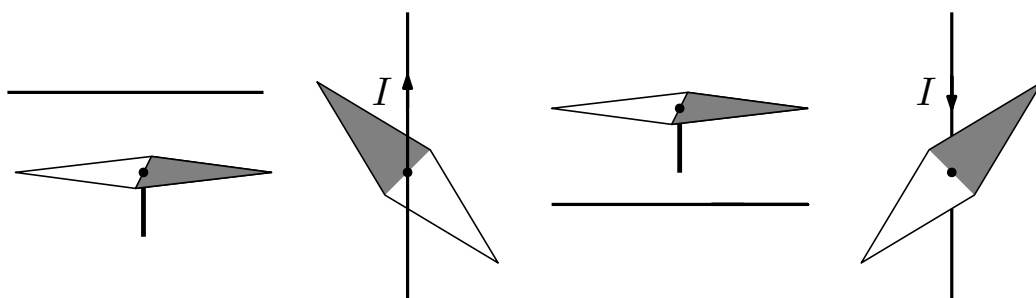
- elektrický konflikt působí na magnet
- konflikt není uzavřen ve vodiči, ale působí i v jeho okolí
- konflikt tvoří kolem vodiče víry

Sám Ørsted výsledky pokusu, kdy vodič umístil vodorovně, paralelně a nad magnetku (viz Obr. 1.17), popsal následovně :

„V tomto uspořádání se magnetka pohne, a to tak, že konec bližší záporné straně článku se pohne směrem na západ. Při vzdálenosti mezi vodičem a magnetkou přibližně $\frac{3}{4}$ palce, výchylka byla přibližně 45° . S rostoucí vzdáleností výchylka klesala, se snižující se vzdáleností výchylka rostla.“ [13]

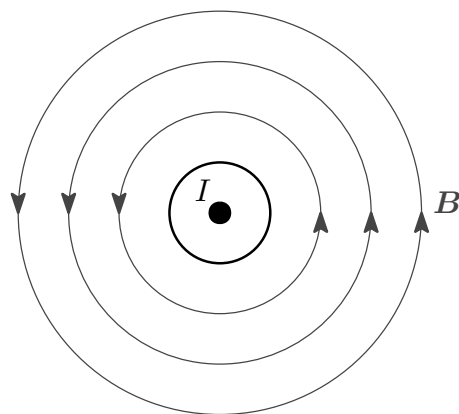
Nakonec formuloval jedno obecné pravidlo:

„Konec magnetky nad kterým vstupuje záporná elektrina se otočí na západ, vstupuje-li pod, otočí se na východ.“ [13]



Obrázek 1.17: Vliv proudovodiče na magnetku.

Magnetické pole kolem vodiče je vyvolané pohybem elektrického náboje (elektrickým proudem). Neproměnný stejnosměrný proud vyvolává stacionární magnetické pole. Vlastnosti magnetického pole jsou popsány vektorem magnetické indukce \mathbf{B} (Obrázek 1.18). Vektor magnetické indukce je závislý na velikosti a vzájemné poloze, směru a rychlosti elektrických nábojů.



Obrázek 1.18: Magnetická indukce \mathbf{B} v okolí vodiče protékaného stejnosměrným proudem I .

1.6 Dvojice Biot-Savart

Jean Baptiste Biot (1774-1862) byl profesor fyziky na Pařížské univerzitě (Université de Paris). Věnoval se především optice, objevil polarizaci světla při lomu a většinu života

zastával korpuskulární (částicovou) teorii světla. Názor na vlnovou teorii změnil až s Foucaultovými experimenty. [3]

Felix Savart (1791-1841) byl vojenský chirurg, který se zajímal o fyziku. Zaslouhou svého přítele Biota získal místo profesora fyziky na Collège de France, kde se věnoval akustice a lidskému sluchu. [3]

Společně se vědecké právi věnovali od roku 1819. Na začátku září 1820 se dvojice dozvěděla o pokusech provedených Ørstedem. Rozhodli se nalézt matematický popis nového jevu. Výsledky prvního pokusu předvedli Akademii věd v Paříži 30. října 1820. Vztahy plynoucích z pokusu druhého předvedli 18. prosince téhož roku. Přednášky podané Akademii věd nebyly vydány, místo nich vydali dva články, první ještě v roce 1820, druhý v květnu 1821 a nakonec celou svou práci Biot shrnul ve druhém (1821) a třetím (1824) vydání své knihy *Physique exp'perimentale*. [3]

1.6.1 Síla mezi magnetickou střelkou a přímým proudovodičem

Prvním pokusem se dvojice snažila zjistit závislost síly, kterou vodič protékaný proudem působí na magnetickou střelku, na vzdálenosti mezi nimi. Podobně jako C. Coloumb využili tlumení oscilací. K vyloučení vlivu magnetického pole Země použili silný permanentní magnet, který umístili tak, že magnetka (zatím bez vlivu proudu) mohla zaujmout libovolnou rovnovážnou polohu. [3][9]

Při vychýlení magnetky z rovnovážné polohy působí vratná síla, která se snaží magnetku vrátit do původního stavu (viz Obr. 1.19). Pro moment působící na magnetku je možné vyjádřit druhý Newtonův zákon pro rotační pohyb:

$$\mathbf{l} \times \mathbf{F} = \varepsilon J, \quad (1.2)$$

kde \mathbf{l} je délka magnetky, \mathbf{F} je síla působící na konec magnetky, ε je úhlové zrychlení a J je moment setrvačnosti vzhledem k těžišťové ose magnetky.

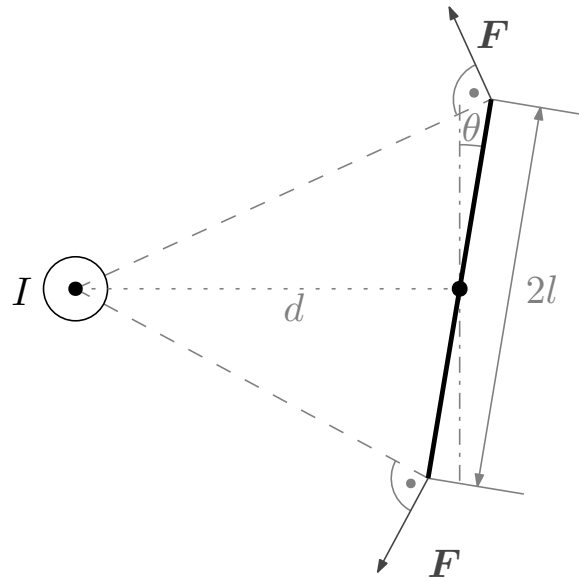
Po rozepsání vektorového součinu a vyjádření úhlového zrychlení pomocí úhlu vychýlení dostáváme:

$$-lF \sin(\theta) = \frac{d^2\theta}{dt^2} J \quad (1.3)$$

Po úpravě:

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} + \frac{lF}{J}\theta = 0, \quad (1.4)$$

kde θ je úhel vychýlení magnetky z roviny kolmé na kolmici na vodič. Výsledný vztah je analogický k pohybu kyvadla s malou výchylkou (předpokládáme, že platí $\sin(\theta) \simeq \theta$). Řešení obyčejné diferenciální rovnice vede na tlumené harmonické kmity, kde ω je úhlová



Obrázek 1.19: Síly působící na magnetku, kde I je proud, d je kolmá vzdálenost mezi středem vodiče a magnetky, $2l$ je délka magnetky, θ je úhel vychýlení magnetky z roviny paralelní se směrem proudu.

rychlost a T je perioda kmitů:

$$\omega = \sqrt{\frac{lF}{J}} \quad (1.5)$$

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = 2\pi\sqrt{\frac{J}{lF}} \quad (1.6)$$

Z výše uvedeného plyne, že působící síla je závislá na periodě kmitů:

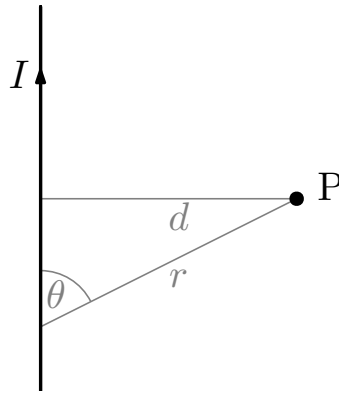
$$F \sim \frac{1}{T^2} \quad (1.7)$$

Tím získali možnost porovnávat síly v různých vzdálenostech. Z následných měření odvodili, že síla je nepřímo úměrná kolmé vzdálenosti mezi středem magnetky a vodičem, $F \sim \frac{1}{d}$. P. S. Laplace poté vyjádřil vztah pro sílu, kterou působí element vodiče ds jako závislost na převrácené hodnotě druhé mocniny vzdálenosti. Tím se tato síla zařadila mezi ostatní zákony inverzních čtverců. [11][3]

$$dF = K \frac{i ds}{r^2} f(\theta), \quad (1.8)$$

kde $f(\theta)$ je obecná funkce závislá na θ , i elektrický proud, K je konstanta závislá na zvolené soustavě jednotek, r je vzdálenost mezi magnetickou částicí (element střílky kompasu) a proudovým elementem, θ je úhel mezi přímou vzdáleností r a směrem proudu.

Cílem následujícího pokusu Biota a Savarta bylo popsat zatím neznámou funkci $f(\theta)$ ze vztahu (1.8), na níž je závislá elementární síla, kterou působí element vodiče. K aparátu z předchozího měření Biot a Savart přidali vedle přímého svislého vodiče další, tentokrát



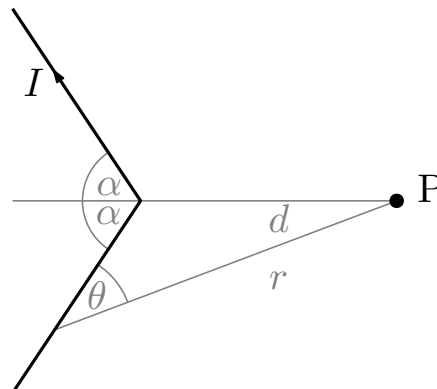
Obrázek 1.20: Silové působení přímého dlouhého vodiče na element magnetky P při průchodu stejnosměrného proudu I .

ohnutý vodič (Obrázek 1.21). Funkci úhlu chtěli odvodit porovnáváním sil, kterými působí rovný a ohnutý vodič. Nejdříve porovnávali síly při konstantním ohybu a měnili vzdálenost mezi magnetkou a vodiči, následně měnili ohyb druhého vodiče při konstantní vzdálenosti (Obrázek 1.21). Jejich první závěry vedly k přímé úměře celkové síly a úhlu α , $F \sim \frac{\alpha}{d}$. Svě výsledky publikovali a po kritice ze strany A. M. Ampéra a F. Savaryho měření opakovali s větší přesností. To dalo za pravdu jejich kritikům a publikovali přesnější vztahy pro celkovou i elementární sílu [3][9]:

$$dF = \frac{Ki ds}{r^2} \sin(\theta) \quad (1.9)$$

$$F = \frac{2Ki}{d} \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right), \quad (1.10)$$

kde i je elektrický proud, K je konstanta závislá na zvolené soustavě jednotek, r je vzdálenost mezi magnetickou částicí (element strelky kompasu) a proudovým elementem, θ je úhel mezi přímkou vzdáleností r a směrem proudu a α je polovina úhlu ohybu vodiče.



Obrázek 1.21: Silové působení zahnutého dlouhého vodiče na element magnetky P při průchodu stejnosměrného proudu I .

Vztah (1.10) byl nakonec zobecněn P. S. Laplaccem[11]:

$$d\mathbf{F} = Ki \frac{d\mathbf{s} \times \mathbf{r}}{r^3}, \quad (1.11)$$

kde $d\mathbf{s}$ je délkový element vodiče.

1.7 André Maria Ampère (1775-1836)

André Maria Ampère byl francouzský profesor fyziky a astronomie. Kromě toho se věnoval i botanice, zoologii, filozofii, matematice a elektromagnetismu. [11]

K práci v oblasti elektromagnetismu ho inspiroval Ørstedův objev. Z touhy vysvětlit podstatu pohybu magnetické střelky v blízkosti proudovodiče nakonec vzešel nový vědní obor, elektrodynamika, kterému Ampère položil pevné základy. Také proto ho J. C. Maxwell nazval „Newtonem elektrodynamiky“ a pojmenoval po něm jeden ze základních vztahů moderní elektrodynamiky, Ampèreův zákon celkového proudu, tedy 1. Maxwellovu rovnici. [11][3]

Jeho jednotná soustava elektromagnetických zákonů byla charakteristická základními fenomenologickými pravidly, která formuloval stylem „pokud-pak“. Nazval je obecná fakta. Tím, že se omezil pouze na makroskopický popis jevů, byla jeho teorie odolná proti změnám popisu mikroskopického. Nejvýraznějším příkladem je zavedení galvanického (dnes elektrického) proudu. [11][3]

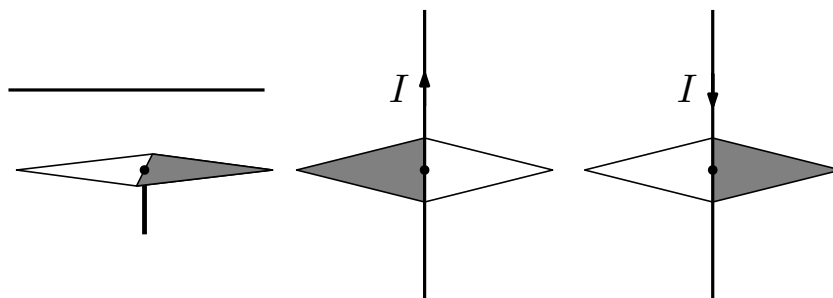
Aby zjednodušil popis složité geometrie používal proud pouze jako směrovou souřadnici, zpočátku dokonce ani netvrdil, že by vodičem cokoli skutečně teklo. Tím sloučil dvě prostorové souřadnice (baterii a vodič) do jedné. Geometrický popis dále zjednodušil formulací tzv. pravidla plavce, které následně upravil na pravidlo pravé ruky, to se dodnes uplatňuje pro určení směru produktu vektorového součinu. Pro elektrodynamiku a vztah mezi elektrickým proudem a magnetickým polem bylo zjednodušeno do podoby: „Položíme-li pravou ruku na vodič tak, aby palec ukázal směr proudu, prsty ukáží směr indukčních čar magnetického pole.“ [11][3][8]

1.7.1 První obecný fakt

Ørstedem pozorovaná 45° výchylka (sekce 1.5.1) byla dle Ampèra zvláštní. Domníval se, že v plném projevu síly od vodiče brání zemské magnetické pole. Na rozdíl od Biota a Savarta se rozhodl vliv Země vyrušit mechanicky tak, že položil osu rotace magnetky paralelně k siločárám magnetického pole Země. [3][8]

Při průchodu proudu vodičem umístěným nad střelkou v rovině kolmé na její střed pozoroval při ustálení výchylku 90s° (Obr. 1.22), a to nezávisle na vzdálenosti a intenzitě proudu. Na základě toho formuloval první ze svých tzv. obecných faktů, pravidlo zarovnání:

„Je-li magnetická strelka v blízkosti galvanického proudu, je jím veden její pohyb a pokaždé zaujme kolmou pozici ke směru proudu.“ [13]



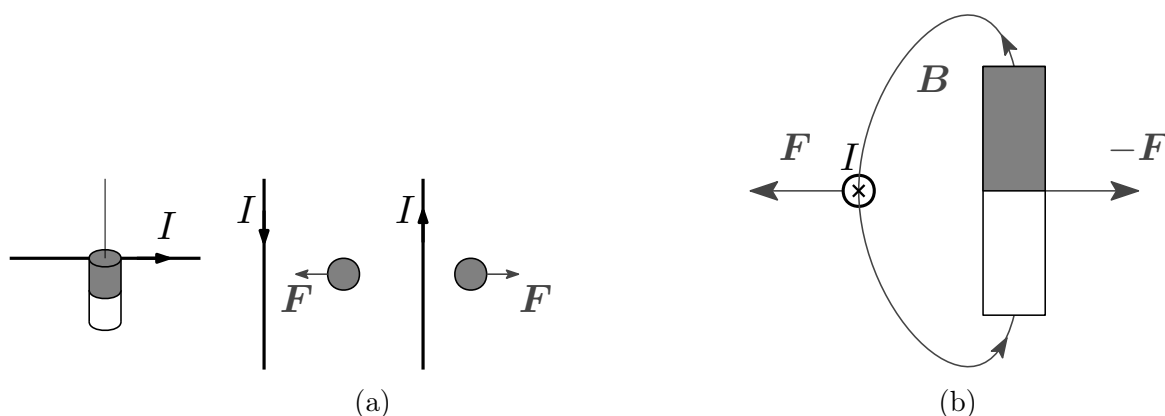
Obrázek 1.22: Strelka zaujímá kolmou polohu na směr proudu.

1.7.2 Druhý obecný fakt

Uvědomil si, že magnetickou strelku může použít jako „detektor proudu“. Tak zjistil, že proud protéká nejen vodičem, ale též baterií. Tak zavedl uzavřený (spojitý) obvod.

Pravidlo zarovnání vysvětlovalo výchylku magnetky umístěné přímo nad vodičem, avšak na výchylku magnetky v rovině vedle vodiče nepostačovalo. Proto ve svém druhém pokusu studoval interakci mezi permanentním magnetem zavěšeným vedle vodiče jako kyvadlo (viz Obr. 1.23). Na základě výsledků formuloval druhý obecný fakt, zákon přitahování a odpuzování [3][8]:

„Galvanický proud a magnet, jehož osa je kolmá na směr proudu, se, v souladu s předchozím pravidlem, přitahují, je-li severní pól nalevo od proudu, a odpuzují se, je-li severní pól napravo od proudu.“ [13]



Obrázek 1.23: Přitahování a odpuzování permanentního magnetu v závislosti na směru proudu.

Pro sílu působící na proudovodič v magnetickém poli Ampère později formuloval vztah dnes známý jako Ampèreův silový zákon:

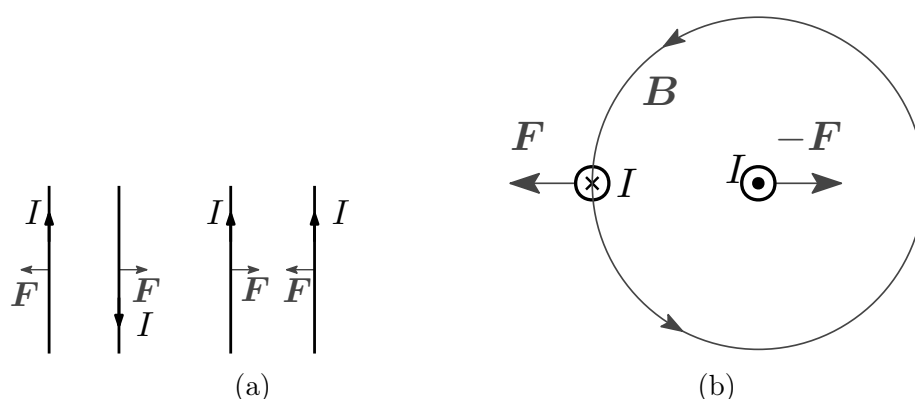
$$d\mathbf{F} = I d\mathbf{l} \times \mathbf{B}, \quad (1.12)$$

kde I je proud tekoucí vodičem, $d\mathbf{l}$ délkový element vodiče protékaného proudem a \mathbf{B} je magnetická indukce vnějšího magnetického pole. Použití obecného pravidla pravé ruky pro vektorový součin lze odvodit pohyb zavěšeného magnetu v blízkosti proudovodiče. Položíme-li ukazovák ve směru proudu (elementu vodiče), prostředník ve směru magnetické indukce působící na vodič, bude palec udávat směr síly působící na vodič. Jelikož v magnetickém poli platí třetí Newtonův pohybový zákon akce a reakce, působí na permanentní síla stejné velikosti, ale opačného směru. Směry vektorů pro rozložení z Obrázku 1.23(a) jsou zobrazeny na Obrázku 1.23(b).

1.7.3 Třetí obecný fakt

Dvě Ampèrem formulovaná pravidla plně postačovala k vysvětlení všech Øerstedem pozorovaných jevů a další předpovídala, např. inklinaci střelky z osy rotace. Původní cíl svého výzkumu, tedy dokončit a objasnit Øerstedovu práci, tím splnil, přesto pokračoval dál.

Při třetím pokusu předvedl, že dva paralelní proudovodiče na sebe silově působí. Pokud oběma vodiči protéká proud stejným směrem, vodiče se odpuzují, protéká-li každým vodičem proud opačným směrem, vodiče se přitahují (Obrázek 1.24). [13][3]



Obrázek 1.24: Přitahování a odpuzování dvou paralelních vodičů v závislosti na směrech proudu.

Pro sílu mezi dvěma paralelními proudovodiči platí Ampèrův silový zákon. Vnější magnetické pole působící na vyšetřovaný vodič je v tomto případě vyvoláno elektrickým proudem druhého vodiče. Použitím pravidla pravé ruky lze odvodit směr síly mezi dvěma vodiči. Síly mezi dvěma vodiči protékanými proudy opačným směrem jsou zobrazeny na Obrázku 1.24(b).

1.8 Michael Faraday (1791-1867)

Michael Faraday byl anglický fyzik a chemik. Neměl matematické vzdělání, proto veškerý svůj výzkum zakládal na pokusech (často je přezdíván filozofem experimentu) a výsledky

formuloval pouze slovně. I přesto je jeho dílo základem moderní elektrotechniky a zavedlo vzniku nové disciplíny – teorie elektromagnetického pole. [11]

Faradayův výzkum elektromagnetismu započal v roce 1820, když se s ním H. Davy zopakovali Oerstedovy pokusy. První výsledek se dostavil už v roce 1821, kdy sestrojil zařízení využívající permanentního magnetu a průchodu proudu vodičem k otáčivému pohybu – v podstatě první elektromotor. [3]

Svou vědeckou práci v oblasti elektromagnetismu shrnul do 3362 odstavců v roce 1855 v publikaci *Experimental Researches in Electricity*. [3]

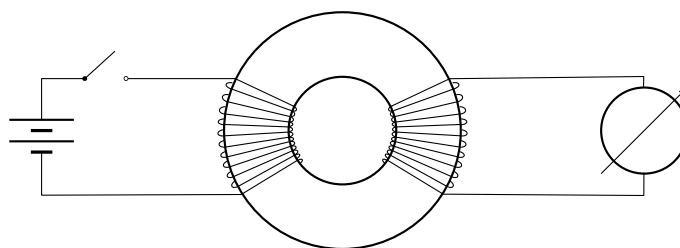
1.8.1 Elektromagnetická indukce

Již v roce 1822 se Faraday rozhodl nalézt inverzní jev k Oerstedovu objevu. Pomocí železného prstence se dvěma cívkami se snažil „vytvořit elektřinu magnetismem“ (Obrázek 1.25). Zpočátku měřil proud druhou cívkou při průchodu stejnosměrného proudu cívkou první. Po prvotním zklamání, že žádný proud nezjistil, si v roce 1831 všiml, že při připojení zdroje napětí k první cívce galvanometr ukázal proudový pulz. Při odpojení zdroje napětí byl pulz opačného smyslu. Pozorovaný jev nazval elektromagnetickou indukcí. Tím objevil induktivní vazbu, tedy princip transformátoru. [2][3]

Zákon elektromagnetické indukce je jediný matematický vztah, který Faraday vyjádřil:

$$u_i = -\frac{d\phi}{dt}, \quad (1.13)$$

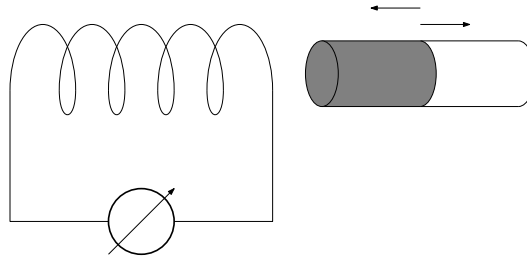
kde u_i je indukované napětí a ϕ je magnetický indukční tok spřažený s cívkou.



Obrázek 1.25: Toroidní magnetické jádro se dvěma vinutími.

1.8.2 Magnetoelektrická indukce

Po objevu elektromagnetické indukce své experimenty upravil tak, aby snáze našel její podstatu. Prstenec s navinutými cívkami nahradil jedinou cívkou se vzduchovým jádrem. Při pohybu permanentního magnetu v cívce ukazoval galvanometr procházející proud, jehož směr závisel na směru pohybu magnetu (Obrázek 1.26). Tento jev nazval magnetoelektrickou indukcí. Tím objevil princip generátoru a na jeho základě sestrojil v roce 1834 první dynamo a stejnosměrný motor. [8]



Obrázek 1.26: Pohyb magnetu cívkou.

2 Demonstrace principů elektromagnetismu

V návaznosti na historický kontext vývoje teorie elektromagnetického pole byly pro tuto práci zvoleny experimenty tak, aby byly ukázány základní principy elektrostatiky a elektrodynamiky.

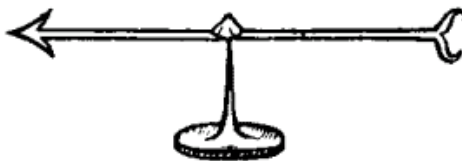
Nejprve jsou popsány nástroje potřebné k detekci elektrického náboje a pozorování elektrostatických jevů. Následuje popis a realizace pokusů z elektrostatiky a z elektrodynamiky.

2.1 Nástroje

Přitahování lehkých papírových odštívků je jednoduchá a celkem spolehlivá metoda detekce elektrického náboje. Pro pozorování složitějších jevů a principů však nedostačuje. Např. pozorování horizontálních sil je značně ztíženo zemskou přitažlivostí. Proto je, po vzoru prvních badatelů, nutné nalézt citlivější a konzistentnější nástroje.

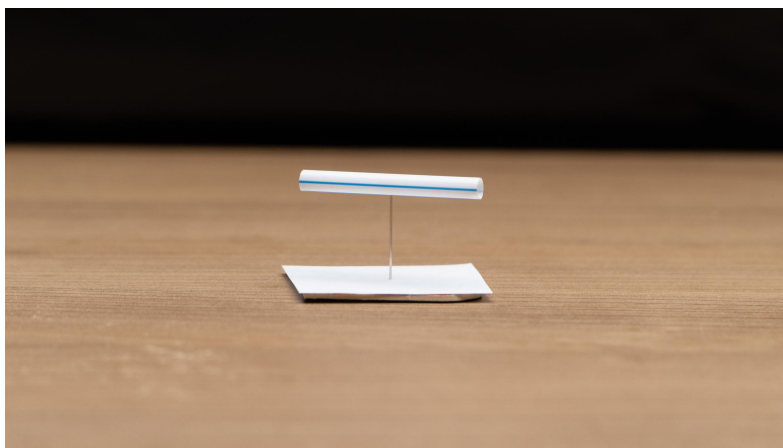
2.1.1 Versorium

Versorium je elektrostatickou obdobou magnetického kompasu, tedy lehká, otočná, střílka na pevné podstavě. Při přiblížení nabitého předmětu se orientuje ve směru siločar elektrostatického pole. Střílku lze vyrobit jak z vodiče, tak z izolantu. Orientace ve směru elektrických siločar nastane v obou případech. První sestavené versorium je připisováno W. Gilbertovi, který použil kovovou střílku (Obrázek 2.1).



Obrázek 2.1: Gilbertův náčrt versoria (převzato z [4]).

V této práci bylo použito versorium s nevodivou střílkou vyrobenou z nápojového brčka. Jako podstava slouží špendlík zapíchnutý v kartonové základně (Obrázek 2.2).



Obrázek 2.2: Versorium.

2.1.2 Elektrické kyvadlo

Elektrické kyvadlo se skládá ze závaží zavěšeného na pevném rámu. Jako závaží může být použit jak vodič, tak izolant, ovšem pro pozorování složitějších jevů např. ACR, je nutné použít vodič.

V této práci byl použit disk z hliníkové fólie zavěšený bavlněnou nití za nevodivý rám z nápojových brček. Celý rám je zajištěn v podstavě z polystyrenu.

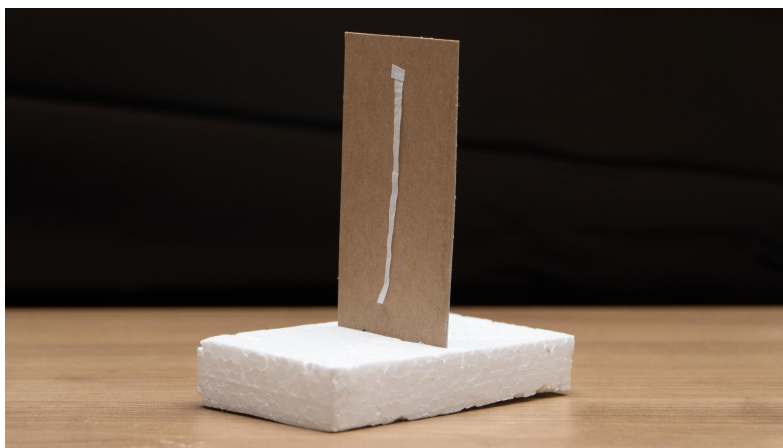


Obrázek 2.3: Elektrické kyvadlo.

2.1.3 Elektroskop

Elektroskop využívá k indikaci náboje jednoduchého faktu, že náboje shodné polarity se odpuzují. Skládá se ze 3 základních částí, vodivého indikačního proužku, který je vodivě spojen s vodivou základnou. Základnu elektroskopu je nutné umístit na nevodivou podstavu, aby nedošlo ke svedení elektrického náboje do země.

V této práci byl použit indikační proužek z tenkého papíru připevněný lepicí páskou ke kartonové základně a polystyrenová podstava (Obrázek 2.4).



Obrázek 2.4: Elektroskop.

2.2 Vodiče a izolanty

Materiály lze rozdělit na vodiče a izolanty. Vodiče mají volné náboje (ionty nebo elektrony), které se mohou pohybovat celým objemem tělesa, tedy umožňuje průchod elektrického proudu podél povrchu a vnitřním objemem. V izolantech jsou veškeré náboje pevně vázány na vnitřní strukturu a mohou se pohybovat pouze v rámci jednotlivých molekul, tedy neumožňují průchod elektrického proudu.

K vysvětlení elektrostatických jevů v následujících pokusech je nutné znát zařazení předmětů, které budou v pokusech použity. Testovány budou předměty z polypropylenu, akrylátu, dřeva a vnější izolaci CYKY kabelu z PVC, která je odolná průrazu do 2,5 kV.

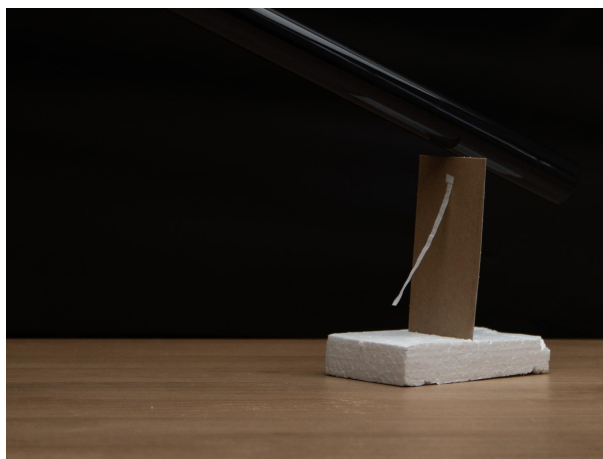
Rozdělení na vodiče a izolanty není absolutní a závisí především na napěťové hladině, které budou materiály vystaveny. Mimo napětí je rozdělení materiálů závislé na délce tělesa, tedy povrchové vzdálenosti mezi elektroskopem a zemí, a průřezu tělesa.

2.2.1 Podle elektroskopu

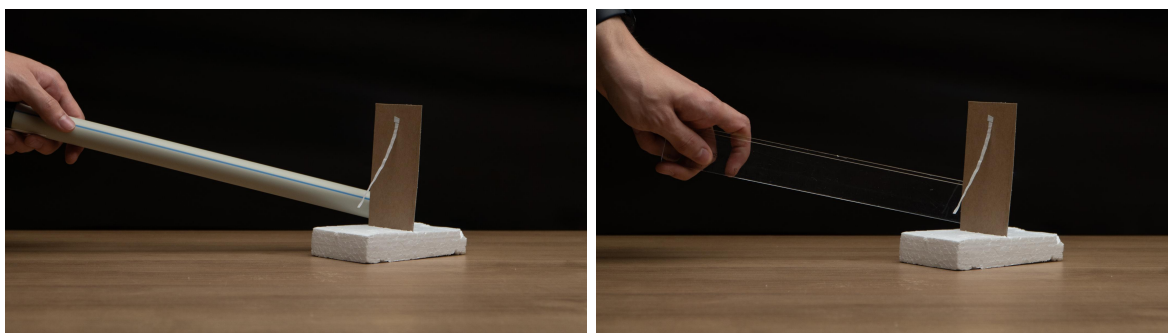
Třením nabitých izolantů mohou mít proti zemi napětí jednotky až desítky kV. Proto se materiály, v běžných podmínkách používány jako izolanty, při elektrostatických experimentech chovají jako vodiče.

Kritériem pro zařazení materiálu je vybití elektroskopu, tedy návrat indikačního proužku do svislé polohy, v „krátkém čase“ propojením základny elektroskopu a země (lidské tělo). Pro účely této práce byla hodnota „krátkého času“ stanovena na 5 sekund. K nabití elektroskopu použijeme třením nabitou tyč, kterou lehce přejedeme přes horní stranu základny (Obrázek 2.5).

Z vybraných materiálů můžeme mezi izolanty zařadit polypropylen a akrylát (Obrázek 2.6). Z vybraných materiálů můžeme mezi vodiče zařadit vnější izolaci kabelu CYKY a borovicové dřevo. Ze zařazení izolace z PVC mezi vodiče můžeme usoudit, že napětí vyskytující se při elektrostatických experimentech dosahuje minimálně 2,5 kV, tedy průrazného



Obrázek 2.5: Nabití elektroskopu.



Obrázek 2.6: Izolanty pro elektrostatiku.



Obrázek 2.7: Vodiče pro elektrostatiku.

napětí izolace udávaného normou.

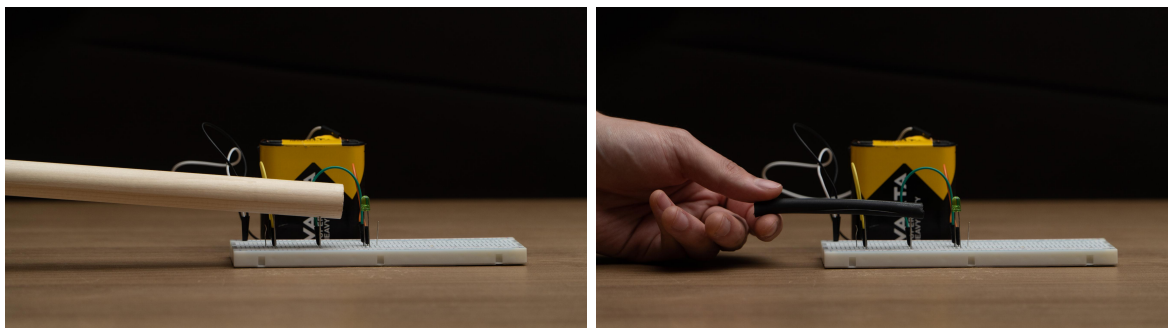
2.2.2 Podle rozsvícení LED

Pro rozdělení materiálu dle vodivosti v „běžných“ podmínkách lze použít LED připojenou k 4,5V baterii.

Kritériem pro zařazení materiálu je rozsvícení LED při uzavření obvodu spojením dvou kovových hrotů, mezi nimiž je přibližně 3cm mezera. Napětí diody v propustném směru $U_f = 3\text{ V}$, proud diodou v propustném směru $I_f = 20\text{ mA}$. Při napájecím napětí $U_0 = 4,5$

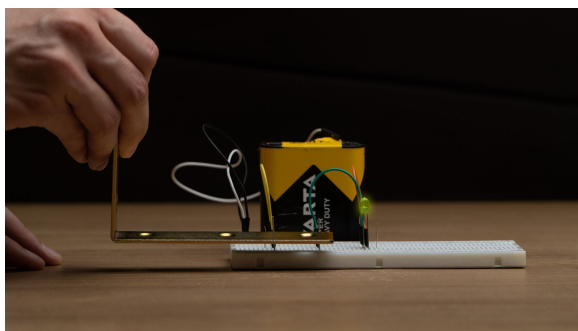
V lze maximální elektrický odpor pro rozsvícení LED spočítat jako:

$$R = \frac{U_0 - U_f}{I_f} = \frac{4,5 - 3}{0,02} = 75 \Omega \quad (2.1)$$



Obrázek 2.8: Izolanty pro běžná napětí (dřevo, CYKY izolace).

Pro velmi nízká napětí se jako izolant chová dřevo i vnější izolace kabelu CYKY, materiály pro elektrostatické pokusy vedené jako vodiče. Mezi vodiče pro velmi nízká napětí můžeme z vybraných materiálů zařadit pouze mosaz.



Obrázek 2.9: Vodiče pro běžná napětí (mosaz).

2.3 Nabíjení předmětů třením

Nabití předmětu třením se nazývá triboelektrický jev. Dnes je vysvětlována přesunem nábojů (elektrony/ionty) mezi povrchy materiálů, které při kontaktu vytvoří chemické vazby. Jedná se o nejčastější původ statické elektřiny. Mezi další patří elektrochemický, pyroelektrický (teplo) a piezoelektrický (tlak) proces. Nabíjena jsou vždy obě třená tělesa, a to nábojem opačné polaroty. Polarita obdrženého náboje závisí na vzájemné poloze materiálů v tzv. triboelektrické řadě (Tabulka 2.1).

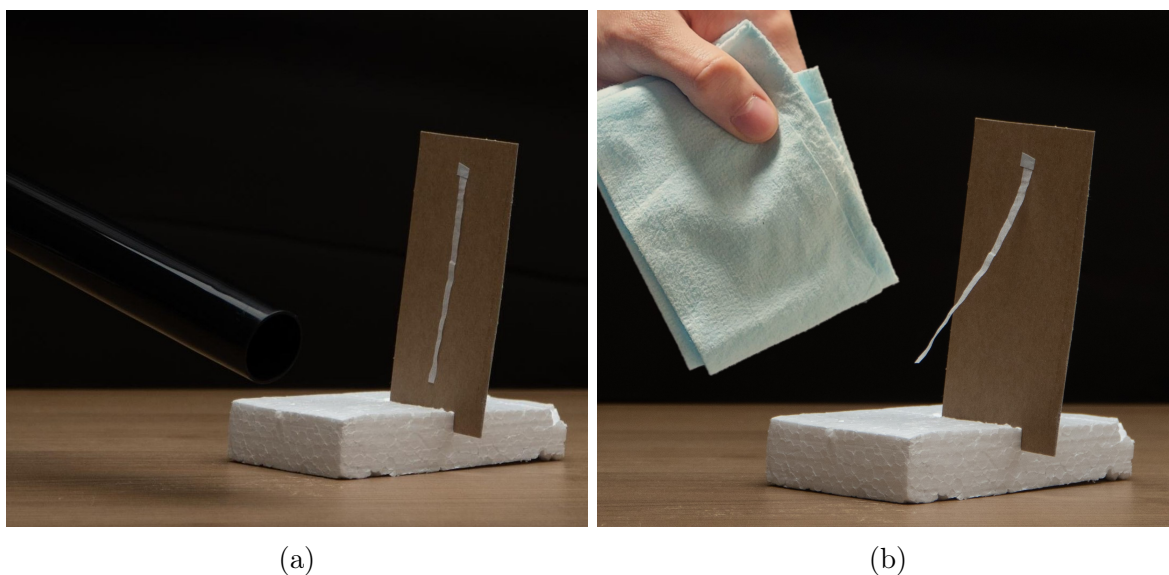
Vzájemná poloha dvou třených materiálů udává, který náboj každý z nich obdrží. Materiál blíže hornímu konci tabulky (+) bude nabit kladně, materiál blíže spodnímu konci tabulky (–) bude nabit záporně.

Nabití třených předmětů opačnou polaritou náboje můžeme pozorovat pomocí elektroskopu. Polyesterovou tkaninou nabijeme tubu z ABS. Dotykem základny elektroskopu a

Tabulka 2.1: Triboelektrická řada (převzato z [1]).

+
Polyuretan
Vlasy, kůže
Nylon
Papír
Dřevo
0
ABS
Akrylát
Polystyren
PVC
Polyester
Teflon
-

tuby elektroskop nabijeme. Jelikož má elektroskop náboj shodné polarity jako tuba, bude při přiblížení tuby indikační proužek odpuzován (Obrázek 2.10(a)). Po přiblížení třené tkaniny je indikační proužek přitahován (Obrázek 2.10(b)). To znamená, že elektroskop a nabitá tkanina jsou nabity opačnou polaritou náboje.



Obrázek 2.10: Nabítí třených materiálů opačnou polaritou náboje.

Z rozdílů mezi vodiči a izolanty plyne, že vodiče není možné nabít třením, pokud je držíme v ruce. Obdržený elektrický náboj je okamžitě sveden do země, kterou představuje naše tělo.

K ověření tohoto rozlišení využijeme lehké hliníkové lístky. Jednotlivé předměty se pokusíme nabít třením polyesterovou tkaninou. Bude-li předmět hliníkové lístky přitahovat, můžeme usoudit, že daný materiál patří mezi izolanty, nebude-li po tření přitahovat, můžeme usoudit, že materiál patří mezi vodiče.



Obrázek 2.11: Předměty nabité třením.

Výsledky pokusu potvrzují, že polypropylen a akrylát patří mezi izolanty, jelikož po tření polyesterovou tkaninou přitahují hliníkové lístky.



Obrázek 2.12: Předměty nenabitě třením.

Výsledky pokusu potvrzují, že náboj obdrženy třením byl dřevem a mosazí sveden do země. Proto tyto materiály patří mezi vodiče.

2.4 Kladně a záporně nabitě těleso

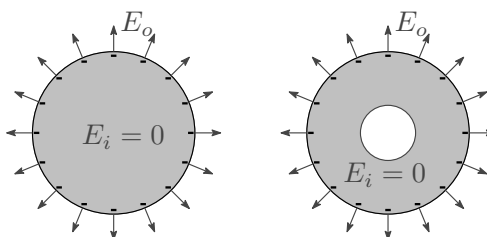
Tělesa nabývají vždy jednoho ze tří makroskopických stavů, mohou být neutrální (vybitá, bez náboje), pozitivní (nabitá kladným nábojem), negativní (nabitá záporným nábojem). Na základě stavů těles lze popsat jejich vzájemné chování, dvě neutrální tělesa na sebe vzájemně nepůsobí, nabitě (jak pozitivně, tak negativně) těleso přitahuje těleso neutrální. Tělesa nabitá shodným nábojem se odpuzují, tělesa nabitá opačným nábojem se přitahují.

Síla mezi dvěma náboji je popsána Coulombovým zákonem (3.1).

2.4.1 Nabitý vodič

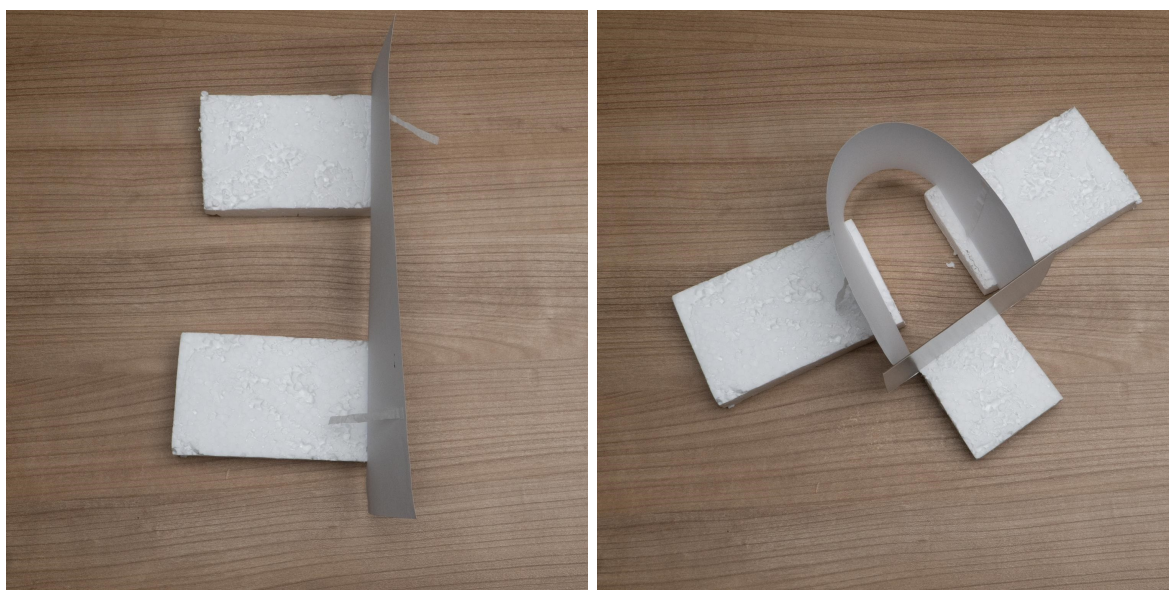
Po nabití vodiče se vlivem Coulombových sil začnou pohybovat volné nosiče náboje. Ustálený stav nastane rozložením volných nábojů na povrchu vodiče tak, že veškeré silové působení, mimo to, směřující kolmo z povrchu vodiče, je vyrušeno. Uvnitř vodiče je tedy nulová intenzita elektrického pole a siločáry intenzity elektrického pole vně nabitého vodiče směřují kolmo k povrchu. Pokud by stále existovala tečná složka intenzity elektric-

kého pole, musely by se volné náboje vlivem odpuzivých sil dále pohybovat. Jelikož je v objemu obklopeném přeskupenými volnými náboji nulová intenzita elektrického pole, můžeme vnitřní objem „vyjmout“ a náboj bude rozložen pouze na vnějším povrchu vodiče.



Obrázek 2.13: Elektrické pole nabitého vodiče.

Následujícím pokusem se přesvědčíme, že intenzita elektrického pole, a tedy i silové působení, je uvnitř nabitého vodiče nulová. Použijeme obdélníkový elektroskop se dvěma indikačními proužky na protějších stranách základny. Elektroskop nabijeme a následně, aniž bychom elektroskop vybili, jej ohneme do tvaru podkovky. Pro uzavření použijeme izolovaný kus kartonu. Po uzavření po obvodu elektroskopu pozorujeme, že vnitřní indikační proužek klesl do svislé polohy, zatímco vnější proužek zůstal zdvižený.



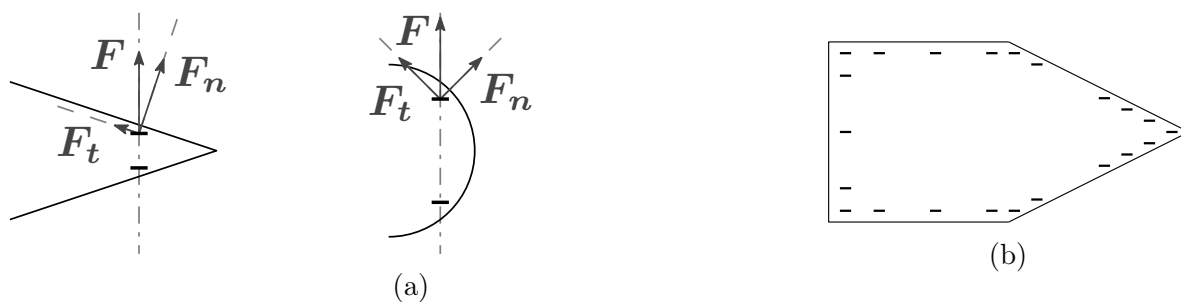
(a)

(b)

Obrázek 2.14: Rozložení náboje na vnějším povrchu vodiče, (a) oba indikační proužky na protějších stranách jsou odpuzované, (b) indikační proužek uvnitř uzavřeného vodiče klesá, proužek na vnější ploše vodiče zůstává odpuzovaný.

2.4.2 Intenzita elektrického pole v okolí hran vodiče

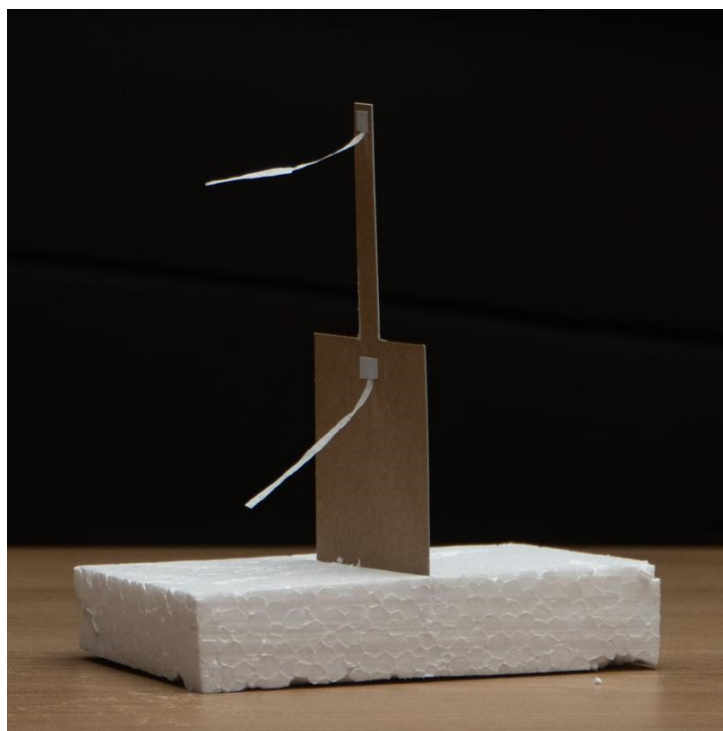
Z popisu ustáleného stavu elektrostatického pole v nabitém vodiči vyplývá, že hustota náboje bude vyšší na ostrých hranách vodiče. Vyšší hustota náboje znamená i vyšší intenzitu elektrického pole. Důvodem je větší normálová složka Coulombovy síly mezi náboji



Obrázek 2.15: (a) porovnání normálových a tečných složek Coulombových sil poblíž ostré a oblé hrany vodiče, (b) výsledné rozložení volného náboje v nabitém vodiči.

v okolí zakřiveného povrchu v porovnání se zaobleným povrchem, kde převažuje složka tečná.

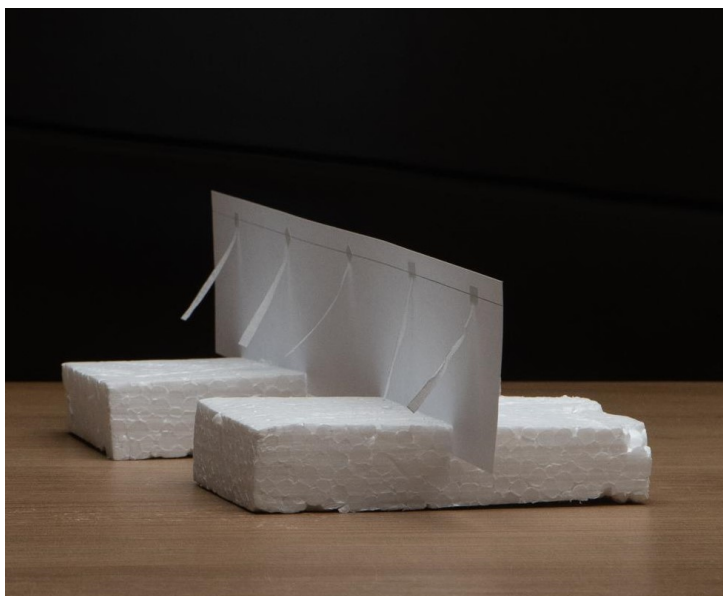
Nerovnoměrné rozložení náboje na povrchu vodiče lze znázornit pomocí asymetrického elektroskopu. Tradiční obdélníkový tvar upravíme zúžením jeho poloviny a na dvě vzniklé oblasti připevníme indikační proužky stejných rozměrů. Po nabití elektroskopu je viditelné, že lístek ve zúžené části elektroskopu se zvedl více než lístek v širší části.



Obrázek 2.16: Asymetrický elektroskop.

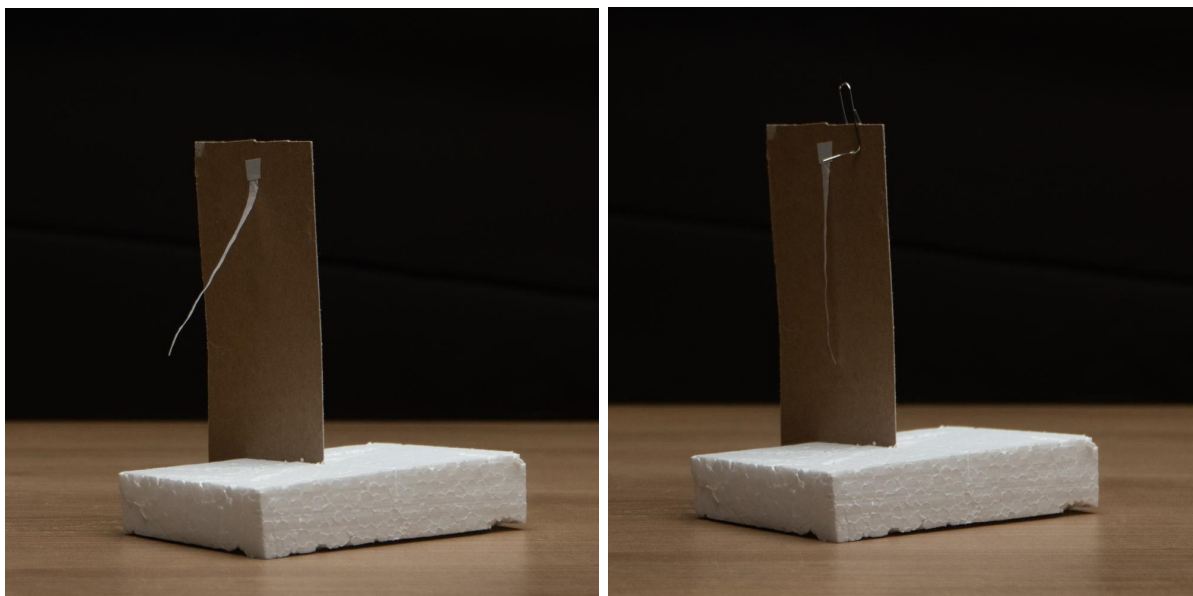
Nerovnoměrné rozložení náboje lze též pozorovat na podlouhlém obdélníkovém elektroskopu s několika indikačními proužky. Důležité je použít indikační proužky stejných rozměrů a ze stejného materiálu, aby výška zdvihu byla ovlivněna pouze množstvím náboje působícího odpuzování.

Významně silnější intenzitu elektrického pole v okolí tenkých hrotů můžeme pozorovat také nepřímo. Nabitý elektroskop se samovolně vybíjí déle než 20 minut. Pokud na



Obrázek 2.17: Podlouhlý obdélníkový elektroskop.

základnu elektroskopu spustíme na nevodivém vlákně kovový hrot (ohnutá kancelářská sponka), můžeme pozorovat, že indikační proužek klesne do původní polohy během 30 sekund (Obrázek 2.18). Sršení náboje b okolí ostrých hrotů je podstatný jev, kterého se využívá např. při konstrukci hromosvodů, ovšem má i negativní implikace např. při ztrátách na přenosovém vedení.

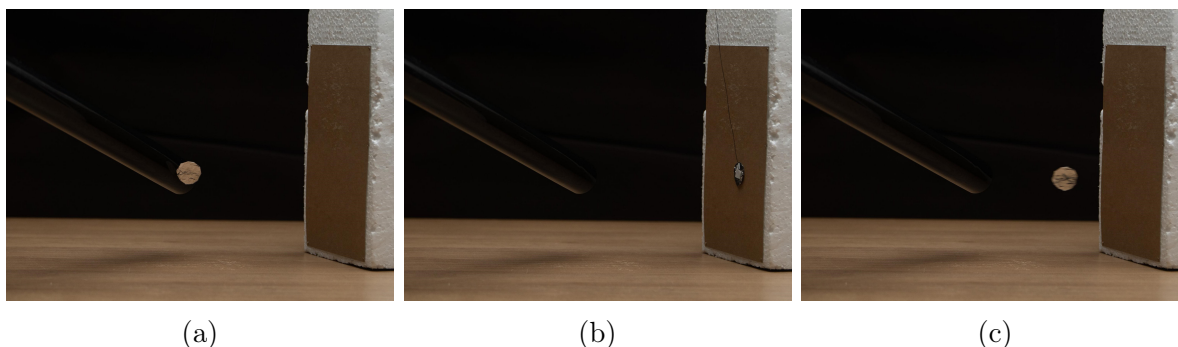


Obrázek 2.18: Vybití elektroskopu přiložením hrotu.

2.4.3 Přitahování-kontakt-odpuzování (ACR)

Přenos náboje z nabitého tělesa do izolovaného vodiče znamená, že se tato tělesa začnou vzájemně odpuzovat. Zároveň, nyní už nabitý vodič, začne přitahovat neutrální předměty.

K demonstraci tohoto, pro výzkum elektrostatiky, důležitého jevu využijeme elektrické kyvadlo umístěné mezi nabitou tyč a neutrální vodič. Po přiblížení nabitě tyče je neutrální kyvadlo přitahováno. Dojde-li k dotyku, obdrží náboj shodné polarity a je od tyče odpuzováno. Zároveň je přitahováno k neutrálnímu kartonu naproti tyči. Po dotyku s kartonem je kyvadlo opět neutrální a cyklus se opakuje. Dochází tak k oscilaci mezi nabitým předmětem a „zemí“. Oscilace se zastaví, jakmile je z tyče odebráno takové množství náboje, že již nedojde ke kontaktu vlivem přitahování.

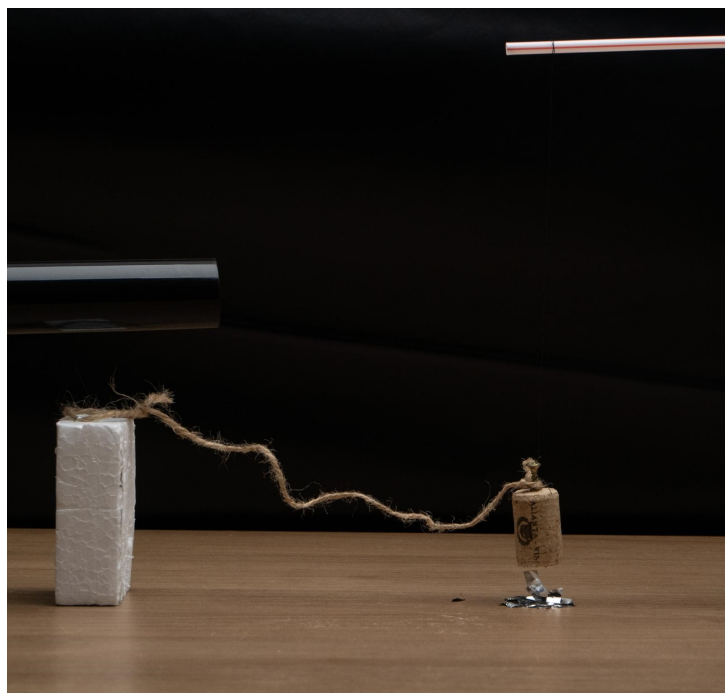


Obrázek 2.19: ACR, (a) kovový disk je nabit dotykem s nabitou tyčí, (b) nabitý kovový disk je odpuzován od shodně nabitě tyče a zároveň je přitahován k neutrální vodivé kartonové desce, (c) kovový disk je kontaktem s neutrálním vodičem vybit a vrací se do původní svislé polohy.

2.5 Chování materiálů ve vnějším elektrickém poli

Pro výpočet elektrostatické síly (3.1) jsou nutné dva na sebe vzájemně působící náboje. První, získaný triboelektrickým procesem, byl nepřímo popsán již Gilbertem. Druhý náboj, který se musí objevit v přitahovaném tělese dlouho unikal pozornosti výzkumníků. Teprve pokus Stephena Graye s elektrizací vodiče na dálku, tedy bez kontaktu, odhalil elektrickou polarizaci.

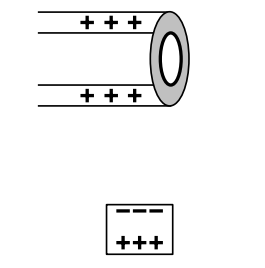
K napodobení Grayova pokusu použijeme korkovou zátku zavěšenou na nevodivém vlákně, kterou vodivě spojíme s jutovým motouzem. Motouz upevníme na nevodivou podpěru několik centimetrů od zátky. Po přiblížení nabitě plastové tyče, aniž bychom se motouzu dotkli, pozorujeme, že korková zátka začíná přitahovat hliníkové lístky. V motouzu i korku (vodiče) je indukován elektrický náboj (Obrázek 2.20).



Obrázek 2.20: Grayův přenos elektřiny na dálku.

2.5.1 Vodič ve vnějším elektrickém poli

Po vložení od země izolovaného vodiče do vnějšího elektrického pole dojde k pohybu volných nábojů proti směru elektrického pole. Náboje opačné polarity, než má těleso, které změnu vyvolalo, jsou přitahovány směrem k nabitému tělesu, zatímco náboje stejné polarity jsou odsunovány od nabitého tělesa (Obrázek 2.21). Pohyb náboje trvá, dokud není dosaženo rovnovážného stavu, tedy nulové intenzity elektrického pole uvnitř vodiče.

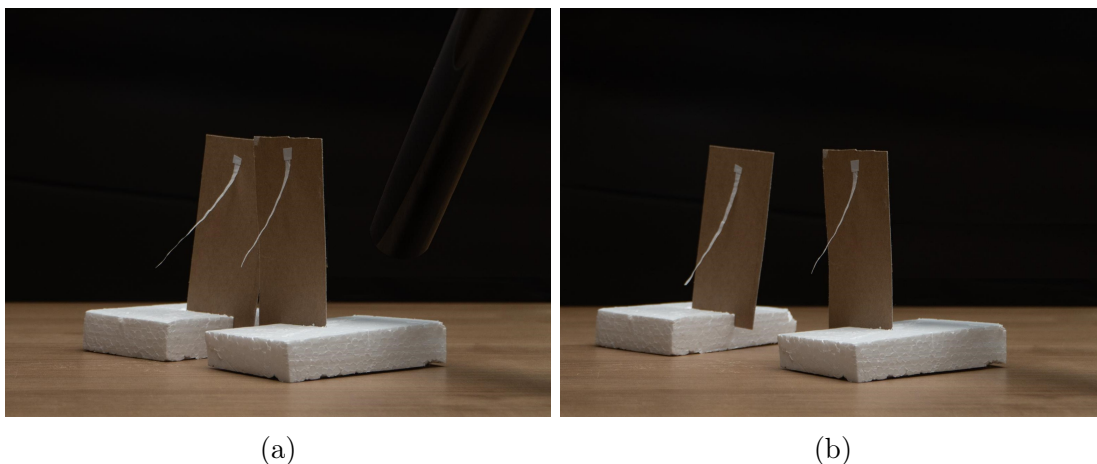


Obrázek 2.21: Vodič ve vnějším elektrickém poli.

Došlo-li by k fyzickému oddělení oblastí s opačným indukovaným nábojem, získali bychom dvě opačně nabitá tělesa. Tento jev se nazývá elektrická indukce, přeskupený náboj se nazývá indukovaný náboj a elektrické pole vyvolané indukovaným nábojem se nazývá indukované elektrické pole.

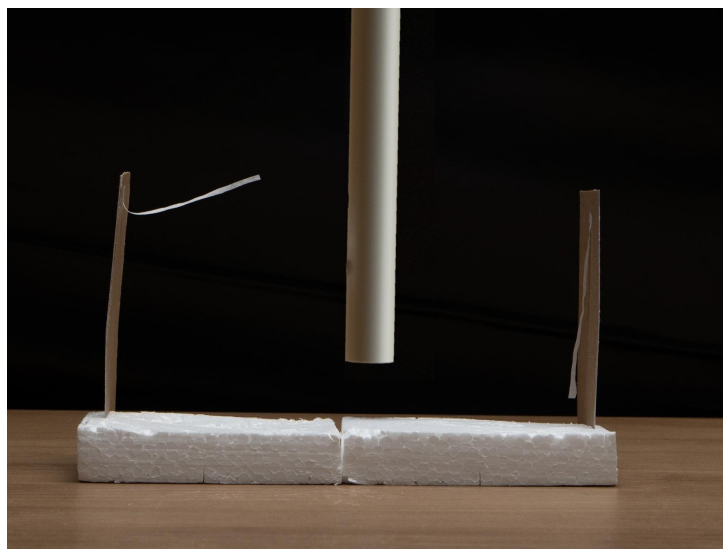
Oddělení indukovaného náboje lze demonstrovat pomocí dvou elektroskopů. Ke dvěma vzájemně se dotýkajícím elektroskopům přiblížíme nabitou tyč. Indikační proužky obou elektroskopů se zvednou. Pokud bychom nabitou tyč opět vzdálili, oba proužky by klesly. Ponecháme-li však nabitou tyč v blízkosti elektroskopů a elektroskopy od sebe oddělíme

tak, aby se nedotýkaly, můžeme pozorovat, že indikační proužky zůstanou vztyčené i po odendání nabitě tyče, tedy elektroskopy jsou nabitý (Obrázek 2.22).



Obrázek 2.22: Nabití elektroskopů indukovaným nábojem, (a) nabitá tyč přiblížená k vzájemně se dotýkajícím se elektroskopům, (b) nabitě elektroskopy po jejich rozdělení a oddálení nabitě tyče.

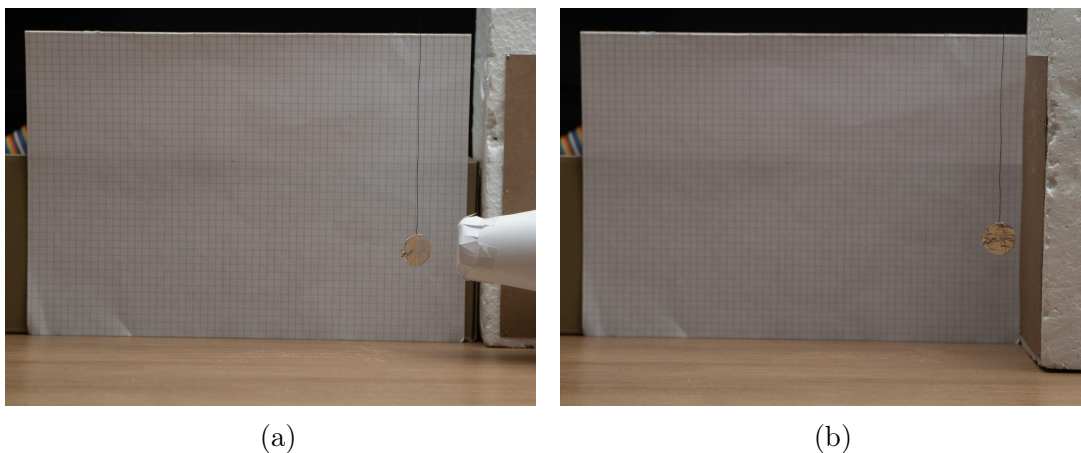
Opětovným přiblížením nabitě tyče (z důvodu viditelnosti vzhledem k černému pozadí byla použita PP tyč místo ABS, na výsledek ukázky to ovšem nemá vliv) k jednotlivým elektroskopům můžeme pozorovat, že vzdálenější elektroskop je nabitý shodnou polaritou (indikační proužek je odpuzován), zatímco bližší elektroskop je nabitý opačnou polaritou (indikační proužek je přitahován) Obrázek 2.23.



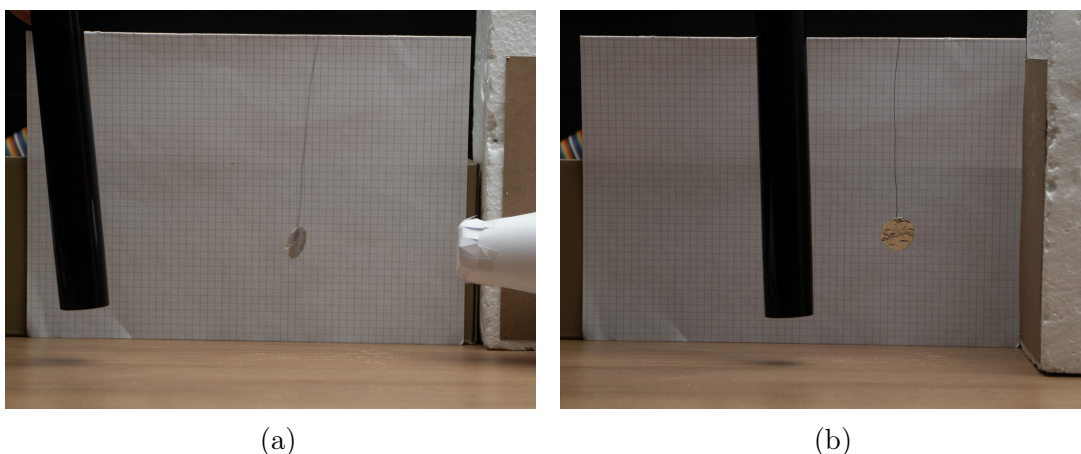
Obrázek 2.23: Ověření nabití elektroskopů opačnou polaritou náboje přiblížením nabitě tyče.

Vyšší intenzita elektrického pole v okolí hran vodiče se projevuje též při rozložení indukovaného náboje. Ke znázornění nám poslouží elektrické kyvadlo umístěné vedle plochého vodiče z kartonu a vedle vodivého kuželu z papíru. Pomalu začneme přibližovat nabitou tyč a sledujeme, kdy začne být kyvadlo přitahováno. Pro porovnání vzdáleností

použijeme čtverečků v pozadí. Kyvadlo umístěné vedle vodivého kužele bylo přitahováno na vzdálenost 43 čtverečků, kyvadlo umístěné vedle vodivé plochy bylo přitahováno na vzdálenost 25 čtverečků.



Obrázek 2.24: Výchozí poloha elektrického kyvadla vedle (a) vodivého komolého kužele, (b) vodivé rovinné desky.

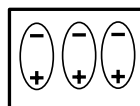
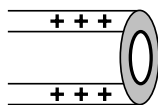


Obrázek 2.25: Vzdálenost potřebná k přitažení elektrického kyvadla zavěšeného vedle (a) vodivého komolého kužele, (b) vodivé rovinné desky.

2.5.2 Izolant ve vnějším elektrickém poli

Po vložení izolantu (dielektrika) do vnějšího elektrického pole dochází ke vzniku, případně natočení, elektrických dipólů. V nepolárních dielektrikách vznikne dipól deformací atomů vlivem elektrostatické přitažlivosti (opačný náboj je přitahován, shodný je odpuzován). Polární dielektrika jsou tvořena polárními molekulami, které tvoří dipóly. Bez vnějšího působení je pohyb molekul náhodný a z makroskopického hlediska se vzájemně vyruší, těleso je neutrální. Vložením do vnějšího elektrického pole se polární molekuly natočí proti směru vnějšího pole (Obrázek 2.26). Veškeré náboje jsou stále pevně vázány ve struktuře materiálu. Tento jev se nazývá elektrická polarizace. Veškeré dipóly vzniklé

polarizací mají opačnou polaritu k polaritě vnějšího elektrického pole. Tím se intenzita elektrického pole uvnitř dielektrika snižuje.



Obrázek 2.26: Polarizace dielektrika ve vnějším elektrickém poli.

2.5.3 Uzemněný vodič ve vnějším elektrickém poli

Pouhým okem nelze pozorovat rozdíl mezi chováním vodiče a izolantu ve vnějším elektrickém poli. Přiložíme-li k materiálům obou skupin nabitou tyč, dojde k jejich přitahování. Zásadní rozdíl mezi oběma skupinami, a to pohyblivost vzniknuvšího náboje je možné předvést jednoduchým pokusem.

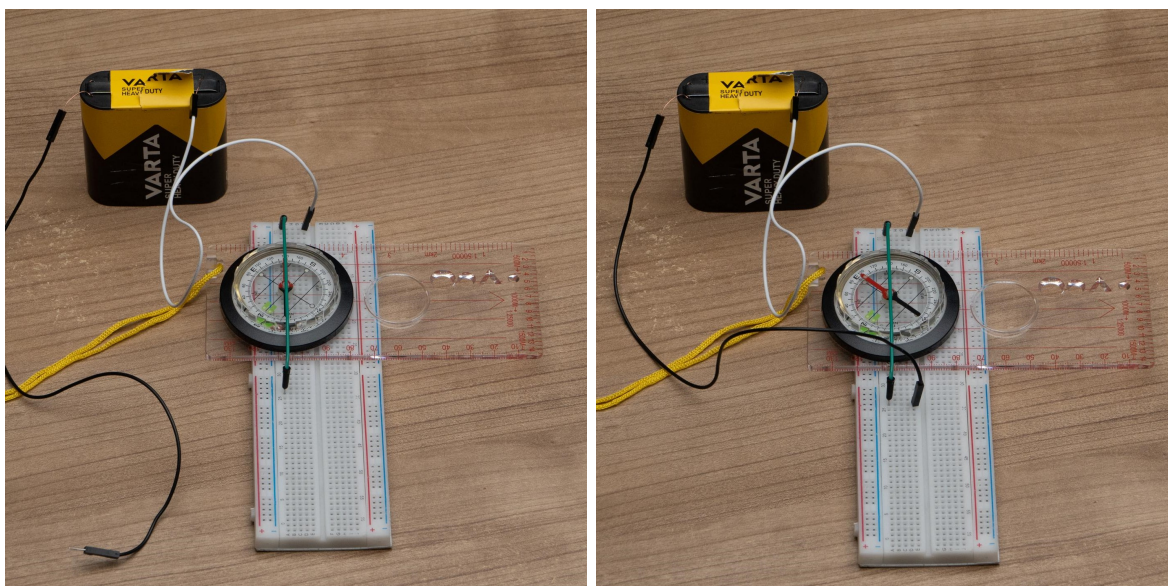
Připravíme si elektrické kyvadlo, nabitou tyč a dvě desky, jednu vodivou, např. list papíru, druhou nevodivou, např. plastovou pracovní podložku. Nevodivou desku položíme vedle kyvadla. Jakmile přiblížíme nabitou tyč, dojde k polarizaci desky a kyvadlo je přitahováno i přes zakrytí tyče deskou. Nevodivou desku vyměníme za vodivou. Důležité je vodivou desku držet v ruce. Po přiblížení nabitě tyče dojde ke vzniku indukovaného náboje, který je ovšem vodivou plochou desky sveden do země (do ruky). Na straně kyvadla není přítomný žádný náboj a kyvadlo tedy není nijak přitahováno.



Obrázek 2.27: Stínění.

2.6 Působení proudovodiče na kompas

Silové působení magnetického pole v okolí proudovodiče lze pozorovat přiblížením magnetické střelky kompasu (Obrázek 2.28(a)). V tomto uspořádání je směr proudu od jihu k severu (podle střelky kompasu), respektive odspodu nahoru (podle orientace obrázku). Použitím Ampèrova silového zákona (1.12) a pravidla pravé ruky můžeme odvodit, že síla působící na proudovodič míří na východ, respektive doleva. Jelikož je vodič pevně ukotven, pozorujeme pouze sílu v opačném směru, tedy na západ, respektive doprava, působící na střelku magnetu. Obrátili bychom směr proudu, došlo by též ke změně vychýlení střelky (Obrázek 2.28(b)).



(a)

(b)

Obrázek 2.28: Výchylka střelky kompasu v blízkosti vodiče protékaného proudem.

3 Závěr

Cílem této práce bylo splnit čtyři základní body. Prvním bodem bylo provést rešerši experimentů z oboru elektromagnetismu. Rešerše se zabývá experimenty, které vedly k objevům základních principů elektromagnetismu a poskytuje tak též historický kontext.

Druhým bodem bylo navrhnout několik experimentů a popsat jejich fyzikální podstatu a možnost realizace. Návrhy experimentů se přímo opíraly o historické pokusy popisované v první kapitole. Fyzikální podstata jednotlivých experimentů je zprvu nastíněna v historické rešerši, když jsou popisované jevy vysvětleny dnešními pojmy. Podobnější teoretický rozbor, je-li potřeba, ve druhé kapitole předchází jednotlivé experimenty.

Třetím bodem bylo vybrané experimenty realizovat a porovnat jejich chování s teoretickými předpoklady. Realizované experimenty byly zfotodokumentovány. Odchytky od předpokládaného chování popsaného v teoretických částech práce se nevyskytly.

Za nedostatek práce by se dalo považovat použití černé tyče v elektrostatických experimentech na černém pozadí, což v některých případech značně snižuje viditelnost na obrázcích a celkovou přehlednost.

Čtvrtým bodem byl návrh implementace experimentů do výuky. Jednoduchý návrh výukového materiálu pro praktická cvičení s teoretickým úvodem, popisem potřebného vybavení a postupu se nachází v příloze. Na konci materiálu je prostor pro závěry studenta, který experiment provedl.

Seznam použité literatury

- [1] The TriboElectric Effect Series. Dostupné z: <https://www.alphalabinc.com/triboelectric-series/>.
- [2] AL-KHALILI, J. The birth of the electric machines: a commentary on Faraday (1832) ‘Experimental researches in electricity’. *Philosophical Transactions A*. 2015, 2015, Volume 373, s. 1–12. ISSN 1471-2962. doi: <http://dx.doi.org/10.1098/rsta.2014.0208>.
- [3] ASSIS, A. K. T. – CHAIB, J. P. M. C. *Ampère’s Electrodynamics*. C. Roy Keys Inc., 2015. ISBN 978-1-987980-04-2.
- [4] ASSIS, A. K. T. *The Experimental and Historical Foundations of Electricity*. C. Roy Keys Inc., 2010. ISBN 978-0-9864926-3-1.
- [5] ASSIS, A. K. T. *The Experimental and Historical Foundations of Electricity: Volume 2*. C. Roy Keys Inc., 2018. ISBN 978-1-987980-11-0.
- [6] BRANSPIZ, Y. – KOVALEVSKY, A. Analysis of the Oersted experiments. In *MMET Conference Proceedings. 1998 International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory. MMET 98 (Cat. No.98EX114)*, 1, s. 240–242 vol.1, 1998. doi: [10.1109/MMET.1998.709735](https://doi.org/10.1109/MMET.1998.709735).
- [7] CAMPBELL, W. H. *Earth Magnetism*. HARCOURT/ACADEMIC PRESS, 2001. ISBN 0-12-158164-0.
- [8] DARRIGOL, O. *Electrodynamics from Ampere to Einstein*. Oxford University Press, 2000. ISBN 0-19-850594-9.
- [9] ERLICHSON, H. The experiments of Biot and Savart concerning the force exerted by a current on a magnetic needle. *Am. J. Phys.* 1998, 1998, Vol. 66, s. 386–391. doi: [10.1119/1.18878](https://doi.org/10.1119/1.18878).
- [10] GILLMOR, C. S. *Coulomb and the Evolution of Physics and Engineering in Eighteenth-Century France*. Princeton University Press, 1971. ISBN 9780691654300.
- [11] MAYER, D. *Pohledy do minulosti elektrotechniky*. Kopp, 2. dopl. vyd edition, 2004. ISBN 80-7232-219-2.
- [12] MEYER, H. W. *A HISTORY OF ELECTRICITY AND MAGNETISM*. Burndy Library, 1972. ISBN 0 262 13070 X.
- [13] STEINLE, F. – LEVINE, A. *EXPLORATORY EXPERIMENTS*. University of Pittsburgh Press, 1st edition edition, 2016. ISBN 13: 978-0-8229-4450-8.

- [14] VERSCHUUR, G. L. *Hidden attraction*. Oxford University Press, Inc., 1993. ISBN 0-19-506488-7.
- [15] WHITTAKER, E. T. *A History of the Theories of Aether and Electricity: From the Age of Descartes to the Close of the Nineteenth Century*. Longmans, Green and Co., 1910. ISBN 1-143-01208-9.

Seznam obrázků

1.1	Orientace versoria směrem k nabitému tělesu.	13
1.2	Elektrické pole bodového náboje.	13
1.3	Gilbertův zmenšený model Země používaný k měření magnetické inklinace (převzato z [4]).	14
1.4	Magnetické pole permanentního magnetu.	14
1.5	Dotykem nabitá korková zátka v otvoru na konci skleněné tuby.	15
1.6	Přenos náboje kontaktem dřevěnou tyčí a jutovým motouzem.	16
1.7	Grayův objev izolantů.	16
1.8	Grayův objev indukovaného náboje ve vnějším elektrickém poli.	17
1.9	Dobový náčrtek Grayova pokusu se zavěšeným chlapcem (převzato z [5]).	17
1.10	Demonstrace rozložení indukovaného náboje na povrchu vodiče porovná- ním přitažlivosti duté a plné dřevěné kostky.	18
1.11	Porovnání vzdálenosti potřebné k přitažení lístku v závislosti na použité podstavě.	19
1.12	Odpuzování lístku z křemenné desky (na horní straně polarizované desky je odpuzován lístek s indukovaným nábojem stejné polarity).	20
1.13	ACR.	20
1.14	Du Fayův objev dvou nábojů pozorováním výjimky z ACR.	21
1.15	Coulombova torzní váha (převzato z [10]).	22
1.16	Síla mezi opačně nabitými náboji.	23
1.17	Vliv proudovodiče na magnetku.	24
1.18	Magnetická indukce \mathbf{B} v okolí vodiče protékaného stejnosměrným proudem I	24
1.19	Síly působící na magnetku	26
1.20	Silové působení přímého dlouhého vodiče na element magnetky P při prů- chodu stejnosměrného proudu I	27
1.21	Silové působení zahnutého dlouhého vodiče na element magnetky P při průchodu stejnosměrného proudu I	27
1.22	Střelka zaujímá kolmou polohu na směr proudu.	29
1.23	Přitahování a odpuzování permanentního magnetu v závislosti na směru proudu.	29
1.24	Přitahování a odpuzování dvou paralelních vodičů v závislosti na směrech proudu.	30
1.25	Toroidní magnetické jádro se dvěma vinutími.	31
1.26	Pohyb magnetu cívkou.	32

2.1	Gilbertův nákres versoria (převzato z [4]).	33
2.2	Versorium.	34
2.3	Elektrické kyvadlo.	34
2.4	Elektroskop.	35
2.5	Nabití elektroskopu.	36
2.6	Izolanty pro elektrostatiku.	36
2.7	Vodiče pro elektrostatiku.	36
2.8	Izolanty pro běžná napětí (dřevo, CYKY izolace).	37
2.9	Vodiče pro běžná napětí (mosaz).	37
2.10	Nabití třených materiálů opačnou polaritou náboje.	38
2.11	Předměty nabitě třením.	39
2.12	Předměty nenabitě třením.	39
2.13	Elektrické pole nabitého vodiče.	40
2.14	Rozložení náboje na vnějším povrchu vodiče	40
2.15	Rozložení volného náboje na povrchu vodiče	41
2.16	Asymetrický elektroskop.	41
2.17	Podlouhlý obdélníkový elektroskop.	42
2.18	Vybití elektroskopu přiložením hrotu.	42
2.19	ACR, (a) kovový disk je nabit dotykem s nabitou tyčí, (b) nabitý kovový disk je odpuzován od shodně nabitě tyče a zároveň je přitahován k neutrální vodivé kartonové desce, (c) kovový disk je kontaktem s neutrálním vodičem vybit a vrací se do původní svislé polohy.	43
2.20	Grayův přenos elektřiny na dálku.	44
2.21	Vodič ve vnějším elektrickém poli.	44
2.22	Nabití elektroskopů indukovaným nábojem, (a) nabitá tyč přiblížená k vzájemně se dotýkajícím se elektroskopům, (b) nabitě elektroskopy po jejich rozdělení a oddálení nabitě tyče.	45
2.23	Ověření nabití elektroskopů opačnou polaritou náboje přiblížením nabitě tyče.	45
2.24	Výchozí poloha elektrického kyvadla vedle (a) vodivého komolého kužele, (b) vodivé rovinné desky.	46
2.25	Vzdálenost potřebná k přitažení elektrického kyvadla zavěšeného vedle (a) vodivého komolého kužele, (b) vodivé rovinné desky.	46
2.26	Polarizace dielektrika ve vnějším elektrickém poli.	47
2.27	Stínění.	47
2.28	Výchylka strelky kompasu v blízkosti vodiče protékajícího proudem.	48

Přílohy

Seznam příloh

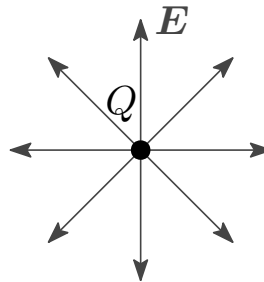
Příloha 1 - Praktické cvičení z elektrostatiky

Příloha 2 - Praktické cvičení z elektromagnetismu

Praktické cvičení z elektrostatiky

Teoretický úvod

Elektrostatické pole je vyvoláno nepohyblivými náboji. Vlastnosti elektrostatického pole jsou popsány vektorem intenzity elektrického pole \mathbf{E} . Vektor intenzity elektrického pole je závislý na velikosti a vzájemné poloze elektrických nábojů.

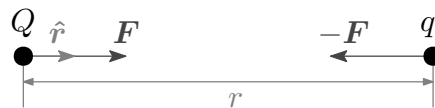


Elektrické pole bodového náboje.

Pro elektrostatickou sílu působící mezi dvěma bodovými náboji platí Coulombův zákon:

$$\mathbf{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qQ}{r^2} \hat{\mathbf{r}}, \quad (3.1)$$

kde \mathbf{F} je síla, ϵ_0 je relativní permitivita vakua, q a Q jsou náboje, r je vzdálenost mezi středy nábojů a $\hat{\mathbf{r}}$ je jednotkový vektor udávající směr spojnice středů nábojů.



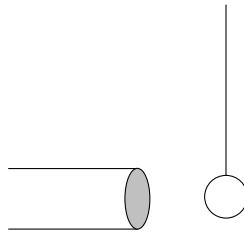
Síla mezi opačně nabitými náboji.

Nabití předmětu třením se nazývá triboelektrický jev. Přesun nábojů (elektrony/ionty) mezi povrchy materiálů nábojů je způsoben chemickou vazbou, která při přiblížení materiálů vzniká. Jedná se o nejčastější původ statické elektřiny. Mezi další patří elektrochemický, pyroelektrický (teplo) a piezoelektrický (tlak) proces.

Potřebný materiál

K demonstraci nabití třením a Coulombových sil budeme potřebovat:

- elektrické kyvadlo (malý vodivý disk např. z papíru zavěšený za nevodivé vlákno např. z bavlny)
- plastovou trubku (může být z PVC, PP nebo ABS)
- tkaninu z umělého vlákna (polyester, polyamid)



Vzájemná poloha disku kyvadla a nabité tyče.

Postup

Elektrické kyvadlo umístíme do prostoru tak, aby se mohlo volně kývat. Plastovou tyč nabijeme třením s tkaninou a přiblížíme k disku kyvadla tak, aby se vzájemně dotkly. Po dotyku plastovou tyč oddálíme a místo ní přiblížíme k disku kyvadla tkaninu, kterou jsme třeli plastovou tyč.

Výsledky (vyplní student)

Změnilo se chování disku kyvadla po dotyku s nabitou tyčí?

Co lze podle Coulombova zákona prohlásit o elektrickém náboji v plastové tyči a v disku kyvadla?

Jak se po dotyku s tyčí choval disk kyvadla v blízkosti třené látky?

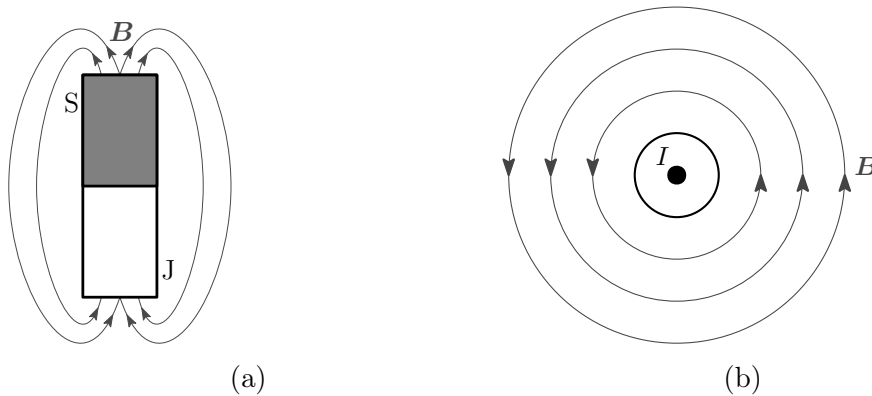
Co lze podle Coulombova zákona prohlásit o elektrickém náboji v umělohmotné tkanině?

Praktické cvičení z elektromagnetismu

Teoretický úvod

Magnetické pole permanentního magnetu je buzeno magnetickými dipóly. Magnetické dipóly vznikají působením elementárních proudů (pohyb elektronů v atomech). Vlastnosti magnetického pole jsou popsány vektorem magnetické indukce \mathbf{B} . Magnetické indukční čáry permanentního magnetu vycházejí ze severního pólu magnetu, směřují k jižnímu pólu.

Magnetické pole kolem vodiče je vyvolané pohybem elektrického náboje (elektrickým proudem). Neproměnný stejnosměrný proud vyvolává stacionární magnetické pole. Vlastnosti magnetického pole jsou popsány vektorem magnetické indukce \mathbf{B} . Vektor magnetické indukce je závislý na velikosti a vzájemné poloze, směru a rychlosti elektrických nábojů.



(a) magnetické pole permanentního magnetu, (b) magnetické pole vodiče protékaného elektrickým proudem

Pro sílu v magnetickém poli platí Ampérův silový zákon:

$$d\mathbf{F} = I d\mathbf{l} \times \mathbf{B},$$

kde I je proud tekoucí vodičem, $d\mathbf{l}$ délkový element vodiče protékaného proudem a \mathbf{B} je magnetická indukce vnějšího magnetického pole.

Potřebný materiál

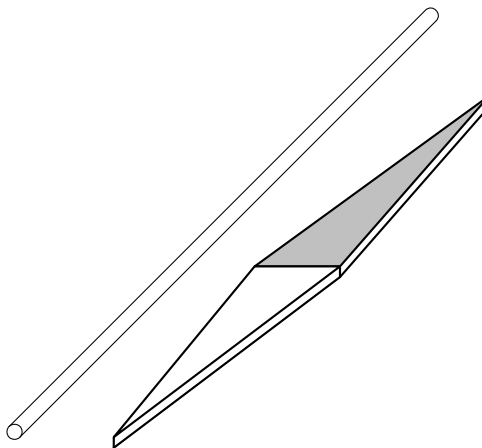
K demonstraci silového působení mezi permanentním magnetem a elektrickým proudem budeme potřebovat:

- kompas nebo buzolu
- zdroj stejnosměrného napětí
- elektrické vodiče

- rezistor pro omezení elektrického proudu vodičem na bezpečnou hodnotu

Postup

Kompas položíme na vodorovnou podložku. Na kompas položíme vodič, a to tak, aby byl zarovnaný se směřováním střelky kompasu (bude směřovat z jihu na sever).



Vzájemná poloha střelky kompasu a vodiče

Jeden konec vodiče přes rezistor připojíme k jednomu z kontaktů zdroje stejnosměrného napětí (rezistor můžeme připájet, případně použít nepájivé pole). Druhý konec vodič připojíme k druhému kontaktu zdroje napětí a pozorujeme chování střelky kompasu.

Pozorování opakujeme s opačnou polaritou zdroje napětí.

Výsledky (vyplní student)

Změnilo se chování střelky po připojení vodiče ke zdroji stejnosměrného napětí?

Bylo chování střelky závislé na polaritě připojeného napětí?

Jak byste odvodili chování střelky z poznatků uvedených v teoretickém úvodu?