

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



Mgr. Michal Kreps

Autoreferát dizertačnej práce

**Produkcia nestabilných častíc  
v hadrón-protónových zrážkach pri  
158 GeV/c**

Na získanie vedecko-akademickej hodnosti: Philosophiae Doctor  
v odbore doktorandského štúdia:  
11-24-9 Jadrová a subjadrová fyzika

Bratislava, 2004

Dizertačná práca bola vypracovaná v dennej forme doktorandského štúdia na Ústave fyziky Fakulty matematiky, fyziky a informatiky

Predkladateľ:

Mgr. Michal Kreps  
Ústav fyziky  
FMFI UK, Mlynská dolina  
842 48 Bratislava

Školiteľ:

doc. RNDr. Vladimír Černý, CSc.  
Ústav fyziky  
FMFI UK, Mlynská dolina  
842 48 Bratislava

Oponenti:

Prof. RNDr. Gabriela Martinská, CSc.  
Ústav fyzikálnych vied, Prírodovedecká fakulta UPJŠ Košice  
RNDr. Ivan Králik, CSc.  
Ústav experimentálnej fyziky SAV Košice  
RNDr. Jiří Dolejší, CSc.  
Ústav časticové a jaderné fyziky, Matematicko-fyzikální fakulta University Karlovy Praha

Autoreferát bol rozoslaný dňa ...

Obhajoba dizertačnej práce sa koná dňa .... na FMFI UK, Mlynská Dolina, 842 48 Bratislava, miestnosť číslo F1 ... pred komisiou pre obhajobu dizertačnej práce doktorandského štúdia vymenovanou dňa .... predsedom spoločnej odborovej komisie vo vednom odbore 11-24-9.

Predseda spoločnej odborovej komisie:

prof. RNDr. Jozef Masarik, DrSc.  
Katedra jadrovej fyziky UK FMFI, Bratislava

## Obsah

<b>1 Úvod.</b>	<b>3</b>
<b>2 Ciele dizertačnej práce.</b>	<b>3</b>
<b>3 Experiment NA49 v CERNe.</b>	<b>4</b>
<b>4 V-korekcia</b>	<b>5</b>
<b>5 Metóda miešania udalostí</b>	<b>6</b>
<b>6 Produkcia baryónových rezonancií</b>	<b>9</b>
<b>7 Záver</b>	<b>15</b>
<b>8 Summary.</b>	<b>16</b>
<b>9 Zoznam prác dizertanta.</b>	<b>16</b>
9.1 Publikácie v časopisoch . . . . .	16
9.2 Interné publikácie. . . . .	18
9.3 Vystúpenia na medzinárodných konferenciách a seminároch. . .	19
<b>Literatúra</b>	<b>19</b>

## 1 Úvod.

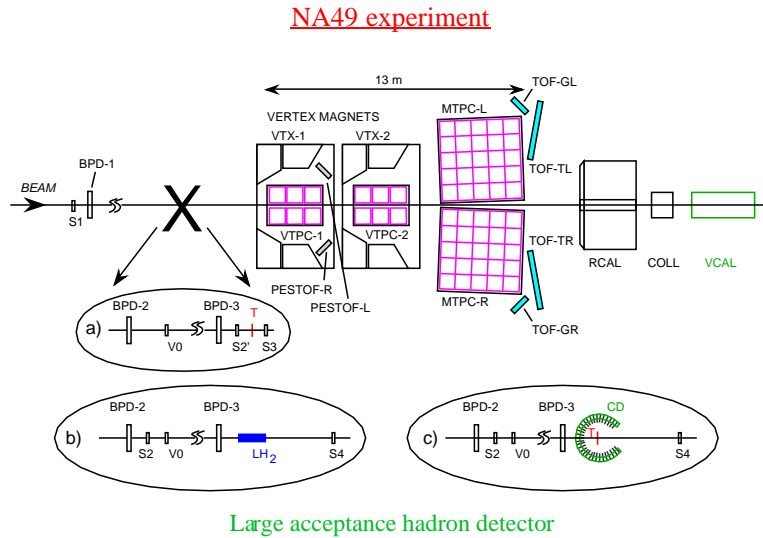
Fyzika vysokých energií je odvetvie, ktoré sa v posledných desaťročiach prudko rozvíja. Výrazným pokrokom v tejto oblasti bolo sformulovanie Štandardného modelu interakcie častíc, ktorý v sebe zahŕňa teóriu elektroslabých interakcií a teóriu silných interakcií. Práve v súvislosti s existenciou štandardného modelu možno pozorovať tri hlavné aktivity vo fyzike vysokých energií a to testovanie štandardného modelu, hľadanie nových javov, ktoré štandardný model nepopisuje a snaha o pochopenie javov, ktoré síce štandardný model popisuje, no súčasné vedomosti nám neumožňujú robiť detailné predpovede. Všetky tri okruhy štúdií potrebujú k svojmu rozvoju teoretickú ale aj experimentálnu prácu.

Príkladom experimentu v súčasnej fyzike vysokých energií môže byť aj experiment NA49, ktorý prispieva do oblasti, kde sa predpokladá, že štandardný model platí, no výpočty nevieme robiť. Je to hlavne oblasť mäkkých nepružných zrážok. Práve tieto zrážky sa tento experiment snaží komplexne študovať a tým prispieť k rozvoju oblasti. Treba povedať, že súčasné experimenty vo fyzike vysokých energií sú mimoriadne komplexné a na ich príprave, behu a spracovaní sa podieľajú veľké tímy ľudí.

Každý experiment pozostáva z niekoľkých častí a tými sú príprava experimentu, vyriešenie technických otázok súvisiacich s detektorom, či softwarom na spracovanie dát a samotného získavania fyzikálnych výsledkov. Výnimkou nie je ani experiment NA49, v rámci ktorého vznikla táto práca, takže práca obsahuje aj technickú časť, ktorá sa zaoberá riešením problému V-korekcie.

## 2 Ciele dizertačnej práce.

Prvým cieľom práce je riešenie technického problému V-korekcie, čo je môj hlavný príspevok k experimentu po technickej stránke. Hlavným cieľom práce bolo zistenie, či sa v protón-protónových zrážkach rodia z baryónových rezonancií iba  $\Delta$  rezonancie, alebo aj rezonancie s vyššími hmotnosťami, ako napríklad  $N^*$  rezonancie a z nameraných dát extrahovať inkluzívny účinný prierez pre produkciu  $\Delta$  rezonancií v protón-protónových zrážkach a prípadne aj inkluzívny účinný prierez pre produkciu  $N^*$  rezonancie. Na splnenie tohoto hlavného cieľa bolo potrebné ďalšie prehĺbenie vedomostí o metóde miešania udalostí a dôkladné otestovanie metódy, takže ďalším cieľom je práve dôkladnejšie preskúmanie metódy miešania udalostí.



Obrázok 1: Experiment NA49.

### 3 Experiment NA49 v CERNe.

Experiment NA49 [1] sa nachádza na urýchľovači *SPS* v Európskom centre jadrového výskumu CERN pri Ženeve. Je to experiment s pevným terčom, ktorého cieľom je študovať širokú paletu zrážok, počnúc hadrón-nukleónovými ( $\pi^\pm p$ ,  $pp$ ) zrážkami cez hadrón-jadrové ( $\pi^\pm Pb$ ,  $pPb$ ) zrážky až po zrážky ťažkých iónov ako napríklad zrážky olova na olovo ( $PbPb$ ). Zvlášť zaujímavými sú tu zrážky  $dp$ , ktoré sa vykonávajú s deuterónovým zväzkom a vďaka identifikácii neinteragujúceho nukleónu vieme tieto zrážky rozdeliť na  $pp$ ,  $np$  zrážky a zrážky, kde interagujú oba nukleóny. Experiment sa zameriava na štúdium finálnych hadrónov v tomto širokom spektre možných zrážok. Experiment NA49 je magnetický spektrometer, založený na štyroch veľkoobjemových časovo projekčných komorách (TPC). Dve z nich (VTPC1 a VTPC2) sa nachádzajú v magnetickom poli dvoch supravodivých dipólových magnetov (viď obrázok 1). Ďalšie dve (MTPC), ktoré sú väčšie, sa nachádzajú mimo magnetického poľa. Intenzita magnetického poľa v komore VTPC1 je  $B = 1.5 T$  a v komore VTPC2 je  $B = 1.1 T$ . Informácia z týchto komôr sa používa na vyhľadávanie stôp nabitých častíc a meranie ich hybnosti ako aj na identifikáciu týchto častíc pomocou merania merných ionizačných strát.

V oblasti minimálnej ionizácie ( $\beta\gamma \approx 3$ ) je identifikácia posilnená niekoľkými detektormi na meranie doby preletu (TOF). Detektory označené na obrázku 1 ako TOF-TL a TOF-TR sú pixlové scintilačné detektory, ktoré

detekujú častice s hybnosťami 3–12  $GeV/c$ . Detektory označené ako TOF-GL a TOF-GR sú mriežkové scintilačné detektory určené na detekciu častíc s hybnosťami 2–6  $GeV/c$ .

Experiment obsahuje dva kalorimetre, Ring kalorimeter [2] a Veto kalorimeter. Veto kalorimeter sa používa na triggerovanie v jadro-jadrových zrážkach. Ring kalorimeter bol pôvodne určený na meranie priechnej energie v jadro-jadrových zrážkach, no v posledných rokoch sa začal na experimente využívať aj v iných typoch zrážok. Tento detektor sa používa v zrážkach s hadrónovými zväzkami a deuterónovým zväzkom na detekciu rýchlych častíc, ktoré nie sú viditeľné v TPC komorách. Kvôli lepšiemu využitiu Ring kalorimetra boli v roku 1999 pridané dve proporcionálne komory(VPC), ktoré sa nachádzajú medzi MTPC a Ring kalorimetrom a slúžia na rozlišovanie nabitých a nenabitých častíc.

V roku 2001 bol experiment rozšírený o ďalšiu TPC komoru (GTPC), ktorá sa nachádza medzi VTPC1 a VTPC2 tak, aby vykryla medzeru v strede komôr a tak zvýšila presnosť merania rýchlych častíc, ktoré predtým nezanechávali body v magnetickom poli.

Detektory označené ako BPD-1 až BPD-3 slúžia na kontrolu polohy zväzku a detektory S1 až S4, spolu s detektorom centrality (CD) a Veto kalorimetrom (VCAL) na triggerovanie.

## 4 V-korekcia

V časoch experimentov, kde bola hlavným detektorom bublinová komora, sa dalo pri každej jednej udalosti veľmi ľahko a dobre rozlíšiť, či bola detekovaná častica vyprodukovaná priamo v mieste interakcie, alebo pochádzala z rozpadu slabo sa rozpadajúcej častice (tzv. V-častice), ako napríklad  $\Lambda^0$ . Keďže toto odlíšenie bolo jednoduché, experimenty na bublinových komorách do inkluzívnych účinných prierezov častice pochádzajúce zo slabých rozpadov nezarátavali. S príchodom elektronických experimentov sa však situácia podstatne skomplikovala. Tieto experimenty totiž už nevidia slabé rozpady tak dobre. Okrem toho, žiaden experiment nevidí všetky rozpady a teda časť častíc pochádzajúcich z týchto rozpadov sa stráca. Taktiež pri softwarovom spracovaní údajov môžu byť niektoré dráhy častíc pochádzajúcich zo slabých rozpadov vynechané zo spracovania, keďže zjavne nepochádzajú z interakčného bodu. V-korekcia<sup>1</sup> je práve korekcia, ktorá hovorí, koľko z meraného účinného prierezu pre produkciu danej častice v danom experimente pochádza zo slabých rozpadov.

---

<sup>1</sup>V anglickej literatúre feeddown

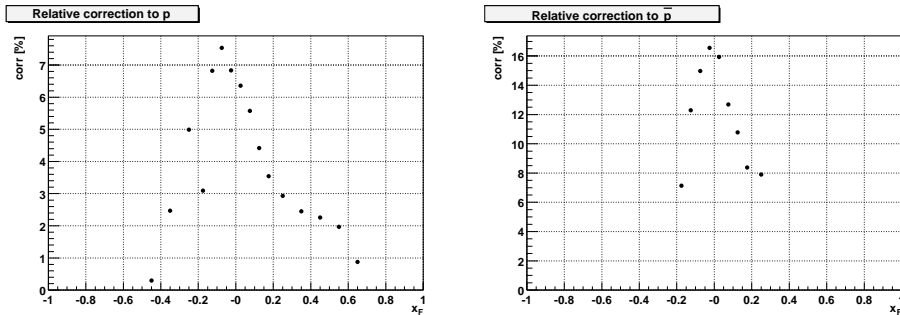
Práve výpočet V-korekcie pre  $pp$  a  $\pi p$  zrážky v experimente NA49 bol môj hlavný príspevok k experimentu po technickej stránke. Celý výpočet bol rozdelený na dve časti. V prvej sa rátala pravdepodobnosť toho, že častica pochádzajúca zo slabého rozpadu bude zrekonštruovaná ako primárna častica. Takúto pravdepodobnosť možno zrátať pre každú dcérsku časticu, ktorými boli v mojom prípade protóny, antiprotóny a nabité pióny. Na konci prvého kroku výpočtu teda máme k dispozícii pravdepodobnosti rekonštrukcie každej dcérskej častice z každej uvažovanej slabo sa rozpadajúcej častice. V mojom výpočte bol na tento krok využitý model VENUS [3]. Z vygenerovaných udalostí sa vybrali iba tie, ktoré mali požadovanú V-časticu a takto vyselektované udalosti slúžili ako vstup do GEANT simulácie experimentu NA49. Výstupom simulácie sú dáta v rovnakom formáte ako dáta z detektora, takže následne možno použiť identický rekonštrukčný software na rekonštrukciu udalostí a získať hľadané pravdepodobnosti. V druhom kroku boli potom na základe parametrizácie  $X_F$  a  $p_T$  rozdelení generované V-častice, ktoré sa ďalej rozpadali za účelom získania  $X_F$  rozdelenia jednotlivých dcérskych produktov z jednotlivých V-častíc. Získané  $X_F$  rozdelenia sa potom pre násobili pravdepodobnosťami získanými v prvom kroku. Na záver sa príspevky od jednotlivých V-častíc sčítali a tak sa získala finálna V-korekcia.

Za účelom parametrizácie  $X_F$  a  $p_T$  rozdelenia V-častíc bolo potrebné zozbierať pokiaľ možno kompletnú informáciu o produkcii V-častíc. Práve prehľad dostupných informácií o produkcii V-častíc v  $pp$  a  $\pi p$  zrážkach bol venovaný dôraz pri opise riešenia tohoto problému v mojej dizertačnej práci. Dôvodom je fakt, že kým samotná výsledná V-korekcia nie je pre ľudí mimo experiment výraznejšie zaujímavá, opis metódy a prehľad výsledkov o produkcii V-častíc sa môžu zísť aj experimentátorom pracujúcim na iných experimentoch.

Z výsledkov tu spomeňme iba relatívnu veľkosť korekcie pre protóny a antiprotóny v  $pp$  zrážkach, aby bolo vidieť, o akej veľkej korekcii v prípade experimentu NA49 hovoríme. Na grafe 2 je relatívna hodnota V-korekcie pre protóny a antiprotóny v  $pp$  zrážkach ako funkcia  $X_F$ . V-korekcia sa výrazne mení s meniacim sa  $X_F$ , pričom pre protóny je maximum okolo 7.5% a pre antiprotóny zhruba 16%. Pre pióny oboch nábojov je korekcia menšia, pričom jej maximum je 2%. V  $\pi p$  zrážkach sú maximálne hodnoty relatívnej V-korekcie na podobnej úrovni ako v  $pp$  zrážkach.

## 5 Metóda miešania udalostí

Hlavným cieľom mojej práce bolo štúdium produkcie baryónových rezonancií v  $pp$  zrážkach. Rezonancie však žijú veľmi krátku dobu ( $\tau \approx 10^{-23}s$ ) a tak je nemožná ich detekcia pomocou vyhľadávania sekundárneho vertexu.



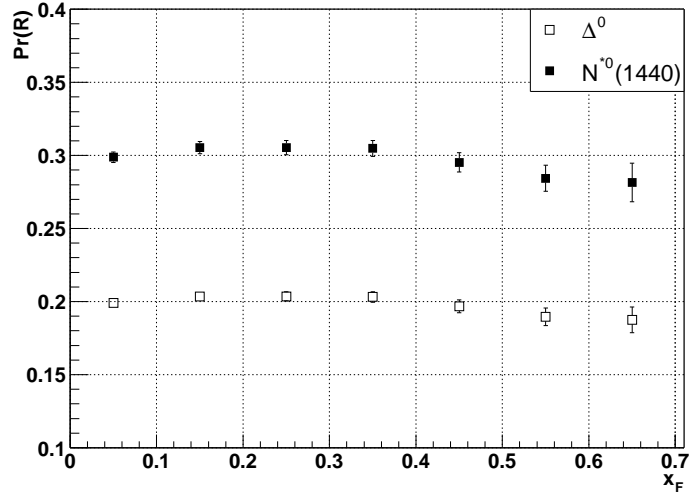
Obrázok 2: Relatívna V-korekcia pre protóny a antiprotóny v  $pp$  zrážkach. Získaná je ako absolútna V-korekcia podelená rozdelením protónov, prípadne antiprotónov meraných v experimente.

Z toho dôvodu sa používa metóda, kde sa urobí rozdelenie invariantných hmotností všetkých párov častíc, ktoré môžu pochádzať z rozpadu danej rezonancie a v tomto rozdelení sa potom hľadá pík prislúchajúci danej rezonancii. Nevýhodou tejto metódy je, že v rozdelení invariantných hmotností nemáme iba píky, ale aj pozadie, ktoré má kombinatorický charakter. Veľkosť pozadia pritom rastie so zvyšujúcou sa multiplicitou zrážky. Na získanie počtu vyprodukovaných rezonancií je potrebné toto pozadie odčítať, no práve tu sa začínajú problémy, keďže neexistuje teória či model, ktoré by umožnili vyrátať pozadie.

Na riešenie problémov pri popise pozadia bola navrhnutá metóda miešania udalostí (event mixing), ktorá spočíva v myšlienke, že ak vezmeme častice z rôznych udalostí, tieto nie sú korelované a teda by malo byť možné popísať pozadie pomocou párov častíc pochádzajúcich z rôznych udalostí. Najhlbšie bola táto myšlienka preštudovaná v prácach H. G. Fischera a jeho spolupracovníkov [4, 5] a práci L'Hota [6]. Na práce H. G. Fischera a spolupracovníkov nadviazal J. Bracinič vo svojej dizertačnej práci [7], kde navrhovanú metódu podrobnejšie preštudoval pre prípad jednej rezonancie v udalosti a pomocou metódy extrahoval z nameraných dát účinný prierez pre produkciu  $\Delta^{++}$  rezonancie v  $pp$  zrážkach získaných na experimente NA49.

V rámci mojej práce som ďalej prehĺbil vedomosti o metóde miešania udalostí a o jej aplikovateľnosti na extrakciu počtu vyprodukovaných rezonancií. Toto rozšírenie spočíva v dôkladnom preštudovaní metódy pre prípad, keď máme dve rezonancie rozpadajúce sa do toho istého rozpadového kanála. Toto je prípad takmer všetkých baryónových rezonancií, takže je užitočné preskúmať, či metóda funguje aj v takomto prostredí. Toto štúdium bolo urobené pomocou jednoduchého štatistického modelu zavedeného v dizertačnej práci J. Braciniča. Tento model je značne zjednodušený, no dovoľuje vykonať všetky





Obrázok 3: Nameraná pravdepodobnosť produkcie rezonancií v modeli so zákonom zachovania energie a hybnosti. Hodnoty, ktoré boli do modelu vložené, sú 0.2 a 0.3.

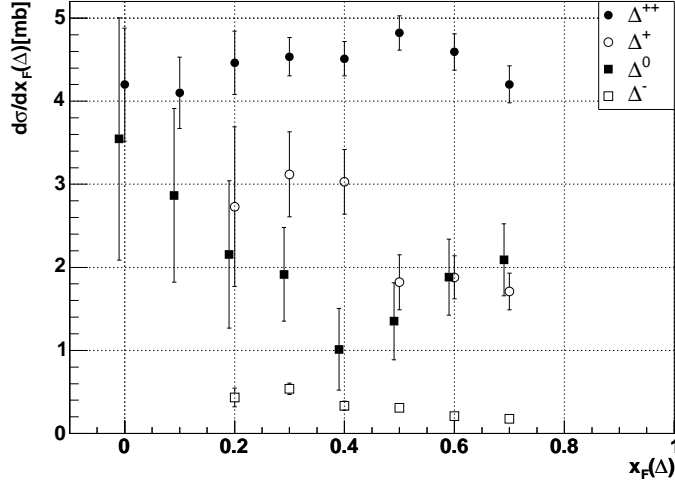
potrebné výpočty analyticky. Na tomto modeli bolo ukázané, že ak fixujeme protón do úzkeho binu v pozdĺžnej hybnosti, tak je možné extrahovať počet vyprodukovaných rezonancií pomocou komplementárnej Monte Carlo simulácie obsahujúcej iba rezonancie. Získaný výsledok som následne overil pomocou Monte Carlo simulácií. Prvou bola simulácia, ktorá presne zodpovedala analytickým výpočtom. Táto bola bez akýchkoľvek korelácií okrem korelácie spôsobenej faktom, že častice pochádzali z rozpadu rezonancie. V tomto modeli nebola zachovávaná ani hybnosť a energia. Druhá Monte Carlo simulácia na overenie získaných poznatkov o metóde miešania udalostí už bola bližšie k realite, keďže tu bola zachovávaná hybnosť a energia. Okrem toho model obsahoval už len koreláciu častíc pochádzajúcich z rozpadu rezonancie. Na generovanie hybností bol použitý Jadachov algoritmus [8], pričom udalosť obsahovala vždy maximálne jednu rezonanciu. Ako rezonancie boli použité  $\Delta^0$  a  $N^{*0}(1440)$  rezonancie. Na obrázku 3 sú výsledné namerané pravdepodobnosti produkcie spomínaných dvoch rezonancií v mojom jednoduchom modeli so zákonom zachovania energie a hybnosti. Hodnoty, ktoré boli do modelu vložené, sú 0.2 pre  $\Delta^0$  rezonanciu a 0.3 pre  $N^{*0}(1440)$  rezonanciu. Ako vidno na obrázku, tieto hodnoty sú celkom dobre reprodukované meraním pomocou metódy miešania udalostí a teda možno skonštatovať, že metódu možno použiť na extrakciu počtu rezonancií z experimentálnych dát.

## 6 Produkcia baryónových rezonancií

Počas štúdia rôznych typov hadrón-protónových zrážok sa objavil efekt tzv. rezonančnej dominancie [9]. Experimentálne sa zistilo, že veľká časť hadrónov vo finálnom stave ( $\pi$ ,  $K$ ,  $p$ ,  $\bar{p}$ ) sa nerodí priamo v zrážke, ale sú produktami rozpadov rezonancií produkovaných v zrážke. Na podporu takéhoto tvrdenia uvedme dva príklady. Prvý z nich je zo zrážok  $\pi^+p$  pri  $p_{LAB} = 16 GeV/c$ , kde bolo zistené, že až 43% všetkých  $\pi^-$  pochádza z  $\rho$  a  $\omega$  rezonancií. Okrem toho bolo taktiež zistené, že veľká časť  $\pi^+$  pochádza z baryónovej rezonancie  $\Delta^{++}$ . Druhý taký príklad pochádza z  $pp$  interakcií pri  $\sqrt{s} = 53 GeV$ , kde získali výsledok, že viac ako 60% všetkých nabitých piónov a kaónov pochádza z rezonancií  $\rho$ ,  $\omega$ ,  $K^*$ .

Ďalším posilnením motivácie pre štúdium rezonancií je otázka dynamiky hadrón-nukleónovej zrážky. Čo sa tohoto týka, najviac akceptovaným pohľadom na dynamiku zrážky je taký, že v prvej fáze zrážky efektívne interagujú dva partóny z rôznych hadrónov, ktoré potom naťahujú strunu, ktorá sa trhá a postupne hadronizuje [10]. Tento pohľad je základom pre modely ako napríklad PYTHIA [11, 10]. V týchto modeloch sa produkujú rezonancie, no zvyčajne sú obmedzené iba na rezonančné stavy s nižšou hmotnosťou. Niektoré modely sa snažia nejaké efektívne rezonancie s hmotnosťami vyššími ako hmotnosť  $\Delta$  zavádzať. Príkladom takéhoto modelu je model VENUS [3]. Pokračovateľom tohoto modelu je model NEXUS [12], ktorý oproti VENUSu zavádza aj ďalšie baryónové rezonancie. Jedným z alternatívnych pohľadov je taký, že v zrážke interagujú spolu v podstate celé nukleóny, pričom tieto sa v prvej fáze excitujú na vysoké hmotnosti a následne sa tieto rozpadajú v niekoľkých krokoch až na stabilné častice. V extrémnom prípade môže nastať situácia, kde na strane terčiku aj na strane projektilu vznikne extrémne ťažký objekt. Tieto dva objekty sa potom rozpadajú v niekoľkých krokoch až na stabilné častice. Takýto pohľad je extrémny, ale vyvoláva prirodzenú otázku, či sa v skutočnosti pri trhaní strún neprodukujú aj ťažšie rezonancie. Pre experimentátorov je dôležitá otázka, čo môže v nazeraní na svet povedať experiment. Práve otázka produkcie ťažkých rezonancií (napr.  $N^*(1440)$ ,  $N^*(1520)$ ,  $N^*(1680)$ , ...) môže priniesť informácie o dynamike zrážky. Navyše otázky rezonančnej dominancie, teda koľko protónov, piónov a podobne pochádza z rezonancií, či koľko  $\Delta$  rezonancií pochádza z rozpadov iných rezonancií, nemožno uzavrieť bez dôkladného preštudovania produkcie rezonancií. Práve priniesť nové informácie o produkcii rezonancií je cieľom tejto práce.

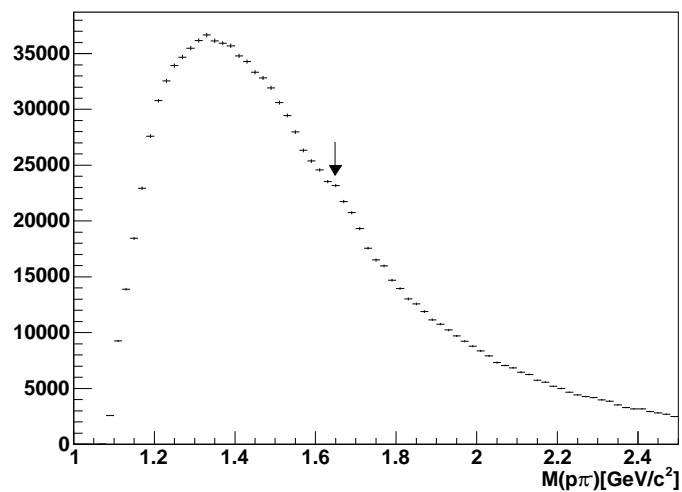
Ako prvý výsledok je na grafe 4  $X_F$  rozdelenie všetkých štyroch  $\Delta$  rezonancií v  $pp$  zrážkach. Vo všetkých prípadoch okrem  $\Delta^-$  rezonancie som svoje výsledky porovnal s existujúcimi meraniami a možno skonštatovať celkom



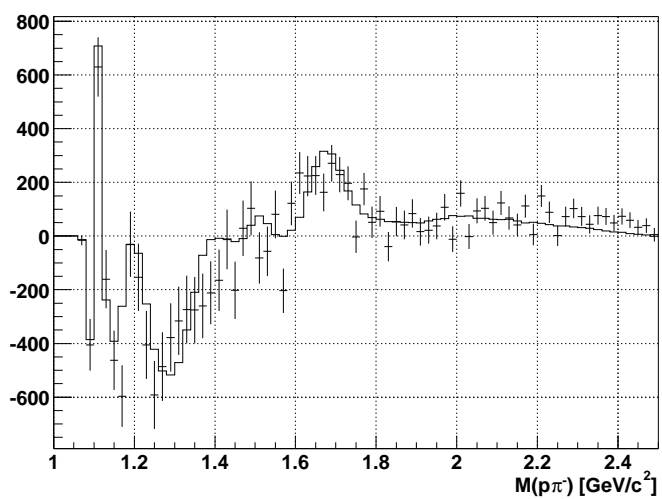
Obrázok 4: Inkluzívne  $X_F$  rozdelenie  $\Delta$  rezonancií v  $pp$  zrážkach. Výsledky pre  $\Delta^0$  sú mierne posunuté k menšiemu  $X_F$  kvôli prehľadnosti.

dobrú zhodu. Celkove možno povedať, že po vykonaní korekcií na známe systematické efekty je tu priestor, aby výsledky experimentu NA49 boli najlepšie dostupné výsledky pre produkciu  $\Delta$  rezonancií. Navyše ide o prvé meranie účinného prierezu  $\Delta^-$  rezonancie.

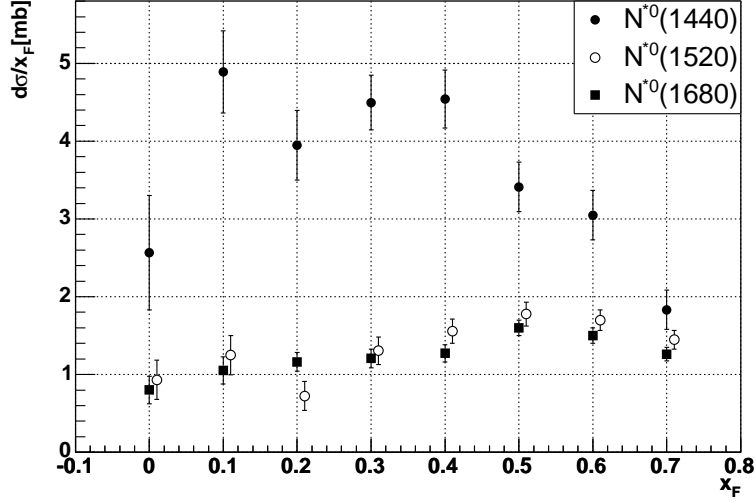
Najdôležitejším výsledkom mojej práce je ukázanie, že v  $pp$  zrážkach sa produkujú aj  $N^{*0}$  rezonancie a získanie ich  $X_F$  rozdelenia. Ide o prvé meranie takého rozsahu pre tieto častice. Doteraz boli pozorované  $N^*$  rezonancie iba v difrakcii s  $X_F$  blízky jednotke. Ide teda o dôležité meranie, ktoré môže napomôcť lepšiemu chápaniu  $pp$  zrážok. Na obrázku 5 je rozdelenie invariantných hmotností párov  $p\pi^-$ , v ktorom je viditeľný náznak píku s hmotnosťou zhruba  $1680\text{MeV}$ . Na získanie tohto rozdelenia boli použité iba páry, ktoré mali priečne hybnosti orientované proti sebe. Obrázok 6 ukazuje príklad odčítaného rozdelenia z metódy miešania udalostí, kde je taktiež viditeľný pík s rovnakou hmotnosťou. Na to, aby sa dalo popísať odčítané rozdelenie získané metódou miešania udalostí, treba uvažovať okrem  $\Lambda$ ,  $\Delta^0$  a  $N^{*0}(1680)$  rezonancií, ktoré sú viditeľné, aj  $N^{*0}(1440)$  a  $N^{*0}(1520)$ . Ešte treba podotknúť, že existujú dve rezonancie s hmotnosťami  $1520\text{MeV}$  a  $1535\text{MeV}$  a tri rezonancie s hmotnosťami  $1650\text{MeV}$ ,  $1675\text{MeV}$  a  $1680\text{MeV}$ . Keďže však experimentálne nie sme schopní rozlíšiť rezonancie ležiace blízko seba, tak pod rezonanciou  $N^{*0}(1520)$  rozumiem efektívnu rezonanciu popisujúcu sumu  $1520\text{MeV}$  a  $1535\text{MeV}$  a podobne pod rezonanciou  $N^{*0}(1680)$  rozumiem efektívnu rezonanciu nahradzu-



Obrázok 5: Rozdelenie invariantných hmotností párov  $p\pi^-$  v  $pp$  zrážkach. Na rozdelení je náznak píku s hmotnosťou okolo  $1680\text{MeV}$ .



Obrázok 6: Príklad odčítaného rozdelenia v kanáli  $p\pi^-$  v  $pp$  dátach. Rozdelenie zodpovedá  $X_F(\Delta) \in \langle 0.15; 0.25 \rangle$ , pričom body predstavujú dáta a plná čiara komplementárnu Monte Carlo simuláciu na popis tohoto rozdelenia.



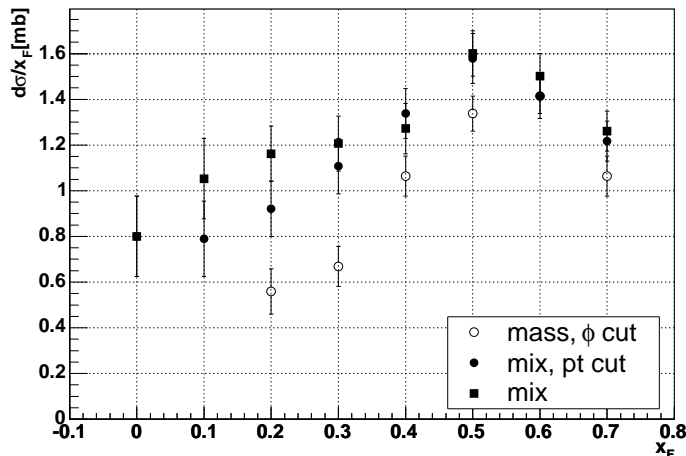
Obrázok 7: Inklusívne  $X_F$  rozdelenie  $N^{*0}(1440)$ ,  $N^{*0}(1520)$  a  $N^{*0}(1680)$  rezonancií v  $pp$  zrážkach. Výsledky pre  $N^{*0}(1520)$  sú mierne posunuté k vyššiemu  $X_F$  kvôli prehľadnosti.

júcu tri rezonancie s hmotnosťou blízkou  $1680\text{MeV}$ .  $X_F$  rozdelenie zmerané pomocou metódy miešania udalostí pre spomínané tri  $N^{*0}$  rezonancie je na obrázku 7. Za účelom otestovania, že získané výsledky sú v poriadku, som extrahoval účinný prierez pomocou metódy miešania udalostí s obmedzením na  $p_T$  piónov. Toto obmedzenie bolo, že  $p_T$  piónu musí byť väčšie ako  $400\text{MeV}$ . Takéto obmedzenie efektívne spôsobí, že potlačí páry s nízkou invariantnou hmotnosťou, kým párov s vyššími invariantnými hmotnosťami sa dotkne v oveľa menšej miere. Navyše pre rezonancie  $N^{*0}(1520)$  a  $N^{*0}(1680)$  som účinný prierez extrahoval aj pomocou fitovania rozdelenia invariantných hmotností funkciou

$$f(M) = (A \cdot M^2 + B \cdot M + C) \cdot e^{-D \cdot M} + E \cdot BW_{1520}(M) + F \cdot BW_{1680}(M) \quad (1)$$

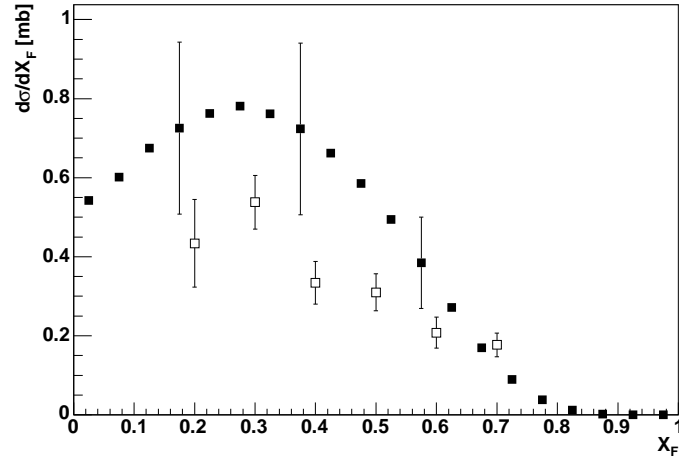
kde  $A-F$  sú fitovacie parametre a  $BW_{1520}(M)$  a  $BW_{1680}(M)$  sú Breit-Wignerove funkcie pre rezonancie  $N^{*0}(1520)$  a  $N^{*0}(1680)$ . Interval pre fit bol od  $1.4\text{GeV}$  do  $2.5\text{GeV}$  (viď obrázok 5). Porovnanie všetkých troch metód pre rezonanciu  $N^{*0}(1680)$  je na obrázku 8. Ako vidno, možno skonštatovať celkom dobrú zhodu medzi jednotlivými metódami, takže sa možno oprávnene domnievať, že získané účinné prierezy sú v poriadku.

Inou možnosťou, ako skontrolovať, že získané účinné prierezy sú v poriadku

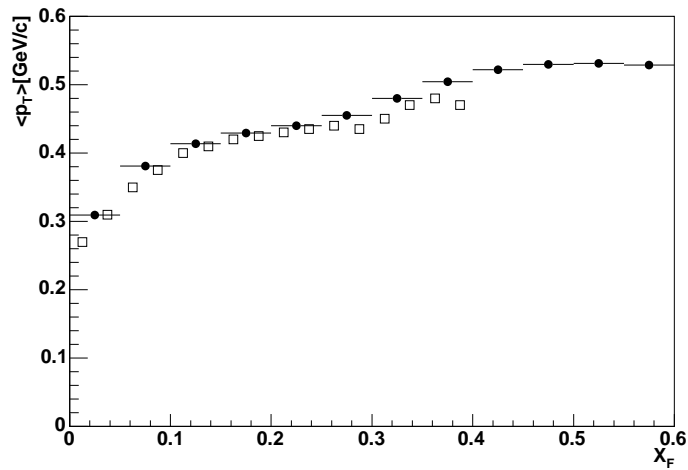


Obrázok 8: Inkluzívny diferenciálny účinný prierez produkcie  $N^{*0}(1680)$  rezonancie v  $pp$  interakciách. Prázdne krúžky sú výsledky získané fitovaním rozdelenia invariantných hmotností pozadím plus pikmi, plné krúžky pomocou miešania udalostí s použitím iba piónov s  $p_T > 400 MeV$  a štvorčeky pomocou miešania udalostí s použitím všetkých piónov.

je otestovať, či výsledky pre rôzne častice nie sú v priamom rozpore. Môžeme napríklad skontrolovať, že množstvo protónov z rozpadov skúmaných rezonancií nepresahuje množstvo všetkých vyprodukovaných protónov. To isté možno urobiť aj s neutrónmi, či piónmi. V mojej práci sa tieto porovnania nachádzajú, pričom možno konštatovať, že jednotlivé výsledky si neprotirečia. Navyše v niektorých prípadoch si možno všimnúť veľkú podobnosť tvaru  $X_F$  rozdelenia častíc z rozpadov rezonancií a meraného  $X_F$  rozdelenia, čo naznačuje, že rezonancie môžu hrať významnú úlohu v  $pp$  zrážke. Po prvýkrát je však vďaka výsledkom tejto práce možno začať porovnávať merané  $X_F$  rozdelenie  $\Delta$  rezonancií s  $X_F$  rozdelením  $\Delta$  rezonancií pochádzajúcich z rozpadov  $N^*$  rezonancií. Na obrázku 9 je porovnanie pre  $\Delta^-$  rezonanciu, ktoré naznačuje, že všetky  $\Delta^-$  rezonancie produkované v  $pp$  zrážke pochádzajú z rozpadov  $N^{*0}$  rezonancií. Fakt, že  $X_F$  rozdelenie z rozpadov  $N^{*0}$  je vyššie ako merané  $X_F$  rozdelenie, je spôsobený tým, že nie všetky systematické efekty pri absolútnej normalizácii účinných prierezov  $\Delta^-$  a  $N^{*0}$  boli zahrnuté, pričom treba povedať, že nezahrnuté efekty v prípade  $\Delta^-$  spôsobujú podhodnotenie účinného prierezu a naopak v prípade  $N^{*0}$  rezonancií jeho nadhodnotenie. Okrem toho, v samotnej simulácii na zistenie  $X_F$  rozdelenia  $\Delta^-$  pochádzajúcich z rozpadov  $N^{*0}$  je chyba asi 30%, ktorá pochádza z experimentálnej chyby celkových



Obrázok 9:  $X_F$  rozdelenie  $\Delta^-$  rezonancie v  $pp$  zrážkach. Prázdne štvorčeky zobrazujú meranie experimentu NA49 a plné štvorčeky zobrazujú  $\Delta^-$  rezonancie pochádzajúce z rozpadov  $N^{*0}$  rezonancií. Chyby na prázdnych štvorčkoch sú len odhadom na ilustráciu ich veľkostí. Všetky štvorčeky majú relatívnu chybu podobnej veľkosti.



Obrázok 10: Závislosť strednej hodnoty pričnej hybnosti kladných piónov v závislosti od ich  $X_F$ . Prázdne symboly sú dáta experimentu NA49 a plné symboly častice pochádzajúce z rozpadov rezonancií.

účinných prierezo  $N^{*0}$  rezonancií a parametrizácie ich  $X_F$  rozdelenia. Posledným porovnaním je seagull (stredná hodnota priečnej hybnosti v závislosti od  $X_F$  častice) pre protóny a kladné pióny. Ako vidno na obrázku 10, závislosť kladných piónov pochádzajúcich z rozpadov rezonancií je opäť veľmi podobná meranej závislosti. Na základe týchto výsledkov možno povedať, že merané účinné prierezy pre produkciu rezonancií vyzerajú byť rozumné. Okrem toho porovnanie ukazuje, že rezonancie hrajú významnú úlohu v  $pp$  zrážkach.

Ďalšie rozvinutie týchto myšlienok potrebuje meranie účinného prierezu pre produkciu  $N^{*+}$  rezonancií. Ide však o podstatne náročnejšie meranie ako v prípade  $N^{*0}$ , keďže tieto sa rozpadajú buď dvojčasticovo, pričom jedna z dcérskych častíc je neutrálna, alebo trojčasticovo, čo prináša problém v podobe väčšieho kombinatorického pozadia.

## 7 Záver

Táto práca sa zaoberá štúdiom produkcie rezonancií v protón-protónových zrážkach. Štúdium bolo robené v rámci experimentu NA49, ktorý má jeden z najväčších súborov dát dostupných v produkčnom experimente.

Ciele tejto práce, ktoré boli spomenuté v jej úvode, boli podľa môjho názoru splnené.

Hlavným cieľom práce bolo zistiť, či sa spomedzi baryónových rezonancií rodia v  $pp$  zrážkach okrem  $\Delta$  rezonancie aj rezonancie s vyššími hmotnosťami. Konkrétne som ukázal, že v  $pp$  zrážkach sa rodia  $N^{*0}$  rezonancie s hmotnosťami  $1440\text{MeV}$ ,  $1520\text{MeV}$  a  $1680\text{MeV}$ . Za použitia metódy miešania udalostí som z dát experimentu NA49 extrahoval ich diferenciálny inkluzívny účinný prierez v závislosti od  $X_F$  a to nielen pre spomenuté  $N^{*0}$ , ale aj pre všetky štyri nábojové stavy  $\Delta$  rezonancie. Na to, aby bolo vôbec možné extrahovať tieto účinné prierezy, bolo potrebné zdokonaľiť metódu miešania udalostí a ukázať, že sa dá použiť aj pre viacero rezonancií v danom rozpadovom kanáli. Tu sa mi podarilo ukázať, že metóda naozaj pracuje, na jednoduchom štatistickom modeli. Okrem toho som metódu dôkladne overil aj Monte Carlo simuláciách.

Využívajúc získané účinné prierezy spolu s poznatkami o produkcii mezónových rezonancií, ktoré pochádzajú z iných prác, som preštudoval dôsledky produkcie rezonancií na pozdĺžne rozdelenia piónov, protónov a neutrónov. Okrem toho som porovnal seagull protónov a kladných piónov so seagullom protónov a kladných piónov pochádzajúcich z rozpadov rezonancií. Z tejto časti je najzaujímavejšie porovnanie účinného prierezu pre produkciu  $\Delta^-$  rezonancie s  $\Delta^-$  rezonanciami pochádzajúcimi z rozpadu  $N^{*0}$ , ktoré naznačuje, že všetky vyprodukované  $\Delta^-$  rezonancie pochádzajú práve z rozpadov  $N^{*0}$  rezonancií.



Ďalej som porovnal získané výsledky s modelmi FRITIOF, VENUS a NE-XUS, pričom toto porovnanie ukazuje, že lepšie vedomosti o produkcii rezonancií sú potrebné na ďalšie vylepšenie týchto modelov.

Navyše som navrhol aj ďalšie možnosti, kam by sa mohlo uberať pokračovanie štúdia rezonancií v experimente NA49. Pri tomto návrhu som vychádzal z momentálnej dostupnosti dát v experimente NA49, takže všetky navrhnuté merania by mali byť realizovateľné z pohľadu existencie dát.

## 8 Summary.

In this work, a study of baryonic resonances in  $pp$  collisions was done. I have concentrated on the production of the  $\Delta$  and  $N^{*0}$  resonances in the  $pp$  data from the NA49 experiment. In the technical part the NA49 detector is briefly described and the feeddown correction to stable hadrons in  $pp$  and  $\pi p$  interactions is calculated.

In any study of high energy resonance production, one of the biggest problems is the extraction of resonances from the combinatorial background. To solve this problem the event mixing technique was invented long time ago. However, the method is still not completely understood. Already at the time when it was invented there were experiments, for which this technique didn't work. Although the experience at the NA49 with this method is generally positive further study of the method was needed since the aim was to study higher-mass nucleon resonances. In this study I showed, that the method can be used (in a suitable modification) for the extraction of resonances also in the case, where we have more than one baryonic resonance in a given channel.

Using the proposed method I obtained the  $X_F$  distributions of all the four charge states of the  $\Delta$  resonance in  $pp$  interactions. In addition it was shown, that also the  $N^{*0}$  resonances are produced in  $pp$  interactions and the  $X_F$  distributions of the  $N^{*0}(1440)$ ,  $N^{*0}(1520)$  and  $N^{*0}(1680)$  were obtained. In the case of the  $\Delta^-$ ,  $N^{*0}(1440)$ ,  $N^{*0}(1520)$  and  $N^{*0}(1680)$  this is the first measurement of  $X_F$  distribution in  $pp$  collisions ever.

## 9 Zoznam prác dizertanta.

### 9.1 Publikácie v časopisoch

1. M. Kreps et al., Baryon and anti-baryon production in hadron hadron and hadron nucleus interactions, Nucl.Phys. **A715**(2003)502–505
2. C. Alt, . . . , M. Kreps, . . . , Observation of an exotic S=-2, Q=-2 baryon

resonance in proton proton collisions at the CERN SPS, hep-ex/0310014, akceptované vo Phys. Rev. Lett.

3. C. Blume, ..., M. Kreps, ..., Results on correlations and fluctuations from NA49, Nucl.Phys. **A715**(2003)55–64
4. M. van Leeuwen, ..., M. Kreps, ..., Recent results on spectra and yields from NA49, Nucl.Phys. **A715**(2003)161–170
5. A. Mischke, ..., M. Kreps, ..., Energy dependence of lambda and anti-lambda production at CERN-SPS energies, Nucl.Phys. **A715**(2003)453–457
6. C. Alt, ..., M. Kreps, ..., Direct and elliptic flow of charged pions and protons in Pb+Pb collisions at  $40\text{AGeV}$  and  $158\text{AGeV}$ , Phys.Rev. **C68**(2003)034903
7. A. Wetzler, ..., M. Kreps, ..., Direct and elliptic flow in Pb+Pb collisions at  $40\text{AGeV}$  and  $158\text{AGeV}$ , Nucl.Phys. **A715**(2003)583–586
8. C. Hohne, ..., M. Kreps, ..., System size dependence of strangeness production at  $158\text{AGeV}$ , Nucl.Phys. **A715**(2003)474–477
9. H.G. Fischer, ..., M. Kreps, ..., Elementary hadronic interactions at the CERN SPS, Nucl.Phys. **A715**(2003)118–128
10. A. Rybicki, ..., M. Kreps, ..., Baryon number transfer in nuclear collisions at SPS energies, Acta Phys.Polon. **B33**(2002)1483–1494
11. H.G. Fischer, ..., M. Kreps, ..., Baryon number transfer and central net baryon density in elementary hadronic interactions, Acta Phys.Polon. **B33**(2002)1473–1482
12. S.V. Afanasiev, ..., M. Kreps, ..., Energy dependence of pion and kaon production in central Pb+Pb collisions, Phys.Rev. **C66**(2002)054902
13. T. Šuša, ..., M. Kreps, ..., Cascade production in p+p, p+A and A+A interactions at  $158\text{AGeV}$ , Nucl.Phys. **A698**(2002)491–494
14. V. Friese, ..., M. Kreps, ..., Production of strange resonances in C+C and Pb+Pb collisions at  $158\text{AGeV}$ , Nucl.Phys. **A698**(2002)487–490
15. S.V. Afanasiev, ..., M. Kreps, ..., New results from NA49, Nucl.Phys. **A698**(2002)104–111

16. S.V. Afanasiev, . . . , M. Kreps, . . . , Cascade and anti-cascade production in central Pb+Pb collisions at  $158\text{GeV}/c$  per nucleon, Phys.Lett. **B538**(2002)275–281
17. Kollegger, . . . , M. Kreps, . . . , Energy dependence of kaon production in central Pb+Pb collisions, J.Phys. **G28**(2002)1689–1696
18. S.V. Afanasiev, . . . , M. Kreps, . . . , Lambda production in central Pb+Pb collisions at CERN SPS energies, J.Phys. **G28**(2002)1761–1768
19. K.Kadija, . . . , M. Kreps, . . . , Strange particle production in p+p, p+Pb and Pb+Pb interactions from NA49, J.Phys. **G28**(2002)1675–1682
20. A.Mischke, . . . , M. Kreps, . . . , Lambda production in central Pb+Pb collisions at CERN-SPS energies, J.Phys. **G28**(2002)1761–1768

## 9.2 Interné publikácie.

1. J.Braciník, V.Černý, M.Kreps, Event mixing method for baryon resonance extraction in AA collisions, a feasibility study, NA49 Internal Note, 2001
2. M.Kreps, Feeddown correction for protons and antiprotons, NA49 Internal Note, 2001
3. M.Kreps, Reinteraction in the hydrogen target of the NA49 experiment, NA49 Internal Note, 2003
4. S.V. Afanasiev, . . . , M. Kreps, . . . , Progress report and beam request for 2002, CERN-SPSC-2002-008, CERN-SPSC-P-264-ADD-10, Marec 2002
5. S.V. Afanasiev, . . . , M. Kreps, . . . , Status and future of the NA49 program on nucleus nucleus collisions at low SPS energies, CERN-SPSC-2001-008, CERN-SPSLC-P-264-ADD-9, Marec 2001
6. M. Botje, . . . , M. Kreps, . . . , Additional information concerning future NA49 programme on hadronic physics with proton and pion beams, CERN-SPSC-2000-033, CERN-SPSLC-P-264-ADD-6, August 2000
7. M. Botje, . . . , M. Kreps, . . . , Status and future program of the NA49 experiment, CERN-SPSC-2000-011, CERN-SPSLC-P-264-ADD-5, Marec 2000

### 9.3 Vystúpenia na medzinárodných konferenciách a seminároch.

1. M.Kreps et al., Baryon and anti-baryon production in hadron hadron and hadron nucleus interactions, 16th International Conference on Ultra-relativistic Nucleus-Nucleus Collisions, Quark Matter 2002, Nucl.Phys. **A715**(2003)502–505
2. M.Kreps, Feeddown correction, NA49 Collaboration meeting, apríl 2001
3. M.Kreps, Inclusion of GTPC in the reconstruction, NA49 Collaboration meeting, apríl 2002

### Literatúra

- [1] S. Afanasiev et al., Nucl. Instrum. Meth. **A430** (1999), 210–244.
- [2] C. De Marzo et al., Nucl. Instrum. Meth. **217** (1983), 405–417.
- [3] K. Werner, Phys. Rept. **232** (1993), 87–299.
- [4] T. Nakada, Technical Report, č. CERN-EP/83-10, 1983.
- [5] D. Drijard, H. G. Fischer, T. Nakada, Nucl. Instr. Meth. **A225** (1984), 367.
- [6] D. L'Hote, Nucl. Instrum. Meth. **A337** (1994), 544–556.
- [7] J. Bracíník, *Plynové polohovocitlivé detektory vo fyzike vysokých energií*, Dizertačná práca, MFF-UK, Bratislava, 2000.
- [8] S. Jadach, Comp. Phys. Commun. **9** (1975), 297.
- [9] K. Fialkowski, W. Kittel, Rept. Prog. Phys. **46** (1983), 1283–1392.
- [10] B. Andersson, G. Gustafson, G. Ingelman, T. Sjöstrand, Phys. Rept. **97** (1983), 31–145.
- [11] T. Sjöstrand, Comput. Phys. Commun. **82** (1994), 74–90.
- [12] H. J. Drescher, M. Hladik, S. Ostapchenko, T. Pierog, K. Werner, Phys. Rept. **350** (2001), 93–289.