

JAN MAZANEK

# GLOBALNÍ STRUKTURA VESMÍRU



Jan Mazanec

# GLOBÁLNÍ STRUKTURA VESMÍRU

© Ing. Jan Mazanec (janmazanec@email.cz)

Recenzoval: Ing. Jiří Havlíček

Jazyková korektura: Ing. Jarka Kovaříková

Grafická úprava: Barbora Trnková & Tomáš Javůrek

Grafická úprava obálky: Anita Somrová

Sazba a zlom: Tomáš Javůrek

Ilustrace: Martin Salajka, Samuel Paučo, Oldřich Morys, Marek Hlaváč, Tomáš Hodbodě, Tomáš Javůrek & Barbora Trnková. (Výběr děl vychází z kurátorského projektu Jany Písaříkové a Tomáše Hodbodě Kraj-jinné meze, realizovaném v Galerii města Blanska 2. 3. – 27. 3. 2013, jehož byla maketa této knihy také součástí.)

Vydal: Tomáš Javůrek v Brně 2015 (sídlo: Podnásepní 380/12, 602 00 Brno-Trnitá)

ISBN 978-80-906173-0-8

# PŘEDMLUVA

Snad každému člověku se při pohledu na zářící a jasnou noční oblohu zatají dech nad hloubkou mrazivého, zdánlivě nekonečného prostoru posetého tisíci hvězdami. Po staletí si člověk s rozechvěním kladl stejné otázky. Kde jsou hranice vesmíru? Co se skrývá mezi zářícími hvězdami, je tam někde skryta odpověď na otázky po vzniku hmotného světa, prostoru a času? Pokud vás z představ nekonečnosti a prázdnoty prostoru mrazí a chodíte s hlavou zakloněnou, potom právě vám je tato kniha určena.

Pohledem na nebe prostým okem spatříme jen nepatrný zlomek viditelného vesmíru, a to pouze z nejbližšího okolí našeho Slunce. Náš zrak nám dovolí rozlišit pouze necelých 6 000 hvězd, v příznivých obdobích lze spatřit 5 planet naší Sluneční soustavy, několik málo uskupení kulových či otevřených hvězdokup, mlhovin a galaxií. Sestrojení prvních dalekohledů posunulo hranice poznatelného vesmíru a jeho struktury mnohem dále a ovlivnilo naše poznání z mytologického pohledu na vesmír k racionálnímu. Rozvoj přístrojové a kosmické techniky, nejen v optických, ale i v dalších spektrálních oborech záření vesmírných objektů nám umožnil stanout téměř na samém okraji časoprostoru. Je naše současné poznání objektivní, zobecnitelné, nebo jde jen o jednu z cest, částečně odpovídající našim zkušenostem a schopnostem chápání a omezenou představivostí? Je vůbec v mož-

nostech přírody či v jejím záměru, abychom byli schopni poznat vše?

V této knize přístupnou formou shrnuji aktuální vědecké poznatky o struktuře pozorovatelného vesmíru. Současně vám představím některé modely a teorie, které se v současné době pokouší vysvětlit jeho historii, současné a budoucí chování. Kniha má otevřený konec, nepřisvojuje si právo být moudřejší než příroda.

Budoucí vývoj vědy jistě poopraví, zpřesní či dokonce nahradí některé teorie, omyly a naděje, samozřejmě za předpokladu, že odvěkou lidskou touhu po poznání a pravdě nezhubí omezenost, bezduchost, nesvoboda a násilí.

Prostor vesmíru, respektive to, co chápeme jako prostor expandující s nejvyšší pravděpodobností současně s časem od vzniku vesmíru, je z globálního hlediska homogenním způsobem zaplněn hmotou a energií. Dnes se domníváme, že jen malá část hmoty ve vesmíru – cca 5 % – je **baryonové** (atomární) povahy. Z těchto pouhých 5 % je jen 1 % svítící baryonové hmoty, tj. to, co můžeme zrakem či pomocí techniky přímo pozorovat, a zbylá 4 % tvoří tzv. nesvítící baryonová hmota. Asi 27 % hmoty vesmíru je tvořeno **temnou hmotou** pro nás doposud neznámé povahy. Její existence se předpokládá na základě projevujících se gravitačních účinků na rozlehlé vesmírné objekty. Zbylých 68 % tvoří **temná energie**, která je pravděpodobně tvořena kvantovými fluktuacemi vakua a je za hranicemi současných možností pozorování. Složení vesmíru patří k jedné z největších záhad současné fyziky. Naše znalosti vesmíru jsou nejdále v poznání oněch 5 % baryonové hmoty. Úsilí velké části vědeckého světa je v současné době věnováno právě výzkumu temné hmoty a temné energie. Výzkumy se realizují ve vazbě na poznání nejen makrosvěta, ale v úzkém spojení s vývojem poznání v oblasti kvantové fyziky, které může napovědět mnohé o procesech vzniku a vývoje vesmíru. Této problematice se budeme věnovat i v naší knize.

Co tedy můžeme zahrnout do těchto 5 % pro nás známé hmoty baryonové povahy?

Patří sem především hvězdy, planety, mezihvězdná a meziplanetární hmota, hvězdokupy, mlhoviny, galaxie. Přírodní zákonitosti, jimž podléhají, jsme v současné době schopni popsat ať již klasickou, relativistickou či kvantovou fyzikou poměrně přesně, a jsou potvrzeny i pozorováním.

V první části knihy jsem zaměřil svou pozornost na základy astrofyziky, popisující oněch nepatrných 5 % baryonové hmoty. Věřím, že i zde nalezne pozorný čtenář

mnoho úchvatného a usnadní mu to základní orientaci v problematice chování a vývoje vesmírných objektů. Dotkneme se i základů jaderné a kvantové fyziky, které čtenáři posléze umožní nalézt spojitosti mezi chováním hmoty v mikrosvětě a makrosvětě.

Brno 2014

Jan Mazanec

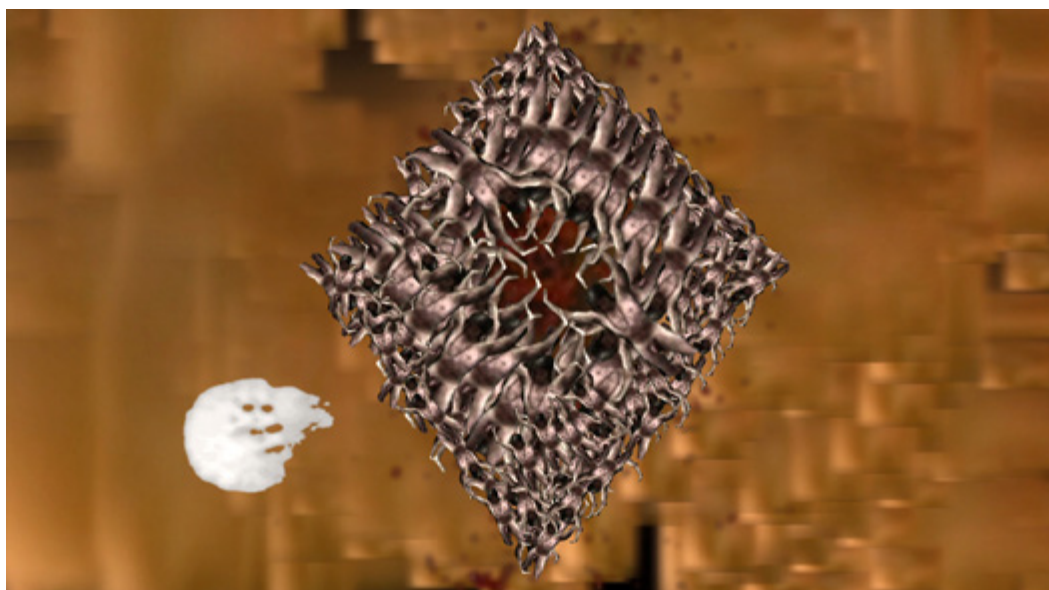




# OBSAH

|                                    |           |
|------------------------------------|-----------|
| PŘEDMLUVA                          | 3         |
| <b>1 Vesmír a mikrosvět</b>        | <b>10</b> |
| 1.1 Standardní model mikrosvěta    | 11        |
| 1.2 Leptony                        | 15        |
| 1.3 Kvarky                         | 18        |
| 1.4 Intermediální částice          | 22        |
| 1.5 Bosony                         | 26        |
| 1.6 Fermiony                       | 27        |
| 1.7 Higgsovy částice               | 28        |
| 1.8 Korpuskulárně vlnový dualismus | 29        |
| 1.9 Symetrie v přírodě             | 32        |
| 1.10 Hranice kvantového světa      | 37        |
| 1.11 Kde se vzala ve vesmíru hmota | 41        |
| 1.12 Gravitace, prostor a čas      | 46        |

|          |                                                                   |            |
|----------|-------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>2</b> | <b>Hvězdy a jejich základní charakteristiky</b>                   | <b>65</b>  |
| 2.1      | Měření vzdáleností ve vesmíru a jejich jednotky                   | 71         |
| 2.2      | Velikosti a hmotnosti hvězd                                       | 76         |
| 2.3      | Zdroje záření                                                     | 79         |
| 2.4      | Spektra hvězd a jejich třídění                                    | 82         |
| 2.5      | Stavba hvězd a zdroje zářivé energie                              | 94         |
| <b>3</b> | <b>Zrození hvězd a hvězdný vývoj</b>                              | <b>100</b> |
| 3.1      | Hvězdy s hmotností podobné Slunci a nepřekračující $10 M_{\odot}$ | 104        |
| 3.2      | Hvězdy s hmotností překračující $10 M_{\odot}$                    | 107        |
| 3.3      | Hvězdy s extrémní hmotností převyšující $50 M_{\odot}$            | 112        |
| <b>4</b> | <b>Galaxie</b>                                                    | <b>117</b> |
| 4.1      | Stavba naší Galaxie                                               | 123        |
| 4.2      | Mlhoviny                                                          | 127        |
| 4.3      | Otevřené hvězdokupy                                               | 132        |
| 4.4      | Kulové hvězdokupy                                                 | 133        |
| <b>5</b> | <b>Galaktické skupiny, kupy a nadkupy</b>                         | <b>136</b> |
| <b>6</b> | <b>Kosmologie, vznik a vývoj vesmíru</b>                          | <b>140</b> |
| 6.1      | Rozpínání vesmíru                                                 | 142        |
| 6.2      | Inflační model                                                    | 150        |
| 6.3      | Geometrie vesmíru                                                 | 152        |
|          | <b>ZÁVĚR</b>                                                      | <b>155</b> |
|          | <b>PŘÍLOHY</b>                                                    | <b>157</b> |



*Ilustrace č. 1: Tomáš Hodbod'. Rhapsody\_1\_(live & death). Video 1' 30". 2013.*

# • 1 •

## • V E S M Í R A M I K R O S V Ě T •

Hvězdy, které každou jasnou noc ozařují naši oblohu, jsou naší bránou poznání vesmíru. Jsou pojítkem mezi pozemským a vesmírným prostorem. Dnes již o nich víme poměrně mnoho a domníváme se, že s vysokou pravděpodobností pro jejich stav a vývoj platí stejné fyzikální zákony jako na Zemi. Víme také, že některé jejich chování na počátku a konci vývoje je teorií a lidskou představivostí jen těžko uchopitelné.

Informace o hvězdách či obecně o vesmíru získáváme prostřednictvím rozboru a analýzy záření, které se po cestě vesmírným prostorem dostane až do našich dalekohledů či měřicí techniky. Zdrojem těchto informací z hvězd a mezihvězdného prostoru jsou procesy probíhající na úrovni mikrosvěta. Proto tuto kapitolu o hvězdách začneme úvodem do světa elementárních částic. Znalost a studium chování hmoty a energie v mikrosvětě je klíčem ke studiu či alespoň k představě o chování velkých struktur hmoty, vesmíru v minulosti, současnosti i budoucnosti. Pochopení chování mikrosvěta nám přiblíží i těžko představitelné vlastnosti vakua, které nejspíše tvoří oněch 68 % materiální podstaty vesmíru – temné energie.

V úvodu této knihy jsem se zmínil o své snaze vytvořit popis stávajícího poznání našeho vesmíru populární a přístupnou formou. V některých částech se bohužel nevyhneme použití jednoduché matematiky, která usnadní a zpřesní popis předmětu

dané kapitoly. Většinou však nepřekročí svojí náročností znalosti získané absolvováním kurzů matematiky na středních školách. Je třeba chápat matematiku jako nástroj, jazyk, který svojí extrémně symbolickou povahou zestruční jinak zdlouhavý a explikativní slovní popis vzájemných vazeb mezi popisovanými veličinami a umožní nám opakovatelné použití či analýzu chování při změnách vstupních veličin a sledování vývoje v čase<sup>[1]</sup>.

## 1.1 Standardní model mikrosvěta



Ilustrace č. 2: Tomáš Hodbod'. Video skica. Video-montáž. 2013.

Z pozorování chování hmoty v prostoru kolem nás víme, že se může projevovat jak v podobě hmatatelné, jako látka, nebo v podobě různých druhů polí či záření. Můžeme dokonce považovat tuto skutečnost za projev jednoho a téhož, o čemž vypovídá i známý jednoduchý vztah  $E = mc^2 = h\nu$ , kde je zobrazeno jednoduché a kouzelné rovnítko mezi částicemi látky, zářením a energií. V tomto vztahu je  $E$  energie,  $m$  hmota,  $c$  rychlost světla,  $h$  Planckova konstanta a  $\nu$  frekvence záření. Částice hmoty se mohou chovat jako vlnění a naopak vlnění jindy jako hmotné částice, tzv. kvanta.

[1] Pokud není uvedeno jinak, nejsou v textu pro zjednodušení rozlišeny vektorové veličiny od skalárních.

Ale začněme od počátku.

To, co jsme nazvali látkou, se může nacházet v přírodě v různých tzv. **skupenstvích**. Hovoříme o **skupenství degenerovaného plynu, pevném, kapalném, plynném a plazmatickém**. Látka může své skupenství změnit. K této změně nedochází samovolně, ale vždy za působení vnější energie.

Dále látku rozdělujeme podle charakteristických vlastností na tzv. **prvky** – např. zlato, měď, železo, kyslík, uran atd. Za základní stavební částici prvku považujeme **atom**. Mendělejev v roce 1869 seřadil známé prvky podle hmotností atomů a vytvořil tak dnes po něm pojmenovanou **Mendělejevovu tabulku prvků**. V současnosti tato tabulka obsahuje 117 prvků, z nichž se 94 vyskytuje na Zemi v přírodní podobě. Mendělejev měl zařazeno v tabulce původně jen 63 prvků, ale díky geniálnímu zákonu periodicity dokázal předpovědět dalších deset prvků, které byly později skutečně objeveny.

Atomy považujeme za **chemicky** nedělitelné. Fyzika jde však dále.

Na začátku dvacátého století se ukázalo, že atom není nedělitelný, ale skládá se z jádra a elektronového obalu. Vlastní jádro obsahuje částice s kladným elektrickým nábojem – **protony** a částice<sup>[2]</sup> bez náboje – **neutrony**. Tyto částice nazýváme nukleony. Obal jádra tvoří elektrony, částice se záporným elektrickým nábojem. Atomy prvků charakterizují následující čísla:

**A** – nukleonové číslo, **Z** – protonové číslo a **N** – neutronové číslo.

Přitom platí, že:

$$A = N + Z$$

Protony a neutrony jsou v jádru vázány jadernými silami. Rozměry atomových jader jsou řádově  $10^{-15}$  m. Elektrony jsou vázány k jádru elektrostatickými silami a společně s jádrem tak tvoří atom o rozměrech řádově  $10^{-10}$  m.

---

[2] O částici hovoříme v mikrosvětě, pokud její existence překročí čas minimálně  $10^{-26}$  s. Pokud je doba její existence kratší, hovoříme o tzv. rezonanci a nikoliv o částici. Pokud budete mít v následujícím textu pocit, že občas nerozlišuji ve výkladu záření, tj. jeho vlnový charakter a částicový charakter a občas je mezi sebou prohazuji, věřte, že příroda to takto připravila a v části věnované kvantově vlnovému dualismu si tuto schválnost přírody pokusíme vysvětlit. K základním charakteristikám elementárních částic patří klidová hmotnost, elektrický náboj, spin, magnetický moment, podivnost, izospin, parita, leptonové či baryonové číslo.

V základním stavu je počet protonů a elektronů v atomu stejný a atom se chová jako elektricky neutrální, tedy bez náboje. Počet a rozložení elektronů v elektronovém obalu vytváří charakteristické fyzikální a chemické vlastnosti látek. Každého jistě napadne, jak je možné, že se jádro nerozpadne, když kladně nabité protony by se měly odpuzovat a ne vázat v celek, či proč záporně nabitý elektron není protonem s kladným nábojem přitažen a nespojí se s ním? Jsou protony a neutrony skutečně elementární částice? Existují i jiné částice? Co drží tyto částice pohromadě? Na tyto otázky lze odpovědět jen tehdy, pokud se hlouběji ponoříme do studia kvantové fyziky. Pokusím se alespoň částečně poodhalit tato tajemství mikrosvěta, jež vám umožní lépe pochopit chování hmoty ve hvězdách, galaxiích či ve vesmíru jako celku. Začnu nejprve tzv. **standardním modelem** (*SM*) mikrosvěta, který shrnuje prakticky všechny poznatky současné vědy o elementárních částicích. *SM* nemusí být definitivní teorií mikrosvěta, ale popisuje jej **na současném stupni poznání**. A přesto, že je jednou z nejlépe experimentálně potvrzených teorií, nevysvětluje některé skutečnosti, jako například vznik baryonové asymetrie a další. Teorie ve spojení s experimenty a pozorováním však zatím stoprocentně potvrzuje, že pokud by byl mikrosvět jiný, musel by být jiný i vesmír.

Základní třídění standardního modelu elementárních částic provádíme podle rodové příslušnosti a statistického chování. Elementární znamená **nedělitelné, tedy bez vnitřní struktury**.

| Rozdělení elementárních částic podle rodové příslušnosti |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|----------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Leptony                                                  | Patří sem <b>elektrony</b> , jejich <b>neutrína</b> , <b>miony</b> , <b>tauony</b> a jejich <b>neutrína</b> a příslušné <b>antičástice</b> .                                                                                                                                                                                                                    |
| Kvarky                                                   | Částice, z nichž jsou složeny protony, neutrony a mezony. Známe v současnosti šest kvarků – <b>d, u, c, s, t, b</b> a jejich <b>antičástice</b> .                                                                                                                                                                                                               |
| Intermediální částice                                    | Částice, zprostředkující interakce (částice pole – silové působení mezi částicemi).<br><br><b>Foton</b> – elektromagnetická interakce.<br><br><b><math>W^+</math>, <math>W^-</math>, <math>Z^0</math> boson</b> – slabá interakce.<br><br><b>Gluony</b> 8 typů – silná interakce.<br><br><b>Graviton</b> – gravitační interakce (zatím jen teoretická částice). |
| Higgsovy částice                                         | Částice odpovědné za nenulovou hmotnost částic hmoty – <b><math>W^+</math>, <math>W^-</math>, <math>Z^0</math></b> .                                                                                                                                                                                                                                            |

Tabulka č. 1: Rozdělení elementárních částic podle rodové příslušnosti

| Rozdělení elementárních částic podle statistického chování |                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Bosony                                                     | <b>Mezony</b> a všechny <b>intermediální částice</b> , tj. foton, <b><math>W^+</math>, <math>W^-</math>, <math>Z^0</math></b> , gluony.<br><br>Mají celočíselnou paritu.<br><br>Nesplňují Pauliho vylučovací princip.                                                                  |
| Fermiony                                                   | Všechny <b>leptony</b> a <b>kvarky</b> . K fermionům také patří částice, složené ze tří kvarků (tzv. <b>baryony</b> například neutron, proton, <b><math>\Delta</math></b> baryon, <b><math>\Lambda</math></b> hyperon, atd. Mají poločíselný spin. Splňují Pauliho vylučovací princip. |

Tabulka č. 2: Rozdělení elementárních částic podle statistického chování



## 1.2 Leptony



*Ilustrace č. 3: Samuel Paučo. Před oponou 13. Komb. tech. na plátně. 230 x 200 cm. 2012.*

Skupina leptonů zahrnuje šest částic a jejich šest antičástic. K nim patří: **elektron  $e^-$** , **mion  $\mu^-$** , **taun  $\tau^-$** , **elektronové neutrino  $\nu_e$** , **mionové neutrino  $\nu_\mu$**  a **taunové neutrino  $\nu_\tau$** .

**Elektron  $e^-$**  byl objeven roku 1897. Je nositelem tzv. elementárního elektrického náboje o velikosti  $1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ , jeho hmotnost značíme  $m_e$  a činí  $9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$ . Konfigurace elektronů v elektronovém obalu atomu způsobují rozdílné chování atomů při vytváření vyšších struktur, jako jsou krystaly či molekuly. Změny jeho energetického stavu jsou doprovázeny emisí (vyzářením) či pohlcením kvanta záření. Právě změny energetických stavů elektronu jsou nepostradatelným zdrojem informací o vesmíru a jeho tělesech. Pokud dojde k odtržení elektronu z elektronového obalu, hovoříme o ionizaci. Antičásticí elektronu je **pozitron** a byl objeven roku 1930. Od elektronu se liší pouze opačným znaménkem náboje. Elektron má dva větší, respektive hmotnější bratry, a to **mion  $\mu^-$**  a **taun  $\tau^-$** . Hovoříme o nich také jako o těžkém a supertěžkém elektronu. **Mion  $\mu^-$**  má hmotnost  $207 m_e$ . **Taun  $\tau^-$**  je supertěžký elektron s hmotností  $3484 m_e$ .

Tito sourozenci elektronu  $e^-$  mají rovněž schopnost vázat se v elektronovém obalu k jádrům atomů. Kromě stejného záporného elementárního náboje a spinu rovnému  $\frac{1}{2}$  mají ještě jednu podivnou vlastnost. Při všech interakcích jsou doprovázeny partnerskými částicemi bez náboje – neutriny. Elektron **elektronovým neutrinem  $\nu_e$** , jehož existence byla potvrzena v roce 1956, mion **mionovým neutrinem  $\nu_\mu$** , jehož existence byla potvrzena v roce 1962, a taun **taunovým neutrinem  $\nu_\tau$**  objeveným v roce 1977. Neutrino jsou částice bez náboje a neúčastní se elektromagnetické interakce, naopak se aktivně zapojují do interakce slabé. V literatuře bývají často sestavovány do takzvaných dubletů, tvořících generace. V dubletu jsou částice, které se v tzv. slabé interakci chovají jako jedna částice a nelze je rozlišit. Elektromagnetická interakce je rozlišuje – jinak se chová částice s nábojem a jinak ta bez náboje, která je nezachytitelná v rámci elektromagnetické interakce. S dubletem první generace se běžně v přírodě, respektive ve vesmíru setkáváme. Dublet druhé generace je vzácnější a je možno se s ním setkat ve světě vysokých energií. Dublet třetí generace se již v přírodě nevyskytuje, je možno ho vytvořit pouze uměle na urychlovačích. Při vzniku vesmíru sehrály svoji roli všechny tři generace.

$$\begin{array}{ccc}
 \text{1. generace} & \text{2. generace} & \text{3. generace} \\
 \begin{bmatrix} e^- \\ \nu_e \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} \mu^- \\ \nu_\mu \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} \tau^- \\ \nu_\tau \end{bmatrix}
 \end{array}$$

Jak miony, tak tauony jsou částice nestabilní. Miony se rozpadají v čase  $2 \cdot 10^{-6} \text{ s}$  na elektron, elektronové neutrino a mionové neutrino. Tauon v čase  $3 \cdot 10^{-13} \text{ s}$  na elektron nebo mion a neutrino.

| Přehled leptonů |       |           |                  |
|-----------------|-------|-----------|------------------|
| lepton          | spin  | náboj     | hmotnost         |
| $e^-$           | $1/2$ | <b>-1</b> | <b>0,51 MeV</b>  |
| $\nu_e$         | $1/2$ | <b>0</b>  |                  |
| $\mu^-$         | $1/2$ | <b>-1</b> | <b>105,7 MeV</b> |
| $\nu_\mu$       | $1/2$ | <b>0</b>  | <b>0,07 eV</b>   |
| $\tau^-$        | $1/2$ | <b>-1</b> | <b>1777 MeV</b>  |
| $\nu_\tau$      | $1/2$ | <b>0</b>  |                  |

Tabulka č. 3: Přehled leptonů<sup>[3]</sup>

O chování elektronů se více dozvíme v části popisující elektromagnetické spektrum. Všechny leptony se zúčastňují slabé interakce, a pokud mají náboj, tak i interakce elektromagnetické.

[3] Jednotka elektronvolt (**eV**) je odpovídající kinetické energii, kterou získá elektron, urychlený potenciálem **1 V** ve vakuu. Můžeme uvést vztah  $1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$ . Ve světě elementárních částic se často používá odvozená jednotka hmoty  **$\nu \text{ eV}$** , opírající se o teorii relativity a vztah  $E = m \cdot c^2$ . Hmotnost elektronu dle soustavy jednotek SI činí  **$9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$** . Násobíme-li ji  $c^2$ ,  $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$  a využijeme-li převodní vztah  $1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$ , vyjde nám hmotnost elektronu **0,51 MeV**. Pro úplnost: zápis jednotek by měl být **0,51 MeV/c<sup>2</sup>**. Veličina  $c^2$  se velkoryse pro zjednodušení zápisu vypouští.  $1 \text{ eV} = (1,602176462 \pm 0.000000063) \cdot 10^{-12} \text{ erg} = (1,602176462 \pm 0.000000063) \cdot 10^{-19} \text{ J}$ .

### 1.3 Kvarky



Ilustrace č. 4: Oldřich Morys. *BLANSKO* (Nový E.). Kombinovaná technika. 2013.

Kvarky jsou elementární částice, z nichž se skládají tzv. hadrony, k nimž patří i **nukleony**, tj. proton a neutron. Teoreticky byly předpovězeny v roce 1964 a potvrzeny experimenty na urychlovačích částic v roce 1969. Poslední kvark z šestice kvarků byl objeven až v roce 1994. Kvarky mají spin<sup>[4]</sup> rovný  $\frac{1}{2}$  a patří tedy z hlediska statistického chování mezi **fermiony**. Rozeznáváme 6 kvarků značených **d, u, s, c,**

---

[4] Spin je jednou z tzv. kvantových charakteristik částic. Přestože je elektron bodovou částicí, má vlastní magnetické pole, podobné jako u rotující koule. Spin si lze představit jako vlastní hybnost rotující částice a jeho hodnota se uvádí v násobcích redukované Planckovy konstanty  $\hbar = h/2\pi = 1,05 \cdot 10^{-34} \text{Js}$ . Spin určuje kvantově mechanické chování částic a jeho velikost rozděluje částice na fermiony a bosony. Podle typu průmětu mají částice spin  $0, \pm 1/2, \pm 1, \pm 11/2, \pm 2$ . Částice s poločíselným spinem nazýváme fermiony a platí pro ně tzv. Fermiho–Diracova statistika řídící se Pauliho vylučovacím principem. Podle této statistiky může být v daném souboru částic pouze jedna v daném energetickém stavu. Částice s celočíselným spinem nazýváme bosony a platí pro ně Boseho–Diracova statistika.

**b**, **t** a jejich 6 antičástic, lišících se pouze v náboji. Jejich názvy jsou zkratkami počátečních písmen slov **d**own, **u**p, **s**trange, **c**harm, **b**ottom, **t**op. Podobně jako leptony je dělíme do dubletů tří generací.

$$\begin{array}{ccc}
 \text{1. generace} & \text{2. generace} & \text{3. generace} \\
 \left[ \begin{array}{c} d \\ u \end{array} \right] & \left[ \begin{array}{c} s \\ c \end{array} \right] & \left[ \begin{array}{c} b \\ t \end{array} \right]
 \end{array}$$

Jednotlivé generace se liší svými hmotnostmi, ostatní parametry jsou shodné. Proč příroda připravila takovou paletu prakticky shodných elementárních částic, lišících se jen hmotností, je jednou z největších záhad fyziky. Svět, který známe, je sestaven z kvarků první generace. Z druhé se setkáme s **kvarkem s**, který byl objeven jako součást kaonů. **Kvarky c, b**, a **t** umíme vytvořit pouze v urychlovačích. Podobně jako všechny generace leptonů, i kvarky sehrály svoji roli v období vysokoenergetického raného vesmíru.

| Přehled kvarků |      |       |          |
|----------------|------|-------|----------|
| kvark          | spin | náboj | hmotnost |
| <b>d</b>       | 1/2  | -1/3  | 7 MeV    |
| <b>u</b>       | 1/2  | +2/3  | 5 MeV    |
| <b>s</b>       | 1/2  | -1/3  | 150 MeV  |
| <b>c</b>       | 1/2  | +2/3  | 1,4 GeV  |
| <b>b</b>       | 1/2  | -1/3  | 4,3 GeV  |
| <b>t</b>       | 1/2  | +2/3  | 176 GeV  |

Tabulka č. 4: Přehled kvarků

Kvarky působí v hadronech mezi sebou tzv. **silnou interakcí** krátkého dosahu. Intermediální částicemi silné interakce jsou **gluony**. Vazba mezi kvarky je svým charakterem pozoruhodná – s rostoucí vzdáleností její intenzita roste, v těsné blízkosti je

nulová. Zbytkovým projevem této silné interakce je vázání protonů a neutronů do atomových jader. Zbytková silná interakce tedy překonává elektrické odpuzivé síly protonů se shodným kladným nábojem. Velká jádra s velkým počtem nukleonů se však stávají nestabilní a dochází k uvolnění části. Jde o přirozený rozpad.

Kvarky při současných relativně nízkoenergetických experimentech nelze pozorovat jako samostatné částice. Jejich existenci dokazují rozptylové experimenty při srážkách hadronů. Vysokoenergetické srážky zpřetrhají silové vazby, držící pohromadě hadrony, a způsobují vznik **kvark-gluonového plazmatu**. Inflační teorie vzniku vesmíru předpokládá, že hmota vesmíru byla v čase  $t = 20 \text{ } [\mu\text{s}]$  tvořena právě kvark-gluonovým plazmatem.

Každý kvark se může vyskytnout ve třech modifikacích – kvantových stavech. Fyzikové je označili jako barvy – červená, zelená, modrá. Hovoříme rovněž o tzv. **barevném náboji**. Samozřejmě se nejedná o skutečné barvy tak, jak je známe díky našemu zraku. Vlnové délky těchto barev v optickém spektru jsou nesrovnatelně větší než velikost kvarků. Jde o formální rozlišení kvarků se specifickými vlastnostmi a fyzikové si toto měřítko zvolili díky své pozoruhodné fantazii.



|         |                     |      |       |          |                 |
|---------|---------------------|------|-------|----------|-----------------|
| Hadrony | Baryony             |      |       |          |                 |
|         | název               | spin | náboj | hmotnost | kvarky          |
|         | proton              | 1/2  | +1    | 938 MeV  | <i>uud</i>      |
|         | neutron             | 1/2  | 0     | 937 MeV  | <i>ddu</i>      |
|         | hyperon $\Lambda$   | 1/2  | 0     | 937 MeV  | <i>uds</i>      |
|         | hyperon $\Sigma^+$  | 1/2  | +1    | 937 MeV  | <i>uus</i>      |
|         | hyperon $\Sigma^-$  | 1/2  | -1    | 937 MeV  | <i>dds</i>      |
|         | hyperon $\Sigma^0$  | 1/2  | 0     | 937 MeV  | <i>uds</i>      |
|         | hyperon $\Omega$    | 3/2  | -1    | 937 MeV  | <i>sss</i>      |
|         | Mezony              |      |       |          |                 |
|         | pion $\pi^+, \pi^-$ | 0    | 1     | 139 MeV  | <i>ud', du'</i> |
|         | pion $\pi^0$        | 0    | 0     | 134 MeV  |                 |
|         | kaon $K^+, K^-$     | 0    | 1     | 493 MeV  | <i>us', su'</i> |
|         | kaon $K^0$          | 0    | 0     | 497 MeV  | <i>ds'</i>      |
|         | částice $J/\psi$    | 1    | 0     | 3460 MeV |                 |
|         | částice $\gamma$    | 1    | 0     | 9460 MeV |                 |

Tabulka č. 5: Hadrony – ukázka skladby malé části částic tvořených kvarky. Mezony jsou složeny vždy z jednoho kvarku a jednoho antikvarku. Baryony obsahující podivný kvark *s* nazýváme hyperony.<sup>[5]</sup>

[5] Je nutno se smířit s tím, že v mikrosvětě platí tzv. princip neurčitosti, podle něhož je možno změřit přesně jen jednu z dynamicky spjatých fyzikálních veličin. S rostoucí přesností jedné změřené veličiny klesá přesnost veličiny jiné až k naprosté neurčitosti. To platí i u momentu hybnosti coby vektorové veličiny. Čím přesněji jsme schopni měřit či definovat složku vektoru *x*, tím více roste neurčitost složek *y* a *z*. Totéž se týká i polohy. Čím přesněji zaznamenáme či měříme polohu, např. v ose *x* prostoru, tím neurčitější je hybnost částice v ose *y*. Hovoříme o Heisenbergových relacích neurčitosti.

## 1.4 Intermediální částice



Ilustrace č. 5: Martin Salajka. *Pes*. Olej na plátně. 40 x 40 cm. 2012.

V minulosti vesmíru, kdy jeho teplota a energie měly nesrovnatelně vyšší hodnoty, se v něm vyskytovaly všechny výše uvedené elementární částice. Vzájemně na sebe působily **interakcemi** a vytvářely vyšší struktury. Roli zprostředkovatelů zde sehrály i **intermediální částice**.

V současnosti rozeznáváme **čtyři interakce**, kterými elementární částice mezi se-



bou působí. Mezi tyto fundamentální interakce patří **gravitační, elektromagnetická, silná a slabá**. Interakce se projevují působením sil, které zprostředkovávají **intermediální částice (bosony)**, někdy nazývané **polní částice**, částice pole. Částice interakcí mají spin rovný 1. Někdy bývá částicová interakce srovnávána s chemickou vazbou, která vznikla sdílením jednoho elektronu mezi dvěma atomy. Výměnu intermediálních částic lze chápat jako jejich sdílení. Klasický způsob chápání vzájemného působení částic jako newtonovské silové působení opustila jak kvantová fyzika, tak i **Albert Einstein** (1879 – 1955) v obecné teorii relativity, kde je silové gravitační působení těles nahrazeno křivostí prostoru. Elektromagnetická, silná a slabá interakce jsou popsány **kalibrační kvantovou teorií**. Tyto interakce jsou zprostředkovány třídami **kalibračních částic**, které jsou kvanty tzv. **kalibračních polí**.

**Graviton – gravitační interakce** působí univerzálně bez ohledu na to, zda se jedná o působení na látku, její částice či záření. Má nekonečný dosah, její účinky klesají se čtvercem vzdálenosti, je nejslabší interakcí a hraje v mikrosvětě zanedbatelnou úlohu. Samozřejmě jinak je tomu v makrosvětě, zejména pak v globálních strukturách vesmíru. Intermediálním bosonem by měl být teoretický doposud neobjevený **graviton**. Gravitace má pouze jeden náboj – **hmotnost**. Gravitace má nekonečný dosah a nelze ji odstínit, nemá znaménko náboje. Je vždy přitažlivá, samozřejmě podle námi známého chování a stupně poznání. **Kvantová teorie gravitace** stále není úplná a čeká na potvrzení existence gravitonů, není tedy zatím experimentálně ověřená. Zatím byla nepřímě potvrzena existence **gravitačních vln** ve vesmíru u binárních pulsarů. Gravitace je úspěšně popsána **obecnou teorií relativity**.

**Foton – kalibrační částice elektromagnetické interakce**, respektive její popis a teorie, vznikly sjednocením základních interakcí, a to magnetické a elektrostatické. Elektromagnetickou interakcí na sebe působí částice s elektrickým nábojem. Změny elektrického pole generují vznik pole magnetického a obráceně. Toto chování dokonale popsal James Maxwell koncem devatenáctého století, a je shrnuto do čtyř rovnic popisujících chování elektromagnetického pole. Tato Maxwellova elektromagnetická teorie byla v rozporu s výsledky experimentů fotoelektrického jevu. Max Planck a zejména pak Einstein podali jednoduché vysvětlení, že se energie předává ne kontinuálně, ale v elementárních kvantech, kde je přímo úměrná frekvenci elektromagnetického záření.

Tyto objevy se staly základem **kvantové teorie elektromagnetického pole**, na je-