Zdravotně sociální fakulta
Faculty of Health and Social Sciences

Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích
University of South Bohemia in České Budějovice

Fyzikální základy termografie pro radiologické asistenty

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Studijní program:
SPECIALIZACE VE ZDRAVOTNICTVÍ

Autor: Šimon Lávička

Vedoucí práce: doc. RNDr. Přemysl Záškodný, CSc.

České Budějovice 2018

Prohlášení

Prohlašuji, že svoji bakalářskou práci s názvem *Fyzikální základy termografie pro radiologické asistenty* jsem vypracoval samostatně pouze s použitím pramenů v seznamu citované literatury.

Prohlašuji, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb. v platném znění souhlasím se zveřejněním své bakalářské/diplomové práce, a to v nezkrácené podobě elektronickou cestou ve veřejně přístupné části databáze STAG provozované Jihočeskou univerzitou v Českých Budějovicích na jejích internetových stránkách, a to se zachováním mého autorského práva k odevzdanému textu této kvalifikační práce. Souhlasím dále s tím, aby toutéž elektronickou cestou byly v souladu s uvedeným ustanovením zákona č. 111/1998 Sb. zveřejněny posudky školitele a oponentů práce i záznam o průběhu a výsledku obhajoby bakalářské/diplomové práce. Rovněž souhlasím s porovnáním textu mé bakalářské/diplomové práce s databází kvalifikačních prací Theses.cz provozovanou Národním registrem vysokoškolských kvalifikačních prací a systémem na odhalování plagiátů.

V Českých Budějovicích dne 2. 5. 2018 .....

Šimon Lávička

Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval za odborné vedení mému vedoucímu bakalářské práce panu doc. RNDr. Přemyslu Záškodnému, CSc. Dále děkuji všem radiologickým asistentům, kteří věnovali svůj čas k vyplnění vědomostního dotazníku.

Fyzikální základy termografie pro radiologické asistenty

Abstrakt

V současné době není k dispozici edukační materiál pro radiologické asistenty a studenty tohoto oboru, který by pojednával o fyzikálních základech termografie. Zejména materiál, který by byl přiměřený předpokládaným fyzikálním a matematickým znalostem potřebným pro obor Radiologický asistent a další příbuzné obory. V termografii vidí část vědecké obce slibnou metodu pro mammologii, revmatologii, ortopedii, angiologii a stomatologii. Výše zmíněná motivace vedla k vypracování této bakalářské práce, ve které byly vytyčeny následující cíle:

1. Výběr teorie přenosu poznatků na úroveň oboru „Radiologický asistent“ a dalších příbuzných oborů.
2. Vytvoření edukačního textu, který bude respektovat vybranou teorii a odrážet zákony záření černého tělesa.
3. Zmapování současného stavu znalostí termografie u adresátů.

Na základě analýzy současného stavu a vytyčení cílů byly formulovány dvě hypotézy:

1. Aplikací teorie kurikulárního procesu lze vytvořit významné složky projektového kurikula pro danou skupinu adresátů edukace.
2. Znalosti adresátů budou mít v oblasti fyzikálních základů termografie teoretické rozdělení blízké rozdělení normálnímu.

Vhodnou teorií pro přenos poznatků z vědy do edukační sféry se ukázala být teorie kurikulárního procesu, jejíž aplikabilita byla přijata i zahraniční vědeckou komunitou viz impaktovaná publikace (Záškodný, 2012).

Nejprve byl připomenut obecně známý vztah infračerveného záření k termografii, dále bylo nutné shrnout a analyzovat objevené teoretické fyzikální podklady k dnešnímu datu, nejdůležitější pro termografii – rovněž ve vztahu k záření černého tělesa. V práci jsou uvedeny a popsány následné fyzikální zákony: Stefanův-Boltzmannův zákon, Wienův zákon posuvu, Rayleigh-Jeansonsův zákon a Planckův vyzařovací zákon, přičemž je nutné zejména zdůraznit vztah těchto zákonů k záření černého tělesa, jehož teplota je 0 K nebo -273,15 ℃ přes vysvětlení parametru emisivity, která je bezrozměrnou veličinou určující schopnost vyzařování tepla. Parametr emisivity je poměrem vyzařování

daného tělesa k intenzitě vyzařování absolutně černého tělesa se stejnou teplotou. Její hodnota musí být v termokameře zadána.

Následně byl vytvořen vědomostní test čítající osmnáct otázek s výběrem ze čtyř možností, přičemž pouze jedna byla považována za správnou. Adresátem bylo dvacet pět radiologických asistentů aktivně činných ve svém oboru ve věku od dvaceti tří do padesáti tří let, s délkou praxe od půl roku do třiceti jednoho roku. V kvantifikaci znalostí adresátů bylo použito metod deskriptivní a matematické statistiky. Takto bylo zpracováno všech dvacet pět testů. Provedení neparametrického testování empirického rozdělení četností získaných bodových hodnocení těchto testů ukázalo, že druhá z nastavených hypotéz nebyla potvrzena. Znalosti adresátů byly vyšší, než hypotetický předpoklad.

Klíčová slova

Radiologický asistent; termografie; infračervené záření; záření černého tělesa; emisivita; kurikulární proces; edukační text

Physical bases of thermography for radiotherapists

Abstract

There is currently no educational material for radiological assistants and students in this field to discuss the physical foundations of thermography. In particular, material which is appropriate to the presumed physical and mathematical knowledge required for the field of Radiologic Assistant and other related disciplines. Especially due to the fact that part of the scientific community sees in thermography a promising method for mammologii, rheumatology, orthopedics, angiology and dentistry. This motivation led to the elaboration of this bachelor thesis which set out these following goals:

1. The selection of theory of knowledge transfer to the level of "Radiological Asssistant" and other related fields.
2. The creation of an educational text that respects the chosen theory and reflects the blackbody radiation laws.
3. The monitoring of current state of thermography knowledge in the addressees.

There were two hypotheses formulated on the basis of an analysis of the current state and the setting of objectives:

1. The application of theory to the curriculum process can create important components of a project curriculum for a given group of learners.
2. The knowledge of the learners will have a theoretical distribution of the near-normal distribution in the area of physical fundamentals of thermography.

As a convenient theory for transferring knowledge from science to the educational sphere has been proved to be the theory of the curricular process. Its applicability was accepted by the international scientific community as well – see the impacted publication (Záškodný, 2012).

Firstly, it was necessary to remind a generally known relationship of infrared radiation to thermography and than analyze the discovered theoretical physical backgrounds up to date, the most important for thermography – also in relation to the radiation of the blackbody. There are also shown and described subsequent physical laws: Stefan-Boltzmann law, Wien displacement law, Rayleigh-Jeansons law and Planck´s radiation law, whereby it is especially necessary to emphasize the relationship of these laws to blackbody radiation whose temperature is between 0 K or -273,15 ℃ through the

explanation of the emissivity parameter, which is a dimensionless quantity determining the heat emission capability. Its value must be entered in the thermal camera.

Subsequently, a knowledge test was created on eighteen questions with a selection of four options, where only one was correct. Twenty-five radiological assistants active in their field at the age of twenty-three to fifty-three, with a length of practice from half a year to thirty-one years, were addressed. The methods of descriptive and mathematical statistics were used in the quantification of the addressees´ knowledge. All twenty-five tests were processed this way. Performing nonparametric testing of the empirical distribution of the scores obtained from these tests revealed that the second of the hypotheses set was not confirmed. The knowledge of the addressees was higher than the hypothetical assumption.

Key words:

Radiologic assistant; thermography; infrared radiation; blackbody radiation; emissivity; curricular proces; educational text

Obsah

1. Teoretická část 11
1.1 Historie termografického zobrazování 11
1.2 Teorie kurikulárního procesu 13
1.3 Fyzikální princip termografie 15
1.3.1 Elektromagnetické spektrum 15
1.3.2 Záření absolutně černého tělesa 17
1.3.3 Emisivita 18
1.3.4 Veličiny 20
1.3.5 Stefanův-Boltzmannův zákon 21
1.3.6 Wienův zákon posuvu 22
1.3.7 Planckův vyzařovací zákon 25
1.4 Infrakamera, její funkce a princip na kterém pracuje 29
1.4.1 Detektor 31
1.4.2 Mechanismus rozkladu obrazu 32
1.4.3 Termogram 33
2. Hypotézy a metodika výzkumu 34
2.1 Hypotézy a cíle 34
2.2 Metodika výzkumu 34
2.2.1 Konceptuální kurikulum 35
2.2.2 Zamýšlené kurikulum 35
2.2.3 Projektové kurikulum 37
2.2.4 Implementované kurikulum – 1 37
2.2.5 Implementované kurikulum – 2 38
2.3 Statistické vyhodnocení dotazníku 38
2.3.1 Formulace statistického šetření 38
2.3.2 Škálování 38
2.3.3 Elementární statistické zpracování 39

2.3.4 Neparametrické testování – Pearsonův test $\chi 2$ 43
3. Diskuze 46
3.1 Diskuze ověření první hypotézy 46
3.2 Diskuze ověření druhé hypotézy 46
4. Závěr 50
5. Seznam literatury 51
6. Seznam obrázků, grafů a tabulek 55
7. Přílohy 56

Úvod

Termografie je metoda, která zobrazuje infračervené záření. Její název je složen ze dvou slov, řeckého thermé – teplo a latinského graphia, vycházejícího z řeckého grafó – píši, vyjadřující znázornění orgánu, zaznamenávání činnosti (Kábrt, 1979). Jedná se tedy o převedený do češtiny řecko – latinský výraz, velmi dobře vystihující podstatu metody. Medicínské využití termografie pracuje s tím, že lidské tělo tak jako všechna tělesa na Zemi, má větší teplotu než absolutní nula, to znamená více jak - 273,15 ℃. Tím pádem vyzařuje elektromagnetické (tepelné) záření, které je možno bezkontaktně zobrazit termokamerou.

V současné době není u nás k dispozici vhodný ucelený a volně dostupný edukační text pojednávající o fyzikálních základech termografie, který by byl přiměřený znalostem radiologických asistentů a studentů tohoto oboru.

Tato bakalářská práce se snaží aplikací kurikulárního procesu vytvořit vhodný edukační text fyzikálních základů termografie pro výše uvedené adresáty. Tedy dosáhnout projektového kurikula. Podkladem a základním vstupem je analýza současného vědeckého poznání v této oblasti a je rozpracována v teoretické části práce, s následnou úpravou základního tématu do srozumitelné formy edukačního textu pro zamýšlenou cílovou skupinu. Možným pomocným vodítkem v tomto procesu vytváření edukačního textu by měli být i výsledky statistického šetření vědomostního testu provedeného na toto téma u skupiny již aktivně pracujících radiologických asistentů v běžné praxi.

1. Teoretická část

1.1 Historie termografického zobrazování

Počátek byl dílem pouhé náhody, kdy se sir William Herschel (Obrázek č. 2) astronom na královském dvoře Jiřího III., snažil o objevení nového optického materiálu (Grigar, 2000; Ring 2016).

Obrázek 1: William Herschel
Zdroj: Courtesy of the National Portrait Gallery, London

Tento materiál měl být využit pro optický filtr k dalekohledu, kterým chtěl pozorovat Slunce. Po několika pokusech s barevnými sklíčky Herschel zjistil, že některými sklíčky prochází méně tepla a některými tolik tepla, že byly schopné zapálit. Dále Herschel opakoval Newtonův pokus s hranolem, ale na rozdíl od něj se zaměřil na tepelný efekt. Za pomoci rtuťového teploměru, kterému začernil baňku, začal měřit teplotu od fialového konce spektra až po ten červený. Zde, ale nenašel maximální tepelný bod, proto postupoval dále. Teplota stále vzrůstala a zastavila se v dnes známém infračerveném pásmu. Při potvrzování správnosti Herschelova objevu byla využita přírodní sůl NaCl (chlorid sodný), jejíž krystaly byly vybroušeny do podoby čočky a ta propouštěla pouze infračervené záření. K dalšímu posunu došlo v době, kdy se na základě diferenciálního odpařování povedlo zaznamenat první tepelný obraz. Za tímto objevem stál Herschelův

syn John, který jej pojmenoval: termogram. Další pokrok je spojen s rokem 1880, kdy Samuel Pierpont Langley vynalezl bolometr. Bolometr se skládal z proužku platiny, který je připojen k Wheatstonovu můstku. Na tento systém bylo zaměřeno infračervené záření, na které reagoval citlivý galvanometr (Grigar, 2000; Ring 2016).

V meziválečné době došlo k vynálezu dvou infračervených detektorů. Prvním byl konvertor obrazu, který byl omezen na blízké infračervené vlnové délky. O jeho vývoj se velmi zajímala armáda za účelem nočního vidění. Jeho hlavním problémem bylo to, že se nepřátelský objekt musel nasvítit infračerveným zářením a tím hrozilo prozrazení celé operace (Zwiener, 2006; Ring 2016).

Druhým byl fotonový detektor, který byl opět v oblasti zájmu mnoha armád. Využívaly se extrémně citlivé infračervené detektory. Tuto kameru vyvinul maďarský fyzik Kálmán Tihanyi a sloužila jako noční vidění pro protiletadlovou obranu již roku 1929. K jejímu velkému rozvoji došlo v průběhu druhé světové války. Za zmínku stojí zejména německý zbrojní průmysl, který vyvinul takové zbraňové systémy jako například: Vampir ZG 1229 přenosný systém pro noční vidění (viz Obrázek č.3), který byl nasazen na útočnou pušku StG 44. Dále reflektor o průměru 20 centimetrů s dosahem až 400 metrů, který byl montován na tank Pz. V. Panther Ausf. G. Mezi přední výrobce této techniky patřila zejména firma Siemens (Lusar, 1964; Spielberger, 1993; Ring 2016).

Obrázek 2: Vampir ZG 1229, připnutý na útočnou pušku StG 44

Zdroj: Infrazařízení…, 2010

První infračervený obraz lidského těla byl prezentován prof. Czernym ve Frankfurtu nad Mohanem již v roce 1928. V začátcích se používaly pouze jedno-detektorové přístroje. První kamery byly pro medicínské účely nevhodné. Armádě, která je v té době vyráběla, stačilo nízké rozlišení a jejich cena byla velice nadsazená. K intenzivnímu

rozvoji došlo až s příchodem výkonné počítačové techniky, adekvátního hardwaru a softwaru v osmdesátých letech minulého století. Od roku 2000 se začaly používat v medicíně a jejich cena klesla na únosnou hodnotu. Bodem zlomu byl rok 2007, kdy některé termografické přístroje dostaly certifikát o shodě CE (Conformité Européene tzn. Evropská shoda), tím se shodují s evropskou legislativou a povoluje se jejich použití k vyšetření pacienta. Termografické vyšetření mohou aplikovat pouze trénovaní pracovníci. Studium v Evropě je možné například v Německu a Walsu. Termografie se v zahraničí využívá k několika typům vyšetření jako například: ženského prsu, revmatologii, ortopedii, neurologii, zobrazení cév, celotělové snímání atd. (Berz, 2007).

1.2 Teorie kurikulárního procesu

Obsahem a jedním z cílů této práce je osvětlení teoretických podkladů termografie pro radiologické asistenty. Měla by se tedy teoreticky zapojit do edukační komunikace fyziky jako procesu, při kterém dochází k předávání a zprostředkování výsledků a metod fyzikálního poznání do vědomí jednotlivců, které se na vzniku daného poznání nepodíleli (Záškodný, 2012).

Kurikulem se tedy rozumí obsah edukace, vzdělávání, a kurikulárním procesem fyziky pak posloupnost transformačně na sebe navazujících variantních forem kurikula. Těmi jsou kurikulum konceptuální, zamýšlené, projektové, implementované a dosažené.

Konceptuální kurikulum v sobě obsahuje koncepci toho, co by mělo být obsahem vzdělávání ve školách. (Průcha, 2013) Zamýšlené kurikulum obsahuje plánované cíle a obsah vzdělávání v dokumentech, jako jsou učební osnovy a učebnice. Projektové a implementované kurikulum-1 je projektová a realizační forma. Implementované kurikulum-2 lze vnímat jako učivo osvojené edukanty. Dosažené kurikulum je již obsah vzdělávání fungující na straně subjektů. (Záškodný, 2009)

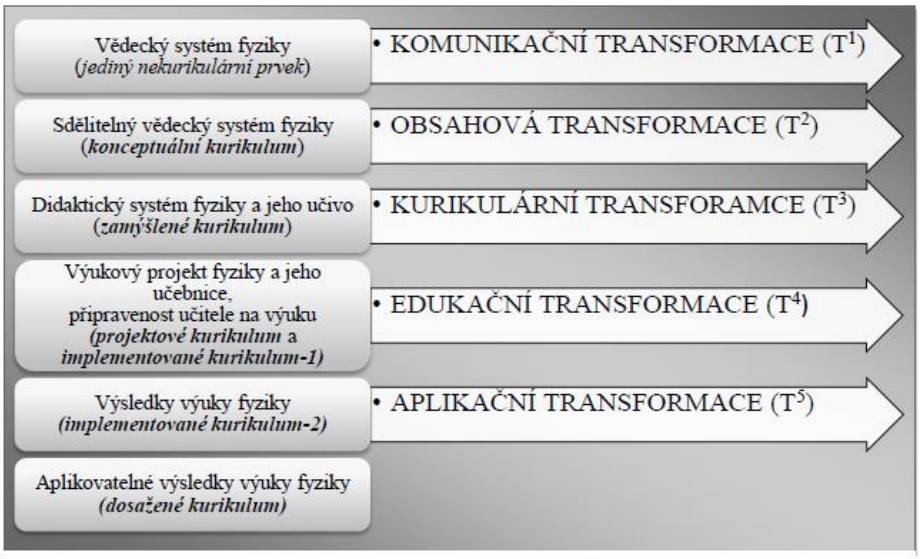
Fyzikální teoretické poznatky uváděné v této práci prodělaly a prodělávají z hlediska kurikulárního procesu několik významných transformací. Od úrovně prvotně vědecké až po transformaci pro nevědeckou obec. To znamená, od obtížně uchopitelné a srozumitelné, až na úroveň akceptovatelnou učitelům, kteří dále po pedagogickém zpracování je vysvětlují a předávají studentům ve srozumitelné formě. (Záškodný, 2009)

Obsah edukace musí podstoupit několik transformací v procesu edukační komunikace fyziky. Označují se jako T^1 až T^5. Transformace T^1-komunikační, T^2 obsahová, T^3-kurikulární, T^4-edukační, T^5-aplikační. (Záškodný, 2009)

Schéma jednotlivých transformací a jejich sjednocení s kurikulárním procesem fyziky (Záškodný, 2009):

- Transformace T^1 (vstup → výstup) – Komunikační transformace Vstup T^1: Vědecký systém fyziky → Výstup T^1 : Sdělitelný vědecký systém fyziky jako konceptuální kurikulum
- Transformace T^2 (vstup → výstup) – Obsahová transformace Vstup T^2: Sdělitelný vědecký systém fyziky jako konceptuální kurikulum → Výstup T^2: Didaktický systém fyziky a jeho učivo jako zamýšlené kurikulum
- Transformace T^3 (vstup → výstup) – Kurikulární transformace Vstup T^3: Didaktický systém fyziky a jeho učivo jako zamýšlené kurikulum → Výstup T^3: Výukový projekt fyziky a jeho učebnice a připravenost učitele na výuku jako projektové kurikulum a implementované kurikulum-1
- Transformace T^4 (vstup → výstup) – Edukační transformace Vstup T^4: Výukový projekt fyziky a jeho učebnice a připravenost učitele na výuku jako projektové kurikulum a implementované kurikulum-1 → Výstup T^4: Výsledky výuky fyziky jako implementované kurikulum-2
- Transformace T^5 (vstup → výstup) – Aplikační transformace Vstup T^5: Výsledky výuky fyziky jako implementované kurikulum-2 → Výstup T^5: Aplikovatelné výsledky výuky fyziky jako dosažené kurikulum (Záškodný, 2009; Záškodný, 2012)

Provázanost a posloupnost jednotlivých forem kurikula a transformací velmi názorně a srozumitelně zobrazuje obrázek č. 3:



Obrázek 3: Grafické znázornění didaktických transformací jednotlivých variantních forem kurikula
Zdroj: (Záškodný, 2009)

Z výše uvedeného schématu vyplývá, že podstata tvorby bakalářské práce se bude pohybovat na úrovni konceptuálního, zamýšleného a projektového kurikula. Proběhne transformace T^2 a T^3.

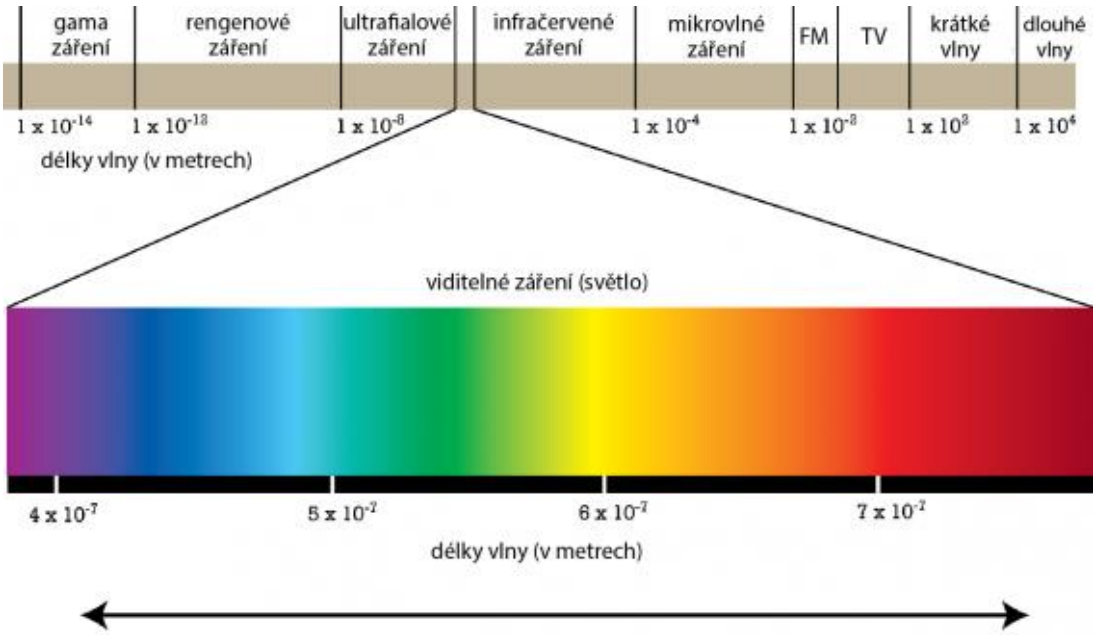
1.3 Fyzikální princip termografie

Infračervené záření je formou elektromagnetického záření, které zahrnuje: radiové vlny, mikrovlny, ultrafialové záření, viditelné světlo, rentgenové záření a záření gama. Vlnová délka infračerveného záření je od 0,78 μm do vzdálenosti 1 μm. Infračervené záření je emitováno pohybem atomů a molekul na povrchu objektu, který má teplotu vyšší než je absolutní nula. Čím je teplota objektu větší, tím větší je intenzita vyzářeného infračerveného záření. Vyzařování tělesa je definováno jako poměr vyzářené energie emitované jakýmkoliv předmětem záření, které by bylo emitované černým tělesem při stejné teplotě. Energie absorbovaná ideálním černým tělesem při stejné teplotě se bude rovnat energii emitované. To bohužel není možné, protože v praxi tyto ideální podmínky znemožňují jak průchodnost, tak i odrazivost (Minkina a Dudzik, 2009; Ruddon, 2012.)

1.3.1 Elektromagnetické spektrum

Elektromagnetické záření vzniká při přeměnách energie v atomu. Jedná se o soubor všech vlnových délek záření. Jestliže atom získá nějakým způsobem vyšší energii, pak ji může vyzářit právě jako elektromagnetické vlnění. Elektromagnetického vlnění je

několik druhů, které se od sebe liší vlnovou délkou neboli frekvencí. Vlnová délka určuje fyzikální vlastnosti záření. Mezi jednotlivými druhy záření není vždy ostrá hranice, někdy se vlnění prostupují, to je viditelné na obrázku č. 4 (The Evolution of…, 2007):



Obrázek 4: Elektromagnetické spektrum

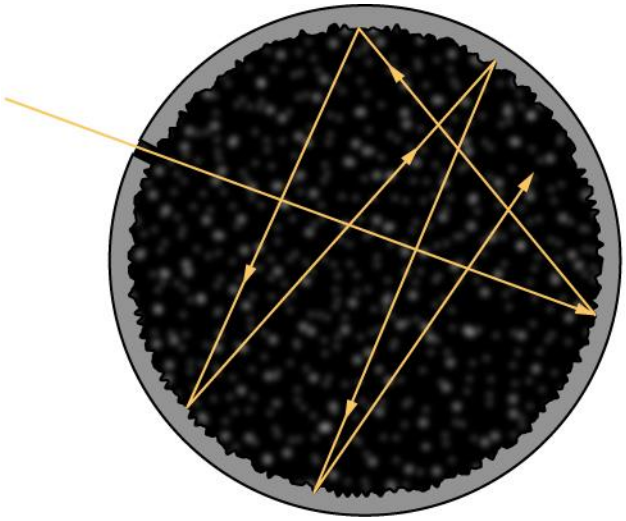
Zdroj: Elektromagnetické spektrum, 2017

Pro námi požadované zobrazení je nejdůležitější infračervené záření, které se dá rozdělit podle vlnových délek na pět dílčích podoblastí (The Evolution of…, 2007):

1. blízká infraoblast, s označením: NIR o vlnové délce: 0,75 – 1,4 μm
2. infraoblast krátkých vln, s označením: SWIR o vlnové délce: 1,4 - 3 μm
3. blízká infraoblast středních vln, s označením: MWIR o vlnové délce: 3 - 8 μm
4. blízká infraoblast dlouhých vln, s označením: LWIR o vlnové délce: 8 - 15 μm
5. blízká infraoblast dlouhých a extra dlouhých vln, s označením: VLWIR a FWIR o vlnové délce: 15-1000 μm (The Evolution of…, 2007)

1.3.2 Záření absolutně černého tělesa

Absolutně černé těleso je těleso, které pohltí veškerou dopadající energii. Jedná se tedy o abstrakci. V reálném světě neexistuje, a to kvůli tomu, že se vždy část záření od tělesa odrazí. Jako příklad černého tělesa si můžeme uvést Slunce, které má větší objem nežli svoji plochu. Na Zemi můžeme jako příklad černého tělesa použít kouli (s černou matnou barvou uvnitř) s otvorem, kde černým tělesem není dutina, ale otvor, kterým se do dutiny díváme. Záření, které se otvorem dostane dovnitř dutiny se zde odráží do doby, kdy zeslábne natolik, že již nepronikne z dutiny ven (viz Obrázek 5) (Záření absolutně…, 2009; Black Body…, 2018).



Obrázek 5: Příklad modelu černého tělesa

Zdroj: Black Body…, 2018

Takovým příkladem je okno v panelovém domě, které se nám jeví tmavé. Pohltivost je závislá na vlnové délce. Pohltivost, kterou lze považovat za konstantní u většího spektra vlnových délek, pojmenováváme jako šedé zářiče (Záření absolutně…, 2009; Black Body…, 2018).

Teplo se šíří za pomoci elektromagnetického záření. Toto záření se nazývá teplotní záření a je způsobeno termickým pohybem nabitých částic. Jedinou podmínkou je, že těleso musí mít teplotu vyšší než absolutní nula. Jestliže se záření setká s jinou látkou, dojde ke třem dějům (Záření absolutně…, 2009; Black Body…, 2018):

1) Část energie je pohlcena
2) Další část je odražena
3) Nebo dojde k průchodu energie látkou

Při průchodu záření látkou dochází k předání energie a zvyšuje se její vnitřní energie. Při teplotě menší než 530 ℃ dochází k vyzařování jen infračerveného záření, u teplot vyšších nežli 530 ℃ dochází ke zkracování vlnových délek. Jednoduchým příkladem může být bílá a černá barva. Jestliže chci, aby se vlnění odráželo a ne pohlcovalo, použiji barvu bílou. U černé barvy je to naopak (Záření absolutně…, 2009; Black Body…, 2018).

1.3.3 Emisivita

Emisivita je velmi podstatný parametr při měření infrazáření kamerou. Lze jí chápat jako efektivitu vyzařování. Před každým měřením je důležité jí do infrakamery ručně zadat. Tyto hodnoty jsou zapsány v tabulkách, díky kterým je možné dohledat příslušnou hodnotu emisivity k měřenému tělesu. Emisivita je definována jako poměr intenzity vyzařování daného tělesa ku intenzitě vyzařování absolutně černého tělesa se stejnou teplotou. Jedná se o bezrozměrnou veličinu, která nám určuje schopnost vyzařování tepla (Buisson, 2016).

Je dána vzorcem:

$$\varepsilon = \frac{M}{M_0}\varepsilon\sigma T^4,$$

Kde: ε je emisivita

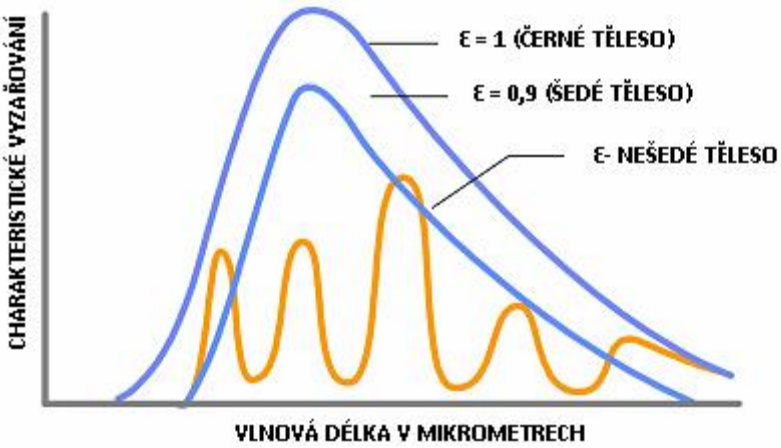
M je intenzita vyzařování tělesa uváděná v $W.m^{-2}$

M_0 je intenzita vyzařování černého tělesa uváděná v $W.m^{-2}$

Emisivita je závislá na několika parametrech:

1. na teplotě
2. vlnové délce
3. vlastnostech povrchu
4. druhu zdroje

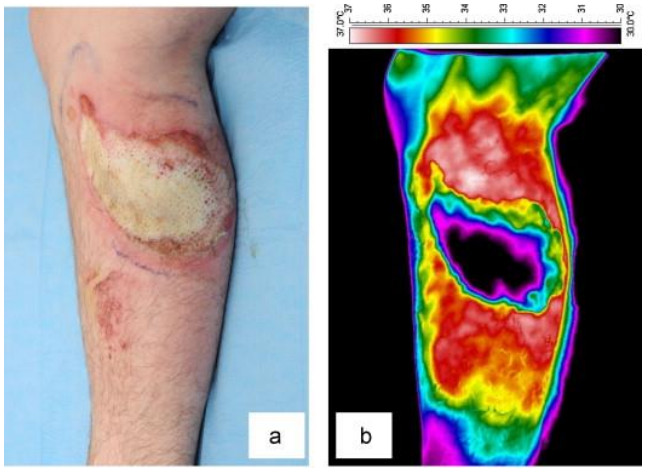
Jestliže s emisivitou počítáme jako s konstantní veličinou, tzn. že je nezávislá na vlnové délce, jedná se o šedé těleso. V reálném světě jsou všechna tělesa selektivní zářiče, to znamená, že jejich emisivita je vždy závislá na vlnové délce. Znázornění černého tělesa, šedého tělesa a selektivního zářiče je zobrazeno na obrázku č. 6 (Buisson, 2016):



Obrázek 6: Emisivita: černého tělesa, šedého tělesa a nešedého tělesa
Zdroj: Bezkontaktní měření…, 2011

Emisivita kůže je přibližně 0,98, ale je zde mnoho proměnných, např.: o jakého jednotlivce se jedná, zdali je kůže poškozena, v jaké zkoumané oblasti se nachází atd.

Bylo zjištěno, že kůže, která je poraněná, měla emisivitu s hodnotou 0,99, což je o něco více nežli intaktní kůže. Oproti tomu kůže na okraji rány měla hodnotu emisivity nižší a to: 0,95. To je patrné z obrázku č. 7 (Usamentiaga, 2014).



Obrázek 7: Termogram vředu na noze
Zdroj: https://ars.els-cdn.com/content/image/1-s2.0-S0305417912001040-gr2.jpg

1.3.4 Veličiny

Energie vyzářená do prostoru za jednotku času se nazývá „zářivý tok Φ“ (udává se ve Wattech). Zářivý tok závisí na velikosti povrchu tělesa. Proto se zavádí veličina *H* (intenzita vyzařování), která nám říká: zářivý tok Φ vydělený plochou *S* (Záření absolutně…, 2009)

$$H = \frac{\Phi}{S},$$

Jednotkou je $W.m^{-2}$.

Intenzita vyzařování nám neudává, jak je energie rozdělena do vlnových délek. Proto je nutné zavést spektrální hustotu intenzity vyzařování (H_λ), která nám udává podíl energie vyzářené z jednotky plochy ve vazbě na jednotkovou vlnovou délku

$$H_\lambda = \frac{\mathrm{d}H}{\mathrm{d}\lambda},$$

kde: *H* je intenzita vyzařování

λ je vlnová délka

Nejedná se jen o vyzařování, těleso záření též pohlcuje. Energie, která na těleso dopadá (ve vazbě na energii, která se pohltí), se nazývá pohltivost a značíme ji α. Těleso s pohltivostí 1 je absolutně černé těleso, to znamená, že pohltí všechno záření, které na něj dopadne. Naopak těleso s pohltivostí 0 veškeré záření odrazí nebo jím projde. Tím pádem například těleso s pohltivostí 0,6: šedesát procent dopadajícího záření pohltí a zbylých čtyřicet procent záření se odrazí nebo projde (Záření absolutně…, 2009).

Dle druhého zákona termodynamiky nelze, aby z tělesa, které je chladnější, přecházely vlny na těleso teplejší. Obě tato tělesa setrvávají v tepelné rovnováze. To znamená, že čím více energie těleso pohltí, tím více jí vyzáří. Největší intenzitu vyzařování má tedy absolutně černé těleso (při stejné teplotě jako ostatní tělesa) (Záření absolutně…, 2009).

1.3.5 Stefanův-Boltzmannův zákon

Rakouský fyzik Boltzmann zkoumal hustotu zářivého toku v závislosti na teplotě. Teoreticky se mu povedlo odvození, které posléze experimentálně potvrdil Josef Stefan. Výsledkem je zákon dnes známý jako Stefanův – Boltzmannův, který říká: Každé těleso, které má nenulovou absolutní teplotu, září, přičemž hustota zářivého toku je úměrná čtvrté mocnině absolutní teploty. Matematicky se k tomuto zákonu lze dostat přes integraci spektrální hustoty zářivého toku absolutně černého tělesa s užitím Planckova vyzařovacího zákona (Pavelek et al, 2007; Záření absolutně…, 2009):

$$dI = \frac{\hbar}{4\pi^2 c^2} \frac{\omega^2}{e^{\frac{\hbar\omega}{kT}} - 1} d\omega$$

Integrací přes úhlové frekvence dostaneme celkový vyzařovací výkon:

$$P = \int_0^{+\infty} I(\omega) d\omega = \frac{\hbar}{4\pi^2 c^2} \int_0^{+\infty} \frac{\omega^2}{e^{\frac{\hbar\omega}{kT}} - 1}$$

Za pomoci substituční metody si zjednodušíme integrál: $x = \frac{\hbar\omega}{k_B T}$, kde $\omega = \frac{k_B T}{\hbar} x$, a $d\omega = \frac{k_B T}{\hbar} dx$:

$$P = \frac{\hbar}{4\pi^2 c^2} \int_0^{+\infty} \frac{x^3 dx}{e^x - 1} \frac{k_B T^4}{\hbar^4}$$

Hodnota určitého integrálu je: $\int_0^{+\infty} \frac{x^3 dx}{e^x - 1} = \frac{\pi^4}{15}$,

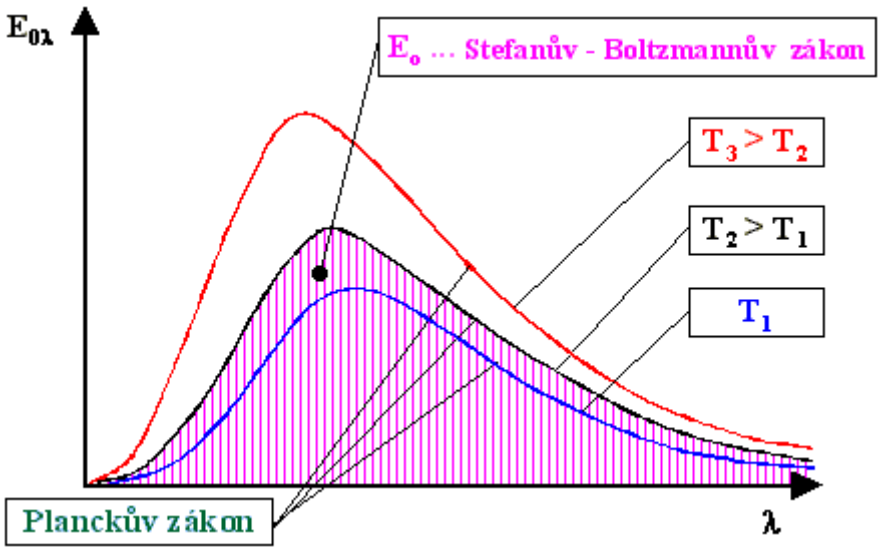
$$P = \frac{\pi^2 k_B^4}{60\hbar^3 c^2} T^4 = \sigma T^4$$

Kde: Vztažením *P* na jednotku plochy je *I* celková intenzita záření uváděná v $W.m^{-2}$

σ je Stefanův-Boltzmannova konstanta rovna: $5,670400\,.\,10^{-8} W.m^{-2}K^{-4}$

T je termodynamická teplota uváděná v Kelvinech

Za pomocí diagramu (Obrázek č. 8) lze zobrazit hustotu zářivého toku absolutně černého tělesa na určité vlnové délce (jedná se o plochu pod izotermou, *P* nebo *I* se často označuje E).



Obrázek 8: Diagram Stefanův – Boltzmannova zákona

Zdroj: Pavelek et al, 2007

Pro šedá tělesa, neboli nedokonalé zářiče, lze Stefanův – Boltzmannův zákon přepsat jako:

$$P = \varepsilon \sigma T^4,$$

Kde: ε je emisivita tělesa.

1.3.6 Wienův zákon posuvu

Wilhelm Carl Werner Otto Fritz Franz Wien byl německý fyzik, který za pomoci termodynamických úvah odvodil Wienův posunovací zákon, který říká: S rostoucí teplotou zářiče se posouvá maximální hodnota spektrální hustoty zářivého toku ke

kratším vlnovým délkám. To znamená, čím teplejší je těleso, tím vysílá záření na vyšších frekvencích (kratších vlnových délkách) (Pavelek et al, 2007; Záření absolutně…, 2009).

Matematicky je Wiennův posuvný zákon formulován vztahem:

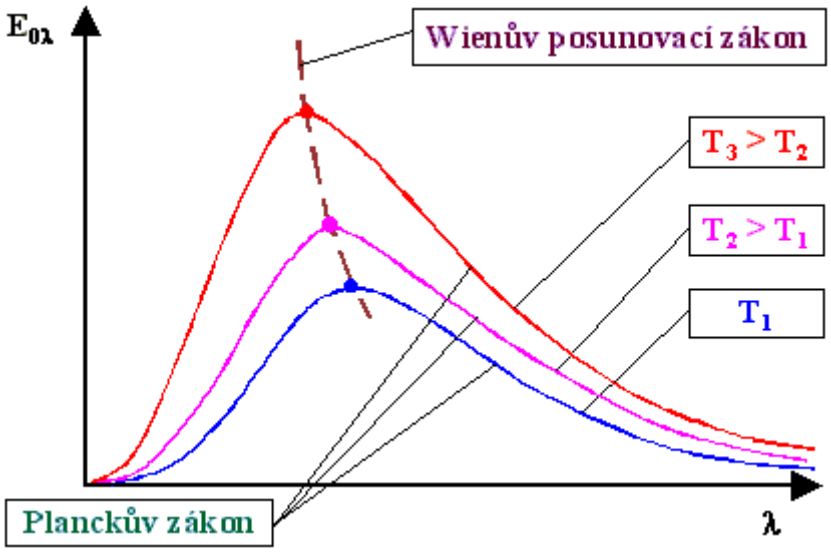
$$\lambda_{max} \,.\, T = b$$

Kde: λ_{max} je maximální vlnová délka spektrální hustoty zářivého toku při maximální teplotě zářiče

T je termodynamická teplota uváděná v Kelvinech

b je Wiennova konstanta jejíž hodnota je: $2{,}8978 \,.\, 10^{-3} m.K$

Wienův posunovací zákon v diagramu (Obrázek č. 9) závislosti spektrální hustoty zářivého toku absolutně černého tělesa na vlnové délce záření (Pavelek et al, 2007):



Obrázek 9: Diagram Wienova posunovacího zákona

Zdroj: Pavelek et al, 2007

Pro odvození zákona lze začít s tvarem funkce, který použil Wien jako první:

$$M_{0\lambda} = \frac{1}{\lambda^5} \varphi(\lambda \mathrm{T}) \,,$$

Kde: φ je funkce jediné proměnné: $\lambda \,.\, \mathrm{T}$.

To řeší otázku, kterou vlnovou délku vyzařuje černé těleso nejsilněji při dané teplotě. To podmiňuje vztah:

$$\frac{\partial M_{0\lambda}}{\partial \lambda} = 0,$$

to znamená:

$$-\frac{5}{\lambda^6}\varphi(\lambda \mathrm{T}) + \frac{1}{\lambda^5}\varphi'(\lambda \mathrm{T}) \,.\, T = 0,$$

Upraveno:

$$\lambda \mathrm{T} \,.\, \varphi'(\lambda \mathrm{T}) - 5\varphi(\lambda \mathrm{T}) = 0$$

Kde: φ'je derivací funkce φ podle λ. Můžeme určit λ_{max} za předpokladu, že známe nejméně jeden kořen rovnice $\lambda \,.\, \mathrm{T}$. Wien tento kořen označil písmenem b. Tím se dostáváme k finální podobě Wienova posuvného zákona (Pavelek et al, 2007):

$$\lambda_{max} \,.\, T = b$$

Wien se též snažil odvodit funkci $\varphi(\lambda \mathrm{T})$. To se mu podařilo za použití klasické statistiky a vyšla mu závislost (tzv. Wienův zákon):

$$\varphi(\lambda T) = c_1 e^{\frac{c_2}{\lambda T}}$$

Kde: c_1 a c_2 jsou konstanty

Tento vzorec platí pouze pro kratší vlnové délky (tzn. spektrum, které vyzařuje černé těleso při nízkých teplotách). Pro delší vlnové délky černého tělesa teoreticky odvodil Rayleigh a Jeans (Pavelek et al, 2007):

$$\varphi(\lambda T) = c_3 \lambda T$$

Kde: c_3 je konstanta

To, ale vedlo k ultrafialové katastrofě, to znamená, že snižující se vlnová délka vedla k neomezené intenzitě vyzařování, neboť:

$$M_{0\lambda} = \frac{c_3 T}{\lambda^4}$$

Vše vyřešil, až Max Planck, který dokázal spojit Wienův a Rayleigh-Jeansův zákon do jednoho tvaru.

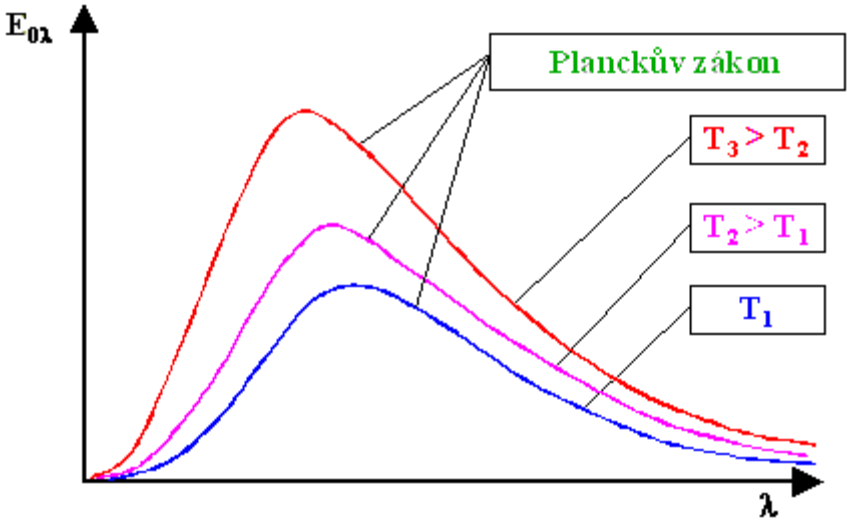
1.3.7 Planckův vyzařovací zákon

Max Planck byl německý fyzik, kterému se povedlo na základě kvantové teorie a v souladu se zákony pravděpodobnosti odvodit vyzařovací zákon. Při odvození opustil v té době uznávaný předpoklad, který říkal, že energie je libovolně dělitelná. Planckova hypotéza tedy zní: Záření o frekvenci *f* může být vyzařováno, nebo pohlcováno, jen po kvantech energie o velikosti (Pavelek et al, 2007; Záření absolutně…, 2009):

$$E = h \,.\, f$$

Kde: *h* je Planckova konstanta rovna: $(6{,}6256 \pm 0{,}0005) \,.\, 10^{-34}\, J.s$

Spektrální hustota zářivého toku dokonale černého tělesa v závislosti na vlnové délce záření a teplotě zářiče (Obrázek č. 10):



Obrázek 10: Diagram Planckova zákona

Zdroj: Pavelek et al, 2007

Pro odvození zákona začneme spojením Wienovy a Rayleigh-Jeansovy formule. Nejprve si lze formulovat Rayleigh-Jeansův zákon, který je platný pro dlouhé vlnové délky s velkým počtem fotonů s nízkou energií. Převažují vlnové složky. Zářivý výkon připadající na $1\ m^2$ povrchu černého tělesa a na jednotkový interval vlnové délky je (Pavelek et al, 2007; Záření absolutně…, 2009):

$$B_\lambda(T) = \frac{2ck_BT}{\lambda^4}$$

Kde: λ je vlnová délka

T je absolutní teplota zářiče

c je rychlost světla

k je Boltzmanova konstanta

Častěji se setkáváme s jiným zápisem, který se vyjadřuje za pomoci kmitočtu ν, ten se využívá v radioastronomii:

$$B_\lambda(T) = \frac{2\,\nu k_B T}{c^2}$$

Nyní můžeme začít s odvozením zákona:

$$\varphi(\lambda T) = \frac{c_1}{e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1}$$

Pro mále hodnoty λT bude:

$$e^{\frac{c_2}{\lambda T}} \gg 1$$

Tím můžeme jedničku zanedbat a získáme Wienův zákon. Pro velké hodnoty λT se lze omezit jen na dva členy:

$$e^{\frac{c_2}{\lambda T}} \approx 1 + \frac{c_2}{\lambda T}$$

Proto:

$$\varphi(\lambda T) = \frac{c_1}{1 + \frac{c_2}{\lambda T} - 1} = \frac{c_1}{c_2}\lambda T$$

Nyní lze položit: $c_3 = \frac{c_1}{c_2}$ a dostaneme se k Rayleigh-Jeansovu zákonu. Takto se Planck dopracoval k výrazu, který vyhovoval všem vlnovým délkám. Teoretické zdůvodnění bylo nesmírně složité z toho důvodu, že Planck nepracoval s klasickým předpokladem, že střední energie všech zářičů jsou stejné a rovné kT. Uvažoval, že

střední energie zářičů závisí na jejich frekvenci (Pavelek et al, 2007; Záření absolutně…, 2009):

$$\langle w \rangle = \frac{hv}{e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1}$$

Tento vztah plyne z Planckovy kvantové hypotézy. Jestliže

$$v = \frac{c}{\lambda}$$

Kde: c je rychlost světla ve vakuu, která je rovna 299 792 458 m/s

Dostaneme v Planckově zákoně dva vztahy pro: c_1 a c_2:

$$c_1 = 2\pi hc^2$$

$$c_2 = \frac{hc}{k}$$

Kde: k je Boltzmannova konstanta

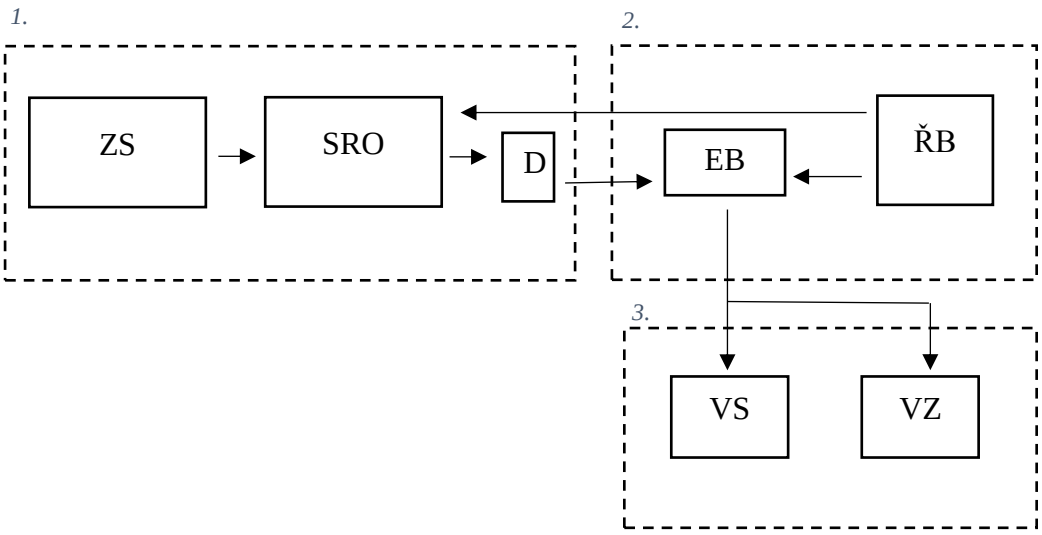
Konečný tvar Planckova zákona pro spektrální rozdělení monochromatických vyzařování černého tělesa je:

$$M_{0\lambda} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{hc}{k\lambda T}} - 1}$$

1.4 Infrakamera, její funkce a princip na kterém pracuje

Infrakamera je přístroj, který je schopen bezkontaktně a bez jakéhokoliv poškození tkáně detekovat infračervené záření (viz Obrázek č.11). To posléze převede na elektrický signál, který následně zobrazí v takovém spektru barev, které je schopné lidské oko pozorovat. Infrakamera využívá toho, že každé těleso v našem vesmíru má větší hodnotu nežli 0 kelvinů, to znamená, že emituje infračervené záření. Kvůli tomu, že naše oko je schopno zaznamenávat záření o vlnové délce pouze od 380 do 760 nm, bylo nutno vyrobit přístroj, který nám infračervené záření zobrazí (Pavelek et al, 2007; Usamentiaga, 2014).

Čím větší je teplota tělesa, tím více vyzařuje infračerveného záření. Infrakamera je schopna toto záření zachytit na stejném principu, jako pracuje video kamera, která snímá viditelné spektrum záření. To vše je schopna zachycovat v absolutní tmě. Za pomoci algoritmu je schopna kamera interpretovat data a vytvořit obraz. Obraz zobrazuje přibližnou teplotu tělesa, kamera totiž nezpracovává data pouze z tělesa, ale zaměřuje se ve skutečnosti na zpracování oblastí obklopující těleso, nežli na snímání aktuální teploty objektu (Pavelek et al, 2007; Usamentiaga, 2014).



Obrázek 11: Blokové schéma infrakamery
Zdroj: Vlastní tvorba

Kde: ZS je zobrazovací soustava

SRO je systém rozkladu obrazu

D je detektor

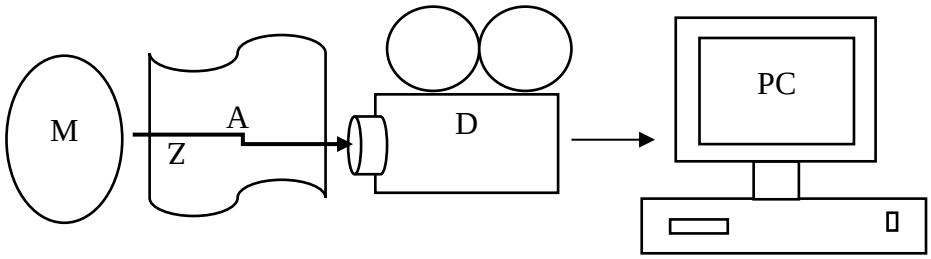
EB je elektronický blok

ŘB je řízení barev

VS je výstup pro zpracování a záznam signálu

VZ je výstup pro zobrazení

Průběh snímání je vyobrazen na obrázku č. 12, na kterém je vidět, jak infračervené záření prochází atmosférou a je detekováno v detektoru, kde dochází k převedení na elektrický signál, který je posléze vyobrazen na monitoru. V posledních letech se začaly upřednostňovat maticové detektory, které se ukázaly jako výkonnější, nežli jejich starší předchůdce, který pracoval s rozkladem světla (Pavelek et al, 2007; Battalwar et al, 2015).



Obrázek 12: Bezdotykové snímání pomocí infrakamery

Zdroj: Vlastní tvorba

Kde: M je snímaný objekt

Z je infračervené záření

A je atmosféra

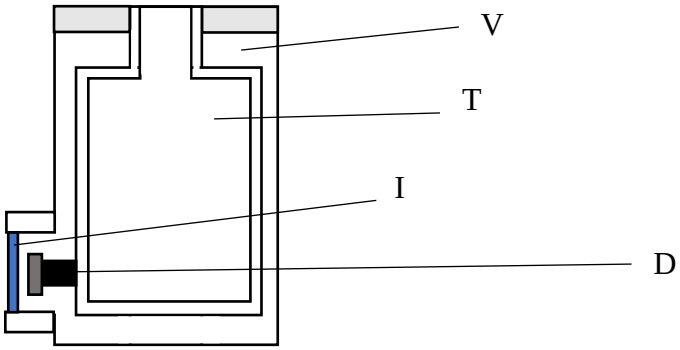
D je detektor

PC je počítač umožňující zpracování a následné zobrazení

1.4.1 Detektor

Nejdůležitější součástí kamery je detektor. Je nutné stanovit potenciální hladinu tepla nebo teploty a prostorové rozlišení. Detektory jsou dvojího typu (Pavelek et al, 2007; Battalwar et al, 2015):

1. Zvýšení teploty, které je způsobeno infračerveným zářením, zahřívá detektor. Posléze jsou spuštěny další fyzikální mechanismy, které nám určují míru záření, která dopadá na detektor.
2. K vytvoření nosičů náboje, které se generují napříč detektorem, je nutné, aby fotony interagovaly na atomové nebo molekulární úrovni s materiálem detektoru. V tomto případě je pokaždé foton absorbován elektronem, a proto dochází k nárůstu energie v elektronu. Po absorbování energie se elektron posouvá z jednoho orbitu na druhý. Tento detektor se nazývá fotonový nebo kvantový detektor.

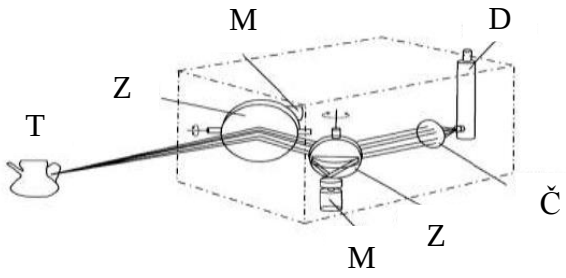


Obrázek 13: Dusíkem chlazený detektor infračerveného záření
Zdroj: Vlastní tvorba

Kde: V – vakuum
T – tekutý dusík
I – infračervené okno
D – detektor

1.4.2 Mechanismus rozkladu obrazu

Za pomoci čoček, které jsou řízeny precizními motory je na detektoru vytvořen obraz. Máme zde tři typy skenovacího systému, jak je patrné z jednodimensionálního uspořádání oscilujícího zrcadla skeneru. U prvního uspořádání je mezi optickým systémem a detektorem skener. Druhé uspořádání, kde je místo mezi vnějším tělesem a optickým systémem, který vytváří obraz, zaplněno skenerem. V posledním případě je skener uložen mezi ohniskovou předozadní částí a zadního konce obraz tvořícího optického systému. Mechanismus skenování je zobrazen na obrázku č. 14. Jsou na něm dvě zrcadla osazená motory. Na pravém konci je infračervený detektor. Je zde jediný způsob, jak naskenovat zorné pole kamerou s jedním detektorem – levé zrcadlo snímá vertikální osu a pravé zrcadlo snímá horizontální osu. Proto se pro snímání celého zorného pole používají zrcadla osazená motory (Battalwar et al, 2015).



Obrázek 14: Mechanismus skenování

Zdroj: Battalwar et al, 2015

Kde: T je těleso

Z je zrcadlo

M je motor

Č je čočka

D je detektor

Závěrem je vyžadováno externí zobrazení. K tomu nám poslouží obrazovka počítače nebo speciální displej na přístroji. Přístroj může být monochromatický nebo barevný, ten nám zobrazí rozdílnou teplotu rozdílnou barvou (Battalwar et al, 2015).

1.4.3 Termogram

Termogram jako termovizní snímek (viz Obrázek č.7), který nám umožňuje sledovat infračervené záření, které je jinak neviditelné. Termovizní snímek je vyobrazen za pomoci škály barev, které se přiřazují různé škále teplot. Tím se termogram stává pro lidské oko viditelným. Škály barev lze měnit v závislosti na tom, jaká místa chceme zviditelnit. To se děje na počítači, který používá adekvátní software. Standartní škály používané pro termogramy jsou (Battalwar et al, 2015; Zhang et al, 2015):

1. železo
2. duha
3. stupeň šedi

Termogramy se dělí na dvě skupiny (Battalwar et al, 2015; Zhang et al, 2015):

a. Radiometrické: Umožňují měření teploty a upravování parametrů, jako jsou: vzdálenost objektu, emisivita, údaje o atmosféře (její propustnost) atd. To vše je možné zpracovávat za pomoci software i po jejich uložení v počítači nebo infrakameře. Tyto snímky umožnují měření hodnot v určitém bodě. Jestliže ale bude tento snímaný bod větší nežli měřený objekt, bude toto snímání ovlivněno okolím. Tomuto jevu se dá předejít přiblížením k objektu nebo použitím většího rozlišení detektoru. Dnešní rozlišení termokamer je až 1024x1024 bodů. Posledním velmi důležitým parametrem je teplotní citlivost, která dosahuje i rozlišení rozdílu pouhých 0,05 ℃.
b. Neradiometrické: Umožnují pouhé zobrazení tepelného rozvrstvení. Není možné zpracovávat obrazy za pomocí softwaru, jako tomu je u radiometrických snímků.

2. Hypotézy a metodika výzkumu

2.1 Hypotézy a cíle

Bakalářská práce pracuje s dvěma hypotézami:

1. Aplikací kurikulárního procesu lze vytvořit významné složky projektového kurikula pro danou skupinu adresátu edukace.
2. Znalosti radiologických asistentů získané prostřednictvím znalostního testu v oblasti fyzikálních základů termografie budou mít rozdělení blízké normálnímu rozdělení.

Práce se snaží naplnit tři cíle:

1. Výběr teorie přenosu poznatků na úroveň radiologického asistenta a dalších příbuzných oborů.
2. Vytvoření edukačního textu, který bude respektovat vybranou teorii a odrážet zákony záření černého tělesa.
3. Zmapovat současný stav znalostí termografie u adresátů.

2.2 Metodika výzkumu

Metodika zpracování bakalářské práce je rozdělena do čtyř základních kroků:

1. Analýza současného vědeckého poznání v oblasti termografie.
2. Vytvoření testu pro ověření současných znalostí radiologických asistentů a následné statistické vyhodnocení těchto testů.
3. Vytvoření vlastního edukačního textu na základě analýzy současného vědeckého poznání v oblasti termografie a statistického vyhodnocení znalostního testu se zaměřením na možnost vytvoření významné složky projektového kurikula pro danou skupinu adresátů edukace, v tomto případě pro radiologické asistenty formou edukačního textu.

Tyto výše uvedené kroky odrážejí logiku kurikulárního procesu.

2.2.1 Konceptuální kurikulum

Je koncepce toho, co má být ve školách obsahem vzdělávání. V daném případě pro pochopení termografie je potřebné znát nejen úzkou problematiku infračerveného záření, ale i zákony týkající se záření černého tělesa prostřednictvím, vysvětlením a rozborem Stefanův-Boltztmanova zákona, Wienova zákona, Rayleigh-Jeansonova zákona a Planckova vyzařovacího zákona až ke konečnému tvaru Planckova zákona pro spektrálního rozdělení monochromatických vyzařování černého záření. Toto je podrobně rozebráno v kapitole 1.3 (Záškodný, 2009).

2.2.2 Zamýšlené kurikulum

Toto kurikulum přizpůsobuje poznatky výše uvedené tzn. objevy kvantové fyziky a fyziky elektromagnetického záření, předpokládaným fyzikálním a matematickým znalostem radiologického asistenta získané během studia na střední a vysoké škole. Přizpůsobení lze odečíst a modifikovat dle studijního plánu pro radiologické asistenty na Zdravotně sociální fakultě Jihočeské univerzity pro předměty matematiky a fyziky.

- **Základy matematiky**
    - Systém elementárních funkcí
    - Grafy a vlastnosti elementáních funkcí
    - Extrémy funkce, průběh funkce
    - Práce s mocninami a odmocninami, úpravy algebraických výrazů
    - Řešení základních typů rovnic
    - Řešení základních typů nerovnic
    - Spojitost a limita funkce
    - Derivace funkce
    - Parciální derivace
    - Určitý a neurčitý integrál
    - Metody integrace
    - Aplikace integrálního počtu
    - Základy vektorového počtu
    - Potřebnost matematiky pro studium radiologie (IS/STAG, 2014)
- **Radiologická fyzika 1 a 2**
    - Úvod do radiologické fyziky
    - Základní pojmy o ionizaci, složky profilu radiologického asistenta

- Potřebné matematické základy radiologické fyziky
- Potřebné základy diferenciálního počtu ve vazbě na přeměnový a absorpční zákon.
- Potřebné matematické základy radiologické fyziky
- Potřebné základy integrálního počtu ve vazbě na přeměnový a absorpční zákon.
- Struktura fyziky
- Klasická, kvantová a relativistická dimenze nestatistické fyziky
- Struktura radiologické fyziky
- Zdroje záření, interakce záření, detekce a dozimetrie záření úvodní přehled
- Základy klasické fyziky potřebné pro radiologickou fyziku
- Polohový vektor, pohybový zákon, pohybová rovnice, kinematika, dynamika
- Základy klasické fyziky potřebné pro radiologickou fyziku
- Zákony zachování, harmonický pohyb kmitavý
- Základy klasické fyziky potřebné pro radiologickou fyziku
- Základní pojmy o vlnění, vlnová funkce, vlnová rovnice
- Další potřebné matematické základy pro radiologickou fyziku
- Potřebné pojmy vektorového počtu a jejich aplikace ve fyzice a radiologické fyzice
- Aplikace na vazbu mezi pohybovým zákonem a pohybovou rovnicí v radiologii
- Přechod od pohybového zákona k pohybové rovnici a přechod opačný
- Standardní model elementárních částic a jejich interakcí a jeho místo v radiologii
- Fermiony, bosony, silná a slabá interakce, elektromagnetická a gravitační interakce
- Vlnově korpuskulární dualismus a jeho role v radiologii
- Vlnově korpuskulární dualismus fotonů, vlnově korpuskulární dualismus elektronů
- Základy relativistické fyziky potřebné pro radiologii
- Klasická fyzika, speciální teorie relativity, obecná teorie relativity a jejich místo v radiologické fyzice

- Struktura radiologické fyziky z hlediska její klasické a relativistické dimenze Z tohoto výčtu studijních plánů aplikované matematiky a radiologické fyziky vyplývá, že teoretické podklady pro termografii jsou v nich v podstatě obsaženy, otázkou je pouze nasměrování jejich obsahu směrem k této metodě.
- Kmitání a vlnění v radiologické fyzice
- Elektromagnetické pole v radiologické fyzice
- Kvantová optika v radiologické fyzice
- Kvantová mechanika elektronu v radiologické fyzice
- Jaderná fyzika v radiologické fyzice
- Zdroje ionizujícího a neionizujícího záření
- Interakce záření s prostředím fyzikálním, chemickým a biologickým
- Detekce a dozimetrie záření a jejich význam pro radiologickou fyziku
- Fyzikální základy zobrazovacích metod
- Fyzikální základy radiodiagnostiky a radioterapie souhrn (IS/STAG, 2014)

2.2.3 Projektové kurikulum

Edukační text je v dané bakalářské práci podstatnou složkou projektového kurikula. Na základě studia a analýzy současného vědeckého poznání a jeho převedením do sdělitelné formy byl vytvořen edukační text: „Fyzikální základy termografie pro radiologické asistenty“, který by měl odpovídat jejich úrovni znalostem fyziky a matematiky.

2.2.4 Implementované kurikulum – 1

Vzhledem k tomu, že jedním z cílů této bakalářské práce bylo vytvoření edukačního textu a tím naplnění složky projektového kurikula, je problematika implementovaného kurikula – 1 jenom hypotetická, protože toto kurikulum v sobě obsahuje přípravu na výuku a ve své podstatě ověření edukační funkce vytvořeného edukačního textu. V praxi by mohlo toto proběhnout následným způsobem. Všech pětadvacet respondentů, kteří byli tak vstřícní, věnovali mi svůj čas a vyplnili znalostní dotazník, bych spolu s poděkováním osobně oslovil a předal edukační text s žádostí o jeho laskavé přečtení a prostudování. A vzhledem k jejich pracovnímu vytížení, by byl interval prostudování

alespoň 3 týdny s následným vybráním tohoto textu a předaní k vyplnění druhého pozměněného znalostního testu na toto téma se zaměřením na otázky, které měli v prvním testu největší chybovost. Tím by mělo dojít k ověření hodnoty a efektivity edukačního textu. Druhým možným způsobem, a pravděpodobně schůdnějším, s pravděpodobně s početně vyšší skupinou respondentů, by bylo toto provést od počátku prvního testu přes edukační text až po druhý test u studentů zimního semestru třetího ročníku oboru radiologický asistent na univerzitách a vysokých školách v České republice.

2.2.5 Implementované kurikulum – 2

Toto kurikulum zkoumá dosažené výsledky edukačním procesem. Tento bod není naplněn a vysvětlení této skutečnosti je vyjasněno včetně možnosti jeho naplnění v předešlém odstavci 2.2.4. A ani nebylo cílem této práce.

2.3 Statistické vyhodnocení dotazníku

Cílem práce není vyčerpávající podrobný rozbor všech vhodných dostupných statistických metod a postupů. V daném případě této práce jsou tyto prostředkem k dosažení cílů výzkumu a ověření hypotézy. Následně proto uvedu vždy tyto postupy při konkrétním použití statistického vyhodnocení (Záškodný, 2012; Dorda, 2013; Záškodný et al, 2016).

2.3.1 Formulace statistického šetření

- Hromadný náhodný jev – v tomto případě měření teoretických znalostí radiologických asistentů v oblasti termografie
- Statistická jednotka – radiologický asistent
- Statistický znak – rozsah znalostí v oblasti termografie
- Základní statistický soubor – 25 radiologických asistentů
- Výběrový statistický soubor – 25 radiologických asistentů (Hendl, 2000; Záškodný et al, 2016)

2.3.2 Škálování

V daném případě bylo použito kvantitativně metrické škálování. Provedeno bylo dvacet pět měření. Dosažené počty bodů byly v intervalu $< 6; 17 >$. Pro účely tohoto

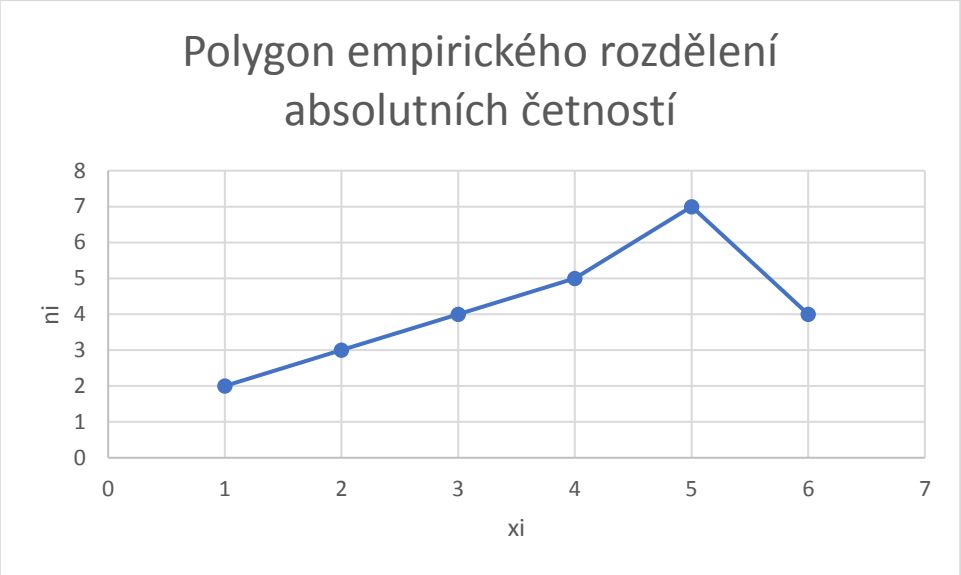
statistického měření je zvolena kvantitativní metrická škála. Výčet jednotlivých škál je následující: $(-\infty; 7>, <8; 9>, <10; 11>, <12; 13>, <14; 15>, <16; \infty)$.

2.3.3 Elementární statistické zpracování

Tabulka 15: Elementární statistické zpracování

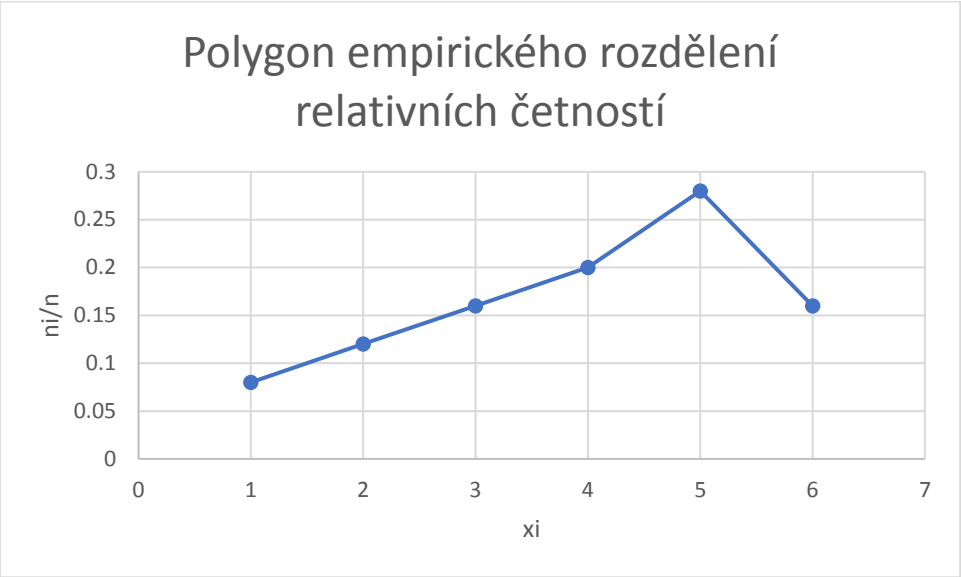
x_i	stř. int.	n_i	$\sum n_i$	$\frac{n_i}{n}$	$\sum \frac{n_i}{n}$	$n_i x_i$	$n_i x_i^2$	$n_i x_i^3$	$n_i x_i^4$
$(-\infty; 7>$	6,5	2	2	0,08	0,08	13	84,5	549,25	3570,125
$<8; 9>$	8,5	3	5	0,12	0,2	25,5	216,75	1842,375	15660,19
$<10; 11>$	10,5	4	9	0,16	0,36	42	441	4630,5	48620,25
$<12; 13>$	12,5	5	14	0,2	0,56	62,5	781,25	9765,625	122070,3
$<14; 15>$	14,5	7	21	0,28	0,84	101,5	1471,75	21340,38	309435,4
$<16; \infty)$	17	4	25	0,16	1	68	1156	19652	334084
$\sum$		25				312,5	4151,25	57780,13	833440,3

Zdroj: Vlastní výzkum



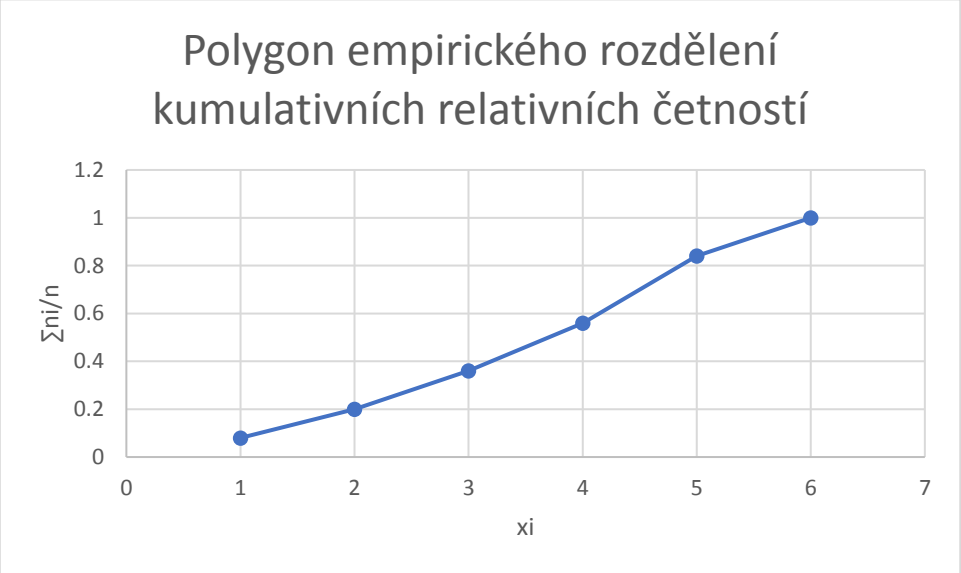
Obrázek 16: Polygon empirického rozdělení absolutních četností

Zdroj: Vlastní výzkum



Obrázek 17: Polygon empirického rozdělení relativních četností

Zdroj: Vlastní výzkum



Obrázek 18:Polygon empirického rozdělení kumulativních četností

Zdroj: Vlastní výzkum

Empirické parametry:

1. Parametr polohy – neboli aritmetický průměr je určen momentem prvního řádu O_1 a ukazuje nám umístění empirického rozdělení četností na vodorovné ose. Vypočítá se za pomocí následujícího vzorce (Záškodný et al, 2016):

$$O_1 = \bar{x} = \frac{1}{n}\sum n_i x_i = \frac{312{,}5}{25} = 12{,}5$$

2. Parametr proměnlivosti (variability) – neboli empirický rozptyl je určen centrálním momentem druhého řádu C_2 a jeho odmocnina je rovna směrodatné odchylce. Vypočítá se za pomoci následujícího vzorce (Záškodný et al, 2016):

$$O_2 = \frac{1}{n}\sum n_i x_i^2 = \frac{4151{,}25}{25} = 166{,}05$$

$$C_2(x) = \frac{1}{n}\sum n_i (x_i - O_1)^2 = O_2 - O_1^2 = 166{,}05 - 156{,}25 = 9{,}8$$

3. Směrodatná odchylka nám ukazuje výpovědní hodnotu aritmetického průměru. V případě, kdy je směrodatná odchylka nízká, tak výpovědní hodnota aritmetického průměru je vysoká. V opačném případě je to tomu naopak. Vypočítá se za pomoci následujícího vzorce (Záškodný et al, 2016):

$$S_x = \sqrt{C_2} = 3{,}1304951$$

4. Parametr šikmosti se nejčastěji určuje za pomoci normovaného momentu třetího řádu N_3. V případě, že je parametr kladný, tak prvky škály leží na levé straně od aritmetického průměru a mají vyšší četnosti. V opačném případě je tomu naopak. Vypočítá se za použití následujícího vzorce (Záškodný et al, 2016):

$$O_3 = \frac{1}{n}\sum n_i x_i^3 = \frac{57780{,}13}{25} = 2311{,}2052$$

$$C_3(x) = \frac{1}{n}\sum n_i (x_i - O_1)^3 = O_3 - 3O_2O_1 + 2O_1^3$$
$$= 2311{,}2052 - 3 \times 166{,}05 \times 12{,}5 + 2 \times 1953{,}125$$
$$= -9{,}41980$$

$$N_3 = \frac{C_3}{C_2\sqrt{C_2}} = \frac{-9{,}41980}{9{,}8\sqrt{9{,}8}} = -0{,}307045380$$

5. Parametr špičatosti se nejčastěji určuje za pomoci normovaného momentu čtvrtého řádu N_4. Při špičatějším rozdělení v daném rozptylu odpovídá vyšší hodnotě koeficientu nežli rozdělení plošnému. Vypočítá se za použití následujícího vzorce (Záškodný et al, 2016):

$$O_4 = \frac{1}{n}\sum n_i x_i^4 = \frac{833440{,}3}{25} = 33337{,}612$$

$$C_4(x) = \frac{1}{n}\sum n_i (x_i - O_1)^4 = O_4 - 4O_3O_1 + 6O_2O_1^2 - 3O_1^4$$
$$= 33337{,}612 - 4 \times 2311{,}2052 \times 12{,}5 + 6 \times 166{,}05 \times 156{,}25$$
$$- 3 \times 24414{,}0625 = 207{,}0395$$

$$N_4 = \frac{C_4}{C_2^2} = \frac{207{,}0395}{96{,}04} = 2{,}1557632236$$

6. Exces je srovnání špičatosti empirického rozdělení se špičatostí normovaného normálního rozdělení. Jeli je exces kladný, pak je empirické rozdělení špičatější (Záškodný et al, 2016).

$$E_x = N_4 - 3 = -0{,}844236776$$

2.3.4 Neparametrické testování – Pearsonův test χ^2

Jako první se musí odhadnout neznámý parametr exponenciálního rozdělení μ a to na základě výběru. Díky němu je možné specifikovat nulovou a alternativní hypotézu (Dorda, 2013; Záškodný et al, 2016).

$$\check{\mu} = \frac{1}{\bar{x}} = \frac{1}{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} n_i z_i} = \frac{n}{\sum_{i=1}^{n} n_i z_i} = \frac{25}{2 \times 6{,}5 + \cdots + 4 \times 17} = 0{,}08$$

Po provedení odhadu parametru rozdělení je možné specifikovat hypotézy:

1. H_0 = náhodný výběr pochází z exponenciálního rozdělení s parametrem: $\mu = 0{,}08$
2. $H_a =$ náhodný výběr nepochází z exponenciálního rozdělení s parametrem: $\mu = 0{,}08$

Nyní si stanovíme hodnoty distribuční funkce exponenciálního rozdělení pro všechny horní hranice h_i (Dorda, 2013):

$$F(h_1) = 1 - e^{-0{,}08 \times 7} = 0{,}429$$

$$F(h_2) = 1 - e^{-0{,}08 \times 9} = 0{,}513$$

$$F(h_3) = 1 - e^{-0{,}08 \times 11} = 0{,}585$$

$$F(h_4) = 1 - e^{-0{,}08 \times 13} = 0{,}647$$

$$F(h_5) = 1 - e^{-0{,}08 \times 15} = 0{,}699$$

$$F(h_6) = 1$$

Dalším krokem je stanovení relativní četnosti, které je možné díky znalosti hodnot distribuční funkce (Dorda, 2013):

$$p_{0,1} = F(h_1) = 0{,}429$$

$$p_{0,2} = F(h_2) - F(h_1) = 0{,}084$$

$$p_{0,3} = F(h_3) - F(h_2) = 0{,}072$$

$$p_{0,4} = F(h_4) - F(h_3) = 0{,}062$$

$$p_{0,5} = F(h_5) - F(h_4) = 0{,}052$$

$$p_{0,6} = F(h_6) - F(h_5) = 0{,}301$$

Tabulka 19: Přehled výpočtů Pearsonova χ^2- testu dobré schody

x_i	stř. int.	n_i	hor. hran. h_i	Hodnota distribuční funkce $F(h_i)$	Teoretická relativní četnost $p_{0,i}$	Teoretická četnost $np_{0,i}$
$(-\infty; 7>$	6,5	2	7	0,429	0,429	10,725
$< 8; 9>$	8,5	3	9	0,513	0,084	2,1
$< 10; 11>$	10,5	4	11	0,585	0,072	1,8
$< 12; 13>$	12,5	5	13	0,647	0,062	1,55
$< 14; 15>$	14,5	7	15	0,699	0,052	1,3
$< 16; \infty)$	17	4	∞	1	0,301	7,525
$\sum$		25			1	25

Zdroj: Vlastní výzkum

Podle pravidla sloučení intervalů menších, nežli 5 sjednotíme 2., 3., 4. a 5. interval. Z toho nám vyplývá další tabulka (Dorda, 2013):

Tabulka 20: Přehled výpočtů experimentální hodnoty Pearsonova χ^2- testu χ^2_{exp}

n_i	Teoretická četnost $np_{0,i}$	Experimentální hodnota χ^2 testu
2	10,725	7,098
19	6,75	22,231
4	7,525	1,651
	25	30,98

Zdroj: Vlastní výzkum

Nyní je zapotřebí zjistit teoretickou hodnotu Pearsonova χ^2 testu:

$$\chi^2_{teor} = \chi^2_{k-r-1} = \chi^2_{3-1-1} = \chi^2_1 \rightarrow \chi^2_1 = 3{,}84 \text{ pro } \alpha = 0{,}05$$

Sestavení intervalu spolehlivosti pro hladinu významnosti $\alpha = 0{,}05$:

$$\chi^2_{exp} = 30{,}98 \in W \in < 3{,}84; \infty)$$

Z toho plyne zamítnutí nulové hypotézy H_0, přijetí alternativní hypotézy H_a.

3. Diskuze

3.1 Diskuze ověření první hypotézy

Tato hypotéza byla vytvořena následovně:

- Aplikací teorie kurikulárního procesu lze vytvořit významné složky projektového kurikula pro danou skupinu adresátů edukace

V daném případě se jednalo o vypracování edukačního textu, který shrnuje základní teoretické poznatky ve vztahu k termografii a odráží zákony záření černého tělesa. Vytvořením tohoto textu byla tato hypotéza potvrzena.

Zjištění jeho efektivity a účinnosti nebylo sice součástí této hypotézy ani cílem práce, ale bylo jistě možné, a to pokračováním v kurikulárním procesu edukační transformací T^4. Například opakováním vědomostního testu na toto téma u dostatečného vzorku studentů bakalářského studia oboru Radiologický asistent. Následným rozdáním výše uvedeného edukačního textu k prostudování adresátům, a v dostatečném časovém odstupu zopakování vědomostního testu. Statistickým zhodnocením a porovnáním obou testů by byla ukončena edukační transformace a naplněno implementované kurikulum – 2 a současně by mohlo dojít k zhodnocení didaktické úrovně edukačního textu.

3.2 Diskuze ověření druhé hypotézy

Tato hypotéza byla vytvořena následovně:

- Znalosti adresátů budou mít v oblasti fyzikálních základů termografie teoretické rozdělení blízké rozdělení normálnímu

Statistické šetření znalostí radiologických asistentů vědomostním testem prokázalo, že nelze přijmout nulovou hypotézu H_0 – znalosti adresátů budou mít rozdělení blízké normálnímu rozdělení. Jinými slovy, že pravděpodobnost průměrných výsledků bude nejvyšší, nižší a vyšší dosažené bodové výsledky budou spojeny s pravděpodobnostmi nižšími.

Pearsonův χ^2 test dobré shody, test normality ukázal, že pozorovaná hodnota testové statistiky, je vyšší než kritická hodnota testu, neleží tedy v oboru přijetí, proto na hladině významnosti $\alpha = 0{,}05$ zamítáme nulovou hypotézu H_0 a přijmáme alternativní hypotézu H_a. Tuto skutečnost potvrzuje i parametr šikmosti $N_3 = -0{,}307$ určující, kterým

směrem je naše proměnná asymetricky rozložena. Jelikož u daného souboru vyšla záporná, znamená to, že většina hodnot se nalézá nad průměrem, což je v souladu s přijetím alternativní hypotézy. Tedy adresáti měli lepší znalosti než byl hypotetický předpoklad. Parametr špičatosti s lehce vyšší hodnotou $N_4 = 2{,}15$ toto nevylučuje a záporná hodnota excesu $E_x = -0{,}84$ značí, že rozdělení výsledků daného souboru je rovnoměrnější a jeho křivka hustoty je plošší, než u normálního rozdělení. Také nízká hodnota směrodatné odchylky $S_x = 3{,}1$ ukazuje, že si jsou prvky souboru většinou navzájem podobné.

Maximální možný bodový zisk z testu byl 18 bodů. Nad hranici 12 bodů, což je 67 % úspěšnost v testu, dosáhlo 64 % adresátů. Obecně se při testech na vysokých školách bere jako hranice úspěšnosti okolo 70 %, v dané testované skupině tento procentní požadavek úspěšnosti splnilo 64 % adresátů. Tato skutečnost podporuje výsledek neparametrického testování s odmítnutím nulové hypotézy H_0 a ukazuje směrem k vyššímu rozdělení znalostí adresátů.

Následné dva grafy závislosti počtu správných odpovědí na délce praxe (viz Obrázek 21) a závislosti procenta správných odpovědí na věku (viz Obrázek 23) ukazují trend, že větší délka praxe a vyšší věk není nezbytně spojen s vyšší procentní úspěšností testu. Skupina adresátů do třiceti let a tedy s nižší délkou praxe, měla vyšší úspěšnost, vyrovnanější výsledky, než skupina nad třicet let s delší praxí. Přičemž skupina do třiceti let byla jedenácti členná a reprezentovala 44 % adresátů. Pravděpodobně tato úspěšná skupina profitovala z kratšího odstupu od ukončení studia na vysoké škole, kde byly testované teoretické fyzikální základy obsahem studijních plánů a implementovány studentům.

Druhý diagram (viz Obrázek 22) zachycuje počet adresátů správně odpovídajících na každou jednotlivou otázku. Z něho vyplývá, že nejvyšší chybovost byla u otázek č.: 2, 11, 12, 17.

Při nastavení limitu, aby správně odpovědělo na každou jednotlivou otázku minimálně 12 adresátů, což je přibližně 50 % skupiny, pak s tímto tvrzením lze souhlasit. Jejich výčet:

2) První termografické zobrazení lidského těla bylo provedeno v roce?

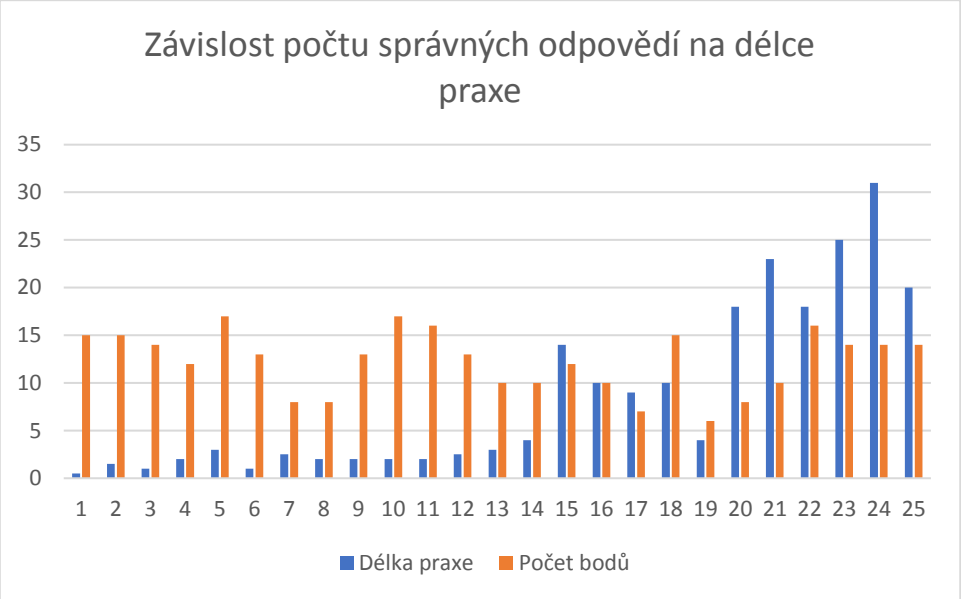
11) Stefanův-Boltzmannův zákon je vyjádřen rovnicí?

12) Stefanův-Boltzmannův zákon nám umožnuje vypočítat?

17) Kvanta elektronového záření se nazývají?

Proto byl při vytváření edukačního textu v problematice těchto více chybových otázek brán větší zřetel.

Obrázek 21: Grafické závislosti počtu správných odpovědí na délce praxe

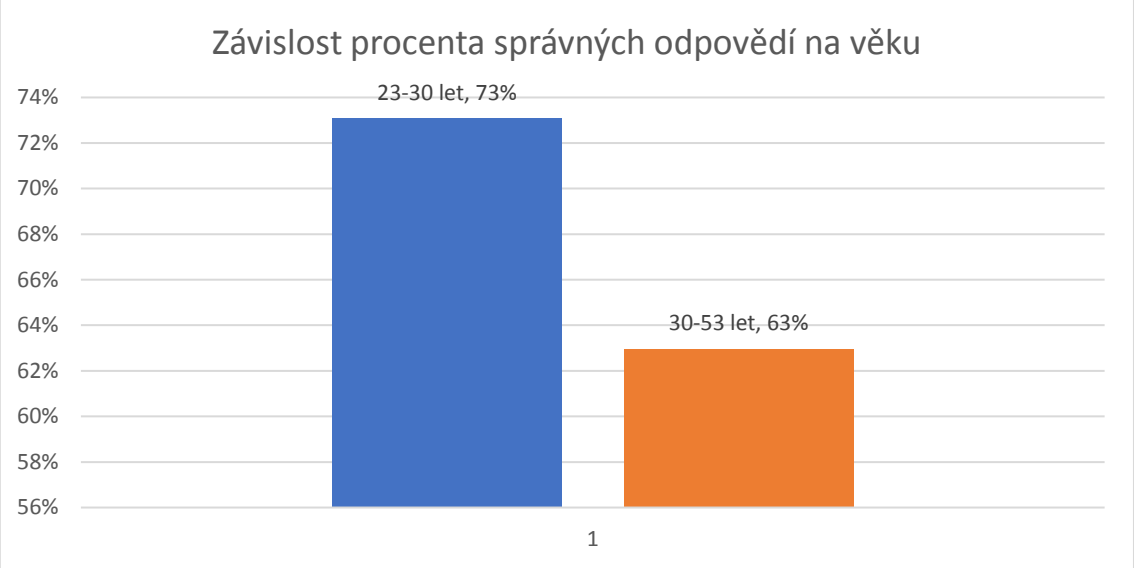


Zdroj: Vlastní výzkum

Obrázek 22: Grafické znázornění počtu správně odpovídajících adresátů na jednotlivé otázky

Zdroj: Vlastní výzkum

Obrázek 23: Grafické znázornění závislosti procenta správných odpovědí na věku



Zdroj: Vlastní výzkum

4. Závěr

Úkolem bakalářské práce bylo vytvoření edukačního textu pro radiologické asistenty na téma fyzikální základy termografie prostřednictvím aplikace teorie kurikulárního procesu. Sestavením tohoto edukačního textu (viz Příloha A) se potvrdila první hypotéza, že aplikací tohoto procesu lze vytvořit významnou složku projektového kurikula pro danou skupinu adresátů populace.

Výchozím bodem bylo konceptuální kurikulum, byl zkoumán a analyzován sdělitelný vědecký systém fyziky v oblasti elektromagnetického záření, optiky a kvantové fyziky se zaměřením na zákony záření černého tělesa. Byla i nutnost podrobného rozpracování definic a charakteristik infračerveného záření, Stefanova-Boltzmannova zákona, Wienova zákona posuvu, Rayleigh-Jeansonsonova zákona, Planckova vyzařovacího zákona a parametru emisivity. Obsahovou transformací T^2 konceptuálního kurikula bylo dosaženo zamýšleného kurikula, didaktického systému fyziky v oblasti aplikace na termografii. Výsledkem této transformace bylo přizpůsobení poznatků výše uvedených oblastí fyziky na předpokládanou úroveň radiologických asistentů, kde vodítkem byl i výsledek vědomostního testu na téma fyzikální základy termografie. Prostřednictvím kurikulární transformace T^3 bylo vytvoření edukačního textu (viz Příloha A). Tím bylo dosaženo cílového projektového kurikula.

Posledním cílem bylo zmapovat současný stav teoretických znalostí termografie u radiologických asistentů a ověřit druhou hypotézu, že jejich znalosti budou mít rozdělení blízké normálnímu rozdělení, tedy pravděpodobnost průměrných výsledků bude nejvyšší. Statistické šetření tuto hypotézu nepotvrdilo, naopak jeho výsledek ukazuje, že se testovaný soubor adresátů pohybuje mimo oblast normálního rozdělení, a to v oblasti výsledků nadprůměrných.

Kdyby se toto zjištění potvrdilo i na větším a více reprezentativním vzorku adresátů, pak by se dalo usuzovat, že v případě zavedení termografie do běžné klinické praxe by tu byla velmi dobrá teoretická připravenost již v praxi činných radiologických asistentů. To ale neznamená, že by se termografii a v této práci uvedeným teoretickým fyzikálním základům neměla věnovat náležitá pozornost již během bakalářského studia u studentů oboru Radiologický asistent. Tomu by mohl napomoci i v práci uvedený edukační text.

5. Seznam literatury

1. BATTALWAR, P., GOKHALE, J., UTKARSHA, B. 2015. Infrared Thermography and IR Camera. *International Journal of Research In Science & Engineering* 1 (3), 9–14. ISSN: 2394-8299.
2. BERZ, R. 2007. The Medical Use of Infrated – Thermography History and recent Applications. *DGZfP* 6 (4), 1–12. Dostupné z: http://www.ndt.net/article/dgzfp-irt-2007/Inhalt/v04.pdf
3. *Bezkontaktní měření teplot a oteplení*, 2011. [online] ElektroPrýmysl.cz Informace ze světa průmyslu a elektrotechniky. [cit. 2018-2-10]. Dostupné z: http://www.elektroprumysl.cz/merici-technika/bezkontaktni-mereni-teplot-a-otepleni
4. *Black Body Radiation Experiment Pdf*, 2018. [online] STAFFSEVEN. [cit. 2018-2-15]. Dostupné z: http://staffseven314.weebly.com/blog/black-body-radiation-experiment-pdf
5. BUISSON, F., 2016. *BASIC PRINCIPLES: of non-contact temperature measurement*. Berlin. BR-E2016-08-A.
6. DIAKIDES, N., BRONZINO, J. 2008. *Medical infrared imaging*. Boca Raton: CRC Press, 20 p. ISBN 13-08-493-9027-3.
7. DORDA, M. *Pearsonův χ^2 test dobré schody* [PDF]. 2013 [cit. 2018-03-11]. Dostupné z: http://homel.vsb.cz/~dor028/KMORII_5.pdf
8. *Elektromagnetické spektrum*, 2017. [online] PION. [cit. 2018-2-03]. Dostupné z: http://www.pion.cz/cs/clanek/elektromagneticke-spektrum
9. GAUSSORGUES, G. 1994 Infrared thermography. English language ed. New York: Chapman & Hall. ISBN 0412479001.
10. GRIGAR, J., 2000. *Dvě století infračervené astronomie* [online]. Praha: Fyzikálního ústavu AV ČR [cit. 2018-01-4]. Dostupné z: http://www.astronom.cz/grygar/200irast.htm
11. HALLIDAY, D., RESNICK, R., WALKER, J. 2013: *Fyzika 1 + 2*. 8. vydání. Praha. Brno: VUTIUM. 1248 s. ISBN: 978-80-2144-123-1.
12. HENDL, J. 2000. *Přehled statistických metod: analýza a metaanalýza* dat. 5. rozšířené vydání. Praha: Portál. ISBN 978-80-262-0981-2.

13. *Infrazařízení za druhé světové války*, 2010. [online] KROJC. [cit. 2018-1-06]. Dostupné z: https://www.fronta.cz/infrazarizeni-za-druhe-svetove-valky
14. IS/STAG portál. *Předmět - Radiologická fyzika 1* [online]. [cit. 2018-01-10]. Dostupné z: https://wstag.jcu.cz/portal/studium/moje-studium/index.html?pc_pagenavigationalstate=H4sIAAAAAAAAAGNgYGBkYDMyMrYwMBVmAAEAcmPoGhIAAAA*#prohlizeniAnchor
15. IS/STAG portál. *Předmět - Radiologická fyzika 2* [online]. [cit. 2018-01-10]. Dostupné z: https://wstag.jcu.cz/portal/studium/moje-studium/index.html?pc_pagenavigationalstate=H4sIAAAAAAAAAGNgYGBkYDMyMrYwMBVmAAEAcmPoGhIAAAA*#prohlizeniAnchor
16. IS/STAG portál. *Předmět - Základy matematiky* [online]. [cit. 2018-01-10]. Dostupné z: https://wstag.jcu.cz/portal/studium/moje-studium/index.html?pc_pagenavigationalstate=H4sIAAAAAAAAAGNgYGBkYDMyMrYwMBVmAAEAcmPoGhIAAAA*#prohlizeniAnchor
17. JONES, S., 2007. *The Evolution of Thermal Imaging Cameras: The World's Finest Manufacturers of Temperature, Pressure & Humidity, Test and Calibration Instruments.* [online]. West Chester Pike: A Shelby Jones Co. [cit. 2018-2-03]. Dostupné z: http://instrumentation.com/PDFS/EvolutionThermalImagingCameras.pdf
18. KÁBRT, J. 1979. *Stručný lékařský slovník*. Praha: Avicenum, zdravotnické nakladatelství, 368 s. ISBN: neuvedeno.
19. LUSAR, R., 1971. *Die deutschen Waffen und Geheimwaffen des 2. Weltkrieges und ihre Weiterentwicklung.* 5. stark überarb. und erweiterte Aufl. München: J.F. Lehmann. 446 s. ISBN-13: 978-3469003096.
20. LYSENKO, V. 2005. *Detektory pro bezdotykové měření teplot*. Praha: BEN-technická literatura, Senzory neelektrických veličin. 156 s. ISBN 80-7300-180-2.
21. MACHAČÍK, J., MACHAČÍKOVÁ, I., 2005. *Záření absolutně černého tělesa: Troška historie*. [online]. Dostupné z: http://www.gymhol.cz/projekt/fyzika/13_act/13_act.htm
22. MINKINA, W., DUDZIK, S. 2009. *Infrared thermography: errors anduncertainties*. Hoboken, NJ: J. Wiley, ISBN 978-0-470-74718-6.

23. PAVELEK, M., JANOTKOVÁ, E., ŠTĚTINA, J. 2007. *Vizualizační a optické metody*. [online]. Brno: VUT [cit. 2018-2-17]. Dostupné z: http://ottp.fme.vutbr.cz/~pavelek/optika/
24. RING, F., 2016. The Herschel Heritage to Medical Thermography. *Journal of Imaging* 13 (2), 1 – 8. doi: 10.3390//jimaging2020013.
25. RUDDON, R. 2012. *Basic infrared thermography principles*. S.l.: Reliability Web.com, 97 p. ISBN 978-0-9832258-1-2.
26. RUDDON, R. c2012. *Basic infrared thermography principles*. S.l.: Reliability Web.com, ISBN 978-0-9832258-1-2.
27. SPIELBERGER, W., 1993 *Panther & its variants. Atglen*, PA: Schiffer Military/Aviation History, 288 s. ISBN 0887403972.
28. SVATOŠ, Josef. 1998. *Zobrazovací systémy v lékařství*. Praha, Skriptum.
29. TOPILOVÁ, V. 1999 *Anglicko-český, česko-anglický lékařský slovník*. Praha: Grada, 878 s. ISBN 80-7169-284-0.
30. USAMENTIAGA, R., VENEGAS, P., GUEREDIAGA, J., VEGA, L., MOLLEDA, J., BULNES, F. 2014. Infrared Thermography for Temperature Measurement and Non-Destructive Testing. *Journal of Imaging* 13 (2), 2 – 4. doi: 10.3390/s140712305.
31. USAMENTIAGA, R., VENEGAS, P., GUEREDIAGA, J., VEGA, L., MOLLEDA, J., BULNES, F. 2014. Infrared Thermography for Temperature Measurement and Non-Destructive Testing. *Department of Computer Science and Engineering* 13 (2), 2 – 4. doi: 10.3390/s140712305.
32. VON LAUE, M. 1958. *Dějiny fyziky*. Praha: Orbis. 170 s. ISBN: neuvedeno.
33. *Záření absolutně černého tělesa*, 2009. [online] UTB. [cit. 2018-2-16]. Dostupné z: http://ufmi.ft.utb.cz/texty/fyzika_2/F2_10.pdf
34. ZÁŠKODNÝ, P. 2005 *Přehled základů teoretické fyziky (s aplikací na radiologii).* Bratislava: Didaktis, 264 s. ISBN 80-89160-25-5.
35. ZÁŠKODNÝ, P. 2009. *Kurikulární proces fyziky: (s přehledem základů teoretické fyziky).* 2. vydání. Ostrava: Algoritmus. 385 s. ISBN 978-80-902491-0-3.
36. ZÁŠKODNÝ, P. Data Mining Tools in Science Education [PDF]. 2012, [cit. 2018-02-23]. ISSN 1690-4524. Dostupné z: http://www.iiisci.org/journal/CV$/sci/pdfs/HMB711BO.pdf

37. ZÁŠKODNÝ, P., HAVRÁNKOVÁ R., HAVRÁNEK J., VURM V. 2016 *Základy statistiky (s aplikací na zdravotnictví)*. Praha: Curriculum, 254 s. ISBN 978-80-87894-12-5.
38. ZHANG, H., YANG, R., HE, Y., FOUDAZI, A., CHENG, L., TIAN, G. 2017. A Review of Microwave Thermography Nondestructive Testing and Evaluation. *Sensors.* 17 (5), 1-10. doi: 10.3390/s17051123 .
39. ZWIENER, V., MARTIŠ, L., HŮLKA, C., 2006. Termovize odhalujeme tepelné mosty. *Dektime*. 1 (1), 18 – 22. Dostupné z: https://atelier-dek.cz/docs/atelier_dek_cz/publikace/DEKTIME/dektime-2006-01.pdf

6. Seznam obrázků, grafů a tabulek

Obrázek 1: William Herschel 11
Obrázek 2: Vampir ZG 1229 12
Obrázek 3: Grafické znázornění didaktických transformací jednotlivých variantních forem kurikula 15
Obrázek 4: Elektromagnetické spektrum 16
Obrázek 5: Příklad modelu černého tělesa 17
Obrázek 6: Emisivita: černého tělesa, šedého tělesa a nešedého tělesa 19
Obrázek 7: Termogram vředu na noze 19
Obrázek 8: Diagram Stefanův – Boltzmannova zákona 22
Obrázek 9: Diagram Wienova posunovacího zákona 23
Obrázek 10: Diagram Planckova zákona 26
Obrázek 11: Blokové schéma infrakamery 29
Obrázek 12: Bezdotykové snímání pomocí infrakamery 30
Obrázek 13: Dusíkem chlazený detektor infračerveného záření 31
Obrázek 14: Mechanismus skenování 32
Tabulka 15: Elementární statistické zpracování 39
Obrázek 16: Polygon empirického rozdělení absolutních četností 39
Obrázek 17: Polygon empirického rozdělení relativních četností 40
Obrázek 18: Polygon empirického rozdělení kumulativních četností 40
Tabulka 19: Přehled výpočtů pearsonova $\chi 2$- testu dobré schody 44
Tabulka 20: Přehled výpočtů experimentální hodnoty pearsonova $\chi 2$- testu $\chi exp2$ 45
Obrázek 21: Grafické závislosti počtu správných odpovědí na délce praxe 48
Obrázek 22: Grafické znázornění počtu správně odpovídajících adresátů na jednotlivé otázky 48
Obrázek 23: Grafické znázornění závislosti procenta správných odpovědí na věku 49

7. Přílohy

Edukační text – základy termografie pro radiologické asistenty

Dotazník pro radiologické asistenty

Příloha A – edukační text

Fyzikální základy termografie pro radiologické asistenty

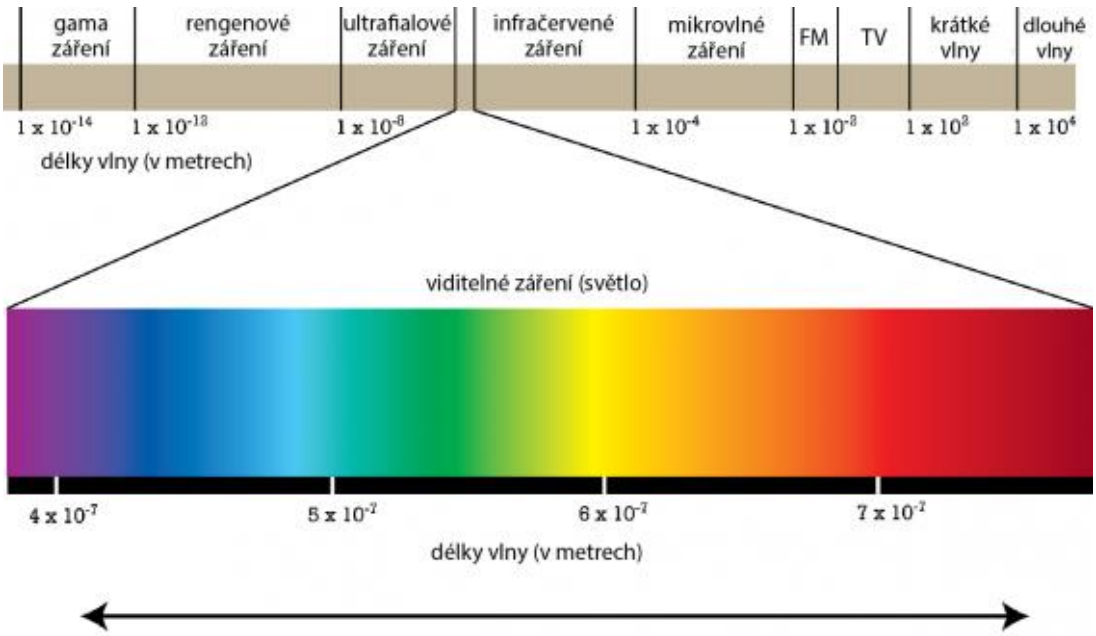
Termografie je metoda, která zobrazuje infračervené záření. Její název je složen ze dvou slov, řeckého thermé – teplo a latinského graphia, vycházejícího z řeckého grafó – píši, vyjadřující znázornění orgánu, zaznamenávání činnosti. Jedná se tedy o převedený do češtiny řecko – latinský výraz, velmi dobře vystihující podstatu metody. Medicínské využití termografie pracuje s tím, že lidské tělo tak jako všechna tělesa na Zemi, má větší teplotu než absolutní nula, to znamená více jak - 273,15 ℃. Tím pádem vyzařuje elektromagnetické (tepelné) záření, které je možno bezkontaktně zobrazit termokamerou. První infračervený obraz lidského těla byl prezentován prof. Czernym ve Frankfurtu nad Mohanem již v roce 1928.

Fyzikální princip termografie

Infračervené záření je formou elektromagnetického záření, které zahrnuje: radiové vlny, mikrovlny, ultrafialové záření, viditelné světlo, rentgenové záření a záření gama. Vlnová délka infračerveného záření je od 0,78 μm do vzdálenosti 1 μm. Infračervené záření je emitováno pohybem atomů a molekul na povrchu objektu, který má teplotu vyšší než je absolutní nula. Čím je teplota objektu větší, tím větší je intenzita vyzářeného infračerveného záření. Vyzařování tělesa je definováno jako poměr vyzářené energie emitované jakýmkoliv předmětem záření, které by bylo emitované černým tělesem při stejné teplotě. Energie absorbovaná ideálním černým tělesem při stejné teplotě se bude rovnat energii emitované. To bohužel není možné, protože v praxi tyto ideální podmínky znemožňují jak průchodnost, tak i odrazivost.

Elektromagnetické spektrum

Elektromagnetické záření vzniká při přeměnách energie v atomu. Jedná se o soubor všech vlnových délek záření. Jestliže atom získá nějakým způsobem vyšší energii, pak ji může vyzářit právě jako elektromagnetické vlnění. Elektromagnetického vlnění je několik druhů, které se od sebe liší vlnovou délkou neboli frekvencí. Vlnová délka určuje fyzikální vlastnosti záření. Mezi jednotlivými druhy záření není vždy ostrá hranice, někdy se vlnění prostupují, to je viditelné na obrázku:

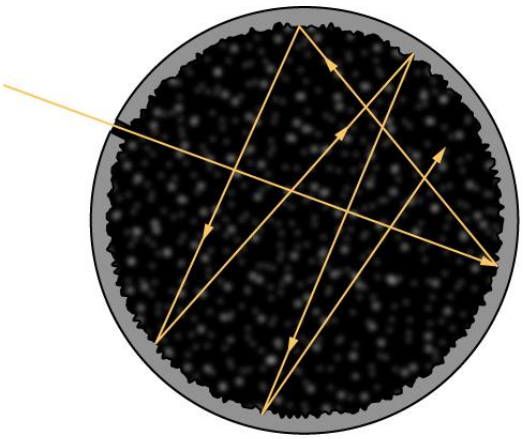


Pro námi požadované zobrazení je nejdůležitější infračervené záření, které se dá rozdělit podle vlnových délek na pět dílčích podoblastí:

1. blízká infraoblast, s označením: NIR o vlnové délce: 0,75 – 1,4 μm
2. infraoblast krátkých vln, s označením: SWIR o vlnové délce: 1,4 - 3 μm
3. blízká infraoblast středních vln, s označením: MWIR o vlnové délce: 3 - 8 μm
4. blízká infraoblast dlouhých vln, s označením: LWIR o vlnové délce: 8 - 15 μm
5. blízká infraoblast dlouhých a extra dlouhých vln, s označením: VLWIR a FWIR o vlnové délce: 15-1000 μm

Záření absolutně černého tělesa

Absolutně černé těleso je těleso, které pohltí veškerou dopadající energii. Jedná se tedy o abstrakci. V reálném světě neexistuje, a to kvůli tomu, že se vždy část záření od tělesa odrazí. Jako příklad černého tělesa si můžeme uvést Slunce, které má větší objem nežli svoji plochu. Na Zemi můžeme jako příklad černého tělesa použít kouli (s černou matnou barvou uvnitř) s otvorem, kde černým tělesem není dutina, ale otvor, kterým se do dutiny díváme. Záření, které se otvorem dostane dovnitř dutiny se zde odráží do doby, kdy zeslábne natolik, že již nepronikne z dutiny ven:



Příklad modelu černého tělesa

Takovým příkladem je okno v panelovém domě, které se nám jeví tmavé. Pohltivost je závislá na vlnové délce. Pohltivost, kterou lze považovat za konstantní u většího spektra vlnových délek, pojmenováváme jako šedé zářiče.

Teplo se šíří za pomoci elektromagnetického záření. Toto záření se nazývá teplotní záření a je způsobeno termickým pohybem nabitých částic. Jedinou podmínkou je, že těleso musí mít teplotu vyšší než absolutní nula. Jestliže se záření setká s jinou látkou, dojde ke třem dějům: část energie je pohlcena, další část je odražena nebo dojde k průchodu energie látkou.

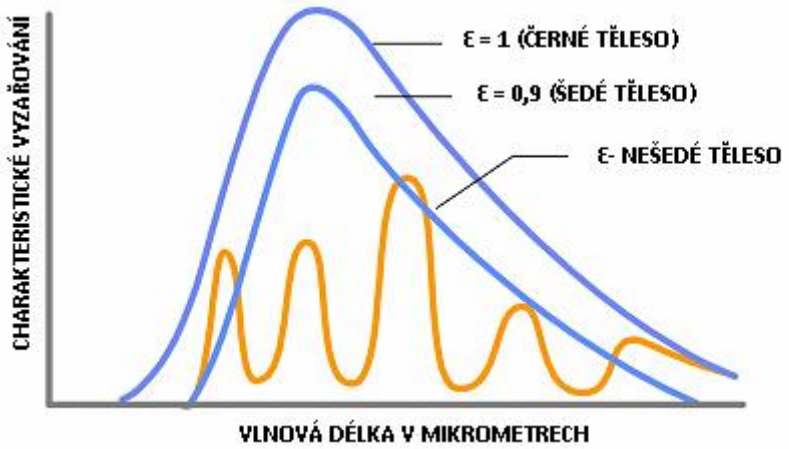
Při průchodu záření látkou dochází k předání energie a zvyšuje se její vnitřní energie. Při teplotě menší než 530 ℃ dochází k vyzařování jen infračerveného záření, u teplot vyšších nežli 530 ℃ dochází ke zkracování vlnových délek. Jednoduchým příkladem může být bílá a černá barva. Jestliže chci, aby se vlnění odráželo a ne pohlcovalo, použiji barvu bílou. U černé barvy je to naopak.

Emisivita

Emisivita je velmi podstatný parametr při měření infrazáření kamerou. Lze jí chápat jako efektivitu vyzařování. Před každým měřením je důležité jí do infrakamery ručně zadat. Tyto hodnoty jsou zapsány v tabulkách, díky kterým je možné dohledat příslušnou hodnotu emisivity k měřenému tělesu. Emisivita je definována jako poměr intenzity vyzařování daného tělesa ku intenzitě vyzařování absolutně černého tělesa se stejnou teplotou. Jedná se o bezrozměrnou veličinu, která nám určuje schopnost vyzařování tepla.

Je dána vzorcem: $\varepsilon = \frac{M}{M_0}\varepsilon\sigma T^4$, ε je emisivita, M je intenzita vyzařování tělesa uváděná v $W.m^{-2}$ a M_0 je intenzita vyzařování černého tělesa uváděná v $W.m^{-2}$.

Emisivita je závislá na několika parametrech: na teplotě, vlnové délce, vlastnostech povrchu, druhu zdroje. Jestliže s emisivitou počítáme jako s konstantní veličinou, tzn. že je nezávislá na vlnové délce, jedná se o šedé těleso. V reálném světě jsou všechna tělesa selektivní zářiče, to znamená, že jejich emisivita je vždy závislá na vlnové délce. Znázornění černého tělesa, šedého tělesa a selektivního zářiče je zobrazeno na obrázku:



Emisivita: černého tělesa, šedého tělesa a nešedého tělesa

Stefanův-Boltzmannův zákon

Energie vyzářená do prostoru za jednotku času se nazývá „zářivý tok Φ“ (udává se ve Wattech). Zářivý tok závisí na velikosti povrchu tělesa. Boltzmann zkoumal hustotu zářivého toku v závislosti na teplotě. Teoreticky se mu povedlo odvození, které posléze experimentálně potvrdil Josef Stefan. Výsledkem je zákon dnes známý jako Stefanův – Boltzmannův, který říká: Každé těleso, které má nenulovou absolutní teplotu, září, přičemž hustota zářivého toku je úměrná čtvrté mocnině absolutní teploty. $P = \sigma T^4$, σ je Stefanův-Boltzmannova konstanta rovna: $5,670400\,.10^{-8} W.m^{-2}K^{-4}$, T je termodynamická teplota uváděná v Kelvinech. Matematicky se k tomuto zákonu lze dostat přes integraci spektrální hustoty zářivého toku absolutně černého tělesa s užitím Planckova vyzařovacího zákona. Za pomocí diagramu lze zobrazit hustotu zářivého toku absolutně černého tělesa na určité vlnové délce (jedná se o plochu pod izotermou, *P* nebo *I* se často označuje E).

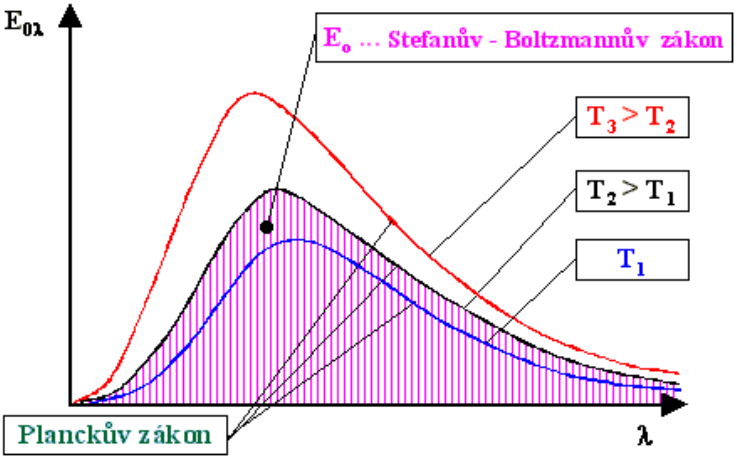


Diagram Stefanův – Boltzmannova zákona

Pro šedá tělesa, neboli nedokonalé zářiče, lze Stefanův – Boltzmannův zákon přepsat jako: $P = \varepsilon\sigma T^4$, ε je emisivita tělesa.

Wienův zákon posuvu

S rostoucí teplotou zářiče se posouvá maximální hodnota spektrální hustoty zářivého toku ke kratším vlnovým délkám. To znamená, čím teplejší je těleso, tím vysílá záření na vyšších frekvencích (kratších vlnových délkách) $\lambda_{max} . T = b$, λ_{max} je maximální vlnová délka spektrální hustoty zářivého toku při maximální teplotě zářiče, T je termodynamická teplota uváděná v Kelvinech, b je Wiennova konstanta jejíž hodnota je: $2{,}8978 . 10^{-3} m.K$. Wienův posunovací zákon v diagramu závislosti spektrální hustoty zářivého toku absolutně černého tělesa na vlnové délce záření.

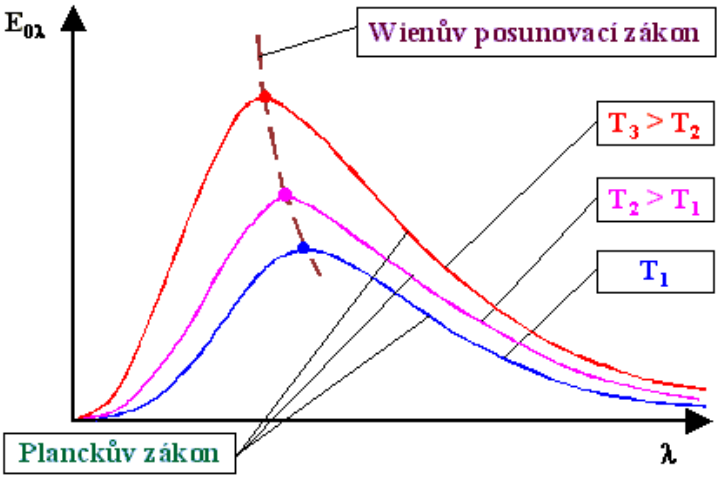


Diagram Wienova posunovacího zákona

Wien se též snažil odvodit funkci $\varphi(\lambda T)$. To se mu podařilo za použití klasické statistiky a vyšla mu závislost (tzv. Wienův zákon): $\varphi(\lambda T) = c_1 e^{\frac{c_2}{\lambda T}}$, c_1 a c_2 jsou konstanty. Tento vzorec platí pouze pro kratší vlnové délky (tzn. spektrum, které vyzařuje černé těleso při nízkých teplotách). Pro delší vlnové délky černého tělesa teoreticky odvodil Rayleigh a Jeans: $\varphi(\lambda T) = c_3 \lambda T$, c_3 je konstanta. To, ale vedlo k ultrafialové katastrofě, to znamená, že snižující se vlnová délka vedla k neomezené intenzitě vyzařování. Vše vyřešil, až Max Planck, který dokázal spojit Wienův a Rayleigh-Jeansův zákon do jednoho tvaru.

Planckův vyzařovací zákon

Max Planck byl německý fyzik, kterému se povedlo na základě kvantové teorie a v souladu se zákony pravděpodobnosti odvodit vyzařovací zákon. Při odvození opustil v té době uznávaný předpoklad, který říkal, že energie je libovolně dělitelná. Planckova hypotéza tedy zní: Záření o frekvenci f může být vyzařováno, nebo pohlcováno, jen po kvantech energie o velikosti: $E = h \,.\, f$, h je Planckova konstanta rovna: $(6{,}6256 \pm 0{,}0005) \,.\, 10^{-34}\, J.s$. Spektrální hustota zářivého toku dokonale černého tělesa v závislosti na vlnové délce záření a teplotě zářiče.

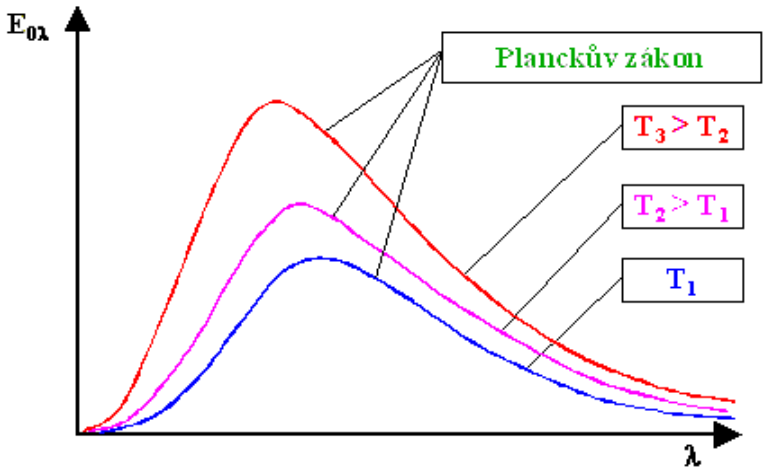
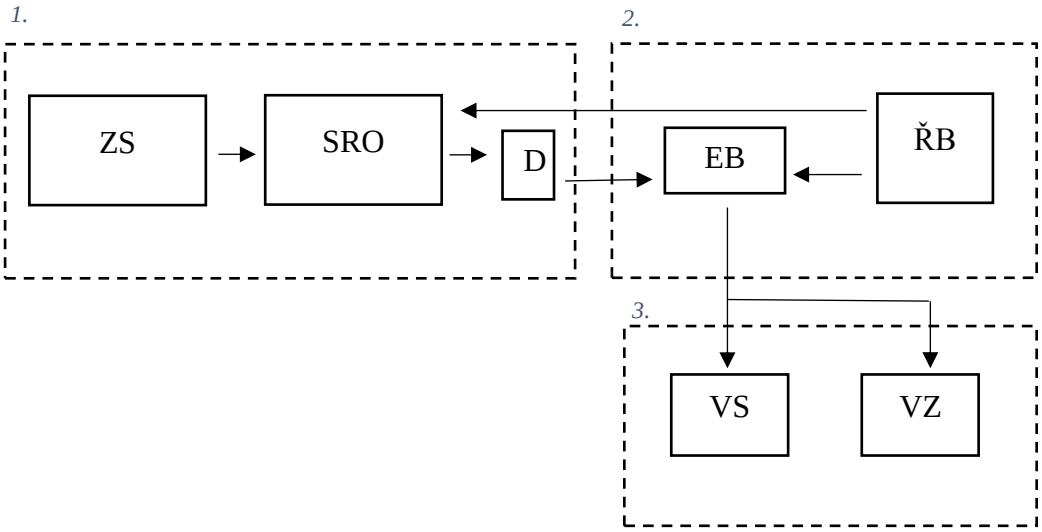


Diagram Planckova zákona

Závěr: Infrakamera, její funkce, a princip na kterém pracuje

Infrakamera je přístroj, který je schopen bezkontaktně a bez jakéhokoliv poškození tkáně detekovat infračervené záření. To posléze převede na elektrický signál, který následně zobrazí v takovém spektru barev, které je schopné lidské oko pozorovat. Infrakamera využívá toho, že každé těleso v našem vesmíru má větší hodnotu nežli 0 kelvinů, to znamená, že emituje infračervené záření. Kvůli tomu, že naše oko je schopno zaznamenávat záření o vlnové délce pouze od 380 do 760 nm, bylo nutno vyrobit přístroj, který nám infračervené záření zobrazí.

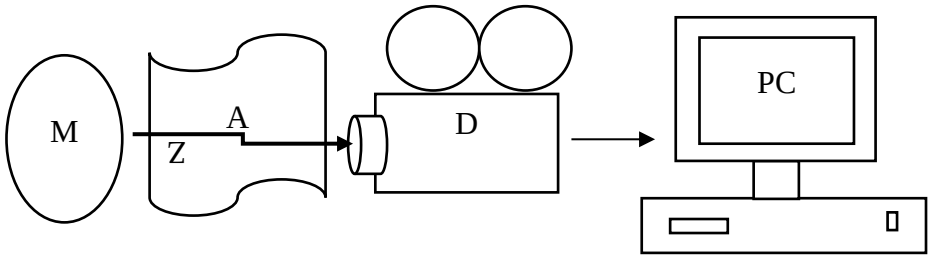
Čím větší je teplota tělesa, tím více vyzařuje infračerveného záření. Infrakamera je schopna toto záření zachytit na stejném principu, jako pracuje video kamera, která snímá viditelné spektrum záření. To vše je schopna zachycovat v absolutní tmě. Za pomoci algoritmu je schopna kamera interpretovat data a vytvořit obraz. Obraz zobrazuje přibližnou teplotu tělesa, kamera totiž nezpracovává data pouze z tělesa, ale zaměřuje se ve skutečnosti na zpracování oblastí obklopující těleso, nežli na snímání aktuální teploty objektu.



Blokové schéma infrakamery

ZS je zobrazovací soustava, SRO je systém rozkladu obrazu, D je detektor, EB je elektronický blok, ŘB je řízení barev, VS je výstup pro zpracování a záznam signálu, VZ je výstup pro zobrazení

Průběh snímání je vyobrazen na schématu, na kterém je vidět, jak infračervené záření prochází atmosférou a je detekováno v detektoru, kde dochází k převedení na elektrický signál, který je posléze vyobrazen na monitoru. V posledních letech se začaly upřednostňovat maticové detektory, které se ukázaly jako výkonnější, nežli jejich starší předchůdce, který pracoval s rozkladem světla.



Bezdotykové snímání pomocí infrakamery

Kde: M je snímaný objekt

Z je infračervené záření

A je atmosféra

D je detektor

PC je počítač umožňující zpracování a následné zobrazení

Závěrem můžeme konstatovat: absolutní nula je hypotetický stav látky, ve kterém se zastaví veškerý tepelný pohyb částic. V takovém stavu bychom tento objekt termokamerou zobrazit nemohli.

Příloha B – dotazník pro radiologické asistenty

Tento vědomostní test jsem formálně nazval: „Dotazník pro radiologické asistenty – teoretické podklady pro termografii“. Osobně jsem rozdal čtyřicet těchto dotazníků radiologickým asistentům. Obsahoval osmnáct otázek se čtyřmi možnostmi, kdy ke každé otázce existovala vždy pouze jedna správná odpověď. Test byl plně anonymní to znamená jak osobou, tak místem pracoviště. Požádal jsem pouze o vyplnění řádky věku respondenta a délky jeho praxe. Plnou anonymitu jsem deklaroval následným textem v záhlaví a svým podpisem: Prohlašuji, že dotazník je anonymní, jak osobou, tak místem pracoviště. Je zaměřen na teoretické znalosti termografie, metody v České republice v běžné klinické praxi zatím nepoužívané. Nejedná se o hodnocení jednotlivých respondentů. Výsledky budou hodnoceny v rámci celé množiny, tyto mimo moji bakalářskou práci nebudu nikde jinde zveřejňovat. Šimon Lávička student 3. ročníku Zdravotně sociální fakulty Jihočeské univerzity v Českých Budějovicích obor radiologický asistent.

Časový limit vzhledem k pracovnímu vytížení respondentů byl dva dny. Respondenty jsem zdvořile požádal o vyplnění dotazníku pouze z hlavy, na základě svých aktuálních znalostí, bez pomoci jiných zdrojů. Ze čtyřiceti takto předaných dotazníků jsem jich zpět získal dvacet pět. Hodnocení spočívalo v přičítání jednoho bodu za správnou odpověď, za nesprávně zodpovězenou nebo nevyplněnou otázku se bod neodečítal.

Teoretické podklady pro Termografii
Dotazník pro radiologické asistenty

I. Dotazník má 18 otázek, je anonymní, prosím nevyplňujte jméno a příjmení.
II. Uveďte prosím svůj věk v letech: ……
III. Uveďte prosím délku Vaší praxe v letech: ……
IV. Pouze jedna odpověď na danou otázku je správná, prosím zakroužkujte.

Velmi Vám děkuji za Váš čas věnovaný vyplnění dotazníku.

Šimon Lávička student 3. ročníku ZSF JČU obor radiologický asistent.

1. **Termografie zobrazuje:**
   a) UV záření
   b) gama záření
   c) mikrovlny
   d) infračervené záření
2. **První termografické zobrazení lidského těla bylo provedeno v roce:**
   a) 1928
   b) 1948
   c) 1968
   d) 1978
3. **Termografie se běžně v ČR používá ve:**
   a) stavebnictví
   b) humánní medicíně
   c) veterinární medicíně
   d) nepoužívá se
4. **Vlnová délka v rozmezí: 0,78 μm do 1000 μm je charakteristická pro:**
   a) UV záření
   b) gama záření
   c) mikrovlny
   d) infračervené záření
5. **Při teplotě tělesa méně jak 530℃ toto vyzařuje pouze:**
   a) UV záření
   b) gama záření
   c) mikrovlny
   d) infračervené záření
6. **Jaká je hodnota absolutní nuly? Což je hypotetický stav, při kterém se zastaví veškerý tepelný pohyb částic.**
   a) -273,15℃
   b) -312,42℃
   c) 0℃
   d) 453℃

7. **Co je absolutně černé těleso?**
    a) těleso s pohltivostí 0
    b) těleso s pohltivostí 1
    c) těleso s pohltivostí 2
    d) těleso s pohltivostí 0,2
8. **Tepelné záření látky je způsobeno:**
    a) termickým pohybem jejich nabitých částic
    b) pohybem elektronů
    c) interakcí elektronů
    d) anihilací elektronů
9. **Foton je:**
    a) vlna
    b) částice
    c) vlna i částice
    d) kvark
10. **Pro absolutně černé těleso platí:**
    a) $P = \sigma . T^4$
    b) $P = \omega . T^4$
    c) $P = \sigma . T^2$
    d) $P = c . T^4$
11. **Stefanův-Boltzmannův zákon je vyjádřen rovnicí:**
    a) $P = \sigma . T^4$
    b) $P = \omega . T^4$
    c) $P = \sigma . T^2$
    d) $P = c . T^4$
12. **Stefanův-Boltzmannův zákon nám umožnuje vypočítat:**
    a) celkovou energii vyzářenou tělesem o teplotě T z jednotky plochy za jednotku času
    b) celkovou energii vstřebanou tělesem o teplotě T z jednotky plochy za jednotku času
    c) odraženou energii tělesem o teplotě T z jednotky plochy za jednotku času
    d) odraženou i vstřebanou energii tělesem o teplotě T z jednotky plochy za jednotku času
13. **Wienův posunovací zákon je vyjádřen rovnicí:**
    a) $\lambda_{max} . T = b$
    b) $\lambda_{max} . T = c$
    c) $\lambda_{max} . T = E$
    d) $\lambda_{max} . T = W$

14. Wienův posunovací zákon praví:

a) s rostoucí teplotou zářiče se maximum spektrální hustoty intenzity vyzařování přesouvá ke kratším vlnovým délkám.
b) s rostoucí teplotou zářiče se maximum spektrální hustoty intenzity vyzařování přesouvá k delším vlnovým délkám.
c) s klesající teplotou zářiče se maximum spektrální hustoty intenzity vyzařování přesouvá ke kratším vlnovým délkám.
d) s klesající teplotou zářiče se maximum spektrální hustoty intenzity vyzařování přesouvá k delším vlnovým délkám.

15. Planckův zákon praví:

a) emise a absorpce zářivé energie se může dít jen po celistvých násobcích kvanta
b) emise a absorpce zářivé energie se může dít jen po polovičních násobcích kvanta
c) emise a absorpce zářivé energie se může dít jen po desetinných násobcích kvanta
d) emise a absorpce zářivé energie se nemůže dít jen po celistvých násobcích kvanta

16. Planckův zákon je vyjádřen rovnicí:

a) $E = h \, . \, f$
b) $E = a \, . \, f$
c) $F = h \, . \, f$
d) $F = a \, . \, f$

17. Kvanta elektronového záření se nazývají:

a) fotony
b) emise elektronů
c) emise protonů
d) emise neutronů

18. Kvantovou Planckovu hypotézu potvrdil:

a) A. Einstein
b) I. Newton
c) N. Tesla
d) S. Hawking