

13. Klíčové experimenty ve fyzice

- popis a výklad experimentů, které vedly nebo mohou vést k formulaci obecných fyzikálních principů
- interpretace předložených grafických závislostí např. grafu záření černého tělesa .

Popis a výklad experimentů, které vedly nebo mohou vést k formulaci obecných fyzikálních principů.

Základním zdrojem poznání ve fyzice je experiment. Experiment je nástroj pro ověřování teorií a současně je zdrojem pro jejich další rozvoj. Prvním průkopníkem experimentálních metod byl **Roger Bacon**, podle něho experiment slouží jako nástroj pro ověřování poznatků. Další experimentátor **Galileo Galilei** závěry svých experimentů formuloval jako fyzikální zákony. **Isaac Newton** zavedl základní fyzikální pojmy jako míry, kterým přiřazoval číselné hodnoty, což umožnilo lepší interpretaci fyzikálních experimentů. Později **Albert Einstein** zavádí myšlenkový experiment, hypotetický scénář, který nám slouží k pochopení skutečného stavu věcí.

Existují různé druhy myšlenkových experimentů. Všechny myšlenkové experimenty se nicméně vyhýbají empirickým metodám, t.j. jejich součástí není pozorování ani vlastní fyzické provedení experimentu. Podstatou je teoretická metoda "a priori". Obecně můžeme říci, že myšlenkové experimenty mají tyto výsledky:

- zpochybnění nebo dokonce vyvrácení teorie (zde je často využíváno myšlenkového postupu *reductio ad absurdum*)
- potvrzení existující teorie
- navrnutí nové teorie
- současné vyvrácení existující a navržení nové teorie

Vědci dále používají myšlenkové experimenty v případech, kdy je fyzická realizace experimentu nemožná.

Při plánování a vyhodnocování experimentu musíme pamatovat **na 2 základní požadavky kladené na experiment: výběrovost a reprodukovatelnost**. Experiment provádíme za určitých podmínek, které ovlivňujeme a volíme nebo alespoň registrujeme (př. teplota, tlak, vlhkost vzduchu). Opakované provádění experimentu různými osobami musí poskytovat srovnatelné výsledky. Z hlediska **charakteru pokusu** rozlišujeme 2 druhy experimentu: **kvalitativní** (zjišťujeme jestli jev nastal nebo ne) a **kvantitativní** (zjišťujeme míru daného jevu, provádíme měření a výsledkem je číslo).

Experimenty

- **Reálné** – sledujeme probíhající experiment v reálném čase a měříme přístroji v reálném čase.
- **Myšlenkové** – navodí se podmínky experimentu a dedukuje se na základě známých zákonů bez ohledu na realizaci.
- **Počítačové** – simulace na základě známých zákonů.

GALILEO GALILEI 15/16

Doba kyvu tělesa: Na bohoslužbě v katedrále v Pise ho zaujalo kývání velké bronzové lampy, která visela na dlouhém řetězu. Použil svůj pulz jako stopky a zjistil, že doba kyvu lampy není závislá na velikosti (amplitudě) kyvu. Později experimentálně dokázal, že doba kyvu tělesa není závislá ani na jeho hmotnosti ale výlučně na délce závěsu.

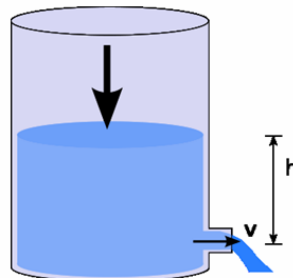
Dráha pádu tělesa (volný pád): Před studenty a profesory pustil ze známé šikmé věže dvě kovová tělesa o různé hmotnosti. Obě dopadla na zem ve stejný okamžik - na rozdíl od tvrzení Aristotela (tvrdí, že různě těžké předměty padají k zemi různou rychlostí). Tím došel k závěru (matematické vyjádření zákona o zrychlení), že dráha pádu tělesa je přímo úměrná čtverci času pádu tohoto tělesa. Tělesa padají k zemi rychlostí stejnou, ať již je jejich hmotnost jakákoli: rozdíl v rychlostech jejich pádu je způsoben jedině a pouze třením vzduchu. Dále prováděl i valení koulí dolů po nakloněné rovině, čímž dokazoval tutéž věc: padající nebo koulejší se objekty (koulení je pomalejší verzí padání) se zrychlují nezávisle na jejich hmotnosti.

Měření rychlosti světla: V 17. století se poprvé pokusil o změření rychlosti šíření světla, se svým asistentem si jednoho jasného večera vzali lucerny a vyšli na dva, míli od sebe vzdálené kopec. Experiment spočíval v tom, že Galileo odkryje na krátký okamžik svou lucernu a až světlo dorazí na druhý kopec, totéž udělá i jeho asistent. Z doby mezi odkrytím lucerny a přijetím paprsků z druhé lucerny chtěl Galileo spočítat rychlost šíření světla. Bohužel je velikost rychlosti šíření světla tak veliká, že tímto experimentem byl daleko od jakéhokoli přesvědčivého měření. Proč se o to pokoušel: Nevěřil v to, že Země je centrem vesmíru a nevěřil v nekonečnou rychlost šíření světla.

Dalekohled: V letech 1604 - 1609 konstruoval svůj dalekohled. Jako první člověk pozoroval tímto dalekohledem nebeskou oblohu a objevil 4 Jupiterovy měsíce, skvrny na Slunci a krátery na Měsíci, Mléčnou dráhu. Objev Jupiterových měsíců (Medičejské hvězdy), fáze planety Venuše a rotace Slunce pak vede Galilea k tomu, že se veřejně vysloví k uznání heliocentrické soustavy M. Kopernika.

EVANGELISTA TORRICELLI 1641

Torricelliho zákon vysvětluje rychlost proudění kapaliny z otvoru na boku nádoby. Předpokládejme, že plocha nádoby je hodně větší než otvor, kterým kapalina vytéká, proto můžeme pokles hladiny považovat za zanedbatelný $= v_0$. Atmosferický tlak můžeme při malém rozdílu výšek také pokládat za konstantní.

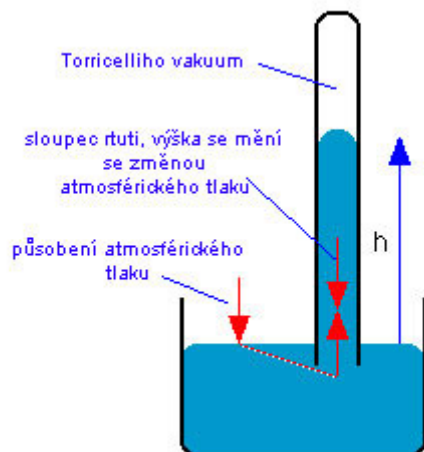


$$\frac{1}{2} v_0^2 + g(h_1 - h_2) = \frac{1}{2} v^2$$

$$v = \sqrt{2gh}$$

Jde o speciální případ Bernoulliho rovnice. Pro reálnou kapalinu bude rychlost jejího odtoku nižší vzhledem k její viskozitě.

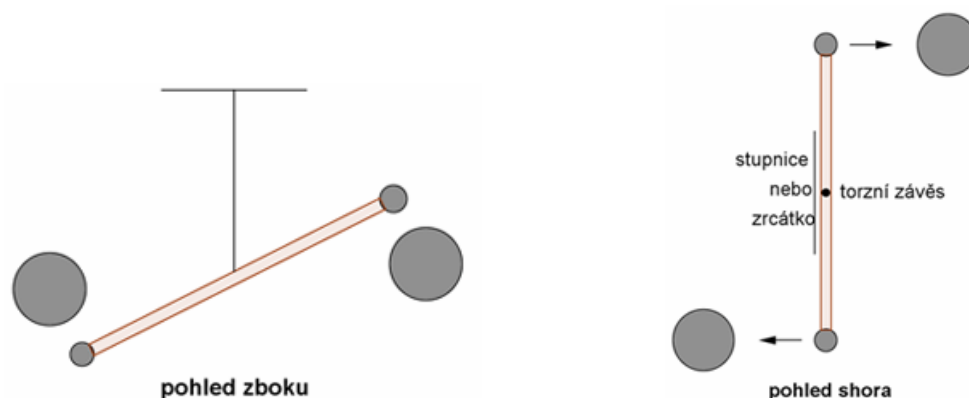
Barometr - Torricelliho pokus. Pumpaři toskánského velkovévody se pokoušeli dostat vodu do výšky 12 metrů, zjistili ale, že pomocí sací pumpy se výš než do 10 metrů voda nedostane. Torricelliho napadlo použít rtuť, která je cca 14 krát těžší než voda. Použil 1 metr dlouhou na jednom konci zaslepenou trubičku, naplnil ji rtutí a postavil ji na výšku do nádržky se rtutí. Sloupec rtuti klesl na hodnotu 76cm a nad ní vzniklo Torricelliho vakuum.



Jak už dnes víme, výška sloupce kolísá podle měnícího se atmosférického tlaku, tímto tedy vznikl první barometr. Podle výšky rtuti pod zataveným koncem lze určit velikost atmosférického tlaku (čím vyš rtuť vystoupí, tím větší tlak). Jednotka Torr se dnes používá při popisu velmi malých tlaků nebo při měření krevního tlaku. $1 \text{ Torr} = 133 \text{ Pa}$.

HENRY CAVENDISH 1798

V roce 1798 jako první přesně spočítal hmotnost Země. Použil k tomu torzní váhy, s jejichž pomocí změřil gravitační sílu působící mezi olověnými koulemi. Váhy se skládají z tenkého vlákna a příčně zavěšené tyče (v jeho případě dlouhé 180 cm a vyrobené ze dřeva). K otočení vlákna o nějaký úhel potřebujeme určitý moment síly, který je závislý na čtvrté mocnině poloměru vlákna. Tyto váhy jsou velmi citlivé, jestliže použijeme velmi tenké vlákno. K měření použil kromě torzních vah i velké olověné koule o hmotnosti 160 kg. Tyto koule přitahovaly malé koule na koncích tyče a ze stočení a ostatních známých veličin pak vypočítal gravitační konstantu.



Jeho výpočty byly zpřesněny až ve 20. století. V současnosti je nejlepší odhad hmotnosti Země asi 5,973 zettatun (tedy $5,973 \times 10^{24} \text{ kg}$), což se od Cavendishova výpočtu odlišuje jen asi o 1 %.

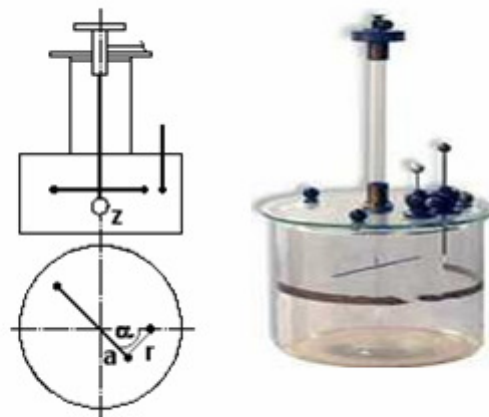
CHARLES-AUGUSTIN DE COULOMB 17/18

Experimentální zkoumání elektrického přitahování: Měření přitažlivé síly mezi nesouhlasně nabitými tělesy tedy použil tento postup:

- na posunovatelnou zděř, umožňující pohyb po horizontálním ramenu podstavce, izolovaně na hedvábné vlákno zavěsil jehlu v horizontální poloze, na jejímž jednom konci byl upevněn malý disk ze zlaté fólie
- jehlu s diskem poté přisunul do blízkosti velké izolované vodivé koule v úrovni jejího středu
- disk a koule nabil opačnými náboji
- jehla byla uvedena do horizontálních oscilací při různě nastavených vzdálenostech od koule;
- v každé poloze byla zaznamenána její frekvence

Za předpokladu platnosti nepřímé závislosti síly na čtverci vzdálenosti by perioda oscilací měla být úměrná vzdálenosti mezi náboji. Experimentem byl tento předpoklad dokázán.

Coulombovy torzní váhy: Torzní váhy jsou určeny pro měření malých sil. Sestaveny ze skleněné válcové nádoby, ve které je na tenkém pružném vlákně o poloměru R zavěšeny izolační ramínka o délce $2a$. Vlákno je upnuté v otočné hlavici se stupnicí. Na ramínku jsou 2 kovové kuličky. U jedné z nich je další kovová kulička, která je upevněna na tenké kovové tyčce. Úhel vychýlení ramínka α se indikuje pomocí odrazu světelného paprsku od zrcátka z namontovaného na ramínku.



Náboj se přenáší na kuličky a měří se síla působící mezi kuličkami. Platí vztah:

$$F = \frac{\pi \cdot G \cdot R \cdot 4 \cdot \alpha}{2 \cdot a \cdot l \cdot \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right)}$$

Kde G - modul pružnosti v krutu, R - poloměr vlákna, α - úhel vychýlení, a - poloměr ramínka, l - délka vlákna

Zákon pro síly magnetické: použil dvě nezávislé metody:

- Použil krátkou stěelku magnetu volně oscilující kolem své základní polohy a vertikálně zavěsil zmagnetizovaný ocelový drát o tloušťce přibližně pětadvacet palců. Zaznamenával periodu oscilací jehly pro malé amplitudy. Nejdříve pouze pod vlivem samotného zemského pole a potom s vertikálním magnetem držným v rozdílných malých vzdálenostech od jehly. Za předpokladu jednoduchých harmonických kmitů by se měla intenzita pole měnit inverzně s kvadrátem periody. Při vhodné kombinaci výsledků byl vyloučen vliv zemského magnetického pole a síla, kterou vykazoval magnet, byla nepřímo úměrná kvadrátu vzdálenosti od působícího pole.
- Použil torzní váhy, které použil k určení zákona elektrického odpuzování. Přístroj se skládal ze skříňky obsahující kruhovou stupnici překlenující břevnem, v jehož středu byl otvor, jímž procházela vertikální trubice. Uvnitř této trubice byl mosazný drát připevněný svým horním koncem k torznímu mikrometru, schopnému pootočit drátem o jakýkoliv úhel, který bylo možné číst na oceichené hlavici mikrometru. Na svém dolním konci nesl drát třmen, do něžž byl umístěn tyčový magnet; přístroj byl nejdříve nastaven tak, že drát nebyl vystaven torzi – odečet na mikrometru byl nula a magnet ve třmenu ležel na magnetickém poledníku označeném 0° na dolní kruhové stupnici. Drát byl potom zkroucen tak, že se od poledníku odchýlil o měřený úhel. Magnet byl poté vrácen zpět na poledník a dlouhý magnet byl vertikálně umístěn na poledník tak, aby odpuzoval zavěšený magnet. Zavěšený magnet byl zkroucením drátu opakovaně vrácen zpět do své startovací polohy a torze vynaložená na každou úhlovou vzdálenost dvou pólů byla zaznamenána. Při dané torzi od zemského pole (známou z minulého experimentu) bylo možné zjistit, jak se mění odpuzování obou pólů se změnou oddělující vzdálenosti. Byla tak potvrzena inverzní kvadratická závislost síly na vzdálenosti. Matematický vztah pro magnetické síly je zcela analogický vztahu pro síly elektrické

Coloumbův zákon: Síla, kterou na sebe vzájemně působí dva statické bodové náboje, je přímo úměrná součinu obou nábojů a nepřímo úměrná druhé mocnině jejich vzdálenosti:

$$F_E = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_R} \cdot \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2}$$

Síly působící mezi póly magnetu i mezi elektrickými náboji: Experimenty, uskutečňované ve vzduchu a neuvažující vliv prostředí. Potvrdilo se to, co se již tušilo v minulosti, totiž že síly působící mezi póly magnetu i mezi elektrickými náboji se řídí týmiž zákony jako gravitace. Tedy že platí nepřímá úměrnost na čtverci vzdálenosti. Tím byla umožněna aplikace celé soustavy Newtonovy mechaniky na oblast elektřiny a magnetismu. ALE S VÝJIMKOU: v těchto oblastech na rozdíl od gravitace existují vedle sil přitažlivých i síly odpudivé, ale brání jako síly „působící na dálku“, tedy okamžitě a prázdným prostorem.

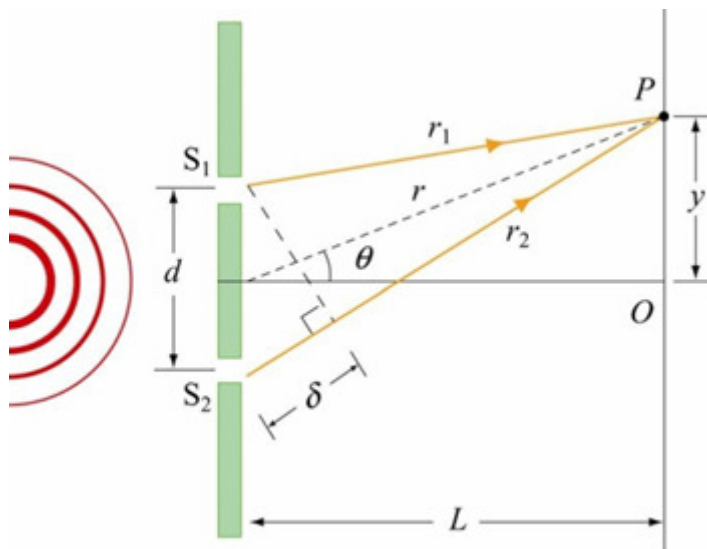
THOMAS YOUNG 1801

Do zatemněné místnosti přicházelo sluneční světlo úzkou štěrbínou, které pak bylo rozděleno do dvou svazků paprsků pomocí dvojice štěrbín (dvojštěrbina) v malé vzájemné vzdálenosti. Očekávali bychom, že světlo po průchodu štěrbínami osvětlí 2 světlé oblasti na stínítku a tam, kde světlo nedopadne, bude stínítko tmavé.

Když světlo ze štěrbín dopadlo na stínítko umístěné ve větší vzdálenosti, překvapivě pozorujeme barevné proužky rovnoběžné se štěrbínami – tzv. interferenční obrazec.



Pokud je použit monofrekvenčním zdroj světla (laser), má interferogram podobu navzájem rovnoběžných, pravidelně rozložených světlých a tmavých proužků rovnoběžných se štěrbinami.



Světlý proužek je v místě interferenčního maxima, kde je světelná energie nahromaděna:

$$\delta = d \cdot \sin \theta = k \cdot \lambda$$

A tmavý proužek v místě interferenčního minima, kde je intenzita světla velmi malá:

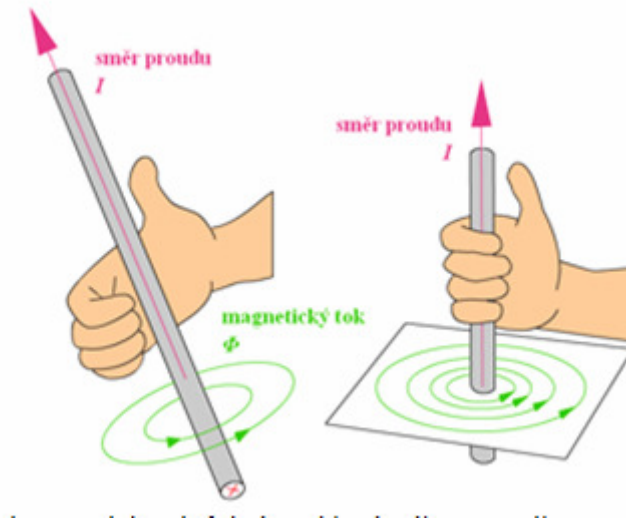
$$\delta = d \cdot \sin \theta = \left(k + \frac{1}{2}\right) \cdot \lambda$$

Vznik proužků označil Young za výsledek interference světla, a tím za jasný důkaz, že světlo je vlnění.

ANDRE MARIE AMPERE 1882

Solenoid: V roce 1822 sestrojil první solenoid. Při pokusech se solenoidní cívkou zjistil, že pokud jí protéká proud, orientuje se jako magnetická strelka.

Pravidlo pravé ruky: Uchopíme vodič elektrického proudu pravou rukou tak, že palec ukazuje směr proudu, pak ostatní prsty ukazují orientaci indukčních čar. Rovněž vztah mezi magnetickou indukcí, rychlostí, nábojem a silou.



Galvanometr: objev přístroje, který pomocí výchylky strelky umožňuje měřit protékající elektrický proud.

Směr elektrického proudu: V elektrodynamických pokusech definuje směr elektrického proudu jako směr pohybu kladného elektrického náboje, zavádí severní a jižní pól magnetu.

Ampérův zákon: při svých pokusech pak též teoreticky odvozuje velikost tajemného působení dvou nezávislých elektrických proudů - tento vztah, nazývaný jako Ampérův zákon

$$\int_c H \cdot dc = I$$

Pokouší se při svých výzkumech najít i podstatu elektřiny a magnetismu. V lednu roku 1821 předkládá teorii, ve které o magnetismu uvažuje jako o působení hypotetických atomárních a molekulárních proudů. Tato myšlenka, se později objeví v Bohrově modelu atomu s jeho elektronovými orbitami.

Ampérův silový zákon: zákon vzájemného silového působení dvou lineárních vodičů protékaných elektrickým proudem, který položil základy elektrodynamiky, případně vztah pro magnetickou sílu působící na proudovodič v obecném magnetickém poli. Tento vztah udává sílu, kterou působí magnetické pole na elektrický vodič protékaný elektrickým proudem. Vztah představuje obdobu vztahu pro magnetickou Lorentzovu sílu

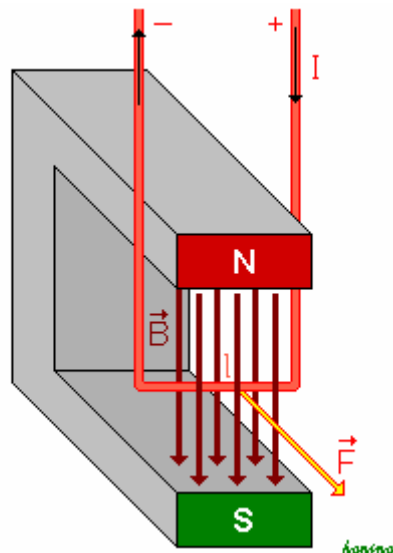
$$F_L = q \cdot (v \times B)$$

ze kterého jej lze odvodit. Síla vystupující v tomto vztahu se někdy nazývá Ampérova či Laplaceova.

Zákon formulovaný v diferenciálním vektorovém tvaru stanoví sílu $d\mathbf{F}$, kterou působí magnetické pole o magnetické indukci \mathbf{B} na element lineárního elektrického vodiče o délce a směru $d\mathbf{l}$ protékaného elektrickým proudem \mathbf{I} . Tento vztah lze zapsat rovnicí:

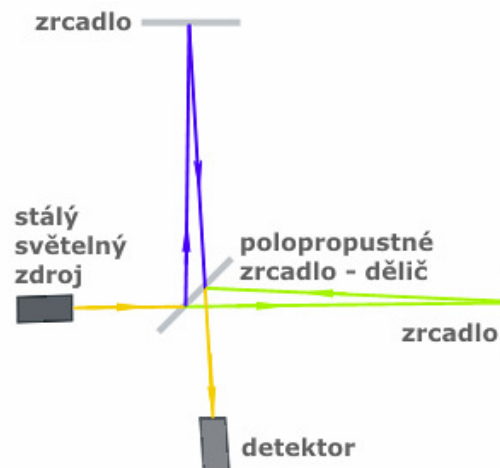
$$d\mathbf{F} = I d\mathbf{l} \times \mathbf{B}$$

(Pravidlo levé ruky)



MICHELSON - MORLEY 1887

Cílem bylo měření rychlosti Země pohybující se domnělým „světelným éterem“. Schéma pokusu je znázorněno na nákresu Michelsonova interferometru, k rozdělení světla na dva monochromatické paprsky (t. j. mající jen jednu vlnovou délku), které se dále šíří v pravém úhlu, bylo použito polopropustné zrcadlo s tenkou vrstvou stříbra. Po opuštění tohoto dělicího zrcadla se oba paprsky odrážejí několikrát mezi dalšími zrcadly aby oba paprsky urazily stejnou vzdálenost, je pro ně počet odrazů shodný (během skutečného Michelson-Morleyova experimentu bylo použito více zrcadel než je vidět na obrázku). Po jejich následném sloučení vznikne obrazec konstruktivní a destruktivní interference. I malá změna rychlosti světla v některém z ramen interferometru (způsobená tím, že se přístroj společně se Zemí měl pohybovat předpokládaným „éterem“) by měla zapříčinit změnu doby, kterou paprsek potřebuje na překonání vzdálenosti, což se mělo projevit jako změna interferenčního obrazce. Celé zařízení se otáčelo (nejprve bylo zařízení natočeno tak, že jeden paprsek jde podél pohybu Země a druhý kolmo na něj), aby se změnila dráha paprsků v „éteru“ vlivem toho, že rychlosti světla a Země by se měly sčítat.



Experiment neměl žádný výsledek, ať bylo aparaturou otáčeno jakkoliv a stal se pravděpodobně nejznámějším a nejužitečnějším neúspěšným experimentem v historii fyziky. Éter se prostě nijak měřitelně neprojevuje. Rychlost světla je konstantní ve všech směrech. Na základě tohoto experimentu byla prokázána nezávislost rychlosti světla na pohybu Země kolem slunce a neexistence „éteru“.

ALBERT EINSTEIN

Myšlenkový experiment, že on sám žene za paprskem světla vedl k formulování speciální teorie relativity (STR) -> jedinečný příklad použití myšlenkového experimentu, protože experiment totiž nebyl fyzicky nikdy proveden, ale pomohl ustanovit úspěšnou teorii, která byla posléze prokázána jinými empirickými metodami.

Einsteinův –de Haasův experiment byl pokus k určení podílu magnetického momentu a momentu hybnosti elektronu. Z pootočení feromagnetického válce na otáčivém vlákně při změně magnetického pole se určí uvedený podíl.

Fotoelektrický jev je jev, který v roce 1887 poprvé popsal Heinrich Hertz. Pozoroval z pohledu tehdejší fyziky nevysvětlitelné chování elektromagnetického vlnění při dopadu na povrch kovu. Kvantové vysvětlení poskytl Albert Einstein. Einstein za vysvětlení fotoelektrického jevu a za svůj přínos k teoretické fyzice dostal Nobelovu cenu v roce 1921. Je to fyzikální jev, při němž jsou elektrony uvolňovány (vyzařovány, emitovány) z látky (nejčastěji z kovu) v důsledku absorpce elektromagnetického záření (např. rentgenové záření nebo viditelného světla) látkou. Pokud jev probíhá na povrchu látky, tzn. působením vnějšího elektromagnetického záření se elektrony uvolňují do okolí látky, hovoří se o vnějším fotoelektrickém jevu. Fotoelektrický jev však může probíhat i uvnitř látky, kdy uvolněné elektrony látku neopouští, ale zůstávají v ní jako vodivostní elektrony. V takovém případě se hovoří o vnitřním fotoelektrickém jevu. Bylo zjištěno, že při osvětlení některých látek (především kovy) se tyto látky nabíjí. Např. zinek osvětlený ultrafialovým světlem se nabije kladně. Podivné chování světla při interakci s vlněním vysvětlil až Einstein v roce 1905 s využitím poznatků právě se rodící kvantové teorie. Byla to především Planckem prezentovaná teorie, že elektromagnetické vlnění předává svou energii při interakcích s jinými částicemi nespojitě, po takzvaných kvantech. Velikost kvanta energie [foton] závisí na frekvenci (vlnové délce) elektromagnetického záření, přičemž platí

$$E = h \cdot \nu = \hbar \cdot \omega$$

Světlo při dopadu předává energii elektronům na povrchu zkoumané látky. Je-li vlnová délka λ světla dostatečně malá, pak frekvence ν a tedy i energie ($c = \nu\lambda$), kterou záření po dopadu předá elektronu může dosáhnout dostatečné hodnoty pro uvolnění tohoto elektronu z vazby v obalu atomu. Hodnota této energie potřebné k uvolnění elektronu se označuje jako ionizační energie. Velikost ionizační energie, kterou potřebují elektrony k uvolnění z látky se někdy označuje jako fotoelektrická bariéra. Předáním dostatečné energie elektronům je možné tuto bariéru překonat (hovoří se také o tzv. výstupní práci). Minimální frekvence, při níž dopadající fotony předávají elektronům energii potřebnou k překonání této bariéry se označuje jako prahová frekvence. Při velkých vlnových délkách (nízkých frekvencích a tedy i energiích) se jev neprojeví, protože energie fotonu nestačí na uvolnění elektronu z obalu atomu. Pokud je energie předaná elektronu větší než je potřeba k jeho uvolnění (tedy větší než výstupní práce), pak fotoelektronu po opuštění látky část energie zůstane. Tato energie má formu kinetické energie elektronu. Z těchto úvah získal Einstein rovnici fotoelektrického jevu

$$h \cdot \nu = h \cdot \nu_0 + E_{\max}$$

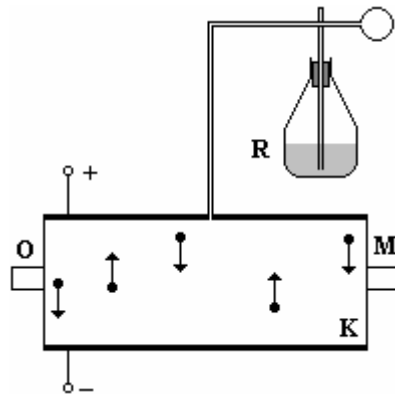
$$h \cdot \nu = W_v + E_k$$

kde h - Planckova konstanta, ν - frekvence dopadajícího fotonu, W_v - výstupní práce, E_k - kinetická energie vyraženého elektronu.

Teorie světelného kvanta [foton] byla předzvěstí vlnově-částicové duality, představy, že fyzikální systémy mohou vykazovat jak vlnové, tak částicové vlastnosti, která byla použita jako základní princip tvůrce kvantové mechaniky.

ROBERT ANDREWS MILLIKAN 1909

Na určení měrného náboje elektronu (poměr elektrického náboje elektronu a jeho hmotnosti). Vodorovný kondenzátor K, do něho vstříknutý olej pomocí rozprašovače R. Kapičky nesoucí elektrický náboj se vnašely mezi vodorovnými deskami kondenzátoru ve zředěném vzduchu. Když nebyl kondenzátor nabit, padaly by vlivem tíhové síly ($m \cdot g$) dolů. Když byl nabit soupaly by vzhůru pod vlivem elektrostatické síly ($q \cdot e$). Vlivem existence odporu vzduchu se rychlost kapiček vždy ustálila. Kapičky bylo možné pozorovat díky osvětlení O a mikroskopu M.



$$F_E = F_G$$

$$m \cdot g = e \cdot E$$

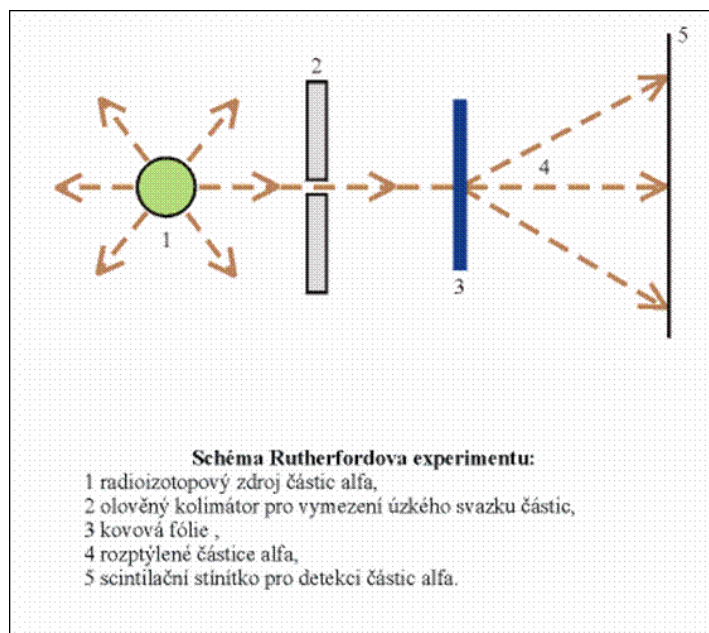
$$m \cdot g = q \cdot \frac{U}{d}$$

$$q = \frac{m \cdot g \cdot d}{U}$$

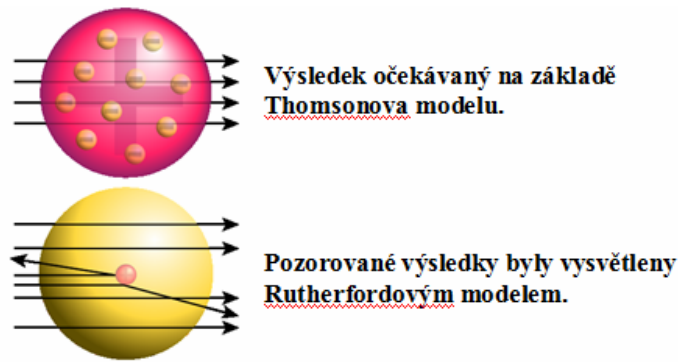
Millikan změřil náboje kapiček a zjistil, že náboj je vždy malým celočíselným násobkem záporně vzatého elementárního náboje. Vysvětlit to lze tak, že na kapičce vždy ulpí několik málo elektronů. Tím bylo ukázáno, že elektrický náboj je kvantován (tj. je možné ho měnit nespojitě).

ERNEST RUTHEFORD 1909

Objev jádra. NC za chemii. Pomocí alfa částic se ostřelovala tenká hliníková fólie. Na stínítku se pozoroval dopad částic.



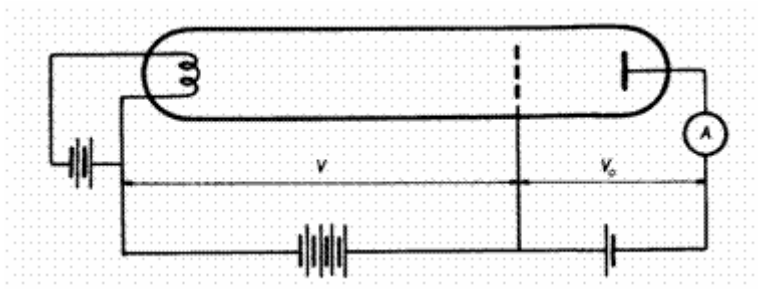
Některé prošly, některé se vychýlily, některé se úplně odrazily. Záviselo na průchodu kolem jádra – odraz, změna směru.



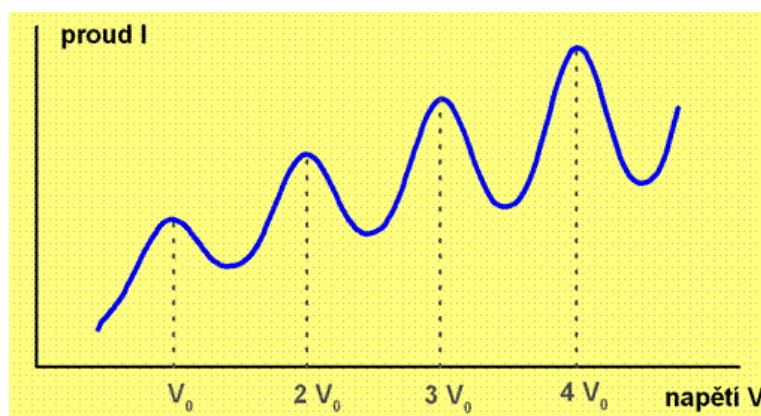
Výsledkem bylo objevení kladně nabitého jádra o velikosti 10^{-15} v atomu o velikosti 10^{-10} . Podstatná část hmoty je soustředěna v kladně nabitém jádře uprostřed, objem má ale zanedbatelný. Vypracoval potom Rutherfordův model atomu, ale měl nedostatky: Z modelu vyplývá spojité spektrum, zatímco v experimentu pozorujeme čárové spektrum atomů. Elektron v Rutherfordově modelu atomu by ztrácel energii a pohyboval by se po spirále směrem k jádru, s nímž by se nakonec spojil. Atom by tedy zanikl. Z výpočtu plyne, že by se tak stalo v čase řádově 10^{-10} s.

James Franck A Gustav Ludwig Hertz 1914

1925 NC. Triodu T plnili Franck a Hertz parami různých prvků. Ze žhavené katody K vystupují elektrony a jsou unášeny elektrickým polem ke kladně nabitě mřížce M. Potenciálový rozdíl mezi katodou a mřížkou označme symbolem V . Na své cestě se elektrony srážejí s atomy par vyplňujících vnitřní prostor triody, přičemž tyto srážky mohou být jak pružné, tak i nepružné. Slabé brzdicí napětí mezi mřížkou a anodou dále způsobí, že jen elektrony s jistou minimální kinetickou energií dopadnou na anodu a přispějí k proudu tekoucímu galvanometrem A. Elektrony s menší kinetickou energií ke katodě nedospějí a jsou odvedeny mřížkovou větví obvodu.



Franck a Hertz měřili v takto sestaveném obvodu závislost proudu I tekoucího galvanometrem A na napětí V mezi katodou a mřížkou. Získali tak voltampérové charakteristiky podobné té, kterou pro ilustraci uvádíme na následujícím obrázku.



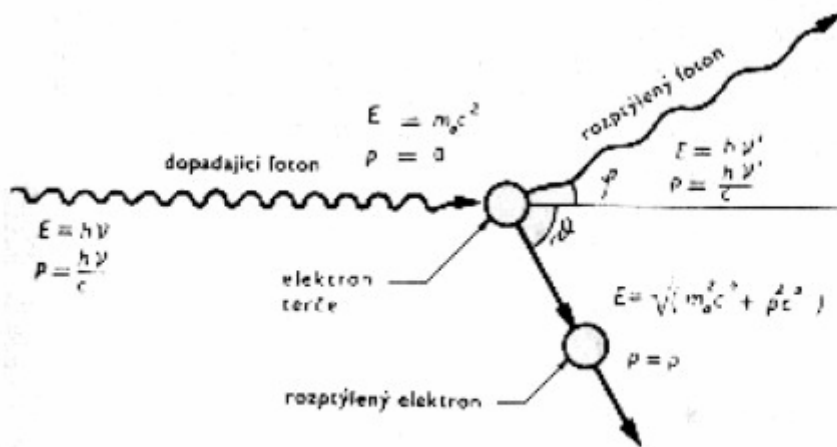
Výsledek experimentu je na první pohled v rámci klasické fyziky nepochopitelný. Podle ní bychom totiž ve shodě s Ohmovým zákonem očekávali spíše monotónní závislost proudu na mřížkovém napětí. Výrazná lokální maxima, ekvidistantně rozložená na experimentální křivce, jsou pochopitelná pouze, přijmeme-li Bohrovu představu o kvantování vnitřní energie atomů. Popišme si proto procesy, které v triodě probíhají, podrobněji.

Elektrony vystupující z katody jsou, jak již bylo uvedeno výše, urychlovány elektrickým polem mezi katodou a mřížkou. Kdyby nebylo srážek s atomy par v triodě, pohybovaly by se rovnoměrně zrychleně s energií rostoucí lineárně se vzdáleností od katody. Zmíněné srážky ovšem charakter pohybu elektronů ovlivňují. Pružné srážky mění jeho směr. Vzhledem k velkému rozdílu mezi hmotnostmi elektronů a atomů nedochází během nich k téměř žádným změnám kinetické energie elektronů. Naopak ve srážce nepružné, která je doprovázena excitací srážejícího se atomu, se kinetická energie elektronů zmenšuje. A zde je třeba hledat původ oněch záhadných maxim a minim na voltampérových charakteristikách změřených Franckem a Hertzem.

Pro páry rtuti zjistili Franck a Hertz, že první pokles proudu nastává pro mřížkové napětí $V = 4,9 \text{ V}$. Energetický rozdíl mezi základní a první excitovanou hladinou v atomu rtuti by tedy měl být . V dokonalém souladu s tímto závěrem pozorujeme v absorpčním spektru rtuťových par spektrální čáru o vlnové délce 253,6 nm, jíž odpovídá energie fotonu rovná právě oněm 4,9 eV.

ARTUR HOLLY COMPTON 1923

Comptonův rozptyl. 1927 NC. Při tomto typu absorpce narazí foton záření gama nebo rentgenového záření na elektron, který uvolní z jeho dráhy. Foton přitom ztratí pouze určitou část své energie, změní směr pohybu a pokračuje dál jako rozptýlené záření o větší vlnové délce. Čím víc energie získal elektron od fotonu, tím méně je odchýlen od původního směru pohybu fotonu. Foton v tomto případě změní svůj směr o větší úhel. Při předání menší části energie je tomu naopak: odchýlení dráhy elektronu (po srážce s fotonem) od původního směru fotonu je větší, odchýlení fotonu je menší.



Obr. 3.13 Comptonův jev.

Při Comptonově jevu se tedy počet fotonů nemění, fotony se pouze rozptylují z původního směru, ztrácejí část své energie a zvětšují svoji vlnovou délku. Uvažujme takové uspořádání experimentu, kdy na elektron, který je v klidu dopadá foton (tedy elektromagnetické záření).

$$h\nu - h\nu' = E_k$$

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = \frac{h}{m_e \cdot c} (1 - \cos \theta)$$

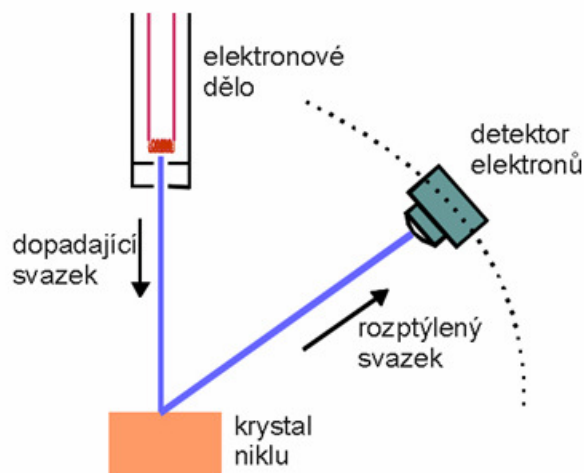
Podle Comptonovy rovnice dochází k největší změně vlnové délky pro úhel rozptylu $\theta = \pi$, tzn.

$$\Delta\lambda = 2 \cdot \frac{h}{m_e \cdot c}$$

Experimentální důkaz tohoto jevu sloužil jako jeden ze základních argumentů pro vlnově-korpuskulární charakter světla a elektromagnetického záření celkově.

CLINTON JOSEPH DAVISSON 1927

Davissonův-Germerův pokus. NC 1937. Při Davissonově-Germerově pokusu dopadá svazek elektronů na krystal niklu. Intenzita rozptýlených (odražených) elektronů v závislosti na směru se měří pohyblivým detektorem elektronů (měří se proud, jenž vytváří elektrony dopadající do detektoru).

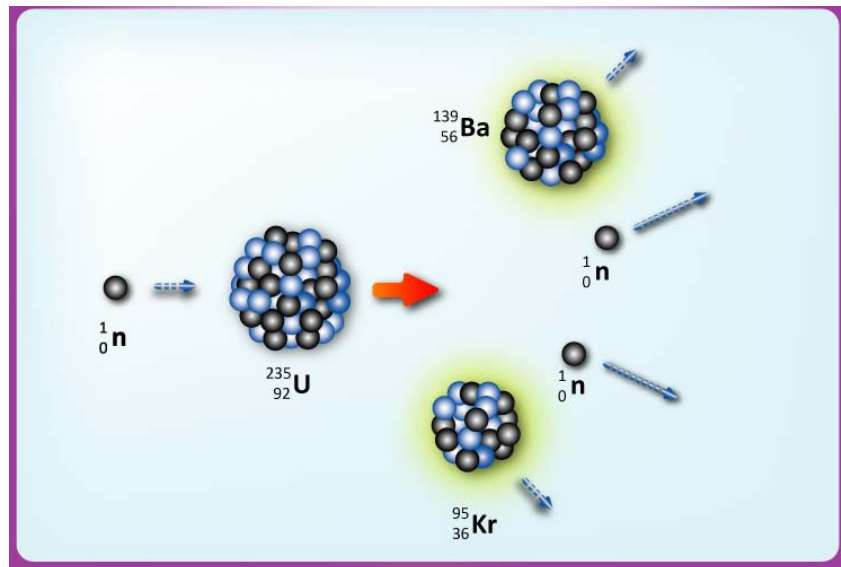


Charakteristickou vlastností vlnění je schopnost interference (difrakce). Vlnové vlastnosti hmotných objektů experimentálně potvrdili v roce 1927. V experimentu dopadal svazek elektronů urychlených napětím několika desítek voltů na povrch krystalu niklu. Při urychlovacím napětí několika desítek voltů dochází k odrazu elektronů na povrchové vrstvě atomů krystalu. Při měření intenzity rozptýlených elektronů v závislosti na směru rozptylu pozorovali zřetelná maxima a minima. K vysvětlení jejich vzniku využili de Broglieho vlnovou hypotézu. Navrhli interpretaci, podle níž se elektrony rozptylují na atomech krystalu zcela obdobně jako paprsky rentgenového záření. Tím byl dualismus částice - vlna (korpuskulárně vlnový dualismus) prokázán i pro částice. Proto je nutné si uvědomit, že pod pojmem částice se v mikrosvětě rozumí objekt, který vykazuje jak částicové vlastnosti, tak vlnové vlastnosti.

LISA MEITNEROVÁ 1933

1917 objev prvku 191 – Protaktinium. Meitnerová + Hahn.

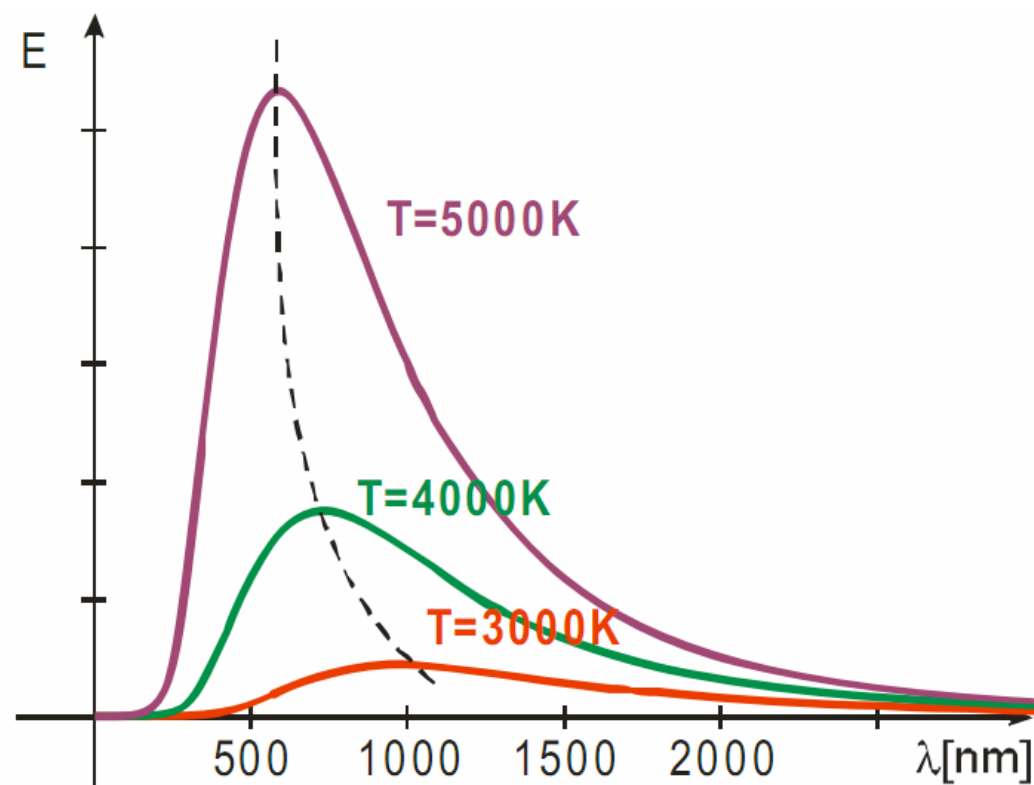
Štěpení uranu (NC Hahn 1944) Štěpením jádra atomu uranu pomocí neutronového bombardování vzniká radioaktivní bariem. Při tomto procesu se v důsledku Einsteinova vztahu $\Delta E = \Delta mc^2$ uvolní obrovské množství energie (200 MeV), což je řádově 107 krát více než při běžné chemické reakci. Při této reakci vznikají dva fragmenty a dva až tři neutrony.



Kromě neutronů vznikají i fotony gama záření. Energie reakce v případě štěpení uranu je průměrně 200 MeV. Štěpení uranu se uskuteční pouze tehdy, zachytí-li se neutron v jádře. To je možné pouze pro tzv. pomalé neutrony, které mají kinetické energie nižší než 0,3 eV. Podmínkou vzniku štěpné řetězové reakce uranu je proto tzv. moderace neutronů (sníží se jejich kinetická energie)

Interpretace předložených grafických závislostí např. grafu záření černého tělesa.

Sledujeme, kolik energie (spektrální hustota intenzity vyzařování) vyzáří černé těleso při určité teplotě v nějakém rozsahu vlnových délek (například od 700 nm do 710 nm) \Rightarrow pro každý interval získáme hodnotu energie \Rightarrow graf (přirůzných teplotách různé křivky).



Z grafu vidíme:

- S rostoucí teplotou se zkracuje vlnová délka, na které se vyzáří nejvíce energie (špička křivky).

Wienův posunovací zákon:

$$T \cdot \lambda = b$$

- S rostoucí teplotou se vyzářuje větší množství energie.

Stefan-Boltzmannův zákon:

$$M_e = \sigma \cdot T^4$$

Důležité je si uvědomit, že při dané teplotě vyzářuje těleso záření VŠECH vlnových délek. Přitom ale záření s různou vlnovou délkou mají různou intenzitu. Posun maxim je zde uveden čárkovanou čarou. Fyzici se dlouho snažili odvodit vztah pro tvar křivky při různých teplotách \Rightarrow korektní odvození z hlediska klasické fyziky = ultrafialová katastrofa = ze vzorců vyplývalo, že každé těleso vyzářuje nekonečné množství energie na velmi malých vlnových délkách \Rightarrow klasická fyzika neumí vysvětlit křivku záření černého tělesa \Rightarrow jedno z vodítek ke kvantové teorii.