

PŘÍRODOVĚDECKÁ FAKULTA UNIVERZITY PALACKÉHO V OLOMOUCI

KATEDRA OPTIKY

**ANALÝZA CITLIVOSTI ZRAKU PŘI  
SUBJEKTIVNÍM MĚŘENÍ PLANCKOVY  
KONSTANTY**

Diplomová práce

VYPRACOVALA:

Bc. Markéta Štěpková

Obor: 5345R008 OPTOMETRIE

Studijní rok 2023/2024

VEDOUCÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE:

RNDr. František Petráš

## Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci "Analýza citlivosti zraku při subjektivním měření Planckovy konstanty" jsem vypracovala samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce. Jako autorka uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušila autorská práva třetích osob.

V Olomouci dne 30.4. 2024

\_\_\_\_\_Štěpková\_\_\_\_\_

## **Poděkování**

Děkuji vedoucímu práce RNDr. Františkovi Petrášovi za jeho pomoc, cenné rady a připomínky při zpracování této diplomové práce, a také bych rovněž chtěla poděkovat za pomoc při sestavě experimentu. Také děkuji Ing. Zdeňkovi Řehořovi, Ph.D. za konzultaci při měření spektrálních charakteristik LED diod. Dále děkuji své rodině a blízkým, kteří mě podporovali po celou dobu mého studia. Tato práce byla vytvořena za podpory projektů IGA PřF UP v Olomouci s názvem “Optometrie a její aplikace“, č. IGA\_PrF\_2023\_004 a IGA\_PrF\_2024\_019.

# **Analýza citlivosti zraku při subjektivním měření Planckovy konstanty**

## **Anotace**

Diplomová práce se zabývá zkoumáním spektrální fyziologické citlivosti lidského oka při subjektivním měření Planckovy konstanty, a s tím souvisejícími tématy, jako je psychofyzikální funkce  $K'(\lambda)$  a  $K(\lambda)$  popisující citlivost oka na různé vlnové délky při fotopickém a skotopickém vidění, zrakové vnímání – vytváření zrakového vjemu, teorie barevného vidění, adaptace oka na tmu, úvod do kvantové teorie a problematika LED.

Cílem experimentální části této práce bylo provést analýzu spektrálních křivek citlivosti oka pro fotopické (čípky) a skotopické (tyčinky) vidění za podmínek určité předchozí adaptace na tmu před samotným měřením a během něj. Měření bylo realizováno za pomoci LED diod vybraných vlnových délek. Zaznamenávala se přesná hodnota napětí v okamžiku rozsvícení LED – v tento moment vznikl první zrakový vjem bílého světla. Následně se zaznamenávala hodnota napětí v momentě, kdy fyziologie oka vytvořila barevný vjem. Z hodnot napětí byly výpočtem určeny hodnoty Planckovy konstanty, které sloužily ke srovnání s hodnotou Planckovy konstanty uváděné v literatuře, a rovněž k celkovému vyhodnocení spektrální fyziologické citlivosti oka. V průběhu měření a z naměřených a vypočtených hodnot se došlo k mnoha překvapivým a zajímavým poznatkům a výsledkům, jenž této tematice udávají nový rozměr.

**Klíčová slova:** zrakový vjem, světelná účinnost záření  $K(\lambda)$ , adaptace na tmu, citlivost oka, Planckova konstanta, LED diody, P-N přechod

# **Analysis of visual sensitivity by subjective measurement of Planck's constant**

## **Annotation**

The thesis deals with the investigation of the spectral physiological sensitivity of the human eye during subjective measurement of Planck's constant and related topics such as the psychophysical functions  $K'(\lambda)$  and  $K(\lambda)$  describing the sensitivity of the eye to different wavelengths in photopic and scotopic vision, visual perception - the formation of visual perception, the theory of colour vision, adaptation of the eye to darkness, introduction to quantum theory and LED issues.

The aim of the experimental part of this thesis was to analyse the spectral sensitivity curves of the eye for photopic (cones) and scotopic (rods) vision under conditions of some prior adaptation to darkness before and during the actual measurement. The measurements were performed using LEDs of selected wavelengths. The exact voltage value at the moment of LED illumination was recorded - at this moment the first visual perception of white light was created. Subsequently, the voltage value was recorded at the moment when the eye physiology created the colour perception. From the voltage values, Planck's constant values were determined by calculation and used for comparison with the Planck's constant values reported in the literature, as well as for an overall evaluation of the spectral physiological sensitivity of the eye. In the course of the measurements and from the measured and calculated values, many surprising and interesting findings and results were obtained that give a new dimension to this topic.

**Keywords:** visual perception, The luminous efficiency of radiation  $K(\lambda)$ , dark adaptation, eye sensitivity, Planck's constant, LED diode's, P-N junction

# Úvod

Lidský zrak je velmi specifickým a výjimečným smyslem co se týče přijímání, zpracovávání informací z okolního světa a následné interpretaci a uvědomění si toho, co vidíme. Světlo nejprve vstupuje do oka a prochází všemi optickými médii (dochází k určitým lomům světelných paprsků) až na sítnici. Dva druhy sítnicových fotoreceptorů přijímají světelný signál, který se dalšími (chemickými) procesy mění na elektrický signál vedený zrakovou dráhou do zrakové kůry mozku. Tento velice složitý, komplexní proces zpracování zrakových podnětů z okolí umožňuje vnímání mnoha aspektů, jako je například rozlišování barev, detekce pohybu, prostorová orientace, kontrastní citlivost, vnímání detailů, a také poznávání a pojmenování toho, co vidíme. Jedním z nejvíce pozoruhodných aspektů zraku, kterému se tato práce věnuje, je spektrální citlivost oka. Lidské oko, tedy respektive tyčinkové fotoreceptory jsou velice citlivé na světlo za skotopických podmínek, tj. za šera či za tmy. V literatuře se uvádí, že první zrakový vjem je aktivován přibližně prvními deseti fotony vstupujícími do oka za určitých podmínek, které mohou vytvořit vjem „bílého světla“. Z takto malého množství světelné energie detekovatelné lidským okem lze odvodit poměrně jednoduchými, nicméně fundamentálními fyzikálními vztahy přibližný odhad velikosti Planckovy konstanty. Při subjektivním určení citlivosti oka obecně v celém viditelném spektru vlnových délek za použití LED se setkáváme s překvapivou citlivostí, a také možností určit experimentálně velmi malé hodnoty světelné energie vyvolávající prvotní zrakový vjem.

V teoretické části práce je uvedena základní teorie o fyziologii zrakového vnímání, fyzikálních vlastnostech světla a principech vidění. Zejména jsou popsány vlastnosti zrakového vjemu za různých světelných podmínek a s tím spojená citlivost oka na různé vlnové délky světla, respektive účinek záření na zrak popsaný psychofyzikální funkcí  $K(\lambda)$ . Dále je uveden význam Planckovy konstanty a stručně popsána možnost jejího určení při subjektivní detekci prahového světelného vjemu během rozsvícení LED – při generaci prvních fotonů na polovodičovém přechodu P-N. V této souvislosti jsou též uvedeny nezbytné informace o fyzikální podstatě a vlastnostech P-N přechodu a teorie LED.

V experimentální části je provedeno měření pro vybrané diody odlišných vlnových délek stimulující primárně odlišné typy fotoreceptorů. Zaznamenávána je přesná hodnota napětí na P-N přechodu v okamžiku rozsvícení LED, kdy fyziologie lidského oka vytváří první zrakový vjem bílého světla. Poté je zaznamenána hodnota napětí při následném barevném vjemu. Z těchto hodnot napětí jsou výpočtem určovány hodnoty Planckovy konstanty, které

slouží při srovnání s hodnotou Planckovy konstanty uvedené v literatuře k celkovému vyhodnocení spektrální fyziologické citlivosti oka.

# Obsah

Úvod.....	6
1 Přehled fyzikálních a fyziologických aspektů vnímání světla .....	1
1.1. Fyzikální vlastnosti světla a popis jeho vlivu na zrakový vjem.....	1
1.1.1. Fotometrie .....	2
1.1.2. Účinek záření na zrak.....	5
1.2. Fyziologie vidění (vnímání).....	7
1.2.1. Průběh primární zrakové dráhy a uvědomění si zrakového podnětu .....	8
1.2.1.1. Typy fotoreceptorů.....	10
1.2.1.1.1. Tyčinky.....	11
1.2.1.1.2. Čípky .....	11
1.2.1.2. Distribuce fotoreceptorů na sítnici.....	12
1.3. Duplicitní teorie vidění.....	14
1.3.1. Skotopické vidění.....	14
1.3.2. Mezopické vidění .....	14
1.3.3. Fotopické vidění.....	15
2. Percepce barev.....	15
2.1. Trichromatická teorie barevného vidění.....	15
2.2. Měření barvy .....	17
2.3. Aditivní a subtraktivní míchání barev .....	19
2.4. Metamerie barev.....	20
3. Adaptace oka .....	20
3.1. Adaptační mechanismy oka.....	20
3.1.1. Foto-pupilární reflex .....	21
3.1.2. Rozklad a syntéza pigmentu rhodopsinu.....	21
3.1.3. Změna velikosti receptivních polí .....	22



3.2.	Faktory ovlivňující průběh adaptace .....	22
3.3.	Adaptace na tmu .....	23
3.3.1.	Porucha adaptace na tmu .....	24
4.	Počátky kvantové teorie, Planckova konstanta .....	24
4.1.	Význam a historie.....	26
4.2.	Teorie přechodu P-N .....	29
4.2.1.	Příměsový polovodič .....	31
4.3.	LED .....	33
4.3.1.	Voltampérová (VA) charakteristika LED .....	36
4.3.2.	Vyzařování LED .....	37
4.3.3.	Tunelový jev u elektroluminiscenčních diod .....	38
4.3.4.	Význam LED pro měření Planckovy konstanty.....	39
5.	Experimentální část .....	41
5.1.	Metodika.....	41
5.2.	Výsledky.....	47
5.3.	Diskuze.....	54
	Závěr.....	58
	Zdroje literatury, obrázků a tabulek .....	60

# 1 Přehled fyzikálních a fyziologických aspektů vnímání světla

Světlo je elektromagnetické vlnění, které se přenáší vakuem nebo médii a poskytuje vizuální vjem. Rozsah vlnových délek světla je 380 nm až 790 nm. Záleží také na dalších fyzikálních vlastnostech, které určují, zda a jak bude světlo vnímáno. Z fyziologického hlediska zrakový vjem vzniká zachycením světla zrakovým analyzátozem, jenž sestává ze tří částí: oka, kde vzniká primární obraz, zrakové dráhy, kterou se světlo převedené na nervový impuls dále šíří až do mozku, kde dochází k uvědomění si obrazu vnějšího světa. Oba aspekty, fyzikální i fyziologické, zaujímají stejně významnou roli při zpracování a vnímání světla. Fyzikální vlastnosti světla představují primární popis zrakového stimulu, fyziologie zrakového aparátu pak určuje jejich dopad na výsledný zrakový vjem. [1][2]

## 1.1. Fyzikální vlastnosti světla a popis jeho vlivu na zrakový vjem

Mezi základní fyzikální charakteristiky světla patří jeho vlnová délka a intenzita. Vlnová délka světla dopadajícího do oka hraje významnou, ne však výlučnou, roli ve vnímání barev. Nejkratší vlnové délky odpovídají modré až fialové barvě, dlouhé vlnové délky vidíme jako červené až temně rudé. Středním vlnovým délkám odpovídá zelená až zeleno-žlutá barva. Podrobněji je vjem barev rozebrán v kapitole 2. Vlnová délka je v daném prostředí jednoznačně dána frekvencí, která přímo souvisí s energií elementárních částic světla – fotonů. Blíže bude tento vztah rozebrán v kapitole 4. věnované počátku kvantové teorie a Planckově konstantě. Intenzita, daná kvadrátem amplitudy světelné vlny, zase souvisí s vnímaným jasnem světelného zdroje. Čím větší je amplituda, tím vyšší je jas. Lidské oko dokáže rozlišit různé intenzity světla v širokém rozsahu, od velmi slabého světla až po velmi jasné světlo. Další fyzikální charakteristikou světla je polarizace. Světlo a obecně elektromagnetické vlnění je vlněním příčným, kdy vektor intenzity leží v rovině kolmé na směr šíření. Je-li v této rovině jeho směr nahodilý, je vlnění nepolarizované. Polarizovaným vlněním pak rozumíme stav, při kterém mají tyto vektory v dané rovině stejný směr. Polarizaci lidské oko obvykle není schopno přímo vnímat, a proto se jí dále nebude tato práce zabývat. [3][2]

Významným hlediskem při popisu zdrojů světla, obecněji elektromagnetického záření, je hledisko energetické. Popisem záření jako formy energie se zabývá radiometrie, přičemž

používá ryze objektivní veličiny. Dopadem záření na zrak se pak zabývá fotometrie, která je logicky zaměřena pouze do oblasti viditelných vlnových délek.[4]

### 1.1.1. Fotometrie

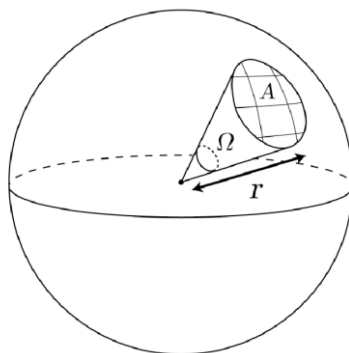
Fotometrie se zaměřuje na energetické vlastnosti zdrojů s ohledem na jejich dopad na zrakové vnímání. Je těsně spjatá s radiometrií, přičemž všechny veličiny jsou poměřovány (váženy) spektrální odezvou oka. Každá fotometrická veličina má odpovídající radiometrickou veličinu a jejich vztah závisí na spektrálním složení světla. Mezi typické fotometrické veličiny patří svítivost, světelný tok, jas, světlení, osvětlení a osvit. Fotometrie využívá detektory optického záření konstruované tak, aby napodobovaly spektrální odezvu oka, nebo spektrometrii spojenou s vhodnými výpočty pro přepočítání podle spektrální odezvy oka. [5][6][7]

#### Svítivost $I$

Základní fotometrickou veličinou je svítivost  $I$  s jednotkou kandela (cd), která od roku 1954 patří mezi základní jednotky Mezinárodní soustavy jednotek (SI). Svítivost charakterizuje bodové zdroje. Jejím radiometrickým ekvivalentem, se kterým úzce souvisí, je zářivost s jednotkou  $W \cdot sr^{-1}$ . Zářivost udává výkon vyzářený do prostorového úhlu jeden steradián. Přitom prostorový úhel  $\Omega$ , který je podstatný při definici řady radiometrických i fotometrických veličin, představuje část prostoru vymezenou rotační kuželovou plochou, viz obr. 1. Určuje se poměrem plochy  $A$  kulového vrchlíku vymezeného na kouli opsané z vrcholu úhlu ke druhé mocnině poloměru  $r$  této koule,

$$\Omega = A/r^2.$$

Jednotkou prostorového úhlu je steradián. Pokud se plocha kulového vrchlíku rovná druhé mocnině poloměru koule, prostorový úhel má velikost 1 sr. [7][8][9]



Obr. 1. Definice prostorového úhlu  $\Omega$  [10]

Kandela je jedinou jednotkou SI, která je vázána na lidské vnímání a v současné době je definována jako svítivost zdroje  $I$ , který vyzařuje monochromatické záření o frekvenci  $540 \cdot 10^{12} \text{ Hz}$  do daného směru a má v tomto směru zářivost  $1/683 \text{ W} \cdot \text{sr}^{-1}$ . Tato frekvence se volí proto, že odpovídá vlnové délce  $555 \text{ nm}$ , což je blízko vrcholu fotopické (denní) funkce citlivosti lidského oka. Na základě svítivosti jsou formálně definovány další výše zmiňované fotometrické veličiny a jejich jednotky. Pro objasnění vztahu mezi čistě energetickými, objektivními (radiometrickými) veličinami je však vhodnější a názornější vycházet ze světelného toku  $\Phi$  a jeho radiometrického ekvivalentu. Této problematice bude věnována samostatná podkapitola 1.1.2. účinek záření na zrak [11][6]

### Světelný tok $\Phi$

Světelný tok  $\Phi$  souvisí se svítivostí vztahem

$$I = \frac{d\Phi}{d\Omega},$$

kde  $d\Phi$  je elementární světelný tok vyzářený zdrojem o svítivosti  $I$  do nekonečně malého (infinitesimálního) prostorového úhlu  $d\Omega$ . Odtud lze elementární světelný tok vyjádřit jako

$$d\Phi = I d\Omega$$

a celkový světelný tok stanovit integrací přes celý daný prostorový úhel  $\Omega$ ,

$$\Phi = \int_{\Omega} d\Phi = \int_{\Omega} I d\Omega.$$

Jednotkou světelného toku je lumen (lm),  $1 \text{ lm} = 1 \text{ cd} \cdot \text{sr}$ . Jeden lm je světelný tok produkovaný bodovým zdrojem světla o svítivosti  $1 \text{ cd}$  pod úhlem  $1 \text{ sr}$ . [6][5]

## Jas $L$

Jas je fotometrická veličina charakterizující plošné zdroje. Je definován vztahem

$$L = \frac{dI}{dA \cos \theta},$$

kde  $\theta$  je úhel směru ve kterém jas detekujeme a kolmice k pozorované infinitezimální ploše  $dA$ . Jednotkou jasu je  $\text{cd}/\text{m}^2$ . [5]

## Světlení $M$

Světlení  $M$  opět charakterizuje zdroje světla a je definováno poměrem elementárního toku  $d\Phi$  vyzářeného z infinitezimální plošky  $dA$ ,

$$M = \frac{d\Phi}{dA},$$

příčemž se vztahuje k celému poloprostoru. Jednotkou je  $\text{lm}\cdot\text{m}^{-2}$ . Vystihuje tedy plošnou hustotu vyzářeného světelného toku. [5]

## Osvětlení $E$

Osvětlení  $E$  je veličina vyjadřující osvětlenost daného předmětu nebo plochy dopadajícím světelným tokem. Intenzita v určitém bodě plochy je dána jako podíl elementárního světelného toku  $d\Phi$  dopadajícího na element plochy  $dA$  obsahující daný bod,

$$E = \frac{d\Phi}{dA}.$$

Jednotka osvětlení je lux (lx),  $\text{lx} = \text{lm}\cdot\text{m}^{-2}$ . Vystihuje tedy plošnou hustotu dopadajícího světelného toku. Osvětlení plochy od různých zdrojů lze sčítat. [5][8]

## Osvit $H$

Osvit neboli expozice  $H$  vyjadřuje plošnou hustotu světelného toku (průměrného osvětlení) dopadajícího na danou plochu za daný časový interval  $\Delta t$ ,

$$H = E \cdot \Delta t.$$

Jednotkou osvitu je  $\text{lx} \cdot \text{s}^{-1}$ . [8][5]

### 1.1.2. Účinek záření na zrak

Účinek záření na zrak popisuje tzv. světelná účinnost záření  $K$ . Umožňuje přepočítání mezi radiometrickými a fotometrickými veličinami, konkrétně mezi světelným tokem  $\Phi$  a zářivým tokem  $\Phi_e$ , přičemž radiometrický zářivý tok  $\Phi_e$  vystihuje výkon elektromagnetického záření daného zdroje a jeho jednotkou je watt (W). Přitom zářivý tok lze jako energetickou veličinu objektivně stanovit měřením energie vyzařované zdrojem za daný čas. Světelná účinnost záření je definována vztahem [12]

$$K = \frac{\Phi}{\Phi_e}.$$

Jednotkou světelné účinnosti je  $\text{lm} \cdot \text{W}^{-1} = \text{cd} \cdot \text{sr} \cdot \text{W}^{-1}$ . Lze tedy říct, že popisuje účinnost vlivu elektromagnetického záření s daným přenášeným výkonem na zrak. Tato veličina se vztahuje k celému vyzařovanému spektru. [8][12]

Jelikož je však oko různě citlivé na různé vlnové délky, bude nás při hodnocení vlivu záření na zrak také zajímat vliv jednotlivých vlnových délek  $\lambda$ , tedy světelná účinnost  $K$  pro jednotlivé vlnové délky. Tento parametr je označován jako spektrální světelná účinnost  $K(\lambda)$  a udává efekt spektrální hustoty zářivého toku  $\Phi_{e,\lambda}$  na zrak. Je definován poměrem

$$K(\lambda) = \frac{\Phi_\lambda}{\Phi_{e,\lambda}},$$

kde veličiny  $\Phi_{e,\lambda}$  a  $\Phi_\lambda$  představují spektrální hustoty zářivého a světelného toku,

$$\Phi_{e,\lambda} = \frac{d\Phi_e}{d\lambda}, \quad \Phi_\lambda = \frac{d\Phi}{d\lambda}.$$

Jednotkami spektrálních hustot jsou  $\text{W} \cdot \text{m}^{-1}$  a  $\text{lm} \cdot \text{m}^{-1}$ , jednotka spektrální světelné účinnosti je totožná s jednotkou světelné účinnosti, tj.  $\text{cd} \cdot \text{sr} \cdot \text{W}^{-1}$ . Pro  $K$  pak také platí vztah

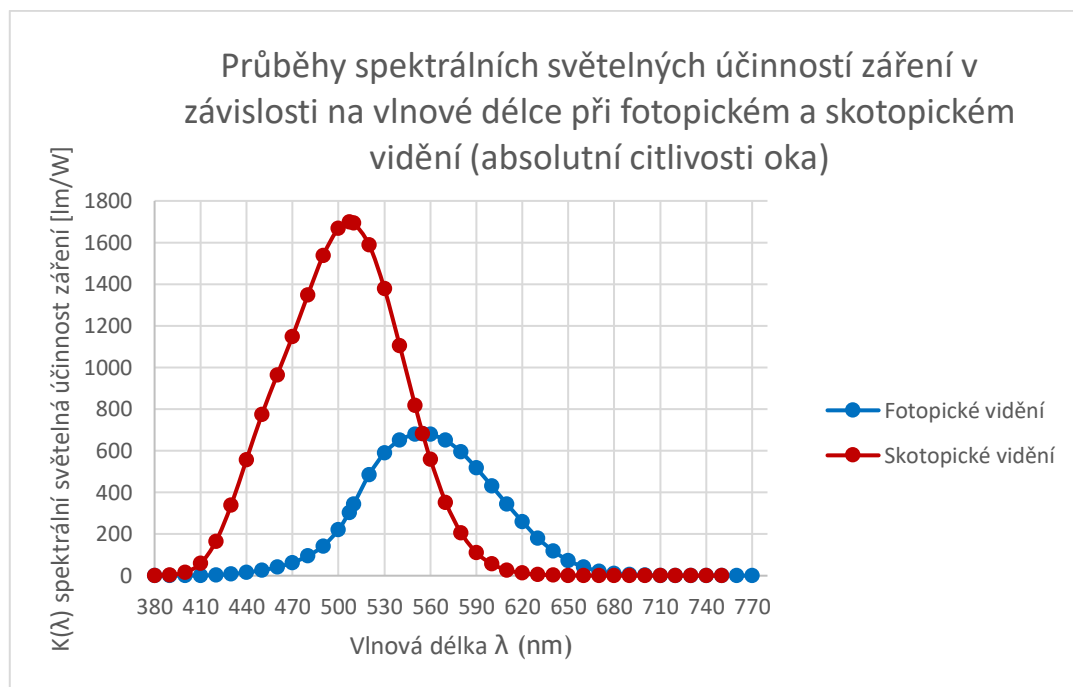
$$K = \frac{\int_0^\infty K(\lambda) \Phi_{e,\lambda} d\lambda}{\int_0^\infty \Phi_{e,\lambda} d\lambda}.$$

Vedle spektrální světelné účinnosti se používá také normovaná varianta označovaná jako poměrná spektrální světelná účinnost  $V(\lambda)$  nabývající hodnot od 0 do 1. Tato empirická křivka je založena na vyhodnocení průměrného vnímání lidí se zdravými očima za dobře definovatelných podmínek, pro tzv. standartního pozorovatele definovaného Mezinárodní

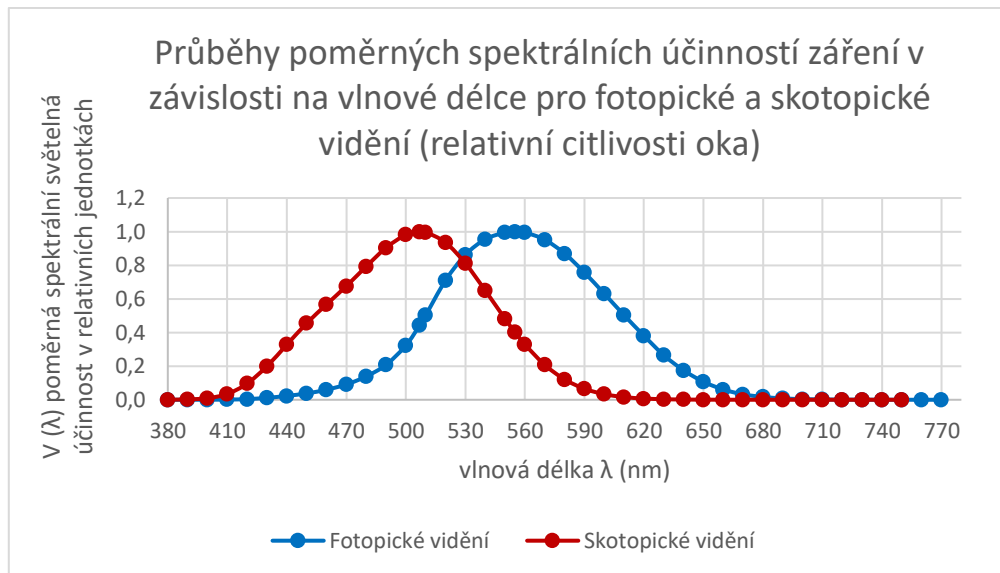
komisí pro osvětlování (CIE, Commission Internationale de l'Éclairage), a s  $K(\lambda)$  souvisí vztahem

$$K(\lambda) = K_{\max}V(\lambda).$$

$K_{\max}$  zde představuje maximální hodnotu spektrální světelné účinnosti.  $K(\lambda)$  i  $V(\lambda)$  se liší pro denní (fotopické) a noční (skotopické) vidění, jak zachycují obr. 2 a 3. Přitom denní vidění začíná být aktivní přibližně při jasech nad  $10^{-2}$  cd.m<sup>-2</sup>, pod touto úrovní nastupuje noční vidění. Blíže je tato tzv. duplicitní teorie vidění popsána v kapitole 1.3. Při denním vidění maximální citlivost oka odpovídá vlnové délce  $\lambda = 555$  nm, tedy frekvenci  $540.10^{12}$  Hz a v souladu s definicí kandely platí  $K_{\max} = K(555 \text{ nm}) = 683 \text{ cd.sr.W}^{-1}$ . V případě nočního vidění má oko standardního pozorovatele maximální citlivost pro  $\lambda = 507$  nm a platí  $K_{\max} = K(507 \text{ nm}) = 1700 \text{ cd.sr.W}^{-1}$ . Posun citlivosti oka ke kratším vlnovým délkám za skotopického vidění se nazývá Purkyňův posun. [13][4][11][5]



Obr. 2. Grafy absolutních spektrálních světelných účinností pro fotopické a skotopické vidění [9]



Obr. 3. Grafy poměrných spektrálních světelných účinností pro fotopické a skotopické vidění [9]

Uvedené křivky v sobě zahrnují též ztráty optické energie na cestě z rohovky do sítnice. V důsledku stárnutí oka dochází u zejména komponent s kratší vlnovou délkou ke zvyšujícím se ztrátám absorpcí a rozptylem, což nakonec ve skutečnosti vede k nižším hodnotám, než odpovídá popisovaným funkcím. [13]

## 1.2. Fyziologie vidění (vnímání)

Vidění představuje velice komplikovaný fyziologický proces, sestávající z několika na sebe navazujících, nebo případně souběžně probíhajících biofyzikálních a biochemických pochodů. Světlo nejprve dopadá do optického systému oka, který vytváří na sítnici obraz pozorovaného objektu. Ten je následně zachycen fotoreceptory (tyčinky, čípky), jež byly světlem podrážděny. Vzniklý vzruch je přenášen přes bipolární buňky sítnice do gangliových buněk, a odtud zrakovou nervovou dráhou až do korových zrakových center v týlním laloku mozku. Výsledný zrakový vjem je nejen výsledkem veškerých složitých zrakových procesů v korových zrakových centrech, ale i v celém mozku díky vzájemnému propojení jednotlivých jeho oblastí. S tím se pojí i Weberův-Fechnerův zákon, tzv. psychofyzický, který říká, že rostli velikost podnětu řadou geometrickou, lidský vjem roste řadou aritmetickou. Toto lidskému zraku umožňuje vnímání světelných podnětů ve velmi širokém rozsahu.[14]



### 1.2.1. Průběh primární zrakové dráhy a uvědomění si zrakového podnětu

Vstupem podnětu do zrakového systému je sítnice oka, jak již bylo uvedeno v předchozí kapitole. Zrakový podnět neboli stimul je veden čtyř-neuronovou zrakovou dráhou (obr. 4.) počínající na sítnici. Optická část sítnice má 10 vrstev a nachází se zde první, druhý a třetí neuron zrakové dráhy. Za první neuron se považují fotoreceptory (tyčinky a čípky). Tyčinky i čípky mají svá koncentrická receptivní pole, což označuje tu část sítnice, která vyvolá elektrickou odpověď buňky, pokud dojde k její stimulaci. Velikost receptivních polí a míra konvergence signálu u tyčinek je mnohem větší než u čípků, proto vykazují několikanásobně vyšší sensitivitu na světlo. [15][16][17]

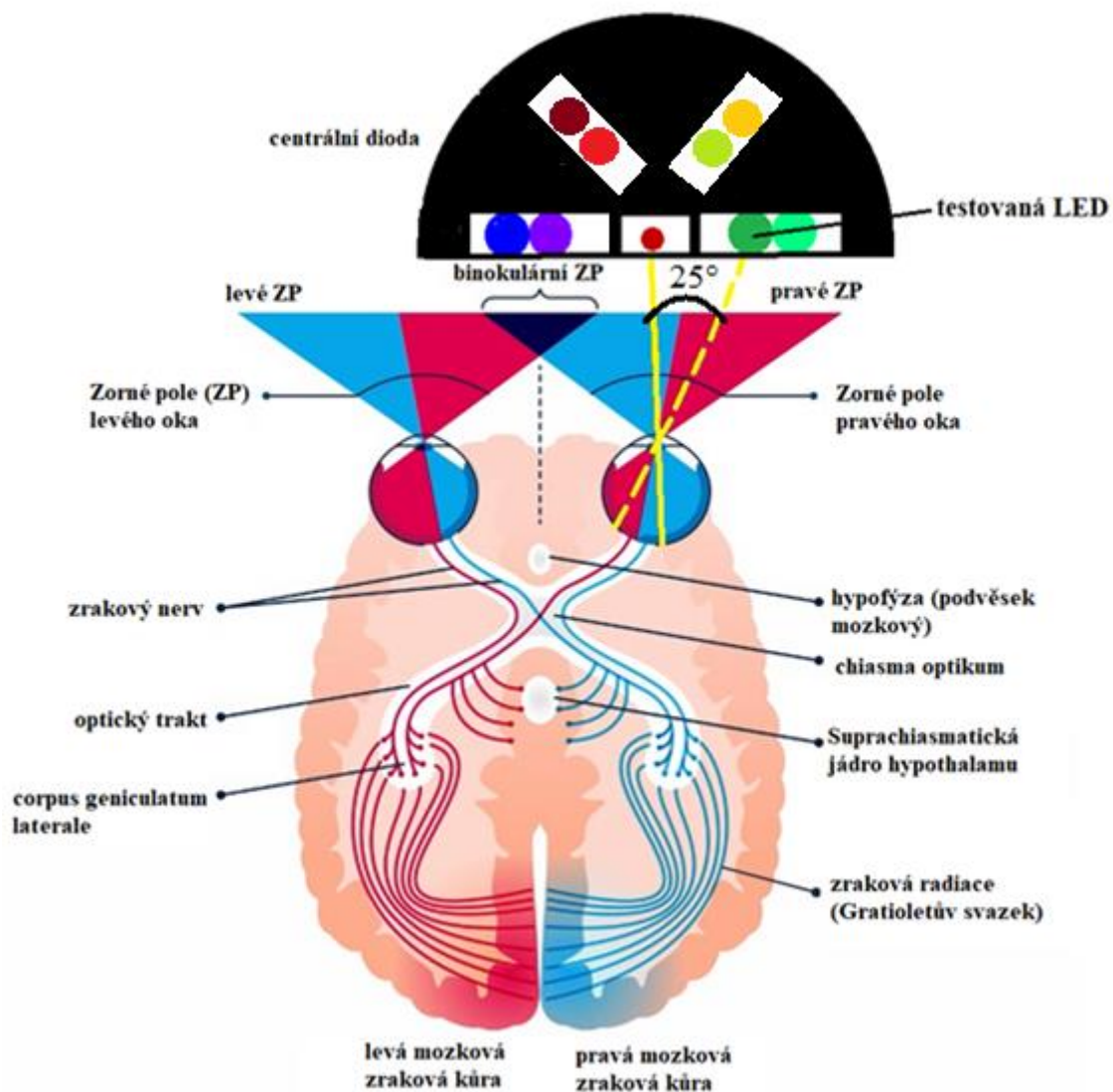
Fotoreceptory jsou dále napojeny synapsemi na druhý neuron tvořený bipolárními buňkami sítnice a třetím neuronem zrakové dráhy jsou gangliové sítnicové buňky, jejichž neurity opouštějí oko v místě papily zrakového nervu. Kromě tohoto vertikálního napojení neuronů na sítnici existují také horizontální propojení, která jsou zajištěny tzv. horizontálními a amakrinními buňkami a mohou tak určitým způsobem modifikovat signál přijímaný z fotoreceptorů. Zrakový nerv neboli nervus optikus obsahuje asi 1,2 milionů nervových vláken, z toho je 80 % senzorických a 20 % pupilomotorických, které mají do určité části shodnou nervovou dráhu s primární zrakovou dráhou, v dalším průběhu se však liší. Za odstupem retinálních cév do nervus opticus jde makulopapilární svazek senzorických nervových vláken axiálně a periferní vlákna zahajují vnitřní (nazální) 45° rotaci. Zrakovým nervem jdou dále do chiasma opticum, kde se nervová vlákna z obou nazálních sítnic očí specificky kříží. Z chiasma opticum pokračují dále už jako zrakové trakty, které se rozbíhají po spodině mozku, zanořují se do mozkové tkáně a následně směřují zpět ke střední rovině do zrakové části thalamu – primárního podkorového zrakového centra (corpus geniculatum laterale). Zde končí 3. neuron zrakové dráhy a přepojuje se na 4. neuron. Corpus geniculatum laterale je párová struktura trojúhelníkovitého tvaru tvořená ze šesti koncentrických vrstev, 1 a 2 vrstva se nazývají magnocelulární, protože jsou tvořeny velkými nervovými buňkami a reagují velmi rychle na světelnou stimulaci jakékoliv vlnové délky, zatímco vrstvy 3-6 nesou název parvocelulární, kde se vyskytují malé neurony a vedou vzruchy pomaleji. K jejich aktivaci dochází pouze pokud dopadá světlo o určité vlnové délce. Díky křížení nervových vláken v chiasma opticum vstupuje do vrstev 2, 3 a 5 informace ze stejnostranného oka a do 1, 4 a 6 vrstvy informace z kontralaterálního oka. V laterálním genikulárním tělísku dochází k primárnímu zpracování zrakového podnětu ze sítnice, který tvoří přibližně asi 15 % z celkového vstupu informací. Poslední čtvrtý neuron zrakové dráhy je označován jako centrální a neurity vycházející

z primárního zrakového centra tvoří zrakovou radiaci, tzv. Gratioletův svazek neboli tractus geniculocalcarinus. Zraková radiace je tvořena magnocelulární dráhou vycházející z 1. a 2. vrstvy a vede signály pro detekci pohybu, hloubky prostoru a kmitání, a také parvocelulární dráhou vystupující z 3. až 6. vrstvy corpus geniculatum laterale nesoucí signál pro barevné vidění, tvar, strukturu a jemný detail. Vlákná obchází postranní mozkovou komoru temporálním a parietálním lalokem a směřují do okcipitálního laloku. Zrakový podnět je touto cestou z corpus geniculatum laterale přenesen do mozkové kůry. [18][15]

Primární zraková kůra se nazývá Brodmannova area 17 (area striata, V1), která zaujímá širokou oblast zadního pólu týlního laloku mozku a po vnitřní interhemisferální pokračuje dál podél fisura calcarina. Zde lze vidět stejné uspořádání vláken jako na sítnici, protože dochází ke zpětné zevní rotaci odpovídajících sektorů. V1 je tvořena ze šesti vrstev odlišných buněk. Axony jdoucí z corpus geniculatum laterale vytvářejí magnocelulární dráhu končí ve čtvrté korové vrstvě v její nejhlubší oblasti, rovněž zde končí většina parvocelulárních drah. V 2. a 3. korové vrstvě končí axony z interlaminární oblasti. Nervové buňky v jednotlivých vrstvách area striata jsou mezi sebou komplexně propojeny, především 4. vrstva s vrstvami 2 a 3, jež vedou signál do vyšších korových center. Brodmannovu areu 17 obklopují v těsné blízkosti Brodmannova area 18 (area parastriata, označována jako V2) a Brodmannova area 19 (area peristriata, označována jako V3). „V“ reprezentuje slovo vizuální, tedy zraková. Mají podobnou strukturu jako V1 a jsou s ní propojeny množstvím nervových drah. Integrují vstupní zrakové vjemy s dalšími korovými oblastmi a funkcemi v týlních, temenních i spánkových lalocích. Jedna z funkcí area parastriata je funkce asociační. Znamená to, že pokud není porušena area 17, tak pacient předmět vidí, ale nedokáže ho pojmenovat nebo použít – typ zrakové poruchy vnímání, tzv. vizuální agnozie. Jako další funkce V2 se uvádí schopnost rozlišení barvy, pohybů či jasu. [19][18][17][20]

Zrakový mozek se skládá přibližně z 30 rozmanitých korových oblastí, jež jsou vzájemně propojeny od primární zrakové kůry (area striata) do vyšších korových oblastí a zase nazpět. Mimo jiné jsou zrakové podněty zpracovávány v mnoha korových polích současně. Jednotlivé korové oblasti v týlních, spánkových a temenních lalocích nemají vymezené jasné hranice, mohou se různě překrývat. Jejich poloha od Brodmannovy oblasti 17 (primárního zrakového centra) má vliv na pravděpodobnost, že neurony korových oblastí budou zpracovávat kromě zrakových i další smyslové informace. K prvotnímu uvědomění toho, že vidíme, dochází v primárním korovém centru v týlním laloku a přilehlých korových oblastech, kde jsou zpracovávány elementární zrakové informace, jako například vnímání vlnové délky světla podnětu (V1), prostorová orientace pohyb nebo vnímání barev (V4). Ve vyšších korových

oblastech (PPA – parahippocampal place area, FFA – fusiform face area) se postupně fúzí všech vstupních elementárních zrakových informací vytvoří komplexní zrakový podnět, jako například budovy, prostředí či tváře. [20][17]



Obr. 4. Zraková dráha vedoucí z oka do mozku + znázornění umístění centrální a testované diody před pravým okem [21]

### 1.2.1.1. Typy fotoreceptorů

V lidské sítnici jsou přítomny dva typy světločivných elementů, tyčinky a čípky, kde se uvnitř těchto fotoreceptorů po dopadu fotonů světelná energie transformuje na energii chemickou, která změní potenciál buněčné membrány a vzniká tak elektrický impulz. Typy fotoreceptorů se od sebe liší specifickým umístěním jádra, tvarem synaptickým zakončením a

tvarem vnitřního a vnějšího segmentu. Zevní segment fotoreceptoru obsahuje zrakový pigment a slouží k převodu světelného signálu na elektrický a vnitřní segment zajišťuje metabolické procesy. Vzhledem k inverznímu charakteru sítnice světlo nejprve prochází všemi vrstvami sítnice, než dopadne na fotoreceptory a k podráždění je využito asi jen 10 % dopadající světelné intenzity. [22]

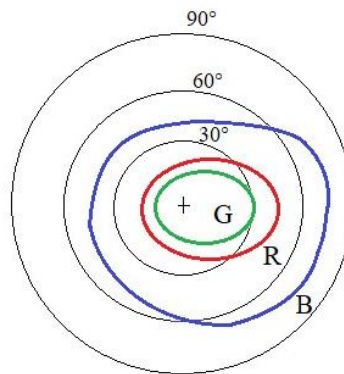
#### 1.2.1.1.1. Tyčinky

Orientují se na množství dopadajícího světla, tedy vnímání světelných rozdílů při velmi slabém osvětlení, tj. při nočním (skotopickém) vidění. Jejich citlivost (sensitivita) na světlo je mnohonásobně vyšší oproti čípkům. V literatuře je dle vědeckých pokusů uváděno, že ke vzniku světelného zrakového vjemu absorpce stačí jen asi 5-14 fotonů. Obzvláště velkou senzitivitu tyčinky vykazují v modrozelené oblasti spektra. Jsou umístěny v periférii sítnice, nazálně a temporálně od fovey a uplatňují se tak i za dne v periferním vidění, které je důležité pro orientaci v prostoru. V sítnici jsou zastoupeny většinou, asi okolo 140 milionů, a jejich hustota se snižuje s věkem o 30 %. V průměru mají tyčinky asi 2  $\mu\text{m}$ , jsou cca 60  $\mu\text{m}$  dlouhé a tvarově cylindrické. Zevní segment tyčinek obsahuje zrakové barvivo rhodopsin, který se v reakci na světlo rozpadá a bledne (mění barvu), a vyvolává nervové vzruchy, jenž přechází synapsemi na vrstvu bipolárních nervových buněk. [22][23][24]

#### 1.2.1.1.2. Čípky

Fungují za jasného světla a zajišťují denní (fotopické) vidění. Umožňují rozlišení detailů, zrakovou ostrost, vidění barev a zároveň i rozeznání jejich sytosti a intenzity. Na sítnici se nachází tři typy čípků s různými rozsahy citlivostí pro různé vlnové délky světla (nejcitlivější pro modrou, zelenou a červenou barvu). Maximální kombinovaná citlivost čípků je v zelenožluté oblasti spektra. Jejich počet je podstatně menší než u tyčinek, činí 5-7 milionů a nejvyšší hustota čípků je ve fovee. Rychlý pokles hustoty nastává v makule, a v periférii sítnice už je denzita konstantní, ale umístění nepravidelné – vyšší hustotu mají nazálně než temporálně. Zorné pole pro barvy je různé, největší je pro modrou barvu, menší pro barvu červenou a nejmenší pro zelenou barvu. Rozsah zorného pole pro barvy je vyobrazen na obr. 5. Na rozdíl od tyčinek jsou čípky kratší, tlustší a mají kónický tvar, který se směrem k zevnímu segmentu zužuje. To však neplatí ve fovee, kde jsou nahuštěny a připomínají tvarem spíše tyčinky. Zrakový pigment uložený v membránách se nazývá iodopsin a vlivem světla obdobně jako u

tyčinek dochází k přeměně světelného signálu na nervové vzruchy a jejich šíření synapsemi na bipolární buňky sítnice. [25][22]



Obr. 5. Zorná pole pro modrou, červenou a zelenou barvu pro pravé oko [22]

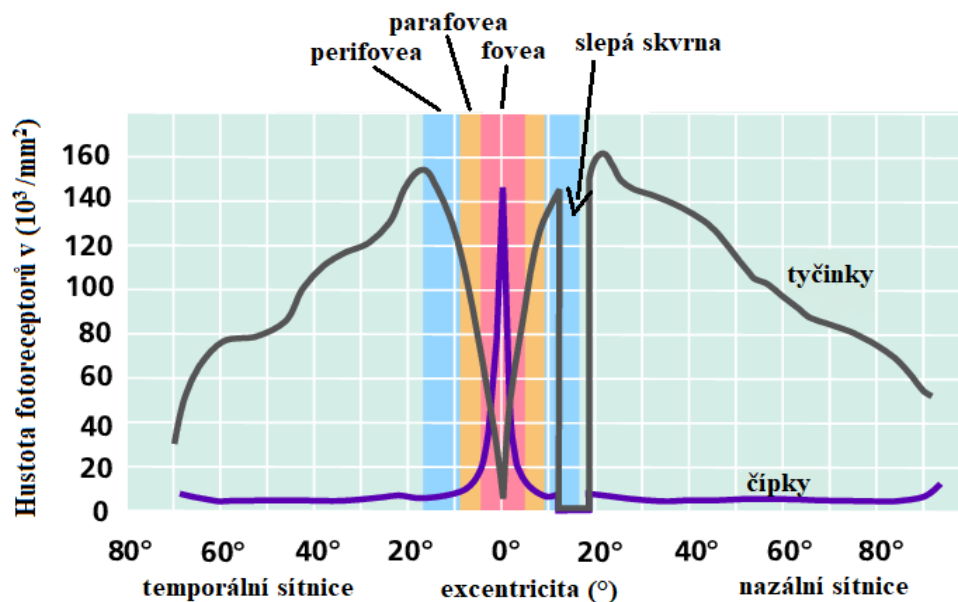
#### 1.2.1.2. Distribuce fotoreceptorů na sítnici

Lidská sítnice je tvořena z 95 % tyčinkovými fotoreceptory a pouze 5 % čípků. Jejich plošné rozdělení na sítnici ukazuje obr. 6. Oblast sítnice s nejvyšší zrakovou ostroť, tj. centrální oblast sítnice, má nejvyšší hustotu čípků, rostoucí v průměru asi až na 146 000 čípků na mm<sup>2</sup>. Tato oblast má průměr asi 5,5 mm a uprostřed obsahuje žlutý pigment, který dává vzniknout názvu macula lutea neboli žlutá skvrna. U člověka se centrální oblast jeví jako tmavě červená, protože krevní kapiláry cévnatky procházejí v místě, kde se sítnice ztenčuje díky odsunutí určitých vrstev směrem od středu a zůstává pouze pigmentový epitel a fotoreceptory. Fovea, mající asi 1,5 mm v průměru, je centrální prohlubeň či jamka v makule vytvořena, která vzniká již zmíněným odsunutím vrstev sítnice od středu. Ve svém centru (foveole centralis o průměru asi 0,350 mm), jsou čípků umístěny těsně u sebe se vzdáleností od středu ke středu 1,5 μm. Těsnění vykazuje tendenci k plástvovitému vzoru s čípků majícími šestiúhelníkový průřez, který není přítomen jinde v sítnici. Foveola je místem na sítnici, kam je zobrazen fixovaný objekt. Na sítnici kromě macula lutea se nachází další důležitý bod, a tím je slepá skvrna (tzv. Marriotův bod) s excentricitou přibližně 15° nazálně od fovey. Slepá skvrna je místo, kde oko opouští nervová vlákna buněk sítnice v podobě zrakového nervu, nejsou zde proto žádné fotoreceptory. Při běžném vidění se to projeví jako fyziologický výpadek zorného pole, který si ale pozorovatel neuvědomuje, jelikož vizuální systém extrapoluje informace z okolí.[26][27][22][28][29]

Hustota čípků exponenciálně klesá se zvyšující se excentricitou, asi na 10 000 čípků na mm<sup>2</sup> ve vzdálenosti 10° od foveoly a zůstává na této hladině skrz celou sítnici. Při

ekvivalentních excentricitách je hustota čípků o 40-45 % vyšší v nazální v porovnání s temporální sítnicí. Hustota tyčinek se na rozdíl od čípků zvyšuje s rostoucí excentricitou sítnice a vrcholí ve 20° od foveoly temporálně, a ve 25° nasálně v okolí slepé skvrny (výstup zrakového nervu). Poté klesá asi na 30 000 tyčinek na mm<sup>2</sup> v extrémně temporální části sítnice a na 80 000 tyčinek na mm<sup>2</sup> v extrémně nazální horní části sítnice. [27] [22]

Individuální variabilita v hustotě rozložení fotoreceptorů se liší s oblastí sítnice a je podobná pro čípky i tyčinky. Variabilita je nejvyšší v blízkosti fovey, dosahuje minima ve střední periférii, a poté se zvyšuje s excentricitou až k oblasti, kde končí zraková část sítnice (tzv. ora serrata). S rostoucím věkem se snižuje hustota fotoreceptorů mimo foveu. Roční ztráta buněk bývá přibližně 0,2 % až 0,4 % a je podobná ztrátě retinálních gangliových buněk a buněk pigmentového epitelu taktéž související s věkem. Výraznější pokles fotoreceptorů postihuje více tyčinky než čípky. Výraznější pokles zaznamenáme při excentricitě 5 až 8 mm než na periférii sítnice při excentricitě větší než 14 mm. [30]



Obr. 6. Distribuce fotoreceptorů z hlediska pozice na sítnici [31]

### 1.3. Duplicitní teorie vidění

Duplicitní teorií vidění se rozumí rozdílné vidění dvou typů fotoreceptorů, tyčinek a čípků, přičemž závisí na úrovni jasu prostředí, ve kterém se pohybujeme. Na základě různé citlivosti fotoreceptorů pro různé vlnové délky rozlišujeme tři oblasti vidění: fotopické (denní), skotopické (noční) a mezopické vidění. Tyto oblasti vidění budou vysvětleny podrobně v dalších kapitolách. Citlivost (popř. relativní citlivost) jednotlivých typů fotoreceptorů za fotopických a skotopických podmínek kopíruje odpovídající křivky spektrální (popř. poměrné spektrální) světelné účinnosti, viz obr. 2. a 3. v předchozí kapitole 1.1.2 účinek záření na zrak. Z obr. 2. je patrné, že v oblasti červeného světla okolo vlnových délek 650 nm a větších jsou více citlivé čípky, zatímco tyčinky na tyto vlnové délky téměř nereagují. [19]

#### 1.3.1. Skotopické vidění

Při skotopickém, nočním vidění, se zapojují pouze tyčinky. Ty jsou velice citlivé na světlo, ale jejich reakce je pomalejší než u čípků. Tyčinky pracují dobře za velmi nízkého jasu, na úrovni nižší než cca  $10^{-3}$  cd/m<sup>2</sup> a maximální citlivosti dosahuje v zelenomodré oblasti spektra, přibližně okolo 507 nm. Jelikož jsou na sítnici situovány v periférii, lze při skotopickém vidění pozorovat centrální výpadek v zorném poli (centrální skotom), daný absencí tyčinek v centru sítnice. Při skotopickém vidění také dochází ke ztrátě barevného vidění a vnímáme pouze různé úrovně jasu, tj. v odstínech šedé. Celkový průběh poměrné spektrální citlivosti je posunut více do modrého spektra. [32][19]

#### 1.3.2. Mezopické vidění

Na procesu mezopického vidění se podílí oba typy fotoreceptorů, tedy jak tyčinky, tak čípky, a to v různém podílu dle aktuálního jasu. Rozmezí jasů se pohybuje mezi skotopickou a fotopickou oblastí a toto vidění nelze popsat jedním průběhem křivky citlivosti, neboť při jednotlivých jasech se maxima citlivosti křivek neustále mění. Dochází tady k tzv. Purkyňovu posunu. To značí, že s úbytkem světla nastává posun citlivosti oka ke kratším vlnovým délkám. V praxi to znamená rozdíl v kontrastu různých barev např. při jasném světle a za soumraku. [33][32][34][35][19]

### 1.3.3. Fotopické vidění

Za fotopické vidění, tedy vidění při denním světle, jsou zodpovědné zejména čípky. Čípky jsou méně citlivé na světlo oproti tyčinkám, ale reagují rychleji a jsou více zaměřené na zrakovou ostrost. Ve fovee, kde jsou čípky nejvíce nahuštěny, se vytvoří ostrý a barevný obraz. Úroveň jasu, kdy můžeme začít hovořit o fotopickém vidění se pohybuje přibližně od 3 cd/m<sup>2</sup> a výše, a maximální citlivosti kombinace všech druhů čípků dosahuje v zeleno-žluté oblasti, tj. přibližně okolo 555 nm. Celkový průběh poměrné spektrální citlivosti je posunut spíše do červené oblasti spektra.[32][36]

## 2. Percepce barev

Lidský zrak dokáže identifikovat nejen tvary předmětů, jejich rozměry, polohu v prostoru a pohyb, ale také barvu, tedy vlnovou délku záření odrážející se od předmětu. Barvy, které vidíme, závisí nejen na vlastnostech povrchu předmětů, ale také na tom, jak tyto vlastnosti interagují se světlem a jak světlo odražené od předmětů působí na zrakový systém člověka. Lidské oko je schopno vnímat elektromagnetické vlny v rozmezí přibližně 380 – 790nm a tato oblast spektra se nazývá viditelné světlo. Barva je pouze subjektivní lidský vjem, který se vytváří v mozku pomocí interakcí několik miliard neuronů a je promítána do vnějšího světa, který vidíme. Je úzce spojena s vnímáním formy, kde barva usnadňuje detekci hran objektů. Barevné vidění zajišťují čípky a pracují při určitém množství světla – za fotopických podmínek. [19][37][38]

### 2.1. Trichromatická teorie barevného vidění

To, co vnímáme jako barvu, je kombinovaný efekt. Záleží na spektrálním rozložení světelného toku ze světelného zdroje poskytujícího energii, na fyzikálních a chemických vlastnostech všech materiálů, které propouštějí nebo odrážejí světelný tok směrem k oku, na fyziologické reakci oka na světelný tok zahrnující nervové impulsy přenášené do části mozkové kůry zodpovědné za vidění a na zpracování těchto signálů naším mozkiem v kombinaci se signály ze sousedních oblastí zorného pole a našich vzpomínek na podobné situace, které se odehrály někdy v minulosti. [39]

Zpracování barevného vidění v zrakovém systému je iniciováno absorpcí světla třemi různými spektrálními třídami čípků. V důsledku toho je barevné vidění popisováno jako

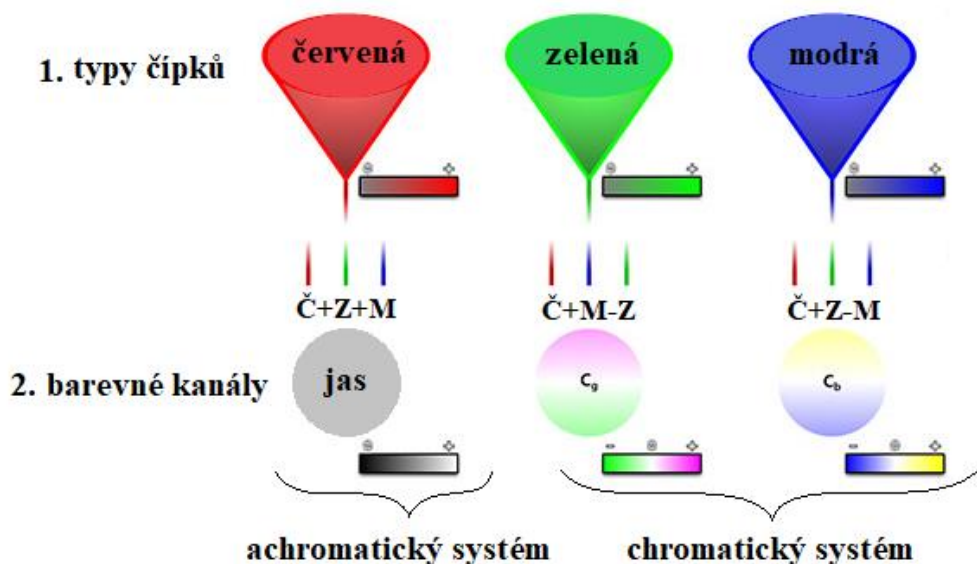


trivariantní neboli trichromatické a počáteční psychofyzikální studie ukázaly, že barvy mohou být vytvářeny použitím tří různých primárních barev. Dříve, v roce 1802 navrhl Thomas Young model, podle kterého může být vnímání barev kódováno třemi hlavními barevnými receptory namísto tisíců barevných receptorů kódujících jednotlivé barvy. Teorie byla v roce 1866 prozkoumána G. Helmholtzem, který byl pro dostatečnost pouze tří základních mechanismů založených na předpokladu, že mají spektrální citlivost v širokém, částečně se překrývajícím rozsahu. Podle předpokladů by měly být v sítnici lidského oka tři typy čípků, jejichž maximální citlivost spadá na červenou, zelenou a modrou část spektra, to znamená, že odpovídají třem "primárním" barvám. Tato hypotéza však nemůže vysvětlit ani mechanismus zpracování signálu, ani stálost vnímání barev, když se mění spektrální složení světelného zdroje. [40][22]

V roce 1870 německý fyziolog Hering formuloval takzvanou opačnou hypotézu barevného vidění, známou také jako teorie protibarev (oponentního procesu). Uvažoval nejen přítomnost pěti psychologických pocitů – pocitu červené, zelené, žluté, modré a bílé, ale i to, že působí v opačných párech, současně se doplňují a vylučují. Předpokládal tři opačné páry reakčních procesů na žlutou a modrou, červenou a zelenou a na černou a bílou, tzv. receptorové systémy. Ani tahle domněnka však není ve své původní podobě zcela správná, neexistují pro ni anatomické ani fyziologické důkazy. Lze ji však v rámci tzv. teorie zón aplikovat na receptivní pole. [40][22]

Další teorií je teorie zón. Obě předchozí teorie, jak trichromatická, tak teorie oponentního procesu, mohou být využity k vysvětlení fungování barevného vidění, ale každá z nich se vztahuje na jinou úroveň (zónu) vizuálního procesu. První úroveň zahrnuje oblast retinálních fotoreceptorů. Na základě studií jejich absorpčních spekter byla potvrzena existence tří typů čípků, každý s vlastním pigmentem, určitým rozsahem a maximem spektrální citlivosti. Dle těchto kritérií rozlišujeme S-, M-, a L-čípky citlivé na krátké, střední a dlouhé vlnové délky. S-čípky fungují v krátkovlnné oblasti spektra s rozsahem citlivosti 400-500 nm a jejím maximem 420-440 nm, což odpovídá fialovomodré barvě. Naproti tomu L-čípky pracují v dlouhovlnných oblastech spektra při rozsahu citlivosti 500-700 nm, absorpčním maximem 564-580 nm pro zelenožlutou barvu a s fotosenzitivním pigmentem erytrolabem. Na oblast středních vlnových délek 450-650 nm jsou pak citlivé M-čípky disponující pigmentem chlorolabem a jejich maximální citlivost s pohybuje v rozmezí 534-545 nm. Signály z čípků jsou pak následně kombinovány v rámci tzv. receptivních polí (tj. oblastí na sítnici, které odvádí signál do dané buňky zrakové dráhy) do dvou barevných kanálů (žluto-modrý a zeleno-purpurový – jiné publikace uvádějí zeleno-červený) a jednoho jasového kanálu. Tato úroveň zpracování koresponduje s Heringovou teorií a představuje druhou zónu ve zpracování

barevného vjemu. V případě barevných kanálů světlo jedné z dvojice barev buňku, na kterou je receptivní pole napojeno, aktivuje, světlo druhé barvy ji naopak tlumí. Při současném působení obou barevných světél reakce buňky přibližně odpovídá klidovému režimu a výsledný vjem je bezbarvý – bílý. Jasový kanál pak udává intenzitu světelného podnětu. Schematické propojení jednotlivých typů čípků v těchto kanálech uvádí obr. 7. [40][41][22][42]



Obr. 7. Spojení trichromatické teorie a teorie protibarev – teorie zón [42]

## 2.2. Měření barvy

Barva sama o sobě v okolním světě neexistuje. Jde pouze o percepci světla ve viditelné oblasti spektra dopadajícího na sítnici, odraženého od předmětu o určité spektrální vlnové délce a zpracování nervovými procesy v mozku. Výsledek se nám jeví jako barva daného předmětu. Barva tedy vystihuje vlastnost lidského zrakového vjemu. Tento přístup ke vnímání barvy je označován jako psychosenzorický. Z fyzikálního hlediska je barva dána spektrálním složením světla dopadajícího do oka. Schopnost tohoto fyzikálního podnětu vytvořit barevný vjem lze vyjádřit ve vhodné číselné soustavě (psychofyzikální hledisko). Trichromatická povaha barevného vidění, popsána v předchozím textu, umožní, aby téměř každá barva byla vytvořena směsí tří barev, a proto jsou k psychofyzikálnímu popisu barvy dostačující tři číselné složky. Této problematice se věnuje věda zvaná kolorimetrie. [37][8] [43].

Měření barev, tedy tzv. kolorimetrie umožňuje vnímat barevný smyslový počitek objektivně a zachytit ho číselně. Na procesu vidění a zhodnocení odstínu barvy mají podíl tři komponenty, a to světelný zdroj, pozorovaný předmět a lidské oko. Vnímaná barva tedy nezávisí jen na sledovaném předmětu, ale také na vlastnostech oka a druhu osvětlení. Při změně jedné z těchto komponent se změní i vnímání odstínu barvy. [44]

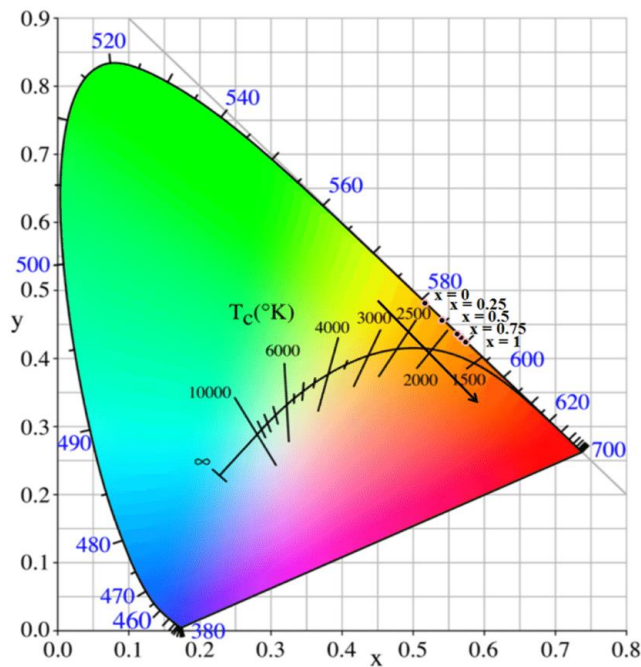
Základy kolorimetrie byly vytvořeny mezinárodní komisí pro osvětlování CIE (Commission internationale de L'éclairage) v roce 1931. Trichromatický systém CIE je nejrozšířenější systém pro číselný popis barev. Všechny možné barvy lze popsat pomocí kladných hodnot třech základních trojbarevných složek  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ , které odpovídají tokům třech virtuálních barevných světél, které nejsou reprezentovány jedinou vlnovou délkou, ale tzv. trichromatickými činiteli  $\bar{x}$ ,  $\bar{y}$ ,  $\bar{z}$ , jejichž spektrální průběh je definován normou. Požadovaná složka se vypočítá ze znalosti relativního spektrálního složení studovaného světla  $F(\lambda)$  a příslušného trichromatického činitele: [43][45][46]

$$X = \int_0^{\infty} F(\lambda) \cdot \bar{x}(\lambda) d\lambda, Y = \int_0^{\infty} F(\lambda) \cdot \bar{y}(\lambda) d\lambda, Z = \int_0^{\infty} F(\lambda) \cdot \bar{z}(\lambda) d\lambda.$$

Barva světla je závislá pouze na poměru těchto složek, barva předmětu i na jejich konkrétních hodnotách. Pro vyjádření barvy světla jsou proto definovány tzv. poměrné barevné souřadnice  $x$ ,  $y$ ,  $z$ ,

$$x = \frac{X}{X+Y+Z}, \quad y = \frac{Y}{X+Y+Z}, \quad z = \frac{Z}{X+Y+Z},$$

jejichž poměr je shodný s poměrem základních složek. Současně je jejich součet roven 1. Při znalosti dvou poměrných souřadnic lze tedy dopočítat třetí. Pro vyjádření barvy světla tedy postačují pouze dvě z těchto souřadnic. To umožňuje zachytit všechny barvy světla do plošného (tzv. chromatického) diagramu, v němž je každá barva světla reprezentována souřadnicemi  $x$  a  $y$ , viz obr. 8. [43][8][46]



Obr. 8. Chromatický diagram [47]

Po obvodu diagramu jsou znázorněny právě syté barvy (tj. barvy, které neobsahují bílou složku), spektrální barvy (barvy, vyskytující se ve spektru) nalezneme také na obvodu, s výjimkou oblasti purpurových barev. Čím je barva blíže k bílé (umístěné přibližně ve středu), tím je méně sytá. Směsi dvou barev v diagramu leží na jejich spojnici. Dvojice barev, jejichž směsí ve vhodném poměru získáme barvu bílou, se nazývají doplňkové. [43]

### 2.3. Aditivní a subtraktivní míchání barev

Při míchání barev lze postupovat aditivně, kdy k danému barevnému světlu přidáváme další složky, nebo subtraktivně, kdy z vícebarevného světla naopak jednotlivé barevné složky odebíráme. [48]

Aditivní míchání barev lze popsat pomocí tří vhodně volených, tzv. základních (primárních) barev. Tyto barvy vytváří v chromatickém diagramu trojúhelník, přičemž všechny barvy uvnitř trojúhelníku lze získat smícháním zvolených základních barev. Typické primární barvy jsou červená, zelená a modrá. Prakticky lze tento typ míchání realizovat objektivně (mimo oko) např. promítáním barevných světél na bílou plochu, nebo subjektivně, kdy jsou aditivní barevné směsi produkovány percepčními mechanismy nebo optickými vlastnostmi oka (např. při pozorování rotujícího kotouče s barevnými výsečemi). [49][50]

Také při subtraktivním míchání je možné využít znalosti z barevného trojúhelníku, přičemž jej prakticky realizujeme pomocí filtrů. Pokud např. na purpurový filtr dopadá bílé světlo, filtr selektivně absorbuje (odečítá) zelenou složku a propouští modrou a červenou, které vytvoří purpurovou. Většina materiálů selektivně absorbuje vlnové délky a jejich barva tak vzniká odečítáním příslušných barevných světél z dopadajícího bílého světla. Subtraktivní míchání se proto využívá v souvislosti s barvami těles. Primárními subtraktivy jsou žlutá, azurová a purpurová barva, což jsou doplňkové barvy k aditivním primárním barvám. [51][50]

## 2.4. Metamerie barev

Případ, kdy dva či více barevných povrchů se pod určitým osvětlením jeví stejně barevné a pod jiným jsou odlišné, se nazývá metamerie. Například žlutou barvu lze získat aditivním mícháním dvou barev, ale také může být viděna jako odstín jednoho monochromatického zdroje světla. Projev metamerie závisí na zdroji světla, pod kterým objekty pozorujeme. Jiné vnímání barev může nastat při pozorování za denního světla a pod umělým osvětlením, kde si můžeme všimnout drobných barevných rozdílů. [52] [53][46]

## 3. Adaptace oka

Přizpůsobení se vidění při různých hladinách osvětlení se nazývá zraková adaptace. Oko je schopné vnímat ve velmi širokém rozsahu jasů, obvykle se uvádí hodnoty asi od  $10^{-6}$  cd.m<sup>-2</sup> až  $10^5$  cd.m<sup>-2</sup>. Umožňuje tak pozorování velmi intenzivně, ale i velmi slabě osvětlených předmětů. Adaptační stav oka se obvykle udává pomocí jasového prahu (nejnižší hodnota jasu objektu, který oko ještě dokáže zaznamenat). Rozlišujeme adaptaci zraku na tmu a na světlo. Pokud přijdeme ze světla do tmy, jasový práh se s postupem časem snižuje (tj. citlivost roste), až dosáhne minima, takzvaného absolutního prahu. Závislost změn jasového prahu (nebo citlivosti) na čase se nazývá adaptační křivka. Naopak při přechodu ze tmy na světlo se jasový práh zvýší. Adaptace závisí na schopnosti regenerace, syntézy a rozkladu zrakového pigmentu. [19][22]

### 3.1. Adaptační mechanismy oka

Aby se oko co nejlépe přizpůsobilo měnícím se světelným podmínkám prostředí, využívá několika adaptačních mechanismů, které mu poskytují v dané situaci co nejlepší vjem

okolí. Na takovéto změny osvětlení reaguje oko v první řadě foto-pupilárním reflexem, dále pak změnou citlivosti fotoreceptorů a také změnou velikosti receptivních polí sítnice. [54]

### 3.1.1. Foto-pupilární reflex

Změna velikosti pupily reguluje množství dopadajícího světla do oka. Při velmi jasném světle se pupila může zmenšit až na průměr 1,8 mm, a naopak v úplné tmě dosahuje největšího průměru, téměř 8 mm. Rychlost změny je v řádech milisekund, udává se asi 380 ms. Zúžení nebo rozšíření pupily řídí dva svaly, a to musculus sphincter pupillae a musculus dilatator pupillae. [55][54][56]

### 3.1.2. Rozklad a syntéza pigmentu rhodopsinu

Pokud přecházíme ze světla do tmy, trvá delší dobu, než se zrak zadaptuje na nové podmínky a než citlivost tyčinek stoupne vlivem syntézy tyčinkového foto-pigmentu rhodopsinu. Závisí také na intenzitě osvětlení, ze kterého do tmy přecházíme a na vlnové délce světla. Působením nízké intenzity světla dochází k rozpadu rhodopsinu a změně barvy ze zrakového purpuru na zrakovou žlut. Tato reakce je reverzibilní a velmi rychlá. Nicméně při příliš silném osvětlení se mění retinal na retinol a se pigment zcela vybělí. Reakce je rovněž reverzibilní, ale o mnoho pomalejší. Přecházíme-li ze tmy na světlo, adaptace je velmi rychlá, trvá asi 1 minutu a během toho nastává rozpad rhodopsinu a aktivuje se funkce čípků. [22]

Tyčinky, jak již bylo zmíněno v předchozím odstavci, obsahují ve své membráně zevního segmentu protein rhodopsin, což je kovalentně vázaný komplex bílkoviny opsinu a 11-cis-retinalu (derivát vit. A). Ve tmě je cGMP (cyklický guanosinmonofosfát) vázán na kationtových kanálech v buněčné membráně zevního segmentu a drží je otevřené, takže  $\text{Na}^+$  a  $\text{Ca}^{2+}$  mohou vtékat do buňky a depolarizovat ji na -40 mV.  $\text{Ca}^{2+}$  vtékající do zevního segmentu je pomocí výměníku  $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$  v plazmatické membráně hned zase z buňky odstraněn, takže cytosolová koncentrace  $\text{Ca}^{2+}$ , ve tmě (při 350-500 nmol/l) je udržována konstantní. Po dopadu světla (fotonu) na sítnici nastává jeho absorpce. Tím dochází k podráždění membrány a následné izomeraci 11-cis-retinalu na formu all-trans-retinalu. Tato změna geometrie zapříčiní odloučení barviva od bílkoviny. Molekula all-trans-retinalu už nekoresponduje s vazebním místem. Aktivovaný rhodopsin spouští sérii dalších aktivací molekul, které vedou k hydrolýze cGMP. Původně otevřený iontový kanál se tak uzavře a tok iontů se přeruší. Výsledkem je hyperpolarizace membrány fotoreceptoru. Tento receptorový potenciál inhibuje uvolnění

transmiteru glutamátu v synaptické části fotoreceptoru, což vede v dále zapojených neuronech sítnice k depolarizaci, tedy ke vzniku akčního potenciálu. [57][58]

### **3.1.3. Změna velikosti receptivních polí**

Velmi účinným adaptačním mechanismem je proměnlivost velikosti průměru receptivních polí sítnice při změnách hladin jasů. Receptivní pole zrakového neuronu se nazývá část sítnice, která vyvolá elektrickou odpověď neuronu, pokud dojde k její stimulaci. Gangliové nervové buňky sítnice umístěné v centru sítnice (fovee) mají nejmenší receptivní pole a ty, které se nacházejí na v periférii, mají největší receptivní pole. Velmi mnoho tyčinek a čípků tak může být v periférii napojeno na jednu jedinou gangliovou buňku, a to vede ke konvergenci a zesílení signálu - tzv. prostorové sumaci, která při horších světelných podmínkách roste. Pokud tedy přecházíme z dobře osvětleného prostředí do prostředí s nízkým jasnem, začínají vnímat tyčinky v periferní oblasti sítnice, a tím dochází ke zvětšení receptivních polí. Lze tak pojmout signál z mnoha fotoreceptorů a vytvořit co nejkvalitnější zrakový vjem. [57][16][22]

## **3.2. Faktory ovlivňující průběh adaptace**

Existují čtyři faktory ovlivňující adaptaci a její průběh. Prvním z nich je intenzita a expozice světla před samotnou adaptací. Čím je intenzita osvětlení vyšší, tím se čípková adaptace prodlužuje a adaptace tyčinek se více zpožďuje. Prodlužuje se tak i čas dosažení absolutního prahu. Naopak při nízkých před-adaptačních úrovních osvětlení dochází k poměrně rychlé tyčinkové adaptaci a dosažení absolutní prahové hodnoty. Dalším faktorem je uvažovaná pozice na sítnici a velikost testového stimulu. Využitím centrální části sítnice (fovey) a malého testovacího bodu se adaptují jen čípky, zatímco při testování stejného bodu v periférii sítnice dochází k adaptaci jak čípků, tak tyčinek. Podobný princip platí při použití různých velikostí testovacího bodu. Pokud by byl pro testování zvolen malý bod o velikosti asi  $2^\circ$ , objevila by se pouze čípková adaptace, jelikož velikost odpovídá fovee. Při použití většího testovacího bodu při adaptaci na tmu opět dochází ke stimulaci obou druhů fotoreceptorů. S rostoucí velikostí testovacího podnětu reaguje na adaptaci více tyčinek a citlivost oka je ve tmě ještě vyšší. Tuto skutečnost dokazuje větší prostorová sumace tyčinek za tmy. Prostorová sumace nastává, působí-li podněty současně, ale v různých oblastech sítnice a vyžaduje proto působení více synapsí současně. Existují laterální spojení (synapse) skupin fotoreceptorů a bipolárních buněk

prostřednictvím horizontálních a amakrinních buněk vrstvy sítnice, které prostorovou sumaci umožňují. Informace z fotoreceptorů na poměrně velké ploše sítnice se tak mohou sbíhat (konvergovat) do jediné gangliové buňky a dochází ke kumulativnímu účinku na membránový potenciál. Znamená to tedy, že slabý světelný podnět rozprostřený asi na 1000 tyčinek má stejný účinek jako silnější podnět, rozložený na 100 či méně tyčinek.[59][60][61][62]

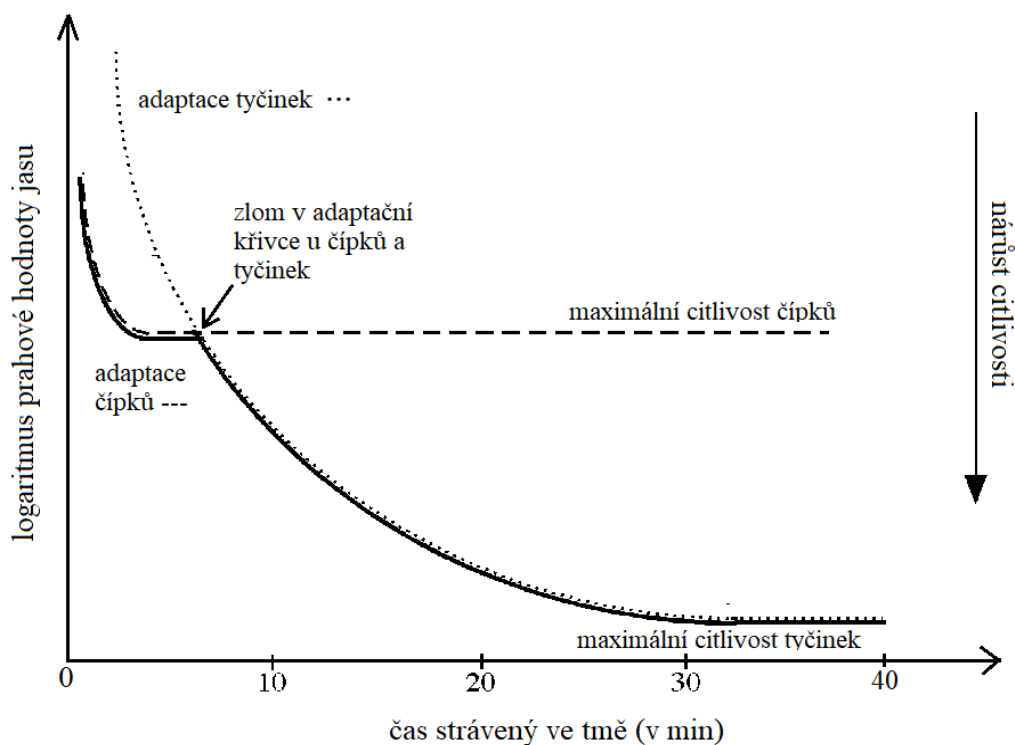
Dalším z faktorů je vlnová délka světla, která opět ovlivňuje zapojení jednotlivých typů fotoreceptorů. Při dlouhovlnném světle, jako je temně červená, mají oba typy světločivných buněk obdobnou citlivost a rozdíl v adaptaci není patrný. Ovšem při využití krátkovlnného světla je adaptace tyčinek o dost výraznější, protože tyčinky jsou v této oblasti spektra mnohem citlivější než čípky, jakmile jsou zadaptovány na tmu. Poslední činitel ovlivňující adaptaci je regenerace rhodopsinu, tedy rozpad a syntéza pigmentu fotoreceptoru.[62]

### **3.3. Adaptace na tmu**

Jak již bylo uvedeno, jedná se o pokles prahového jasu oka s časem. Velmi nízký prahový jas je dosažen asi po 20 minutách, pro dosažení absolutního prahu je potřeba adaptace až 40 minut. [22]

Adaptaci na tmu podléhají jak tyčinky, tak i čípky. Každý z fotoreceptorů se však adaptuje jinak. Nejprve je pokles prahu rychlý, ale ne tak výrazný a je způsoben čípkovou adaptací. Následuje adaptace tyčinek. Odlišnost v adaptačních procesech obou typů fotoreceptorů se projeví zlomem na křivce, který odpovídá přechodu mezi viděním čípkovým (fotopickým) a tyčinkovým (skotopickým). Ve fovee prakticky chybí tyčinková část křivky, tj. hodnota prahu se ustálí na prahové hodnotě čípků. Naopak v periférii sítnice je výrazná tyčinková křivka, která dosahuje až k absolutnímu prahu. Adaptační křivka na tmu je znázorněna na obr. 9. Čas potřebný pro adaptaci je z části vymezen i dobou nutnou k obnově zásob rodopsinu, jenž zajišťuje optimální fungování tyčinek. [22][62]





Obr. 9. Adaptační křivka oka na tmu [63]

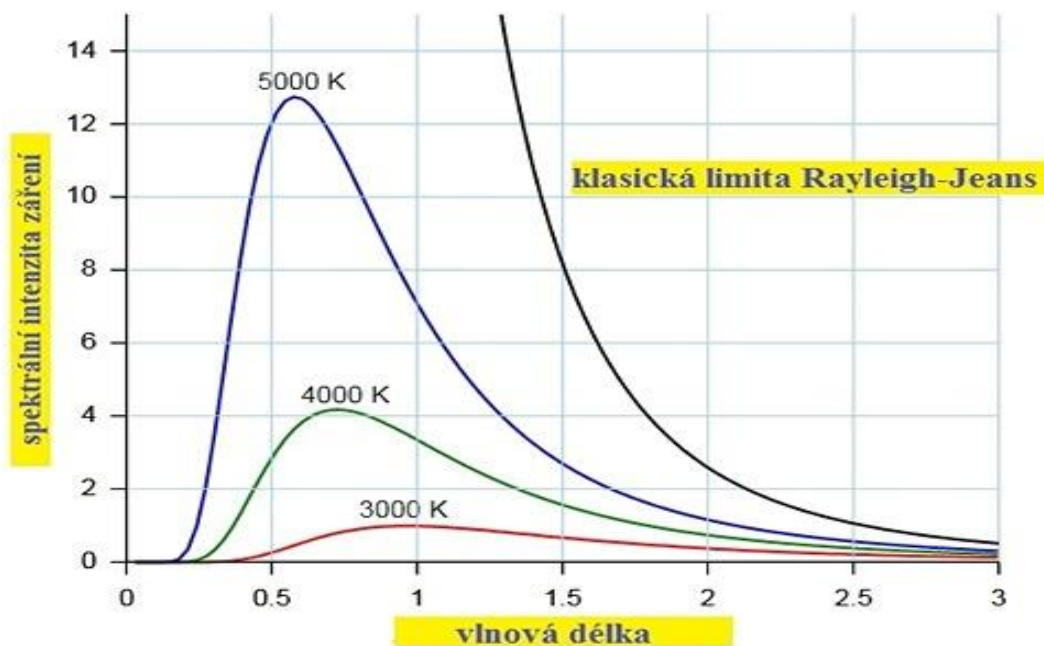
### 3.3.1. Porucha adaptace na tmu

Projevem poruchy adaptace na tmu bývá snížená či úplná neschopnost vidění v noci i za šera. U nás se tento zhoršený stav zraku označuje jako šeroslepost, v anglické literatuře se můžeme setkat s pojmem noční slepota – night blindness, nebo také nyktalopie. Příčiny šerosleposti mohou být různé. Buď se jedná o čistě o oční onemocnění, vrozenou poruchu vidění za šera, onemocnění jater nebo nedostatečný příjem vitamínu A v potravě. Šeroslepost se objevuje jako jeden z prvních symptomů u mnoha onemocnění sítnice a jiných stavů oka, jako např. xerophthalmie a nekorigované myopie. Nejčastěji je způsobena nedostatkem vitamínu A, přičemž dochází k poklesu hladiny rhodopsinu, a tím následně k narušení činnosti tyčinek. Vrozená šeroslepost je vzácná a vyskytuje se u dědičných poruch týkajících se funkce tyčinek. Při rané formě šerosleposti trvá delší čas, než se zrak zadaptuje na tmu. Později jedinec zcela ztrácí noční vidění. [64][65]

## 4. Počátky kvantové teorie, Planckova konstanta

Od počátku, kdy byla Maxwellem předpovězena teorie elektromagnetických vln a současně experimentálně prokázána elektromagnetická podstata světelného vlnění se objevují

experimentální poznatky vypovídající o kvantovém charakteru interakce mezi elektromagnetickým zářením a látkou. Zejména výsledky experimentů týkající se emise a absorpce záření nelze úspěšně vysvětlit pouze vlnovým popisem. [66]



Obr. 10. Vyzařování absolutně černého tělesa jako funkce vlnové délky, při různých absolutních teplotách. Každá křivka má vrchol na jiné vlnové délce, závislost posouvání vrcholů ekvitermních křivek popisuje Wienův zákon. [67]

Když zaměříme svoji pozornost na uvedený graf vyzařování takzvaného **absolutně černého** tělesa na obr. 10., uvědomíme si podstatné vlastnosti průběhu křivek popisujících posun maxim vlnových délek se zvyšující se teplotou tělesa. Tyto vlastnosti se postupně vyjasňovaly pomocí zákonitostí, jako byl například Wienův posunovací zákon, Rayleigh-Jeansův zákon a **Planckův vyzařovací zákon**. Wienův posunovací zákon je fyzikální zákon, který konstatuje, že v záření absolutně černého tělesa je maximální energie vyzařována na vlnové délce, která se s rostoucí termodynamickou teplotou snižuje (to znamená, že čím teplejší je těleso, tím více vyzařuje na kratších vlnových délkách - vyšších frekvencích). Tento vztah mezi intenzitou a vlnovou délkou nemohla klasická fyzika dostatečně vysvětlit. **Rayleigh-Jeansův** zákon, který byl odvozen podle zákonů klasické fyziky, byl nejlepší aproximací podle klasické fyziky, ale stále velmi špatně reprodukoval data, proto se neschopnost klasické fyziky vysvětlit záření černého tělesa stala známou jako ultrafialová katastrofa. [66][68]

Matematické vyjádření pro Planckův vyzařovací zákon je:

$$B(\lambda, T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1},$$

kde  $B(\lambda, T)$  je spektrální záření černého tělesa při dané vlnové délce  $\lambda$  a termodynamická teplotě  $T$ ,  $h$  je Planckova konstanta (přibližně  $6,626 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$ ),  $c$  je rychlost světla (přibližně  $3 \times 10^8 \text{ m/s}$ ),  $k$  je Boltzmannova konstanta (přibližně  $1,38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ ),  $\lambda$  je vlnová délka emitovaného záření.[69]

#### 4.1. Význam a historie

Všechny pokusy pochopit paradoxní výsledky emise a absorpce záření byly neúspěšné, dokud M. Planck v roce 1900 nepřišel s myšlenkou omezit emisní energie oscilujících elektronů, které jsou zodpovědné za emisi černého tělesa, na diskrétní hodnoty a hypotézou, že **oscilátor** s vlastní frekvencí  $f$  ( $\nu$ ) může emitovat a absorbovat energii pouze po částech (porcích), které nazval kvanta.  $E = hf = h\nu$  [66]



Obr. 11. Max Planck v roce 1901, rok poté, co publikoval svůj článek o kvantu [70]

Vlastnosti a zákonitosti vyzařování takzvaného absolutně černého tělesa se snažil objasnit Max Planck (1858-1947) a postuloval takzvaný Planckův vyzařovací zákon. Pro vyřešení shody s experimentálně zjištěnými závislostmi pro spektrální hustotu zářivé energie Planck zavedl novou fundamentální přírodní konstantu  $h = 6,626 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{Hz}^{-1}$  ( $\text{J}\cdot\text{s}$ ), která se později nazvala Planckova konstanta. Poněvadž se ve fyzice častěji užívá kruhová frekvence  $\omega = 2\pi f$ , uvádí se dnes vztah rovněž ve tvaru  $E = \hbar \omega$ , kde  $\hbar$  značí redukovanou Planckovu konstantu, zavedenou Paulem Diracem, ve známém vztahu:  $\hbar = h/2\pi = 1,055 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$ .

Redukovaná Planckova konstanta se také nazývá Planckova-Diracova. Objekty mikrosvěta se z našeho pohledu někdy chovají jako částice popsané energií a hybností ( $\mathbf{E}, \mathbf{p}$ ), jindy jako vlnění popsané úhlovou frekvencí a vlnovým vektorem ( $\omega, \mathbf{k}$ ). V soustavě jednotek **SI** je převodním koeficientem mezi částicovými a vlnovými vlastnostmi objektu právě Planckova konstanta:

$$\mathbf{E} = \hbar \omega, \mathbf{p} = \hbar \mathbf{k}. [66]$$

Existence Planckovy konstanty je pro nás tedy velmi významná, poněvadž vymezuje hranici mezi makrosvětlem, kde platí Newtonovy zákony mechaniky a mikrosvětlem, kde platí zákony kvantové mechaniky.[71]

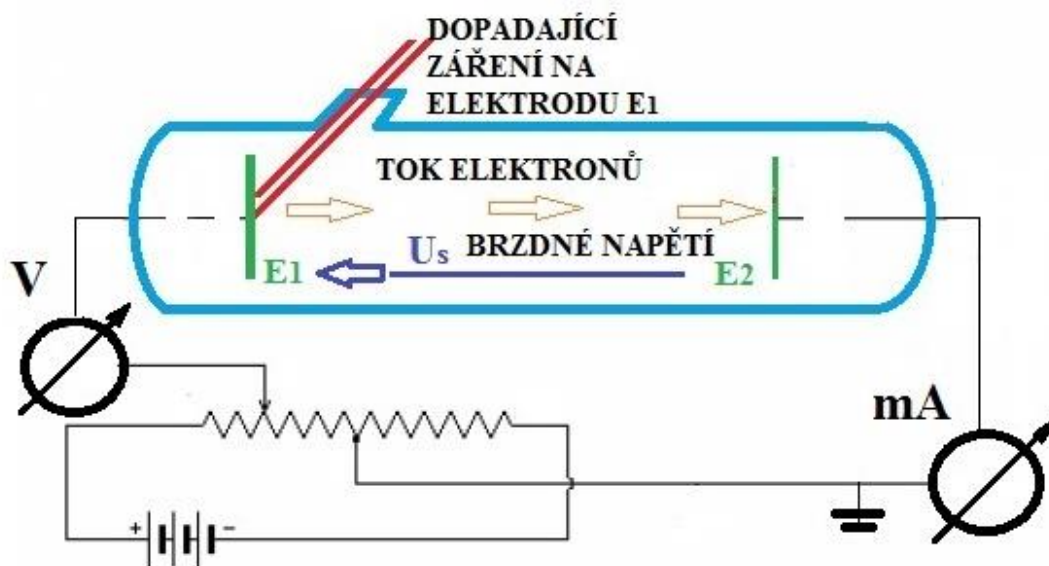
Kvanta energie Max Planck zavedl při analýze a matematickém modelování procesů v takzvaném absolutně černém tělese, při popisu chování harmonických oscilátorů tvořících stěny dutiny naplněné zářením a nikoli samotného záření. (*Černé těleso je idealizovaný objekt, který by absorboval veškeré záření na všech vlnových délkách a současně vyzařuje záření specifickým způsobem závislým na teplotě.*) Pokud by však energie těchto oscilátorů byla skutečně kvantována, musela by být stejně kvantována i energie jimi emitovaná či absorbována při výstupu nebo vstupu do dutiny, což by znamenalo, že výměna energie mezi rovnovážným tepelným zářením a stěnami dutiny (*elektromagnetickým zářením a materiálem*) probíhá po kvantech tedy o velikosti  $E = hf = h\nu$ . V takovém případě by ovšem nebylo vyloučeno, že se toto kvantování projeví i u samotného záření. [66]

S touto myšlenkou přichází v roce 1905 Albert Einstein ve své práci - *O jednom heuristickém aspektu týkajícím se vzniku a přeměny světla*- [On a Heuristic Point of View about the Creation and Conversion of Light] [72]. Analyzuje zde několik navzájem odlišných jevů, kdy pro jejich vysvětlení neuspěla klasická vlnová teorie. Pozornost věnuje popisu interakce světla (elektromagnetického záření) s látkou a problému rovnovážného tepelného záření. Vychází z určité nesymetrie předchozích Planckových úvah – kdy se na stěny a materiál dutiny pohlíží jako na soubor částic (oscilátorů), jejichž energie je navíc kvantována, zatímco záření v dutině, které je jimi emitováno a absorbováno, se považuje za spojitě – formuluje klíčovou myšlenku: **Energie je nejen emitována a absorbována stěnami dutiny po kvantech, ale ve formě těchto kvant v dutině i existuje.** Na rovnovážné tepelné záření (elektromagnetické pole) lze tedy pohlížet jako na soubor lokalizovaných objektů –světelných kvant – majících energii  $E = hf$  a pohybujících se rychlostí světla  $c$ , v důsledku těchto skutečností Einstein odvozuje alternativním způsobem Planckův vyzařovací zákon. [72]

Podobného fyzikálního principu a metody použil k objasnění klasicky do té doby několika nevysvětlených jevů. Nejznámějším z nich je fotoelektrický jev. Emise elektronů z ozařovaného vodivého vzorku, jež je jeho podstatou, je zde nově interpretována jako důsledek

absorpce jednotlivých světelných kvant jednotlivými elektrony a matematicky popsána vztahem,  $E_0 = hf - E_V$  (kde  $E_0$  je energie uvolněného elektronu a  $E_V$  výstupní energie), který je dnes známý jako Einsteinův zákon (vnějšího) fotoelektrického jevu. Fotoelektrický jev zahrnuje emisi elektronů z určitých materiálů při vystavení světlu a nelze jej vysvětlit klasickými modely. Za tuto práci obdržel Einstein v roce 1921 Nobelovu cenu za fyziku. Niels Bohr použil Planckovy myšlenky o kvantování energie jako výchozí bod při vzniku moderní teorie pro atom vodíku. Robert Millikan provedl první měření Planckovy konstanty v roce 1916. Nejlepší aktuální hodnota pro Planckovu konstantu konstanta je  $6,62607554 \times 10^{-34} \text{ J s}$ . [72][73][69]

Potvrzení kvantování energie přineslo tedy vysvětlení fotoelektrického jevu Albertem Einsteinem v roce 1905. Při tomto jevu záření způsobuje vystoupení elektronů z kovového povrchu pouze v případě, že záření má vyšší frekvenci, odpovídající prahové hodnotě  $U_0$ , která je závislá na typu kovu. Vyvržené elektrony jsou detekovány jako elektrický proud tekoucí v obvodu mezi kovem elektrody  $E_1$  a druhou elektrodou  $E_2$  a jejich kinetická energie  $E_K$  byla vyhodnocena přivedením napětím  $U_s$  mezi obě elektrody, dokud proud nepřestal téct. [69]



Obr. 12. Schéma fotoelektrického jevu

Kinetická energie elektronů vyvržených konkrétním světelným zdrojem je určena hodnotou tohoto takzvaného brzdného potenciálu  $U_s$  tohoto světelného zdroje (*s danou frekvencí, vlnovou délkou*)  $E_K = hf - hf_0 = \frac{1}{2}mv^2 = -e U_s$ , přičemž  $m$ ,  $v$  a  $e$  jsou hmotnost, rychlost a náboj elektronu. [69][73]

Pozorování provedená při experimentech s fotoelektrickým jevem byla v rozporu s klasickou fyzikou. Nejprve bylo zjištěno, že kinetická energie vyvržených elektronů je úměrná rozdílu mezi frekvencí použitého světla  $\nu$ , a  $\nu_0$ . Pokud se intenzita světelného zdroje zvýšila, zvýšil se pouze počet emitovaných elektronů, nikoli jejich kinetická energie. Na druhé straně klasická fyzika předpovídala, že elektrony by měly být emitovány při jakékoli frekvenci světla a že zvýšení intenzity světelného zdroje by pouze zvýšilo kinetickou energii elektronů. Einstein racionalizoval tento rozpor tím, že předpokládal něco velmi podobného Planckovi - totiž že světlo dopadající na kovový povrch existuje v kvantech energie  $h\nu$ . To znamenalo, že  $E_W = h\nu_0$  byla energie potřebná k vyvržení elektronu z povrchu, zatímco  $E_K = h\nu - h\nu_0$  se jeví jako kinetická energie elektronu. V kombinaci s předchozí rovnicí to znamená, že  $h\nu - h\nu_0 = -e U_s$ . Veličina  $h\nu_0$  se stala známou jako pracovní funkce kovu  $E_W$ . Pomocí známé hodnoty  $e$  byl Einstein schopen nezávisle určit  $h$ . Jeho hodnota velmi dobře souhlasila s Planckovou, což naznačuje, že existuje přirozený základ pro kvantování a pro konstantu  $h$ . [73]

Závěrem je, že:

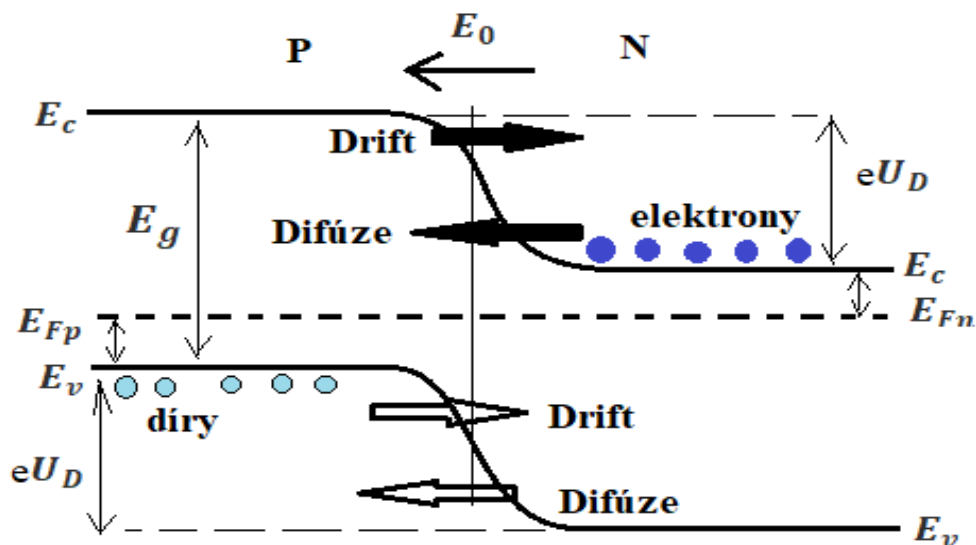
- a) kinetická energie elektronů emitovaných při fotoelektrickém jevu nezávisí na intenzitě dopadajícího záření, ale celkový počet elektronů emitovaných z povrchu kovu za jednotku času, je úměrný intenzitě světla.
- b) Kinetická energie elektronů emitovaných při fotoelektrickém jevu roste s frekvencí dopadajícího záření.
- c) Pro každý kov existuje minimální frekvence  $\nu_{min} = \nu_0$  nazývaná také mez fotoelektrického jevu, takže světlo o nižší frekvenci fotoelektrický jev nezpůsobuje. [73]

## 4.2. Teorie přechodu P-N

Přechod P-N vznikne spojením dvou typů polovodičových materiálů, polovodiče typu N a polovodiče typu P. Polovodič typu N má vysokou koncentraci volných, takzvaných vodivostních elektronů, zatímco polovodič typu P obsahuje velké množství vodivostních děr. Při spojení těchto dvou materiálů je vytvořen velmi silný gradient koncentrace majoritních nosičů nábojů, díky němuž dochází k difúzi, difúznímu proudu vodivostních elektronů a děr přes rozhraní P-N. Vodivostní elektrony se pohybují z oblasti N do oblasti P, a díry migrují z oblasti P do oblasti N. Difundující elektrony v blízkosti P-N přechodu rekombinují a vzniká záporný prostorový náboj pevně vázaných iontů akceptoru v P-oblasti a kladný prostorový náboj v N-oblasti pevně vázaných iontů donoru, který nedovolí dalším elektronům a dírám přejít přes rozhraní P-N. Oblast kolem P-N přechodu neskýtá téměř žádné volné nosiče náboje

a říká se jí proto ochuzená oblast, neboli oblast prostorového náboje (OPN). Vzniklý prostorový náboj napříč ochuzenou oblastí vytváří elektrické pole o intenzitě  $E_0$  a difúzní napětí  $U_D$  (rozdíl potenciálů mezi P a N). Vzniklé elektrické pole působí driftový pohyb minoritních nosičů náboje proti difúzi. Bez připojení vnějšího zdroje napětí nastává na P-N přechodu stav dynamické rovnováhy, kdy driftový proud  $I_{dr}$  tvořený pohybem minoritních nosičů náboje a difúzní proud  $I_{dif}$  majoritních nosičů náboje mají stejnou hodnotu a působí proti sobě navzájem, tedy liší se pouze znaménkem:  $|I_{dr}| = |I_{dif}| = I_0$ . Proud procházející elektrickým obvodem je tedy nulový. Pohyb nabitých částic a pásová struktura polovodiče je zachycena na obr. 13. Z termodynamické rovnováhy vyplývá, že difúzní bariéra  $e \cdot U_D$  je rovna rozdílu mezi šířkou zakázaného pásu  $E_g$  a Fermiho hladinami  $E_{Fn}$  a  $E_{Fp}$  pro N a P oblasti:[12][74][75][76][77]

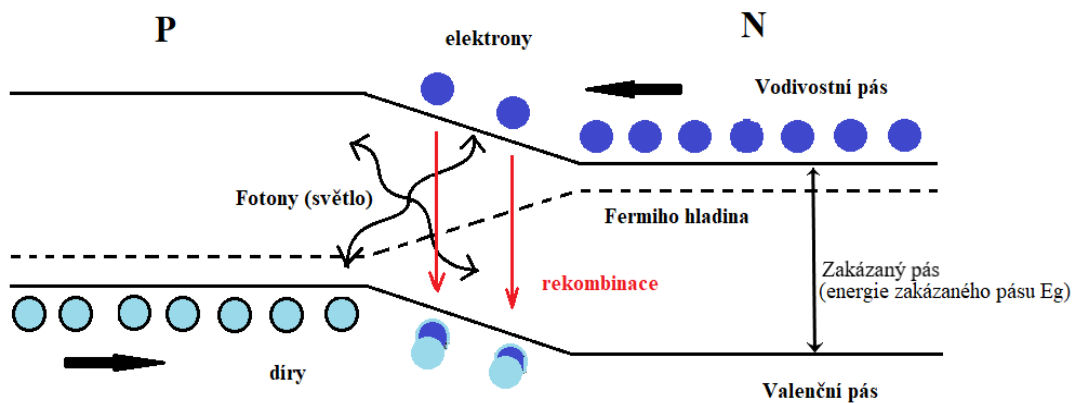
$$e \cdot U_D = E_g - (E_{Fn} + E_{Fp})$$



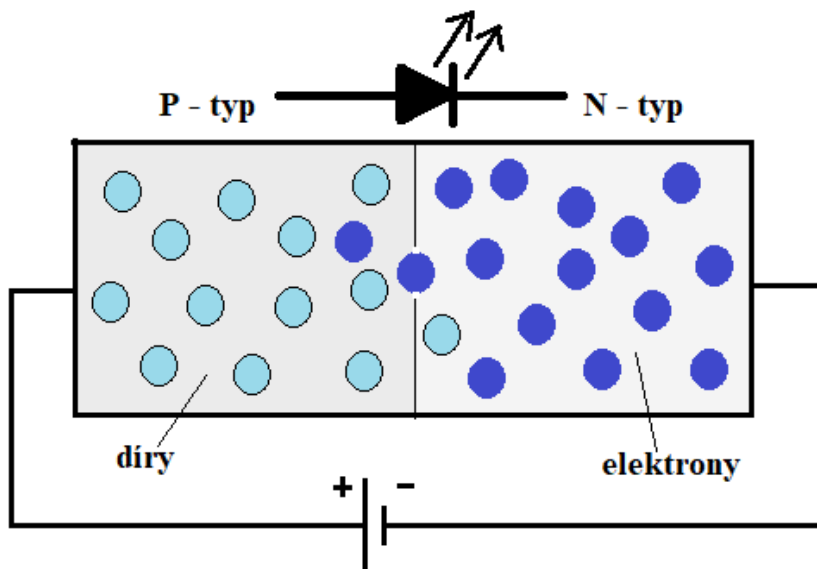
Obr. 13. Pásový diagram polovodičového přechodu P-N za podmínek termodynamické rovnováhy [74]

Pokud je přechod P-N připojen ke zdroji elektromotorického napětí  $U$ , mohou nastat dvě varianty. Zapojení přechodu P-N ke zdroji napětí způsobem, že záporný pól je připojen na polovodič P a kladný pól připojen k polovodiči N vyvolá určité působení elektrických sil v elektrickém poli. Volné nosiče náboje od přechodu P-N vzdalují, ochuzená oblast se ještě více rozšíří (difúzní bariéra se ještě zvětší  $\rightarrow e(U_D + U)$ ) a vzroste tak její elektrický odpor. V tomto případě elektrický proud neprochází přes P-N přechod a jedná se o takzvané zapojení v závěrném směru. Avšak při opačné polaritě připojení zdroje elektromotorického napětí, tedy že kladný pól připojíme k polovodiči P a záporný pól k polovodiči N, přechází volné nosiče

náboje (elektrony a „díry“) působením elektrických sil přes rozhraní P-N. Následkem je zúžení ochuzené oblasti (snížení difúzní bariéry  $\rightarrow e(U_D - U)$ ), čímž se sníží i její elektrický odpor. V této situaci P-N přechodem začíná procházet proud a takovéto zapojení se nazývá zapojení v propustném směru, znázorněno na obr. 14.[8][75][78]



Obr. 14. P-N přechod na LED diodě zapojený v propustném směru [79]



Obr. 15. Elektrický obvod s LED v propustném směru [79]

#### 4.2.1. Příměsové polovodiče

Polovodiče jsou materiály, které se od kovů (vodičů) a izolantů liší způsobem, jakým se elektrony v jejich struktuře chovají. V polovodičích je většina elektronů vázána ve struktuře materiálu, ale malá část je pohyblivá, takže za určitých okolností snadno vede proud. Přidáním malého množství příměsových atomů do polovodičového prvku lze zásadním způsobem měnit



jeho fyzikální vlastnosti a vytvořit nové energetické hladiny ležící uvnitř zakázaného pásu  $E_g$ . Zakázaný pás je energetický interval mezi valenčním pásem elektronů označovaným  $E_v$  a vodivostním pásem značeným  $E_c$ . Ve valenčním pásu jsou elektrony součástí valenční vazby mezi atomy. Ve vodivostním pásu mají elektrony dostatečné množství energie a mohou zprostředkovat elektrický proud.  $E_g$  představuje minimální množství energie nutné k přechodu elektronu z úrovně valenčního pásu do vodivostního pásu. Zakázaný pás je důležitý energetický interval, jež určuje fyzikální vlastnosti polovodiče. [80][81]

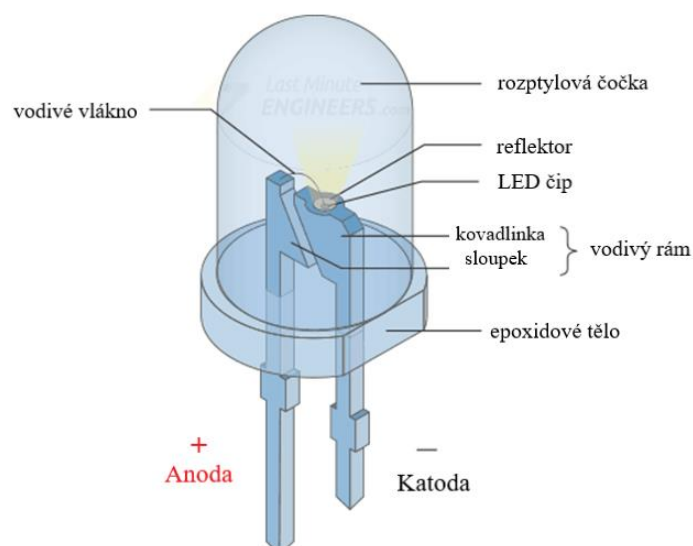
Důležitou roli hraje rovněž významná, takzvaná Fermiho energetická hladina. Fermiho energie  $E_F$  je hranice mezi plně obsazenou energetickou hladinou (valenčním pásem) a zcela prázdnou energetickou hladinou (vodivostním pásem), při teplotě blízké se 0 K. Fermiho hladina  $E_F$  charakterizuje obsazení energetických stavů. Odpovídá energetické hladině, která je při dané teplotě obsazená s pravděpodobností 50 %. Poloha Fermiho energetické hladiny se může měnit s rostoucí teplotou materiálu nebo s přidáním příměsových atomů do polovodičového materiálu. Pro nedegenerovaný polovodič typu N leží Fermiho hladina  $E_{Fn}$  pod úrovní  $E_c$  dna vodivostního pásu. U polovodiče typu P se Fermiho hladina  $E_{Fp}$  nachází nad úrovní horního okraje valenčního pásu  $E_v$  znázorněné na obr. 10. [12][82][83]

Pokud je v krystalové mříži křemíkového polovodiče nahrazen jeden atom křemíku pětímocným prvkem, např. atomem fosforu (P) mající v konfiguraci o elektron více, vznikne po utvoření kovalentních vazeb mezi atomy ve valenčním pásu jeden volný elektron, vázán velmi slabě k atomu fosforu. Tento elektron se nachází na takzvané donorové energetické hladině  $E_D$ , velmi blízko dna vodivostního pásu. V porovnání s energetickou šířkou zakázaného pásu  $E_g$  je jeho energie značená  $E_D$  potřebná pro přechod do vodivostního pásu velmi malá. Atom fosforu lehce daruje elektron do vodivostního pásu, proto se nazývá donor. Polovodičům dotovaným právě atomy donorů se říká polovodiče typu N z důvodu výrazně vyššího počtu negativních nosičů náboje (elektronů) ve vodivostním pásu, než počtu pozitivních nosičů náboje – děr ve valenčním pásu. Elektrony jsou v polovodiči typu N majoritními a díry minoritními nosiči el. náboje. Naopak nahrazením atomu křemíku v krystalové mříži třímocným prvkem, např. atomem Galia, který má ve své konfiguraci o elektron méně, vznikne na vazebném místě díra. Působením tepelné energie může být vytržen elektron ze sousední vazby, aby tuto díru zaplnil a vzniká tak další díra, a ta se pohybuje krystalickou mříží. Tento elektron se nachází v blízkosti vrcholu valenčního pásu. Energie  $E_A$  nutná k přechodu elektronu z valenčního pásu na akceptorovou energetickou hladinu  $E_A$  je v porovnání se šířkou  $E_g$  velmi malá. Atom Galia (Ga) lehce přijme elektron z valenčního pásu, nazývá se tedy akceptor. Tyto

polovodiče dotované atomy akceptorů se nazývají polovodiče typu **P**, protože počet pozitivních nosičů náboje – děr ve valenčním pásu je výrazně vyšší než počet elektronů ve vodivostním pásu. Díry jsou v polovodiči typu **P** majoritními nosiči a elektrony minoritními nosiči el. náboje. [84][75][9][8]

### 4.3. LED









Pro účely analýzy citlivosti oka využíváme v experimentu subjektivní měření rozsvícení LED diod. Světelná dioda, LED (light emitting diode), je typ polovodičové diody s jedním P-N přechodem. Diody LED vyzařují světlo prostřednictvím jevu, který nazýváme elektroluminiscence, kdy se díry a elektrony zářivě rekombinují v polovodičovém materiálu. Při zapojení P-N přechodu v propustném směru dochází k rekombinaci elektronů a děr v blízkosti rozhraní P-N. Rekombinační proces může být jak zářivý, tak nezářivý. V případě zářivé rekombinace je emitován foton o energii rovné rozdílu energií nosičů, což je v podstatě energie zakázaného pásu. Vlnová délka  $\lambda$  vyzářeného světla je závislá na energii zakázaného pásu a lze ji vyjádřit pomocí vztahu:  $\lambda = h \cdot c / E_g$ , kde  $h$  označuje Planckovu konstantu a  $c$  je rychlost světla ve vakuu. Energie (šířka) zakázaného pásu je ovlivněna tím, jaký materiál je ke konstrukci P-N přechodu zvolen. LED vyzařují poměrně úzkou šířku pásma viditelného světla na různých vlnových délkách, ale mohou vyzařovat i neviditelné IR nebo UV záření. Jsou vyrobeny z velmi tenké vrstvy silně dopovaného polovodičového materiálu a v závislosti na použitém materiálu a množství (poměru) dopování (příměsí) bude LED dioda při zapojení v propustném směru vyzařovat barevné světlo o určité spektrální vlnové délce. Světlo emitující dioda je tvořena přechodem P-N, který je obklopen průhledným pláštěm nebo polokulovitým tělem z tvrdého plastu z epoxidové pryskyřice chránící diodu před vibracemi a nárazy. Konstrukce LED je znázorněna na obr. 16. Mezi nejdůležitější výhody LED patří vysoká účinnost a dlouhá životnost. Díky nim mají LED široké využití, např. osvětlení v domácnostech, kancelářích, světlomety u aut či signalizační osvětlení s vysokým jasem.[85][86][87][78]



Obr. 16. Konstrukce a popis částí LED diody [88]

Barva vyzařovaného světla diody je dána materiálem polovodiče. Klíč k pozoruhodnému výkonu LED diod spočívá v použití polovodičových materiálů III.-V. skupiny prvků periodické tabulky. Tyto sloučeniny, vytvořené z prvků ve skupinách III. a V., vykazují výjimečné elektronické vlastnosti, které jim umožňují vyzařovat světlo, když jsou zapojeny v elektrickém obvodu a protéká jimi elektrický proud. Nejvíce používanými materiály při výrobě LED diod jsou arsenid galia (GaAs), fosfid galia (GaP) a nitrid galia (GaN). GaAs a GaP jsou dva z nejběžnějších materiálů používaných při výrobě LED. Tyto materiály byly využívány při výrobě raných generací LED, které primárně vyzařovaly červené a zelené světlo. Materiály sk. III.-V. jsou skupinou polovodičových materiálů, které se skládají ze tří nebo pěti prvků ze skupin III. a V. periodické tabulky. Tyto materiály se běžně používají k výrobě LED diod, protože mají správné vlastnosti pro produkci světla. [89] Pro výrobu různých barev LED diod se mohou použít tyto materiály:

Tabulka č. 1 Jednotlivé barvy LED s rozsahem vlnových délek a dalšími charakteristikami [90][86][91]

Barva LED	Název barvy	Vlnová délka záření (nm)	Úbytek napětí (V)	Typické materiály pro jednotlivé $\lambda$
	Infračervená	>760	<1,9	GaAs, AlGaAs
	Červená	610 – 760	1,6 - 2,0	GaP, AlInGaP
	Oranžová	590 – 610	2,0 -2,1	GaAsP
	Žlutá	570 – 590	2,1 – 2,2	GaInP
	Zelená	500 – 570	1,9 – 4,0	AlGaP, InGaN
	Modrá	450 – 500	2,5 – 3,7	InGaN, SiC
	Fialová	400 – 450	2,8 – 4,0	InGaN
	Ultrafialová	< 400	3,1 – 4,4	AlGaN, AlN

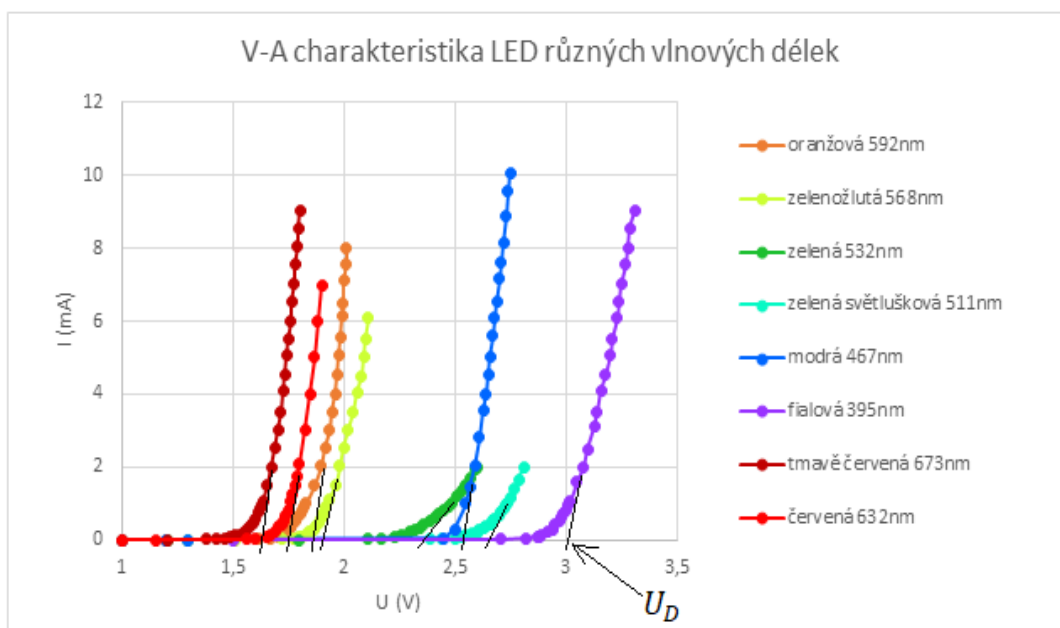
Když zapojíme LED do elektrického obvodu a prochází-li LED diodou elektrický proud, pozorujeme určitý úbytek napětí. Pokles neboli úbytek napětí diody je napětí, které změříme voltmetrem na dané diodě v propustném směru. Pokles napětí diody je výsledkem toku proudu z anody na katodu. Tento úbytek napětí v propustném směru je výsledkem vzniku působení ochuzené oblasti tvořené P-N přechodem pod účinkem přiloženého napájecího zdroje. Jinými slovy je způsoben rozdílem v energetických hladinách (potenciálech P a N oblasti), který je potřeba překonat, aby docházelo k pohybu elektrických nábojů přes P-N přechod. Zmiňovaný úbytek napětí se nazývá také jako prahové napětí  $U_p$ , kdy diodou zapojenou v propustném směru začne procházet proud a pomalu se rozsvěcí. Prahové napětí  $U_p$  je tedy téměř totožné s difúzním napětím  $U_D$  na P-N přechodu. Při vyšším úbytku napětí na LED se zvyšuje pravděpodobnost zářivých rekombinací, tzn. že dioda svítí jasněji (vyšší intenzita vyzařování), ale šířka (energie) zakázaného pásu se nemění. Za určitý pokles napětí je rovněž zodpovědný určitý vnitřní odpor diody. Pokles napětí v důsledku odporu závisí na přípustném

průtoku proudu na přechodu P-N. Úbytek napětí na různých diodách z různých materiálů se liší. U světelných LED diod se úbytek napětí pohybuje od 1,4 do 4 V, konkrétní hodnoty jsou uvedeny v tabulce č.1. Na úbytku napětí na diodě závisí velikost procházejícího proudu I diodou. [85][86][87][89][92]

#### 4.3.1. Voltampérová (VA) charakteristika LED

Jedná se o proudově-napěťovou charakteristiku elektrické součástky. Popisuje chování a vlastnosti elektronické součástky při různých hodnotách přiloženého napětí a představuje vztah mezi procházejícím stejnosměrným proudem a stejnosměrným napětím přiloženým na LED. Voltampérové charakteristiky LED znázorněné v grafické formě poskytují cenné informace týkající se odporu a pracovní oblasti LED. Mohou také pomoci určit, kde a jak lze LED použít v elektrickém obvodu. Na grafu Voltampérové charakteristiky LED je na ose x znázorněno napětí U(V), které je nezávislou proměnnou, protože se dá snadno ovládat, narozdíl od proudu I (mA) vyjádřeného na ose y, což je závislá proměnná na U. [93][92] Difúzní proud protékající PN přechodem v propustném směru můžeme vyjádřit vztahem (Shockleyho rovnicí):

$$I = I_0 \exp\left(\frac{eU}{kT}\right)$$

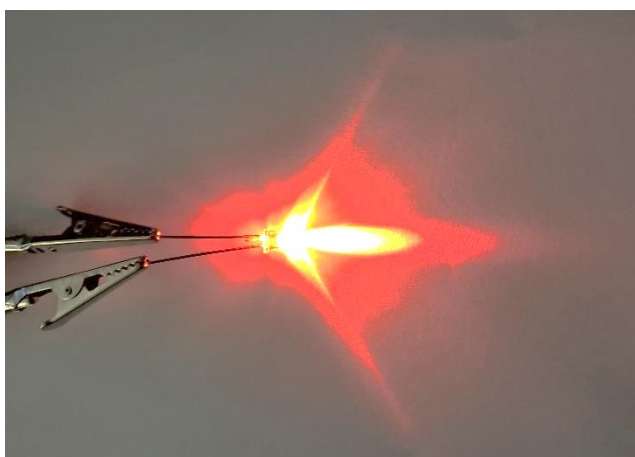


Obr. 17. Voltampérová charakteristika LED – originální naměřená data

Na obrázku 17. je vykreslen typický průběh Voltampérové charakteristiky různých světelných diod. Pracovní oblasti diod jsou barevně zvýrazněny. Oblasti s kladným napětím říkáme propustná. Diodou v této části začíná procházet proud. Při dosažení difúzního napětí  $U_D$ , téměř totožného s prahovým napětím  $U_P$  (stanovené extrapolací z lineární části V-A charakteristiky) se dioda „rozsvěcuje“, nárůst proudu na napětí začíná mít exponenciální až lineární charakter a vniká na ní pokles napětí. [92]

#### 4.3.2. Vyzařování LED

Vyzařování LED je vždy směrové oproti žárovce, která vyzařuje rozptýlené světlo do celého prostoru. Každý osvětlovací prvek má specifický rozptylu. Úhly rozptylu u LED diod se mohou pohybovat od 20 do 120 stupňů. Nejjasnější světlo vychází ze středu svítidla. Úroveň osvětlení klesá, jak se blíží k hranicím úhlu rozptylu. Na základě těchto vlastností je zhotovena konstrukce světelného zdroje pro různé účely. LED se mohou používat pro směrové osvětlení konkrétního místa či objektu. Pro pokrytí velkého prostoru světlem jsou součástí konstrukce svítidla difuzní čočky.[94]



Obr. 18. Vyzařování červené LED diody – originální foto

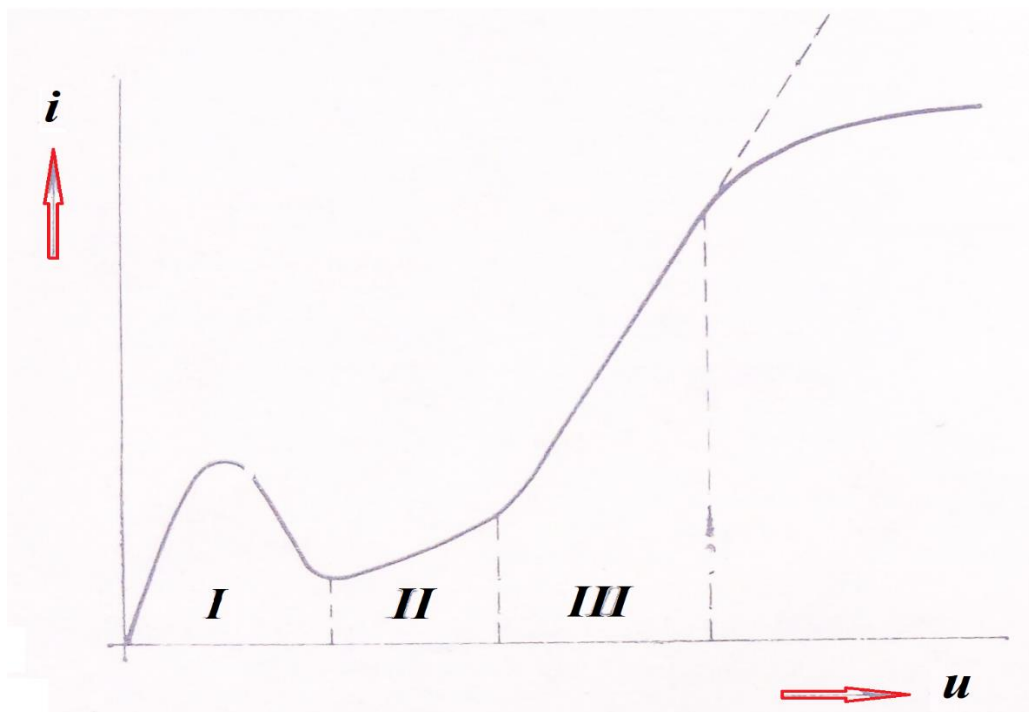
Na obrázku 18. můžeme vidět vyzařování LED v takzvaných „lalocích“. Největší intenzita vyzařování je na optické ose diody v hlavním laloku přímo vpřed, ve vedlejších bočních lalocích je úroveň intenzity záření nižší. Vyzařování světla z LED diody popisuje tzv. emisní rovnice vyjádřená vztahem:

$$I = \frac{e \cdot \eta \cdot \lambda}{h \cdot c}$$

kde  $I$  představuje intenzitu vyzařování [ $W/m^2$ ],  $e$  je elementární náboj elektronu,  $\lambda$  značí vlnovou délku záření,  $h$  je Planckova konstanta a  $c$  je rychlost světla ve vakuu. [95]

### 4.3.3. Tunelový jev u elektroluminiscenčních diod

Na přechodu P-N může za určitých podmínek docházet ke vzniku tunelového proudu, a tím k vybuzení záření v polovodičích. Z kvantové mechaniky vyplývá, že elektron může projít úzkou potenciálovou bariérou, i když jeho energie není dostatečná, aby ji překonala. Elektroluminiscenční struktury mají tunelový proud velmi malý ve srovnání s difúzním nebo generačně rekombinačním proudem. Zářivé tunelování je možné experimentálně pozorovat pouze při nízkých teplotách a malých napětích v propustném směru u struktur, majících na P-N přechodu tloušťku oblasti prostorového náboje menší než přibližně 10nm. Tunelový proud rovněž závisí na poměru elektronů, jež tunelují skrz k celkovému počtu elektronů dopadajících na potenciálovou bariéru s určitou energií  $E$  a na statistickém rozdělení částic v daných podmínkách. Tyto podmínky vzniku tunelového proudu platí pro silně degenerovaný P-N přechod při nízkém napětí v propustném směru. Elektron tuneluje horizontálně z polovodiče typu N do polovodiče typu P na příměsovou hladinu a zde může buď zářivě či nezářivě rekombinovat. Nejvyšší pravděpodobnost tunelování je pro nosiče nábojů s energií v blízkosti Fermiho hladin, kde je výška potenciálové bariéry nejmenší. Proto se s nárůstem napětí na přechodu P-N bude maximum emisního spektra posouvat směrem k vyšším energiím. [12][96]



Obr. 19. Voltampérová charakteristika elektroluminiscenční diody zapojené v propustném směru, část I. převládá tunelový proud, část II. proud vznikající změnou hustoty nosičů náboje v důsledku rekombinace v OPN, část III. dominuje difúzní proud [12]

#### 4.3.4. Význam LED pro měření Planckovy konstanty

V experimentu jsou využity světelné diody - LED různých barev k provedení vlastního měření Planckovy konstanty. Jedná se v podstatě o demonstraci fotoelektrického jevu do jisté míry "naopak (inverzně)". LED diody zapojené do obvodu elektrického proudu vyzařují záření, když je napětí na ně přivedené nad minimální prahovou hodnotou. Za těchto podmínek se vytváří v diodě páry elektron-díra. Páry elektron-díra jsou nosiče náboje a pohybují se, když jsou umístěny v elektrickém potenciálu. Páry elektron-díra tedy v elektrickém poli vytváří proud. Nad prahovou hodnotou roste proud exponenciálně s napětím. Elektronů putují k anodě, díry ke katodě. Když se elektron a díra setkají, rekombinují a dojde k vyzaření světla. (K vytvoření páry elektron díra je zapotřebí kvantum energie a tato energie se znovu uvolní, když elektron a díra rekombinují). [69]

U většiny klasických diod je tato energie absorbována polovodičem jako teplo, ale u LED tato kvanta energie vygenerují foton diskrétní energie  $E = hf = h\nu$ . Protože zvýšením napětí na diodě může být vybuzeno více stavů, budou při zvyšujícím napětí emitovány fotony s rostoucí energií. To znamená, že světlo vyzařované LED pokrývá rozsah diskrétních vlnových délek, které se zkracují s rostoucím napětím nad prahové napětí  $U_p$  – startující rozsvěčující



napětí (kratší vlnová délka = vyšší energie), které se číselně rovná minimální energii nutné k překonání energetické hodnoty potenciálu takzvaného zakázaného pásu polovodiče (nosiče náboje – elektrony přechází z valenčního do vodivostního pásu, dochází k vytvoření a rekombinaci páru elektron-díra a vyzáření fotonu) a současně vzniká zrakový vjem jako odezva na fotony dopadající na fotoreceptory sítnice. Maximální vlnová délka  $\lambda$  je generovaná tedy při  $U_p$ . Toto napětí zjišťujeme pomocí lidského oka, kdy zaznamenáváme obecně přiložené napětí  $U_0$  ( $U_S$  pro vjem „bílého světla“,  $U_B$  pro barevný vjem) na diodu v okamžiku prvního zrakového vjemu při rozsvěcení LED. [69] Vztah mezi vlnovou délkou  $\lambda$  a přiloženým napětím  $U_0$  je:

$$E = h f = h c / \lambda = e U_0$$

Experimentální hodnotu Planckovy konstanty lze pak určit pomocí známých hodnot rychlosti světla  $c$ , náboje elektronu  $e$  a přesné hodnoty napětí  $U_0$  ze vzorce:

$$h = e U_0 \lambda / c$$

Ze zaznamenaných hodnot napětí (potenciálu) na P-N přechodu LED v okamžiku prvního zrakového vjemu, ze znalosti vlnových délek jednotlivých diod a dalších fyzikálních konstant lze pro dané LED diody určit výpočtem hodnotu Planckovy konstanty, která definuje elementární množství energie v kvantech (termín „kvantum“ představuje určité množství absorbované či vyzážené energie).[97]

## 5. Experimentální část

V praktické části diplomové práce byla provedena analýza citlivosti zraku pro vybrané vlnové délky světla. Prostřednictvím plynulého rozsvěcení osmi LED diod vybraných vlnových délek zapojených v elektrickém obvodu byly zaznamenávány hodnoty napětí na jednotlivých diodách v momentě, kdy oko detekovalo nejprve světlo – první generované fotony na P-N přechodu, které oko dokázalo vyhodnotit jako zrakový vjem, v počátku nebarevný světelný vjem „bílého světla“ s akceptováním pojmu bílého světla jako pocitu v důsledku vnímání tyčinkami. Poté se zaznamenala také hodnota napětí, kdy byla rozpoznána barva diody při navýšení napětí na téže diodě. Z těchto hodnot napětí pro každou vlnovou délku byla výpočtem stanovena hodnota Planckovy konstanty. Získaná data byla statisticky vyhodnocena a porovnána s údaji v odborné literatuře.

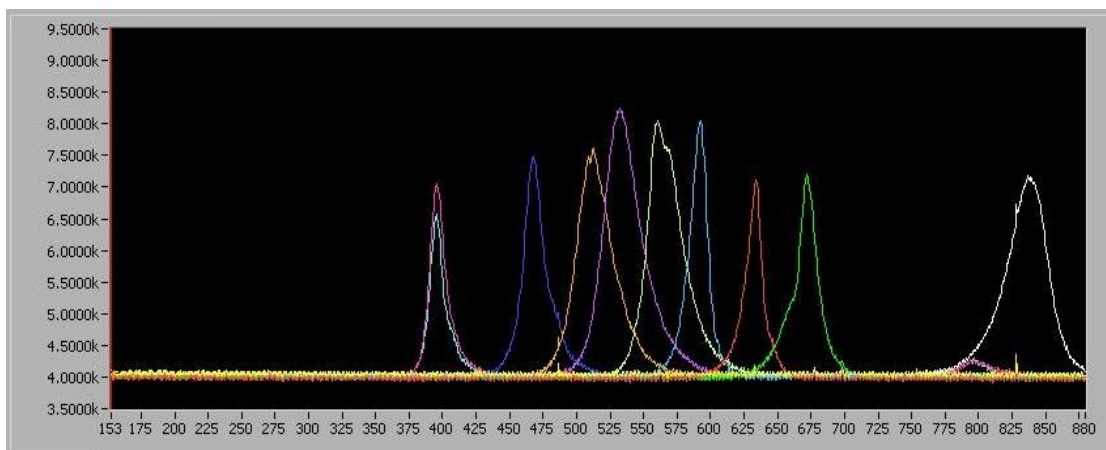
### 5.1. Metodika

#### Výběr testovaných osob

Experimentu se zúčastnilo 13 osob, z toho 7 mužů a 6 žen ve věkovém rozsahu 20-65 let při průměrném věku 35let a směrodatné odchylce 12,3. Testovalo se vždy pravé oko a všechny testované osoby disponovaly normálním viděním, bez patologií, které by nějakým způsobem ovlivňovali průběh měření nebo výsledky měření. Každá osoba podepsala informovaný souhlas, kde byla seznámena s cílem experimentu, jeho průběhem a případnými riziky při účasti na tomto experimentu.

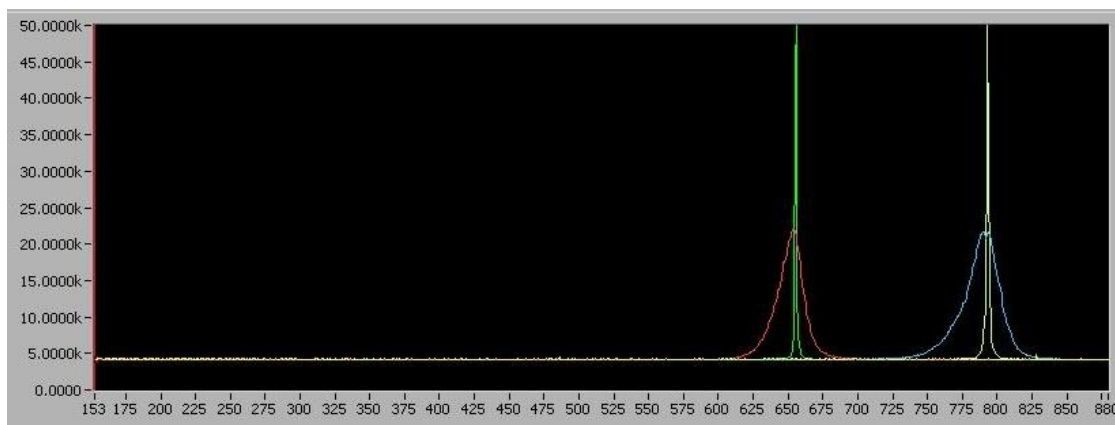
#### Spektrální charakteristika LED diod

Pro experimentální měření bylo vybráno 8 různobarevných LED a byla u nich změřena spektra pro zjištění přesné vlnové délky pomocí spektrometru IS Series Minispectrometer a optického vlákna, které světlo do spektrometru přivádí. Program pro vykreslení spektra LED má název: Newport Oriol TRACQ Basic for MinSpec Version 1.6.6. Jednotlivá barevná spektra LED jsou vidět na obr. 20.

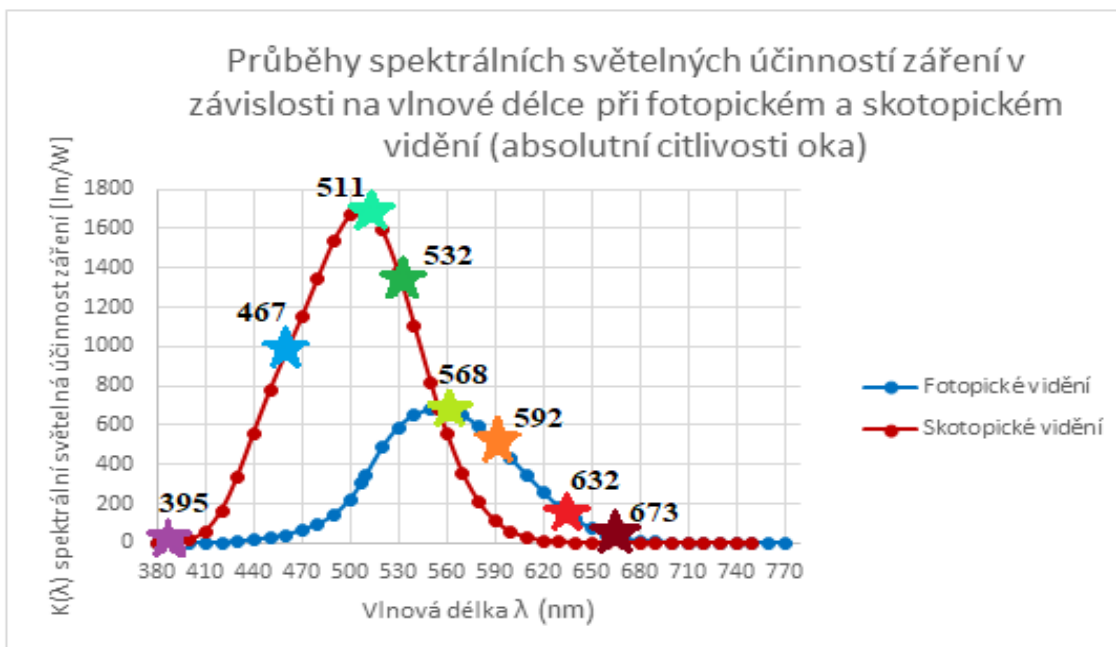


Obr. 20. Jednotlivá barevná spektra vybraných LED

Výběr specifických vlnových délek byl proveden s ohledem na spektrální citlivost oka stanovenou psychofyzikální funkcí  $K(\lambda)$ , která je uvedena v teoretické části v kapitole 2.1.2. Účinek záření na zrak a výběr diod je znázorněn na obr. 22. Spektra diod byla zjišťována pro účely výpočtu Planckovy konstanty, při kterém se vycházelo z hodnoty dominantní (maximální) hodnoty vlnové délky daného spektra LED diody. V obr. 20. a 21. je na horizontální ose vynesena vlnová délka záření a vertikální osa představuje intenzitu záření. Nejvíce vlevo leží spektrum fialové LED o dominantní vlnové délce 395nm, poté směrem doprava byly postupně vybrány další LED: modrá LED o vlnové délce 467nm, (modro)zelená 511nm (poblíž maxima citlivosti skotopické funkce  $K'(\lambda)$ , 507nm), zelená 532nm, žlutozelená 568nm (poblíž maxima citlivosti fotopické funkce  $K(\lambda)$ , 555nm), oranžová 592nm, červená 632nm a červená 673nm. Jako kuriozita byla do měření zařazena i infračervená dioda o vlnové délce 835nm testována na čtyřech subjektech a dvě laserové diody (LD) vlnových délek 655nm a 790nm testované na dvou subjektech. Na obr. 21. lze vidět spektrum LD 655nm a 790nm v režimu spontánní emise a emise stimulované.



Obr. 21. Spektra laserových diod vlnových délek 655 nm a 790nm



Obr. 22. Grafy absolutních spektrálních světelných účinností (citlivostí oka) pro fotopické a skotopické vidění s vybranými vyznačenými měřeními diodami určitých vlnových délek [9]

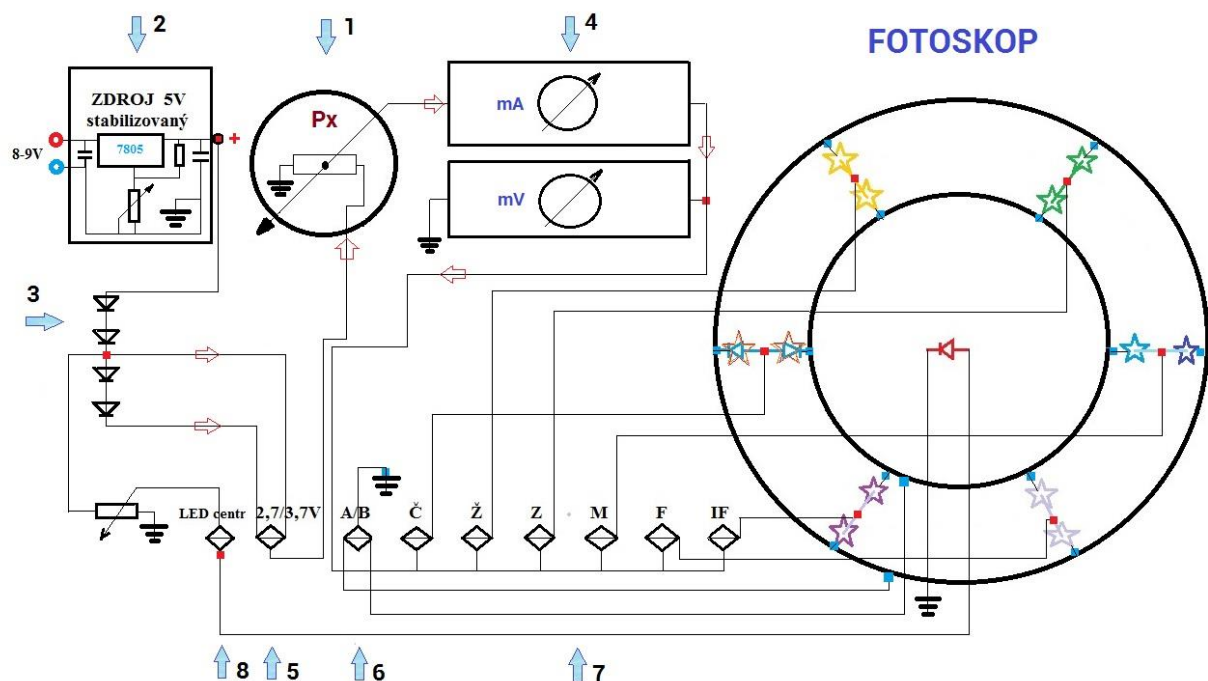
### Postup měření

Samotnému měření nejprve předcházela adaptace testované osoby na tmu. Doba strávená ve tmě činila asi 20 minut, kdy bylo dosaženo velmi nízkého prahového jasů oka. Adaptace probíhala v laserové laboratoři za úplného zatemnění. Testováno bylo vždy pravé oko, levé oko měli testované osoby překryté černou páskou z plyše. Rozsvícení diody bylo realizováno potenciometrem, kterým se otáčelo buď po směru hodinových ručiček, kdy se napětí na diodě snižovalo a dioda svítila méně, nebo proti směru hodinových ručiček, kdy se napětí na diodě zvyšovalo a začala se rozsvěcet. Seznamovací měření proběhlo na vlnové délce 673 nm, kde si testované osoby vyzkoušeli otáčení potenciometrem a rozsvícení diody. Každá testovaná osoba byla informována o tom, jak měření bude probíhat a co bude jejím úkolem. Diody byly umístěny na černém otočném kotouči ve vzdálenosti asi 6-7 cm od jeho středu. Pro každou diodu byly měřeny dvě fáze. První fáze (A) představovala detekci bílého světla periferně a druhá fáze (B) rozlišení barvy diody přímým pohledem na diodu. Kotoučem bylo otáčeno tak, aby měřená dioda ležela vždy napravo v horizontální rovině se středem kotouče, kam byl směřován pohled testované osoby. Pozorovací vzdálenost od kotouče byla určena výpočtem přes Pythagorovu větu a podobnost trojúhelníků a činila zhruba 15 cm z důvodu, aby obraz dopadal na sítnici pod úhlem cca 25° nasáňně, kde je největší hustota tyčinek. Úkolem testované osoby bylo periferně (tyčinkami) detekovat přechod ze tmy na světlo při pohledu oka

přímo vpřed. Jakmile testovaná osoba detekovala první fotony-světelný „bílý vjem“, oznámila tento okamžik, zakryla si oči a současně byla zaznamenána hodnota napětí pro „vjem bílého světla“ uvedená na multimetru. Následně byl pohled směřován už přímo na testovanou diodu (detekce prostřednictvím čípků) a potenciometrem se nadále navyšovalo napětí, dokud nebyla rozlišena vyzařovaná barva diody – barevný vjem. Jakmile došlo k rozlišení barvy, testovaná osoba opět oznámila, že poznává barvu a uvádí jakou, např. zelenou. Poté si testovaná osoba znovu zakryla oči a hodnota napětí pro „barevný vjem“ na téže diodě byla zaznamenána. Takto se měření opakovalo i pro ostatní LED diody.

### Sestava experimentu – LED-Fotoskop

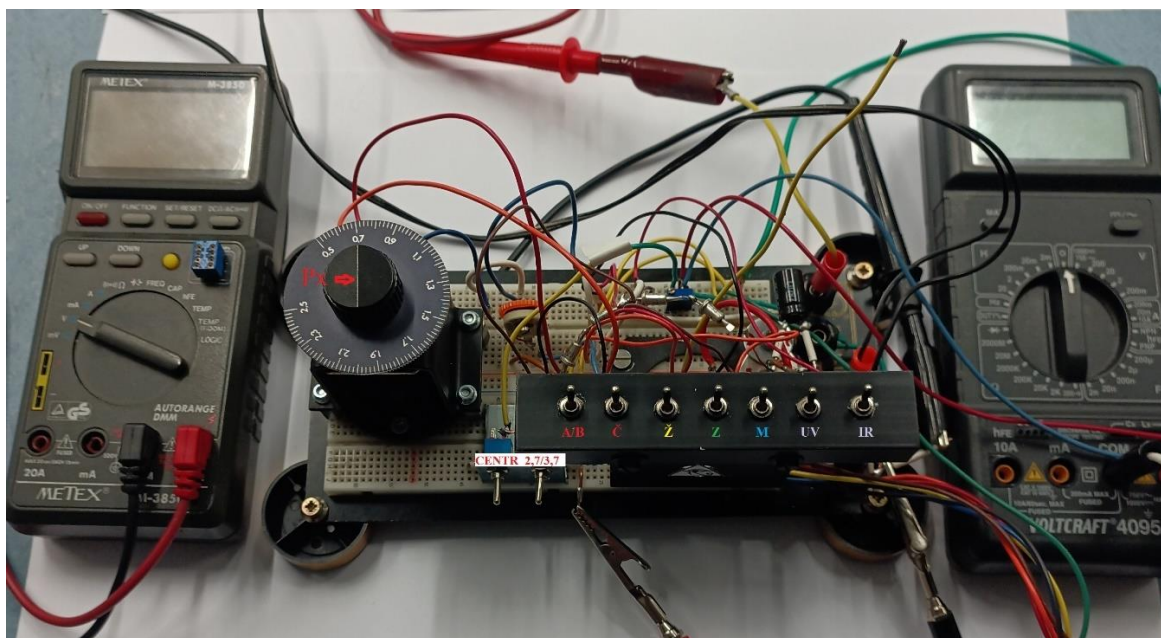
Pro experimentální měření byl sestaven elektrický obvod se zapojenými měřenými LED diodami a dalšími nezbytnými elektronickými součástkami. Průběh fotopické a skotopické funkce inspiroval k vytvoření názvu měřící aparatury. Schéma experimentu je vyobrazeno na obr. 23.



Obr. 23. schéma LED – Fotoskop

Uvedené schéma LED-fotoskopu na obr. 23. znázorňuje blokově a symbolicky zapojení aparatury pro měření citlivosti zraku při plynulém rozsvícení vybraných LED diod a laserových diod. Přesné nastavení hodnoty napětí  $U$  pro okamžik rozsvícení LED se realizuje

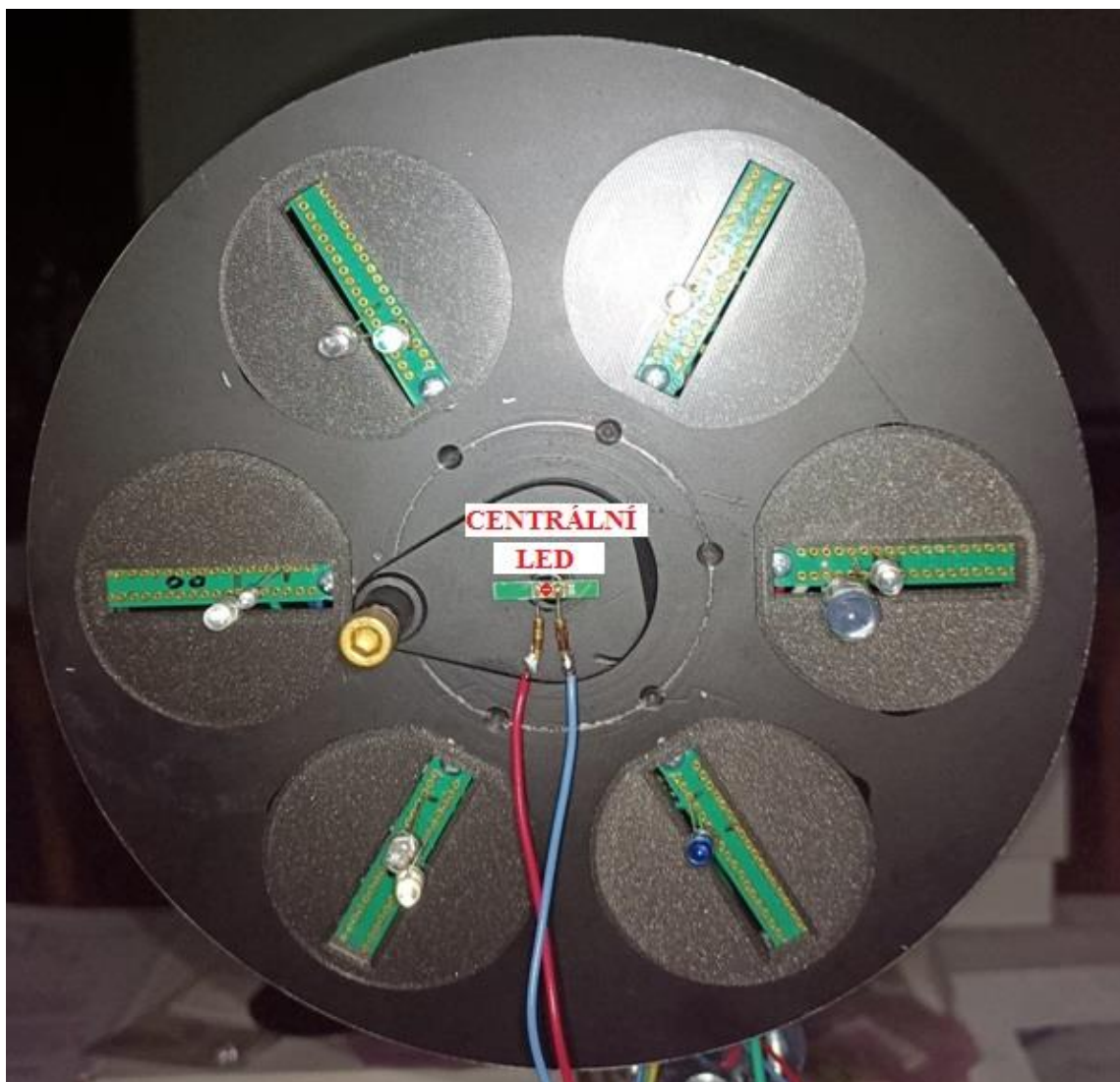
víceotáčkovým potenciometrem Px s hodnotou  $2,2k\Omega$  - 1. Přesnost a kvalita měřeného napětí je zajištěna zařazením integrovaného stabilizátoru - 2. Nastavení dvou výchozích hodnot měřících napětí (2,7 a 3,74) pro vybrané LED diody a UV LED je zajištěna úbytkem napětí na sérii diod (KZ723) - č.3. Zvolená hodnota napětí se nastavuje přepínačem (2,7/3,7) – č.5. Pro odečítání hodnot napětí (proudu) je v obvodu zapojen digitální milivoltmetr (miliampérmetr) – č.4. Vnější a vnitřní kruh měřených LED diod se určuje pozicí přepínače A/B – č.6. Sada šesti spínačů (Č,Ž,Z,M,F,IF) – č.7. umožňuje zapínat a vypínat připojení jednotlivých diod do obvodu. Spínač – č.8. umožňuje rozsvítit centrální diodu.



Obr. 24. Elektronika aparatury fotoskopu



Obr. 25. Pohled na centrální a měřenou LED diodu



Obr. 26. fotografie Fotoskopu

### Stanovení Planckovy konstanty

Pro jednotlivé LED diody byla výpočtem stanovena hodnota Planckovy konstanty  $h$  ze vzorce:  $h = e \cdot U \cdot \lambda / c$ , jenž je uveden v teoretické části v kapitole 4.3.4. Hodnota Planckovy konstanty byla stanovena také souhrnně na základě směrnice jako doplňující informace a vycházíme ze závislosti  $U = h/e \cdot f$ , kde  $f$  vyjadřuje frekvenci záření.  $h$  pak lze stanovit ze směrnice  $k$  grafu závislosti  $U$  na  $f$ ,  $U = k \cdot f$ , tj.  $h = k \cdot e$ . Směrnici určíme metodou lineární regrese aplikovanou na soubor tvořený daty všech testovaných osob, a to samostatně pro fázi A – detekce světla a fázi B – detekce barvy. Při regresi byl uvažován nenulový konstantní člen.

## Statistická analýza dat

Normalita naměřených dat byla hodnocena Shapiro-Wilkovým testem. Většina měřených dat měla normální rozdělení (s výjimkou detekce bílého světla pro vlnovou délku 511 nm, po Bonfferoniho korekci hladiny významnosti na  $0,05/16 = 0,003125$ ) byla i tato data normální. Pro sledování vlivu detekovaného světla (bílého nebo barevného) a vlnové délky na naměřenou hodnotu Planckovy konstanty proto byla využita analýza rozptylu (ANOVA) pro opakovaná měření. Následná párová porovnání byla provedena pomocí post-hoc Tukeyovým HSD testem. Statistické výpočty byly prováděny v programu STATISTICA 13.4 (TIBCO Software Inc., Palo Alto, CA, USA) na hladině významnosti  $\alpha = 0,05$ . V textu jsou též uvedeny mezní hodnoty  $p$  hladiny významnosti, při které právě dojde k zamítnutí testované hypotézy. Lineární regrese pro stanovení směrnice závislosti  $U$  na  $f$  byla provedena v programu MS Excel 365 (Microsoft Corporation, Redmond, WA, USA) pomocí funkce Regrese v doplňku Analýza dat.

### 5.2. Výsledky

Průměrné hodnoty naměřeného prahového napětí a vypočtené Planckovy konstanty spolu s příslušnými směrodatnými odchylkami jsou pro jednotlivé použité diody, resp. vlnové délky, v případě obou fází experimentu uvedeny v grafech č.1. a č.2. Hodnoty naměřeného napětí a hodnoty vypočtené Planckovy konstanty pro jednotlivé testované osoby jsou uvedeny v tabulkách 2-5.

Tabulka č. 2.

Testovaná osoba	detekce vjemu bílého světla u LED vybraných $\lambda$ (nm) - napětí $U_S$ (V) - tyčinky							
	395 nm	467 nm	511 nm	532 nm	568 nm	592 nm	632 nm	673 nm
M. B.	2,445	2,001	1,861	1,735	1,579	1,574	1,363	1,446
Š. J.	2,463	1,961	1,63	1,689	1,552	1,546	1,424	1,429
L. M.	2,464	2,039	1,86	1,758	1,638	1,595	1,427	1,425
V. P.	2,435	1,985	1,872	1,741	1,552	1,581	1,421	1,433
K. P.	2,659	2,118	1,824	1,708	1,585	1,536	1,396	1,444
M. H.	2,471	2,108	1,887	1,82	1,613	1,577	1,397	1,438
M. K.	2,557	2,036	1,891	1,725	1,577	1,555	1,421	1,465
A. K.	2,527	2,016	1,855	1,764	1,559	1,556	1,35	1,414
K. H.	2,503	2,061	1,895	1,776	1,565	1,569	1,356	1,453
F.PI.	2,372	1,938	1,786	1,727	1,474	1,568	1,381	1,414
A. D.	2,356	1,938	1,797	1,674	1,465	1,512	1,362	1,403
M. Š.	2,486	1,989	1,814	1,688	1,521	1,547	1,337	1,438
F. Pe.	2,41	1,939	1,843	1,771	1,497	1,574	1,353	1,413
průměr	2,473	2,010	1,832	1,737	1,552	1,561	1,384	1,432
SD	0,080	0,061	0,070	0,041	0,051	0,022	0,032	0,018

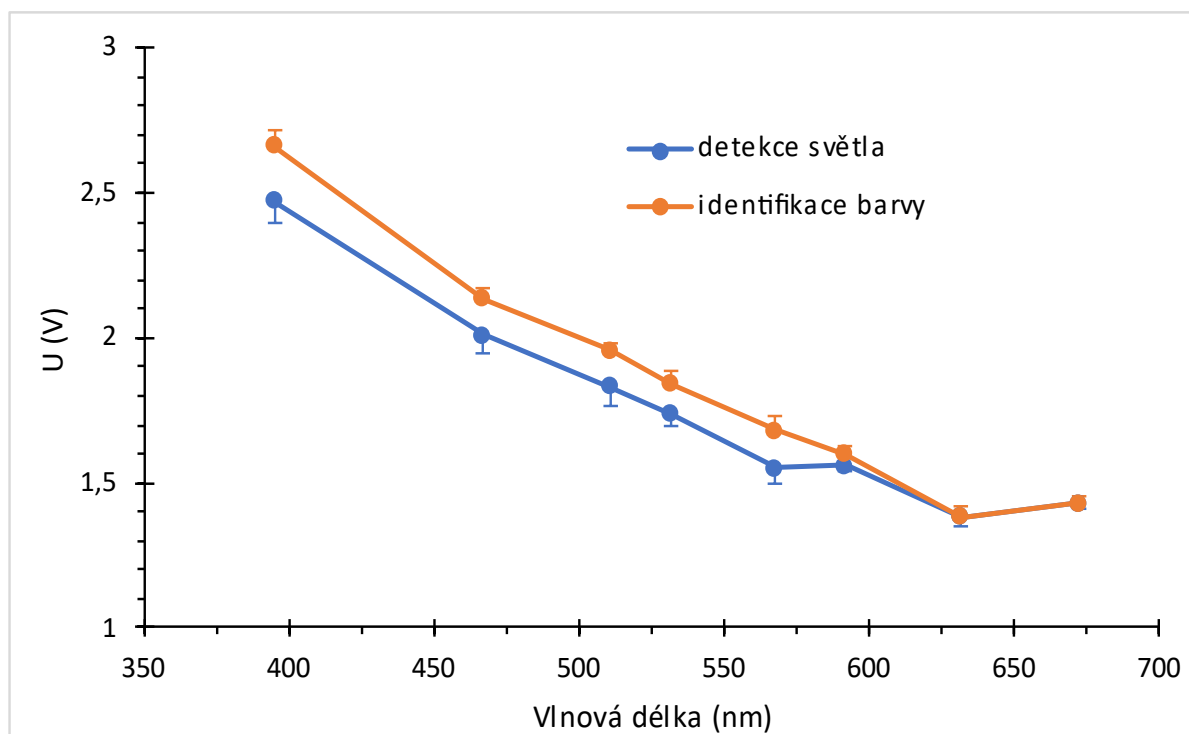
zelená = úplná shoda; světle modrá = rozdíl jedné tisíciny; žlutá – rozdíl do 3 jednotek tisícín



Tabulka č. 3.

Testovaná osoba	detekce vjemu barvy u LED vybraných $\lambda$ (nm) - napětí $U_B$ (V) - čípky							
	395 nm	467 nm	511 nm	532 nm	568 nm	592 nm	632 nm	673 nm
M. B.	2,617	2,198	1,971	1,883	1,72	1,617	1,363	1,446
Š. J.	2,619	2,141	1,952	1,813	1,65	1,619	1,424	1,429
L. M.	2,666	2,14	1,987	1,856	1,787	1,662	1,427	1,425
V. P.	2,682	2,135	1,961	1,839	1,659	1,606	1,421	1,433
K. P.	2,713	2,147	1,923	1,739	1,622	1,557	1,396	1,444
M. H.	2,605	2,162	1,968	1,886	1,714	1,625	1,397	1,438
M. K.	2,701	2,116	1,976	1,879	1,655	1,581	1,421	1,465
A. K.	2,653	2,1	1,948	1,926	1,728	1,607	1,35	1,414
K. H.	2,722	2,188	1,985	1,847	1,642	1,591	1,356	1,453
F.PI.	2,759	2,134	1,954	1,821	1,671	1,571	1,381	1,414
A. D.	2,557	2,05	1,941	1,771	1,653	1,594	1,362	1,403
M. Š.	2,627	2,116	1,952	1,825	1,651	1,584	1,337	1,438
F. Pe.	2,686	2,113	1,955	1,821	1,722	1,592	1,353	1,413
průměr	2,662	2,134	1,959	1,839	1,683	1,600	1,384	1,432
SD	0,056	0,038	0,018	0,050	0,047	0,027	0,032	0,018

zelená = úplná shoda; světle modrá = rozdíl jedné tisícin; žlutá – rozdíl do 3 jednotek tisícín



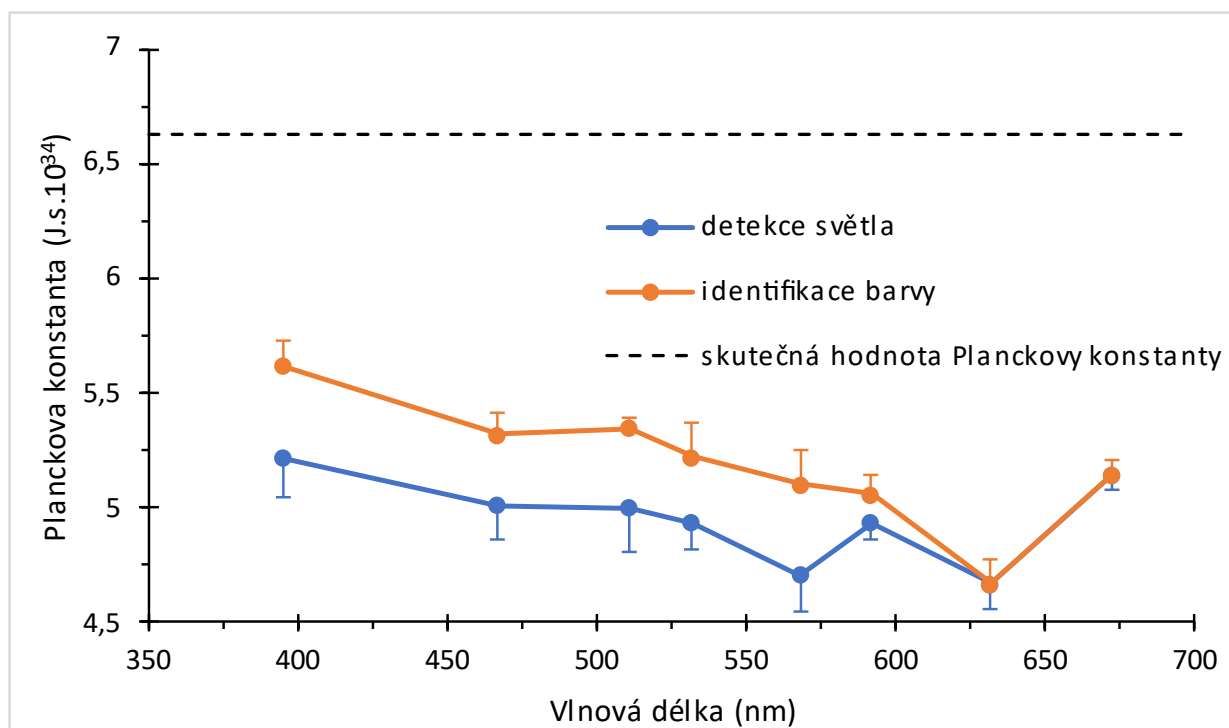
Graf č. 1. Znárodnuje průměrné hodnoty prahového napětí (vyznačené kolečky) z tab. 2. a 3. naměřené při subjektivní detekci vjemu bílého světla (modře) a následném vjemu barvy (oranžově) vynesené v závislosti na dominantní vlnové délce diod. Chybové úsečky reprezentují směrodatné odchylky.

Tabulka č. 4.

Testovaná osoba	Detekce vjemu bílého světla pro LED vybraných $\lambda$ (nm) - výpočet Planckovy konstanty ( $\times 10^{-34}$ J.s) z hodnot napětí $U_S$ (V)							
	395 nm	467 nm	511 nm	532 nm	568nm	592 nm	632 nm	673 nm
M. B.	5,157	4,990	5,078	4,929	4,789	4,976	4,600	5,197
Š. J.	5,195	4,890	4,448	4,798	4,707	4,887	4,806	5,136
L. M.	5,197	5,085	5,075	4,994	4,968	5,042	4,816	5,121
V. P.	5,136	4,950	5,108	4,946	4,707	4,998	4,796	5,150
K. P.	5,609	5,282	4,977	4,852	4,807	4,856	4,711	5,189
M. H.	5,212	5,257	5,149	5,170	4,892	4,985	4,715	5,168
M. K.	5,393	5,077	5,160	4,901	4,783	4,916	4,796	5,265
A. K.	5,330	5,027	5,062	5,011	4,729	4,919	4,556	5,082
K. H.	5,280	5,140	5,171	5,045	4,747	4,960	4,576	5,222
F.PI.	5,003	4,833	4,874	4,906	4,471	4,957	4,661	5,082
A. D.	4,970	4,833	4,904	4,756	4,444	4,780	4,597	5,042
M. Š.	5,244	4,960	4,950	4,795	4,613	4,891	4,512	5,168
F. Pe.	5,083	4,835	5,029	5,031	4,541	4,976	4,566	5,078
průměr	5,227	5,027	4,996	4,925	4,722	4,931	4,678	5,152
SD	0,161	0,146	0,184	0,113	0,149	0,067	0,105	0,062

Tabulka č. 5.

Testovaná osoba	Detekce vjemu barvy pro LED vybraných $\lambda$ (nm) - výpočet Planckovy konstanty ( $\times 10^{-34}$ J.s) z hodnot napětí $U_B$ (V)							
	395 nm	467 nm	511 nm	532 nm	568 nm	592 nm	632 nm	673 nm
M. B.	5,520	5,481	5,378	5,349	5,217	5,112	4,600	5,197
Š. J.	5,524	5,339	5,327	5,151	5,005	5,118	4,806	5,136
L. M.	5,623	5,337	5,422	5,273	5,420	5,254	4,816	5,121
V. P.	5,657	5,324	5,351	5,224	5,032	5,077	4,796	5,150
K. P.	5,723	5,354	5,247	4,940	4,920	4,922	4,711	5,189
M. H.	5,495	5,392	5,370	5,358	5,199	5,137	4,715	5,168
M. K.	5,697	5,277	5,392	5,338	5,020	4,998	4,796	5,265
A. K.	5,596	5,237	5,316	5,472	5,241	5,080	4,556	5,082
K. H.	5,742	5,456	5,417	5,247	4,980	5,030	4,576	5,222
F.PI.	5,820	5,322	5,332	5,173	5,068	4,966	4,661	5,082
A. D.	5,393	5,112	5,296	5,031	5,014	5,039	4,597	5,042
M. Š.	5,541	5,277	5,327	5,185	5,008	5,007	4,512	5,168
F. Pe.	5,666	5,269	5,335	5,173	5,223	5,033	4,566	5,078
průměr	5,611	5,326	5,348	5,228	5,094	5,062	4,678	5,152
SD	0,113	0,091	0,047	0,136	0,137	0,082	0,105	0,062



Graf č. 2. Závislost hodnoty Planckovy konstanty vypočtené z hodnot napětí na základě subjektivního vyhodnocení vjemu bílého světla (modře) a barevného vjemu (oranžově) na vlnové délce. Kolečka představují průměrné hodnoty z tab. 4. a 5., chybové úsečky reprezentují směrodatné odchylky. Přerušovaná čára vymezuje skutečnou hodnotu Planckovy konstanty.

Z grafů je vidět, že prahové napětí (měřené okem) i stanovené hodnoty Planckovy konstanty jsou zřetelně vyšší v případě měření na základě detekce rozlišení barvy světla ( fáze B) než u měření na základě detekce světla ( fáze A) vyjma diod s vlnovou délkou 592 nm a vyšších, kde se prakticky neliší. Napětí s vlnovou délkou s výjimkou oblasti kolem 600 nm klesá, u vypočtených hodnot Planckovy konstanty není tento pokles tak výrazný. Nejvyšší hodnoty Planckovy konstanty byly v případě detekce vjemu bílého světla i barvy naměřeny pro nejkratší vlnovou délku 395 nm, přičemž data pro obě fáze měření zde dosahují největšího rozdílu. Nejnižší hodnoty byly stanoveny pro 632 nm, kde obě křivky (pro obě fáze měření) splývají. Tyto výsledky potvrdila i provedená statistická analýza, která prokázala signifikantní vliv fáze experimentu (tj. zda bylo pouze periferně detekováno světlo nebo zda byla centrálně stanovena i jeho barva,  $p < 0,0001$ ) na hodnotu Planckovy konstanty. Dále byl potvrzen vliv vlnové délky ( $p < 0,0001$ ). Post-hoc test ukázal, že Planckova konstanta určená pro krátkovlnnou diodu 395 nm se signifikantně liší od všech ostatních (vždy  $p = 0,000119$ ), hodnota pro diodu o 632 nm se také liší od všech ostatních (vždy  $p = 0,000119$ ). Statistická analýza dále prokázala významný vliv interakce fáze experimentu s vlnovou délkou ( $p <$

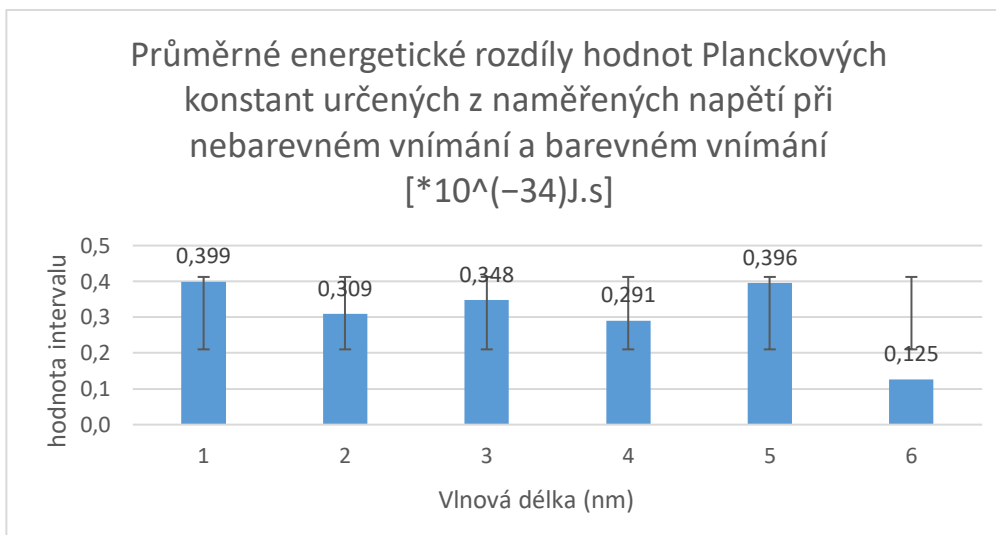
0,0001), tj. při měření založeném na vjemu bílého světla při přímém pohledu, je závislost hodnot na vlnové délce jiná než při měření založeném na periferní detekci vjemu bílého světla. Post-hoc testy potvrdily, že křivka pro detekci bílého světla se významně liší od křivky pro vjem barevného světla pro vlnové délky od 395 nm po 592 nm (vždy  $p < 0,012$ ), pro zbývající dvě vlnové délky (632 nm a 673 nm) rozdíly nejsou signifikantní ( $p > 0,9999$ ).

Všechny hodnoty Planckovy konstanty, stanovené pro jednotlivé diody, jsou nižší než skutečná Planckova konstanta. V průměru nejvíce se liší hodnoty při vlnové délce 632 nm v obou fázích experimentu, druhý největší rozdíl byl zjištěn při vlnové délce 568 nm při detekci světla. Naopak nejbližší skutečné hodnotě byl údaj pro 395 nm při identifikaci barvy. Planckova konstanta, stanovená na základě směrnice regresní přímky proložené všemi daty v jednotlivých fázích, byla  $5,65 \times 10^{-34}$  J.s s 95% konfidenčním intervalem  $(5,42; 5,89) \times 10^{-34}$  J.s pro měření  $U$  na základě detekce světla a  $6,62 \times 10^{-34}$  J.s s 95 % konfidenčním intervalem  $(6,43; 6,81) \times 10^{-34}$  J.s pro měření  $U$  na základě identifikace barvy diody. Hodnota, určená na základě vjemu barevného světla, se na hladině významnosti  $\alpha = 0,05$  významně neliší od skutečné hodnoty konstanty.

Jako velice pozoruhodný fakt stojí za zmínku, že se několik testovaných osob shoduje na hodnotách napětí při detekci světla a rozpoznání barvy u různých LED diod v řádu setin, a dokonce někteří i v řádu tisícín a tím i ve výpočtu Planckovy konstanty. Tyto hodnoty napětí jsou barevně vyznačeny v tabulkách č. 2. a 3.

Na různých vlnových délkách byly pozorovány nepředpokládané vizuální efekty při počátečním barevném vjemu, které předcházely správné identifikaci. Souhrn subjektivních barevných vjemů jednotlivých testovaných osob při přímém vidění je uveden v tab. č. 6. Nejvýraznější rozdíly vjemu oproti předpokládané barvě, které nelze vysvětlit drobnými odchylkami v subjektivním vnímání a popisu barev, jsou patrné u diody s vlnovou délkou 395 nm, které odpovídá fialová barva. Zde 5 testovaných osob vidělo nejprve jiné barevné vjemy, a až následně vjem fialové barvy, přičemž vnímané vjemy nebyly u těchto osob totožné, ale podobaly se. V jednom případě byla vnímána nejprve žlutá barva, poté oranžovo-zelená, v dalším případě byl prvně zaregistrován prvně nádech zelené, poté vjem žluté barvy nebo jen vjem zelenobílé. Další dva testování vnímali nejdříve buď oranžovou nebo červenou a žltorůžovou. U zbylých 8 osob byla hlášena jako první barva přímo fialová.

Z vzájemného odečtu hodnot Planckových konstant vypočtených pro vjem bílého světla a pro vjem barvy jsme dostali velikosti energetických intervalů světelného záření pro různé LED u jednotlivých testovaných osob, zobrazených v grafu č. 3.



Graf. č. 3. Průměrné energetické rozdíly- intervaly vypočtených hodnot Planckových konstant určených z naměřených napětí při nebarevném vnímání (bílém vjemu) a barevném vnímáním. Chybové úsečky znázorňují směrodatné odchylky.

Měření infračervené diody probíhalo za využití centrální diody tmavě červené barvy a probíhalo pouze na čtyřech testovaných osobách, které se účastnili i předchozího statistického měření na ostatních LED ve viditelném spektru. Všechny testované osoby podaly informaci o tom, že nejprve při fixaci na centrální tmavě červenou diodu viděli periferně „bílou mlhu“, a poté co zaměřili pohled už přímo na infračervenou diodu uviděli hned „tmavě červenou mlhu“. Naměřené hodnoty napětí a z nich stanovené hodnoty Planckovy konstanty pro infračervenou LED při detekce světla a identifikaci barvy zrakového vjemu jsou uvedeny v tabulce č. 7.

Tab. č. 7.

figurant	Infra 835 nm - napětí U(V)		Infra 835 nm - stanovené hodnoty Planckovy konst. (x 10 <sup>-34</sup> J.s)	
	detekce vjemu bílého světla $U_S$ (V)	detekce vjemu barvy $U_B$ (V)	Detekce vjemu bílého světla	Detekce vjemu barvy
M.Š.	1,174	1,174	5,235E-34	5,235E-34
F.Pe.	1,193	1,193	5,319E-34	5,319E-34
F.Pl.	1,189	1,189	5,302E-34	5,302E-34
A.D.	1,194	1,194	5,324E-34	5,324E-34

U měření laserových diod (LD) 655 nm a 790 nm bylo rovněž využito centrální diody a měřily se pouze u dvou testovaných osob, které se zároveň účastnili předešlých měření s LED diodami. U obou testovaných při fixaci oka na centrální diodu byl periferně detekován vjem „bílého světla“, u jedné z testovaných osob se to dokonce chytalo zlatavý nádech u LD 655 nm.

Při následném přímém pohledu na LD 655 nm i 790 nm, byla už opět vidět hned červená barva o obou osob. Naměřené hodnoty napětí a z nich stanovené hodnoty Planckovy konstanty pro LD při detekce světla a identifikaci barvy zřakového vjemu jsou uvedeny v tabulce č. 8.

Tab. č. 8.

figurant	LD 655 nm - napětí $U_S(V)$ a $U_B(V)$		LD 655 nm - Planckova konst. ( $\times 10^{-34}J.s$ )		LD 790 nm - napětí $U_S(V)$ a $U_B(V)$		LD 790 nm - Planckova konst. ( $\times 10^{-34}J.s$ )	
	bílé světlo	barva	bílé světlo	barva	bílé světlo	barva	bílé světlo	barva
M.Š.	1,480	1,480	5,177E-34	5,177E-34	1,419	1,419	5,986E-34	5,986E-34
F.Pe.	1,533	1,543	5,362E-34	5,397E-34	1,439	1,439	6,071E-34	6,071E-34

Tabulka č. 6. Subjektivní barevné vjemy u jednotlivých diod vnímané testovanými osobami při přímém pohledu na diodu

	395 nm fialová	467 nm modrá	511 nm zelená	532 nm zelená	568 nm žlutozelená	592 nm oranžová	632 nm červená	673 nm červená
F.Pl.	1. žlutá 2. oranžovo-zelená 3. fialová	1. žlutozelená 2. modrá	zelená	zelená	1. do zelené 2. žlutozelená	oranžová	červená	červená
A.D.	1. zelená mlha 2. do žluta 3. fialový nádech	modrá	zelená	zelená	1. bílo-žlutá 2. žlutá	1. žlutá 2. oranžová	červená	červená
Š.J.	1. oranžová 2. fialová	modrá	zelená	zelená	žlutozelená	oranžová	červená	červená
L.M.	fialová	modrá	tyrkys	1. do modra 2. zelená	žlutozelená	oranžová	červená	červená
V.P.	1. červená 2. žluto-růžová 3. fialová	modrá	zelená	tyrkys	žlutozelená	1. do červena 2. oranžová	červená	červená
A.K.	1. zelenobílá 2. fialová	modrá	zelená	zelená	žlutozelená	oranžová	červená	červená
M.H.	1. nádech fialové	modrá	zelená	zelená	žlutá	1. do červena 2. oranžová	červená	červená
M.Š.	fialová	světle modrá	zelené	1. do modra 2. zelená	žlutozelená	oranžová	červená	červená
M.B.	fialová	světle modrá	zelená	zelená	žlutý nádech	1. do červena 2. oranžová	červená	červená
K.H.	fialová	modrá	zelená	zelená	žlutá	oranžová	červená	červená
M.K.	fialová	modrá	zelená	zelená	žlutozelená	oranžová	červená	červená
K.P.	fialová	modrá	zelená	zelená	žlutozelená	oranžová	červená	červená
F.Pe.	fialová?	modrá	zelená	zelená	1. zeleno-bílá 2. žlutozelená	žlutooranž.	červená	červená

### 5.3. Diskuze

Hodnoty Planckovy konstanty, stanovené na základě detekce nebarevného světla pro jednotlivé měřené diody, jsou vyjma oblasti dlouhých vlnových délek nižší než hodnoty stanovené na základě identifikace barvy, pro dlouhé vlnové délky se tyto hodnoty shodují. Velikost vypočtené Planckovy konstanty v obou případech měření barevného a nebarevného vjemu nejprve s narůstající vlnovou délkou mírně klesá, u dlouhovlnných délek naopak opět mírně roste. Při detekci nebarevného světla je pokles hodnoty Planckovy konstanty výraznější než vyhodnocení barevného světla.

Průběh těchto křivek v grafu 2. lze částečně vysvětlit na základě průběhu křivek citlivosti jednotlivých typů fotoreceptorů (psychofyzikální funkce  $K(\lambda)$ ) a jejich distribuci na sítnici. Při periferním pozorování se do procesu vidění zapojují tyčinky, jejichž hustota v periférii je vyšší, zejména při excentricitě 20-25° od fovey. Tyčinky disponují většími receptivními poli a dávají vzniknout černobílému, resp. bílému vjemu, s možností zesílení signálu, který může být přiváděn z mnoha tyčinek jejichž receptivní pole se vzájemně překrývají. Při centrálním vidění fungují čípky, které mají menší receptivní pole a signál se nezesiluje, napojení je většinou jednoho čípku na jednu bipolární a gangliovou buňku. Čípky zprostředkovávají barevný vjem.

V oblasti vlnových délek, kde mají tyčinky vyšší absolutní citlivost, by měly reagovat dříve tyčinky při periferním vidění než čípky při centrálním vidění, tj. při detekci světla (tyčinkami) by mělo být stanoveno nižší  $U$  (a tím nižší Planckova konstanta) než při identifikaci barvy. Toto tvrzení však odpovídá průběhu grafů jen částečně – zatímco tyčinky vykazují vyšší citlivost i nad 555 nm (což je hodnota maxima fotopické funkce - čípky) při hodnotě 568 nm a 592 nm, tedy naměřené  $U$  a Planckova konstanta byly nižší při detekci světla ještě pro 592 nm. To může být způsobeno větší hustotou tyčinek a integrací signálu v rámci jejich rozsáhlých receptivních polí v periférii, kdy může docházet k zesílení signálu, oproti malým receptivním polím čípků. S ohledem na maxima citlivosti tyčinek a čípků bychom dále mohli předpokládat, že nejmenší naměřená hodnota Planckovy konstanty bude právě v okolí těchto maxim. Tento předpoklad se však nepotvrdil, jak ve fázi s detekcí světla, tak při identifikaci barvy byla ještě nižší hodnota Planckovy konstanty stanovena pro vyšší vlnové délky a nejnižší hodnota byla stanovena pro vlnovou délku 632 nm. Tato skutečnost může být způsobena pravděpodobně jinou, vyšší světelnou účinností [ $\text{lm/W}$ ] LED diody 632 nm oproti ostatním LED. Při detekci světla, kde podle skotopické funkce je maximum citlivosti tyčinek pro vlnovou délku 507 nm

byla vypočtena vyšší hodnota Planckovy konstanty pouze u vlnových délek 395 nm, 467 nm a 673 nm vůči vlnové délce 511 nm, která se v našem případě právě blíží maximu citlivosti skotopické funkce (507 nm). U zbylých měřených vlnových délek 632 nm 592 nm, 568 nm a 532 nm je vypočtená hodnota Planckovy konstanty nižší, to znamená, že oko bylo na tyto vlnové délky citlivější než na vlnovou délku 511 nm, což úplně neodpovídá skotopické křivce citlivosti oka. Mohlo by to být ovlivněno samotnou charakteristikou LED 511 nm nebo i ostatních měřených diod, kde neznáme přesné chemické složení materiálu P-N přechodu, technologii výroby nebo její účinnost. Pro identifikaci barvy, kde podle fotopické funkce je maximum citlivosti čípků pro vlnovou délku 555 nm, (v našem případě je nejbližší maximum vlnová délka 568nm), byla stanovena vyšší Planckova konstanta téměř u všech vlnových délek vyjma 592 nm (oranžová) a 632 nm (červená). Tento popis převážně souhlasí se zmíněnou křivkou citlivosti, ale otázkou zůstává, proč u těchto vlnových délek je stanovena hodnota nižší. Může to opět souviset s neznámou charakteristikou vlastností LED diod. S dalším poklesem citlivosti až k hranicích viditelného spektra (395 nm a 673nm) však již Planckova konstanta roste a důvodem je zhoršení citlivosti fotoreceptorů.

Naměřené a vypočtené hodnoty Planckovy konstanty jsou nižší než skutečná hodnota Planckovy konstanty uváděné v odborné literatuře u každé měřené LED diody jak pro detekci vjemu bílého světla, tak identifikaci barevného vjemu. Tento fenomén může být vysvětlen velkou šířkou spektra diody, kdy může být za nízkých intenzit záření vnímána nejprve jiná než dominantní vlnová délka, tudíž může docházet k nepřesnostem. Určitý podíl na tom by mohl mít i v literatuře zmiňovaný tunelový jev přispívající ke generování fotonů při počátku rozsvěcení diod. Tento jev se může pravděpodobněji vyskytovat u dlouhovlnných diod, kdy šířka zakázaného pásu je velmi úzká. Proto některé elektrony, ač nemají dostatek energie k překonání potenciálové bariéry P-N přechodu, mohou protunelovat skrze bariéru, rekombinovat a vyzářit fotony o určité vlnové délce, které je oko schopno detekovat a ve vizuálním centru mozku dojde k uvědomění si zrakového vjemu. Také například u UV LED cca 396 nm a modrých LED se dá dohledat v literatuře popis technologií, kdy se záměrně příměsemi v polovodiči podporuje příspěvek „tunelového efektu“ ke zvýšení světelné účinnosti diod. Jistou roli může také sehrát celková charakteristika diody, například příměsi ovlivňující chování diody nebo způsoby výroby LED. [98][99][100]

V okamžiku detekce barevného vjemu se vypočtené hodnoty Planckovy konstanty lépe shodují s hodnotou konstanty uváděnou v literatuře (tzn. při hodnotách zjištěných regresí není signifikantní rozdíl). Díky vjemu barvy je nyní jistota, že pozorujeme na odpovídající vlnové délce. O tom, že měření může být ovlivněno právě přítomností parazitního světla jiných



vlnových délek, též mohou svědčit některé pozorované barevné jevy v průběhu měření, viz text níže.

Zrakový vjem se dal popsat buď jako „bílé nebarevné světlo“ nebo se jevil jako barevný. V periférii sítnice je mnohonásobně menší množství čípků, proto je vnímáno při periferním pohledu (při fixaci oka na centrální diodu) převážně jen bílé světlo. Při přímém pohledu (při fixaci na právě měřenou diodu) mimo dlouhovlnných (červených) diod bylo vidět nejprve bílé světlo (čípky nereagovaly), reagovaly jen tyčinky (byť se v okolí centra téměř nevyskytují – testované osoby při přímém pohledu udávali pokles intenzity bílého světla), při vyšších intenzitách světla (při vyšší hodnotě napětí na diodě) začaly reagovat čípky a byl zaregistrován první vjem barvy. U dlouhovlnných diod, tedy na dlouhé vlnové délky dle křivek absolutní citlivosti oka, jsou tyčinky méně citlivé, proto došlo k periferní detekci světla až u jasů, kdy již reagovaly čípky, a proto při následném přímém pohledu byla hned vidět barva. V periferním pohledu však patrná nebyla, neboť hustota čípků reagujících na dlouhovlnné (červené) světlo s excentricitou prudce klesá (viz. distribuce fotoreceptorů na sítnici). I při otestování této situace při vyšší intenzitě světla se nepodařilo periferně rozlišit barvu (stále jasněji bylo vidět bílé světlo). Zřejmě došlo k saturaci tyčinek a potlačení vjemu čípků, a bylo to vnímáno jako periferní oslnění. Částečně to může být vysvětleno i tím, že zorné pole pro červenou barvu má menší rozsah a na jeho okrajích se nachází méně čípků citlivých na tuto vlnovou délku. Pozorované barevné efekty u fialové diody, viz. tab. č. 6. (bílé světlo postupně přešlo na směs zelené nebo žluté, popř. i červené, poté na žluté či oranžové) mohou být způsobeny různými příměsemi v polovodičovém materiálu LED a jejich poměry, které ovlivňují (byť minimálně) spektrální složení, oko je však zřejmě natolik citlivé, že zachytí i tyto drobné změny při nízké intenzitě záření, než nastoupí vlastní, pro danou měřenou diodu charakteristická, barva světla. Také to může být výsledek příspěvku rekombinace negativních a pozitivních nosičů náboje o energiích menších, než je šířka zakázaného pásu dané LED, a proto mohou být patrné i jiné nižší vlnové délky - barva zelená, žlutá, oranžová, červená.

Do statistických dat nebylo zařazeno měření infračervené diody, protože byla testována pouze na čtyřech testovaných osobách. Infračervená LED vlnové délky 835 nm byla vybrána pro měření z důvodu zájmu zjistit, zda tato vlnová délka, zjevně mimo oblast viditelné záření dokáže vyvolat zrakový vjem. U všech čtyř testovaných osob se prokázalo, že infračervené světlo v oblasti spektra 835 nm vyvolalo zrakovou odezvu „bílé mlhy“ periferním pozorováním a hned poté „červené mlhy“ při následném přímém pozorování. I když se infračervené záření neřadí do viditelného spektra (v literatuře uváděné od cca 380 nm do 790 nm) tak tento experiment prokázal, že lidské oko je schopné jej vidět, tedy hranice viditelného spektra jsou u

různých jedinců variabilní a individuální. Může záležet na mnoha dalších faktorech a jejich interakcích, které toto mohou a nemusí ovlivňovat.

Dalo by se předpokládat, že technologie konstrukce laserových diod umožní získat měřením přesnější hodnoty Planckovy konstanty, blíží se teoretické hodnotě uváděné v odborné literatuře. Měření a testování citlivosti pomocí laserových diod bylo realizováno za účelem zjistit, zda lze takto dosáhnout větší přesnosti v měření. Laserová generace u vybraných laserových diod ovšem byla nastavená tak, že jsme se pohybovali v pracovní oblasti LD pod takzvaným prahem, tedy v režimu spontánní emise, kdy šířka spektra vyzařovaného záření je obdobná jako u LED. Z pochopitelných důvodů jsme nevyužívali režim stimulované emise. Výsledkem bylo, že naměřené a vypočtené hodnoty u LD a LED vyšly podobné. O tom svědčí i výpočet stanovené hodnoty Planckovy konstanty pro LD 655 nm, kdy vyšla velmi podobně hodnotě pro nejbližší vlnovou délku příslušné LED 673 nm z tabulky č.8. Závěrem je zjištěno, že použití laserových diod 655 nm a 790 nm nevedlo k přesnějším výsledkům. Tento závěr - srovnání měření s LD a LED není možné považovat za zcela relevantní, jelikož byly porovnány pouze výsledky měření u dvou osob.

## Závěr

Spektrální citlivost lidského oka je schopnost oka různě vyhodnocovat stejný zářivý výkon odlišných vlnových délek ve viditelném spektru. Tento účinek záření na zrak vystihují křivky poměrné a absolutní spektrální světelné účinnosti záření neboli křivky poměrné a absolutní spektrální citlivosti oka. Pro popis a určení citlivosti se využívá fotometrických veličin. V oku se nachází dva druhy fotocitlivých elementů – čípky a tyčinky, z nichž každý pracuje při jiných hodnotách jasu a vyhodnocuje jiné informace. Mnohem citlivější na světlo jsou ovšem tyčinky, a to za skotopických podmínek. K dosažení maximální citlivosti tyčinek, tzv. jasového prahu, je nezbytná určitá doba adaptace ve tmě, pro obnovení zásob fotonopigmentu, který je důležitý pro jejich optimální činnost. Při vyšších jasech (mezopické, fotopické vidění) začínají fungovat také čípky zajišťující barevné vidění. Pro analýzu spektrální citlivosti zraku byly využity LED diody různých vlnových délek, které byly rozsvěcovány ve tmě, kde byla testovaná osoba po určitou dobu adaptována a zaznamenány dvě hodnoty napětí v okamžiku vzniku prvního zrakového vjemu „bílého světla“ a následně vjemu barvy. Z těchto hodnot byly poté stanoveny hodnoty Planckovy konstanty, jež byly zaneseny do grafu v závislosti na vlnové délce.

Z výsledků provedených měření můžeme potvrdit, že lidské oko je spektrálně natolik citlivé, že je schopno detekovat tak malé množství světelné energie, ze kterých lze výpočtem v řádech přibližně odhadnout velikost Planckovy konstanty. Také jsme z velké části dokázali, že je u diod s vlnovými délkami odpovídajícími vyšší absolutní citlivosti tyčinek, podle funkce  $K'(\lambda)$ , nejprve vnímáno periferně „bílé světlo“, taktéž i při přímém pohledu na měřenou diodu s poklesem intenzity, a až poté se zvýšením napětí na diodě stále při přímém pohledu došlo ke vzniku barevného vjemu. U diod 568 nm a 592 nm, kde už by měly mít čípky vyšší absolutní citlivost, jsme zjistili, že stále jako první převládá zrakový vjem bílého světla (tyčinek) při přímém pohledu. U červených diod 632 nm a 673 nm se nám potvrdila větší citlivost čípků dle fotopické křivky citlivosti oka  $K(\lambda)$ , tedy při přímém pohledu byl rovnou patrný barevný vjem. Rovněž překvapivé bylo vnímání různých jiných barevných vjemů, zejména pro krátkovlnnou UV diodu, před nástupem charakteristické barvy pro tuto LED. Dále jsme se také z několika měření zjistili zajímavý poznatek, že oko je schopné za určitých podmínek vidět i infračervené záření o vlnové délce 835 nm, mimo oblast viditelného spektra uváděnou v literaturách. Pozoruhodnou informací je rovněž velikosti energetických intervalů, který značí rozdíl vypočtených hodnot Planckových konstant při detekci bílého světla a při rozpoznání barvy pro

odlišné vlnové délky. Velmi zajímavá byla skutečnost, že u jednotlivých testovaných osob byl tento rozdíl pro různé vlnové délky odlišný, ale v průměru byl energetický interval hodnot Planckovy konstanty stanovené pro detekci vjemu bílého světla a vjemu barvy víceméně podobný u většiny vlnových délek, vyjma oranžové LED 592 nm. Zajímavým výsledkem je rovněž zjištění, že velikosti stanovených hodnot Planckovy konstanty jsou dokonce menší než velikost hodnoty Planckovy konstanty  $6,626 \times 10^{-34}$  J.s zmiňované v odborné literatuře, a to v průměru pro všechny vybrané vlnové délky. Závěrem lze říci, že mezi dvěma kvalitativně odlišnými fyziologickými procesy bílého vjemu a barevného vjemu je velmi malý energetický rozdíl (určený napětím) opakovatelný a prokázáný u většiny měření a vede ke konstatování, že lidský zrak dovede odlišit malý energetický interval, který odpovídá zlomku hodnoty Planckovy konstanty. S ohledem na povahu tohoto tématu by bylo dobré provést další výzkum zaměřený na oblast spektrální citlivosti zraku. Také by bylo zajímavé do budoucna prozkoumat citlivost oka (tyčinek a čípků) v části spektra, kde se protínají ftopické a skotopické křivky - na 555 nm.

## Zdroje literatury, obrázků a tabulek

- [1] MOLHANEC, Martin, Vojtěch MORNSTEIN a Lenka FORÝTKOVÁ. Přednášky z lékařské biofyziky. *Architecture*. 2009.
- [2] *Физические характеристики восприятия света* [online]. 2023. Dostupné z: <https://bstspb.ru/fizicheskiye-kharakteristiki-vostryatiya-sveta/>
- [3] Физические характеристики восприятия света. *Свет и освещение* [online]. 2023. Dostupné z: <https://texpm.ru/fizicheskiye-kharakteristiki-vostryatiya-sveta/>
- [4] GOMES, Jonas, Luiz VELHO a Mario COSTA SOUSA. Radiometry and Photometry. *Computer Graphics* [online]. 2020, 489–508. Dostupné z: doi:10.1201/b11857-23
- [5] Fotometrie a radiometrie [online]. nedatováno, (3), 1–11. Dostupné z: [http://fu.mff.cuni.cz/biomolecules/media/files/courses/Fotometrie\\_a\\_radiometrie.pdf](http://fu.mff.cuni.cz/biomolecules/media/files/courses/Fotometrie_a_radiometrie.pdf)
- [6] O'KANEOVÁ, Mary a Freddie WARD. *Radiometrie, Fotometrie, Radiometrie vs fotometrie, Fotometrické jednotky* [online]. Dostupné z: [https://www.ossila.com/pages/radiometry-and-photometry?fbclid=IwAR0hzfhSXvVcsXg7CTNgBS3H4MxdQhU5nOTBhuGaU\\_h1JhpXLo\\_56o7V604](https://www.ossila.com/pages/radiometry-and-photometry?fbclid=IwAR0hzfhSXvVcsXg7CTNgBS3H4MxdQhU5nOTBhuGaU_h1JhpXLo_56o7V604)
- [7] OHNO, Yoshihiro. *Radiometry and Photometry: Review for Vision Optics* [online]. B.m.: OSA Handbook of Optics Book Chapter (14), OSA Handbook of Optics, Volume III Visual Optics and Vision, 2000. Dostupné z: [https://www.rp-photonics.com/luminosity\\_functions.html](https://www.rp-photonics.com/luminosity_functions.html)
- [8] MIŠKAŘÍK, Stanislav. *Moderní zdroje světla*. 1. vyd. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1979. ISBN 04-509-79.
- [9] LAI, Y. *The Light Measurement Handbook* [online]. 2009. ISBN 0965835693. Dostupné z: <http://www.intl-lighttech.com/sites/default/files/pdf/handbook/ILT-Light-Measurement-Handbook.pdf>
- [10] QUINCEY, Paul. Solid angles in perspective. *Physics Education* [online]. 2020, **55**(5). ISSN 13616552. Dostupné z: doi:10.1088/1361-6552/ab9323
- [11] SAHA, Shibu, Vijeta JANGRA, V K JAISWAL a Parag SHARMA. Realization of

- Candela. In: Dinesh K ASWAL, Sanjay YADAV, Toshiyuki TAKATSUJI, Prem RACHAKONDA a Harish KUMAR, ed. *Handbook of Metrology and Applications* [online]. Singapore: Springer Nature Singapore, 2022, s. 1–30. ISBN 978-981-19-1550-5. Dostupné z: doi:10.1007/978-981-19-1550-5\_15-2
- [12] MIŠEK, Ján a Ladislav KRATĚNA. *Optoelektronika*. 1. vyd. Praha 1: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1979. ISBN 04-012-79.
- [13] PASCHOTTA, Rüdiger. Luminosity Functions - an encyclopedia article. In: *RP Photonics Encyclopedia* [online]. B.m.: RP Photonics AG, 2019. Dostupné z: doi:10.61835/ngk
- [14] PLUHÁČEK, František. *Fyziologická optika - výukové materiály k předmětu Fyziologická optika*. 2015.
- [15] OTRADOVEC, Jiří. *Klinická neurooftalmologie*. 1. vyd. Praha 7: Grada Publishing, 2003. ISBN 80-247-0280-0.
- [16] ALONSO, Jose-Manuel a Yao CHEN. Receptive field. *Scholarpedia* [online]. 2009, 4(1), 5393. ISSN 1941-6016. Dostupné z: doi:10.4249/scholarpedia.5393
- [17] ŠIKL, Radovan. *Zrakové vnímání* [online]. B.m.: Grada, 2012 [vid. 2024-02-25]. ISBN 978-80-247-3029-5. Dostupné z: [https://books.google.com/books/about/Zrakové\\_vnímání.html?hl=cs&id=baNKgp5u7oIC](https://books.google.com/books/about/Zrakové_vnímání.html?hl=cs&id=baNKgp5u7oIC)
- [18] GANONG, William F. *Přehled lékařské fyziologie*. 20. vyd. Praha 5: Galén, 2005. ISBN 80-7262-311-7.
- [19] SYKA, Josef, Luboš VOLDŘICH a František VRABEC. *Fyziologie a patofyziologie zraku a sluchu*. 1. vyd. Praha 1: Avicenum, 1981. ISBN 08-010-81.
- [20] KOUKOLÍK, František. *JÁ - O vztahu mozku, vědomí a sebeuvědomování*. první. Praha 1: Nakladatelství Karolinum, 2003. ISBN 80-246-0736-0.
- [21] BASKIN, Kara. The visual pathway from the eye to the brain. *CVI NOW Perkins School for the Blind* [online]. Dostupné z: <https://www.perkins.org/the-visual-pathway-from-the-eye-to-the-brain/>
- [22] TUNNACLIFFE, Alan H. *Introduction to visual optics*. London W1M 4AT: The

- association of dispensing opticians, 1984. ISBN 0 900099 19 4.
- [23] ČIHÁK, Radomír. *Anatomie 3*. 2. vyd. Praha: Grada Publishing, 2004. ISBN 987-80-247-1132-4.
- [24] KRÁLOVÁ, Magdaléna. Lidské oko. *Techmania Science Center/EDUPORTÁL* [online]. 2007. Dostupné z: <https://edu.techmania.cz/cs/encyklopedie/fyzika/svetlo/lidske-oko>
- [25] MEHRI, Ali. Non-extensive distribution of human eye photoreceptors. *Journal of Theoretical Biology* [online]. 2017, **419**(February), 305–309. ISSN 10958541. Dostupné z: doi:10.1016/j.jtbi.2017.02.030
- [26] HADJIKHANI, Nouchine a Roger B.H. TOOTELL. Projection of rods and cones within human visual cortex. *Human Brain Mapping* [online]. 2000, **9**(1), 55–63. ISSN 10659471. Dostupné z: doi:10.1002/(SICI)1097-0193(2000)9:1<55::AID-HBM6>3.0.CO;2-U
- [27] CURCIO, Christine A., Kenneth R. SLOAN, Robert E. KALINA a Anita E. HENDRICKSON. Human photoreceptor topography. *Journal of Comparative Neurology* [online]. 1990, **292**(4), 497–523. ISSN 10969861. Dostupné z: doi:10.1002/cne.902920402
- [28] URALE, Poutasi W B, Alexander M PUCKETT, Ashley YORK, Derek ARNOLD a D Samuel SCHWARZKOPF. Highly accurate retinotopic maps of the physiological blind spot in human visual cortex. *Human Brain Mapping* [online]. 2022, **43**(17), 5111–5125. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1002/hbm.25996>
- [29] AUTRATA, Rudolf a Jana ČERNÁ. *Nauka o zraku*. první. Brno: Národní centrum ošetrovatelství a nelékařských zdravotnických oborů v Brně, 2006. ISBN 80-7013-362-7.
- [30] WELLS-GRAY, E. M., S. S. CHOI, A. BRIES a N. DOBLE. Variation in rod and cone density from the fovea to the mid-periphery in healthy human retinas using adaptive optics scanning laser ophthalmoscopy. *Eye (Basingstoke)* [online]. 2016, **30**(8), 1135–1143. ISSN 14765454. Dostupné z: doi:10.1038/eye.2016.107
- [31] WEIER, Martin, Michael STENGEL, Thorsten ROTH, Piotr DIDYK, E. EISEMANN, M EISEMANN, Steve GROGORICK, André HINKENJANN, Ernst KRUIJFF, M

- MAGNOR, Karol MYSZKOWSKI a Philipp SLUSALLEK. Perception-driven Accelerated Rendering. *Computer Graphics Forum* [online]. 2017, **36**(2), 611–643. ISSN 01677055. Dostupné z: doi:10.1111/cgf.13150
- [32] ZELE, Andrew J. a Dingcai CAO. Vision under mesopic and scotopic illumination. *Frontiers in Psychology* [online]. 2015, **5**(January), 1–15. ISSN 16641078. Dostupné z: doi:10.3389/fpsyg.2014.01594
- [33] SHIN, Jae Chul, Hirohisa YAGUCHI a Satoshi SHIOIRI. Change of color appearance in photopic, mesopic and scotopic vision. *Optical Review* [online]. 2004, **11**(4), 265–271. ISSN 13406000. Dostupné z: doi:10.1007/s10043-004-0265-2
- [34] VAN BOMMEL, Wout. Mesopic Vision. In: *Road Lighting: Fundamentals, Technology and Application* [online]. Cham: Springer International Publishing, 2015, s. 71–82. ISBN 978-3-319-11466-8. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-319-11466-8\_6
- [35] KINNEY, Jo Ann Smith. Comparison of Scotopic, Mesopic, and Photopic Spectral Sensitivity Curves. *J. Opt. Soc. Am.* [online]. 1958, **48**(3), 185–190. Dostupné z: doi:10.1364/JOSA.48.000185
- [36] *Fotopické, mezopické a skotopické: definice a význam pro výpočty osvětlení* [online]. 2017. Dostupné z: <https://support.agi32.com/support/solutions/articles/22000198065-photopic-mesopic-and-scotopic-definitions-and-relevance-to-lighting-calculations>
- [37] ASTON, Stacey, Kristina DENISOVA, Anya HURLBERT, Maria OLKKONEN, Bradley PEARCE, Michael RUDD, Annette WERNER a Bei XIAO. Exploring the Determinants of Color Perception Using #Thedress and Its Variants: The Role of Spatio-Chromatic Context, Chromatic Illumination, and Material–Light Interaction. *Perception* [online]. 2020, **49**(11), 1235–1251. ISSN 14684233. Dostupné z: doi:10.1177/0301006620963808
- [38] GOURAS, Peter. *COLOR VISION BY PETER GOURAS* [online]. 2009. Dostupné z: <https://webvision.med.utah.edu/book/part-vii-color-vision/color-vision/#:~:text=Color vision is an illusion created by the,and projected onto the outer world we see.>
- [39] *Трёхкомпонентная теория цветового зрения* [online]. Dostupné z: [https://science.fandom.com/ru/wiki/Трёхкомпонентная\\_теория\\_цветового\\_зрения#cite\\_note-1](https://science.fandom.com/ru/wiki/Трёхкомпонентная_теория_цветового_зрения#cite_note-1)



- [40] *Теории цветового зрения* [online]. Dostupné z: [https://science.fandom.com/ru/wiki/Теории\\_цветового\\_зрения](https://science.fandom.com/ru/wiki/Теории_цветового_зрения)
- [41] GOLDSTEIN, E. Bruce. *Sensation and Perception*. 8. vyd. B.m.: Cengage Learning, 2009. ISBN 9780495601494.
- [42] HERTOOG, W, Jorge HIGUERA, Mariano PERALVAREZ a Josep CARRERAS. The Chromaticity of White Light. *12th Congress of the International Color Association*. 2013.
- [43] PLUHÁČEK, František. *Objektivní popis barev - zápisky z předmětu Fyziologická optika*. 2015.
- [44] HUNT, R. W. G. a M. R. POINTER. Měření barev, 4. vydání. In: *Měření barev, 4. vydání* [online]. 4. vyd. 2011. ISBN 978-1-119-97537-3. Dostupné z: <https://www.wiley.com/en-us/Measuring+Colour%2C+4th+Edition-p-9781119975373>
- [45] SAMANTA, Ashis Kumar. *Colorimetry* [online]. Rijeka: IntechOpen, 2022. ISBN 978-1-83962-941-9. Dostupné z: doi:10.5772/intechopen.95699
- [46] SAMANTA, Pubalina. Basic Principles of Colour Measurement and Colour Matching of Textiles and Apparels. In: Ashis Kumar SAMANTA, ed. *Colorimetry* [online]. Rijeka: IntechOpen, 2022. Dostupné z: doi:10.5772/intechopen.101442
- [47] SUZER, Ozge. *The effects of correlated colour temperature on wayfinding: A study in a virtual airport environment*. B.m., 2013. b.n.
- [48] OLESEN, Jacob. *What Is the Difference Between Additive and Subtractive Color Mixing?* [online]. 2013. Dostupné z: <https://www.color-meanings.com/additive-subtractive-color-mixing/>
- [49] ŽALUDOVÁ, Nad'a. Fyzikální pokus: Skládání barev. *Matfyz* [online]. 2016. Dostupné z: <https://www.matfyz.cz/clanky/fyzikalni-pokus-skladani-barev>
- [50] ЮСДЮНКЕЛЬ, Элеонора. 2.3 *Спектральные цвета. Аддитивное и субтрактивное смешивание* [online]. 2010. Dostupné z: <https://natural-colours.livejournal.com/4198.html>
- [51] *Užití mísení barev v praxi* [online]. Dostupné

- z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/550-uziti-miseni-barev-v-praxi>
- [52] AKBARINIA, Arash a Karl R. GEGENFURTNER. Color metamerism and the structure of illuminant space. *Journal of the Optical Society of America A* [online]. 2018, **35**(4), B231. ISSN 1084-7529. Dostupné z: [doi:10.1364/JOSAA.35.00B231](https://doi.org/10.1364/JOSAA.35.00B231)
- [53] *ЦВЕТ 1* [online]. Dostupné z: <https://lkmtrend.ru/cvet-1>
- [54] HABEL, Jiří. Základy světelné techniky (2). *Světlo*. 2008, **10**(8), 52–55.
- [55] *Lighting Handbook INDALUX 2002* [online]. 2009. Dostupné z: <https://issuu.com/lightonline/docs/lighting-handbook-indal-guide>
- [56] SYNEK, Svatopluk a Šárka SKORKOVSKÁ. *Fyziologie oka a vidění*. 1. vyd. Praha 7: Grada Publishing, 2004. ISBN 80-247-0786-1.
- [57] SILBERNAGL, Stefan a Agamemnon DESPOPOULOS. *Atlas fyziologie člověka*. 2. vyd. Praha: Grada, 1993. ISBN 80-85623-79-X.
- [58] KOLB, Helga, Nelson RALPH a Fernandez EDUARDO. Webvision: The Organization of the Retina and Visual System [Internet]. *Salt Lake City (UT): University of Utah Health Sciences Center* [online]. 1995, 1827 [vid. 2024-02-04]. Dostupné z: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK11530/>
- [59] PERKINS, EDWARD S. DAVSON, HUGH AUGUSTYN, Adam, Aakanksha GAUR, Erik GREGERSEN, Gloria LOTHAN, Chelsey PARROTT-SHEFFER, Kara ROGERS, Surabhi SINHA a The Editors of Encyclopaedia BRITANNICA. The work of the retina. *Britannica* [online]. Dostupné z: <https://www.britannica.com/science/human-eye/The-work-of-the-retina>
- [60] MOINI, Jahangir, Anthony LOGALBO a Raheleh AHANGARI. Neural tissue. In: *Foundations of the Mind, Brain, and Behavioral Relationships* [online]. B.m.: Academic Press, 2024, s. 39–62. ISBN 978-0-323-95975-9. Dostupné z: [doi:10.1016/b978-0-323-95975-9.00017-2](https://doi.org/10.1016/b978-0-323-95975-9.00017-2)
- [61] MOINI, Jahangir, Nicholas G. AVGEROPOULOS a Mohtashem SAMSAM. Cytology of the nervous system. In: *Epidemiology of Brain and Spinal Tumors* [online]. B.m.: Academic Press, 2021, s. 41–63. ISBN 978-0-12-821736-8. Dostupné z: [doi:10.1016/b978-0-12-821736-8.00012-1](https://doi.org/10.1016/b978-0-12-821736-8.00012-1)

- [62] KALLONIATIS, Michael a Charles LUU. *Light and Dark Adaptation* [online]. B.m.: University of Utah Health Sciences Center, Salt Lake City (UT), 1995. Dostupné z: <http://europepmc.org/books/NBK11525>
- [63] Dark Adaptation 1. the Basic Curve. In: [online]. nedatováno. Dostupné z: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:14806598>
- [64] Xerophthalmia and night blindness for the assessment of clinical vitamin A deficiency in individuals and populations. *World Health Organization*. 2014, 1–6.
- [65] ROWLAND, Belinda a Rebecca FREY. Night Blindness. *Gale Encyclopedia of Alternative Medicine* [online]. 2018. Dostupné z: <https://www.encyclopedia.com/medicine/diseases-and-conditions/pathology/night-blindness#3435100566>
- [66] CELÝ, Jan. *Základy kvantové mechaniky pro chemiky*. Brno, 1983. Rektorát UJEP.
- [67] *Kvantové vlastnosti světla* [online]. Dostupné z: <https://slideplayer.cz/slide/2907889/>
- [68] STRAUMANN, Norbert. On the first solvay congress in 1911. *European Physical Journal H* [online]. 2011, **36**(3), 379–399. ISSN 21026459. Dostupné z: [doi:10.1140/epjh/e2011-20043-9](https://doi.org/10.1140/epjh/e2011-20043-9)
- [69] HACKWORTH, Martin. Measuring Planck ' s constant using LEDs. nedatováno, 1–5.
- [70] CREPEAU, John. A Brief History of the T4 Radiation Law. In: *Proceedings of the ASME Summer Heat Transfer Conference 2009, HT2009* [online]. 2009. Dostupné z: [doi:10.1115/HT2009-88060](https://doi.org/10.1115/HT2009-88060)
- [71] *Постоянная Планка* [online]. Dostupné z: [https://elementy.ru/trefil/21193/Postoyannaya\\_Planka#:~:text=Грубо говоря%2C постоянная Планка указывает,незначительна%2C что ею можно пренебречь](https://elementy.ru/trefil/21193/Postoyannaya_Planka#:~:text=Грубо говоря%2C постоянная Планка указывает,незначительна%2C что ею можно пренебречь)
- [72] EINSTEIN, Albert. On a Heuristic Point of View about the Creation and Conversion of Light, translated from german by Haar, T. *Annalen der Physik*. 1905, **17**(6), 132–148. ISSN 00033804.
- [73] HACKWORTH, Martin. Measuring Planck ' s Constant. 1962, 1–7.
- [74] ZEGHBROECK, B. Van. Principles of Semiconductor Devices - Chapter 4: p-n Diodes, 4.2 Structure and principle of operation. *Boulder* [online]. 2007. Dostupné

- z: [https://truenano.com/PSD20/chapter4/ch4\\_2.htm](https://truenano.com/PSD20/chapter4/ch4_2.htm)
- [75] ČERVENKA, Milan. *laboratorní úloha - Stanovení Planckovy konstanty pomocí voltampérové charakteristiky LED* [online]. 2019. Dostupné z: <https://planck.fel.cvut.cz/praktikum/downloads/navody/ledplanck.pdf>
- [76] GUOFO, Niu. *Operation of PN Junctions and Reinvention of Bipolar Transistors* [online]. 2012. Dostupné z: <https://www.eng.auburn.edu/~niuguof/2210class/html/pnbipolar.html>
- [77] *19. PN-Junction* [online]. 2024. Dostupné z: [https://wanda.fiu.edu/boeglinw/courses/Modern\\_lab\\_manual3/pn\\_junction.html](https://wanda.fiu.edu/boeglinw/courses/Modern_lab_manual3/pn_junction.html)
- [78] BEŠTA, Miloš. *Polovodičová dioda* [online]. Dostupné z: <http://www.mbest.cz/wp-content/uploads/2013/01/T1.4-DIODA.pdf>
- [79] KASAP, Safa. pn Junction Devices and Light Emitting Diodes. *Junction Devices*. 2001, 7(6), 34.
- [80] HONSBURG, Christiana a Stuart BOWDEN. *Band Gap Overview* [online]. Dostupné z: <https://www.pveducation.org/pvcdrom/pn-junctions/band-gap>
- [81] Band gap. *Energy Education* [online]. Dostupné z: [https://energyeducation.ca/encyclopedia/Band\\_gap#cite\\_note-RE2-1](https://energyeducation.ca/encyclopedia/Band_gap#cite_note-RE2-1)
- [82] CLARK, Elliot. What is Fermi Level? *Energy Theory* [online]. 2023. Dostupné z: <https://energytheory.com/what-is-fermi-level/>
- [83] GREGERSEN, Erik, Gloria LOTHAN a REDAKCE ENCYCLOPAEDIA BRITANNICA. Fermi level - physics. *Britannica* [online]. 2022. Dostupné z: <https://www.britannica.com/science/Fermi-level>
- [84] THORSETH, Anders. *Characterization, Modeling, and Optimization of Light-Emitting Diode Systems* [online]. B.m., 2011. b.n. Dostupné z: <https://backend.orbit.dtu.dk/ws/portalfiles/portal/6469076/Thorseth2011.pdf>
- [85] *The Light Emitting Diode* [online]. Dostupné z: [https://www.electronicstutorials.ws/diode/diode\\_8.html](https://www.electronicstutorials.ws/diode/diode_8.html)
- [86] FOLKERT D.ROSCAM ABBING. *Light-Emitting Diode Junction-Temperature Sensing using.pdf*. 8. srpen 2011

- [87] ISAAC. Colored LEDs: how do you get the different colors? *Hardware spirit* [online]. 29. březen 2023 [vid. 2024-02-04]. Dostupné z: <https://www.hwlibre.com/en/led-colors/>
- [88] SINGH, Inderpreet. *KNOW THY LED* [online]. 2017. Dostupné z: <https://hackaday.com/2017/08/08/know-thy-led/#comments>
- [89] LAMBDA GEEKS. LED Bulb for Motion Sensor Light: A Comprehensive Guide. *Lamda Geeks* [online]. 24. říjen 2023 [vid. 2024-02-04]. Dostupné z: <https://lambdageeks.com/led-bulb-for-motion-sensor-light/>
- [90] *LED Colors and Materials Chart* [online]. Dostupné z: <https://www.circuitbread.com/toolbox/led-colors-and-materials-chart>
- [91] E Electronics 2022. *Pinterest* [online]. Dostupné z: [https://www.pinterest.pt/pin/797137202775411269/?utm\\_campaign=rtpinrecs&e\\_t=3fe0074dced94108b011cf14c5d20858&utm\\_content=797137202775411269&utm\\_source=31&utm\\_term=7&utm\\_medium=2004](https://www.pinterest.pt/pin/797137202775411269/?utm_campaign=rtpinrecs&e_t=3fe0074dced94108b011cf14c5d20858&utm_content=797137202775411269&utm_source=31&utm_term=7&utm_medium=2004)
- [92] BAŘINA, Jaromír, Pavel BRINDL, Ivo VLK, Michal RUDOLF, Eva RUDOLFOVÁ, Robert JEDLIČKA, Zdeněk KOVÁŘ a Miroslav MIKEŠ, LADISLAV HALTMAR. *Voltampérová charakteristika diody* [online]. Dostupné z: <https://eluc.ikap.cz/verejne/lekce/2660>
- [93] I-V Characteristics of LED. *Unacademy* [online]. Dostupné z: <https://unacademy.com/content/jee/study-material/physics/i-v-characteristics-of-led/>
- [94] *ХАРАКТЕРИСТИКИ СВЕТОДИОДОВ: ОПИСАНИЕ МАРКИРОВОК И ТЕХНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ДИОДОВ ДЛЯ ЛАМ ОСВЕЩЕНИЯ, КАКИЕ РАЗМЕРЫ, ВЕС, МОЩНОСТЬ, НАПРЯЖЕНИЕ В LED РАЗНЫХ МАРОК* [online]. 2024. Dostupné z: <https://dznva.ru/blog/harakteristiki-svetodiodov-opisanie-markirovok-i-tehnicheskikh-parametrov-diodov-dlya-lam-osvescheniya-kakie-razmery-ves-moschnost-napryazhenie-v-led-raznyh-marok.html>
- [95] *Лекция 4 Светодиоды (LED).pdf* [online]. Dostupné z: [https://www.kaznu.kz/content/files/pages/folder25931/Лекция 4 Светодиоды \(LED\).pdf](https://www.kaznu.kz/content/files/pages/folder25931/Лекция%204%20Светодиоды%20(LED).pdf)
- [96] MIŠEK, Ján, Ladislav KUČERA a Josef KORTÁN. *Polovodičové zdroje optického*

*zářeni*. 1. vyd. Praha 1: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1988. ISBN 04-538-88.

- [97] The Planck Constant. *National Institute of Standards and Technology* [online]. 2022. Dostupné z: <https://www.nist.gov/physics/what-planck-constant>
- [98] BOCHKAREVA, N, Vlad VORONENKOV, Ruslan GORBUNOV, Philipp LATYSHEV, Yuri LELIKOV, Y REBANE, Alexander TSYUK a Yuri SHRETER. Туннельная инжекция и энергетическая эффективность светодиодов на основе InGaN/GaN. *Fizika i Tekhnika Poluprovodnikov*. 2013, **47**, 129.
- [99] LEE, Moonsang, Hyunkyu LEE, Keun Man SONG a Jaekyun KIM. Investigation of forward tunneling characteristics of InGaN/GaN blue light-emitting diodes on freestanding GaN detached from a Si substrate. *Nanomaterials* [online]. 2018, **8**(7). ISSN 20794991. Dostupné z: [doi:10.3390/nano8070543](https://doi.org/10.3390/nano8070543)
- [100] ALTHIB, Hind. Effect of quantum barrier width and quantum resonant tunneling through InGaN/GaN parabolic quantum well-LED structure on LED efficiency. *Results in Physics* [online]. 2021, **22**, 103943. ISSN 22113797. Dostupné z: [doi:10.1016/j.rinp.2021.103943](https://doi.org/10.1016/j.rinp.2021.103943)