



Zdravotně  
sociální fakulta  
Faculty of Health  
and Social Sciences

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

**Role fermionů a bosonů v magnetické rezonanci**

## **BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

Studijní program: **SPECIALIZACE VE ZDRAVOTNICTVÍ**

**Autor:** Filip Adamec

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

České Budějovice 2022

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že svoji bakalářskou práci s názvem „Role fermionů a bosonů v magnetické rezonanci“ jsem vypracoval samostatně pouze s použitím pramenů a literatury uvedených v seznamu citované literatury.

Prohlašuji, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb. v platném znění souhlasím se zveřejněním své bakalářské práce, a to v nezkrácené podobě elektronickou cestou ve veřejně přístupné části databáze STAG provozované Jihočeskou univerzitou v Českých Budějovicích na jejich 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 kvalifikační práce. Rovněž souhlasím s porovnáním textu mé kvalifikační práce s databází kvalifikačních prací Theses.cz provozovanou Národním registrem vysokoškolských kvalifikačních prací a systémem na odhalování plagiátů.

V Českých Budějovicích dne 2.5. 2022

.....

*Filip Adamec*

**Poděkování**

Rád bych touto cestou poděkoval panu doc. RNDr. Přemyslu Záškodnému, CSc. za jeho odborné vedení práce a cenné rady, díky nimž mohla tato bakalářská práce vzniknout.

## Abstrakt

V současné době existují pouze dílčí teorie popisující roli a aplikaci fermionů a bosonů v magnetické rezonanci, ale neexistují žádné teorie interdisciplinární. Domnívám se, že spojením různorodých disciplín (fyziky, matematiky a medicínské podstaty MR) může vzniknout interdisciplinární teorie, jež může být také použita jako materiál k prohloubení znalostí budoucích či již aktivních radiologických asistentů v oblasti radiologické fyziky a magnetické rezonance.

Pro tuto bakalářskou práci byly stanoveny a splněny následující cíle:

### Globální cíl:

Interdisciplinární komunikací vytvořit odborný popis role fermionů a bosonů v magnetické rezonanci.

### Dílčí cíle:

- **C1:** Data processing – fyzika elementárních částic
- **C2:** Data processing – klasická podoba teorie elektromagnetického pole
- **C3:** Data processing – struktura magnetické rezonance
- **C4:** Data processing – kvantová mechanika protonů

Vzhledem k cílům bakalářské práce byly vytvořeny tyto hypotézy:

- **H1:** Komparací struktury MR a klasické podoby elektromagnetického pole lze vytvořit klasickou dimenzi fyzikální podstaty MR.
- **H2:** Komparací struktury MR a kvantové mechaniky protonů lze vytvořit kvantovou dimenzi fyzikální podstaty MR.
- **H3:** Komparací struktury MR a kvantové dimenze fyzikální podstaty MR se standardním modelem elementárních částic a jejich interakcí lze popsat role fermionů a bosonů v rámci popisu fyzikální podstaty MR.

V úvodu teoretické části práce jsem se zabýval elementárními částicemi, jejich fyzikou a vzájemnými interakcemi. Dále byly tyto částice rozděleny na fermiony a bosony, které byly podrobněji popsány. Další část teorie jsem zasvětil klasické podobě

elektromagnetického pole, kde jsem rozebíral především Maxwellovy rovnice. Následující část byla věnována kvantové mechanice částic a v závěru teoretické části jsem se soustředil na medicínskou část magnetické rezonance.

V praktické části jsou navzájem komparovány poznatky nabyté v teoretické části této práce. Výsledky byly rozděleny do dvou oddílů, podle stanovených hypotéz.

Výsledky této bakalářské práce poukazují na základě ověřených a přijatých hypotéz na poměrně zásadní roli fermionů (elektronů, protonů) a bosonů (fotonů, Cooperových párů).

#### **Klíčová slova**

fermiony; bosony; magnetická rezonance; interdisciplinární teorie; protony; elektromagnetické pole; kvantová mechanika; elementární částice

## **Abstract**

Currently, there are only partial theories describing the role and application of fermions and bosons in magnetic resonance imaging, but there are no interdisciplinary theories. I believe, that by combining diverse disciplines (physics, mathematics and the medical nature of MR), an interdisciplinary theory may emerge, that can also be used as a material to deepen the knowledge of future or already active radiologists in radiological physics and magnetic resonance imaging.

The following objectives have been set for this Bachelor thesis:

### **Global target:**

Creation of an expert description of the role of fermions and bosons in magnetic resonance imaging using interdisciplinary communication.

### **Sub-objectives:**

- **C1:** Data processing – physics of elementary particles
- **C2:** Data processing – classical form of electromagnetic field theory
- **C3:** Data processing – structure of magnetic resonance imaging
- **C4:** Data processing – quantum mechanics of protons

Due to the goals of this bachelor thesis, the following hypotheses were made:

- **H1:** The classical dimension of the physical nature of MR can be created by comparison of the structure of magnetic resonance and the classical form of electromagnetic field
- **H2:** The quantum dimension of the physical nature of MR can be created by comparison of the structure of magnetic resonance and the quantum mechanics of protons
- **H3:** The role of fermions and bosons in the description of the physical nature of magnetic resonance can be described by the comparative structure of magnetic resonance and the quantum dimension of the physical substance of magnetic with the standard model of elementary particles and their interactions

In the introduction to the theoretical part of the work, I dealt with elementary particles, their physics and mutual interactions. Furthermore, these particles were divided into fermions and bosons, which were described in more detail. I devoted another part of the theory to the classical form of the electromagnetic field, where I discussed mainly Maxwell's equations. The next part was devoted to quantum mechanics of particles and at the end of the theoretical part I focused on the medical part of magnetic resonance.

The practical part compares the knowledge gained in the theoretical part of this work. The results were divided into two sections, according to established hypotheses.

The results of this bachelor thesis point to the relatively crucial role of fermions and bosons in magnetic resonance imaging, thus confirming all three established hypotheses.

The results of this bachelor thesis point out the relatively crucial role of fermions (electrons, protons) and bosons (photons, Cooper pairs) based on verified and accepted hypotheses.

**Keywords**

fermions; bosons; magnetic; resonance; imaging; interdisciplinary; theory; protons; electromagnetic field; quantum mechanics; elementary particles

## Obsah

1	Teoretická část .....	11
1.1	Interdisciplinarita .....	11
1.2	Principy komparace .....	11
1.3	Data processing .....	12
1.4	Popis a fyzika fermionů .....	12
1.4.1	Pauliho vylučovací princip .....	13
1.4.2	Fermiho-Diracovo rozdělení .....	13
1.4.3	Boseho-Einsteinovo rozdělení .....	13
1.5	Fermiony .....	14
1.5.1	Kvarky .....	14
1.5.2	Leptony .....	16
1.6	Bosony .....	19
1.6.1	Foton .....	19
1.6.2	Gluony .....	20
1.6.3	W a Z Bosony .....	20
1.6.4	Higgsův boson .....	20
1.7	Interakce .....	21
1.7.1	Gravitační interakce .....	21
1.7.2	Elektromagnetická interakce .....	22
1.7.3	Fundamentální silná interakce .....	22
1.7.4	Zbytková silná interakce .....	22
1.7.5	Slabá interakce .....	22
1.8	Supravodivost .....	23
1.9	Fonony .....	24
1.10	Klasická podoba elektromagnetického pole .....	24
1.10.1	1. Maxwellova rovnice (Gaussův zákon) .....	25
1.10.2	2. Maxwellova rovnice (Gaussův zákon pro magnetismus) .....	25
1.10.3	3. Maxwellova rovnice (Faradayův zákon) .....	26
1.10.4	4. Maxwellova rovnice (Maxwellův-Ampérův zákon) .....	27
1.11	Curieho zákon .....	27
1.12	Kvantová mechanika částic .....	28



1.12.1	Kleinova-Gordonova rovnice .....	29
1.12.2	Diracova rovnice .....	29
1.12.3	Zeemanův jev .....	30
1.13	Magnetická rezonance .....	31
1.13.1	Protony v MRI .....	32
1.13.2	Larmorova frekvence .....	32
1.13.3	Radiofrekvenční pulzy .....	33
1.13.4	Free induction decay (FID) .....	33
1.13.5	Relaxace a relaxační časy .....	34
1.13.6	Blochovy rovnice .....	34
1.13.7	Time to repeat (TR) .....	35
1.13.8	Time to echo (TE) .....	35
1.13.9	Gradients .....	35
1.13.10	Supravodivost v MRI .....	36
1.13.11	Zhášení (Quench) .....	37
1.13.12	Kontrastní látky .....	38
2	Cíle práce a hypotézy .....	39
2.1	Cíle práce .....	39
2.2	Hypotézy .....	39
3	Metodika .....	40
4	Výsledky .....	41
4.1	Komparace struktury magnetické rezonance a elektromagnetického pole 41	
4.2	Komparace elementárních částic a jejich interakcí se strukturou magnetické rezonance a její kvantovou podstatou .....	43
5	Diskuze .....	48
6	Závěr .....	51
7	Seznam použitých zdrojů .....	53
8	Seznam obrázků .....	60
9	Seznam zkratk .....	61

## Úvod

Magnetická rezonance je v dnešní době relativně dobře dostupnou radiodiagnostickou zobrazovací metodou. Ve většině případů je tato zobrazovací modalita popsána pouze monodisciplinárně, ale doposud neexistuje ani jedna interdisciplinární teorie zobrazující roli fermionů a bosonů v magnetické rezonanci. Z tohoto důvodu je náplní této bakalářské práce tvorba interdisciplinární teorie, jež bude odborně popisovat, jakou roli v magnetické rezonanci hrají fermiony a bosony.

Podstatou teoretické části práce je sbírání dat z různých odvětví a jejich následná komparace za účelem vytvoření interdisciplinarity. Důležitou součástí práce je zpracování klasické a kvantové fyziky elektromagnetického pole, elementárních částic a kvantové mechaniky protonů. Dále bylo nutností vytvořit odborný popis podstaty magnetické rezonance, abychom v budoucnu mohli tyto podstaty navzájem komparovat.

Náplní praktické části je nasbírané poznatky z různých vědních oborů navzájem porovnávat a najít jejich společný průnik a následně formulovat interdisciplinární teorii.

# 1 Teoretická část

## 1.1 *Interdisciplinarita*

Vědu a interakce mezi jednotlivými disciplínami lze uchopit různými způsoby. Mezi nejobvyklejší vzájemné komunikace patří interdisciplinarita, multidisciplinarita a transdisciplinarita. Tvorba interdisciplinární teorie vyžaduje vzájemné propojení 2 a více akademických disciplín. Díky jinému náhledu na problém lze najít řešení, které by se v klasickém monodisciplinárním zkoumání neobjevilo. Nejvíce je interdisciplinarita používána buď u problémů, které nelze vyřešit aplikací pouze jednoho oboru, nebo u nadměrně obtížných problémech, k jejichž pochopení je důležité využít více disciplín najednou. Jak nám již předpona inter napovídá, tak se v interdisciplinárním přístupu zabýváme oblastí mezi zkoumanými obory. Spojením více disciplín najednou nám mohou vzniknout disciplíny nové, jako jsou například biochemie, biofyzika atd. Vznik nové disciplíny vybízí původní disciplíny k dalšímu prozkoumávání a vzájemným interakcím. (Dlouhá et al., 2007) (Warwick, 2022)

## 1.2 *Principy komparace*

Metoda komparace je založena na porovnávání dvou a více objektů. Ovšem pouze samotné porovnávání není dostatečné na to, aby se tato metoda mohla nazvat komparací. Aby mohla být metoda práce nazývána komparací, tak potřebuje obsahovat určité náležitosti. První důležitým kritériem je definice předmětu komparování. V tomto kroku si autor ujasňuje, jestli předměty komparace patří do stejné skupiny a mohou být spolu komparovány. Dalším potřebným krokem je stanovení cílů pro komparaci. Během stanovení cílů se snažíme o rozeznání základních podobností a rozdílů mezi komparovanými objekty. Nakonec je důležité si zvolit požadavky pro tvoření vlastní analýzy. Dle obecného pravidla můžeme říct, že s přibývajícím počtem komparovaných objektů nám klesne počet potřebných kritérií na tyto objekty. Obecně je možné komparaci vytvořit ve dvou rovinách – chování komparovaných předmětů ve stejném prostředí nebo v odlišném prostředí. (Lorenc, 2007–2013) (Dvořák et al., 2014)

### 1.3 Data processing

Principem data processingu, nebo také česky zpracování údajů je získávání dat z více různých zdrojů a jejich následně praktické zpracování do formy využitelných dat pro konkrétní výzkum. Postup data processingu se řídí určitými kroky, které jsou nezbytné pro správné zpracování nasbíraných dat a předejdeme tím znehodnocení celého výzkumu. Úplně prvním krokem správného data processingu je sběr dat. Sběr těchto dat je proveden z rozmanitých zdrojů. Důraz je kladen důvěryhodnost zdroje. Čím vyšší důvěryhodnost, tím vyšší kvality data processingu a celého výzkumu. V dalším kroku se sesbíraná surová data třídí a očišťují od všech chyb, které mohly při sbírání dat nastat, opět za účelem zvýšení kvality výzkumného snažení. Po vyselektování všech nesrovnalostí z posbíraných dat zadáváme data do počítače, kde jsou následně zpracovávána. Po zpracování veškerých informací je důležité tato data nějak interpretovat. Interpretace nejčastěji obsahuje buď tabulky, grafy nebo pouze prostý text. Koncem celého procesu je ukládání dat pro možné využití v budoucnu. (Talend, 2022)

### 1.4 Popis a fyzika fermionů

V dnešní době má každá částice svůj moment hybnosti, jež se označuje jako spin. Pokud je osa z orientována ve směru spinu, tak můžeme složku spinu  $S$  vypočítat podle následujícího vztahu:

$$S_z = m_s \cdot h$$

V tomto vztahu  $m_s$  označuje magnetické spinové kvantové číslo a  $h$  označuje redukovanou Planckovu konstantu, která nabývá hodnoty  $1,055 \cdot 10^{-34}$  Js. Tato konstanta vznikla díky Paulu Diracovi, který zjistil, že tato konstanta je snadněji použitelná, pokud je původní Planckova konstanta vydělena hodnotou  $2\pi$ . Pojem spin se běžně využívá ve 2 případech. V jednom případě se slovo spin používá v souvislosti se spinovým kvantovým číslem a ve druhém se takto označuje moment hybnosti částic. Fermionem můžeme podle Enrica Fermiho a Paula Diraca nazvat částici, která má poločíselné spinové kvantové číslo. V předchozí větě zmínění vědci popsali statistické zákony, podle kterých se fermiony mají chovat. Fermiony se taktéž řídí Pauliho vylučovacím principem. (Halliday, 2000) (Kulhánek, 2011 - 2012) (Laboratorní moduly – katedra fyziky FEL ČVUT v Praze, 2021)

#### **1.4.1 Pauliho vylučovací princip**

„Pauliho vylučovací princip říká, že žádné dva elektrony v atomu nemohou existovat ve stejném kvantovém stavu“. (Konečný, 2006, s.39)

#### **1.4.2 Fermiho-Diracovo rozdělení**

Podle tohoto zákona se řídí částice, pro které platí Pauliho vylučovací princip. Narozdíl od Boseho-Einsteinova rozdělení musíme u tohoto rozdělení počítat s tím, že v každém kvantovém stavu se může nacházet pouze jedna částice. Pomocí následujícího vztahu můžeme vypočítat počet všech možných kombinací v kterých mohou být částice uspořádány:

$$W = \frac{g_i!}{n_i! (g_i - n_i)!}$$

(Beiser, 1978)

#### **1.4.3 Boseho-Einsteinovo rozdělení**

Jelikož Fermiho-Diracovým rozdělením se řídí pouze částice, pro které platí Pauliho princip výlučnosti, tak bylo potřeba popsat tak chování bosonů. Z tohoto důvodu vzniká Boseho-Einsteinovo rozdělení. Pravděpodobnost, že částice bude mít určitou energii se řídí podle následujícího vzorce:  $f(E) = \frac{1}{Ae^{E/kt}}$ . (Nave, 2016)

## 1.5 Fermiony

Fermiony jsou rozdělovány na kvarky a leptony (obr. 1):



Obrázek 1: Standardní model elementárních částic, Zdroj: (Reichl et al., 2008)

### 1.5.1 Kvarky

Roku 1961 bylo vytvořeno historicky první rozdělení silně interagujících částic. Tvůrcem tohoto rozdělení byl americký fyzik Muray Gell-Mann. Díky této klasifikaci byl schopen předpovědět existenci kvarků. Kvarky se v této době nezávisle na Gell-Mannovi zabývali ještě 2 vědci – George Zweig a Yuval Ne'eman. I když byly kvarky rozdělovány podle několika klasifikací, stále byly považovány za hypotetické částice, a to do roku 1968. V tomto roce byl ve Stanfordu proveden experiment, který potvrdil, že proton není pravou elementární částicí, ale ještě je složen z dalších částic. Navzdory tomuto experimentu byla řada vědců skeptická vůči srovnání předpovědaných kvarků a objevených částic uvnitř protonu. Nakonec za své fyzikální myšlenky Gell-Mann získal v roce 1969 Nobelovu cenu. Kvarky momentálně nemají známou vnitřní strukturu. Jak kvarky, tak jejich antičástice mají hodnotu náboje buď  $\pm 2/3$ , nebo  $\pm 1/3$ . Jelikož se kvarky řadí mezi fermiony, tak jejich spin nabývá hodnotu  $1/2$ . Pauliho princip vylučnosti nepřipouští

existenci více částic ve stejném kvantovém stavu, ale přesto některé částice toto pravidlo porušují a mohou existovat. Mohou existovat díky jedné vlastnosti, kvůli které se navzájem odlišují. Zmíněnou vlastností je barva náboje. Barevné náboje jsou nejčastěji označovány jako RGB, což je anglická zkratka základního barevného spektra. Barva je v tomto případě pouze metaforou pro kvantové číslo. Finální náboj částic je díky různé barevným kvarkům nulová. Všem částicím, které jsou tvořeny kvarky říkáme hadrony. Pokud je částice složena ze všech tří barevných kvarků, tak se nazývá baryon. Mezi baryony se řadí například neutrony či protony, které jsou důležité pro funkci magnetické rezonance. Kvarky se nemusí v částicích kombinovat pouze mezi sebou, ale existuje také možnost kombinace kvarku a jeho příslušného antikvarku. O této kombinaci se hovoří jako o mezonech. Pokud se budeme zabývat interakcemi, tak kvarky jsou jediné známé částice, které se řídí všemi interakcemi. Ohledně rozdělení si můžeme dovolit říct, že díky svému třígeneračnímu dělení se podobají leptonům. Toto rozdělení by již mělo platit napořád, jelikož se díky současnému vývoji vesmíru nepředpokládá, že by mohla být ještě nějaká další generace. (Kulhánek et al., 2018) (Brittanica, 2021)

#### **1.5.1.1 Rozdělení kvarků**

##### **a) up (u) a down (d) kvarky**

Spin u těchto dvou kvarků je na hodnotě  $\frac{1}{2}$ . Co se týče elementárního náboje, tak up kvark má hodnotu  $+\frac{2}{3}e$  a hodnota u down kvarku je  $-\frac{1}{3}e$ . Tyto dva kvarky řadíme do první generace kvarků, z nichž je pak možné utvořit dvojici baryonů a dvojici mezonů. Mezony mohou mít dvě hodnoty celkového náboje. První hodnotou je 1, což vznikne kombinací kvarků se souhlasným spinem. O těchto částicích se hovoří jako o róonech. Pokud ovšem částice mají k sobě opozitní spin, čímž se jejich spiny navzájem vyruší a výsledný spin je nulový. Těmto částicím říkáme piony. Baryony souvisí s „barvou“ kvarků. Pokud je totiž tvoří 3 různobarevné kvarky a jejich výsledný spin se rovná  $\frac{3}{2}$ , tak se těmto částicím říká delta baryony. Druhou možností baryonů složených z kvarků první generace jsou tzv. nukleony. Ty vznikají seskupením kvarků, kde dva z nich mají stejný směr spinu a jeden má spin k nim opačný. Konfigurace nukleonů mohou být buď uud, čímž vznikají protony, které jsou nesmírně důležité pro princip magnetické rezonance. Druhou možnou konfigurací je ddu, což označuje neutrony. (Kulhánek et al., 2018) (Britannica, 2021) (Nave 2016)

### **b) charm (c) a strange (s) kvarky**

Stejně jako u kvarků up a down je i u této dvojice kvarků spin roven  $\frac{1}{2}$ . Náboj charm kvarku se rovná  $+\frac{2}{3}$ . Jeho objev se datuje do roku 1974, kdy byl vyzorován na urychlovačích. Objevem této částice se konečně potvrdil koncept kvarků, což bylo pro moderní fyziku revoluční. Hodnota elektrického náboje u strange kvarku je na hodnotě  $-\frac{1}{3}$ . U tohoto kvarku je důležité zmínit, že tvoří společně s některým z kvarků první generace vytváří kaony, což jsou částice, které se následně velmi pomalu rozpadají na piony, což již jsou částice tvořené pouze kvarky první generace. Dále byly kaony důležité při objevu narušení CP symetrie. Toto porušení napomohlo k převázení hmoty nad antihmotou ve vesmíru. Pokud baryony obsahují strange kvark, tak o nich hovoříme jako o hyperonech. Hyperonů je více druhů (sigma, omega, ...). Další zajímavostí tohoto kvarku je ta, že na rozdíl od všech ostatních kvarků nemůžeme určit jeho přesného objevitele. (Kulhánek et al., 2018) (Britannica, 2021) (Nave 2016)

### **c) Top (t) a bottom (b) kvarky**

Zatímco o objevení charm kvarku se postaraly americké vědecké týmy, tak bottom kvark byl objeven japonskými fyziky Toshihidem Maskawou a Makotem Kobayashim. Za jejich objev jim byla v roce 2008 udělena Nobelova cena. Jejich objev zároveň pomohl objasnit původce narušení CP symetrie. Spin tohoto kvarku je  $-\frac{1}{3}$ . Pokud se v nějaké částici vyskytuje b kvark, tak je nazývána B mezonem. O těchto mezonech toho zatím není tolik známo, a proto se dále sledují na největších světových urychlovačích částic. Top kvark objevili taktéž vědci Toshihido Maskawa a Makoto Kobayashi a byla objevena jako poslední kvark. Jeho náboj je na hodnotě  $+\frac{2}{3}$ . Společně s bottom kvarkem vytváří třetí a poslední generaci kvarků. Hodnota spinu je stejně jako u ostatních kvarků rovna  $\frac{1}{2}$ . Jelikož je k jejich tvorbě potřeba enormní množství energie, tak se vyrábí pouze uměle. Množství energie potřebné k jejich vytvoření v přírodě byla pouze při vzniku vesmíru. (Kulhánek et al., 2018) (Britannica, 2021) (Nave, 2016)

#### **1.5.2 Leptony**

Dalším typem fermionů jsou leptony. Mezi leptony řadíme šest částic a šest antičástic. Během rozličných experimentů se zjistilo, že si tyto částice zachovávají svou bodovou strukturu, což potvrzuje teorii, že by měly být elementárními částicemi. Narozdíl od



kvarků se leptony řídí pouze slabou a elektromagnetickou interakcí. (Nave, 2016) (Kulhánek et al., 2018) (Britannica, 2021)

### *1.5.2.1 Rozdělení leptonů*

#### **a) Elektrony**

Elektron byl objeven jako vůbec první elementární částice fyzikem Johnem Josephem Thomsonem na konci 19. století. Za jeho objev získal později v roce 1906 Nobelovu cenu. Nobelovu cenu za fyziku získal také jeho syn, který navázal ve výzkumu elektronů na svého otce a objevil jejich vlnové vlastnosti. Antičásticí k elektronu je pozitron, jehož existence byla teoreticky předpovězena Paulem Diracem na konci 30. let 20. století. O několik let později byla existence pozitronu potvrzena v mlžné komoře Carlem Anderssonem. (Nave, 2016) (Kulhánek et al., 2018) (Britannica, 2021)

#### **b) Miony**

Miony byly stejně jako pozitrony objeveny v mlžné komoře během experimentů Carla Anderssona. Za objevení pozitronu a mionu získal v roce 1936 Nobelovu cenu. Svými vlastnostmi se mion velmi nápadně podobá elektronu. Například se dokáže stejně jako elektron vázat s protonem, čímž vytvoří mionium. Jedním z rozdílů je hmotnost, kdy miony váží více. Proto se o nich někdy hovoří jako o těžkých elektronech. Miony se v relativně krátkém čase rozpadají na neutrino a elektron. Přírodně vznikají při interakci horní vrstvy atmosféry a kosmického záření. (Nave, 2016) (Kulhánek et al., 2018) (Britannica, 2021)

#### **c) Tauony**

Díky shodnému náboji s elektronem a jeho velmi vysoké hmotnosti si vysloužil označení supertěžký elektron. Tauony jsou velice nestabilní a během 0,3 ps se rozpadá. Vždy se rozpadne na neutrino, anebo na elektron nebo mion. I když se dříve tauony vyskytovaly běžně ve vesmíru, tak dnes lze tauony vyrobit pouze uměle na urychlovačích. Fakt absence těchto částic ve vesmíru byl způsoben tím, že klidová energie vesmírných částic klesla pod průměrnou energii tauonu. Supertěžký elektron byl objeven až v roce 1977 na Stanfordském urychlovači SPEAR. Vedoucím výzkumného týmu byl americký vědec Martin Perl. O téměř 20 let později za svůj objev obdržel Nobelovu cenu, kterou si v tomto roce rozdělil s Frederickem Reinesem, jenž objevil neutrino. (Nave, 2016) (Kulhánek et al., 2018) (Britannica, 2021)

#### **d) Elektronová neutrína**

Stejně jako ostatní neutrína má i elektronové neutrino nulový náboj. Spin tohoto neutrína je na hodnotě  $\frac{1}{2}$ . První záchyt elektronového neutrína se povedl již v roce 1956 v nukleárním reaktoru P-105. K jeho objevení použil Frederick Reines roztok kadmiumchloridu. Obecně neutrína interagují slabou interakcí a velmi málo jsou ovlivněny také gravitační interakcí. Neutrína jsou stabilní a nerozpadají se na jiné částice. Vůbec první detektor zachytávající elektronová neutrína vytvořil Američan Raymond Davis. V praxi se jednalo o velkou nádobu naplněnou několika stovkami tun tetrachloretylenu. Neutrína při interakci s chlórem přeměňují jeho jádro na argon, jehož poločas rozpadu je v řádu desítek dní, a proto je snadněji detekovatelný. Davisovi se v jeho detektoru nepovedlo zachytit všechny druhy neutrin, jelikož nebyl zkonstruovaný na citlivý záchyt jiných neutrin. (Nave, 2016) (Kulhánek et al., 2018) (Britannica, 2021)

#### **e) Mionová neutrína**

Obdobně jako elektronová neutrína má nulový náboj a spin roven  $\frac{1}{2}$ . Existenci těžkého neutrína prokázali v roce 1962 američtí vědci Jack Steinberger, Leon Lederman a Melvin Schwartz. Tento objev jim vynesl v roce 1988 Nobelovu cenu. Dalším důležitým objevem byla oscilace mezi těmito a elektronovými neutrinami. S mionovými neutrinami se v současné době provádí několik experimentů. Mezi nejvýznamnější patří CNGS. Během tohoto experimentu jsou mionová neutrína vysílána pod povrchem země do města Gran Sasso. V tomto městě jsou dva detektory (Icarus a Opera), které tato neutrína zachytávají. Záměrem tohoto experimentu je sledování oscilací neutrin. (Nave, 2016) (Kulhánek et al., 2018) (Britannica, 2021)

#### **f) Tauonová neutrína**

Díky existenci ostatních neutrin bylo jasné, že po objevení Tauonu musí existovat také tauonové neutrino. Supertěžké neutrino objevili američtí vědci v roce 1999 v rámci experimentálního programu DONUT. O 11 let později byla také objevena oscilace mezi těžkým a supertěžkým neutrinem v rámci projektu CNGS. Každé neutrinum je superpozicí 3 hmotných stavů. (Nave, 2016) (Kulhánek et al., 2018) (Britannica, 2021)

## 1.6 Bosony

Tato skupina částic získala svůj název podle indického vědce Satyendry Boseho. Bosony vykazují oproti fermionům naprosto opačné chování. Neřídí se Pauliho vylučovacím principem, a proto mohou společně obsadit jeden kvantový stav. Zajímavostí je, že při nižších teplotách obsadí všechny bosony pouze jeden základní kvantový stav, čímž vytváří tzv. Boseho-Einsteinův kondenzát. V tomto stavu se všechny bosony chovají stejně a jako celek mohou disponovat supratekutými či supravodivými vlastnostmi. Nejběžnějším zástupcem této skupiny částic jsou fotony. Dalším zajímavým jevem týkající se bosonů jsou tzv. Cooperovi páry, což jsou dva vázané elektrony. Elektrony řadíme mezi fermiony, ale Cooperův pár může existovat ve stejném kvantovém stavu s jiným Cooperovým párem, čímž se z něj stává boson. Zatímco při nižších teplotách se chování bosonů a fermionů rapidně odlišuje, tak při vyšších teplotách se naopak chovají dosti podobně. Působením vyšších teplot kvantové stavy neobsazují ani fermiony ani bosony a jsou často prázdné. Existují také teorie, které tvrdí že v počátcích vesmíru existovaly všechny částice jak ve stavu bosonu, tak i fermionu. Tyto páry se označují jako superpartneři. Ovšem ochlazením vesmíru měla zaniknout jedna z variant superpartneřů a částice se nyní vyskytuje pouze jako fermion, nebo jako boson. Superpartneři k bosonům navíc obdrželi příponu –ino, čímž by měly mezi fermiony měly existovat např. chargina, gravitina, fotina atd. Naopak pro superpartneře fermionů se přidává předpona s. Tím by nám měly vzniknout např. selektrony, skvarky či sleptony. Existence těchto částic je zatím pouze hypotetická a ani na největších a nejmodernějších urychlovačích se nepodařilo prokázat existenci těchto částic, a proto nevíme, zda je tato teorie správná či nikoliv. (Kulhánek, 2011 - 2012) (Britannica, 2021) (ScienceDirect 2021) (Physics232, 2021)

### 1.6.1 Foton

Fotony mají nulovou jak klidovou hmotnost, tak náboj a jejich spin je roven 1. Jedná se o polní částice elektromagnetické interakce. O existenci fotonů se polemizuje poměrně dlouho. Již v 17. století se světlem obecně zabývali vědci Christiaan Huygens a Isaac Newton. Oba měli na chování světla a jeho v té době potenciálních částic jiný pohled. Zatímco Huygens tvrdil, že světlo se chová jako vlny, tak Newton zastával názor, že světlo má spíše charakter částice. V dnešní době již ale víme, že fotony mají povahu vlnově korpuskulárního dualismu, což znamená, že se v některých případech chovají jako částice a v jiných se chovají jako vlny. Samotné fotony byly objeveny v roce 1923

Američanem Arthurem Comptonem. Ovšem jako fotony byly tyto částice pojmenovány až o 3 roky déle, kdy je takto nazval jiný Američan Gilbert Lewis. (Kulhánek et al., 2018) (Britannica, 2021)

### **1.6.2 Gluony**

Gluony mají stejně jako fotony spin roven 1 a nulovou klidovou hmotnost. Jsou základními částicemi silné interakce. Jejich název je odvozen od anglického slova glue, což v překladu znamená lepidlo. V praxi gluony fungují velice podobně, jelikož díky nim dokáže atomové jádro držet pohromadě. Jejich hypotetickou existenci předvídal na počátku 60. let minulého století Murray Gell-Mann, jejich existence však byla potvrzena až v roce 1979. Důležitým pojmem pojícím se s gluony je kvantová chromodynamika. Pole kvantové chromodynamiky jsou podobná těm elektromagnetickým (která jsou tvořena fotony). Tato pole dohromady obsahují osm gluonů. Každý gluon má jednu antibarvu a jednu barvu, což znamená že i možných vzájemných kombinací barev a antibarev bude také 8. Spekuluje se, že je ještě devátá bezbarvá kombinace, ale různých barevných kombinací je pouze 8. (Brandos, 2016) (Kulhánek et al., 2018) (Britannica, 2021)

### **1.6.3 W a Z Bosony**

Tyto bosony jsou základními částicemi slabé interakce. Zatímco boson Z je pouze jeden a nemá žádný náboj, tak boson W může existovat jak v kladné, tak v záporné konfiguraci. Předpověď jejich existence vznikla v rámci tvorby teorie slabé interakce. Za tuto teorii si odnesly fyzici Weinberg, Glashow a Salam Nobelovu cenu. Fyzicky byly tyto bosony objeveny na urychlovačích v CERNu. Experimenty na urychlovačích v CERNu vedli fyzici Simon van der Meer a Carlo Rubbia. Za objev a tím pádem také potvrzení standardního modelu získali Nobelovu cenu. (Kulhánek et al., 2018)

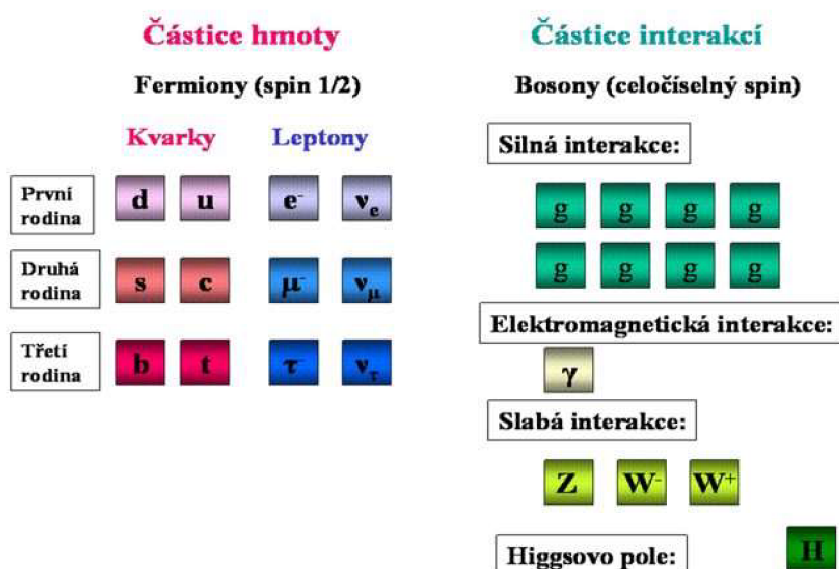
### **1.6.4 Higgsův boson**

Během budování teorie elektroslabé interakce se již od začátku začínaly objevovat potíže. Největší obtíž byla nulová hmotnost všech polních částic této interakce. Již z principu slabé interakce bylo jasné, že tyto částice musí mít nějakou, byť minimální hmotnost. S řešením hmotnostních obtíží přišli tři nezávisle pracující týmy. Nejvýrazněji se této problematice věnoval tým skotského fyzika Petera Higgse, podle kterého byl následně pojmenován nejen objevený boson, ale také nově zavedené pole. Higgs přišel s

teoretickou možností zavedení dalšího pole. Toto pole by mělo některým částicím, které se v něm nacházejí udávat hmotnost. V momentě, kdy je částicím udělena hmotnost, tak je narušena symetrie a dochází k rozkladu elektroslabé interakce na slabou a elektromagnetickou. Stejně jako většina bosonů byl také Higgsov boson fyzicky objeven na urychlovačích v CERNu. (Kapoun, 2011) (Kulhánek et al., 2018)

## 1.7 Interakce

Interakcí je celkem 5 (obr. 2) přičemž pouze 2 z nich mají naprosto neomezený dosah. Těmito interakcemi jsou gravitační a elektromagnetická interakce. Zbývající 3 interakce mají pouze omezený dosah. Mezi interakce s omezeným dosahem řadíme slabou interakci, fundamentální silnou a zbytkovou silnou interakci. (Záškodný, 2020)



Obrázek 2: Druhy interakcí a částice, které se jimi řídí, Zdroj: (Wagner, 2008)

### 1.7.1 Gravitační interakce

Díky svému neomezenému dosahu působí na úplně všechny částice, avšak velice slabě v porovnání s ostatními interakcemi. Svého dosahu využívá ke stanovení rovnováhy v celé řadě objektů jak megasvěta, tak makrosvěta. V porovnání s interakcemi, které jsou omezeny dosahem má menší význam pro mikrosvět. Základní částicí a nositelem vzájemného působení je graviton, který se ale ještě nepodařilo fyzicky objevit a jeho

objevení by vědci přineslo Nobelovu cenu a další významný krok ve fyzice. (Záškodný, 2020)

### ***1.7.2 Elektromagnetická interakce***

Stejně jako gravitační interakce, tak i ta elektromagnetická má neomezený dosah. Působí výběrově pouze na částice, jež vykazují nějaký elektrický náboj (tauony, elektrony, atd). Projev elektromagnetické síly je prostřednictvím magnetických sil řídicích se Lorentzovým zákonem síly a nábojů, které se řídí Coulombovým zákonem. Tato interakce zodpovídá za stabilitu atomu. Základním kamenem elektromagnetické interakce jsou částice nesoucí elektrický náboj jako jsou například elektron v atomovém obalu či protony z jádra atomu. Graviton je zde ve funkci nositele vzájemného působení nahrazen fotonem. (Záškodný, 2020) (Nave, 2016)

### ***1.7.3 Fundamentální silná interakce***

Tato interakce napomáhá ke stabilitě neutronů a protonů. Její dosah se pohybuje kolem  $10^{-15}$  m, čímž ovlivňuje struktury mikrosvěta. Základním kamenem této interakce jsou kvarky, pro které je nutné uvádět jednu důležitou vlastnost, a tou je barva. Pokud by tato vlastnost neexistovala, tak by kvarky, které patří mezi fermiony porušovali Pauliho vylučovací princip. Nositelem interakce jsou gluony, které působí na „barevné“ kvarky. (Záškodný, 2020) (Nave, 2016)

### ***1.7.4 Zbytková silná interakce.***

Úzce souvisí s fundamentální silnou interakcí. Základem zbytkové silné interakce jsou nukleony (neutrony a protony), jejichž stabilita je zajišťována právě fundamentální silnou interakcí. Nositeli této interakce nejsou přímo gluony, nýbrž piony. Princip interakce gluonového pole s kvarky je i u této interakce zachován. (Záškodný, 2020) (Nave, 2016)

### ***1.7.5 Slabá interakce***

Na rozdíl od ostatních interakcí se slabá interakce nezabývá stabilitou mikroobjektů, ale jejich rozpadem. Slabá interakce je v úzké vazbě s radioaktivitou a jejím vznikem (např. beta záření). Jako u všech ostatních interakcí jsou i zde základními kameny kvarky či leptony, které se řadí mezi fermiony. Nositelem slabé interakce jsou bosony, a to konkrétně bosony W a Z. Stavební prvky mají slabý náboj, na který slabá interakce působí. Náboj těchto částic lze vystihnout pomocí izospinu. Pojem je propojen

s multiplicitou. Multiplicita určuje, kolik se v multipletu vyskytuje částic, které se odlišují pouze svým elektrickým nábojem. Příklady multipletu jsou např. mezonové triplety, či nukleonový dublet. Nukleonový dublet vytváří neutron a proton. (Záškodný, 2020)

### **1.8 Supravodivost**

Poprvé se tématem supravodivosti zabýval při studiu vlastností hmoty při velmi nízké teplotě v roce 1911 holandský fyzik Heike Kamerlingh Onnes. Společně se svým výzkumným týmem objevili, že elektrický odpor se v případě teploty nižší než 4,2 K blíží k nulové hodnotě. Po dalším podrobnějším zkoumání vyšlo najevo, že téměř všechny chemické prvky mohou mít supravodivé vlastnosti při dostatečně nízkých teplotách. Onnesovo zkoumání sice objevilo možnost supravodivosti u prvků, ale nevysvětlilo, na základě, jakého principu se tak děje. O vysvětlení se postarali ve druhé polovině 50. let minulého století J. Bardeen, L. Cooper aj. Schrieffer. Tito američtí vědci formulovali teorii, ve které se elektrony při interakci s fonony tvoří Cooperovy páry. Tyto páry se podle jejich teorie vnitřkem pevné látky pohybují bez tření. Pohybem elektronů iontovou mřížkou se ionty dávají do mírného pohybu, čímž nám vzniká elektricky pozitivní oblast, která přitahuje další elektrony. Cooperovy páry lze snadno rozdělit pomocí vyšší teploty, jelikož jejich vzájemná interakce je poměrně slabá. Z tohoto důvodu se supravodivé vlastnosti objevují převážně při nízkých teplotách. Jediný problém této teorie byl ten, že neobjasnila vznik supravodiče při „vyšších“ teplotách (cca. 80 K). Supravodivé materiály mají dvě zajímavé vlastnosti. První z nich je již zmíněná absence elektrického odporu. Díky této vlastnosti dokáže obvodem procházet elektrický proud bez jakékoliv ztráty energie. Druhou vlastností je ta, že pokud je vnější magnetické pole dostatečně slabé, tak nedokáže penetrovat supravodič a tím pádem indukční čáry tohoto pole neprocházejí vnitřkem supravodiče. Této vlastnosti říkáme Meissnerův jev. Supravodiče rozdělujeme na dva typy. Prvním typem jsou supravodiče, pro které platí Meissnerův jev díky nízké intenzitě magnetického pole. Pokud intenzita přesáhne určitou mez, magnetické pole proniká do supravodivého materiálu a ničí jeho supravodivé vlastnosti. Druhý typ si dokáže uchovávat supravodivost i v případě proniknutí magnetického pole do materiálu. (Reichl et al., 2006-2022) (CERN Accelerating science, 2022)

### 1.9 Fonony

Fonony nejsou pravé částice, ale řadíme je mezi kvazičástice. Fonony nejsou částicemi fyzickyrei, ale jsou to pouze vibrační kvanta šířící zvuk. Prakticky je to jednofrekvenční vlna, mající svou vlastní energii a hybnost. Fonony jsou podobné fotonům, jen se místo elektromagnetického záření zabývají energií vibrační. S fotony mají společné to, že se jejich množství energie řídí Planckovým vztahem:  $\Delta E = \hbar v$ . (Chemicool Dictionary, 2020) (Vedantu, 2022)

Další důležitou vlastností fononů je vlnově korpuskulární dualismus – dokáží se chovat jako částice, ale také jako vlny. (Chemicool Dictionary, 2020) (Vedantu, 2022)

### 1.10 Klasická podoba elektromagnetického pole

Klasická podoba magnetické rezonance je popsána pomocí Maxwellových rovnic. To je soustava 4 rovnic, které na makroskopické úrovni velmi dobře zachycují chování elektromagnetického pole. Rovnice byly formulovány skotským fyzikem Jamesem Maxwellem. Rovnice lze zapsat jak ve formě diferenciací, tak ve formě integrálů, přičemž každý tvar se zabývá jinou oblastí. Ve formě diferenciace se zabývají elektromagnetickým polem v konkrétním bodu, zatímco v integrálním tvaru popisuje také elektromagnetické pole, ale nikoliv v určitém bodu, ale v konkrétní oblasti (obr. 3). Důležité pro interpretaci Maxwellových rovnic je znalost víru a zřídla silového pole. Víry nám ukazují místa ohraničená uzavřenými siločárami. Jako zřídla silového pole označujeme místa, kam přicházejí nebo odkud vychází otevřené siločáry. (Záškodný, 2020) (Openstax, 2021)

	<b>Integrální tvar</b>	<b>Diferenciální tvar</b>
1	$\oint_{\gamma} H dl = I + \frac{d\psi}{dt}$	$rot H = J + \frac{\partial D}{\partial t}$
2	$\oint_{\gamma} E dl = -\frac{d\phi}{dt}$	$rot E = -\frac{\partial B}{\partial t}$
3	$\oint_{\mathcal{S}} D dS = Q$	$div D = \rho$
4	$\oint_{\mathcal{S}} B dS = 0$	$div B = 0$

Obrázek 3: Maxwellovy rovnice, Zdroj: (Enpedie, 2013)



### 1.10.1 1. Maxwellova rovnice (Gaussův zákon)

První Maxwellovou rovnicí je tzv. Gaussův zákon. Ten nám pojednává o průchodu elektrického indukčního toku uzavřenou plochou. Tento indukční tok je podle tohoto zákona roven celkovému náboji, jenž je rozložen v objemu, který je ohraničen touto uzavřenou plochou. Názorně je toto pole vyobrazováno pomocí siločar, které vycházejí z kladných nábojů a pokračují směrem k záporným nábojům, kde také končí. Směr těchto siločar nám označuje směr elektrického pole. Z interpretace Gaussova zákona můžeme usoudit, že zdrojem elektrického pole je elektrický náboj.

**Diferenciální tvar:**

$$\operatorname{div} \vec{D} = \rho \text{ nebo } \operatorname{div} \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon}$$

**Integrální tvar:**

$$\oint_S \vec{D} \cdot d\vec{S} = Q$$

(Fowler, 1997) (Halliday, 2000) (Matematicko-fyzikální fakulta UK: Katedra didaktiky fyziky, 2021) (Spix, 2021)

### 1.10.2 2. Maxwellova rovnice (Gaussův zákon pro magnetismus)

Další Maxwellovou rovnicí je tzv. Gaussův zákon pro magnetismus. Tento zákon byl objeven několika vědci, kteří pracovali nezávisle na sobě (Gauss, Green, Ostrogradsky a Lagrange). Zákon v této formě označuje, že v každém bodě ve vesmíru je stejný počet siločar, které do tohoto bodu vstupují a zároveň z něj vystupují. Z čehož můžeme usoudit, že nikde ve vesmíru by se neměl hromadit magnetický náboj, což vylučuje jakoukoliv existenci magnetických monopolů. Tento princip nemůžeme aplikovat u ostatních polí jako je například gravitační pole nebo elektrického pole. V případě objevení magnetických monopolů by došlo k symetrizaci elektromagnetismu, a to znamená že Gaussův zákon pro magnetismus by se od klasického Gaussova zákona lišil pouze tím, že by zde figurovaly magnetické veličiny místo elektrických.

**Diferenciální tvar:**

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0$$

**Integrální tvar:**

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0$$

(Halliday; 2000) (Encyclopedia, 2021) (Maxwell's Equations, 2021)

**1.10.3 3. Maxwellova rovnice (Faradayův zákon)**

Další v soustavě rovnic je Faradayův zákon pro elektromagnetickou indukci. Zákon byl objeven pomocí tří klíčových experimentů, jež Faraday provedl v roce 1831. Ve všech experimentech figuruje elektromagnet, který vytvářel časově závislé magnetické pole. Zároveň ve všech experimentech byla použita smyčka drátu. Experimenty byly provedeny za následujících podmínek:

1. Stacionární magnet s pohyblivou smyčkou drátu
2. Nehybná smyčka s pohyblivým elektromagnetem
3. Oba komponenty byly nehybné, ale síla magnetického pole byla v čase proměnlivá

Faraday vypořádal, že v průběhu experimentů se indukovala elektromotorická síla, a to mělo za následek vznik měřitelného elektrického proudu. Nejdůležitějším Faradayovým poznatkem bylo zjištění, že proměnlivý magnetický tok skrze drátěnou smyčku měl za následek finální elektromotorickou sílu. Jeho poznatky ještě doplnil Heinrich Lenz, který přišel s teorií, že proměnlivost magnetického toku je v nepřímé úměře ke generované elektromotorické síle. Pokud dosadíme definici elektromotorické síly k definici magnetického toku, tak získáme Faradayův zákon pro elektromagnetickou indukci v integrálním tvaru uvedeném níže.

**Diferenciální tvar:**

$$\text{rot } \vec{E} + \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = 0$$

**Integrální tvar:**

$$\oint_C \vec{E} \cdot d\vec{r} + \frac{d}{dt} \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0$$

(Halliday; 2000) (EM GeoSci, 2015 - 2018)

#### 1.10.4 4. Maxwellova rovnice (Maxwellův-Ampérův zákon)

Vůbec prvním vědcem, který zkoumal, jaký je vztah mezi elektrickým proudem a magnetickým polem byl H. C. Ørsted. Ørsted si ve svém experimentu všiml, že elektrický proud vychyluje magnetické jehly. Podobnými experimenty se zabývali i Jean-Baptiste Biot a Félix Savart, z čehož později vznikl Biotův-Savartův zákon. Narozdíl od předešlých vědců se André-Marie Ampér zabýval, jak se navzájem ovlivňují dva elektrické dráty. Roku 1826 zformuloval Ampérův obvodový zákon, který popisoval souvislosti mezi magnetickým polem a elektrickým proudem, který protéká uzavřenou smyčkou. Původně se teorie zabývala pouze volným proudem, který je způsoben volně se pohybujícími náboji. Tato podoba ovšem nerespektovala zákon o zachování elektrického náboje. O pár desetiletí později byl tento zákon zdokonalen Maxwellem. Maxwell tento zákon obohatil o posuvný proud, čímž splnil rovnici kontinuity elektrického náboje. Díky této myšlence Maxwell stvořil teorii elektromagnetického pole, ve které předpokládal ekvivalenci mezi šířením elektromagnetických vln a šířením světla. Jeho myšlenky dokázal ještě posunout Heinrich Hertz, jenž svými experimenty potvrdil Maxwellovu teorii elektromagnetického pole. Na základě těchto poznatků stojí celý rozvoj moderního elektromagnetismu.

**Diferenciální tvar:**

$$\operatorname{rot} \vec{H} - \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} = \vec{j}$$

**Integrální tvar:**

$$\oint_C \vec{H} \cdot d\vec{r} - \int_S \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \cdot d\vec{S} = I$$

(Halliday, 2000) (EM GeoSci, 2015 - 2018)

#### 1.11 Curieho zákon

Zákon byl objeven Pierrem Curie a popisuje nám změnu magnetizace v paramagnetickém materiálu v závislosti na magnetickém poli. Curieho zákon říká, že míra magnetizace paramagnetických materiálů je v nepřímé úměře k teplotě tohoto materiálu podle následujícího vztahu:

$$M = \frac{CB}{T}$$

(Vedantu, 2022)

Hodnota C nám označuje Curieho konstantu, jejíž výpočet bude popsán níže. B je hodnota magnetické indukce a T je teplota v kelvinech.

$$C = \frac{\mu_0 \mu_B^2 n g^2 J(J+1)}{3k_B}$$

G => Landeho g-faktor

J => moment hybnosti

$k_B$  => Boltzmannova konstanta

n => počet magneticky aktivních atomů v prvku

$\mu_B$  => spinový magnetický moment

(Vedantu, 2022)

### 1.12 Kvantová mechanika částic

Roku 1926 rakouský fyzik Erwin Schrödinger vytvořením rovnice dokázal formulovat vlnovou kvantovou mechaniku. Schrödingerova rovnice kvantové mechaniky:

$$\left[ \frac{-\hbar^2}{2m} \Delta + V \right] \psi = E\psi$$

(Kulháněk, 2021) (Chemistry-LibreTexts, 2021)

Díky řešení této rovnice můžeme znovu určit hodnotu E pro objekty v potenciálním poli V. Vlnovou kvantovou mechanikou se nezabýval pouze Schrödinger, ale také Werner Heisenberg. Schrödinger i Heisenberg zkonstruovali lehce odlišné rovnice, ale oba došli ke stejnému výsledku. Rozdíl mezi Schrödingerovou a Heisenbergovou rovnicí byl pouze v odlišně zvoleném Hilbertově prostoru. Obecnou kvantovou teorii vytvořil až Paul Dirac taktéž s využitím Hilbertových prostorů. Až do této doby se postupně vytvářela nerelativistická kvantová teorie. Relativistickou variantu vytvořili až Gordon s Kleinem a Paul Dirac. Dirac se při tvorbě relativistické varianty zabýval částicemi se spinem  $\frac{1}{2}$ , zatímco Gordon a Klein tuto teorii tvořili pro částice s nulovým spinem. Díky relativistické variantě kvantové teorie bylo možno osvětlit podstatu spinu. Na základech relativistické teorie se postupně budovaly i jiné teorie (např. kvantová teorie elmag. pole

či teorie kvantové elektrodynamiky). Lepší interpretaci a přehlednost výsledků této teorie zajišťují tzv. Feynmanovy diagramy. (Formánek; 2004) (Kulhánek, 2021) (Chemistry-LibreTexts, 2021)

### 1.12.1 Kleinova-Gordonova rovnice

Popis spinu není možný pomocí Schrödingerovy rovnice, jelikož není relativistická. Relativistickou podobu vytvořili Walter Gordon a Oskar Klein. Při odvození této rovnice je použita Hamiltonova funkce v nerelativistickém tvaru. Pokud se budeme zabírat relativistickým vztahem pro volné částice, tak v operátorové podobě má následující tvar:

$$(\hat{p}_\alpha \hat{p}^\alpha + m_0^2 c^2)\psi = 0 \quad \hat{p}^\alpha = -i\hbar \hat{\partial}^\alpha$$

Pokud za operátory dosadíme, tak můžeme získat jiný, velmi užívaný tvar Kleinovy-Gordonovy rovnice:  $(\square - k^2)\psi = 0 \quad k = \frac{m_0 c}{\hbar}$

Prakticky se snažíme najít lineární rovnici, jenž při nízkých rychlostech přechází v Schrödingerovu rovnici. Finálním produktem je Schrödingerova časová rovnice ve tvaru:

$$i\hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t} = \left( -\frac{\hbar^2}{2m} \Delta + V \right) \psi = 0$$

V těchto rovnicích můžeme objevit jak první i druhou derivaci, zatímco v Diracově rovnici nalezneme pouze první derivace. (Kulhánek, 2021)

### 1.12.2 Diracova rovnice

Na rozdíl od Kleinovy-Gordonovy rovnice jsou v Diracovy rovnici použity pouze první derivace a byla vytvořena již v roce 1928. S ohledem na elektrony se zjistilo, že Diracovu rovnici pro ně lze aplikovat lépe než Kleinova-Gordonova rovnice. Ukázalo se, že jde o mnohem vhodnější rovnici pro elektron, než je Kleinova-Gordonova rovnice. Díky tomu, že tato rovnice neobsahuje druhé, derivace, tak je nejen jednodušší než předchozí rovnice, ale také u ní můžeme nalézt pouze kladné hustoty pravděpodobnosti. Nicméně stále přetrvávají potíže se zápornými energetickými stavy. Tuto problematiku Dirac vyřešil tak, že příslušné negativní energetické stavy náleží pozitronu. V době Diracovi interpretace nebyl ještě pozitron objeven, a tak byla interpretace pouze hypotetická. Stejně jako u Kleinovy-Gordonovy rovnice hledáme tvar, který je shodný se

Schrödingerovou rovnicí a zároveň je Hamiltonův operátor lineární funkcí prostorových derivací.

Diracova rovnice:

$$i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t} = \hat{H}\psi \quad \hat{H} = a^1 \partial_1 + a^2 \partial_2 + a^3 \partial_3 + b$$

(Branson, 2013) (Kulhánek, 2021)

Kvůli rozměrům koeficienty  $a^k$  a  $b$  hledáme bezrozměrné  $a^k$  a  $\beta$  čímž nám vznikne tvar:

$$\hat{H} = -i\hbar c(a^1 \partial_1 + a^2 \partial_2 + a^3 \partial_3) + \beta m_0 c^2$$

Koeficienty podléhají 2 podmínkám:

1. Použitím Lorentzovy transformace polí a souřadnice se nesmí změnit tvar rovnice
2. Hamiltonova funkce umocněná na druhou musí mít následnou formu:

$$\hat{H}^2 = \hat{P}^2 c^2 + m_0^2 c^4 \hat{I}$$

Díky tomuto tvaru nám jakýmkoliv vyřešením Diracovy rovnice vznikne zároveň řešení pro Kleinovu-Gordonovu rovnici. Následným přidáním druhých derivací nám ještě další řešení přibudou. (Branson, 2013) (Kulhánek, 2021)

### 1.12.3 Zeemanův jev

O Zeemanových spektrálních čarách se ještě budu zmiňovat v souvislosti s Larmorovou frekvencí. Zeemanův jev (obr. 4) nevedl pouze k objevení Larmorovy rovnice, ale souvisí úzce s elektromagnetickým polem, což bude hrát roli ve funkci magnetické rezonance. Jak víme, tak elmag. záření má spektrální čáry, které můžeme díky působení magnetického pole štěpit na více čar s různými vlnovými délkami, přičemž vlnová délka, takto štěpených spektrálních čar je ovlivněna magnetickou indukcí pole. (Reichl, 2006–2022)



Obrázek 4: Zeemanův jev, Zdroj: (Reichl et al., 2006–2022)

### *1.13 Magnetická rezonance*

Magnetická rezonance (obr. 5) se jako zobrazovací metoda nejběžněji využívá k zobrazování měkkých tkání. Nejčastěji zobrazujeme mozek, rameno či koleno. Pracuje na principu protonových jader, která jsou umístěna ve stálém magnetickém poli  $B_0$ . Toto pole způsobí srovnání spinů protonů a dojde ke sjednocení magnetických momentů. Po ukončení působení vnějšího magnetického pole se protony navrací do klidové pozice. K udržení protonů v neustálé rotaci potřebujeme vysokofrekvenční pole. (MRIMASTER.com, 2022) (Wikiskripta, 2021)

Napětí je zde generováno pomocí cívek, které v případě přiblížení k rotujícím magnetickým momentům jader generuje napětí, jež je poté měřeno. Výsledné vygenerované napětí závisí na typu tkáně a jejímu uložení v těle. V MRI využíváme pouze prvky s lichým atomovým číslem, aby nedošlo k vyrušení magnetických momentů. Ideálním prvkem k zobrazování je vodík, jelikož lidský organismus je téměř ze dvou třetin složen z vody. Dále můžeme v MRI využít také uhlík, fluor či sodík. V případě vložení těchto prvků do magnetického pole dojde k synchronizaci spinu protonů. Protony se uspořádávají do dvou konfigurací – paralelní a antiparalelní. Paralelních je o trochu více díky tomu, že jsou energeticky stabilnější. Antiparalelní poloha kromě vyšší energetické náročnosti také snižuje hodnotu podélné magnetizace. Pokud vnější pole přestane působit, vrací se jádro do své původní klidové polohy. Pokud přidáme další kolmo působící pole  $B_T$ , začne jádro znovu rotovat. Následně pomocí cívek detekujeme vyzářenou energii z rotujících protonů. (Questions and Answers in MRI, 2022) (Wikiskripta, 2021)



Obrázek 5: Magnetická rezonance, Zdroj: (Fakultní nemocnice v Motole, 2012)

### ***1.13.1 Protony v MRI***

Protony vykonávají dva pohyby, přičemž oba jsou pro magnetickou rezonanci důležité. První pohyb nazýváme precesí, což je v praxi pohyb po plášti pomyslného kužele. Protony tento pohyb nevykonávají synchronně, nýbrž chaoticky. Tento pohyb je vykonáván rychlostí Larmorovy frekvence. Druhým pohybem je spin. Spin určuje rotaci kolem své osy. (Sedlář, 2011) (Wikiskripta, 2021)

### ***1.13.2 Larmorova frekvence***

Larmorova frekvence nám určuje frekvenci precesního pohybu protonů. Lze ji vypočítat pomocí Larmorovy rovnice ve tvaru:

$$\omega_0 = \gamma \cdot B_0$$

Z rovnice můžeme vyčíst, že výslednou Larmorovu frekvenci získáme vynásobením indukce aktuálně působícího magnetického pole  $B_0$  s gyromagnetickým poměrem  $\gamma$ , přičemž gyromagnetická konstanta je pro každý atom jiná. V případě vodíku, který je pro MRI nejpoužívanější je gyromagnetický poměr roven 42,58 MHz. Na znaménku v případě gyromagnetického poměru záleží, jelikož určuje směr precese, proto například helium se záporným gyromagnetickým poměrem by precesně působilo proti směru vodíku. (Questions and Answers in MRI, 2022)



Původně tato rovnice souvisela se Zeemanovými spektrálními čarami, jelikož v době jeho objevu magnetická rezonance ještě nebyla známa. U spektrálních čar Larmor zjistil, že by se elektrony, jež utváří tyto čáry měly pohybovat kolem magnetického pole. S novými fyzikálními objevy se zjistilo, že Larmorova rovnice platí nejen pro elektrony, ale pro všechny částice s momentem hybnosti či se spinem. (Questions and Answers in MRI, 2022)

### **1.13.3 Radiofrekvenční pulzy**

Jelikož každá tkáň má svůj magnetický moment, který je v důsledku své malé velikosti těžko měřitelný. Tuto malou velikost zajišťují podélné osy protonů, které jsou rovnoběžné s magnetickým polem. Lepší detekovatelnost lze zajistit vysláním  $90^\circ$  radiofrekvenčního pulzu, který protonům dodá energii, čímž je excituje na vyšší energetickou hladinu a díky této excitaci protony začnou více oscilovat. Touto oscilací se vychýlí dlouhá osa protonů, a to má za následek vznik příčné magnetizace. Aby došlo k rezonanci, tak vyslaný pulz musí svou frekvencí odpovídat Larmorově frekvenci. Díky těmto pulzům lze změřit oba druhy magnetizace:

- a) Hodnotu příčné magnetizace vzniklé synchronizací precesí spinů protonů
- b) Pokles hodnot podélné magnetizace

Po ukončení působení pulzu protony přechází ze svého excitovaného stavu zpět do normálu. Tento přechod označujeme jako relaxaci. Během relaxace je uvolňována energie, která je absorbována v okolních tkáních, tato energie zároveň snižuje intenzitu signálu. Pulz nemusí být pouze  $90^\circ$ , ale používá se také  $180^\circ$ . Tento pulz má za úkol přepólovat přebytečné paralelní protony do polohy antiparalelní, což má za následek změnu orientace vektoru magnetizace o  $180^\circ$ . Pulzy lze i různě navzájem kombinovat. (Questions and Answers in MRI, 2021)

### **1.13.4 Free induction decay (FID)**

Free induction decay je druh sinusového elmag. signálu s krátkou dobou trvání. Tento signál vzniká ihned po vyslání  $90^\circ$  pulzu. Prakticky je generován přijímací cívkou. FID vůbec nijak nevylepší klasický MRI obraz, ale je využíván při jednovoxelové MRI spektroskopii. (ScienceDirect; 2010) (Radiopaedia, 2020)

### 1.13.5 Relaxace a relaxační časy

Relaxace nastává po ukončení působení radiofrekvenčního pulzu. Existují 2 druhy relaxačních časů. Jedním druhem relaxace je  $T_1$  relaxace, jinak také nazývaná jako spin-mřížková, protože dochází k přenosu energie do okolních tkání. Během této relaxace dochází k obnovování podélné magnetizace. Jako o  $T_1$  relaxačním čase hovoříme o časovém úseku, za který dojde k obnově podélné magnetizace na 63 % její původní hodnoty. Druhým typem relaxace je  $T_2$  relaxace. Tento druh relaxace označujeme jako spin-spinovou, jelikož si během ní energii předávají spiny mezi sebou.  $T_2$  relaxačním časem nazýváme dobu, za kterou se sníží hodnota příčné magnetizace na 37 % své původní hodnoty. Zobrazení tkání nezávisí pouze na  $T_1$  a  $T_2$  relaxačních časech, nýbrž také na směru a rychlosti pohybu protonů. Posledním důležitým parametrem je také hodnota koncentrace protonů ve tkáni – takovéto obrazy nazýváme jako proton-denzitní. Délka relaxačních časů jednotlivých tkání závisí především na velikosti molekul. Zatímco tukové molekuly jsou poměrně velké a těžkopádné, a proto jednodušeji předávají energii a díky tomu jsou jejich relaxační časy krátké, tak molekula vody je poměrně malá a díky svému rychlému pohybu a pomalejšímu předávání energie má dlouhé relaxační časy. (Wikiskripta, 2021)

### 1.13.6 Blochovy rovnice

Blochovy rovnice nám slouží k fyzikálnímu vysvětlení relaxačních časů využívaných v magnetické rezonanci. Pro nárůst podélné magnetizace, nebo také  $T_1$  relaxace nám slouží následující rovnice:  $M_z = M_0(1 - e^{-t/T_1})$ . Zatímco klesání příčné magnetizace se řídí rovnicí ve tvaru:  $M_{XY} = M_0 e^{-t/T_2}$ . Tyto dvě rovnice nejsou jediné Blochovy rovnice využívané pro magnetickou rezonanci. Dále jsou také využívány 3 rovnice po zapůsobení  $90^\circ$  pulzu. Každá rovina má svou rovnici. Vypočítáním rovnic můžeme zjistit, že proton bude precesovat na Larmorově frekvenci. Tvary rovnic jsou uvedeny níže:

$$1. \quad M_y(t) = M_0 e^{-t/T_2} \cos \omega t$$

$$2. \quad M_z(t) = M_0(1 - e^{-t/T_1})$$

$$3. \quad M_x(t) = M_0 e^{-t/T_2} \sin \omega t$$

(Questions and Answers in MRI, 2021) (ScienceDirect, 2022)

### ***1.13.7 Time to repeat (TR)***

Time to repeat charakterizujeme jako čas od jednoho  $90^\circ$  pulzu k dalšímu. V čase vyslání pulzu jsou hodnoty příčné a podélné magnetizace totožné. (Radiopaedia, 2020)

### ***1.13.8 Time to echo (TE)***

Jak již bylo zmíněno, tak po vyslání  $90^\circ$  pulzu dochází k růstu vektoru přímé magnetizace. Po ukončení pulzu začne systém relaxovat a hodnota příčné magnetizace začne klesat. V čase, o kterém se hovoří jako  $TE/2$  vysíláme  $180^\circ$ , a to má za důsledek přepólování směru precese proton – pomalu precedující protony se nyní ocitají před těmi rychle precedujícími, což způsobí opětovný nárůst vektoru příčné magnetizace. Po uběhnutí dalšího  $TE/2$  se pohyb protonů synchronizuje, což nám opět zvyšuje signál. Time to echo nám tedy logicky vznikne sečtením obou  $TE/2$ . (Radiopaedia, 2021)

### ***1.13.9 Gradients***

Pro dobrou diagnostickou výtěžnost je potřebné lokalizovat protony v lidském těle. K této lokalizaci nám slouží gradienty, což jsou prakticky další magnetická pole. Požadavky na gradientní pole jsou rychlost a síla. Gradienty jsou vloženy ve třech vyšetřovacích rovinách do hlavního magnetického pole. V případě zapnutí všech gradientů najednou dokážeme ovlivnit sílu hlavního magnetického pole. Intenzita těchto gradientů narůstá společně s osu těla, čímž nám vytváří magnetický gradient. (Questions and Answers in MRI, 2021)

#### ***1.13.9.1 Řez určující gradient (Slice selective gradient)***

Tento gradient nám určuje šířku vrstvy a rovinu řezu. Pracuje s faktem, že intenzita magnetického pole se liší v kraniokaudálním směru. Doba jeho trvání je časově ohraničena trváním radiofrekvenčního pulzu. Šíři řezu dokážeme ovlivnit buď nakloněním gradientu, nebo změnou frekvence pulzu. Strmější gradienty vytvářejí užší řezy a podobný efekt má také nižší rozsah frekvence pulzu. (Abdulla, 2021)

#### ***1.13.9.2 Frekvenci kódující gradient (Frequency encoding gradient)***

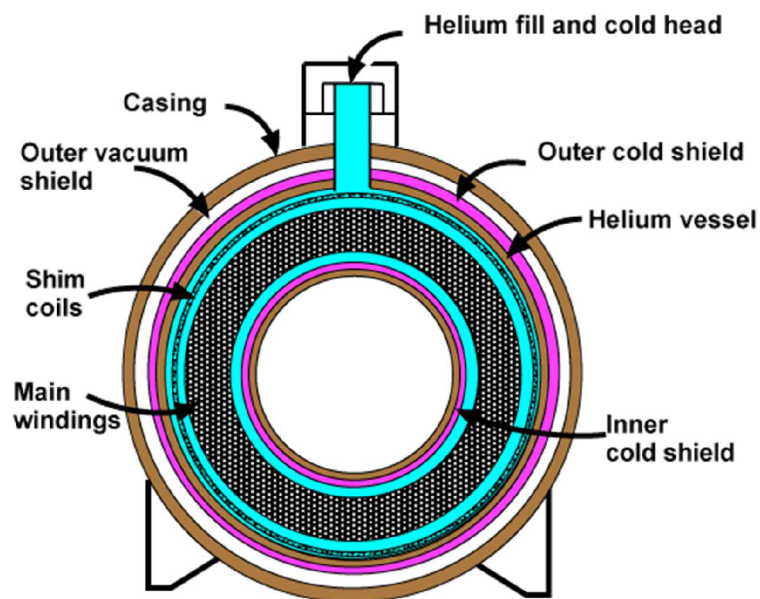
Dalším gradientem je tzv. frequency encoding gradient. Intenzita gradientu narůstá úměrně s frekvencí rotujících protonů v latero-laterálním směru. (Abdulla, 2021)

### ***1.13.9.3 Fázi kódující gradient (Phase encoding gradient)***

Gradient působí energií ještě před frekvencí kódujícím gradientem, čímž ovlivňuje precesní pohyb jednotlivých protonů. Larmorova frekvence těchto protonů je stejná ale neoscilují ve stejné fázi. Po ukončení působení tohoto gradientu vyšetřovaný organismus začne vysílat měřitelnou energii. To má za následek přesnou lokalizaci jednotlivých bodů ve vrstvách. (e-MRI, 2008–2022) (Abdulla, 2021)

### ***1.13.10 Supravodivost v MRI***

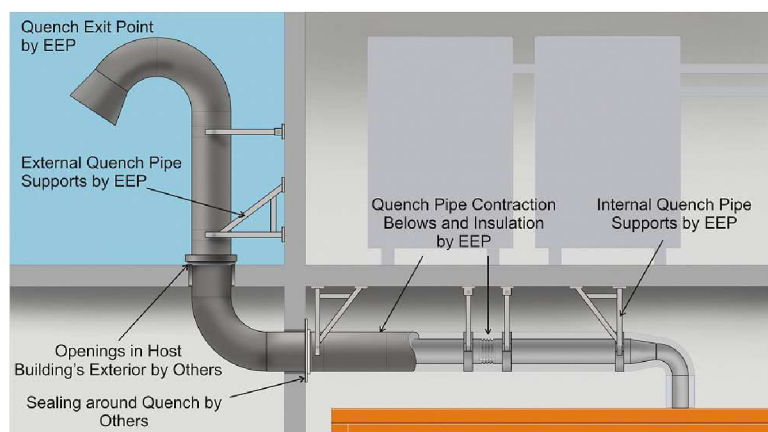
Magnetická rezonance je jedno z nejrozšířenějších odvětví, ve kterých se supravodivost aktivně využívá. Využívá se jak u přístrojů pro zkoumání v chemickém průmyslu, tak v přístrojích určených do nemocnic. Supravodivost je zde zajištěna v podobě supravodivých magnetů, které jsou uloženy v lázni složené z kapalného helia, kterou nazýváme jako kryostat. Kryostat neobsahuje pouze magnety a kapalně helium, ale vyskytuje se zde také vakuové a izolační vrstvy (obr. 6). Tyto vrstvy ochraňují cívky před teplem z okolí. Dále kryostat obsahuje stínící cívky, které zmenšují rozptylové pole a vyrovnávací cívky, které jsou supravodivé a slouží pro vylepšení homogenity magnetického pole. Ochranná konstrukce kryostatu je složena z nemagnetické nerezové oceli. Helium má teplotu přibližně 4,2 K. Supravodivé magnety ovlivňují rozlišovací schopnosti magnetické rezonance. Důležitou součástí moderních strojů jsou niob-titan vodiče. Tyto vodiče získávají supravodivé vlastnosti v případě ochlazení pod 9,4 K. Každý takovýto vodič má v sobě měděné jádro. Měděné jádro zde není pouze kvůli ochraně mikrovláken NbTi vodičů, ale také dokáže vést proud s relativně nízkým odporem, když dojde k narušení supravodivosti. Přístroje, které mají hodnotu magnetické indukce vyšší než 10 T, tak využívají jako vodič slitinu niob-cínu (Nb<sub>3</sub>Sn). V poslední době se vyskytují nové supravodivé materiály díky vyšší teplotě přechodu. Jedním z nových vodičů je Diborid hořečnatý. (Kybic et al., 2008-2013) (Questions and Answers in MRI, 2022)



Obrázek 6: Kryostat v MRI, Zdroj: (Questions and Answers in MRI, 2021)

#### 1.13.11 Zhášení (Quench)

Při zhášení dochází ohřátím k narušení teploty 4,2 K, která slouží k uchování supravodivých vlastností. V důsledku zvedání teploty supravodivé cívky začínají mít odpor a tím dochází k oslabení magnetického pole. Ohřátí má zároveň za následek odpařování kapalného hélia. Jelikož quench může nevratně poškodit MR přístroj, tak k jeho použití by se měl personál uchýlit pouze ve výjimečných případech (požár, ohrožení pacienta, ...). Každý stroj by měl mít odvětrávací systém k případnému odvodu hélia při zhášení (obr. 7). V případě selhání tohoto systému unikající hélium v místnosti nahrazuje kyslík, a to může mít pro personál či pacienta fatální následky. Z důvodu prevence vyšetřovny obsahují monitor kyslíku, který spouští alarm v případě poklesu hodnoty kyslíku pod kritickou hodnotu. (Department of Radiology & Biomedical Imaging, 2021) (Questions and Answers in MRI, 2022)



Obrázek 7: Odváděcí systém pro quench, Zdroj: (Tarawneh, 2019)

### 1.13.12 Kontrastní látky

Úkolem kontrastních látek v magnetické rezonanci je zkracovat relaxační časy, čímž začne u vzniklých obrazů nejčastěji převažovat  $T_1$  vážení. Stejně jako u ostatních zobrazovacích modalit se kontrastní látky využívají k lepšímu zobrazení vyšetřované struktury. Nejpoužívanějšími kontrastními látkami jsou sloučeniny gadolinia (obr. 8). Důležité je, aby bylo gadolinium navázáno na nějaký nosič, jelikož ve své klasické formě je toxické. Ve většině případů je gadolinium navázáno na chelátové komplexy. (Státní ústav pro kontrolu léčiv, 2017) (Questions and Answers in MRI, 2022)



Obrázek 8: Gadoliniová KL pro MRI, Zdroj: (Llamas, 2022)

## 2 Cíle práce a hypotézy

### 2.1 Cíle práce

#### Globální cíl:

- Interdisciplinární komunikací vytvořit odborný popis role fermionů a bosonů v magnetické rezonanci.

#### Dílčí cíle:

- **C1:** Data processing – fyzika elementárních částic
- **C2:** Data processing – klasická podoba teorie elektromagnetického pole
- **C3:** Data processing – struktura magnetické rezonance
- **C4:** Data processing – kvantová mechanika protonů

### 2.2 Hypotézy

- **H1:** Komparací struktury MR a klasické podoby elektromagnetického pole lze vytvořit klasickou dimenzi fyzikální podstaty MR.
- **H2:** Komparací struktury MR a kvantové mechaniky protonů lze vytvořit kvantovou dimenzi fyzikální podstaty MR.
- **H3:** Komparací struktury MR a kvantové dimenze fyzikální podstaty MR se standardním modelem el. částic a jejich interakcí lze popsat role fermionů a bosonů v rámci popisu fyzikální podstaty MR.

### 3 Metodika

Praktická část bakalářské práce je věnována tvorbě interdisciplinární teorie. Interdisciplinární teorie vzniká komparací struktur medicínské a fyzikální části magnetické rezonance.

Získávání dat probíhalo formou obvykle nazývanou „data processing“. Touto metodou byla nejdříve sbírána data o elementárních částicích a jejich interakcích, dále o kvantové fyzice, a nakonec také o praktickém využití magnetické rezonance v medicíně. Informace byly sbírány z nejrůznějších knih, článků a internetových zdrojů s cílem vytvořit komplexní pohled na dílčí teorie.

Po zkompletování veškerých informací byly tyto informace strukturálně zpracovány. V podstatě byly vytvořeny tři strukturální podoby teorií, které v sobě nesly implicitně skryté informace o roli fermionů a bosonů v rámci magnetické rezonance.

Důležitou částí metodiky byly proto strukturální analýzy podniknuté v rámci teoretické části bakalářské práce. Mezi tyto strukturální analýzy patří:

1. Vytvoření strukturálního obrazu klasické teorie elektromagnetického pole a elementárních částic hrajících roli v této klasické podobě.
2. Vytvoření strukturálního obrazu kvantové teorie jádra (s protonovým číslem  $Z=1$ ) a elementárních částic hrajících roli v této kvantové teorii.
3. Vytvoření strukturálního obrazu praktického využití magnetické rezonance a popisných aspektů aplikací této zobrazovací metody.

Realizace uvedených tří strukturálních analýz proběhla v rámci teoretické části bakalářské práce a kvalitativním přínosem bylo sledování komparativní cesty umožňující vznik interdisciplinární teorie. Vzniklé strukturální obrazy byly jen prostředkem k formulování interdisciplinarit na průniku fyziky a medicíny.

Prvním krokem k formulování interdisciplinarit byla komparace magnetické rezonance a elektromagnetického pole. Druhým krokem k formulování interdisciplinarit byla komparace elementárních částic a jejich interakcí a kvantové podstaty se strukturou magnetické rezonance.



## 4 Výsledky

Výsledné komparace byly rozděleny do dvou částí ve vazbě na formulované hypotézy.

### 4.1 *Komparace struktury magnetické rezonance a elektromagnetického pole*

Pro správné pochopení elektromagnetického pole v souvislosti s magnetickou rezonancí je potřeba využít znalosti o Maxwellových rovnicích, spojených se znalostí klinického využití magnetické rezonance.

Existují 2 Gaussovy zákony, které jsou si podobné ale ten pro magnetismus je odlišný v tom, že magnetické póly existují pouze v párech, a tudíž nemůže existovat žádný monopól, což u elektrického pole jde. U magnetické rezonance se polarizace využívá k celkovému usnadnění práce. Pokud totiž na radiodiagnostických pracovištích byl blízko sebe více než jeden přístroj s opačnou polarizací, tak tato silná magnetická pole spolu mohla snadněji interagovat a tento jev poškozoval vyšetření a výsledný obraz. Proto jsou v dnešní době přístroje nakonfigurovány tak, aby jižní magnetický pól byl na straně, kudy se pacient dostává do přístroje. Důraz na správnou polarizaci přístroje je kladen především u přístrojů s velice silným magnetickým polem, která jsou zatím pouze ve výzkumných centrech a v nemocnicích se stále využívají buď 1,5 T nebo 3 T přístroje. Nicméně tento fakt nám potvrzuje neexistenci magnetického monopólu, jelikož v případě jeho existence by bylo správné polarizování přístrojů irelevantní. Klasická varianta Gaussova zákona v zobrazování magnetickou rezonancí nehraje takovou roli. Největší roli hraje elektrické pole a konkrétně jeho intenzita ve veličině zvané SAR neboli specific absorption rate. Tato veličina nám slouží podobně jako u CT dozimetrické veličiny ke kontrole expozice. Na rozdíl například od CT, kde kontrolujeme míru ionizujícího záření, tak v magnetické rezonanci je tělo vystaveno elektromagnetickému záření, a to je také potřeba nějak kontrolovat. Kontrolní veličinou je zde právě SAR, který při výpočtu zohledňuje rozměry vyšetřovaného objektu, či vzdálenost od zdroje. Jelikož jediným vědecky ověřeným negativním dopadem elektromagnetického záření je ohřívání tkání, tak je potřeba SAR regulovat. SAR lze ovlivňovat při plánování jednotlivých sekvencí (např. změna repetičního času (TR) nebo vychylovacího úhlu).

Další Maxwellovou rovnicí je Faradayův zákon. Ten se zabývá elektromagnetickou indukcí. Tento poznatek je pro magnetickou rezonanci poměrně zásadní, jelikož se poměrně výrazně podílí na tvorbě obrazu. Konkrétně se Faradayův zákon týká cívek. Nicméně gradientní cívky, které jsou umístěny uvnitř přístroje a slouží jako elektromagnety využívají spíše poznatků o elektromagnetismu z hlediska Ampérova zákona. Roli Ampérova zákona se budu zabývat níže. Faradayův zákon o elektromagnetické indukci můžeme konkrétně pozorovat u radiofrekvenčních cívek, které se mohou využít jak pro vysílání signálu (90° nebo 180° pulzy), tak pro jeho příjem. V případě, že cívka funguje jako detektor signálu, tak v důsledku relaxace systému, což je z hlediska fyziky předávání energie buď mezi spiny, nebo spinem a okolím. Každopádně tyto změny ovlivňují magnetický tok a ten, jak již známe ze znění Faradayova zákona, generuje elektrický proud v radiofrekvenční cívce. Vygenerovaný proud je následně zdigitalizován, filtrován a zesílen. Proces úpravy signálu probíhá pomocí Fourierových transformací. Veškeré přijaté signály mají rozdílné amplitudy a Fourierovy transformace tyto signály harmonizují.

Poslední Maxwellovou rovnicí je Maxwellův-Ampérův zákon. Původní zákon byl vytvořen pro stacionární pole pouze Ampérem, nicméně postupem času přišel Maxwell se svým vylepšením pro nestacionární pole. Ve své podstatě se zabývá vztahem mezi elektrickým proudem a magnetickým polem. Tento poznatek proto můžeme využít u gradientních cívek. Když přivedeme do cívky elektrický proud, začne generovat magnetické pole. Toto magnetické pole dokáže narušit hlavní magnetické pole  $B_0$ , a díky tomu dokážeme měnit rezonanční frekvenci protonů. Gradienty jsou důležité pro lepší lokalizaci a s tím spojenou lepší diagnostickou výtěžnost z vyšetření. U přístrojů jsou takto využívána 3 přídatná magnetická pole, jedno pro každou anatomickou rovinu těla. V MR strojích se využívají ještě další druhy cívek, jako jsou např. supravodivé cívky, jejichž princip v sobě mixuje poznatky o Maxwellových rovnicích a roli elementárních částic na poli supravodivosti. Supravodivé cívky vytvářejí potřebné silné magnetické pole.

Výsledky komparace magnetické rezonance a elektromagnetického pole a tím i vytvoření první složky interdisciplinární teorie fyzikálního a medicínského pohledu na magnetickou rezonanci lze shrnout následujícím způsobem:

1. Komparace Gaussových zákonů a medicínské a technické struktury magnetické rezonance umožnila vedle dalších aspektů především charakterizovat interdisciplinární podobu SAR (Specific Absorption Rate).
2. Komparace Faradayova zákona a medicínské a technické struktury magnetické rezonance umožnila charakterizovat fyzikální a medicínský aspekt radiofrekvenčních cívek a jejich podílu na tvorbě obrazu.
3. Komparace Maxwellova-Ampérova zákona a medicínské a technické struktury magnetické rezonance umožnila charakterizovat roli gradientních cívek z jiného než medicínského úhlu pohledu.

Souhrn této složky postupně formulované interdisciplinární teorie ukazuje na roli fotonů (bosonů) v oblasti SAR, tvorby obrazu a diagnostické výtěžnosti z vyšetření.

#### *4.2 Komparace elementárních částic a jejich interakcí se strukturou magnetické rezonance a její kvantovou podstatou*

Úvodními komparacemi, kterými se budu zabývat v tomto sektoru je úloha elementárních částic v magnetické rezonanci.

První komparace, kterou jsem na základě poznatků z teoretické části mohl vytvořit je úloha elektronu. Jak již bylo zmíněno výše, elektrony podle standartního modelu elementárních částic patří do kategorie fermionů, ale jsou schopny svou interakcí s fonony stvořit Cooperovy páry, které se již řadí mezi bosony, protože pro ně neplatí Pauliho princip výlučnosti, jelikož ve stejném kvantovém stavu dokáže společně existovat více Cooperových párů. Tyto páry hrají významnou roli v supravodivosti, která je poměrně důležitá pro zobrazování magnetickou rezonancí. Pro MR je důležitý poznatek, že Cooperovy páry lze rozdělit aplikací vyšších teplot, proto je součástí MR přístrojů pro zachování supravodivých vlastností kryostat s kapalným héliem o teplotě 4,2 K. Udržením supravodivosti napomáháme přístroji k lepším rozlišovacím schopnostem. Supravodivost je porušena jen v případě tzv. quenche, který nastává jen v naléhavých případech.

Další nezbytnou elementární částicí pro magnetickou rezonanci jsou protony. Společně s elektrony jsou nejdůležitějšími částicemi pro MRI. Nejvyužívanějším prvkem v magnetické rezonanci je vodík, díky tomu, že je sestaven pouze z jednoho protonu a jednoho elektronu. Vodíku také nahrává fakt, že vodík se vyskytuje ve vodě a lidské tělo je více než z poloviny složeno z vody. Pro protony stejně jako pro elektrony platí Pauliho vylučovací princip, a proto je zařazujeme mezi fermiony. Dalším řazením jsou protony rozříděny mezi baryony, jelikož jsou složeny ze všech třech barevných kvarků. Ohledně složení se proton skládá ze dvou up kvarků a jednoho down kvarku. Sečtením všech kvarkových spinů nám vznikne výsledný spin protonu, který je roven  $\frac{1}{2}$ . Pro kvantovou dimenzi magnetické rezonance jsou důležitá kvantová čísla, která určují chování celého systému.

Z hlediska kvantové mechaniky a matematiky jsou kvantová čísla odvozeny ze Schrödingerovy rovnice. Pomocí Schrödingerovy rovnice lze odvodit magnetické, hlavní a vedlejší kvantové číslo, ale již ne spinové. Ovšem pro magnetickou rezonanci hraje primární roli spin, jelikož jádra s nenulovým spinem jako jsou například protony a elektrony vykazují magnetický moment neboli také gyromagnetický poměr. Pro zjištění vzájemné komunikace mezi MR a kvantovou mechanikou nám tedy stačí náhled na kvantovou mechaniku protonů, jelikož protony hrají v magnetické rezonanci zásadní roli. Kvantová podstata magnetické rezonance je závislá na Schrödingerově rovnici a kvantových číslech. Důležitou roli v kvantové podstatě hraje také Diracova rovnice, jež pracuje s částicemi, které mají spin roven  $\frac{1}{2}$ . Tato rovnice má tvar  $i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t} = \hat{H}\psi$ , přičemž  $\hat{H} = a^1 \partial_1 + a^2 \partial_2 + a^3 \partial_3 + b$ . Jak již bylo zmíněno v teoretické části, tak tato rovnice dokazuje existenci spinu částic, díky čemuž můžeme říct, že se podle ní řídí fermiony. Nevýhodou je možnost záporné hodnoty energie.

V případě uložení pacienta do magnetického pole se protony dostávají do paralelní a méně stabilní antiparalelní pozice. Toto rozdělení je způsobeno Zeemanovým jevem. Mimo magnetické pole mají protony stejnou energetickou hladinu. Při kontaktu s magnetickým polem se energie lehce odlišují, což má za následek štěpení spektrálních čar, a to vede k již zmíněné paralelní/antiparalelní konfiguraci. Zeemanova teorie napomohla vzniku Larmorovy rovnice. Původně Zeeman vytvořil stejný tvar jako

Larmor, ale v jeho rovnici byla navíc na obou stranách Planckova konstanta, kterou Larmor navzájem pokrátí a vznikl tvar, jak ho známe dnes.

Jak bylo výše zmíněno, tak pro magnetickou rezonanci je nejvyužívanější hodnota gyromagnetického poměru 42,58, což je magnetický moment vodíku. Hodnota magnetického momentu je důležitá pro výpočet Larmorovy frekvence. Larmorovu frekvenci jednoduše spočítáme tak, že vynásobíme gyromagnetický poměr s hodnotou magnetické indukce  $B_0$ . Pro klasické radiodiagnostické MR přístroje nám tak vychází Larmorova frekvence 63,87 pro 1,5 T stroje a 127,74 pro 3 T přístroje. Pro onu rezonanci je Larmorova frekvence nesmírně důležitá, jelikož jedině pokud se Larmorova frekvence vyslaného pulzu shoduje s frekvencí precesního pohybu protonů, tak dojde k předání energie a rezonanci na této frekvenci. Po vyslání a přijmutí radiofrekvenčního pulzu o Larmorově frekvenci jsou protony vybudeny a vychylovány ze stabilnější paralelní pozice do polohy antiparalelní, která je již poměrně nestabilní a energeticky náročná. Poměr antiparalelních a paralelních protonů nikdy nemůže být shodný, jelikož by došlo k vyrušení magnetických momentů. Z tohoto důvodu vždy převažuje paralelní pozice díky své snadnější udržitelnosti. Excitací protonu získá proton vyšší vnitřní energii, než jakou by měl v paralelní poloze. Nárůstem antiparalelně uspořádaných protonů nám zároveň klesá počet paralelních protonů. Díky tomuto faktu narůstá příčná magnetizace a ubývá podélná. Po ukončení působení pulzu se veškeré excitované protony navrací do své původní podoby. Tento jev je známý jako relaxace. Pro fyzikální popis relaxací nám slouží Blochovy rovnice. Po ukončení pulzu systém začíná relaxovat a důsledkem relaxace je pokles příčné magnetizace a zároveň nárůst magnetizace podélné. Z hlediska magnetická rezonance rozeznáváme 2 druhy relaxací –  $T_1$  a  $T_2$ .  $T_1$  čas je časový úsek, za jaký dokáže systém obnovit podélnou magnetizaci na 63% původní hodnoty. Nárůst podélné magnetizace lze vypočítat pomocí následující rovnice:  $M_z = M_0(1 - e^{-t/T_1})$ . Každá tkáň relaxuje jinak, a proto je pro nás důležité znát, kdy dosáhne 63% hodnoty podélné magnetizace, jelikož systém je v ten moment dostatečně zrelaxovaný a po použití dalšího  $90^\circ$  pulzu bude vysláno stejné množství energie. Objekty, které se nestíhají zrelaxovat budou na výsledném obraze hyposignální – budou mít černou barvu. Pro rychlost relaxace je důležitá velikost molekuly. Například voda díky své malé velikosti a rychlosti pohybu relaxuje déle, jelikož hůře předává svou energii do okolí. Naopak tuk je „těžkopádná“ molekula a svou energii předává snadněji, proto je tuk na finálních

obrazech světlý. Jelikož jsou protony v excitovaném stavu, tak aby mohl systém vůbec přejít do relaxace, tak je potřeba se přebytečné energie nějak zbavit. Při longitudinální relaxaci se systém nadbytečné energie zbavuje vyzařováním do okolí. Konkrétně do jiných atomů či molekul pomocí srážek či elektromagnetických interakcí, které jak víme mají neomezený dosah a týkají se pouze částic, které mají nějaký elektrický potenciál a protony, jakožto kladně nabitě částice tuto podmínku splňují.

Druhým typem relaxace je  $T_2$  relaxace. To je čas, který je potřebný k poklesu příčné magnetizace na 37 % své původní hodnoty. Tkáně mají stejně jako u  $T_1$  rozdílné i  $T_2$  časy, což napomáhá k většímu kontrastu obrazu. Další podobností s  $T_1$  je i nutnost nějak ventilovat přebytečnou energii. Obecně můžeme říct, že  $T_1$  relaxace ovlivňuje  $T_2$  relaxaci, jelikož jak již bylo zmiňováno, tak při  $T_1$  relaxaci je energie vyzařována do okolních atomů či molekul. To může mít za následek ovlivnění některého ze sfázovaných spinů a precesí protonů. Díky desynchronizaci precesních pohybů začíná ubývat příčná magnetizace a systém tak  $T_2$  relaxuje. Úbytek příčné magnetizace se řídí podle následujícího vztahu:  $M_{XY} = M_0 e^{-t/T_2}$ . Při popisu Blochových rovnic je rovněž důležité zmínit rovnice využívané po aplikaci  $90^\circ$  pulzu.

$$M_y(t) = M_0 e^{-t/T_2} \cos \omega t$$

$$M_z(t) = M_0 (1 - e^{-t/T_1})$$

$$M_x(t) = M_0 e^{-t/T_2} \sin \omega t$$

Jejich řešení nám napovídá, že proton koná precesní pohyb a frekvence tohoto pohybu je rovna Larmorově frekvenci.

Další důležitou součástí magnetické rezonance jsou kontrastní látky. Stejně jako u CT či skiaskopie, tak i u magnetické rezonance se využívají kontrastní látky. Výhodou je, že kontrastní látky pro MR nejsou jodové, nýbrž sloučeniny gadolinia. Gadolinium má poměrně silné paramagnetické vlastnosti. V dnešní době se ale zkoumá, jestli gadoliniové kontrastní látky nemají větší negativní dopad na tělo. Nicméně alergoidní reakce se u gadolinia vyskytují méně než u jodových kontrastních látek. Kontrast na bázi gadolinia má kratit relaxační časy tkání. Schopnost paramagnetizace u gadolinia není zapříčiněna protony, nýbrž díky elektronům. Jak je známo, tak elektrony jsou velikostně menší než

protony, a proto když zhodnotíme jejich shodný spin s protony, tak nám vyjde že budou mít několikanásobně vyšší gyromagnetický poměr. V případě, že v orbitalech prvku nejsou elektrony spárovány díky opačným spinům, tak nepárové elektrony mají vysoký magnetický moment, který dokáže způsobovat relaxaci. Gadolinium je využíváno právě díky svému chemickému složení, kdy mají hodně nepárových elektronů, a proto v těle hodně narůstá magnetický moment a tkáň rychleji relaxují. Celková míra paramagnetizace se řídí Curieho zákonem ve tvaru:  $M = \frac{CB}{T}$ .

Výsledky komparací magnetické rezonance a elementárních částic a jejich interakcí a kvantové povahy a tím i vytvoření druhé složky interdisciplinární teorie fyzikálního a medicínského pohledu na magnetickou rezonanci lze shrnout následujícím způsobem:

1. Elektrony (fermiony) a Cooperovy páry (bosony) umožňují zachování supravodivých vlastností prostřednictvím kryostatu s kapalným héliem o teplotě 4,2 K.
2. Zásadní roli hrají v magnetické rezonanci protony (fermiony). Při uložení pacienta do magnetického pole se protony dostávají do paralelní a méně stabilní antiparalelní pozice. Odtud pramení význam Schrödingerovy rovnice, Diracovy rovnice, Zeemanova jevu a kvantových čísel. Mimo magnetické pole mají protony stejnou energetickou hladinu. Podstatný je magnetický moment vodíku (protonu), který umožňuje výpočet Larmorovy frekvence.
3. Antiparalelně uspořádané excitované protony a převažující paralelně uspořádané excitované protony jsou spojeny s příčnou a podélnou magnetizací. Po ukončení působení fotonů (bosonů) z působení elektromagnetického pole se excitované protony navracejí do své původní podoby. Tento jev je medicínsky znám jako relaxace. Fyzikální popis relaxace umožňují Blochovy rovnice.
4. Další důležitou součástí magnetické rezonance jsou kontrastní látky v podobě sloučenin gadolinia, které mají silné paramagnetické vlastnosti. Schopnost paramagnetizace je zapříčiněna elektrony (fermiony). Kontrastní látky na bázi gadolinia umožňují zkrátit relaxační časy. Celková míra paramagnetizace se řídí Curieho zákonem.

## 5 Diskuze

Úvodem bych rád zmínil cíle, které byly pro tuto bakalářskou práci vytyčeny. Hlavním cílem bylo pomocí interdisciplinární komunikace objasnit roli fermionů a bosonů v magnetické rezonanci. K naplnění globálního cíle byly ještě stanoveny cíle dílčí, jejichž plněním mohla vzniknout interdisciplinarita. Pro plnění těchto minoritních cílů byla využita metoda data processingu. Principem této metody bylo sesbírat data ze všemožných relevantních a důvěryhodných zdrojů, a po nasbírání dostatku dat mohla začít vznikat interdisciplinarita. 3 ze čtyř minoritních cílů obsahovaly shromáždění dat z pole fyziky a v rámci naplnění posledního cíle jsem posbíral také informace o klinickém využití magnetické rezonance a struktúře tohoto přístroje. Všechny stanovené cíle byly naplněny v rámci teoretické části.

Jelikož celá teoretická část byla věnována naplnění cílů práce, tak v praktické části, která byla tvořena formou komparací mezi jednotlivými obory, jsem se věnoval potvrzení či vyvrácení 3 stanovených hypotéz:

- **H1:** Komparací struktury MR a klasické podoby elektromagnetického pole lze vytvořit klasickou dimenzi fyzikální podstaty MR.
- **H2:** Komparací struktury MR a kvantové mechaniky protonů lze vytvořit kvantovou dimenzi fyzikální podstaty MR.
- **H3:** Komparací struktury MR a kvantové dimenze fyzikální podstaty MR se standardním modelem el. částic a jejich interakcí lze popsat role fermionů a bosonů v rámci popisu fyzikální podstaty MR.

Praktická část byla rozdělena pro lepší přehlednost do 2 částí. První segment praktické části jsem věnoval aplikaci a roli elektromagnetického pole v klinickém použití magnetické rezonance. Již v průběhu náběru informací o těchto odvětvích jsem se domníval, že první hypotéza bude potvrzena. Po důkladném data processingu a následném srovnání v praktické části mohu říct, že hypotéza H1 byla potvrzena.

V druhém oddílu praktické části jsem se již začal zabývat přímo konkrétními elementárními částicemi a jakou mají úlohu v zobrazení magnetickou rezonancí. Všechny nasbírané informace opět prošly důkladným procesem sortování, aby má výsledná práce



měla co největší důvěryhodnost. Díky tomuto segmentu bylo možno potvrdit hypotézy H2 a H3.

Primárním zaměřením této práce bylo objasnit jakou roli mají fermiony a bosony v magnetické rezonanci. Když vezmeme v potaz obrovské množství elementárních částic, které popisuje standární model, tak pro magnetickou rezonanci jsou důležité pouze 2, potažmo 3.

Jak je již známo, tak pro zobrazování a tvorbu signálu jsou nejpodstatnější protony, které díky jejich složení řadíme mezi fermiony. Na zobrazování pomocí protonů je založena celá magnetická rezonance. Důležitá je jejich interakce se statickým magnetickým polem, kdy po uvedení těla do tohoto silného magnetického pole jeho protony začnou synchronizovat své spiny. Pro protony je charakteristický ještě precesní pohyb, jehož frekvence je rovna Larmorově frekvenci. Po vybuzení radiofrekvenčním pulzem protony synchronizují své precese a po návratu do normálního stavu je přebytečná energie detekována a následně digitalizována a zpracovávána ve formě obrazu.

Další elementární částicí nezbytnou pro správnou funkci magnetické rezonance je elektron, který stejně jako proton řadíme rovněž mezi fermiony. V praktické části jsem ilustroval, že elektrony mají vliv u principu kontrastních látek v magnetické rezonanci. Mají totiž vysoké paramagnetické schopnosti, které jsou způsobovány právě elektrony. Můžeme říct, že prvky, které mají co nejvíce orbitalů obsazených pouze jedním elektronem, tak budou mít vyšší magnetické momenty než zaplněné orbitály. Právě díky vhodné elektronové konfiguraci se jako kontrastní látka v magnetické rezonanci primárně využívá gadolinium, které má poměrně hodně nezaplňených orbitalů. Gadolinium proto díky vyššímu magnetickému momentu umožňuje rychlejší relaxaci protonů, které se zase podílí na signálu a obraz proto má vyšší kontrast.

V magnetické rezonanci nemají svou úlohu pouze fermiony, ale jak jsem v průběhu praktické části zjistil, tak také bosony. Konkrétně jsou to Cooperovy páry, což je prakticky pár elektronů, které už ale patří do skupiny fermionů. Mezi bosony se Cooperovy páry řadí díky možnosti koexistovat ve stejném kvantovém stavu s více takovými páry. Takto napárované elektrony hrají zásadní roli pro supravodivost. Jak bylo zmíněno v praktické části, tak ta má v magnetické rezonanci důležité postavení,

jelikož díky svým supravodivým cívkám a magnetům napomáhá ke zlepšení rozlišovacích schopností přístroje. Principem supravodivosti u většiny materiálu je to, že si své supravodivé vlastnosti udržují při velmi nízkých teplotách, což je také případ magnetické rezonance, kde k udržení takto nízkých teplot využíváme kapalné hélium. Supravodivost při takto nízkých teplotách je právě způsobována Cooperovými páry, které lze rozdělit pouze vyššími teplotami. Po rozdělení párů materiál přestává být supravodivý.

Domnívám se, že interdisciplinární pohled na magnetickou rezonanci je důležitý pro lepší pochopení principů, na jakých magnetická rezonance pracuje, což by do budoucna mohlo ovlivnit kvalitu radiologických asistentů.

V souhrnu tvorba interdisciplinární teorie měla dvě hlavní části:

1. První složka interdisciplinární teorie fyzikálního a medicínského pohledu na magnetickou rezonanci je tvořena vazbou Gaussových zákonů, Faradayova zákona a Maxwellova zákona na „Specific Absorption Rate“, na tvorbu obrazu a na diagnostickou výtěžnost z vyšetření. Tato složka interdisciplinární teorie ukazuje na roli fotonů (bosonů) v oblasti SAR, tvorby obrazu a diagnostické výtěžnosti z vyšetření. První složka interdisciplinární teorie zároveň umožnila přijmout hypotézu H1 jako hypotézu ověřenou.
2. Druhá složka interdisciplinární teorie fyzikálního a medicínského pohledu na magnetickou rezonanci je tvořena vazbou Boseho-Einsteinovy statistiky (Cooperovy páry – bosony), Schrödingerovy a Diracovy rovnice (protony – fermiony), Larmorovy a Blochovy rovnice (protony – fermiony), Curieova zákona (elektrony – fermiony) na aplikaci kapalného hélia v rámci kryostatu, na příčnou a podélnou magnetizaci a relaxační časy a na kontrastní látky na bázi gadolinia. Tato složka interdisciplinární teorie ukazuje na roli Cooperových párů (bosonů), protonů (fermionů) a elektronů (fermionů) v oblasti kryogenního a gradientního magnetického pole a silné paramagnetizační role gadolinia. Druhá složka interdisciplinární teorie tedy umožnila přijmout hypotézy H2 a H3 jako hypotézy ověřené.

## 6 Závěr

Z hlediska radiodiagnostiky je v dnešní době magnetická rezonance jednou z nejvyužívanějších modalit. Své uplatnění nenachází pouze v oblasti radiodiagnostiky, ale také v onkologii či v nukleární medicíně jako hybrid PET/MR. V teoretické části jsem se zabýval jednotlivými dílčími cíli, vytyčenými pro tuto bakalářskou práci. Přesně jsem se zabýval sesbíráním dat z několika různých odvětví. Nejprve jsem se zaměřil na principy interdisciplinarity, komparace a data processingu. Dále jsem již kompletoval data z pole fyziky, konkrétně fyziku elementárních částic a jakými interakcemi se řídí, dále elektromagnetickým polem a závěr fyzikální teorie byl zasvěcen kvantové mechanice. Po dokončení fyzikální teorie bylo důležité vytvořit také teorii o magnetické rezonanci z hlediska jejího medicínského využití. Všechny dílčí cíle byly v teoretické části naplněny. K dílčím cílům byl ještě stanoven globální cíl. Ten se měl zabývat vytvořením odborného popisu role fermionů a bosonů v magnetické rezonanci pomocí interdisciplinární komunikace. Plněním tohoto cíle jsem se zabýval až v části praktické, stejně jako potvrzením či vyvrácením následujících hypotéz:

- **H1:** Komparací struktury MR a klasické podoby elektromagnetického pole lze vytvořit klasickou dimenzi fyzikální podstaty MR.
- **H2:** Komparací struktury MR a kvantové mechaniky protonů lze vytvořit kvantovou dimenzi fyzikální podstaty MR.
- **H3:** Komparací struktury MR a kvantové dimenze fyzikální podstaty MR se standardním modelem el. částic a jejich interakcí lze popsat role fermionů a bosonů v rámci popisu fyzikální podstaty MR.

V průběhu praktické části byly postupně potvrzeny všechny tři hypotézy.

Pomocí ověřených hypotéz H1, H2, H3 formulovaná interdisciplinární teorie medicínské a fyzikální podoby magnetické rezonance popsala roli fermionů (elektronů, protonů) a bosonů (fotonů, Cooperových párů) ve vazbě na fyzikální složku interdisciplinární teorie, tj. ve vazbě na Gaussovy zákony, Faradayův zákona, Maxwellův-Ampérův zákon,

Boseho-Einsteinovu statistiku, Schrödingerovu a Diracovu rovnici, Larmorovu a Blochovu rovnici a Curieův zákon.

Pomocí ověřených hypotéz H1, H2, H3 formulovaná interdisciplinární teorie medicínské a fyzikální podoby magnetické rezonance popsala roli fermionů (elektronů, protonů) a bosonů (fotonů, Cooperových párů) ve vazbě na medicínskou složku interdisciplinární teorie, tj. ve vazbě na SAR, na tvorbu obrazu, na diagnostickou výtěžnost z vyšetření, na roli kryostatu, na příčnou a podélnou magnetizaci a relaxační časy, a na kontrastní látky na bázi gadolinia.

Tato práce by do budoucna mohla sloužit nejen jako podoba vybudované interdisciplinární teorie, ale také jako pomocný výukový materiál ke snadnějšímu pochopení klinické části magnetické rezonance a jejím fyzikálním souvislostem.

## 7 Seznam použitých zdrojů

1. ABDULLA, Sarah. *Frequency Encoding*. In: Radiology Café. [online] 10.10.2021 [cit.2022-02-13] Dostupné z: <https://www.radiologycafe.com/frcr-physics-notes/mr-imaging/frequency-encoding/>
2. ABDULLA, Sarah. *Slice Selection*. In: Radiology Café. [online] 10.10.2021 [cit.2022-02-13] Dostupné z: <https://www.radiologycafe.com/frcr-physics-notes/mr-imaging/slice-selection/>
3. BEISER, A. *Úvod do moderní fyziky*. Praha: Academia, 1977. ISBN 104-21-852.
4. BRANDOS, Otakar. *Gluony, částice udržující jádro atomu*. In: Treking.cz. [online] 14.10.2016 [cit.2021-09-27] Dostupné z: <https://www.treking.cz/astronomie/gluony.htm>
5. BRANSON, Jim. *The Dirac Equation*. In: Quantum Mechanics. [online] 22.4.2013 [cit.2021-10-29] Dostupné z: [https://quantummechanics.ucsd.edu/ph130a/130\\_notes/node45.html](https://quantummechanics.ucsd.edu/ph130a/130_notes/node45.html)
6. Britannica. *Boson: Subatomic Particle*. [online] 2021 [cit. 2021-09-10] Dostupné z: <https://www.britannica.com/science/boson>
7. Britannica. *Gluon: Subatomic Particle*. [online] 2021 [cit. 2021-09-18] Dostupné z: <https://www.britannica.com/science/gluon>
8. Britannica. *Lepton: Physics*. [online] 2021 [cit. 2021-09-22] Dostupné z: <https://www.britannica.com/science/lepton>
9. Britannica. *Photon: Subatomic Particle*. [online] 2021 [cit.2021-09-30] Dostupné z: <https://www.britannica.com/science/photon>
10. Britannica. *Quark: Subatomic Particle*. [online] 2021 [cit.2021-09-12] Dostupné z: <https://www.britannica.com/science/quark>
11. CERN Accelerating science. *Superconductivity*. [online] 2022 [cit.2022-01-29] Dostupné z: <https://home.cern/science/engineering/superconductivity>
12. Department of Radiology & Biomedical Imaging. *Magnet Quench*. [online] 2021 [cit.2022-04-01] Dostupné z: <https://radiology.ucsf.edu/patient-care/patient-safety/mri/quench>
13. DLOUHÁ, Jana a Bedřich MOLDAN. *Inter-, multi-, trans-disciplinarita – vymezení pojmů*. In: Envigogika. [online] 31.08.2007 [cit.2022-02.20] Dostupné z: <https://envigogika.cuni.cz/index.php/Envigogika/article/view/113/121>

14. DVOŘÁK, Tomáš et al. *Úvod do studia dějepisu – 1.díl*. [online] 1. vydání. Brno: Masarykova univerzita, 2014. ISBN 978-80-210-7013-4. [cit.2022-03-15]  
Dostupné z: <https://digilib.phil.muni.cz/data/handle/11222.digilib/130405/monography.pdf>
15. EM GeoSci. *Ampere - Maxwell*. [online] 2015 – 2018 [cit.2022-02-010] Dostupné z: [https://em.geosci.xyz/content/maxwell1\\_fundamentals/formative\\_laws/ampere\\_maxwell.html](https://em.geosci.xyz/content/maxwell1_fundamentals/formative_laws/ampere_maxwell.html)
16. EM GeoSci. *Faraday's Law*. [online] 2015 – 2018 [cit.2022-02-06] Dostupné z: [https://em.geosci.xyz/content/maxwell1\\_fundamentals/formative\\_laws/faraday.html](https://em.geosci.xyz/content/maxwell1_fundamentals/formative_laws/faraday.html)
17. e-MRI. *Spatial Encoding in MRI*. In: IMAIOS. [online] Copyright © 2008–2022 [cit.2022-02-17] Dostupné z: <https://www.imaios.com/en/e-Courses/e-MRI/Signal-spatial-encoding/Phase-encoding>
18. Encyclopedia. *Gauss's Law for Magnetism*. [online] 2021 [cit.2021-10-15] Dostupné z: [https://wikijii.com/wiki/Gauss%27s\\_law\\_for\\_magnetism](https://wikijii.com/wiki/Gauss%27s_law_for_magnetism)
19. Enpedie. *Maxwellovy rovnice*. [online] 2013 [cit.2022-04-09] Dostupné z: [http://enpedie.cz/wiki/Maxwellovy\\_rovnice](http://enpedie.cz/wiki/Maxwellovy_rovnice)
20. Fakultní nemocnice v Motole. *Magnetická rezonance pro dospělé*. [online] 2012 [cit.2022-04-10] Dostupné z: <https://www.fnmotol.cz/kzm/oddeleni/magneticka-rezonance-dospela-cast/>
21. FORMÁNEK, Jiří. *Úvod do kvantové teorie*. Vyd. 2., upr. a rozš. Praha: Academia, 2004. ISBN 80-200-1176-5.
22. FOWLER, Michael. *Maxwell's Equations and Electromagnetic Waves*. In: Galileo and Einstein. [online] 1997 [cit.2022-03-23] Dostupné z: [http://galileo.phys.virginia.edu/classes/109N/more\\_stuff/Maxwell\\_Eq.html](http://galileo.phys.virginia.edu/classes/109N/more_stuff/Maxwell_Eq.html)
23. HALLIDAY, D., R. RESNICK a J. WALKER. *Fyzika*. VUT Brno. Praha: Prometheus, 2000. ISBN 9788071962137.
24. Chemicool Dictionary. *What Is a Phonon?* [online] 2020 [cit.2022-03-25] Dostupné z: <https://www.chemicool.com/definition/phonons.html>
25. Chemistry-LibreTexts. *Schrödinger and Heisenberg Representations*. [online] 2021 [cit.2021-10-29] Dostupné z: [https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Physical\\_and\\_Theoretical\\_Chemistry\\_T](https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Physical_and_Theoretical_Chemistry_T)

- [extbook\\_Maps/Time\\_Dependent\\_Quantum\\_Mechanics\\_and\\_Spectroscopy\\_\(To\\_kmakoff\)/03%3A\\_Time-Evolution\\_Operator/3.05%3A\\_Schrodinger\\_and\\_Heisenberg\\_Representations](#)
26. KAPOUN, Jan. *Příběh Higgsova bosonu*. In: Science World. [online] 2011 [cit.2021-09-20] Dostupné z: <https://www.scienceworld.cz/neziva-priroda/pribeh-higgsova-bosonu-2285/>
  27. KONEČNÝ, Jiří. *Radiační fyzika*. 1. vydání. České Budějovice: Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích: Zdravotně sociální fakulta, 2006. ISBN 80-7040-843-X.
  28. KULHÁNEK, Petr. *Blyškání: Fermiony a bosony*. [online] 2011 – 2012 [cit. 2021-11-23] Dostupné z: <https://www.aldebaran.cz/zvuky/blyskani/docs/25.html>
  29. KULHÁNEK, P., I. HAVLÍČEK, J. ROZEHNAL a D. BŘEŇ. *Elektromagnetická interakce*. In: Aldebaran. [online] 2018 [cit.2021-11-08] Dostupné z: <https://www.aldebaran.cz/astrofyzika/interakce/elmg.php>
  30. KULHÁNEK, P., I. HAVLÍČEK, J. ROZEHNAL a D. BŘEŇ. *Astrofyzika: Kvarky*. In: Aldebaran. [online] 2018 [cit.2021-11-06] Dostupné z: <https://www.aldebaran.cz/astrofyzika/interakce/quarks.php>
  31. KULHÁNEK, P., I. HAVLÍČEK, J. ROZEHNAL a D. BŘEŇ. *Astrofyzika: Leptony*. In: Aldebaran. [online] 2018 [cit.2021-11-05] Dostupné z: <https://www.aldebaran.cz/astrofyzika/interakce/leptons.php>
  32. KULHÁNEK, P., I. HAVLÍČEK, J. ROZEHNAL a D. BŘEŇ. *Astrofyzika: Polní částice a Higgs*. In: Aldebaran. [online] 2018 [cit.2021-11-07] Dostupné z: <https://www.aldebaran.cz/astrofyzika/interakce/forces.php>
  33. KULHÁNEK, P., I. HAVLÍČEK, J. ROZEHNAL a D. BŘEŇ. *Astrofyzika: Silná interakce*. In: Aldebaran. [online] 2018 [cit.2021-11-09] Dostupné z: <https://www.aldebaran.cz/astrofyzika/interakce/strong.php>
  34. KULHÁNEK, P., I. HAVLÍČEK, J. ROZEHNAL a D. BŘEŇ. *Astrofyzika: Slabá interakce*. In: Aldebaran. [online] 2018 [cit.2021-11-09] Dostupné z: <https://www.aldebaran.cz/astrofyzika/interakce/weak.php>
  35. KULHÁNEK, P. *TF2: Kvantová teorie*. In: Aldebaran. [online] 2021 [cit.2021-11-02] Dostupné z: <https://www.aldebaran.cz/studium/kvantovka.pdf>

36. KYBIC, J., J. HORNAK, M. BOCK a J. HOZMAN. *Magnetická rezonance (4)*. [online] 2008–2013 [cit.2022-02-06] Dostupné z: [https://cw.fel.cvut.cz/old/\\_media/courses/a6m33zsl/mri4.pdf](https://cw.fel.cvut.cz/old/_media/courses/a6m33zsl/mri4.pdf)
37. Laboratorní moduly – katedra fyziky FEL ČVUT v Praze. *Planckova konstanta*. [online] 2021 [cit.2021-09-10] Dostupné z: <https://www.aldebaran.cz/lab/planck/>
38. LLAMAS, Michelle. *Gadolinium*. In: Drugwatch [online] 2022 [cit.2022-04-07] Dostupné z: <https://www.drugwatch.com/gadolinium/>
39. LORENC, Miroslav. *Závěrečné práce – metodika*. In: Lorenc.info. [online] © 2007–2013. [cit.2022-03-04] Dostupné z: <https://lorenc.info/zaverecne-prace/metodika.htm>
40. Matematicko-fyzikální fakulta UK: Katedra didaktiky fyziky. *Maxwellovy rovnice*. [online] 2021 [cit.2021-10-18] Dostupné z: [https://kdf.mff.cuni.cz/vyuka/Fyzika2elmag/ElMag\\_12\\_MaxwellovyRovnice\\_ver\\_0a.pdf](https://kdf.mff.cuni.cz/vyuka/Fyzika2elmag/ElMag_12_MaxwellovyRovnice_ver_0a.pdf)
41. Maxwell's Equations. *Gauss' Law*. [online] 2021 [cit.2021-10-25] Dostupné z: <https://www.maxwells-equations.com/gauss/law.php>
42. MRIMASTER.com. *MRI Description for Patients and Public*. [online] 2022 [cit.2022-01-5] Dostupné z: <https://mrimaster.com/index.7.html>
43. NAVE, C.R. *Fundamental Forces*. In: HyperPhysics. [online] 2016 [cit.2021-09-23] Dostupné z: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Forces/funfor.html>
44. NAVE, C.R. *Leptons*. In: HyperPhysics. [online] 2016 [cit.2021-09-20] Dostupné z: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Particles/lepton.html#cl>
45. NAVE, C. R. *Quarks*. In: HyperPhysics. [online] 2016 [cit.2021-09-24] Dostupné z: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Particles/quark.html>
46. NAVE, C. R. *The Bose-Einstein Distribution*. In: HyperPhysics. [online] 2016 [cit.2022-04-02] Dostupné z: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/quantum/disbe.html>
47. Openstax. *Maxwell's Equations and Electromagnetic Waves*. [online] 2021 [cit.2021-10-02] Dostupné z: <https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/16-1-maxwells-equations-and-electromagnetic-waves>
48. Ox Science. *Schrodinger Time Dpendent Wave Equation*. [online] 10.12.2019 [cit.2021-11-10] Dostupné z: <https://oxscience.com/schrodinger-time-dependent-wave-equation/>



49. Physics232. *Fermions and Bosons*. [online] 2021 [cit.2021-09-25] Dostupné z: <https://web.pa.msu.edu/courses/1997spring/PHY232/lectures/atomic/bosons.html>
50. Questions and Answers in MRI. *Bloch Equations*. [online] 2021 [cit.2022-03-12] Dostupné z: <https://www.mriquestions.com/bloch-equations.html>
51. Questions and Answers in MRI. *Extracellular Gd Agents*. [online] 2021 [cit.2022-04-10] Dostupné z: <https://mriquestions.com/so-many-gd-agents.html>
52. Questions and Answers in MRI. *Gradient Coils*. [online] 2021 [cit.2022-03-23] Dostupné z: <https://www.mriquestions.com/gradient-coils.html>
53. Questions and Answers in MRI. *Larmor Frequency*. [online] 2021 [cit.2022-01-08] Dostupné z: <https://www.mriquestions.com/why-at-larmor-frequency.html>
54. Questions and Answers in MRI. *Magnet Quench*. [online] 2021 [cit.2022-03-25] Dostupné z: <https://mriquestions.com/what-is-a-quench.html>
55. Questions and Answers in MRI. *Radiofrequency (RF) Waves*. [online] 2021 [cit.2022-02-13] Dostupné z: <https://mriquestions.com/radiofrequency-waves.html>
56. Questions and Answers in MRI. *Superconducting Magnets*. [online] 2021 [cit.2022-01-08] Dostupné z: <https://www.mriquestions.com/superconductive-design.html>
57. Radiopaedia. *Echo Time*. [online] 2021 [cit.2022-03-09] Dostupné z: <https://radiopaedia.org/articles/echo-time>
58. Radiopaedia. *Free Induction Decay*. [online] 14.10.2020 [cit.2022-01-11] Dostupné z: <https://radiopaedia.org/articles/free-induction-decay>
59. Radiopaedia. *Repetition Time*. [online] 2020 [cit.2022-03-09] Dostupné z: <https://radiopaedia.org/articles/repetition-time>
60. REICHL, Jaroslav a Martin VŠETIČKA. *Kvarková hypotéza*. In: Encyklopedie fyziky [online] Copyright © 2006–2022 [cit.2022-04-15] Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/908-kvarkova-hypoteza>
61. REICHL, Jaroslav a Martin VŠETIČKA. *Meissnerův jev*. In: Encyklopedie fyziky [online] Copyright © 2006–2022 [cit.2022-02-03] Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/424-meissneruv-jev>

62. REICHL, Jaroslav a Martin VŠETIČKA. *Supravodivost*. In: Encyklopedie fyziky [online] Copyright © 2006–2022 [cit.2022-02-10] Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/423-supravodivost>
63. REICHL, Jaroslav a Martin VŠETIČKA. *Zeemanův jev*. In: Encyklopedie fyziky [online] Copyright © 2006–2022 [cit.2022-04-15] Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/1632-zeemanuv-jev>
64. ScienceDirect. *Bosons*. [online] 2021 [cit.2021-09-25] Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/topics/physics-and-astronomy/bosons>
65. ScienceDirect. *Free Induction Decay*. [online] 2010 [cit.2022-01-17] Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/topics/medicine-and-dentistry/free-induction-decay>
66. ScienceDirect. *Bloch Equations*. [online] 2022 [cit.2022-03-12] Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/topics/medicine-and-dentistry/bloch-equations>
67. SEDLÁŘ, Martin. *Magnetická rezonance*. [online] 2011 [cit.2022-01-09] Dostupné z: [https://www.med.muni.cz/biofyz/files/nutricispecialista/MRI\\_2011\\_Sedlar.pdf](https://www.med.muni.cz/biofyz/files/nutricispecialista/MRI_2011_Sedlar.pdf)
68. SPIX, J.George, *Maxwell's Electromagnetic Field Equation No. 1*. In: Maxwell's Equations. [online] 2021 [cit.2021-10-12] Dostupné z: <https://mypages.iit.edu/~smile/guests/gsmxsec1.htm>
69. Státní ústav pro kontrolu léčiv. *Kontrastní látky obsahující gadolinium – doporučeno pozastavení registrace čtyř lineárních látek*. [online] 15.3.2017 [cit.2022-04-02] Dostupné z: <https://www.sukl.cz/kontrastni-latky-obsahujici-gadolinium-doporuceno>
70. Talend. *What Is Data Processing?* [online] 2022 [cit.2022-03-21] Dostupné z: <https://www.talend.com/resources/what-is-data-processing/>
71. TARAWNEH, Walid. *Recommendations for MRI Quench Pipe Exit Port Clearances*. In: LinkedIn [online] 2019 [cit.2022-04-08] Dostupné z: <https://www.linkedin.com/pulse/recommendations-mri-quench-pipe-exit-port-clearances-tarawneh>
72. Vedantu. *Paramagnetism*. [online] 2022 [cit.2022-03-27] Dostupné z: <https://www.vedantu.com/physics/paramagnetism>
73. Vedantu. *Phonon*. [online] 2022 [cit.2022-03-25] Dostupné z: <https://www.vedantu.com/physics/phonon>

74. WAGNER, Vladimír. *Jak se vyznat ve všemožných částicích?* In: FyzWeb [online] 2008 [cit.2022-04-15] Dostupné z: <http://fyzweb.cz/clanky/index.php?id=118>
75. Warwick. *Interdisciplinarity*. [online] 2022 [cit.2022-02-27] Dostupné z: [https://warwick.ac.uk/fac/cross\\_fac/academy/keythemes/interdisciplinarity/](https://warwick.ac.uk/fac/cross_fac/academy/keythemes/interdisciplinarity/)
76. WikiSkripta. *Nukleární magnetická rezonance*. [online] 2021 [cit.2022-01-22] Dostupné z: [https://www.wikiskripta.eu/w/Nukle%C3%A1rn%C3%AD\\_magnetick%C3%A1\\_rezonance](https://www.wikiskripta.eu/w/Nukle%C3%A1rn%C3%AD_magnetick%C3%A1_rezonance)
77. ZÁŠKODNÝ, Přemysl. *Základy fyziky (se zaměřením na přípravu radiologických asistentů)*. 1.vydání. Praha: CURRICULUM, 2020. ISBN 978-80-87894-21-7.

## 8 Seznam obrázků

Obrázek 1: Standardní model elementárních částic .....	14
Obrázek 2: Druhy interakcí a částice, které se jimi řídí .....	21
Obrázek 3: Maxwellovy rovnice .....	24
Obrázek 4: Zeemanův jev .....	30
Obrázek 5: Magnetická rezonance .....	32
Obrázek 6: Kryostat v MRI .....	37
Obrázek 7: Odváděcí systém pro quench .....	38
Obrázek 8: Gadoliniová KL pro MRI .....	38

## 9 Seznam zkratek

CERN	European council for nuclear research
CNGS	CERN Neutrinos to Grann Sasso
CT	computed tomography
DDU	down down up kvark
DONUT	direct observation of the nu tau
Elmag. pole	elektromagnetické pole
FID	free induction decay
MR	magnetická rezonance
MRI	magnetic resonance imaging
NbTi	niob-titan
RGB	red green blue
SAR	specific absorption rate
SPEAR	Stanford positron electron asymmetric rings
TE	time to echo
TR	time to repeat
UUP	up up down kvark