

Vedecká rada Fakulty matematiky, fyziky a informatiky
Univerzity Komenského v Bratislave

Mgr. Erik Bartoš

Autoreferát dizertačnej práce

**Kalibračné procesy pre vysoko energetické
urýchľovače**

na získanie vedecko–akademickej hodnosti
philosophiae doctor
v odbore doktorandského štúdia
11-21-9 všeobecná a matematická fyzika

Bratislava 2005

Dizertačná práca bola vypracovaná v dennej forme doktorandského štúdia na Katedre teoretickej fyziky a didaktiky fyziky FMFI UK v Bratislave.

- Predkladateľ:** Mgr. Erik Bartoš
KTFDF FMFI UK
Mlynská dolina F2-132
842 48 Bratislava
- Školiteľ:** prof. RNDr. Anna Dubničková, DrSc.
FMFI UK Bratislava
- Školiteľ špecialista:** RNDr. Stanislav Dubnička, DrSc.
Fyzikálny ústav SAV v Bratislave
- Oponenti:** prof. RNDr. Jiří Hořejší, DrSc.
Institute of Particle and Nuclear Physics
Center for Particle Physics, MFF
Charles University
V Holešovičkách 2
180 00 Praha 8
- Doc. RNDr. Michal Hnatič, Ph.D.
Ústav experimentálnej fyziky SAV
Watsonova 47
042 53 Košice
- RNDr. Jaroslav Antoš, Ph.D.
Ústav experimentálnej fyziky SAV
Watsonova 47
042 53 Košice

Autoreferát bol rozoslaný dňa 20. 7. 2005

Obhajoba dizertačnej práce sa uskutoční dňa 13. 9. 2005 o 13:30 hod. na Fakulte matematiky, fyziky a informatiky UK, Mlynská dolina, 842 48 Bratislava, v miestnosti F2-125, pred komisiou pre obhajobu dizertačnej práce doktorandského štúdia vymenovanou dňa 14. 6. 2005 predsedom spoločnej odborovej komisie vo vednom odbore 11-21-9 Všeobecná fyzika a matematická fyzika

Predseda spoločnej odborovej komisie:

prof. Ing. Milan Noga, DrSc.
Katedra teoretickej fyziky a didaktiky
fyziky FMFI UK
Mlynská dolina F2
842 48 Bratislava

Obsah

Úvod	2
1 Ciele dizertačnej práce	3
2 Teória a metódy	3
2.1 Hadrónové light-by-light príspevky k a_μ	3
2.2 Periferické zrážky ťažkých iónov	5
2.3 $\gamma\gamma$ and γ -leptónové zrážky	7
2.4 Sumačné pravidlo pre fotoprodukčné procesy	8
3 Dosiahnuté výsledky dizertačnej práce	11
4 Literatúra	13
5 Zoznam publikácií a citácií	16
5.1 Práce, ktoré tvoria súčasť dizertačnej práce	16
5.2 Ostatné práce	18
5.3 Príspevky na konferenciách	18
Summary	20

Úvod

S rozvojom vysoko energetických urýchľovačov v druhej polovici 20. storočia sa pred časticovou fyzikou otvorili nové možnosti. Zostrojené urýchľovače a hlavne na nich bežiacie experimenty potvrdili dovtedy známe javy a skutočnosti. S ich pomocou sa rozšírili naše vedomosti na subatomárnej úrovni, objavili sa nové častice predpovedané teoretikmi a vynorili sa nové otázky a idey. Ruka v ruke tieto nové idey a objavy v teórii spôsobili ďalší rozmach výskumných zariadení a tým pádom retrospektívne pôsobili na rozvoj nových predpovedí a teórií. Dnes všetci časticoví fyzici očakávajú spustenie urýchľovača Large Hadron Collider (LHC) v CERN-e a v súvislosti s tým je problematika vysoko energetických procesov mimoriadne aktuálna.

Predkladaná dizertačná práca je venovaná práve fyzike vysokých energií na urýchľovačoch, konkrétne vyhodnoteniu anomálneho magnetického momentu miónu, produkcii leptónových párov v periferických zrážkach relativistických ťažkých iónov, problematike $\gamma\gamma$ and γ -leptónových zrážok v helicitnej reprezentácii a nakoniec odvodeniu nového sumačného pravidla pre fotoprodukčné procesy.

Hlavný materiál, ktorý obsahuje predkladaná dizertačná práca, bol opublikovaný v **9** medzinárodných vedeckých časopisoch a získané výsledky boli použité v iných prácach (pozri Zoznam publikácií a citácií).

Získané výsledky boli prezentované na seminároch Bogoljubovho Laboratória Teoretickej Fyziky v JINR, Dubna, Katedry teoretickej fyziky FMFI Univerzity Komenského v Bratislave. Okrem toho boli prezentované na mnohých medzinárodných konferenciách, vrátane PNPI XXXV.–XXXVII. Annual Winter School on Nuclear and Particle Physics, Repino, Russia (2001–2003), Hadron Structure'02 konferencia v Herľanoch (2002), IX. Workshop on High Energy Spin Physics SPIN-01, Dubna, Russia (2002), Miniworkshop Modern Methods in Relativistic Nuclear Physics, Dubna, Russia (2003), Hadron Structure'04 konferencia v Smoleniciach (2004).

1 Ciele dizertačnej práce

Pri stanovení cieľov dizertačnej práce sme vychádzali so súčasného stavu predkladanej problematiky. Napriek značnej pozornosti, ktorá sa venuje procesom skúmaným na urýchľovačoch ťažkých iónov pri relativistických energiách a taktiež plánovanému spusteniu lineárnych urýchľovačov, stále ostáva mnoho otázok súvisiacich so správnym pochopením javov prebiehajúcich na týchto špičkových zariadeniach nedoriešených.

Ciele dizertačnej práce je možné zhrnúť do nasledujúcich bodov:

- Vypočítať hadrónové light-by-light príspevky k a_μ od pólových členov skalárnych σ , a_0 a pseudoskalárnych π^0 , η , η' mezónov v treťom ráde konštanty jemnej štruktúry α v rámci linearizovaného rozšíreného Nambu–Jona–Lasinio modelu.
- Popísať interakciu leptónových párov s elektromagnetickým poľom relativistických ťažkých iónov.
- Zostrojiť impakt faktory pre podprocesy v zrážkach $\gamma\gamma$ a γ –leptónov a použiť ich na konštrukciu zložitejších amplitúd.
- Na základe analytických vlastností amplitúd dopredného Comptonovho rozptylu na protónoch a neutrónoch odvodiť nové sumačné pravidlo pre totálne účinné prirezy fotoprodukčných procesov γp (γn).

2 Teória a metódy

2.1 Hadrónové light-by-light príspevky k a_μ

Anomálny magnetický moment elektrónu a miónu, a_e and a_μ , hrá dôležitú úlohu v rozvoji časticovej fyziky. Do dnešných čias slúžia na previerku správnosti Kvantovej Elektrodynamiky (QED) a Štandardného Modelu (SM) vôbec.

Hodnota anomálneho magnetického momentu elektrónu je veľmi dobre známa [1], v prípade miónu je situácia oveľa komplikovanejšia. Dnešná experimentálna hodnota anomálneho magnetického momentu miónu, založená na posledných výsledkoch mión ($g - 2$) experimentu E821 v Brookhaven National Laboratory [2] je rovná

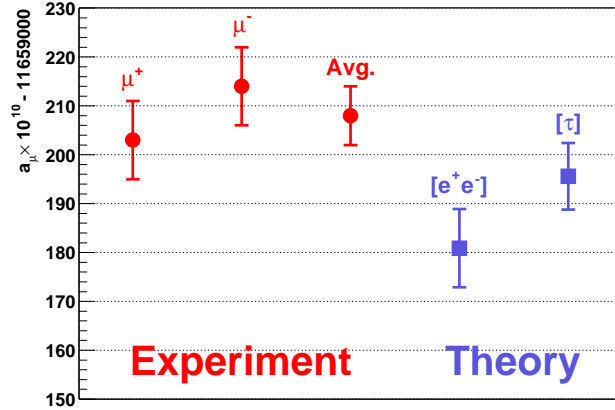
$$a_\mu^{\text{exp}} = 11\,659\,208(6) \times 10^{-10}. \quad (1)$$

Teoreticky vyhodnotiť túto veličinu je netriviálne, pretože teoretická hodnota pozostáva (na rozdiel od elektrónu) z príspevkov slabých, elektromagnetických a silných interakcií. Kým príspevky od elektromagnetických interakcií nadobúdajú hodnotu

$$a_\mu^{\text{QED}} = 11\,658\,471.94(0.14) \times 10^{-10} \quad [3] \quad (2)$$

a od slabých interakcií hodnotu

$$a_\mu^{\text{EW}} = 15.4(0.2) \times 10^{-10} \quad [4], \quad (3)$$



Obr. 1: Experimentálne výsledky pre anomálny magnetický moment miónu a_μ získané v „Muon (g-2) collaboration (E821)“ a ich porovnanie s teoretickými predpoveďami.

hadrónové príspevky sú vyhodnotené nejednoznačne a preto sa rozdiel medzi teoretickou a experimentálnou hodnotou a_μ pohybuje medzi 1,02 až 2,96 štandardnej odchýlky σ (viď Obr. 1).

Hadrónové príspevky pozostávajú z najnižšej hadrónovej vákuovej polarizácie, vyšších hadrónových vákuových polarizácií a hadrónového light-by-light (LBL) príspevku. Kým prvé sa dajú vyhodnotiť pomocou známych experimentálnych hodnôt účinných prierezov, zodpovedajúcich anihilačných procesov elektrónu–pozitrónu s následnou kreáciou hadrónov, s dosť veľkou presnosťou [5], LBL príspevok, hlavne jeho mezónové pólové príspevky, boli nejednoznačne vyhodnotené.

V našom prístupe pri výpočte spomenutých príspevkov bol použitý model konštituentných kvarkových trojuholníkových slučiek. Na interakciu mezónov a konštituentných kvarkov bol použitý rozšírený linearizovaný lagranžian typu Nambu–Jona–Lasinio. Pre hmotnosť konštituentných kvarkov bola vybraná hodnota $m_q = (280 \pm 20)$ MeV [6], hmotnosť σ -mezónu $m_\sigma = (496 \pm 47)$ MeV [7, 8], hmotnosť miónu a odpovedajúcich skalárnych a pseudoskalárnych mezónov z Review of Particle Physics [9]. Použitím procedúry výpočtu slučkových integrálov využitím metódy Feynmanových parametrov, programu MIKOR [10] na ich numerický výpočet, boli vypočítané jednotlivé príspevky mezónov. Celkový vklad mezónových pólových členov do hadrónového LBL príspevku je

$$a_\mu^{\text{lbl,M}} = 10.77(1.68) \times 10^{-10}. \quad (4)$$

Porovnanie nášho získaného výsledku s najnovšími hodnotami je uvedené v Tab. 1. Takým spôsobom celkový LBL príspevok [11, 12] dosiahol hodnotu

$$a_\mu^{\text{lbl}} = 11.12(1.68) \times 10^{-10}. \quad (5)$$

Sčítaním jednotlivých príspevkov QED (2), elektroslabých (3), hadrónových vákuových polarizácií [5, 13] a LBL príspevku (5) sme pre teoretickú hodnotu anomál-

Hodnota $a_\mu^{\text{lbl,M}} \times 10^{10}$	
5.2(1.8)	[11]
9.2(3.2)	[12]
7.9(1.5)	[14]
8.3(1.2)	[15]
5.8(1.0) (len π^0)	[15, 16]
10.77(1.68)	náš výsledok [17]

Tab. 1: Najnovšie výpočty hadrónového light-by-light príspevku pre mezonové pólové členy $a_\mu^{\text{lbl,M}}$.

neho magnetického momentu miónu dostali

$$a_\mu^{\text{th}} = \begin{cases} 11\,659\,181.86(6.65) \times 10^{-10} & e^+e^- \text{ údaje,} \\ 11\,659\,199.46(6.08) \times 10^{-10} & \tau^- \text{ údaje.} \end{cases} \quad (6)$$

Porovnaním teoretických (6) a experimentálnych výsledkov (1) sme získali

$$a_\mu^{\text{exp}} - a_\mu^{\text{th}} = \begin{cases} 26.14(6.65_{\text{th}})(5.8_{\text{exp}}) \times 10^{-10} & (2.96\sigma) \quad e^+e^- \text{ údaje,} \\ 8.54(6.08_{\text{th}})(5.8_{\text{exp}}) \times 10^{-10} & (1.02\sigma) \quad \tau^- \text{ údaje,} \end{cases} \quad (7)$$

čo implikuje dosť veľkú nekonzistentnosť predpovedí Štandardného Modelu pre anomálny magnetický moment miónu s experimentálnymi hodnotami, hlavne tými, ktoré boli získané z e^+e^- údajov. Takým spôsobom problém vyhodnotenia anomálneho magnetického momentu miónu nie je uspokojivo vyriešený a je stále aktuálny.

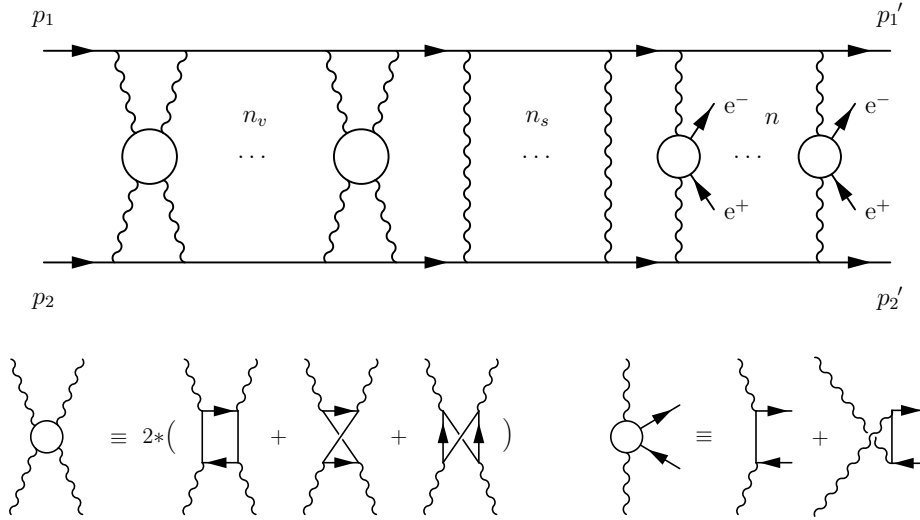
2.2 Periferické zrážky ťažkých iónov

V dizertačnej práci sme rozpracovali produkciu leptónových párov

$$Z_1 + Z_2 \rightarrow e^+e^- + Z_1 + Z_2 \quad (8)$$

v periferických zrážkach ťažkých iónov. Keď sa zrážajú ťažké ióny pri relativistických rýchlostiach, ich elektromagnetické polia sa Lorentzovsky transformujú a na produkciu leptónových párov sa môžeme pozeráť ako na kreáciu párov v dvoch externých poliach, ktoré môžu byť reprezentované klasickými elektromagnetickými potenciálmi [18, 19]. Táto kontrakcia elektromagnetického poľa spolu s veľkým protonovým číslom iónov zvyšuje pravdepodobnosť interakcie elektromagnetických polí iónov, t. j. reálne jedno-, dvoj-fotónovú výmenu (pri väčších energiách môže byť aj viac-fotónová).

Keďže QED a Kvantová chromodynamika (QCD) sú produktom tej istej lokálnej kvantovej teórie poľa, riešenie problému produkcie leptónových párov môže napomôcť porozumeniu veľmi dôležitého a doposiaľ nevyriešeného problému interakcie kvarkov a gluónov v konečnom stave, vznikajúcej v QCD. Napriek nedávnej veľkej aktivite v tejto oblasti [20–27] sa nedosiahlo konečné riešenie tohoto problému. V našom prístupe sme sformulovali úlohu popísať interakciu leptónových párov s elektromagnetickým poľom ťažkých iónov, t. j. napísať amplitúdy uvedeného



Obr. 2: Periferický proces kreácie n leptónových párov s n_s fotónovými výmenami medzi jadrami A_1 , A_2 a n_v light-by-light rozptylovými blokmi.

procesu pre prvé členy poruchového rozvoja v QED, preskúmať ich energetickú závislosť v limitných prípadoch, a ak je to možné, odhadnúť ich príspevok do účinného prierezu.

Pri analýze problematiky sme zvolili prístup založený na technike Feynmanových diagramov. Okrem toho sme použili Sudakovovu techniku [28], ktorá veľmi zjednodušuje výpočty v hybnostnom priestore pre procesy pri vysokých energiách.

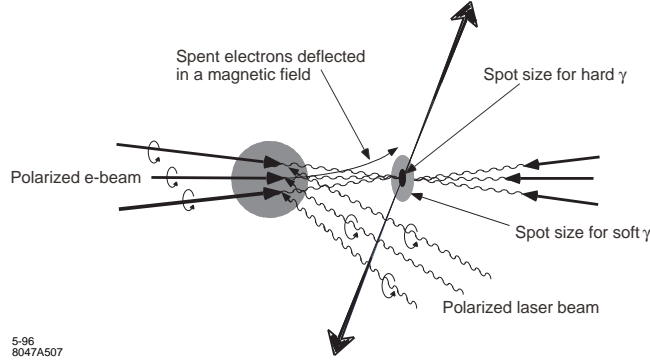
Naviac bola použitá periferická kinematika uvažovaného procesu (8) a zdôraznená dôležitosť použitia podmienok kalibračnej invariantnosti.

Ako výsledok boli nájdené amplitúdy pre coulombovské korekcie v C-párnom a C-nepárnom stave spolu s ich príspevkami k totálnemu účinnému prierezu z ich interferencie s Bornovým členom v hlavnej logaritmickej aproximácii. Ďalej bol podrobne rozpracovaný 4-fotónový mechanizmus a rozanalizovaný prípad pre široko uhlovú limitu. Bola načrtnutá všeobecná konštrukcia maticového elementu pre multifotónovú výmenu medzi leptónovým párom a ťažkými iónmi. Ako sa ukázalo, neexistuje tu zatiaľ jednoduchý spôsob zovšeobecnovania dosiahnutých výsledkov [29].

Pri riešení problematiky viacnásobnej produkcie leptónových párov (viď. Obr. 2), vyplývajúcej z podmienky unitarity [20], sme do komplexnej amplitúdy zahrnuli okrem n produkcie leptónových párov aj n_s fotónovú výmenu medzi jadrami a n_v vklad light-by-light blokov (tzv. screening efekt). Potvrdilo sa, že totálna pravdepodobnosť produkcie n leptónových párov $P(b)$ ako funkcia impakt parametra b môže byť približne reprezentovaná Poissonovým rozdelením, t. j. $P(b, n) = \frac{W^n(b)}{n!} e^{-W(b)}$, kde $W(b)$ je priemerná početnosť párov pri fixnom impakt parametri b .

Taktiež bol spracovaný zaujímavý problém správneho použitia crossing symetrie [30, 31]. Výsledkom analýzy je, že v mnohých prácach ako napr. [23, 24, 32] bola crossing symetria nevhodne použitá.

Ako ilustračný príklad aplikácie metód rozvinutých v rámci QED a rozšírených na problémy hadrónovej produkcie v QCD sme rozpracovali proces jednospinovej asymetrie v piónej produkcii pri zrážkach protónu s polarizovaným protónom.



Obr. 3: Schéma kreácie fotónového zväzku pomocou spätného Comptonovho rozptylu laserových fotónov na elektrónovom zväzku.

2.3 $\gamma\gamma$ and γ -leptónové zrážky

V súčasnosti, hlavne s prípravou spustenia lineárnych urýchľovačov ako je CLIC [33] a TESLA [34] v Európe, NLC [35] v USA a JLC [36] v Ázii, priťahujú veľký záujem fyzikov procesy $\gamma\gamma$ and γ -leptónových zrážok. Dôvodom je unikátna vlastnosť lineárnych urýchľovačov, a to možnosť konštrukcie fotónových urýchľovačov (Obr. 3).

Potenciál fotónových urýchľovačov je veľmi bohatý a dopĺňa podstatným spôsobom fyzikálny program e^+e^- lineárnych urýchľovačov. Poukážme na niekoľko výhod fotónových urýchľovačov, ako napr.:

- vyššie účinné prierezy pre nabitú časticu než v prípade e^+e^-
- rôzne J^{PC} stavy než v prípade e^+e^-
- Higgsove bozóny môžu byť produkované v s -kanáli ako rezonancie
- výhody v CP analýze pre Higgsove bozóny
- precízny test väzbových konštánt na fotóny.

Pre správne fungovanie plánovaných urýchľovačov je nutné dôkladne poznať použité kalibračné a monitorovacie procesy. Veľa pozornosti bolo venované detailom konverzie laserových fotónov v procese spätného Comptonovho rozptylu a efektom hustotného rozdelenia vo fotónových zväzkoch [37]. V [38] bola rozpracovaná všeobecná teória polarizačného fenoménu v zrážkach fotónových zväzkov. Avšak pre účely kalibrácie, merania stupňa polarizácie a luminozity fotónových zväzkov stačí použiť [39] nasledujúce QED procesy s kreáciou jedného páru nabitých leptónov „s alebo bez“ produkcie jedného (alebo viacerých) fotónov

$$\gamma + \gamma \rightarrow \mu^+ + \mu^-, \quad (9a)$$

$$\gamma + \gamma \rightarrow \mu^+ + \mu^- + \gamma. \quad (9b)$$

Okrem toho tieto procesy poskytujú základné pozadie na štúdium procesov s kreáciou hadrónov ako aj ťažkých vektorových bozónov.

Ďalšou triedou QED procesov, ktoré môžu byť použité ako kalibračné procesy je fotoprodukcia nabitých párov na elektróne

$$\gamma + e^- \rightarrow e^- + a + \bar{a}, \quad a = e^-, \mu^-, \pi^- \quad (10a)$$

alebo dvojité Comptonov rozptyl

$$\gamma + e^- \rightarrow e^- + \gamma + \gamma. \quad (10b)$$

Dôležitou triedou procesov sú procesy uvažované v periferickej kinematike, ktoré majú formu 2-jetovej produkcie s výmenou virtuálneho fotónu γ^* v t -kanáli

$$a + b \rightarrow \text{jet}_1 + \text{jet}_2, \quad (11)$$

kde a a b reprezentujú počiatočné častice ako fotón γ , elektón e^- alebo pión π^- . Konečné jety sú páry nabitých častíc (leptónov alebo mezónov) „s alebo bez“ prídavných ťažkých fotónov. Tieto procesy boli rozpracované v [40,41], kde bola pozornosť venovaná hlavne kinematike hlavného príspevku k totálnemu účinnému prierezu. Menovite prípadu, kedy sa konečné častice s hmotnosťami m_i pohybujú v úzkom kuželi θ_i pozdĺž smeru zrážajúcich sa zväzkov $\theta_i \sim (m_i/\sqrt{s})$. Bolo ukázané, že totálny účinný prierez neklesá ako funkcia totálnej cms energie \sqrt{s} počiatočných častíc. Tento fakt je všeobecnou vlastnosťou periferických procesov [42].

V súvislosti s týmto sme vyhodnotili amplitúdy spomenutých procesov (9–11) v tzv. helicitnej reprezentácii. Presnosť dosiahnutých výsledkov je dosť veľká !!!, hoci boli systematicky zanedbávané členy „nie hlavných“ príspevkov. Členy hlavného rádu $(\frac{\alpha}{\pi}L)^n$ sú vzaté do úvahy pri výpočtoch radiačných korekcií v rámci renormalizačnej grupy.

2.4 Sumačné pravidlo pre fotoprodukčné procesy

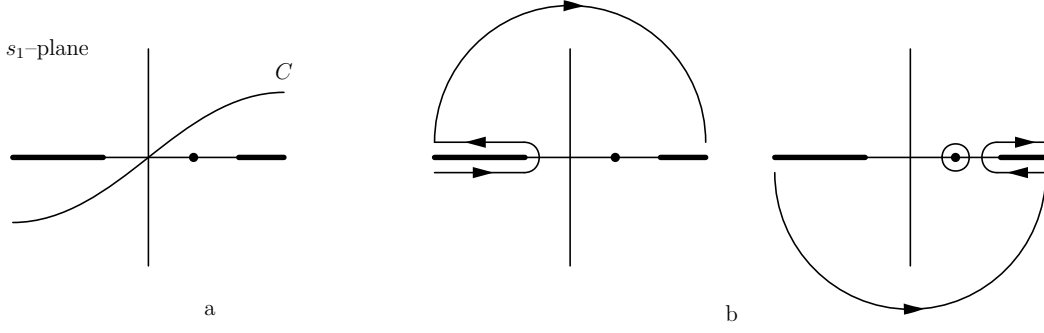
V roku 1967, Kurt Gottfried [43], uvažujúc elektrón–protónový rozptyl pri vysokých energiách a nerelativistický kvarkový model hadrónov, našiel sumačné pravidlo, ktoré dávalo do súvisu strednú hodnotu druhej mocniny nábojového polomeru protónu $\langle r_{Ep}^2 \rangle$, protónový magnetický moment $\mu_p = 1 + \kappa_p$ a integrál totálneho účinného prierezu pre fotoprodukciiu na protóne $\sigma_{\text{tot}}^{\gamma p}(\nu)$ vo forme

$$\int_0^\infty \frac{d\nu}{\nu} \sigma_{\text{tot}}^{\gamma p}(\nu) = \frac{\pi^2 \alpha}{m_p^2} \left[\frac{4}{3} m_p^2 \langle r_{Ep}^2 \rangle + 1 - \mu_p^2 \right], \quad (12)$$

kde ν je energetická premenná v laboratórnej súradnicovej sústave a m_p je hmotnosť protónu.

Dnes je známe, že Gottfriedovo sumačné pravidlo nemôže byť splnené, pretože integrál v sumačnom pravidle diverguje, z dôvodu rastu totálneho účinného prierezu fotoprodukcie na protóne s rastom energie.

My sme odvodili nové sumačné pravidlo, ktoré dáva do súvisu Diracov protónový polomer a anomálne magnetické momenty protónu a elektrónu s integrálom rozdielu totálnych účinných prierezov fotoprodukcie na protónoch a neutrónoch.



Obr. 4: Interpretácia sumačného pravidla v s_1 -rovine. Na obrázku (a) je nakreslená krivka C , na obrázku (b) je krivka C uzavretá do hornej a dolnej polroviny.

Pri konštrukcii nového sumačného pravidla sme vychádzali z procesu elektrón-nukleónového rozptylu na nulový uhol s nenulovou imaginárnou časťou v s -kanáli

$$e^-(p_1) + N(p) \rightarrow e^-(p_1') + X \quad (13)$$

s produkciou hadrónového stavu X , ktorý sa pohybuje v smere pohybu počiatočného nukleónu.

Použitím vyššie uvedených postupov sme dospeli k formule pre rozdiel diferenciálnych účinných prierezov elektroprodukcie na protóne a neutróne

$$\left(\frac{d\sigma^{e^-p \rightarrow e^-X}(s, \mathbf{q})}{d^2\mathbf{q}} - \frac{d\sigma^{e^-n \rightarrow e^-X}(s, \mathbf{q})}{d^2\mathbf{q}} \right) = \frac{\alpha \mathbf{q}^2}{4\pi^2} \int_{2m_N m_\pi + m_\pi^2 + \mathbf{q}^2}^{\infty} \frac{ds_1}{s_1^2 [\mathbf{q}^2 + (m_e s_1/s)^2]^2} [\text{Im} \tilde{A}^{(p)}(s_1, \mathbf{q}) - \text{Im} \tilde{A}^{(n)}(s_1, \mathbf{q})], \quad (14)$$

kde amplitúda $\tilde{A}(s_1, \mathbf{q})$ je v rámci našej konštrukcie len časťou totálnej doprednej amplitúdy pre virtuálny Comptonov rozptyl $A(s_1, \mathbf{q})$.

Použijúc analytické vlastnosti amplitúdy $\tilde{A}(s_1, \mathbf{q})$ v s_1 -rovine a definíciu dráhového integrálu I v s_1 -rovine ako je prezentované na Obr. 4

$$I = \int_C ds_1 \frac{p_1^\mu p_1^\nu}{s^2} [\tilde{A}_{\mu\nu}^{(p)}(s_1, \mathbf{q}) - \tilde{A}_{\mu\nu}^{(n)}(s_1, \mathbf{q})] \quad (15)$$

spolu s uzavretím krivky C do hornej (resp. dolnej) polroviny sme dospeli k sumačnému pravidlu

$$\pi(\text{Res}^{(n)} - \text{Res}^{(p)}) = \mathbf{q}^2 \int_{\text{r.h.}}^{\infty} \frac{ds_1}{s_1^2} [\text{Im} \tilde{A}^{(p)}(s_1, \mathbf{q}) - \text{Im} \tilde{A}^{(n)}(s_1, \mathbf{q})], \quad (16)$$

kde

$$\text{Res}^{(N)} = 2\pi\alpha \left(F_{1N}^2 + \frac{\mathbf{q}^2}{4m_N^2} F_{2N}^2 \right) \quad (17)$$

je pólový príspevok jedno–nukleónového prechodného stavu. Príspevky ľavého rezu z rozdielu ($\text{Im } \tilde{A}^{(p)} - \text{Im } \tilde{A}^{(n)}$) sú navzájom vykompenzované. Ďalšími úvahami sme dospeli ku konečnej forme sumačného pravidla

$$\begin{aligned} 1 + F_{1n}^2(-\mathbf{q}^2) + \frac{\mathbf{q}^2}{4m_n^2} F_{2n}^2(-\mathbf{q}^2) - F_{1p}^2(-\mathbf{q}^2) - \frac{\mathbf{q}^2}{4m_p^2} F_{2p}^2(-\mathbf{q}^2) \\ = 2 \frac{(\mathbf{q}^2)^2}{\pi\alpha^2} \left(\frac{d\sigma^{e^-p \rightarrow e^-X}}{d\mathbf{q}^2} - \frac{d\sigma^{e^-n \rightarrow e^-X}}{d\mathbf{q}^2} \right), \end{aligned} \quad (18)$$

ktoré dáva do vzájomného vzťahu nukleónové formfaktory s diferenciálnymi účinnými prierezmi hlbokonepružného elektrón–protónového rozptylu.

Deriváciou vzťahu (18) podľa štvorca prenesenej hybnosti sme dostali sumačné pravidlo, ktoré dáva do súvisu druhú mocninu Diracovho protónového polomeru a anomálne magnetické momenty protónu a neutrónu s integrálom rozdielu totálnych účinných prierezov fotoprodukcie na protónoch a neutrónoch

$$\frac{1}{3} \langle r_{1p}^2 \rangle - \frac{\kappa_p^2}{4m_p^2} + \frac{\kappa_n^2}{4m_n^2} = \frac{2}{\pi^2\alpha} \int_{\omega_N}^{\infty} \frac{d\omega}{\omega} [\sigma_{\text{tot}}^{\gamma p \rightarrow X}(\omega) - \sigma_{\text{tot}}^{\gamma n \rightarrow X}(\omega)] \quad (19)$$

s $\omega_N = m_\pi + m_\pi^2/2M_N$.

Nové sumačné pravidlo je veľmi presne splnené.

3 Dosiahnuté výsledky dizertačnej práce

V tejto časti zosumarizujeme hlavné výsledky dosiahnuté v dizertačnej práci:

- Vypočítali sme tretí QED rád hadrónových light-by-light príspevkov $a_\mu^{\text{lbl,M}}$ k anomálnemu magnetickému momentu miónu pre pólové členy skalárnych σ , $a_0(980)$ a pseudoskalárnych π^0 , η , η' mezónov v rámci linearizovaného rozšíreného Nambu–Jona–Lasinio modelu. Off-shell štruktúra fotón–fotón–mezónových vertexov bola vzatá do úvahy použitím slučiek pozostávajúcich z konštituentných kvarkov. Hmotnosť konštituentných kvarkov bola vybraná $m_q = (280 \pm 20) \text{ MeV}$. Celková hodnota príspevkov mezónových pólov v light-by-light prípade je $a_\mu^{\text{lbl,M}} = 10.77(1.68) \times 10^{-10}$ [17].
- Boli zostrojené prvé členy pre amplitúdu produkcie leptónových párov v coulombovskom poli dvoch relativistických ťažkých iónov. Použitím Sudakovovej techniky, ktorá uľahčuje výpočty procesov pri vysokých energiách, sme dostali kompaktný analytický výraz pre diferenciálny účinný prierez uvažovaného procesu v najnižšom ráde konštanty jemnej štruktúry (Bornova aproximácia), platný pre ľubovoľný prenos hybnosti a pre široký kinematický režim produkovaných častíc [27].
- Použijúc rovnakú techniku, sme zostrojili ďalšie poruchové členy (do štvrtého rádu konštanty jemnej štruktúry) a skúmali sme ich závislosť na raste energie a taktiež ich limitné prípady. Bolo ukázané, že ak zoberieme do úvahy všetky amplitúdové členy v zodpovedajúcom ráde, získame výrazy pre amplitúdy, ktoré sú kalibračne invariantné a konečné [27].
- Predložili sme explicitné výsledky výpočtov pre konkrétny vklad do produkcie leptónových párov, realizovaný 4-fotónovým mechanizmom $2\gamma + 2\gamma \rightarrow l^+l^-$. Výsledok ukazuje, že amplitúda procesu $2\gamma + 2\gamma \rightarrow l^+l^-$ má logaritmický nárast pre leptónové páry s veľkou kolmou zložkou vymeneného momentu hybnosti. Pre procesy $n\gamma + m\gamma \rightarrow l^+l^-$, kde $m, n > 2$, táto vlastnosť amplitúdy neplatí. Získaný výsledok takto poukazuje na to, že známa eikonalizácia coulombovských korekcií je narušená v prípade opačne sa pohybujúcich coulombovských centier [29].
- Rozdiskutovali sme všeobecný tvar amplitúd pre prípad mnohonásobných fotónových výmen a ukázali sme ako treba zaobchádzať s vyššími poruchovými členmi, ktoré nemôžu byť eikonalizované [29].
- Aplikovali sme Sudakovovu techniku na opis mnohopočetnej produkcie leptónových párov. Ukázali sme, že v prípade ťažkých iónov so $Z_1 Z_2 \alpha \geq 1$ sa musia brať pozorne do úvahy mnohonásobné coulombovské výmeny fotónov a skrínigové efekty medzi zrážajúcimi sa iónmi, pokiaľ interakcie reálnych a virtuálnych leptónových párov so zrážajúcimi sa iónmi vyhovujúcich podmienke $Z_1 \sim Z_2 \ll 1$ môžu byť zanedbané. Ak je pravdepodobnosť produkcie n -leptónových párov prepísaná do tvaru funkcie závisiacej od impakt parametra b , jej správanie má charakter Poissonovej distribúcie [44].

- Bola rozdiskutovaná problematika správneho použitia crossing symetrie pre procesy zrážok ťažkých iónov [30].
- Ako príklad použitia metód, vypracovaných v rámci QED, na problémy produkcie hadrónov v rámci QCD sme uviedli problém jedno–spinovej asymetrie pre proces piónovej produkcie v protón–protónových zrážkach [45].
- Zostrojili sme kompaktné výrazy pre účinné prierezy fotoprodukcie a elektroprodukcie párov nabitých častíc e^+e^- , $\mu^+\mu^-$, $\pi^+\pi^-$ a taktiež dvojitého Comptonovho rozptylu. Získali sme explicitné analytické výrazy v prípade polarizovaného fotónu a počiatočného elektrónu pre kinematiku, kedy môžu byť všetky uvažované častice pokladané za bezhmotné. Polarizácie fotónov boli opísané v termínoch Stokesových parametrov [46, 47].
- Vyšetřili sme jetom–podobné procesy pre tú oblasť rozptylových uhlov, ktorá dáva dominantný príspevok do účinných prierezov. Zostrojili sme sadu amplitúd pre rôzne podprocesy vo forme impakt faktorov. Ich kombináciou je možné skonštruovať zložitejšie a komplikovanejšie amplitúdy. Pre prípad polarizovaných počiatočných a konečných častíc sme získali radiačné korekcie realizované virtuálnymi a mäkkými fotónmi [48].
- Získali sme vzťah medzi nukleónovými formfaktormi a rozdielom protónových a neutrónových diferenciálnych účinných prierezov pre elektroprodukciiu, použitím analytických vlastností časti doprednej virtuálnej Comptonovej amplitúdy pre rozptyl na protóne a neutróne [49].
- Odvodili sme sumačné pravidlo pre prípad malých prenesených momentov hybnosti, ktoré dáva do súvisu druhú mocninu Diracovho protónového polomeru a anomálne magnetické momenty protónu a neutrónu s integrálom rozdielu protónových a neutrónových totálnych účinných prierezov pre fotoprodukciiu [49].

Na záver chceme zdôrazniť, že dosiahnuté výsledky, ako napr. light–by–light príspevok k anomálnemu magnetickému momentu miónu, hrá kvalitatívnu úlohu vo výpočtoch teoretickej hodnoty tejto dôležitej veličiny. Jej presné vyhodnotenie odráža naše porozumenie základných interakčných síl v prírode.

V prípade procesov pre periferické zrážky ťažkých iónov a procesov pre $\gamma\gamma$, resp. γ –leptónové zrážky, môžu získané výsledky slúžiť ako základný materiál vhodný na zostrojenie nových alebo kontrolu existujúcich fyzikálnych generátorov. Navyše, pomocou jednoduchých modifikácií môžu byť použité na riešenie problémov skúmaných v rámci QCD.

Získané sumačné pravidlo pre fotoprodukčné procesy spája teoretické predpovede pre nukleónové formfaktory so súčasnými výsledkami DIS experimentov. Z tohto faktu plynie veľká výzva pre špecializované experimentálne skupiny (hlavne v DESY), a to zistiť konkrétne, nakoľko je získané sumačné pravidlo správne a nakoľko odráža súčasné experimentálne výsledky.

Literatúra

- [1] R. S. Van Dyck et al., Phys. Rev. Lett. **59** (1987), 26.
- [2] G. W. Bennett et al., *Muon ($g-2$) Collaboration*, Phys. Rev. Lett. **92** (2004), 161802.
- [3] T. Kinoshita and M. Nio, hep-ph/0402206 (2004).
- [4] A. Czarnecki, W. J. Marciano and A. Vainshtein, Phys. Rev. D **67** (2003), 073006.
- [5] A. Höcker, hep-ph/0410081 (2004).
- [6] A.-Z. Dubničková, S. Dubnička and P. Stríženec, editors. *Proc. of Int. Conf. "Hadron Structure 2000", Stará Lesná, Slovak Republic, 2.-7.10. 2000*. Comenius Univ., Bratislava, (2001).
- [7] E. M. Aitala et al., Phys. Rev. Lett. **86** (2001), 770.
- [8] T. Komada, M. Ishida and S. Ishida, Phys. Lett. B **508** (2001), 31.
- [9] D. E. Groom et al., *Review of Particle Phys.*, Eur. Phys. J. C **15** (2000), 1.
- [10] I. M. Korobov. *Number Theory Method in Approximate Analysis (in Russian)*. Fizmatgiz, Moscow, (1963).
- [11] M. Hayakawa, T. Kinoshita and A. I. Sanda, Phys. Rev. **D54** (1996), 3137.
- [12] J. Bijnens, E. Pallante and J. Prades, Nucl. Phys. **B474** (1996), 379.
- [13] M. Davier, S. Eidelman, A. Höcker and Z. Zhang, Eur. Phys. J. C **27** (2003), 497.
- [14] M. Hayakawa and T. Kinoshita, Phys. Rev. **D57** (1998), 465.
- [15] M. Knecht and A. Nyffeler, Phys. Rev. **D65** (2002), 073034.
- [16] I. Blokland, A. Czarnecki and K. Melnikov, Phys. Rev. Lett. **88** (2002), 071803.
- [17] E. Bartoš et al., Nucl. Phys. B **632** (2002), 330.
- [18] H. Bethe and L. Maximon, Phys. Rev. **93** (1954), 768.
- [19] H. Davies, H. Bethe and L. Maximon, Phys. Rev. **93** (1954), 788.
- [20] G. Baur, Phys. Rev. A **42** (1990), 5736.
- [21] R. N. Lee, A. I. Milstein and V. G. Serbo, Phys. Rev. A **65** (2002), 022102.
- [22] U. Eichmann, J. Reinhardt and W. Greiner, Phys. Rev. A **61** (2000), 062710.
- [23] B. Segev and J. C. Wells, Phys. Rev. A **57** (1998), 1849.
- [24] A. J. Baltz and L. McLerran, Phys. Rev. C **58** (1998), 1679.

- [25] D. Yu. Ivanov, E. Kuraev, A. Schiller and V. Serbo, Phys. Lett. B **457** (1999), 155.
- [26] S. R. Gevorkyan and E. A. Kuraev, J. Phys. G **29** (2003), 1227.
- [27] E. Bartoš, S. R. Gevorkyan, E. A. Kuraev and N. N. Nikolaev, Phys. Rev. A **66** (2002), 042720.
- [28] V. V. Sudakov, Sov. Phys. JETP **3** (1956), 65.
- [29] E. Bartoš, S. R. Gevorkyan, E. A. Kuraev and N. N. Nikolaev, J. Exp. Theor. Phys. **100** (2005), no. 4, 645.
- [30] E. Bartoš, S. R. Gevorkyan and E. A. Kuraev, Phys. of Atom. Nucl. **67** (2004), no. 10, 1923.
- [31] A. N. Sissakian, A. V. Tarasov, H. T. Torosyan and O. O. Voskresenskaya. nucl-th/0408030, (2004).
- [32] U. Eichmann, J. Reinhardt, S. Schramm and W. Greiner, Phys. Rev. A **59** (1999), 1223.
- [33] R. W. Assmann et al. *A 3 TeV e^+e^- linear collider based on CLIC technology*. Technical Report CERN-2000-008, CERN, (2000).
- [34] B. Badelek et al. *TESLA Technical Design Report*. Part VI, chapter. 1 ed. V. Telnov DESY 2001-011, 2001-209, TESLA Report 2001-23, DESY, Hamburg, (2001).
- [35] By American Linear Collider Working Group (T. Abe et al.). *Linear collider physics resource book for Snowmass 2001*. Technical Report SLAC-R-570, (2001).
- [36] ACFA Linear Collider Working group (K. Abe et al.). Technical Report KEK-REPORT-2001-11, hep-ph/0109166, (2001).
- [37] I. F. Ginzburg, G. L. Kotkin, V. G. Serbo and V. I. Telnov, JETP Lett. **34** (1981), 491.
- [38] I. F. Ginzburg, G. L. Kotkin, S. L. Panfil and V. G. Serbo, Yad. Fiz. **38** (1983), 1021.
- [39] U. Fano, Phys. Rev. **93** (1954), 121; J. M. Jauch and F. Rohrlich. *The Theory of Photons and Electrons*. Springer-Verlag, 2nd edition, (1980).
- [40] E. A. Kuraev, A. Schiller and V. G. Serbo, Nucl. Phys. B **256** (1985), 189.
- [41] E. A. Kuraev, A. Schiller, V. G. Serbo and D. V. Serebryakova, Eur. Phys. J. C **4** (1998), 631.
- [42] V. N. Baier, E. A. Kuraev, V. S. Fadin and V. A. Khoze, Phys. Rept. **78** (1981), 293.

- [43] K. Gottfried, Phys. Rev. Lett. **18** (1967), 1174.
- [44] E. Bartoš, S. R. Gevorkyan, E. A. Kuraev and N. N. Nikolaev, Phys. Lett. B **538** (2002), 45.
- [45] A. Ahmedov et al., J. Phys. G **29** (2003), 1.
- [46] E. Bartoš, A. Z. Dubničková, M. V. Galynskii and E. A. Kuraev, Nucl. Phys. B **676** (2004), 481.
- [47] E. Bartoš, M. V. Galynskii, S. R. Gevorkyan and E. A. Kuraev, Nucl. Phys. B **676** (2004), 390.
- [48] S. Bakmaev et al. hep-ph/0403111, submitted in Nucl. Phys. B, (2004).
- [49] E. Bartoš, S. Dubnička and E. A. Kuraev, Phys. Rev. D **70** (2004), 117901.

5 Zoznam publikácií a citácií

5.1 Práce, ktoré tvoria súčasť dizertačnej práce

- E. Bartoš, A.-Z. Dubničková, S. Dubnička, E. A. Kuraev and E. Zemlyanaya, “Scalar and pseudoscalar meson pole terms in the hadronic light-by-light contributions to a_μ^{had} ”, Nucl. Phys. B **632** (2002) 330-342.
 - B. A. Li, “ $e^+ e^- \rightarrow \pi^0 \gamma$ and form factor of $\pi^0 \gamma^* \gamma^*$,” arXiv: hep-ph/0404248.
 - V. N. Rodionov, “Effects of vacuum polarization in strong magnetic fields with an allowance made for the anomalous magnetic moments of particles,” arXiv: hep-th/0403282.
 - K. Melnikov and A. Vainshtein, “Hadronic light-by-light scattering contribution to the muon anomalous magnetic moment revisited,” Phys. Rev. D **70** (2004) 113006.
 - V. V. Ezhela, S. B. Lugovsky and O. V. Zenin, “Hadronic part of the muon $g-2$ estimated on the $\sigma_{\text{total}}(e^+ e^- \rightarrow \text{hadrons})$ evaluated data compilation,” arXiv: hep-ph/0312114.
 - B. A. Li, “Form factor of $\pi^0 \gamma^* \gamma^*$ and contribution to muon $g-2$,” arXiv: hep-ph/0311027.
 - Z. Bern, “Recent progress in perturbative quantum field theory,” Nucl. Phys. Proc. Suppl. **117** (2003) 260.
 - M. K. Volkov, A. E. Radzhabov and V. L. Yudichev, “Process $\gamma^* \gamma \rightarrow \sigma$ at large virtuality of γ^* ,” Phys. Atom. Nucl. **66** (2003) 2143 [Yad. Fiz. **66** (2003) 2193].
 - M. Krawczyk, “Precision muon $g-2$ results and light Higgs bosons in the 2HDM(II),” Acta Phys. Polon. B **33** (2002) 2621.
 - A. E. Nelson, N. Rius, V. Sanz and M. Unsal, “The minimal supersymmetric model without a mu term,” JHEP **0208** (2002) 039.
 - M. Knecht, S. Peris, M. Perrottet and E. De Rafael, “Electroweak hadronic contributions to $g-2$,” JHEP **0211** (2002) 003.
 - R. N. Faustov and A. P. Martynenko, “Pseudoscalar pole terms contributions to hadronic light-by-light corrections to the muonium hyperfine splitting,” Phys. Lett. B **541** (2002) 135.
 - A. Nyffeler, “Hadronic light-by-light scattering contribution to the muon $g-2$ in large- N_c QCD,” arXiv: hep-ph/0203243.
 - S. Davidson, S. Forte, P. Gambino, N. Rius and A. Strumia, “Old and new physics interpretations of the NuTeV anomaly,” JHEP **0202** 037 (2002) 037.
 - J. Bijnens, E. Pallante and J. Prades, “Comment on the pion pole part of the light-by-light contribution to the muon $g-2$,” Nucl. Phys. B **626** (2002) 410.

- M. Hayakawa and T. Kinoshita, “Comment on the sign of the pseudoscalar pole contribution to the muon $g-2$,” arXiv: hep-ph/0112102.
- M. Knecht, A. Nyffeler, M. Perrottet and E. De Rafael, “Hadronic light-by-light scattering contribution to the muon $g-2$: An effective field theory approach,” Phys. Rev. Lett. **88** (2002) 071802.
- R. Adhikari and G. Rajasekaran, “Anomalous magnetic moment of muon and L-violating supersymmetric models,” arXiv: hep-ph/0107279.
- **E. Bartoš**, A. Z. Dubničková, M. V. Galynskii and E. A. Kuraev, “*Calibration processes for photon photon colliders*”, Nucl. Phys. B **676** (2004) 481.
- **E. Bartoš**, M. V. Galynskii, S. R. Gevorkyan and E. A. Kuraev, “*The lowest order inelastic QED processes at polarized photon electron high energy collisions*”, Nucl. Phys. B **676** (2004) 390.
- S. Bakmaev, **E. Bartoš**, V. V. Bytev, M. V. Galynskii and E. A. Kuraev, “*QED processes in peripheral kinematics at polarized photon photon and photon electron colliders*”, (submitted in Nucl. Phys. B), hep-ph/0403111,.
- A. Ahmedov, E. N. Antonov, **E. Bartoš**, E. A. Kuraev and E. Zemlyanaya, “*Single-spin asymmetry in pion production in polarized proton-proton collisions and odderon*”, J. Phys. G **29** (2003) 521–529.
 - C. Ewerz, “The odderon in quantum chromodynamics,” arXiv: hep-ph/0306137.
- **E. Bartoš**, S. Gevorkyan, E. A. Kuraev and N. N. Nikolaev, “*Multiple lepton pair production in relativistic ion collisions*”, Phys. Lett. B **538** (2002) 45–51.
 - A. N. Sissakian, A. V. Tarasov, H. T. Torosyan and O. O. Voskresenskaya, “ $e^+ e^-$ pair production in relativistic ions collision and its correspondence to electron ion scattering,” arXiv: hep-ph/0412217.
 - A. N. Sissakian, A. V. Tarasov, H. T. Torosyan and O. O. Voskresenskaya, “The $e^+ e^-$ pair production in relativistic ions collision and its correspondence to electron scattering,” arXiv: nucl-th/0408030.
 - G. Baur, K. Hencken, A. Aste, D. Trautmann and S. R. Klein, “Multiphoton exchange processes in ultraperipheral relativistic heavy ion collisions,” Nucl. Phys. A **729** (2003) 787.
- **E. Bartoš**, S. Gevorkyan, E. A. Kuraev and N. N. Nikolaev, “*Lepton pair production in heavy-ion collisions in perturbation theory*”, Phys. Rev. A **66** (2002) 042720.
 - A. N. Sissakian, A. V. Tarasov, H. T. Torosyan and O. O. Voskresenskaya, “ $e^+ e^-$ pair production in relativistic ions collision and its correspondence to electron ion scattering,” arXiv: hep-ph/0412217.

- A. N. Sissakian, A. V. Tarasov, H. T. Torosyan and O. O. Voskresenskaya, “The $e^+ e^-$ pair production in relativistic ions collision and its correspondence to electron scattering,” arXiv: nucl-th/0408030.
- **E. Bartoš**, S. Gevorkyan and E. A. Kuraev, “*Lepton pair production in relativistic ion collisions and its correspondence to the crossing process*”, Phys. of Atom. Nucl. **67**, No. 10 (2004) 1923–1927 [Yad. Fiz. **67**, No. 10 (2004) 1945–1949].
- **E. Bartoš**, S. Gevorkyan, E. A. Kuraev and N. N. Nikolaev, “*Multiple exchanges in lepton pair production in high-energy heavy ion collisions*”, J. Exp. Theor. Phys. **100**, No. 4 (2005) 645–655 [Zh. Eksp. Teor. Fiz. **100**, No. 4 (2005) 732–743].
- **E. Bartoš**, S. Dubnička and E. A. Kuraev, “*Sum rule for a difference of proton and neutron total photoproduction cross sections*”, Phys. Rev. D **70** (2004) 117901.

5.2 Ostatné práce

- **E. Bartoš**, V. Bytev, E. A. Kuraev, “*P violating effects in low-energy compton scattering*”, hep-ph/0011037.
- A. B. Arbuzov, **E. Bartoš**, V. V. Bytev, E. A. Kuraev and Z. K. Silagadze, “*Radiative muon (pion) pair production in high energy electron-positron annihilation (the case of small invariant pair mass)*”, hep-ph/0308292.
 - F. Jegerlehner, “The role of $\sigma(e^+e^- \rightarrow \text{hadrons})$ in precision tests of the standard model,” Nucl. Phys. Proc. Suppl. **131** (2004) 213.
- **E. Bartoš**, E. A. Kuraev and I. O. Cherednikov, “*Double-logarithmic behavior of inelastic form factors in QED and QCD*”, Phys. Lett. B **593** (2004) 115–123.
- S. Dubnička, **E. Bartoš** and E. Kuraev, “*New sum rules for nucleon and trinucleon total photoproduction cross-sections*”, Nucl. Phys. Proc. Suppl. **126** (2004) 100.

5.3 Príspevky na konferenciách

- **E. Bartoš**, **S. Dubnička**, A. Z. Dubničková, E. A. Kuraev, E. Zemlyanaya, “*Is there any room for new physics in the muon $g-2$ problem?*”, International Conference on High Energy Interactions: Theory and Experiment (Hadron Structure '02), 22–27 Sept. 2002, Herľany, Slovakia. Published in Herľany 2002, Hadron Structure 31–38.
 - V. N. Rodionov, “Effects of vacuum polarization in strong magnetic fields with an allowance made for the anomalous magnetic moments of particles,” arXiv: hep-th/0403282.

- M. Endo and Y. Sakamura, “CP violation in models with TeV-scale SUSY breaking,” *Phys. Lett. B* **580** (2004) 79.
- **E. Bartoš**, S. R. Gevorkyan, E. A. Kuraev and N. N. Nikolaev, “*Multiple lepton pair production in relativistic ion collisions*”, International Conference on High Energy Interactions: Theory and Experiment (Hadron Structure '02), 22–27 Sept. 2002, Herľany, Slovakia. Published in Herľany 2002, Hadron Structure 258–265.
- E. Antonov, **E. Bartoš**, E. A. Kuraev, “*Single-spin asymmetry in pion production in pp collisions and odderon*”, IX. Workshop on High Energy Spin Physics SPIN–01, August 2–7 2002, Dubna, Russia
- **E. Bartoš**, S. Dubnička, E. A. Kuraev, “*Relation between the nucleus elastic form factors and the inelastic electron–nuclei scattering cross sections*”, Miniworkshop Modern Methods in Relativistic Nuclear Physics, August 19–20 2003, JINR Dubna, Russia
- **E. Bartoš**, S. Gevorkyan, E. A. Kuraev and N. N. Nikolaev, “*Multiphoton exchanges in pair production processes in heavy ion collisions*”, International Conference on High Energy Interactions: Theory and Experiment (Hadron Structure '04), 29 Aug. – 04 Sept. 2004, Smolenice, Slovakia. Published in *Acta Physica Slovaca* Vol. 55, No. 1 (2005) 1–5.

Summary

The Dissertation is devoted to the processes on high energy colliders, namely, to the measurement and evaluation of muon anomalous magnetic moment, the lepton pair production in peripheral collisions of relativistic heavy ions, $\gamma\gamma$ and γ -lepton collisions in helicity representation and finally to the derivation of new sum rule for photoproduction processes.

The anomalous magnetic moment of the electron and muon, a_e and a_μ , played an important role in the development of particle physics. Until now they have continued to serve as basic quantities for testing the validity of the Quantum Electrodynamics (QED) and Standard Model, put the strict constraints for the theories beyond the Standard Model and provided important insights into the structure of the fundamental interactions.

While the value of anomalous magnetic moment of electron is known very well, in the case of a muon the situation is more complicated. The discrepancy between the theoretical and experimental value varies from 1.02 to 2.96 standard deviation σ . The reason is that the theoretical value consists (unlike the case of electron) from various types of contributions. While QED and weak interaction contributions to a_μ seem to be estimated quite reliably, there is critical situation in hadronic contributions, mainly for light-by-light meson pole terms, therefore the third-order (in fine structure constant α) hadronic light-by-light contributions to a_μ from the pole terms of the scalar σ , a_0 and pseudoscalar π^0 , η , η' mesons in the framework of the linearized extended Nambu–Jona–Lasinio model has been recalculated.

As the QED and Quantum Chromodynamics (QCD) share many properties, the solving of the issue of the lepton pair production in peripheral collisions of heavy ions can help to understand very important and unsolved problem of accounting the final state interaction of quarks and gluons in QCD. Unfortunately, even QED is not solving this problem satisfactorily despite the recent high activity in this problems. So, we set ourselves the task to calculate correctly the lepton pair interaction with heavy ion electromagnetic field, i. e., to write down the amplitudes for the first terms of the perturbation series in QED, investigating their energy dependence in limiting cases and to estimate their contribution to the cross section.

To calculate the amplitudes of the lepton pair production in the Coulomb fields of two relativistic heavy ions we used the powerful Sudakov technique, which simplifies the calculations in momentum space for the processes at high energies. Also the kinematics of considered process is defined, as well the implementation of gauge invariance conditions is carried out.

The amplitudes for Coulomb corrections in C-odd and C-even state, and the contributions to the cross sections from their interference with the Born term in leading logarithmic approximation are given. The 4-photon mechanism is described together with the presentation of the corresponding amplitude with its wide angle limit. The generalization of a construction for matrix element of multiphoton exchange is manifested.

The controversial situation in the subject of multilepton pair production leads us to revisit the multiple pair production. The interesting problem of the correct application of crossing symmetry property was pointed out.

The process of single-spin asymmetry in pion production is given as an example

of application of methods developed in the framework of QED to the problems of hadron production in QCD.

The construction the helicity amplitudes of basic processes (single pair creation, photo-production on the electron and double Compton scattering) is explained in detail. Such QED processes have large cross sections compared with ones of electro-weak as well as hadronic nature. They have an important role in estimating of the background and calibration purposes, e. g., for accurate measurement of a luminosity for unpolarized as well as for polarized beams.

We investigated the QED processes in peripheral kinematics. The accuracy of the gained results for the chiral amplitudes and cross sections is rather high, though it is determined by systematically omitted terms of “nonleading” contributions. The leading order terms $(\frac{\alpha}{\pi}L)^n$ are taken into account when the calculations of radiative corrections in the framework of the renormalization group are performed.

We have found the new sum rule, which reflects the fact of non fulfilment of the Gottfried sum rule. Our approach has been based on the investigation of analytic properties of corresponding amplitudes and the results from scattering processes. We have derived the sum rule which relates Dirac proton mean square radius and anomalous magnetic moments of proton and neutron to the integral over a difference of the total proton and neutron photoproduction cross sections.