

9. Fyzika mikrosvětla

Elektromagnetické spektrum

9.1.1 Druhy elektromagnetického záření

Přehled elektromagnetického spektra

$f(\text{Hz})$	$\lambda(\text{m})$	$f(\text{Hz})$	$\lambda(\text{m})$
10^5	10^4 dlouhé	10^{12}	10^{-3}
10^6	10^3 střední rozhlasové vlny	10^{13}	10^{-4} infračervené
10^7	10^2 krátké rozhlasové vlny	10^{14}	10^{-5} záření
10^8	10 VKV	10^{15}	10^{-6}
10^9	1 radiolokační vlny	10^{16}	10^{-7} ultrafialové
10^{10}	10^{-1} decimetřové	10^{17}	10^{-8} záření
10^{11}	10^{-2} centimetřové	10^{18}	10^{-9} rentgenové
	10^{-3} milimetrové vlny	10^{19}	10^{-10} záření
		10^{20}	10^{-11}
		10^{21}	10^{-12} záření γ
			10^{-13}

Vlnění různých vlnových délek mají velmi odlišné fyzikální vlastnosti. Různé druhy elektromagnetického záření se liší zejména svou schopností procházet různými látkami.

Každé elektromagnetické vlnění přenáší energii (např.: žárovka, anténa, rentgenka).

9.1.2 Vlastnosti infračerveného a ultrafialového záření

Světelné záření zabírá jen velmi malou část spektra elektromagnetického záření v rozsahu: 400 nm – 760 nm.

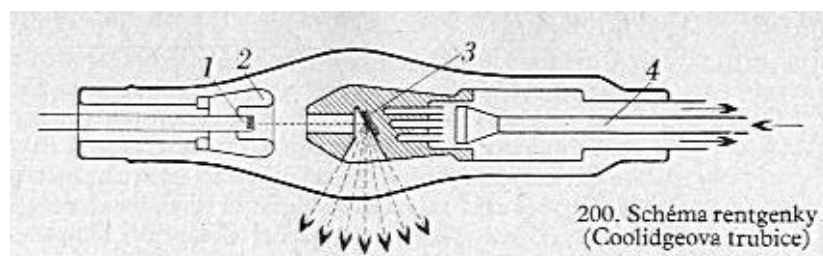
Infračervené záření má vlnovou délku 0,4 mm – 760 nm. Infračervené záření nevnímáme zrakem, při dopadu na kůži nás hřeje (pocit tepla). Má velkou vlnovou délku a fotony mají malou energii. Př: termovize

Ultrafialové záření má vlnovou délku 400 nm – 4 nm. Fotony mají velkou energii, a proto vyvolává luminiscenci, ničí mikroorganismy, působí na zhnědnutí kůže, může vyvolat rakovinu kůže. Pohlcuje se ve skle či ve vzduchu. Nebezpečí ultrafialového záření roste s nadmořskou výškou.

9.1.3 Rentgenové, gama, kosmické záření

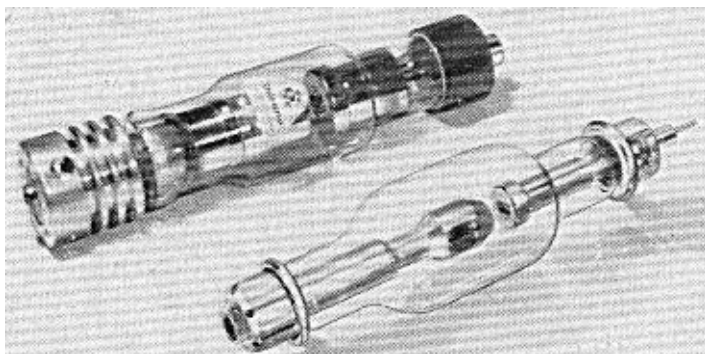
Rentgenové záření má vlnovou délku 10 nm – 0,01 nm a objevil jej Wilhelm Conrad Röntgen. Rentgenové záření vzniká při zabrzdění letících elektronů (využití u rentgenky).

Rentgenka



Je to dioda s vysokým vakuem s přímožhavenou katodou (1) z wolframového drátu. Mezi katodou a anodou je napětí 10 – 400 kV a odvádí všechny elektrony k anodě, takže je proud v rentgence nasycený.

Regulace proudu se provádí změnou žhavení. Katoda je obklopena Wehneltovým válcem (2), který je s ní vodivě spojen a slouží k soustředění svazku elektronů do jednoho místa anody. Rentgenové záření vzniká na anodě (3) v místě, kde na ni dopadají elektrony. Anoda je kovový, většinou wolframový válec se šikmou čelní plochou, aby rentgenové záření vycházelo přímo z baňky ven a nezasahovalo katodu. Rentgenovým zářením se vyzáří méně než 1% celkové energie elektronů a zbytek je teplo. Rentgenku musíme chladit (4).



Rentgenové záření ionizuje vzduch, při dopadu na vhodnou látku vyvolává fluorescenci a působí na fotografickou emulzi. Prochází všemi látkami, ale je v nich též částečně pohlcováno. Nejvíce ho pohlcuje olovo (obecně závisí na protonovém čísle). Pohlcování závisí na tloušťce látky a na vlnové délce záření.

Využití: rentgeny (lékařství),

zjišťování vad – trhlin (defektoskopie), vzduchových bublin.

Lékařský rentgen

Kosti obsahují vápník s vyšší atomovou hmotností. Svaly a vnitřnosti mají prvky s menší poměrnou atomovou hmotností. Kosti proto pohltní více záření než svaly a na fluorescenčním stínítku se objeví stínový obrázek kostí.

Máme dva druhy záření:

Tvrdé záření – má kratší vlnovou délku, prozáří tlustší předměty a lidské tělo nevystavuje velkému záření - využití při rentgenování lidského organismu

Měkké záření – má větší vlnovou délku, používá se při rentgenové terapii (ozařování). Cílem je, aby lidské tělo pohltilo co nejvíce záření.

Gama záření

Při zachycení neutronů nebo protonů jádra se přebytek energie nově vzniklého jádra vyzáří v podobě paprsků gama. Př.: jaderný reaktor

Kosmické záření

Kosmické záření je proud nabitých částic s velkou energií, které přicházejí z vesmíru. Prvotní částice jsou pohlcovány v horních vrstvách atmosféře, přitom vnikají do ní sekundární částice a ty dělíme na dvě složky: tvrdé a měkké.

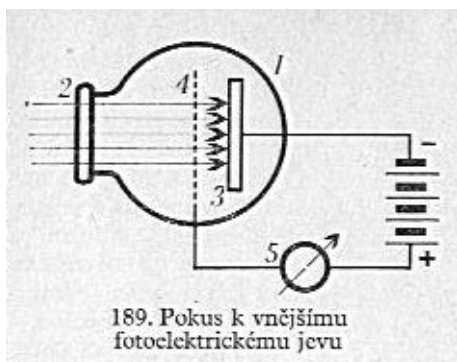
Tvrdá složka má velkou pronikavost a projde celou vrstvou a je hlavní součástí kosmických paprsků.

Kvantová optika

9.2.1 Vnější fotoelektrický jev

Spočívá v tom, že světelné záření, které dopadá na povrch kovu uvolňuje z kovu elektrony (náboj záporně nabitého tělesa se po ozáření slunečním světlem zmenšuje, u kladného ne).

Mluvíme o tzv. fotoelektrické emisi (fotoemisi)



189. Pokus k vnějšímu fotoelektrickému jevu

Vlastnosti fotoelektrického jevu se zjišťují pokusem na obrázku. Ve vyčerpané baňce (1) s okénkem pro světlo (2), kterým vniká světlo, je umístěna deska z kovu (3), jehož fotoelektrickou emisi chceme zkoumat. Deska je připojena k zápornému pólu baterie, a je tedy katodou. Proti ní je umístěna drátěná mřížka (4), připojená ke kladnému pólu baterie, která je anodou. V obvodu mezi anodou a katodou je kromě baterie zapojen citlivý

mikroampérmetr (5). Záření při dopadu na desku uvolňuje elektrony, které přitahuje anoda a obvodem protéká el. proud.

Bylo zjištěno:

- 1) Fotoemise nastává jen tehdy, je-li vlnová délka dopadajícího záření menší než mezní vlnová délka (záleží na materiálu).
- 2) Při ozáření dané katody určitým světelným zdrojem je fotoelektrický proud přímo úměrný intenzitě dopadajícího záření.
- 3) Rychlost elektronů závisí jen na materiálu katody a na vlnové délce záření.

K uvolnění elektronu z kovu je třeba vykonat práci (výstupní práce), ta se koná na účet energie záření. Přebytek energie záření se mění na kinetickou energii elektronu, takže dopadající záření dodá elektronu energii: $W = W_1 + \frac{1}{2} \cdot m_e \cdot v^2$, W_1 - výstupní práce daného

kovu, v - je rychlost elektronu.

Podle vlnové teorie by energie W měla být určena jedinečně intenzitou záření a to je v rozporu s výsledky experimentů.

9.2.2 Fotony

Výklad fotoelektrického jevu provedl Albert Einstein v roce 1905. Zjistil, že zdroje záření nevyzařují energii spojitě, ale po částech (kvantech). Kvanta zářivé energie se chovají jako částice záření a šíří se rychlostí světla c a nazývají se fotony. Pro energii jednoho fotonu

záření, o kmitočtu ν : $W = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$, h - Planckova konstanta.

Energie fotonů závisí na kmitočtu. Fotony nemohou existovat ani v klidu, ani při rychlosti větší než je c . Při dopadu na těleso se buď odrazí nebo pohltí (pak předávají svou energii a zaniknou).

Je-li při dopadu $h\nu \geq W$ může dojít k uvolnění elektronu.

Pro ohraničení fotoemise, mezní vlnová délka, kdy jev bude probíhat: $\lambda_m = \frac{hc}{W}$

Experimentálně zjištěné hodnoty přesně odpovídají těmto rovnicím.

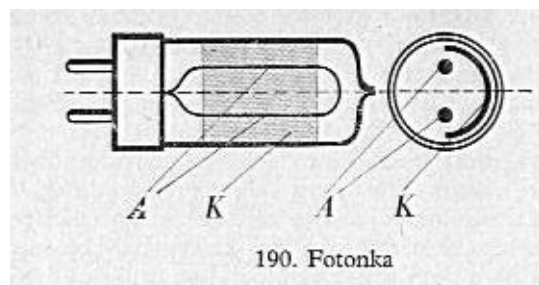
Mají-li dopadající fotony větší energii, než která je nutná k emisi elektronů, přemění se zbytek energie na kinetickou energii elektronů. Energie fotonu se zčásti přemění na výstupní práci a zčásti na kinetickou energii elektronu podle **Einsteinovy rovnice**: $h\nu = W + \frac{1}{2} m \cdot v^2$.

Důsledky rovnice:

Rychlost elektronu závisí na kmitočtu záření a na výstupní práci látky katody, nezávisí na intenzitě záření.

Na vnější fotoelektrickém jevu jsou založeny fotonky.

Fotonky



Složení: baňka, fotoelektrická katoda, anoda (síťka), drátů.

Na sklo se nanáší tenká vrstva dobře vodivého podkladu Ag, a na ni je nanesen emitující kov. Aby fotonka pracovala při viditelném záření, musí se užít kovu, jehož mezní vlnová délka je dosti velká. Vyhovují alkalické kovy (Li, Na, K, Rb,

Cs). Z nich je nejlepší cesium.

Vakuová fotonka

U vakuové fotonky je baňka vyčerpána a proud je tvořen výhradně emitovanými elektrony. Již při malém napětí mezi katodou a anodou je proud nasycený a při dalším zvyšování napětí se nemění.

Plynová fotonka

Fotonky se často plní netečnými plyny (He, Ne, Ar). V plynové fotonce narážení urychlené elektrony na atomy plynu, které ionizují. Ionizací vznikají další elektrony a proud fotonky se zvětšuje. Ionizační napětí netečných plynů jsou asi 20 V. Při tomto napětí se projeví zvětšení proudu.

9.2.3 Vnitřní fotoelektrický jev

Vnitřní fotoelektrický jev

Spočívá v tom, že fotony dopadajícího záření uvolňují nosiče elektřiny (elektrony a díry) v polovodičích, a to uvnitř jejich krystalické struktury. Tím se zvětšuje v polovodiči počet nosičů náboje a roste jeho elektrická vodivost (klesá elektrický odpor). Počet uvolněných nosičů a tím i změna vodivosti jsou přibližně úměrné intenzitě dopadajícího záření.

Hradlové fotoelektrické články využívají kromě vnitřního fotoelektrického jevu ještě usměrňujícího účinku rozhraní kov – polovodič.

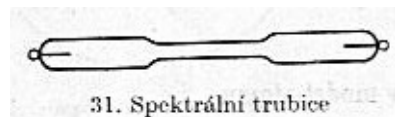
Atomová fyzika

9.3 Atomový obal

9.3.1 Čárové spektrum

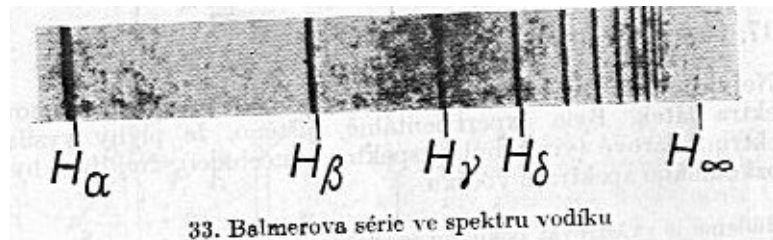
Nejlepší informace o obalu atomu podá atomové spektrum. Bylo experimentálně zjištěno, že plyny vysílají spektrum čárové. Soustava spektrálních čar daného plynu je pro každý druh atomů charakteristická tak jako otisk prstu pro každého člověka. Podle spektra můžeme prvky přesně identifikovat a provádět chemickou spektrální analýzu.

Pokus



31. Spektrální trubice

Zkoumáme to ve spektrální trubici, která obsahuje vodík o nízkém tlaku. Trubicu připojíme ke zdroji vysokého napětí, vznikne v její plyné náplni samostatný výboj jehož spektrum sledujeme pomocí spektrometru. Jako první bylo zkoumáno spektrum vodíku. Obsahuje 4 čáry. Výzkum potvrdil přímou souvislost čárových spekter se stavbou atomů.

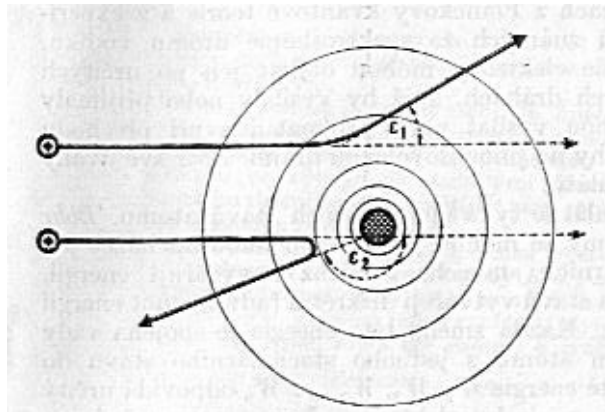


33. Balmerova série ve spektru vodíku



32. Uspořádání pokusu ke zkoumání spektra vodíku

9.3.2 Rutherfordův model atomu

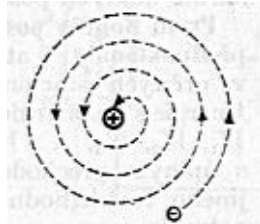


Zkoumal rozptyl částic α (jádra He) na tenké kovové fólii (emitované radioaktivními látkami). Zjistil, že většina jich projde bez podstatné odchylky. Jen menší počet částic se zřetelně odklonil od původního směru. Z rozptylu částic při průchodu tenkými kovovými fóliemi Rutherford usoudil, že většina částic prochází atomy jako rychle letící střely. Atomy jsou snadno propustné. Předpokládal, že veškerá hmotnost atomu je soustředěna ve velmi malé oblasti, v tzv. jádře atomu (průměr atomu je řádově 10^{-9} až

10^{-10} m, průměr jádra řádově $10^{-14} - 10^{-15}$ m), které má kladný elektrický náboj. Odchylky vysvětlil působením sil elektrického pole vytvořeného mezi jádrem a částicí α . Částice, která se značně přiblížila ke kladně nabitému jádru, se působením sil v elektrickém poli jádra zakřivuje.

Předpokládal, že elektrony krouží okolo jádra jako planety kolem Slunce – označujeme **planetární model**. Coulombova přitažlivá síla je dostředivou silou oběžného pohybu elektronu kolem jádra. Planetární model byl však v rozporu se zákony klasické fyziky a s pozorováním.

Příklad atomu H_2 :



Atom vodíku se skládá z jádra s kladným elektrickým nábojem (protonu), kolem kterého obíhá jediný elektron se stejně velkým záporným nábojem. Podle zákonů klasické fyziky je pohyb elektronu po zakřivené dráze provázen proměnným elektromagnetickým polem. Elektron obíhající kolem jádra by tedy neustále vyzařoval energii na úkor své energie kinetické, takže by se neustále blížil k jádru, nakonec by s jádrem splynul a atom by zanikl. Dále by se zkracovala oběžná

doba a rostl by kmitočet, což odporuje experimentu.

Uvedené rozpory planetárního modelu atomu se skutečností ukázaly jeho nedokonalost a neslučitelnost s představami klasické fyziky.

9.3.3 Bohrov model atomu

Za tímto modelem stál Niels Bohr (dán, v roce 1913). Snažil se odstranit rozpory s Rutherfordovou teorií. Převzal planetární model a vyšel z Planckovy teorie a z experimentů. Učinil předpoklad, že elektrony mohou obíhat jen po určitých dovolených kruhových drahách, aniž by vysílaly nebo přijímaly energii. Energií mohou vysílat nebo přijímat jen při přechodu z jedné dovolené dráhy na jinou dovolenou dráhu.

Bohr vše shrnul do dvou postulátů:

- 1) Atomy se mohou nacházet v jistých stacionárních stavech, v nichž nevyzařují energii. Energie stacionárních stavů vytvářejí diskretní řadu hodnot energií $W_1, W_2, \text{atd.}$ Každá změna této energie je spojena vždy s úplným přechodem atomu z jednoho stavu do jiného. Každé hodnotě energie $W_1, W_2, \text{atd.}$ odpovídá určitý poloměr $r_1, r_2, \text{atd.}$ dráhy elektronu. Jsou proto možné jen zcela určité poloměry drah elektronů. Pro tyto poloměry platí: **Bohrova**

kvantová podmínka $m_e \cdot v \cdot r = n \cdot \frac{h}{2 \cdot \pi}$, v – oběžná rychlost, m_e – hmotnost elektronu, r – poloměr dráhy, h – Planckova konstanta.

Z Bohrovy podmínky plyne, že elektron se nemůže pohybovat po kružnicích o libovolném poloměru, neboť jeho dráhy jsou kvantovány. Na pravou stranu rovnice je nutné dosadit za n celá kladná čísla. Číslo n je nazývá hlavní kvantové číslo.

2) **Bohrova frekvenční podmínka.** Týká se vyzařovaných frekvencí. Bohr předpokládal, že při přechodu z jednoho stavu do jiného vyzařují nebo pohlcují atomy monochromatické záření zcela určitého kmitočtu, pro který platí: $f = \frac{W_n - W_s}{h}$, kde W_n, W_s – jsou hodnoty energie příslušných stacionárních stavů.

9.3.4 Franckův-Hertzův pokus

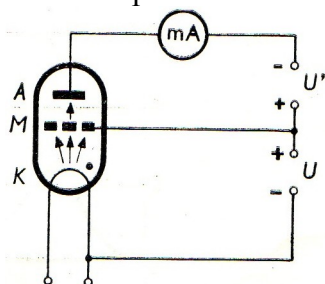
Skutečnost, že atom může vyzařovat a přijímat diskrétní hodnoty energie, byla experimentálně dokázána v roce 1914. Popíšeme si princip pokusu, který je na obrázku.

Atomy nebo molekuly plynu jsou odštělovány pomalými elektrony, přitom se pozoruje rozložení rychlosti elektronu před srážkou a po ní.

Při pružné srážce se rozložení nemění, při nepružné elektron ztrácí část energie - rozložení rychlostí se mění.

Z pokusů vyplynulo:

- 1) Srážka je pružná, když elektrony mají menší rychlost než je kritická rychlost elektronů (elektron se od atomu rtuti odrazí s nepatrnou změnou kinetické energie).
- 2) Vzroste-li však rychlost elektronu na kritickou hodnotu, nastane srážka nepružná, při níž **elektron předá takřka všechnu svou kinetickou energii atomu rtuti, který přejde do jiného stacionárního stavu, vyznačujícího se větší energií.** Urychlující napětí, které je potřebné k tomu, aby elektron získal kritickou rychlost, se nazývá napětí rezonanční a označuje se $U_r = 4,9$ V.

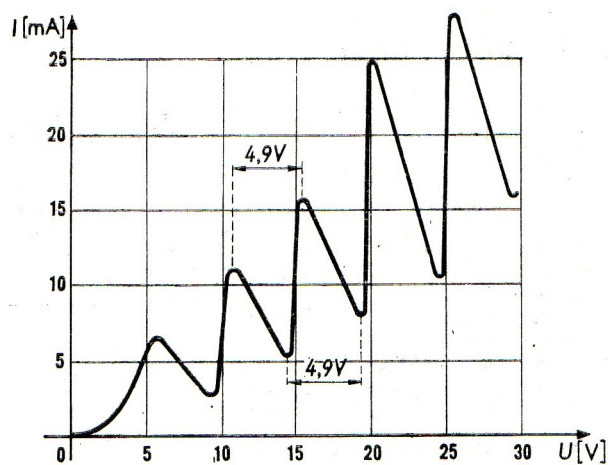


Urychlené elektrony míří k anodě A, před níž je mřížka M. Je-li nabito + pak mezi M a A se elektrony pohybují v brzdícím poli. Jenom ty, které mají dostatečnou W_k doletí až na A, vytvoří zde proud, který lze měřit.

Proud zpočátku roste s rostoucím napětím U podobně jako u elektronky. Jestliže však napětí U vzroste na hodnotu U_r nebo na hodnotu poněkud větší, získají elektrony takovou energii (4,9 eV),

že při rázu s atomy rtuti jim předávají celou svou kinetickou energii, takže už pak nemohou překonat napětí mezi mřížkou M a anodou A, a proud proto klesne na minimum. S rostoucím napětím U se však zvětšuje energie, kterou elektrony po rázu znovu získávají, takže proud roste opět k maximum a při napětí $2 U_r$ nebo o málo větším začne klesat k minimum. Obecně při napětí $n U_r$ počne proud klesat k minimum.

Poklesy proudu se pak s narůstajícím napětím periodicky opakují následkem větší energie a vícenásobných srážek elektronů (obrázek). Tím je dokázáno, že atomy nemohou přijímat libovolné, ale



Závislost anodového proudu I na urychlujícím napětí U při Franckově-Hertzově pokusu

diskrétní hodnoty energie.

9.3.5 Průměr atomu vodíku

Energie je určena $E = hf$

$$E = m \cdot c^2 = p \cdot c = h \cdot f \Rightarrow \frac{p \cdot c}{h} = f = \frac{c}{\lambda} \Rightarrow \lambda = \frac{h}{p}$$

Pohyb elektronu je spojeno s vlnou – vlna musí na dráze interferovat $\Rightarrow 2\pi r = n\lambda = n \frac{h}{p}$

$$2\pi rp = nh$$

$2\pi rmv = nh$ - Bohrova podmínka

$$r = \frac{nh}{2\pi mv}$$

Pro pohyb elektronu kolem jádra: $\frac{m_e v^2}{r} = k \cdot \frac{e^2}{r^2}$

$$\hbar = \frac{h}{2\pi}$$

$$r_n = \frac{n\hbar}{mv} \Rightarrow r_n^2 = \frac{n^2 \hbar^2}{m^2 v^2}$$

$$r = \frac{n^2 \hbar^2}{e^2 m k}$$

$$r_n = n^2 \frac{\hbar^2}{e^2 m} \cdot \frac{1}{k}$$

$$r = \frac{\hbar^2}{e^2 m k} = a_0 - \text{Bohrův poloměr atomu vodíku}$$

$$a_0 = 0,529 \cdot 10^{-8} \text{ cm}$$

$$r_n = n^2 \cdot a_0$$

9.3.6 Energie soustavy jádro - elektron

Poněvadž poloměry a rychlosti oběžných elektronů atomu mají jen určité diskrétní hodnoty, plyne odtud, že energie elektronů na oběžných drahách se může měnit jen po určitých diskrétních hodnotách, jak to bylo experimentálně prokázáno Franckovým-Hertzovým pokusem.

Bohrův postulát o stacionárních stavech stanoví, že elektron při pohybu po libovolné kvantové dráze nevyzařuje energii, takže energie atomu je stálá. Elektronům na každé z kvantových drah přísluší určitá velikost energie, určující energetické hladiny atomu. Vypočteme velikost této energie pro atom vodíku na jednotlivých kvantových dráhách. Energie soustavy se skládá z energie potenciální elektronu v elektrostatickém poli jádra a z energie kinetické elektronu.

Odvození

Coloumbova síla = odstředivá síla

$$k \frac{e^2}{r^2} = \frac{mv^2}{r}$$

$$W_p = -eU$$

$$U = Er = \frac{ekr}{r^2} = \frac{ek}{r}$$

$$W_p = -e \frac{ek}{r} = -\frac{e^2 k}{r}$$

$$E_{\text{celková}} = W_p + W_k = -\frac{ke^2}{r} + \frac{1}{2}mv^2 = -\frac{ke^2}{r} + \frac{1}{2} \frac{e^2}{r} k = -\frac{1}{2} \frac{e^2}{r} k$$

$$E_{\text{celková}} = -\frac{1}{2} \frac{e^2}{r_n} k = -\frac{e^2 k}{2n^2 a_0} = -\frac{K}{n^2} \text{ vyjde nám } 13,67 \text{ eV; přesná hodnota je } 13,53$$

Výpočet energetických hladin pro elektron:

$$E_1 = -13,53 \text{ eV}$$

$$E_2 = \frac{E_1}{2^2} = -3,38 \text{ eV}$$

$$E_3 = \frac{E_1}{3^2} = -1,50 \text{ eV}$$

$$E_4 = \frac{E_1}{4^2} = -0,84 \text{ eV}$$

$$E_5 = \frac{E_1}{5^2} = -0,54 \text{ eV}$$