

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

Mgr. Cyril Adamuščín

Autoreferát dizertačnej práce

**Štruktúra deuterónu z pohľadu nových JLab
protónových polarizačných údajov a unitárneho a
analytického prístupu**

na získanie vedecko–akademickej hodnosti
philosophiae doctor
v odbore doktorandského štúdia
11-24-9 jadrová a subjadrová fyzika

Bratislava 2007

Dizertačná práca bola vypracovaná v dennej forme doktorandského štúdia na Oddelení teoretickej fyziky Fyzikálneho ústavu Slovenskej akadémie vied, Bratislava.

Predkladateľ: Mgr. Cyril Adamuščín
Fyzikálny ústav SAV
Dúbravská cesta 9
845 11 Bratislava

Školiteľ: RNDr. Stanislav Dubnička, DrSc.
Fyzikálny ústav SAV
Dúbravská cesta 9
845 11 Bratislava

Oponenti: prom. fyz. Jiří Adam, CSc.
Ústav jaderné fyziky AVČR
250 68 Řež u Prahy

Doc. RNDr. Michal Hnatič, DrSc.
Ústav experimentálnej fyziky SAV
Watsonova 47
042 53 Košice

Doc. RNDr. Fedor Šimkovic, CSc.
Katedra jadrovej fyziky a biofyziky
FMFI UK
Mlynská dolina F2
842 48 Bratislava

Autoreferát bol rozoslaný dňa 2007

Obhajoba dizertačnej práce sa uskutoční dňa 2007 o hod. na Fyzikálnom ústave SAV, Dúbravská cesta 9, 845 11 Bratislava, v miestnosti, pred komisiou pre obhajobu dizertačnej práce doktorandského štúdia vymenovanou dňa 2007 predsedom spoločnej odborovej komisie vo vednom odbore 11–24–9 Jadrová a subjadrová fyzika

Predseda spoločnej odborovej komisie:
prof. RNDr. Jozef Masarik, DrSc.
Katedra jadrovej fyziky a biofyziky
FMFI UK
Mlynská dolina F2
842 48 Bratislava

Obsah

Úvod	2
1 Ciele dizertačnej práce	3
2 Teória a metódy	3
2.1 Elektroslabá štruktúra hadrónov	3
2.2 Použité modely elektroslabých formfaktorov	5
3 Dosiiahnuté výsledky dizertačnej práce	7
3.1 Nerelativistická impulzná aproximácia a riešenie záhady správania sa elektrického protónového formfaktora	7
3.2 Dvojkomponentný model deuterónu a axiálneho formfaktora nukleónu	8
3.3 Unitárny a analytický model deuterónu	11
3.4 Návrh experimentu na meranie nukleónových formfaktorov v nefyzikálnej oblasti	11
3.5 Meranie polarizačných pozorovateľných veličín deuterónu	12
4 Literatúra	14
5 Zoznam publikácií a citácií	15
5.1 Práce, ktoré tvoria súčasť dizertačnej práce	15
5.2 Ostatné práce	15
5.3 Príspevky na konferenciách	16
Summary	17

Úvod

Ľubovoľné atómové jadro, vrátane deuterónu, je zložené z protónov a neutrónov. Je teda očividné, že tieto jadrá by mali mať nejakú vnútornú elektromagnetickú štruktúru. V päťdesiatych rokoch minulého storočia bola nebodová vnútorná štruktúra objavená Hofstadterom [1] aj v protóne a v neutróne. Takúto elektromagnetickú štruktúru ľubovoľného hadrónu je možné parametrizovať ako sumu násobkov lineárne nezávislých vektorových kovariantov (vytvorených zo štvorhybností a spinových parametrov skúmanej častice) so skalárnymi funkciami jednej premennej – kvadrátu prenesenej hybnosti virtuálnym fotónom. Tieto skalárne funkcie nazývame elektromagnetické formfaktory odpovedajúceho hadrónu.

Dnes vieme, že dôvodom nebodovej štruktúry hadrónov je ich zloženie z kvarkov. Avšak vzhľadom nato, že teória popisujúca interakcie kvarkov a gluónov, kvantová chromodynamika, je schopná predpovedať iba asymptotické správanie elektromagnetických formfaktorov, potrebujeme štruktúru hadrónov popísať fenomenologicky.

Predkladaná dizertačná práca sa zaoberá práve konštrukciou fenomenologických modelov elektromagnetickej štruktúry nukleónov ako aj deuterónu, ktoré vychádzajú z najznámejšieho fenomenologického modelu – modelu vektorovej dominantnosti. Vytvorené modely sú použité na riešenie problému nezrovnalosti polarizačných experimentálnych údajov z Jeffersonovho Laboratória o elektrickom protónovom formfaktore s experimentálnymi údajmi o tomto formfaktore získanými Rosenbluthovou technikou za posledných päťdesiat rokov, ktorý je veľkým problémom súčasnej hadrónovej fyziky.

Zároveň sa táto dizertačná práca venuje problematike merania elektromagnetických formfaktorov v nefyzikálnej oblasti a metódou polarizačných pozorovateľných veličín, ktorá je v tejto práci podrobne popísaná.

Materiál, ktorý je obsahom predkladanej dizertačnej práce, je opublikovaný v štyroch renomovaných medzinárodných vedeckých časopisoch. Jedna práca je prijatá do časopisu a päť prác je pripravených do tlače.

Získané výsledky boli prezentované na seminároch v Európskom centre pre teoretický výskum jadrovej fyziky – ECT* v Trente v Taliansku a v Centre jadrového výskumu – CEA v Saclay vo Francúzsku. Okrem toho boli prezentované aj na medzinárodných konferenciách Nucleon'05 vo Frascati, Workshop on Lepton Scattering and the Structure of Hadrons and Nuclei 2004 v Erice, Hadron Structure'02 v Herľanoch a Hadron Structure'04 v Smoleniciach.

1 Ciele dizertačnej práce

Pri stanovení cieľov dizertačnej práce sme vychádzali zo súčasného stavu riešenej problematiky. Napriek vyše päťdesiatročnému výskumu elektromagnetickej štruktúry hadrónov, stále neexistuje univerzálny prístup popisujúci túto štruktúru v celej kinematickej oblasti. Navyše nedávne polarizačné merania potvrdzujú, že dlhoročne používaná Rosenbluthova technika merania elektromagnetických formfaktorov nie je dostatočne presná a je potrebné využiť polarizačné metódy merania elektromagnetických formfaktorov pre zrážky rôznych druhov častíc.

Ciele dizertačnej práce je možné zhrnúť do nasledujúcich bodov:

- Vypracovať univerzálny unitárny a analytický prístup k elektromagnetickej štruktúre hadrónov so správnou asymptotikou.
- Použiť unitárny a analytický prístup na popis elektromagnetických formfaktorov nukleónov a deuterónu a vyhodnotenie dôsledkov nového správania elektrického protónového formfaktora na rozloženie náboja v protóne
- Využiť unitárny a analytický model nukleónov v nerelativistickej impulznej aproximácii deuterónu na vyriešenie nezrovnalosti medzi experimentálnymi údajmi získanými v polarizačných experimentoch a Rosenbluthovou technikou
- Vypracovať dvojkomponentné modely elektromagnetických formfaktorov deuterónu a axiálneho formfaktora nukleónu
- Navrhnuť metódu merania elektromagnetických formfaktorov nukleónov v nefyzikálnej kinematickej oblasti ako aj axiálneho formfaktora nukleónu v časupodobnej oblasti v procese anihilácie nukleónu na nukleóne s následnou produkciou leptón-antileptónového páru, piónu a nukleónu
- Odvodiť závislosť polarizačných pozorovateľných veličín deuterónu v časupodobnej oblasti od elektromagnetických formfaktorov deuterónu a odhadnúť ich uhlovú závislosť ako aj totálny účinný prierez skúmanej anihilácie elektrónu s pozitronom na deuterón-antideuterónový pár

2 Teória a metódy

2.1 Elektroslabá štruktúra hadrónov

Nebodovú elektromagnetickú štruktúru hadrónov je možné popísať pomocou elektromagnetických formfaktorov, ktoré parametrizujú maticový element elektromagnetického prúdu ako

$$\langle h, p | J_\mu^{EM} | h, p' \rangle = \sum_i R_\mu^i F_i(t), \quad (1)$$

kde R_μ^i sú všetky lineárne nezávislé relativistické kovektory, skonštruované zo štvorhybností a spinových parametrov hadrónu h a skalárne funkcie $F_i(t)$ sú elektromagnetické formfaktory uvažovaného hadrónu.

Počet formfaktorov n potrebných na parametrizáciu skúmaného hadrónu je závislý od jeho spinu s ako

$$n = 2s + 1$$

a teda elektromagnetickú štruktúru nukleónu ($s = 1/2$) parametrizujeme dvomi formfaktormi

$$\langle N, p' | J_\mu^{EM} | N, p \rangle = \frac{1}{2\pi^3} \bar{u}(p') \left[\gamma_\mu F_1(t) + \frac{1}{2m_h} \sigma_{\mu\nu} (p' - p)^\nu F_2(t) \right] u(p), \quad (2)$$

kde $F_1(t)$ a $F_2(t)$ sú Diracov a Pauliho formfaktor, ktoré je možné extrahovať z merania diferenciálneho účinného prierezu rozptylu elektrónu na protóne alebo anihilácie elektrónu s pozitronom na protón a antiprotón, za predpokladu jednofotónovej aproximácie, pomocou Rosenbluthovej techniky

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{\alpha^2 E' \cos^2(\theta/2)}{4E^3 \sin^4(\theta/2)} [A(t) + B(t) \tan^2(\theta/2)], \quad (3)$$

ktorá umožňuje separáciu dvoch štruktúrnych funkcií z merania diferenciálneho účinného prierezu, čo teoreticky postačuje na extrakciu dvoch formfaktorov. Avšak presnejšie polarizačné experimenty naznačujú, že táto metóda nie je dostatočne presná pre vyššie hodnoty kvadrátu prenesenej hybnosti.

Podobne je možné popísať elektromagnetickú štruktúru deuterónu, časticu so spinom rovným 1, pomocou troch formfaktorov

$$\begin{aligned} - \langle D, p | J_\mu^{EM} | D, p' \rangle = & \quad (4) \\ = G_1(t) (\xi'^* \cdot \xi) d_\mu + G_2(t) [\xi_\mu (\xi'^* \cdot q) - \xi_\mu^* (\xi \cdot q)] - G_3(t) \frac{(\xi \cdot q)(\xi'^* \cdot q)}{2m_D^2} d_\mu. \end{aligned}$$

Tu však Rosenbluthova technika nepostačuje na extrakciu všetkých troch formfaktorov deuterónu a preto je nutné použiť aj polarizačné pozorovateľné veličiny deuterónu. Tie je možné merať napr. v rozptylových procesoch $e^- d \rightarrow e^- \vec{d}$ s polarizovaným vstupujúcim elektrónom, v ktorých sa meria účinný prierez a polarizácia vychádzajúceho deuterónu.

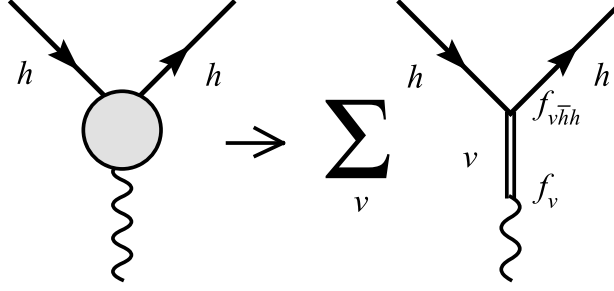
$$\begin{aligned} \frac{d\sigma}{d\Omega d\Omega_2} = \frac{d\sigma}{d\Omega d\Omega_2} \Big|_0 & \left[1 + \frac{3}{2} h p_x A_y \sin \phi_2 + \frac{1}{\sqrt{2}} t_{20} A_{zz} \right. \\ & \left. - \frac{2}{\sqrt{3}} t_{21} A_{xz} \cos \phi_2 + \frac{1}{\sqrt{3}} t_{22} (A_{xx} - A_{yy}) \cos 2\phi_2 \right], \quad (5) \end{aligned}$$

V súčasnosti je najpresnejšie meranie komponenty t_{20} polarizačného tenzora vychádzajúceho deuterónu, ktorá spolu so štruktúrnymi funkciami $A(t)$ a $B(t)$ umožňuje extrakciu troch formfaktorov v priestoru-podobnej oblasti.

V času-podobnej oblasti, čo je kinematická oblasť anihilačného procesu, sú však elektromagnetické formfaktory komplexnými funkciami a na získanie ich kompletnej experimentálnej informácie je potrebné merať väčšie množstvo polarizačných pozorovateľných veličín a to v prípade deuterónu aj nukleónov.

Analogicky ako elektromagnetický hadrónový prúd (2) je možné parametrizovať aj axiálny prúd, ktorý je zložkou neutrálneho prúdu, spôsobeného výmenou virtuálneho Z-bozónu, pomocou dvoch formfaktorov definovaných vzťahom

$$\langle h, p' | J_\mu^{NC,A} | h, p \rangle = \bar{u}(p') \left[\gamma_\mu G_A(t) + \frac{1}{2m_h} (p' - p)_\nu G_P(t) \right] \gamma_5 u(p), \quad (6)$$



Obr. 1: Interakciu fotónu s hadrónom možno aproximovať ako sumu všetkých procesov, kde fotón prechádza na vektorový mezón, ktorý následne interaguje s hadrónom.

2.2 Použité modely elektroslabých formfaktorov

Východiskom pre modely konštruované v tejto práci je známy model dominantnosti vektorových mezónov (VMD), ktorý bol vytvorený s cieľom popísať netriviálne rezonančné správanie formfaktorov v času-podobnej oblasti. Tento model predpokladá, že hadróny neinteragujú priamo s virtuálnym fotónom, ale že ten s istou pravdepodobnosťou prechádza na jeden z vektorových mezónov, ktorý následne interaguje s hadrónom, ako je to zobrazené na obr.1. Formfaktor možno v modeli VMD parametrizovať ako

$$F(t) = \sum_v^n \frac{f_{v\bar{h}h}}{f_v} \frac{m_v^2}{m_v^2 - t}, \quad (7)$$

kde $f_{v\bar{h}h}$, f_v sú vektor-mezónovo hadrónové a univerzálne vektor-mezónové väzbové konštanty a m_v sú hmotnosti vektorových mezónov.

Takýto model má mnoho nedostatkov, ktoré zvyčajne riešia modely z neho odvodené. Jedným z týchto nedostatkov, ktorý je možné vyriešiť priamo vo VMD modeli, je otázka asymptotiky skúmaného formfaktora. Vo všeobecnosti je asymptotika parametrizácie (7) t^{-1} . Tento priebeh však nemusí súhlasiť s predpoveďou QCD, kde asymptotika formfaktora hadrónu s n_q konštituentnými kvarkami je t^{1-n_q} . Ako je transparentne ukázané v štvrtej kapitole predkladanej práce [2], problém je možné vyriešiť vhodnou voľbou pomerov väzbových konštant $a_v = f_{v\bar{h}h}/f_v$ daných ako riešenia sústavy rovníc

$$\begin{aligned} \sum_{v=1}^n a_v &= F_0 \\ \sum_{v=1}^n m_v^2 a_v &= 0 \\ \sum_{v=1}^n m_v^4 a_v &= 0 \\ &\dots \\ \sum_{v=1}^n m_v^{2(m-1)} a_v &= 0, \end{aligned} \quad (8)$$

ktoré po spätnom dosadení do parametrizácie (7) dávajú modifikovaný VMD model

so správnou asymptotikou

$$F_h(t) = F_0 \frac{\prod_{v=1}^m m_v^2}{\prod_{v=1}^m (m_v^2 - t)} - \sum_{k=m+1}^n \frac{\prod_{v=1}^m m_v^2}{\prod_{v=1}^m (m_v^2 - t)} a_k + \sum_{k=m+1}^n \left[\sum_{i=1}^m \frac{m_k^2}{m_k^2 - t} \frac{\prod_{v=1, v \neq i}^m m_v^2}{\prod_{v=1, v \neq i}^m (m_v^2 - t)} \frac{\prod_{v=1, v \neq i}^m (m_v^2 - m_k^2)}{\prod_{v=1, v \neq i}^m (m_v^2 - m_i^2)} \right] a_k. \quad (9)$$

Vzhľadom na ostatné nedostatky VMD modelu, na popis experimentálnych údajov boli v predkladanej dizertačnej práci použité iné fenomenologické modely vychádzajúce z VMD modelu. A to unitárny a analytický model a dvojkomponentný model:

- Unitárny a analytický model, vychádzajúc z VMD modelu, aplikuje nelineárnu transformáciu

$$t = t_0 - \frac{4(t_{in} - t_0)}{[1/W(t) - W(t)]^2}, \quad (10)$$

a zavádza nenulové šírky vektorových mezónov substitúciou

$$m_v^2 \rightarrow (m_v - i\Gamma_v/2)^2, \quad (11)$$

čo po zodpovedajúcich úpravách vedie na parametrizáciu formfaktora

$$F_h(t) = \left(\frac{1 - W(t)^2}{1 - W_N^2} \right)^{2m} \left[\left(F_0 - \sum_{k=m+1}^n a_k \right) \prod_{v=1}^m LH(W_v) + \sum_{k=m+1}^n LH(W_k) \left[\sum_{i=1}^m \prod_{v=1, v \neq i}^m \left\{ LH(W_v) \frac{C(W_v) - C(W_k)}{C(W_v) - C(W_i)} \right\} \right] a_k \right], \quad (12)$$

kde W_k sú hodnoty premennej $W(t)$ pre $t = (m_k - i\Gamma_k/2)^2$ a $LH(W)$ a $C(W)$ sú špecifické funkcie premennej W . Takýto model spĺňa všetky známe vlastnosti elektromagnetických formfaktorov a bez akejkoľvek modifikácie je schopný popísať ich správanie v priestoropodobnej aj v časopodobnej oblasti.

- Dvojkomponentný model vychádza z Iachello, Jackson, Landé modelu nukleónu [3] a opisuje hadrón ako objekt zložený z tvrdého jadra a oblaku mezónov. Formfaktory parametrizuje ako súčin

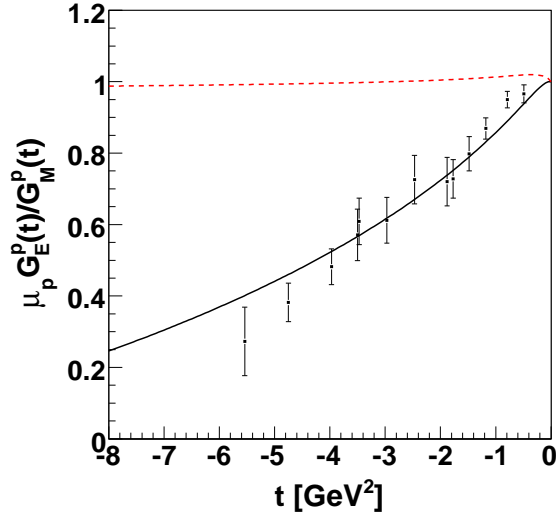
$$F_h(t) = g(t) \cdot M(t), \quad (13)$$

kde $g(t)$ zodpovedá tvrdému jadrú a možno ho zapísať v tvare

$$g(t) = \frac{1}{(1 - \gamma t)^\delta}, \quad (14)$$

ktorý má v prípade nukleónu dipólové správanie ($\delta = 2$) a v prípade deuterónu približne monopólové správanie ($\delta \simeq 1$). Druhý člen (13) $M(t)$ zodpovedá mezónovému oblaku a má formu inšpirovanú VMD modelom

$$M(t) = 1 - \sum_{i=1}^n \alpha_i + \sum_{i=1}^n \alpha_i \frac{m_v^2}{m_v^2 - t}, \quad (15)$$



Obr. 2: Predpovedané správanie $\mu_p G_E^p(t)/G_M^p(t)$ unitárnym a analytickým modelom nukleónu (plná čiara – fit JLab údajov, čiarkovaná čiara – fit údajov získaných Rosenbluthovou technikou) a údaje z Jefferson laboratory získané v polarizačných meraniach [4, 5, 6].

kde prvé dva členy zodpovedajú interakcii virtuálneho fotónu priamo s tvrdým jadrom a tretí člen zodpovedá interakcii cez vektorový mezón.

Tento model dokáže s malým množstvom voľných parametrov dobre popísať správanie formfaktorov niektorých hadrónov (nukleón, deuterón) v priestoru-podobnej oblasti a s istou modifikáciou aj v času-podobnej oblasti.

3 Dosiahnuté výsledky dizertačnej práce

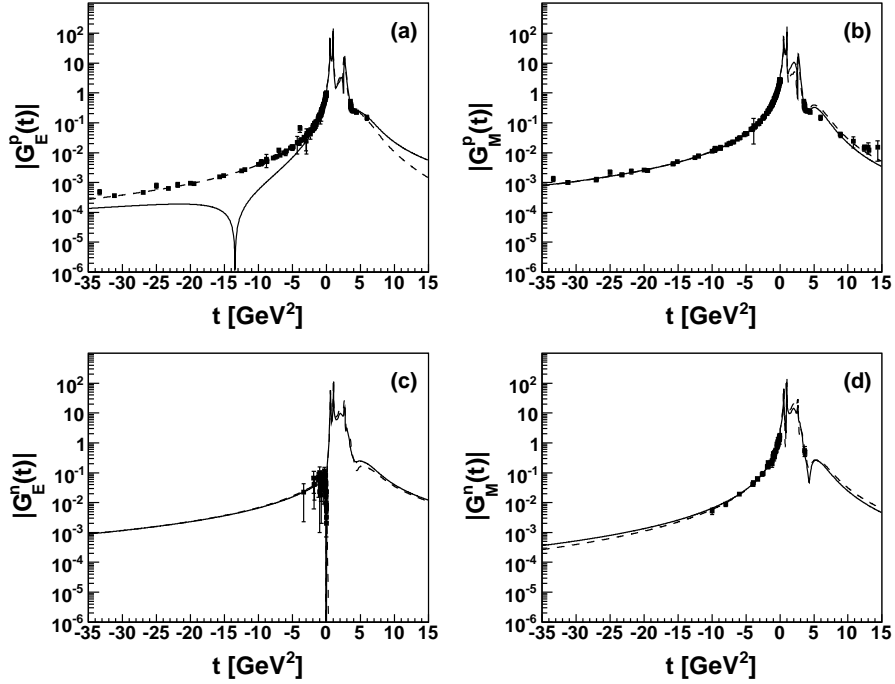
3.1 Nerelativistická impulzná aproximácia a riešenie záhady správania sa elektrického protónového formfaktora

V súčasnosti existujú dve sady údajov o pomere elektrického a magnetického formfaktora protónu $\mu_p G_E^p(t)/G_M^p(t)$ v priestoru-podobnej oblasti:

- údaje získané rosenbluthovou technikou v rozptylových experimentoch s nepolarizovanými časticami
- údaje získané v experimentoch s polarizovanými časticami v Jefferson Laboratory

Ako je vidieť z obr.2 tieto údaje sú vo vzájomnom protiklade a nie je zjavné, ktoré z nich sú správne. V predkladanej práci sme zvolili prístup na vyriešenie tejto hádanky pomocou nezávislých experimentálnych údajov o štruktúrnych funkciách deuterónu, ktoré je možné vyjadriť cez elektromagnetické formfaktory nukleónov pomocou nerelativistickej impulznej aproximácie [7].

V prvom kroku sme nezávisle popísali jednotlivé sady protikladných údajov spolu s ostatnými údajmi o nukleónových formfaktoroch pomocou unitárneho a analytického modelu nukleónu [8, 9], ktoré sú zobrazené na obr.3.



Obr. 3: Simultánny popis všetkých existujúcich údajov o nukleónových formfaktoroch. Čiarkovaná čiara reprezentuje popis, kde na extrakciu údajov o $G_E^p(t)$ v priestoru-podobnej oblasti bola použitá Rosenbluth technika a plná čiara reprezentuje popis, kde boli použité JLab polarizačné údaje o $\mu_p G_E^p(t)/G_M^p(t)$ v priestoru-podobnej oblasti.

V druhom kroku sme tieto 2 rôzne správanie nukleónových formfaktorov, líšiace sa v elektrickom protónovom formfaktore v priestoru-podobnej oblasti použili na popis štruktúrnych funkcií $A(t)$ a $B(t)$ deuterónu (obr.4). Ako je vidieť z Tab.1 na základe hodnôt χ^2 , výrazne sa uprednostňujú polarizačné údaje z JLab.

	χ_A^2	χ_B^2
JLab	926	476
Rosenbluth	2080	574

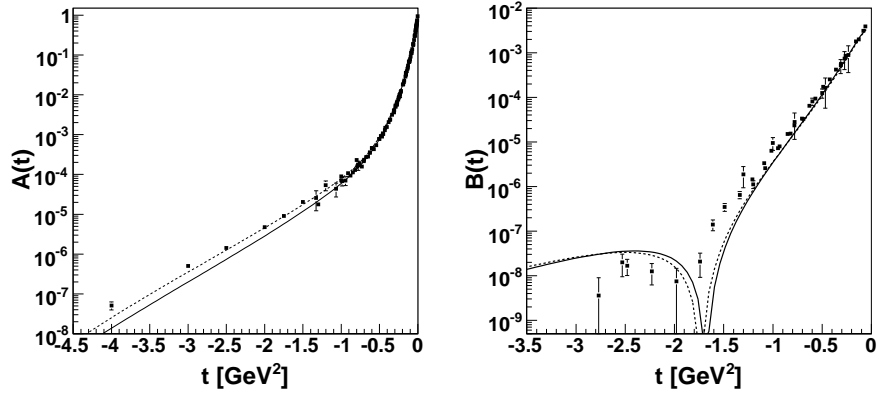
Tab. 1: χ^2 štruktúrnych funkcií $A(t)$ a $B(t)$ deuterónu pre dve rôzne scenária.

3.2 Dvojkomponentný model deuterónu a axiálneho formfaktora nukleónu

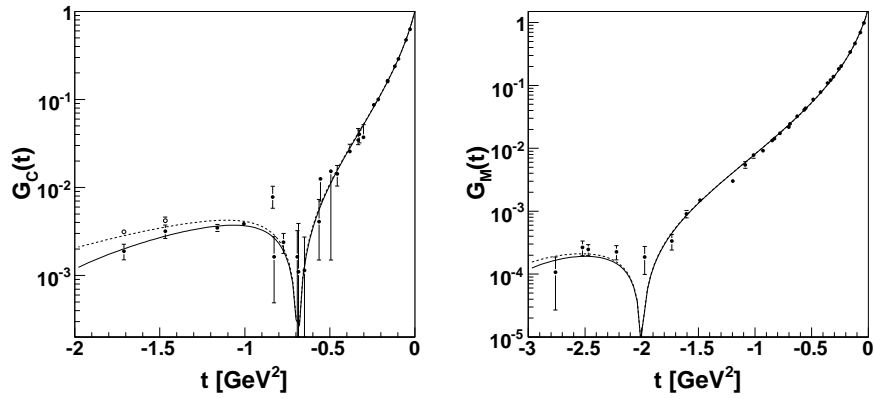
Dvojkomponentný model bol použitý na popis deuterónu [10] a axiálneho formfaktora nukleónu [11]. V prípade deuterónu, ktorý je izoskalár, je mezónový člen nasýtený len izoskalárnymi vektorovými mezónmi ω, ϕ . A teda

$$G_i(t) = N_i \frac{1}{[1 + i\gamma t]^\delta} \left[1 - \alpha_i - \beta_i + \alpha_i \frac{m_\omega^2}{m_\omega^2 - t} + \beta_i \frac{m_\phi^2}{m_\phi^2 - t} \right], \quad (16)$$

kde $i = C, M, Q$, N_i je norma formfaktora a $\alpha_i, \beta_i, \gamma, \delta$ sú voľné parametre modelu. Vzhľadom na známu polohu priesečníkov s x-osou v priebehu nábojového a magne-



Obr. 4: Štruktúrne funkcie $A(t), B(t)$ deuterónu v nerelativistickej impulznej aproximácii.



Obr. 5: Popis nábojového a magnetického formfaktora protónu pomocou dvojkomponentného modelu.

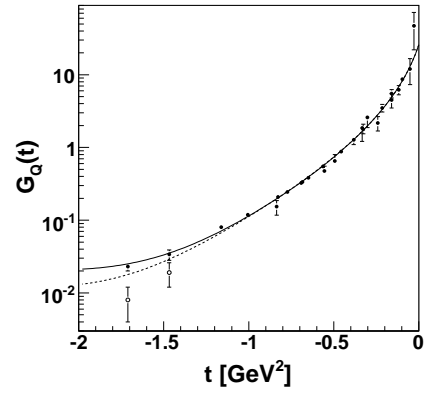
tického formfaktora (G_C, G_M) sa počet voľných parametrov modelu redukuje na 6. Tento model vynikajúco popisuje experimentálne údaje ($\chi^2/ndf = 1.5$) ako vidieť na obr.5,6 a je možné ho rozšíriť aj do času-podobnej oblasti.

Dvojkomponentný model axiálneho formfaktora je jednoduchý model vychádzajúci z Iachello, Landé, Jackson modelu nukleónu, používa rovnaký dipólový tvar tvrdého jadra a predpokladá jeden axiálny mezón (h_1) v mezónovom člene

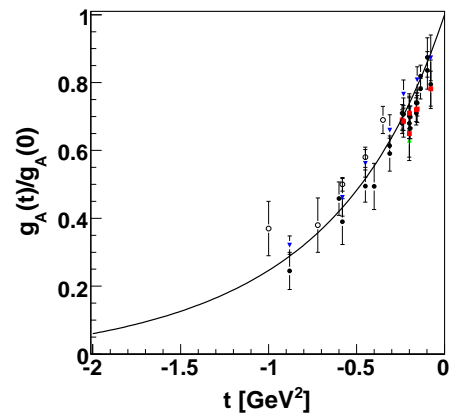
$$g_A(t) = (1 - \gamma t)^{-2} \left[1 - \alpha + \alpha \frac{m_A^2}{m_A^2 - t} \right] g_A(0), \quad (17)$$

kde $m_A = m_{h_1} = 1.17$, $\gamma \simeq 0.25 \text{ GeV}^{-2}$ a α je voľný parameter modelu.

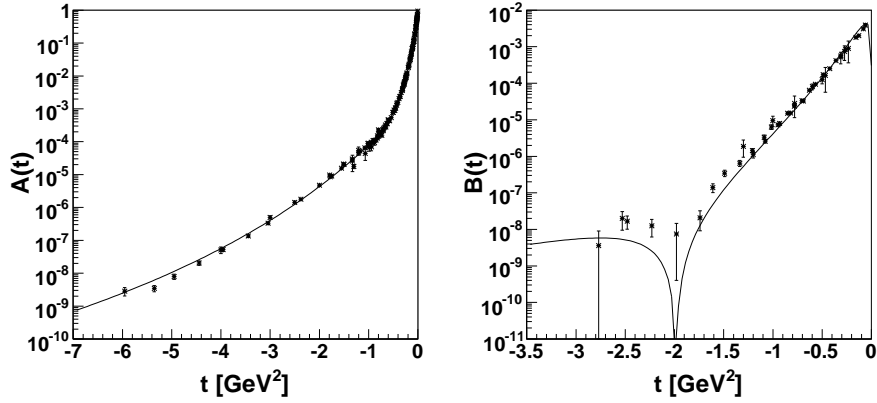
Tento model bol použitý na popis existujúcich údajov (obr.7) ako aj na odhad správania tohoto formfaktora v času-podobnej oblasti, ktorý bol nevyhnutný na návrh experimentu v jednej zo záverečných kapitol dizertácie.



Obr. 6: Popis kvadrupólového formfaktora protónu pomocou dvojkomponentného modelu.



Obr. 7: Nukleónový axiálny formfaktor.



Obr. 8: Správanie štruktúrnych funkcií $A(t)$ a $B(t)$ deuterónu ako ich popisuje unitárny a analytický model.

3.3 Unitárny a analytický model deuterónu

Unitárnym a analytickým prístupom je možné popisovať aj štruktúru najľahšieho atómového jadra, deuterónu, ako hadrónu zloženého zo 6 kvarkov, a to pre energie omnoho väčšie než väzbová energia protónu a neutrónu [12]. Využitím známej asymptotiky deuterónových formfaktorov a U&A vzťahu (12) je možné parametrizovať formfaktory deuterónu nasledovne

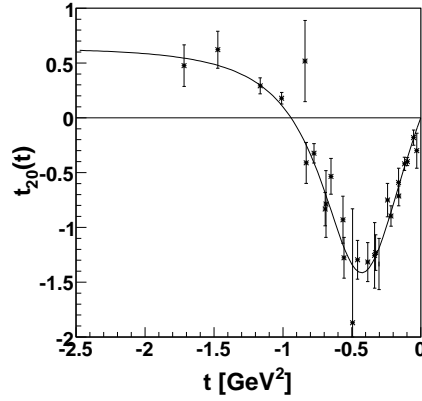
$$\begin{aligned}
G_C(t) &= \left(\frac{1 - W(t)^2}{1 - W_N^2} \right)^{10} \left[(1 - a_{C:J/\Psi} - a_{C:x}) \prod_{v=\omega, \omega', \omega'', \phi, \phi'} LH(W_v) \right. \\
&\quad \left. + \mathcal{LH}(W_{J/\Psi})a_{C:J/\Psi} + \mathcal{LH}(W_x)a_{C:x} \right] \\
G_M(t) &= \left(\frac{1 - V(t)^2}{1 - V_N^2} \right)^{12} \left[\left(\frac{m_d}{m_p} \mu_d - a_{M:x} \right) \prod_{v=\omega, \omega', \omega'', \phi, \phi', J/\Psi} LH(V_v) + \mathcal{LH}'(V_x)a_{M:x} \right] \\
G_Q(t) &= \left(\frac{1 - U(t)^2}{1 - U_N^2} \right)^{12} \left[(m_d^2 Q - a_{Q:x}) \prod_{v=\omega, \omega', \omega'', \phi, \phi', J/\Psi} LH(U_v) + \mathcal{LH}'(U_x)a_{Q:x} \right],
\end{aligned} \tag{18}$$

kde voľnými parametrami sú niektoré pomery väzbových konštánt a_i a hmotnosť a šírka jedného vektorového mezónu. Tento model dobre popisuje experimentálne údaje o štruktúrnych funkciách $A(t)$ a $B(t)$ a polarizačnej pozorovateľnej veličiny t_{20} až do kvadrátu prenesenej hybnosti 6 GeV^2 (obr.8,9) a poskytuje dôveryhodnú predpoveď správania deuterónových formfaktorov aj v času-podobnej oblasti.

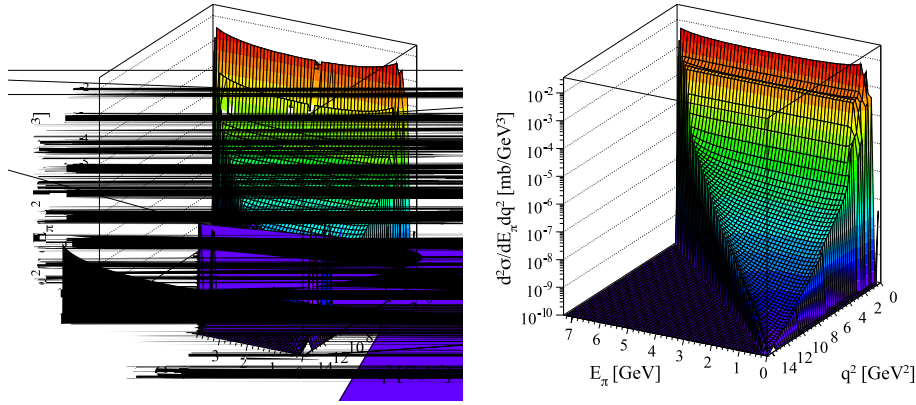
3.4 Návrh experimentu na meranie nukleónových formfaktorov v nefyzikálnej oblasti

Meranie elektromagnetických formfaktorov nukleónov v nefyzikálnej oblasti je v princípe možné v anihilačnom $N\bar{N}$ procese, kde časť vystupujúcej energie odoberie, okrem vzniknutého e^+e^- páru, tretia častica. Príkladom takéhoto procesu sú reakcie

$$\begin{aligned}
\bar{p}(p_1) + n(p_2) &\rightarrow \pi^-(q_\pi) + \ell^-(p_-) + \ell^+(p_+) \\
\bar{p}(p_1) + p(p_2) &\rightarrow \pi^0(q_\pi) + \ell^-(p_-) + \ell^+(p_+), \quad \ell = e, \mu
\end{aligned} \tag{19}$$



Obr. 9: Správanie polarizačnej pozorovateľnej veličiny $\tilde{t}_{20}(t)$ deuterónu ako ju popisuje unitárny a analytický model.

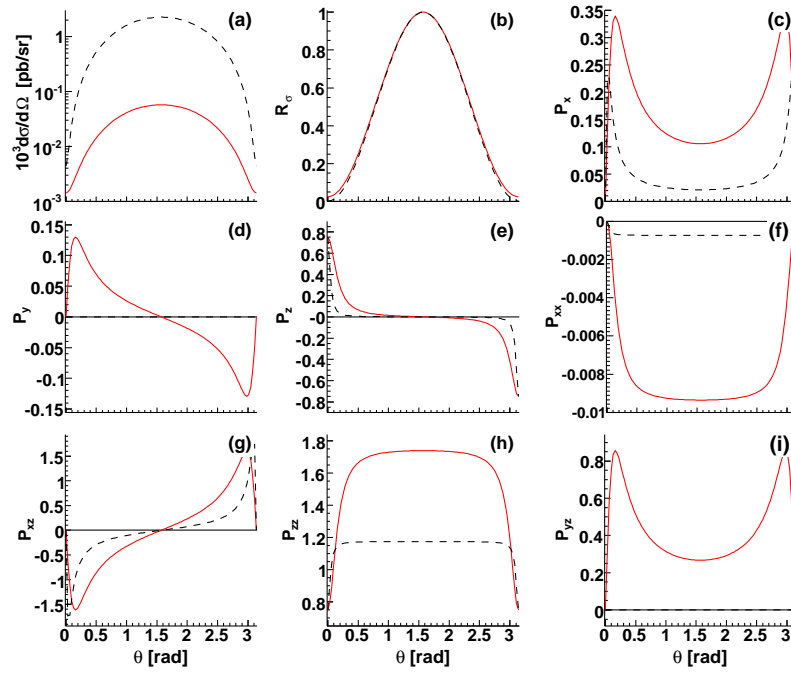


Obr. 10: *Vľavo*: Diferenciálny účinný prierezu reakcie $\bar{p} + p \rightarrow \pi^0 + \ell^+ + \ell^-$ ako funkcia q^2 a E_π . *Vpravo*: Rovnaká veličina pre reakciu $\bar{p} + n \rightarrow \pi^- + \ell^+ + \ell^-$.

skúmané v predkladanej dizertačnej práci [13]. Je odvodený vzťah pre diferenciálny účinný prierez pre prípad úplnej detekcie vzniknutého piónu a leptón-antileptónového páru, ktorý je explicitne závislý na nukleónových formfaktorech. Použitím rôznych modelov elektromagnetických formfaktorov a axiálneho formfaktora nukleónov je urobený odhad tohto účinného prierezu (obr.10) pre obe reakcie a je navrhnuté meranie takýchto anihilačných procesov na urýchľovači FAIR.

3.5 Meranie polarizačných pozorovateľných veličín deuterónu

Polarizačné pozorovateľné veličiny sú nepostrádateľné pri extrakcii plnej informácie o elektromagnetických formfaktorech deuterónu v času-podobnej oblasti. Posledná časť dizertačnej práce [14] sa venuje odvodeniu jednotlivých polarizačných pozorovateľných veličín deuterónu ako funkcií formfaktorov deuterónu. Na základe v práci vypracovaných modelov štruktúry deuterónu je urobený odhad ich správania (obr.11) a je navrhnutý postup extrakcie elektromagnetických formfaktorov deuterónu v času-podobnej oblasti z



Obr. 11: Predpovede pre rôzne polarizačné pozorovateľné veličiny deuterónu s použitím modelových deuterónových formfaktorov v času-podobnej oblasti.

týchto veličín.

Literatúra

- [1] R. Hofstadter, F. Burniller and M. R. Yearan, *Rev. Mod. Phys.* , **30** (1958) 482.
- [2] C. Adamuscin, A. Z. Dubnickova, S. Dubnicka, R. Pekarik and P. Weisenpacher, *Eur. Phys. J.* **C28** (2003) 115.
- [3] F. Iachello, A. D. Jackson and A. Lande, *Phys. Lett.* **B43** (1973) 191.
- [4] M. K. Jones et al., *Phys. Rev. Lett.* **84** (2000) 1398.
- [5] O. Gayou et al., *Phys. Rev. Lett.* **88** (2002) 092301.
- [6] V. Punjabi et al., *Phys. Rev.* **C71** (2005) 055202.
- [7] C. Adamuscin, L. Bimbot, S. Dubnicka, A. Z. Dubnickova and E. Tomasi-Gustafsson, Phenomenological insight into JLab proton polarization data puzzle by deuteron impulse approximation, hep-ph/0703066, 2007.
- [8] S. Dubnicka, A. Z. Dubnickova and P. Weisenpacher, *J. Phys.* **G29** (2003) 405.
- [9] C. Adamuscin, S. Dubnicka, A. Z. Dubnickova and P. Weisenpacher, *Prog. Part. Nucl. Phys.* **55** (2005) 228.
- [10] E. Tomasi-Gustafsson, G. I. Gakh and C. Adamuscin, *Phys. Rev.* **C73** (2006) 045204.
- [11] C. Adamuscin, E. Tomasi-Gustafsson, E. Santopinto, R. Bijker and F. Iachello, Two component model for the axial form factor of the nucleon, to be published.
- [12] C. Adamuscin, S. Dubnicka and A. Z. Dubnickova, Unitary and Analytic Model of the Deuteron Electromagnetic Structure, to be published.
- [13] C. Adamuscin, E. A. Kuraev, E. Tomasi-Gustafsson and F. E. Maas, *Submitted to Phys. Rev. C* .
- [14] G. I. Gakh, E. Tomasi-Gustafsson, C. Adamuscin, S. Dubnicka and A. Z. Dubnickova, *Phys. Rev.* **C74** (2006) 025202.

5 Zoznam publikácií a citácií

5.1 Práce, ktoré tvoria súčasť dizertačnej práce

- **Adamuscin C.**, Dubnickova A. Z., Dubnicka S., Pekarik R., and Weisenpacher P.: *Asymptotic conditions for electromagnetic form factors of hadrons represented by VMD model*, Eur. Phys. J. **C28** (2003), 115-118
- **Adamuscin C.**, Dubnicka S., Dubnickova A. Z., and Weisenpacher P.: *Unitary and analytic model of nucleon EM structure, the puzzle with JLab proton polarization data and new insight into proton charge distribution*, Prog. Part. Nucl. Phys. **55** (2005), 228-241
 - Buttimore N. H. Jennings E., *Polarisation observables in lepton antilepton to proton antiproton reactions including lepton mass*, European Physical Journal **A 31** 9 (2007)
 - Hussein M Y, *Electromagnetic proton form factors* arXiv.org:hep-ph/0610420
 - Meissner Ulf-G., *The Pion Cloud of the Nucleon: Facts and popular Fantasies* arXiv.org:nucl-th/0701094
- Tomasi-Gustafsson E., Gakh G. I., and **Adamuscin C.**: *Two-component model for the deuteron electromagnetic structure*, Phys. Rev. **C73** (2006), 045204
- Gakh G. I., Tomasi-Gustafsson E., **Adamuscin C.**, Dubnicka S., and Dubnickova A. Z.: *Polarization effects in $e^+e^- \rightarrow \bar{d}d$ and determination of time like deuteron form factors*, Phys. Rev. **C74** (2006), 025202
- **Adamuscin C.**, Kuraev E. A., Tomasi-Gustafsson E., and Maas F. E.: *Testing axial and electromagnetic nucleon form factors in time-like regions in the processes $\bar{p}n \rightarrow \pi^- \ell^- \ell^+$ and $\bar{p}p \rightarrow \pi^0 \ell^- \ell^+$, $\ell = e, \mu$* , Submitted to Phys. Rev. C (2006)
 - Schindler M. R., Fuchs T., Gegelia J. et al, *Axial, induced pseudoscalar, and pion-nucleon form factors in manifestly Lorentz-invariant chiral perturbation theory*, Physical Review **C 75** 025202 (2007)
- **Adamuscin C.**, Bimbot L., Dubnicka, S., Dubnickova A. Z., Tomasi-Gustafsson E.: *Phenomenological insight into JLab proton polarization data puzzle by deuteron impulse approximation*, arXiv.org:hep-ph/0703066 (2007)
- **Adamuscin C.**, Dubnicka S., and Dubnickova A. Z.: *Unitary and Analytic Model of the Deuteron Electromagnetic Structure*, (2007)
- **Adamuscin C.**, and Tomasi-Gustafsson E., Santopinto E., Bijker R., Iachello F.: *Two component model of the nucleon axial form factor*, (2007)

5.2 Ostatné práce

- Kuraev E. A., **Adamuscin C.**, Tomasi-Gustafsson E., and Maas F.: *Study of resonant processes for multi-pion production in $p\bar{p} \rightarrow \ell^+ \ell^- n(\pi)$ -annihilation*, DAPNIA-06-450, (2007)
- **Adamuscin C.**, Gakh G. I., and Tomasi-Gustafsson E.: *Polarization effects in the reaction $e^+e^- \rightarrow \rho^+ \rho^-$ and determination of the ρ -meson form factors in the time-like region*, DAPNIA-06-469, (2007)

5.3 Príspevky na konferenciách

- **Proof of equivalence of two systems of asymptotic conditions for electromagnetic form factor in VMD model**
C. Adamuscin, A. Z. Dubnickova, S. Dubnicka, R. Pekarik and P. Weisenpacher, *Proc. Hadron Structure Conf. '02, 22.-27. Sept., 2002, Herlany, Slovak Republic, Eds.: J. Urban, J. Vrbakova, P.J.Safarik Univerzity, Kosice(2003) p.39-45*
- **Some JLab proton polarization data puzzle effects** C. Adamuscin, A. Z. Dubnickova, S. Dubnicka and P. Weisenpacher, *Workshop on Lepton Scattering and the Structure of Hadrons and Nuclei, Erice, Italy, September 2004*
- **Spin polarization observables in $e^+e^- \rightarrow p\bar{p}$ and $p\bar{p} \rightarrow e^+e^-$ processes.**
C. Adamuscin, A. Z. Dubnickova, S. Dubnicka and E. Tomasi-Gustafsson, *Workshop on Nucleon Formfactors 2005, Frascati, Italy*
- **The proton electric FF space-like behaviour puzzle and its consequences on the proton charge distribution**
C. Adamuscin, A. Z. Dubnickova, S. Dubnicka and P. Weisenpacher, *Proc. Hadron Structure Conf. '04, 30.August-3.Sept., 2004, Smolenice Castle, Slovak Republic, Eds.: S. Dubnicka, A. Z. Dubnickova, P. Strizenec, J. Urban, J. Vrbakova, P.J.Safarik Univerzity, Kosice(2005) p.245-251*
- **The puzzle of big disagreement between SLAC and Jlab experimental data**
seminar at ETC, Trento, Italy, 2005
- **A new description of the deuteron structure**
seminar at DAPNIA/SPhN/CEA Saclay, France, 2006

Summary

In the presented Dissertation Thesis applications of the universal approach of a description of the electromagnetic structure of hadrons to a solution of specific problems concerning nucleons and deuteron were demonstrated.

The first three Chapters are serving as an introduction, where general concepts of electromagnetic, weak and strange form factors are reviewed, polarization observables are introduced and the four-component polarization formalism is elaborated in detail.

The first original contribution is contained in the Chapter devoted to VMD model, where the old problem of VMD model with the asymptotics is solved generally and expressions for normalized form factors and the required asymptotics for arbitrary finite number of vector mesons are presented.

The Unitary and Analytic model, which reflects all known form factors properties, is in universal form given in the next Chapter. Its application to the Rosenbluth and Jefferson Lab proton polarization data has led to two contradicting behaviors of the proton electric form factors in the space-like region, what is well known as the JLab proton polarization data puzzle. In order to prefer one of them to be more reliable, they are brought into a comparison with other independent data on deuteron structure functions by means of the non-relativistic impulse approximation of deuteron EM structure. From the values of χ^2 it has been unambiguously demonstrated that the $G_E^p(t)$ from the JLab proton polarization data analysis with the zero around $t = -13 \text{ GeV}^2$ are more consistent with the deuteron structure functions $A(t), B(t)$ data than the older Rosenbluth behavior.

In the eighth Chapter a simple parametrization of the three deuteron electromagnetic FFs, with a minimal number of parameters, based on a transparent physical picture was suggested. It can be used in the comparison of different theoretical models with experiments involving deuteron, and for a precise analytical interpolation of the experimental points in the region $Q^2 < 2 \text{ GeV}^2$.

An application of the Unitary and Analytic model to a description of the deuteron electromagnetic structure is made in the ninth Chapter. Due to its unitary and analytic properties and possibility of a transparent extension to the time-like region we obtained not only fit of the experimental data on the deuteron structure function and polarization observables in the space-like region, but also the prediction of the total cross section of the annihilation process $e^-e^+ \rightarrow d\bar{d}$, which is going to be measured in the near future.

In the tenth Chapter a simple model of the nucleon axial form factor has been developed. The aim of this model is to provide a reasonable estimation of the nucleon axial form factor in the time-like region for the measurement proposal described in the next Chapter, where we studied nucleon antinucleon annihilation processes with the pion, nucleon and lepton-antilepton pair in the final state. The latter allows measurement of the nucleon electromagnetic form factors in the unphysical region and measurement of the nucleon axial form factor in the time-like region. We also provided an estimation of the differential cross section of such processes based on existing models of nucleon electromagnetic and axial form factors.

In the last Chapter polarization effects in the electron-positron annihilation into the deuteron-antideuteron pair for the case of longitudinally polarized electron beam and arbitrary polarization of the produced deuteron, with the aim on a determination of the time-like complex deuteron electromagnetic form factors has been investigated for the first time. We derived general expressions for polarization observables as a functions of deuteron form factors and we made their numerical estimations by means of various models of deuteron electromagnetic form factors, for kinematical conditions near threshold.