

ELEKTROMAGNETICKÁ INTERAKCE

Základní informace

Působení	výběrové (na $Q_e \neq 0$)
Dosah	nekonečný
Symetrie	$U(1)_{loc}$
IM částice	γ - foton

- **Působení interakce:** Elektromagnetická interakce je *výběrová interakce*. Působí jen na částice s nenulovým elektrickým nábojem.
- **Dosah interakce:** *Nekonečný*, existují radiální členy s intenzitou pole $1/r$, tj. s intenzitou energie $1/r^2$, které neubývají ani v nekonečnu. Tyto členy odpovídají elektromagnetickým vlnám.
- **Symetrie interakce:** Každá ze základních interakcí podléhá určité symetrii, která je pro ni typická. Pro elektromagnetickou interakci jde o symetrii, která je nejhůře představitelná. Rovnice kvantové teorie pole se nezmění, nahradíme-li vlnovou funkci jinou vlnovou funkcí, vynásobenou komplexní jednotkou. Jde tedy o transformaci: $\psi \rightarrow \psi \exp [i \alpha(t, x, y, z)]$. Z matematického hlediska jde vlastně o pootočení vlnové funkce, neboli o *unitární* transformaci, s *jedním* parametrem (úhlem α), který může být v každém bodě časoprostoru různý (závisí na t, x, y, z - takovéto transformace nazýváme *lokální*). Matematici proto tuto transformaci označují $U(1)_{loc}$. Jejím přímým důsledkem je existence a zachování elektrického náboje. Někdy se proto zkráceně hovoří o kvantové teorii elektromagnetického pole jako o $U(1)_{loc}$ teorii.
- **Intermediální částice:** Symetrie je popsána jedním volným parametrem (úhlem otočení α), kterému odpovídá jediná intermediální částice - foton. Foton má nulovou klidovou hmotnost. Plyne to z relací neurčitosti mezi energií vyslané IM částice mc^2 a dobou, po kterou může být mimo objekt. Má-li mít interakce nekonečný dosah, musí mít IM částice nulovou hmotnost.

SILNÁ INTERAKCE

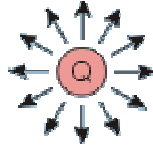
Základní informace

Působení	výběrové, na $Q_c \neq 0$ (kvarky, gluony)
Dosah	konečný, 10^{-15} m
Symetrie	SU(3)
IM částice	8 gluonů

- **Působení interakce:** Silná interakce je *výběrová interakce*. Působí jen na částice s nenulovým nábojem silné interakce Q_c , tzv. barevným nábojem (chromos). Barvu mají kvarky a gluony. Rozeznáváme tři barvy. Výsledný svět je bezbarvý.
- **Dosah interakce:** *Konečný*, interakce silná má krátký dosah, cca 10^{-15} m. S tím je spojená nenulová hmotnost intermediálních částic interakce.
- **Symetrie interakce:** Kvarky jsou fermiony, proto by se neměly nacházet podle Pauliho vylučovacího principu ve stejném kvantovém stavu. Tomu zdánlivě odporuje již existence neutronu (ddu), kde jsou dva kvarky d v témže stavu. V částici Ω^- (sss) jsou dokonce tři kvarky s ve stejném stavu. Tento problém se řeší zavedením další kvantové vlastnosti, která odlišuje jednotlivé kvarky v částici - *barvy*. Název této vlastnosti nijak nesouvisí se skutečnou barvou kvarků a nová vlastnost kvarků mohla být nazvána i jinak. Jde jen o to, že každý kvark se v přírodě musí vyskytovat ve třech navzájem různých provedeních (barvách), které nerozlišuje silná interakce. V matematice tuto symetrii označujeme SU(3) symetrie (barevná symetrie) a je na ní postavena teorie silné interakce. SU(3) je anglická zkratka pro Special Unitary - symetrie je popsána komplexními maticemi, které převádí mezi sebou tři barvy nerozlišitelné při silné interakci. Tyto matice jsou unitární (Unitary) s determinantem rovným jedné (Special). Unitární matice jsou matice, které se nezmění, překlápíme-li je kolem diagonály a komplexně sdružíme. V matematice reprezentují unitární matice dvě třídy operací: rotace ($\det = +1$) a zrcadlení ($\det = -1$).
- **Intermediální částice:** Symetrie je popsána komplexními maticemi 3×3 , ty jsou složeny z 18 reálných a imaginárních částí prvků matice. Podmínka na unitaritu představuje 9 rovnic a podmínka na determinant 1 rovnici. Máme tedy $18 - 9 - 1 = 8$ volných parametrů. Těm odpovídají 8 intermediálních částic, které nazýváme gluony (to glue = lepit v angličtině). Vzhledem k tomu, že jde o interakci krátkého dosahu, je hmotnost těchto částic nenulová.

Základní rozdíly mezi elektromagnetickou a silnou interakcí:

Foton nenes elektrický náboj.	Gluon nese barevný náboj.
Elektricky nabitě částice jsou <i>stíněné</i> elektron pozitronovými páry.	Kvarky jsou <i>antistíněné</i> svými gluonovými kožichy.
Potenciál interakce je v celém průběhu Coulombický.	Potenciál interakce je na malých vzdálenostech Coulombický, na velkých se chová jako potenciál homogenního pole.
Nejjednodušší elektrické pole (bodový náboj):	Nejjednodušší silné pole (dvojice kvark antikvark - mezon):



Těsně u kvarků je pole podobné Coulombickému. Ve větších vzdálenostech je homogenní a vytváří tzv. *gluonovou nit*.

Tensor pole: $F_{\mu\nu} = \partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu$

Tensor pole: $F_{\mu\nu} = \partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu + g (A_\mu A_\nu - A_\nu A_\mu)$

Navíc je zde nekomutující nelineární člen představující interakci gluonu s gluonem.

Abelova (komutující) $U(1)_{loc}$ teorie.

Neabelova (nekomutující) $SU(3)$ teorie.

SLABÁ INTERAKCE

Základní informace

Působení	výběrové, na $Q_f \neq 0$ (leptony a kvarky)
Dosah	konečný, 10^{-17} m
Symetrie	$SU(2)$
IM částice	IM vektorové bosony W^+ , W^- , Z^0

- **Působení interakce:** Slabá interakce je *výběrová interakce*. Působí jen na částice s nenulovým nábojem slabé interakce Q_f , tzv. vůni (flavour). Vůni mají leptony a kvarky. Vždy jedna generace částic uzavřená v závorce (například elektron se svým neutrinem) mají stejnou vůni. Rozeznáváme tedy vůni elektronovou, mionovou, tauonovou, vůni kvarků d a u , vůni kvarků s a c a vůni kvarků t a b (celkem 6 vůní).
- **Dosah interakce:** *Konečný*, interakce slabá má krátký dosah, cca 10^{-17} m. S tím je spojená nenulová hmotnost intermediálních částic interakce (W^\pm mají hmotnost 80 GeV a Z^0 má hmotnost 91 GeV).
- **Symetrie interakce:** Interakce slabá nerozpozná od sebe částice stejné vůně. Například elektron a elektronové neutrino se při slabé interakci jeví jako jediná částice. Stejně tak kvark d a kvark u a i ostatní dvojice. Samozřejmě při jiných interakcích (například elektromagnetické) lze tyto dvojice snadno odlišit. Symetrii nazýváme $SU(2)$, což je anglická zkratka pro Special Unitary - v matematice je popsána komplexními maticemi 2×2 (přehazují mezi sebou dvě částice nerozlišitelné při slabé interakci). Tyto matice jsou unitární (Unitary) s determinantem rovným jedné (Special). Unitární matice jsou matice, které se nezmění, překlápíme-li je kolem

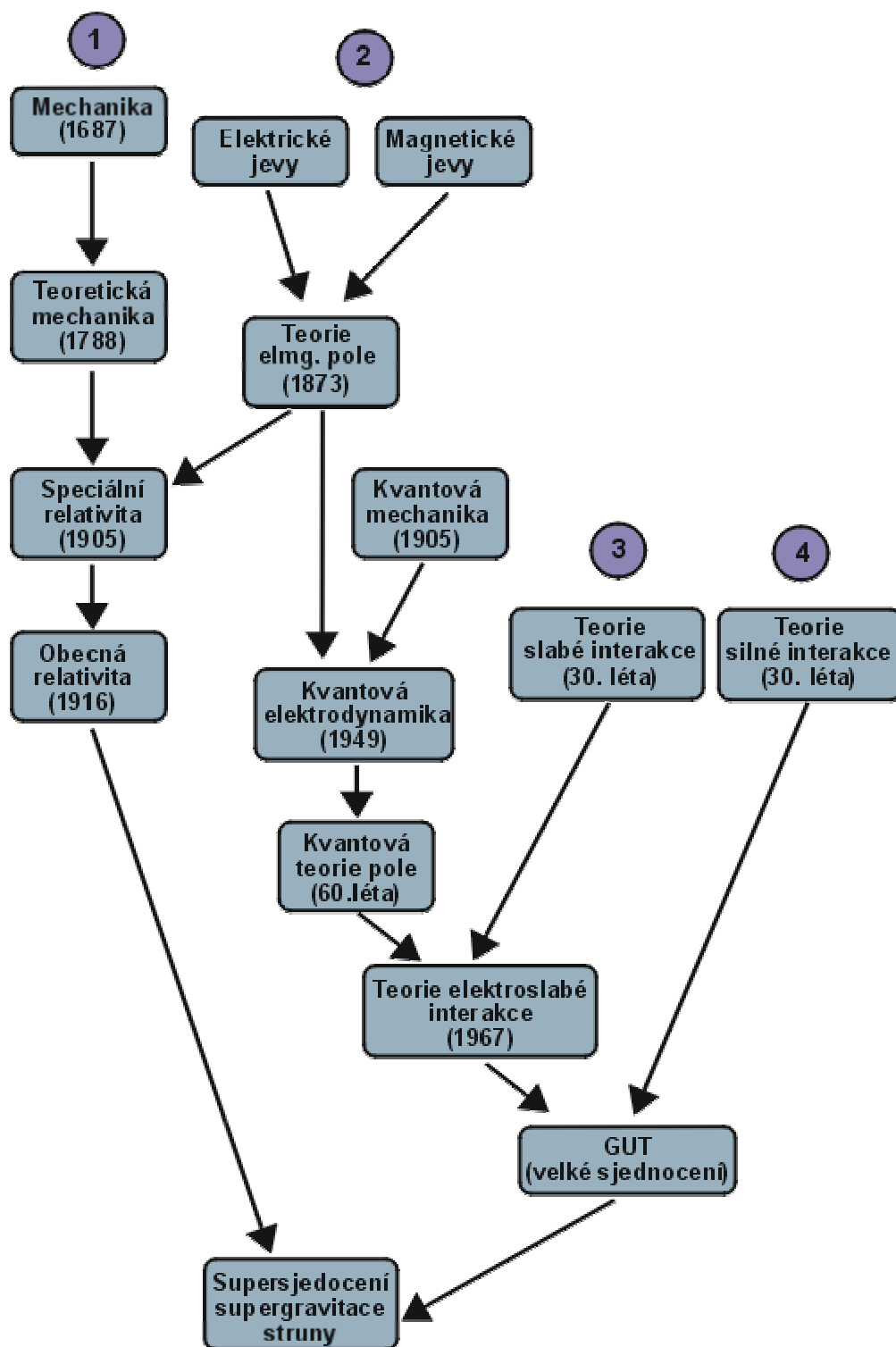
diagonály a komplexně sdružíme. V matematice reprezentují unitární matice dvě třídy operací: rotace ($\det = +1$) a zrcadlení ($\det = -1$).

- **Intermediální částice:** Symetrie je popsána komplexními maticemi 2×2 , ty jsou složeny z 8 reálných a imaginárních částí prvků matice. Podmínka na unitaritu představuje 4 rovnice a podmínka na determinant 1 rovnici. Máme tedy $8 - 4 - 1 = 3$ volné parametry. Těm odpovídají 3 intermediální částice W^+ , W^- a Z^0 . Vzhledem k tomu, že jde o interakci krátkého dosahu, je hmotnost těchto částic nenulová. Částice W^\pm a Z^0 mají klidové hmotnosti 80 GeV a 91 GeV.

SJEDNOCENÍ INTERAKCÍ

Úvod

V průběhu let dochází ve fyzice ke vzniku mnoha nových odvětví, fyzika se diferencuje. Současně však probíhá integrační proces - snaha o jednotný popis fyzikálních jevů. Tak byla v minulém století pochopena společná podstata jevů elektrických a magnetických (Ørsted, Faraday, Maxwell) a vnikla teorie elektromagnetického pole. Po vzniku kvantové teorie se objevila příslušná kvantová analogie - kvantová elektrodynamika a kvantová teorie elektromagnetického pole. V době relativně nedávné se podařilo "spojit" elektromagnetickou a slabou interakci v teorii elektroslabé interakce (Weinberg, Salam, Glashow). Nyní probíhají intenzivní pokusy připojit k teorii elektroslabé interakce ještě interakci silnou (tzv. velké sjednocení) a gravitační (supersjednocení, supergravitace).



Elektromagnetická interakce

Společná podstata jevů elektrických a magnetických byla pochopena v druhé polovině 19. století a vyústila v sadu rovnic klasické elektrodynamiky, u jejichž zrodu stáli J. C. Maxwell,

O. Heaviside a H. Hertz (první formulace v roce 1873). Dnes tyto rovnice nazýváme Maxwellovy rovnice a jejich obsah je jednoduše čitelný:

$\text{div } \mathbf{D} = \rho$	Zdrojem elektrického pole jsou náboje (Gaussova věta pro elektrické pole).
$\text{div } \mathbf{B} = 0$	Magnetické pole nemá bodové náboje (Gaussova věta pro magnetické pole).
$\text{rot } \mathbf{E} = - \partial \mathbf{B} / \partial t$	Zdrojem vírů elektrického pole jsou časové změny magnetického pole (Faradayův zákon indukce).
$\text{rot } \mathbf{H} = \mathbf{j} + \partial \mathbf{D} / \partial t$	Zdrojem vírů magnetického pole jsou tekoucí proudy nebo časové změny elektrického pole (Ampérův zákon).

Ve dvacátém století se objevila kvantová podoba elektrodynamiky a kvantová teorie elektromagnetického pole (P.A.M. Dirac, R.P. Feynman, J. Schwinger, I. Tomonaga), která byla završena elegantními grafickými zkratkami - Feynmanovými diagramy. O detailech se můžete dočíst na stránce věnované [elektromagnetické interakci](#). Zde připomeňme jen to, že elektromagnetická interakce podléhá $U(1)_{\text{loc}}$ symetrii, přenásobíme-li vlnovou funkci komplexní jednotkou, nic se v měřitelných předpovědích nezmění.

Elektroslabá interakce

V šedesátých letech se ukázalo, že je možné vytvořit teorii, která by jednotně popisovala elektromagnetickou i slabou interakci. Slabá interakce je odpovědná za různé pomalé rozpady částic například rozpad neutronu nebo mionu. Základní informace o slabé interakci a Feynmanovy diagramy obou rozpadů naleznete na stránce "[Slabá interakce](#)". Připomeňme zde jen, že slabá interakce podléhá $SU(2)$ symetrii - symetrii mezi elektronem a jeho neutrinem. Slabá interakce tyto částice nerozlišuje.

Problém jednotného popisu elektromagnetické a slabé interakce (tzv. elektroslabé interakce) je otázkou nalezení symetrie, která obsahuje jak $U(1)_{\text{loc}}$ tak $SU(2)$ symetrii, tj. symetrii elektromagnetické a slabé interakce. To se podařilo Steven Weinbergovi, Abdus Salamovi a Sheldon Lee Glashowovi, kteří za teorii elektroslabé interakce obdrželi Nobelovu cenu za fyziku pro rok 1979. Teorie elektroslabé interakce předpověděla, že kromě fotonu existují ještě další tři výměnné částice: intermediální bosony W^+ , W^- , Z^0 , které odpovídají za slabou interakci. Intermediální bosony W^+ , W^- , Z^0 byly objeveny v CERNu v roce 1983 ve

vstřícných proton antiprotonových svazcích o energii 270 GeV. Jejich objevitelé Carlo Rubbia a Simon van der Meer obdrželi za tento objev Nobelovu cenu za fyziku pro rok 1984.

V teorii elektroslabé interakce je jeden zásadní problém. Platí symetrie $U(1)_{\text{loc}}$ a $SU(2)$ beze zbytku, vyjdou hmotnosti všech čtyř intermediálních částic nulové. Ve skutečnosti je nulová jen klidová hmotnost fotonu (s tím souvisí nekonečný dosah elektromagnetické interakce) a částice W^\pm a Z^0 mají klidové hmotnosti 80 GeV a 91 GeV (s tím souvisí krátký dosah slabé interakce). V teorii to znamená, že symetrie musí být narušena. Tento jev nazýváme **spontánní narušení symetrie**. Za narušení symetrie by měly být odpovědné další částice, které nazýváme Higgsovy bosony nebo Higgsovo pole. Tyto částice jsou v posledních letech usilovně hledány a je naděje, že bude možné tyto částice detekovat na v současné době stavěných urychlovačích. Právě energie Higgsova pole mohla být jakousi roznětkou inflační fáze raného Vesmíru. Jev analogický spontánnímu narušení symetrie známe i z běžného života. Postavíme jehlu na povrchu stolu na špičku, měla by podle klasické teorie spadnout tím později, čím lépe je jehla na začátku postavena svisle. Při přesné symetrii (jehla přesně na špičce) by neměla spadnout vůbec, protože nelze vybrat žádný preferovaný směr. Přesto dojde k narušení symetrie a jehla v konečném čase dopadne na povrch stolu.

S $SU(2)$ symetrií slabé interakce souvisí, podobně jako v elektromagnetizmu, i určitý kvantový náboj. Nazýváme ho vůně a nejde o nic jiného než o jiné pojmenování druhů kvarků. Základní konstanta interakce je opět s energií částic proměnná. Při energiích 10^2 GeV by se obě interakce měly chovat jednotně (jako jediná elektroslabá interakce). Při energiích nižších dojde k narušení symetrie a "oddělení" interakce elektromagnetické od slabé a tyto interakce se chovají různě. Ve Vesmíru měly takové energie částice v době 10^{-10} s po jeho vzniku. Odpovídající teplota v té době byla 10^{15} K.

GUT (Grand Unified Theory - teorie Velkého sjednocení)

Pokusy popsat jednotně interakce elektromagnetickou slabou a silnou se nazývají teorie velkého sjednocení neboli GUT (Grand Unified Theory). Teorie silné interakce je teorií symetrie $SU(3)$, která znamená, že při silné interakci se nerozlišují tři barvy kvarků. Detaily o silné interakci naleznete na stránce věnované [silné interakci](#). Teorie GUT je z matematického hlediska hledání symetrie, která obsahuje dílčí symetrie $U(1)_{\text{loc}}$, $SU(2)$ a $SU(3)$ interakcí elektromagnetické, slabé silné. Podle použité symetrie existuje dnes několik variant. Nejpravděpodobnější varianty teorií GUT předpovídají existenci dalších intermediálních částic X a Y, které by měly způsobovat přechody mezi kvarky a leptony:

$$\bar{q} \leftrightarrow e$$

$$q \leftrightarrow \bar{e}$$

Za leptony byl zvolen elektron, ale může jít i o jiné leptony. To má dalekosáhlé důsledky. Především by to mělo znamenat nestabilitu protonu, a tím jaderné hmoty. Kvarky tvořící proton se mohou rozpadnout na leptony. Poločas tohoto rozpadu je však značně delší než stáří Vesmíru. Přesto by takové procesy mohly být našimi prostředky měřitelné a pokud existují, mohou zcela zásadně ovlivnit dalekou budoucnost našeho Vesmíru. Tyto procesy spolu s

narušením CP symetrie také mohly vést k dnešní baryonové asymetrii Vesmíru, tj. nadvládě hmoty nad antihmotou.

Silná a elektroslabá interakce by měly mít shodné chování pro energie částic vyšší než 10^{14} GeV. Při nižších energiích dojde k narušení symetrie GUT a "oddělení" interakce silné od elektroslabé. Takové poměry byly ve Vesmíru v čase 10^{-35} s po jeho vzniku. Odpovídající teplota Vesmíru v tomto čase je 10^{27} K.

Konstanty silné, slabé a elektromagnetické interakce jsou při energii 10^{14} GeV stejné. To je možné díky antistínění slabé a silné interakce a stínění interakce elektromagnetické. Konstanty interakcí jsou vlastně vhodně normované náboje interakcí. Energie Velkého sjednocení 10^{14} GeV je přibližně energie 100 wattové žárovky svítící po dobu jedné minuty. Tuto energii však musí mít při sjednocení GUT jediná elementární částice.

SUSY

Poslední interakcí je gravitační interakce. Gravitační interakce se liší od všech předchozích tří interakcí. Především působí nejen na naprosto všechny materiální objekty, ale i na polní částice. Základní teorií gravitace je obecná relativita, která převádí problémy síly na pohyb po geodetikách v zakřiveném prostoročase. Teorie má tedy zcela odlišnou konstrukci než kvantově polní teorie ostatních tří interakcí, které využívají výměnné částice. Jednotný popis gravitační a ostatních interakcí tedy znamená teoretické spojení obecné relativity s kvantovou teorií. O to se pokoušejí takzvané Supersymetrie (SUSY). Výsledkem těchto teorií je celá řada dalších výměnných částic. Shrňme stručně některé výsledky SUSY teorií:

- Ke každému fermionu by měl existovat superpartner, který je bosonem, a naopak ke každému bosonu by měl existovat superpartner, který je fermionem. Pokud je to možné, názvy super partnerů tvoříme příponou „ino". Tedy například foton - fotino, elektron - elektrino. Tam, kde to možné není, hovoříme o s-neutrinu, neboli o superpartneru neutrina.
- Spojení kvantové teorie s obecnou relativitou naráží ve čtyřech dimenzích na principiální problémy. Tyto problémy lze překonat ve Vesmíru s vyšším počtem dimenzí (10,11,26,506, ...). Je možné, že náš Vesmír je skutečně například desetidimenzionální, ale v makrosvětě vnímáme jen naše čtyři dimenze. Může to být podobné pohledu na chomáč vaty, který se z dálky jeví jako třídídimenzionální útvar s definovaným objemem. Při podrobnějším prozkoumání zjistíme, že je vata tvořena vláčkénky, a že definovat objem nemusí být vůbec jednoduché. Ostatních 6 dimenzí našeho vesmíru by také mohlo tvořit jakási "vláčkénka", jejichž typickým rozměrem by byla Planckova délka. Planckova délka by tak skutečně byla přirozenou jednotkou rozměrů ve Vesmíru. Jestliže by vakuové fotony mohly mít libovolnou energii, byla by energie vakua nekonečná (tzv. UV katastrofa). Za nejmenší možnou vlnovou délku fotonů se proto považuje právě Planckova délka.
- Elementární částice nejsou v SUSY teoriích bodové útvary, ale jednodimenzionální útvary, které nazýváme struny. Struny mohou být otevřené či uzavřené a liší se svým napětím.
- Všechny čtyři interakce by se měly chovat jednotně při energiích vyšších než 10^{19} GeV. To je právě Planckova energie. Tyto podmínky nastaly ve Vesmíru 10^{-43} s po

Velkém třesku. Tento čas je Planckův čas. V Planckově čase tedy došlo k narušení SUSY symetrie a "oddělení" gravitační interakce od elektroslabé a silné interakce. Vesmír před tímto časem asi měl zcela jiné vlastnosti a platily v něm přírodní zákony, které neznáme. Planckův čas je tedy současně časem, od kterého jsme schopni Vesmír vůbec popsat. Teplota v Planckově čase se odhaduje na 10^{32} K a hustota Vesmíru na 10^{94} g cm⁻³.

Částice	spin	superpartner	spin	poznámka
gluon	1	Gluino	1/2	
foton	1	Fotino	1/2	
Z boson	1	Zino	1/2	neutralina
higgs	0	higgsino	1/2	
neutrino	1/2	s-neutrino	0	
W boson	1	Wino	1/2	
lepton	1/2	s-leptony	0	chargina
kvark	1/2	s-kvarky	0	
graviton	2	gravitino	3/2	

Tabulka oddělování interakcí

Interakce	Název teorie	Energie oddělení (narušení symetrie)	Stáří Vesmíru	Teplota Vesmíru
elektromagnetická +slabá	teorie elektroslabé interakce	10^2 GeV	10^{-10} s	10^{15} K
elektromagnetická +slabá +silná	GUT	10^{14} GeV	10^{-35} s	10^{27} K
elektromagnetická +slabá +silná +gravitační	SUSY	10^{19} GeV	10^{-43} s	10^{32} K

Seznam literatury:

Úlehla, I., Suk, M., Trka, Z.: Atomy jádra částice. Praha 1990.

Beiser, A.: Úvod do moderní fyzika. Praha 1975.

Internet: www.aldebaran.cz