

PENTAKVARKOK

Dániel Barna

`barnad@rmki.kfki.hu`

KFKI Részecske- és Magfizikai Kutatóintézet, Budapest

&

CERN NA49 kísérlet

A történet kezdete ...

2003 Január: LEPS kísérlet (SPring-8, Japán)
PRL-hez beküldött cikke

⇒ Éles csúcs $m \approx 1540$ MeV-nél a
 nK^+ spektrumban

Csomó más kísérleti és elméleti cikk követte.

Miért ennyire érdekes ez az eredmény?

- ▶ Az új részecske barion: $B=1$
- ▶ Ritkasága: $S=+1 \Rightarrow$ egy \bar{s} kvarkot tartalmaz

Elméleti jóslatok motiválták a kutatást

Mire számíthatsz a következő 1 órában ...

- ▶ Néhány elméleti modell ...
- ▶ A friss kísérleti eredmények
(és a kísérletek, főleg NA49) áttekintése
- ▶ Régi eredmények áttekintése (miért csak most?)
negatív eredményekkel való konfrontáció

ELMÉLETEK

SU(3) alapok ...

Kvarkok: színesek — Megfigyelt hadronok: színtelenek
A legegyszerűbben így építhetők fel:

- ▶ $qqq \Rightarrow$ barionok $3 \otimes 3 \otimes 3 \supset 1$
- ▶ $q\bar{q} \Rightarrow$ mezonok $3 \otimes \bar{3} \supset 1$

De ez nem minden !!! Bonyolultabb állapotok is alkothatnak szín-szingletet!

- ▶ Tenger-kvark párok ($q\bar{q}$) jelen vannak (és fontosak) a hadronokban
- ▶ Szintén lehetséges: \bar{q} más ízű, mint bármelyik másik $q \Rightarrow$ nincs annihiláció

Penta/tetra-kvarkok: mik is ők?

- ▶ $qqqq\bar{q} \Rightarrow$ **pentakvark** (barion)
- ▶ $qq\bar{q}\bar{q} \Rightarrow$ **tetrakvark** (mezon)

Nyilvánvaló jel: **EXOTIKUS** részecskék megfigyelése
(olyan kvantum-# kombináció, ami nem létezhet 3-kvark rendszerre)

- ▶ Barion $S=+1$ ritkasággal \Rightarrow pár-nélküli \bar{s}
- ▶ Barion: $S=-2, Q=-2 \Rightarrow Q(ssq) \neq -2$

Ha a \bar{q} -nak van íz-partner q -ja \Rightarrow **nem-exotikus**

Elméleti jóslatok

A teljesség igénye nélkül ...

▶ **Bag model**

R.L. Jaffe, SLAC-PUB-1774 (1976)

D. Strottman, Phys. Rev. D20, 748 (1979)

▶ **Skyrme királis szolitonok:**

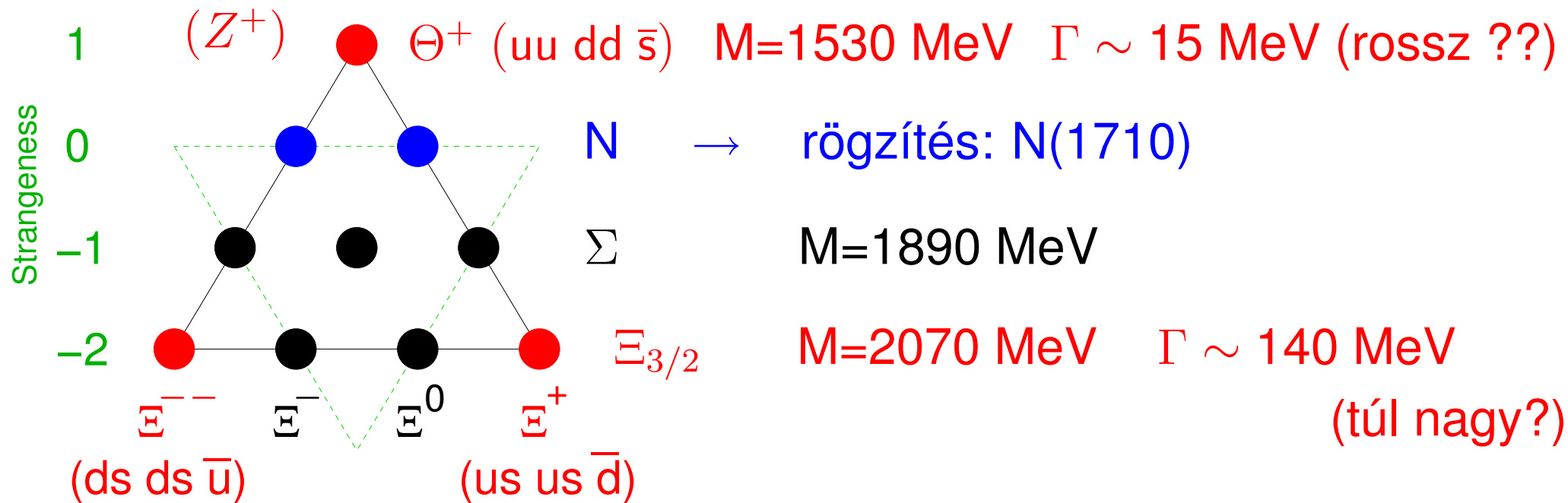
A. Manohar – Nucl. Phys. B248, 19 (1984) } kiterjesztés
M. Chemtob – Nucl. Phys. B256, 600 (1985) } hiperonokra

Diakonov, Petrov, Polyakov – Z. Phys. A359, 305 (1997)

Jóslat: exotikus barion anti-decouplet
⇒ tömeg & szélesség jóslatok
Ez volt a motiváló cikk a LEPS kísérletnek

A királis szoliton modell

Diakonov, Petrov, Polyakov – Z. Phys. A359, 305 (1997)



Jószolt paritás: pozitív

Korrelált (di-)kvark modell

R. Jaffe & F. Wilczek, arXiv:hep-ph/0307341 (2003),
arXiv:hep-ph/0401034

2 kvark egy **di-kvarkok** alkot: $[q_1 q_2]$

▶ Spin: 0

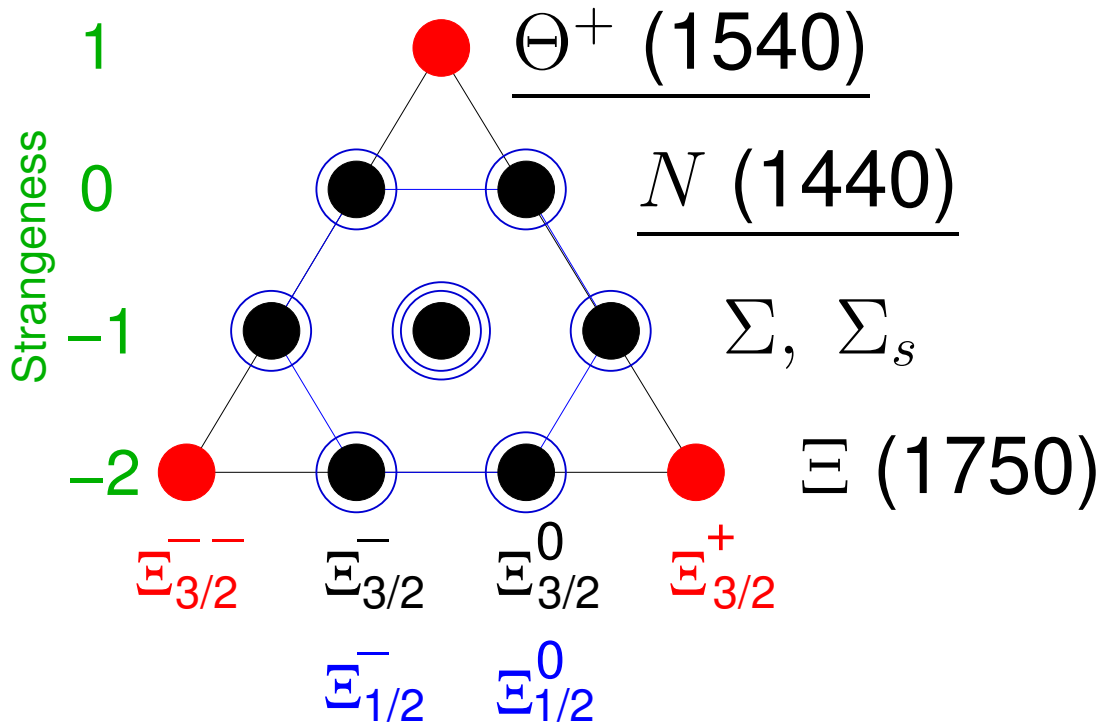
▶ $SU(3)_{\text{flavour}}$ & $SU(3)_{\text{colour}}$: $\bar{3}$ $(3 \otimes 3 \supset \bar{3})$

Pentakvark: $[q_1 q_2][q_3 q_4] \bar{q} \sim \bar{3} \otimes \bar{3} \otimes \bar{3} \supset 1$ ←(szín)
⇒ **Barion anti-decouplet** \oplus **octet** ←(íz)

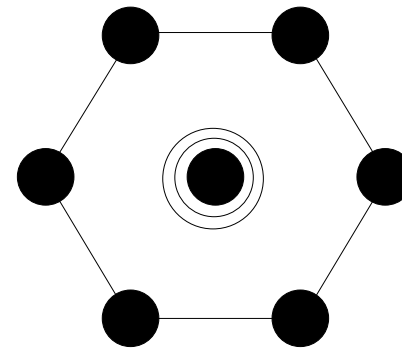
Tetrakvark: $[q_1 q_2][\bar{q}_3 \bar{q}_4] \sim \bar{3} \otimes 3 \supset 1$ ←(szín)
⇒ **Mezon oktet** (nem-exotikus) ←(íz)

Multipletetek a di-kvark modellben

Barionok



Mezonok

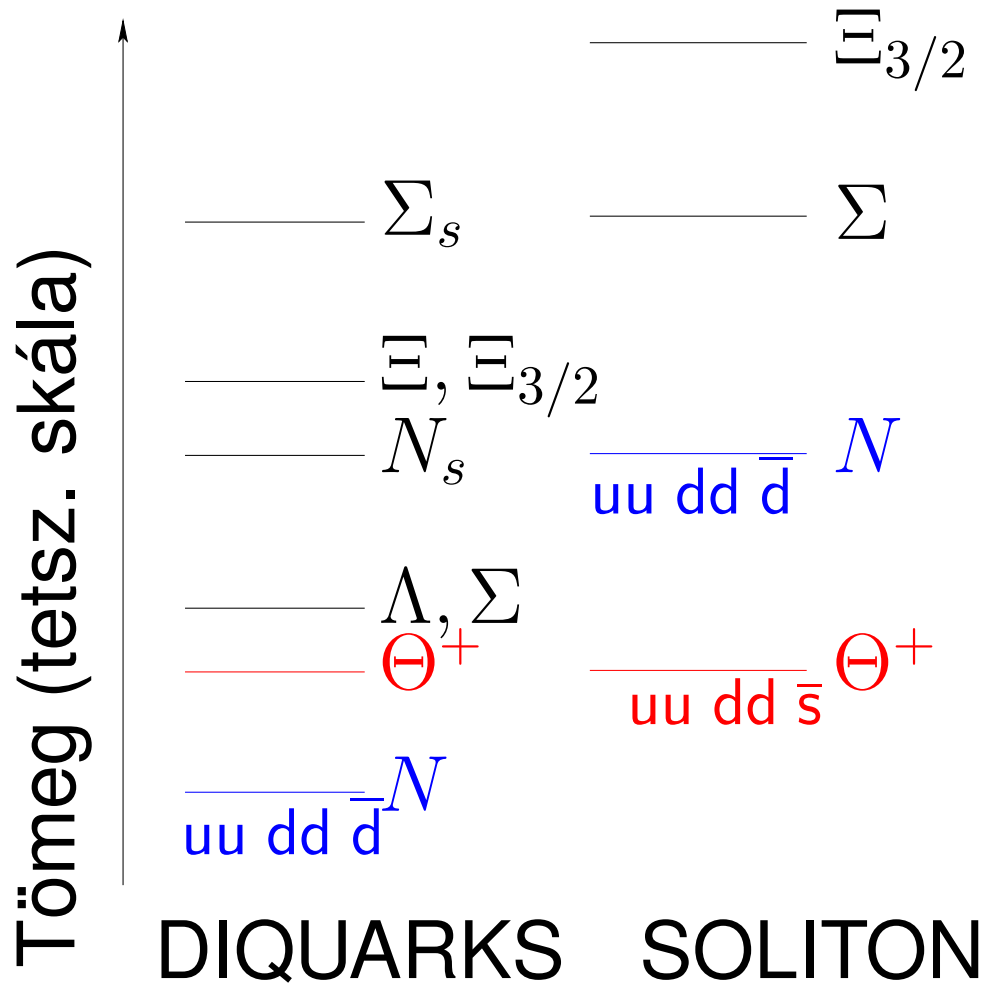


nem-exotikusak = ismert rezonanciák ???

Könnyű kvarkok (u,d,s) esetén: csak ezek a pentakvarkok!

Jószolt paritás: pozitív

Soliton vs. dikvark tömeghierarchia

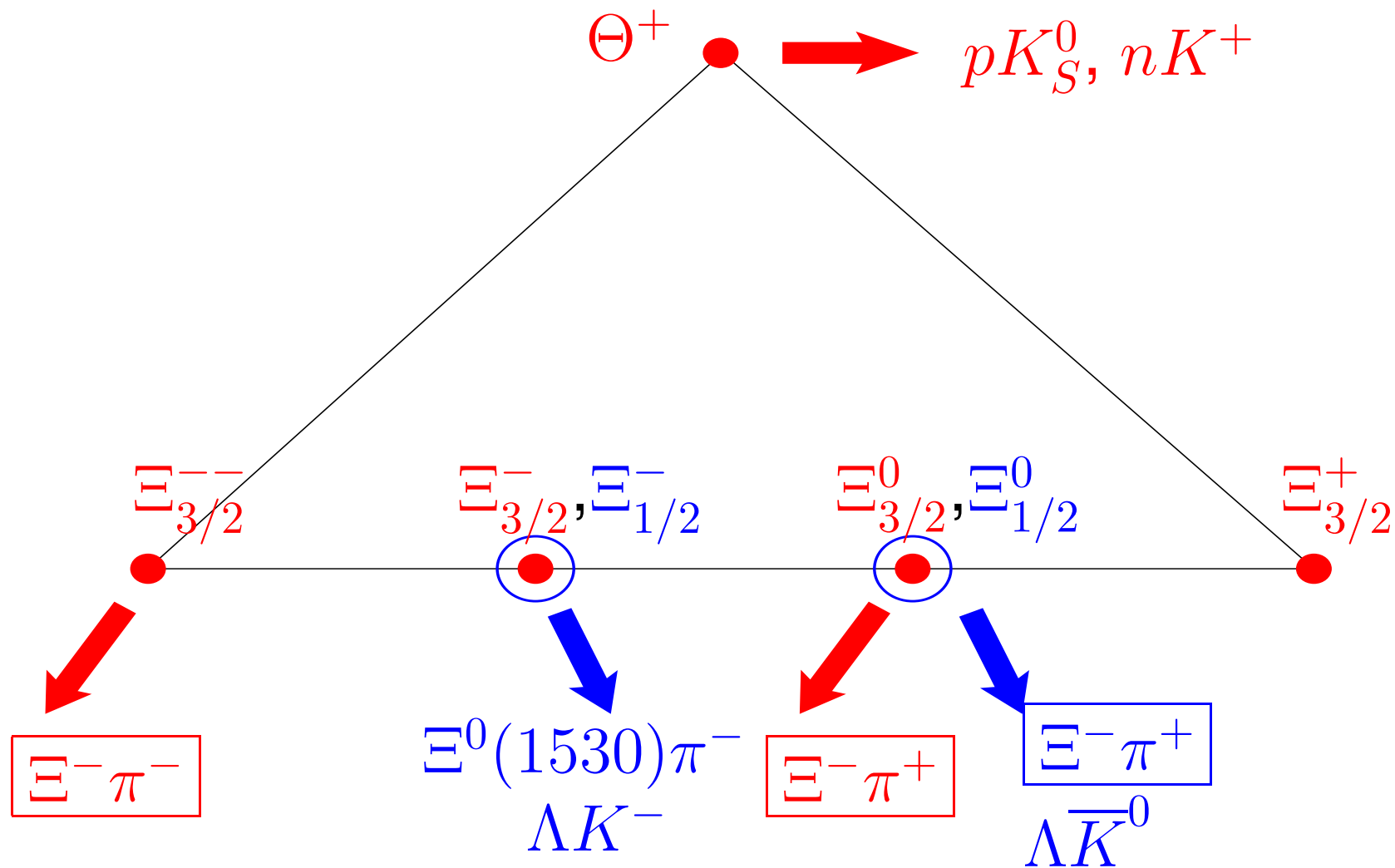


A legérdekesebb különbség:
a legkönnyebb barion

► Dikvark modell:
N (nem-exotikus, s kvark nélkül)

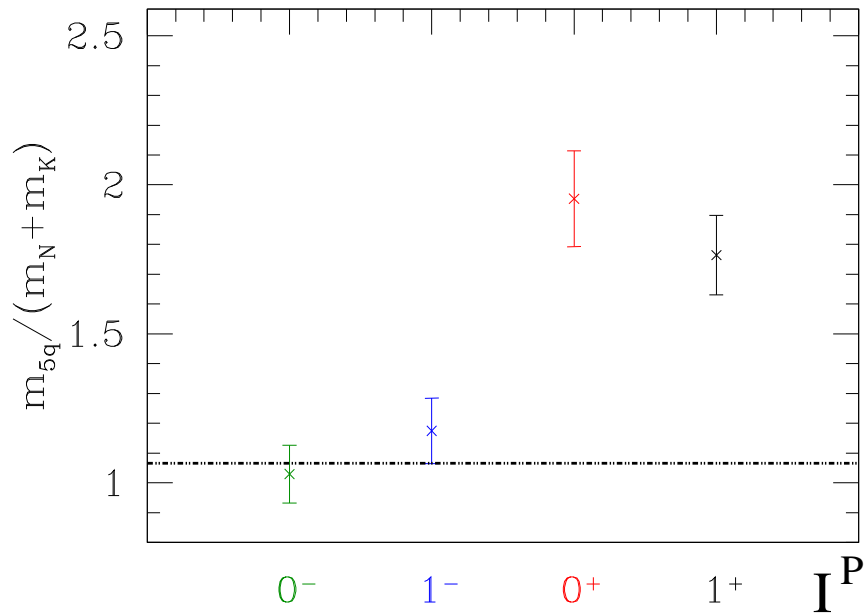
► Soliton modell:
 Θ^+ (exotikus, benne \bar{s})

Az exotikusok bomlási csatornái



Elmélet - Rács QCD

Csikor, Fodor, Katz, Kovács arXiv:hep-lat/0309090



Kísérleti érték a Θ^+ -ra

Jóslott paritás: negatív

ugyanezt jósolja:
arXiv:hep-lat/0310014

Elmélet – alternatívák

Lehet egy barion – mezon kötött állapot, “molekula”?

Szélesség ~ 100 MeV



Kísérletileg: $\Gamma_{\Theta} \lesssim 10\text{-}20$ MeV (kísérleti felbontás)

Nemkorrelált kvarkok?

Paritás: negatív

Különböző modellek különböző jóslatokkal !

FRISS KÍSÉRLETI EREDMÉNYEK

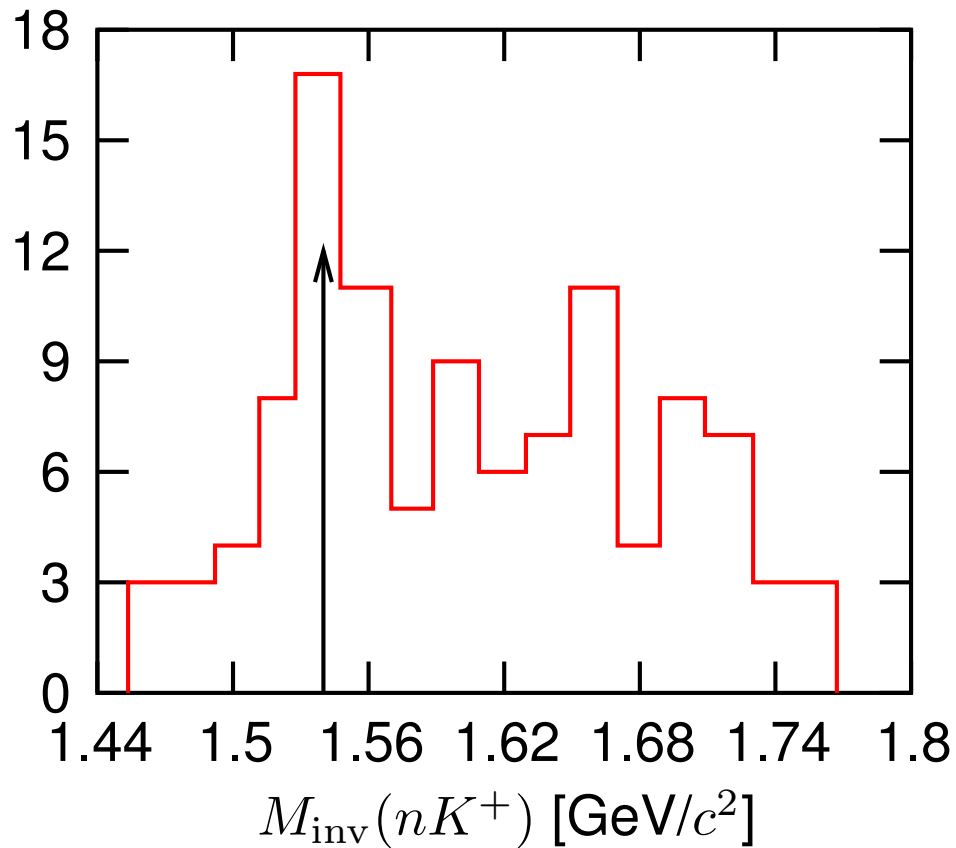
LEPS: #1

Reakció: $\gamma \ ^{12}\text{C} \rightarrow nK^+ K^-$ ($\gamma n \rightarrow nK^+ K^-$)

- ▶ Foton nyaláb:
 - ★ Laser fotonok, Compton-visszaszórva a tárológyűrű 8 GeV/c²-es elektronjairól
 - ★ Foton energia (<2.4 GeV) meghatározása: a szórt e⁻ energiájának mérésével
- ▶ Target: pasztik szcintillátor (C, H)
- ▶ $\gamma p \rightarrow K^+ K^- p$ reakciók kizárása: meglökött p detektálásával
- ▶ $M_{\text{inv}}(nK^+)$ meghatározása: hiányzó tömeg $M_{\text{missing}}(\gamma, K^-)$
- ▶ Korrekció a Fermi-mozgásra

LEPS: #1

Reakció: $\gamma \ ^{12}\text{C} \rightarrow nK^+ K^-$



$M = 1.54 \text{ GeV}$

Szignifikancia: 4.6σ

Phys.Rev.Lett. 91, 012002 (2003)

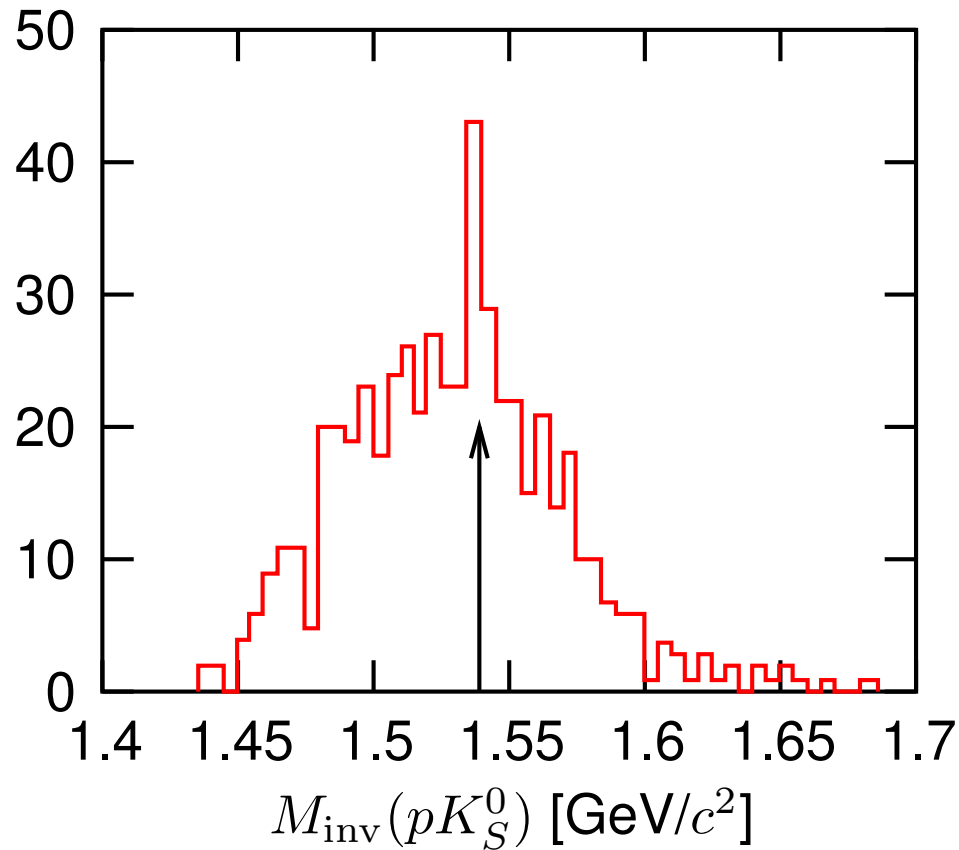
DIANA @ ITEP

Reakció: $K^+ \text{Xe} \rightarrow pK_S^0 \text{Xe}'$

- ▶ Nyaláb: 850 MeV K^+
- ▶ Target: folyékony xenon buborékkamra
- ▶ Részecskeazonosítás: specifikus ionizáció
- ▶ Nincs mágneses tér \Rightarrow momentum meghatározása: részecske úthossza a xenonban

DIANA @ ITEP

Reakció: $K^+ \text{Xe} \rightarrow p K_S^0 \text{Xe}'$



$M = 1.539 \text{ GeV}$

Szignifikancia: 4.4σ

arXiv:hep-ex/0304040

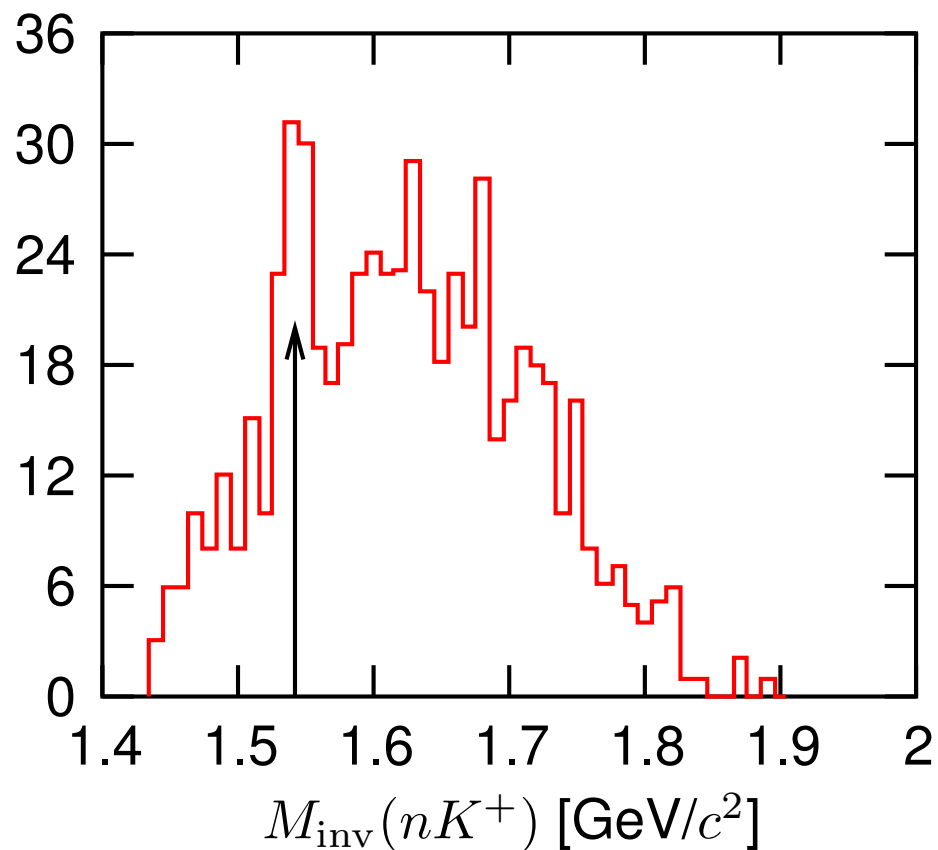
CLAS @ JLAB

Reakció: $\gamma d \rightarrow p n K^+ K^-$

- ▶ Nyaláb: elektron fékezési sugárzás anyagban \implies fotonok
- ▶ Target: folyékony deutérium
- ▶ Végállapot:
 - ★ detektált: $p K^+ K^-$
 - ★ Hiányzó tömeg = M_{neutron}
- ▶ p szintén detektálva \implies Fermi-mozgás korrekciója nem szükséges

CLAS @ JLAB

Reakció: $\gamma d \rightarrow pnK^+K^-$



$M = 1.542 \text{ GeV}$

Szignifikancia: 5.3σ

arXiv:hep-ex/0307018

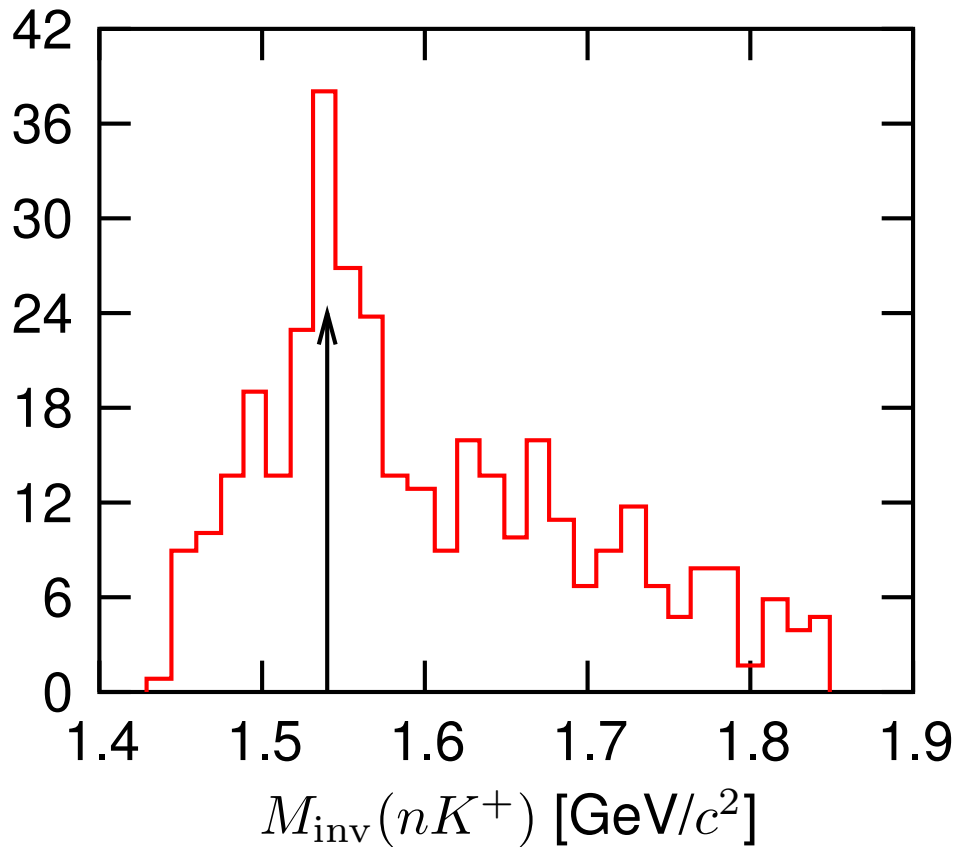
SAPHIR @ ELSA

Reakció: $\gamma p \rightarrow n K^+ K_S^0$

- ▶ Foton nyaláb:
 - ★ e^- fékezési sugárzása rézben
 - ★ Foton-energia meghatározása: szórt e^- mérésével
- ▶ Target: folyékony hidrogén
- ▶ Tracking: driftkamra mágneses térben (\Rightarrow töltés és momentum-meghatározás)
- ▶ n mérés: hiányzó energia, impulzus

SAPHIR @ ELSA

Reakció: $\gamma p \rightarrow nK^+ K_S^0$



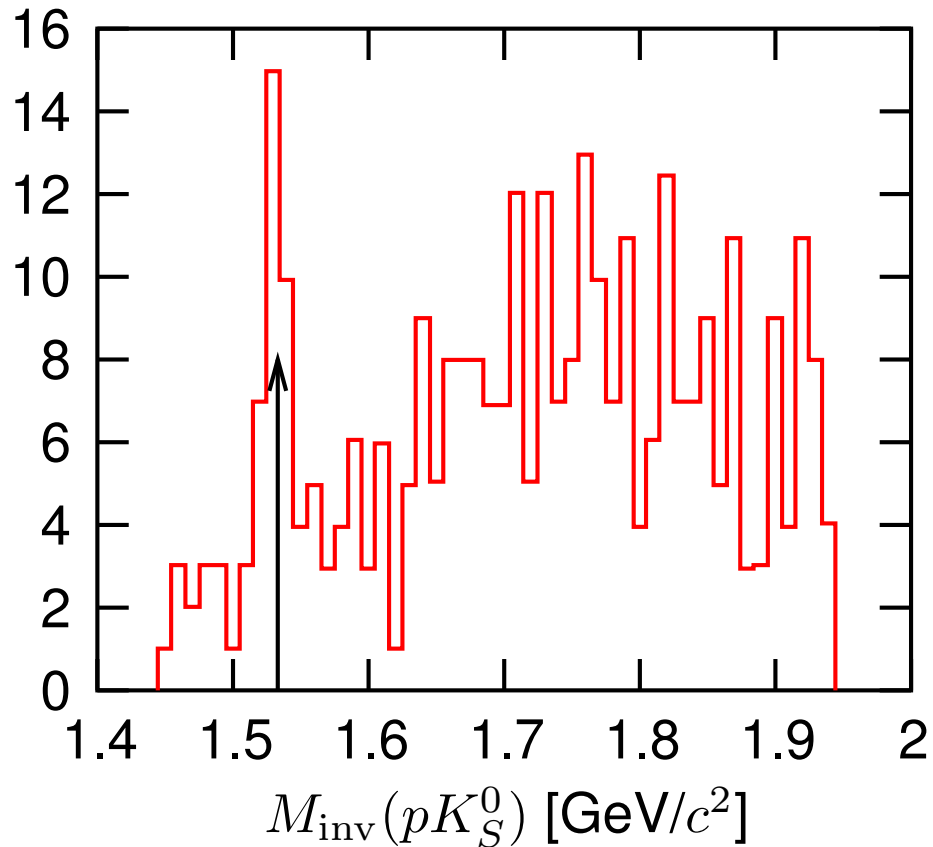
$M = 1.54 \text{ GeV}$

Szignifikancia: 4.8σ

arXiv:hep-ex/0307083

νA ütközések

Buborékkamrás kísérletek kombinált adatai
BEBC (CERN), 15-foot chamber (Fermilab)



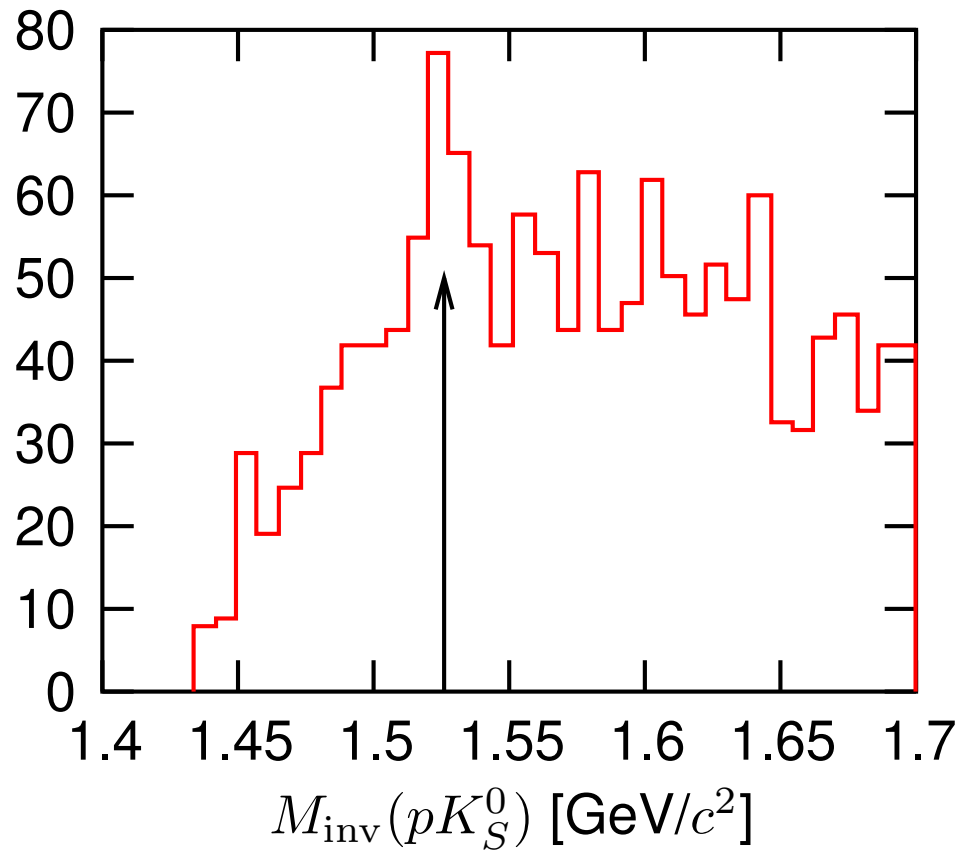
$M = 1.533 \text{ GeV}$

Szignifikancia: 6.7σ

arXiv:hep-ex/0309042

HERMES @ DESY

Reakció: $e d \rightarrow pK_S^0 X$



$M = 1.526 \text{ GeV}$

Szignifikancia: 4-5 σ

Phenix @ RHIC: $\bar{\Theta}^+$

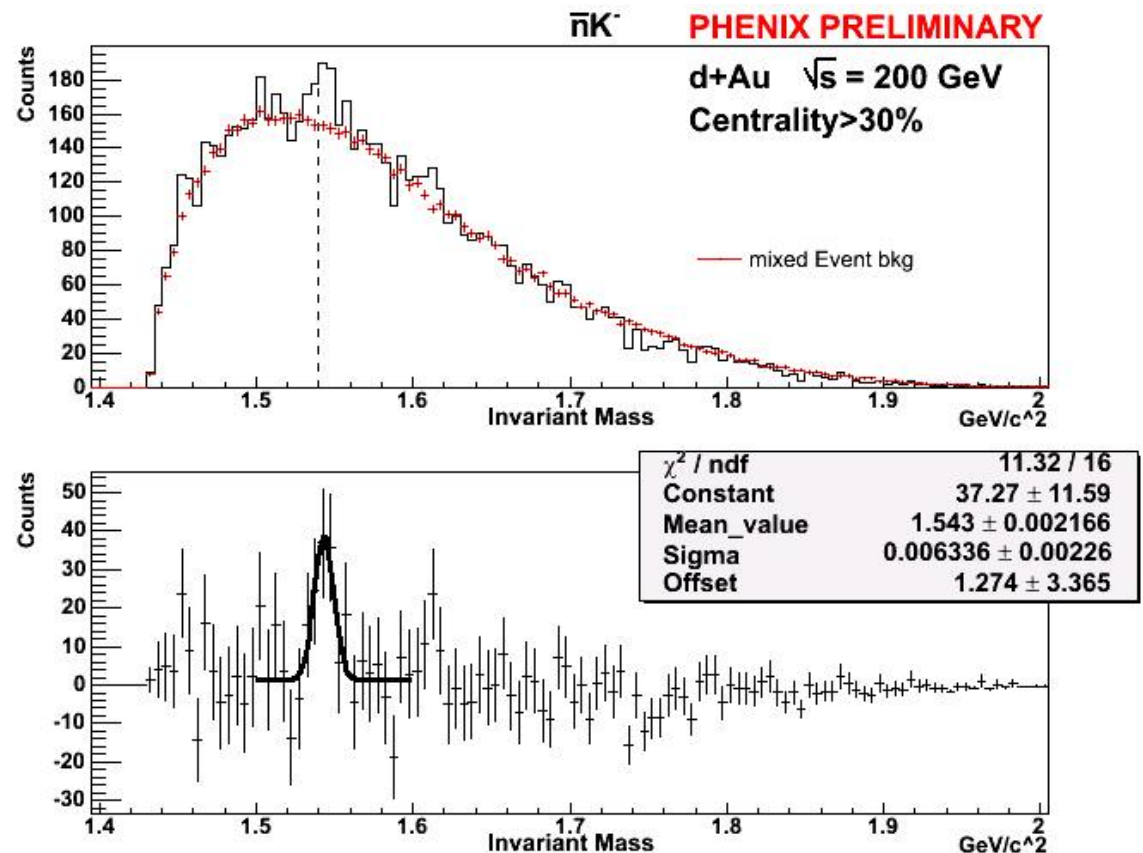
Reakció: $d \text{ Au} \rightarrow \bar{n} K^- X$

Csak periférikus
eseményekben!

Antineutron:
annihilációs cluster
az EM kaloriméter-
ben

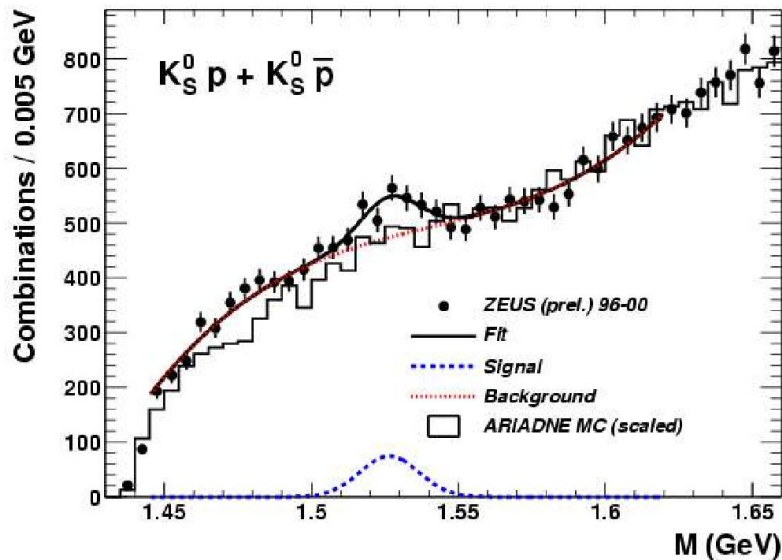
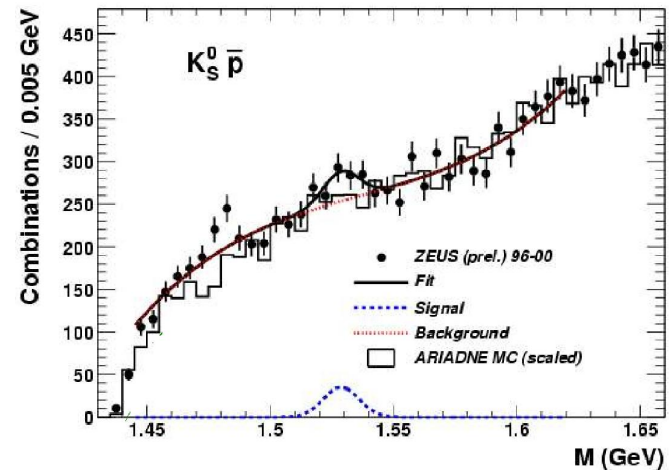
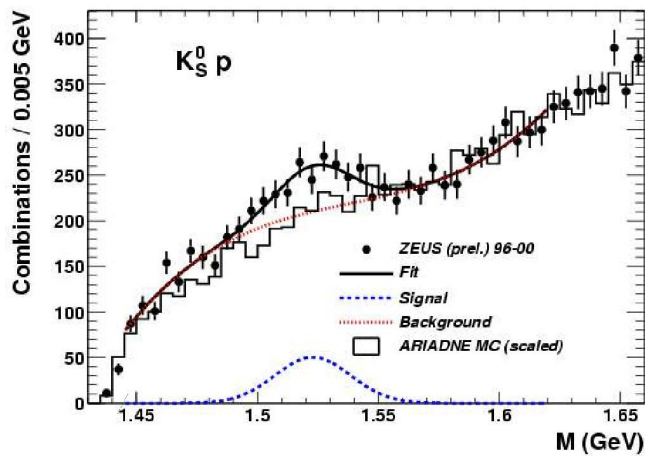
\bar{n} momentum
meghatározás:
repülési időből

Chris Pinkenburg (Phenix)
Poszter: QM2004
(Január 11-17)



ZEUS @ DESY

Reakció: $e^+p, e^-p \rightarrow K_S^0 p$ or $K_S^0 \bar{p} + X$



$$M = 1.527 \pm 2 \text{ GeV}$$

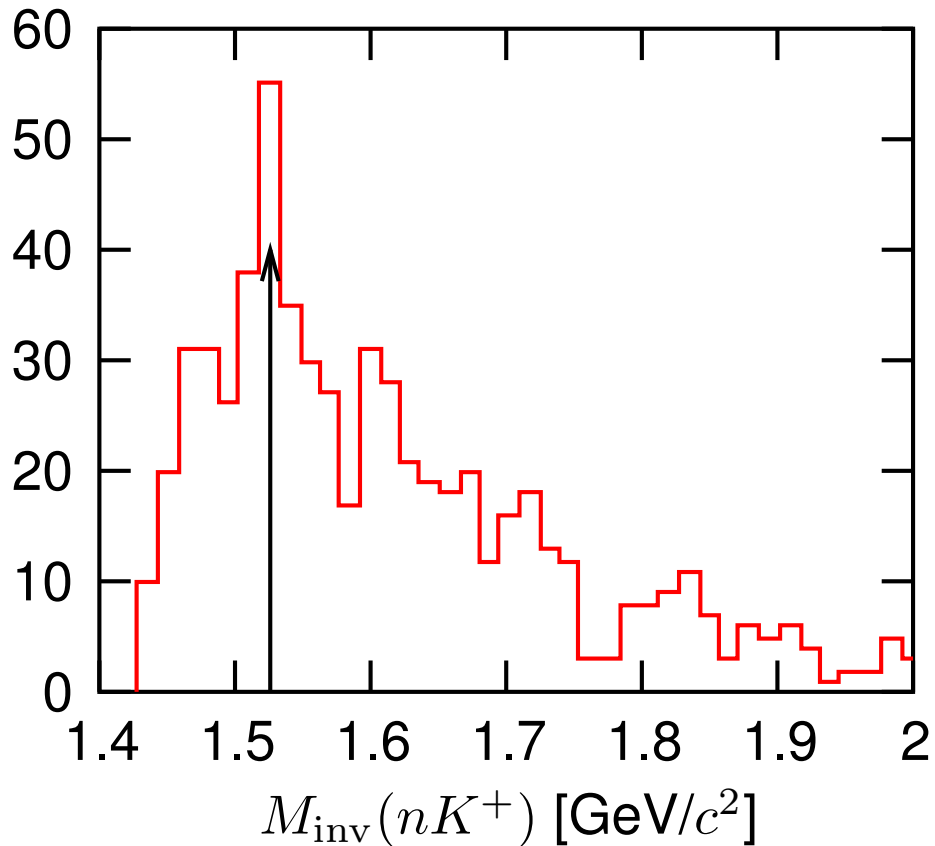
$$\Gamma = 10 \pm 2 \text{ MeV}$$

<http://www.desy.de/f/seminar/Chekanov.pdf>

SVD @ IHEP

Reakció: $p + A \rightarrow pK_S^0 X$

$E_{\text{beam}} = 70 \text{ GeV}$












$M = 1.526 \text{ GeV}$

Szignifikancia: 5.6σ

arXiv:hep-ex/0401024

Kísérleti összefoglaló

Kísérlet	Tömeg [MeV]	Széles. [MeV]	Szignif.	
LEPS	1540 ± 10	$\Gamma < 25$	4.6	 nK^+
DIANA	1539 ± 2	$\Gamma < 9$	4.4	 pK_S^0
CLAS	1542 ± 5	$\Gamma < 21$	5.3	 nK^+
SAPHIR	$1540 \pm 4 \pm 2$	$\Gamma < 25$	4.8	 nK^+
νA	1533 ± 5	$\Gamma < 20$	6.7	 pK_S^0
HERMES	1526 ± 2.5	$\Gamma < 20$	5.6	 pK_S^0
Phenix	1543 ± 2	6 ± 2		 $\bar{n}K^-$
SVD	1526 ± 6	$\Gamma < 24$	5.6	 pK_S^0
ZEUS	1527 ± 2	10 ± 2		 $pK_S^0, \bar{p}K_S^0$

Tömeg: többnyire konzisztens eredmények

pK_S^0 csatornában kisebb tömeg ???

Szélesség: $\Gamma \lesssim 10\text{-}20$ MeV (kísérleti felbontás)

Friss, negatív kísérletek

- ▶ STAR @ RHIC: nincs jel p+p, d+Au, Au+Au ütközésekben
(<http://www.jlab.org/intralab/calendar/archive03/pentaquark/talks/salur.pdf>)
- ▶ HERA-B @ DESY: nincs jel p+C, p+Ti, p+W ütközésekben
(<http://www-rnc.lbl.gov/qm2004/talks/parallel/Friday03/KTKnoepfle.pdf>)
- ▶ Cosy: állítólag láttak csúcsot p+p ütközésekben
(ha megkövetelik egy Σ^+ jelenlétét), de nem mutattak ábrát
(<http://www.jlab.org/intralab/calendar/archive03/pentaquark/talks/stroeher.pdf>)

Első pozitív kísérletek: γ vagy lepton (or K^+) nyalábok

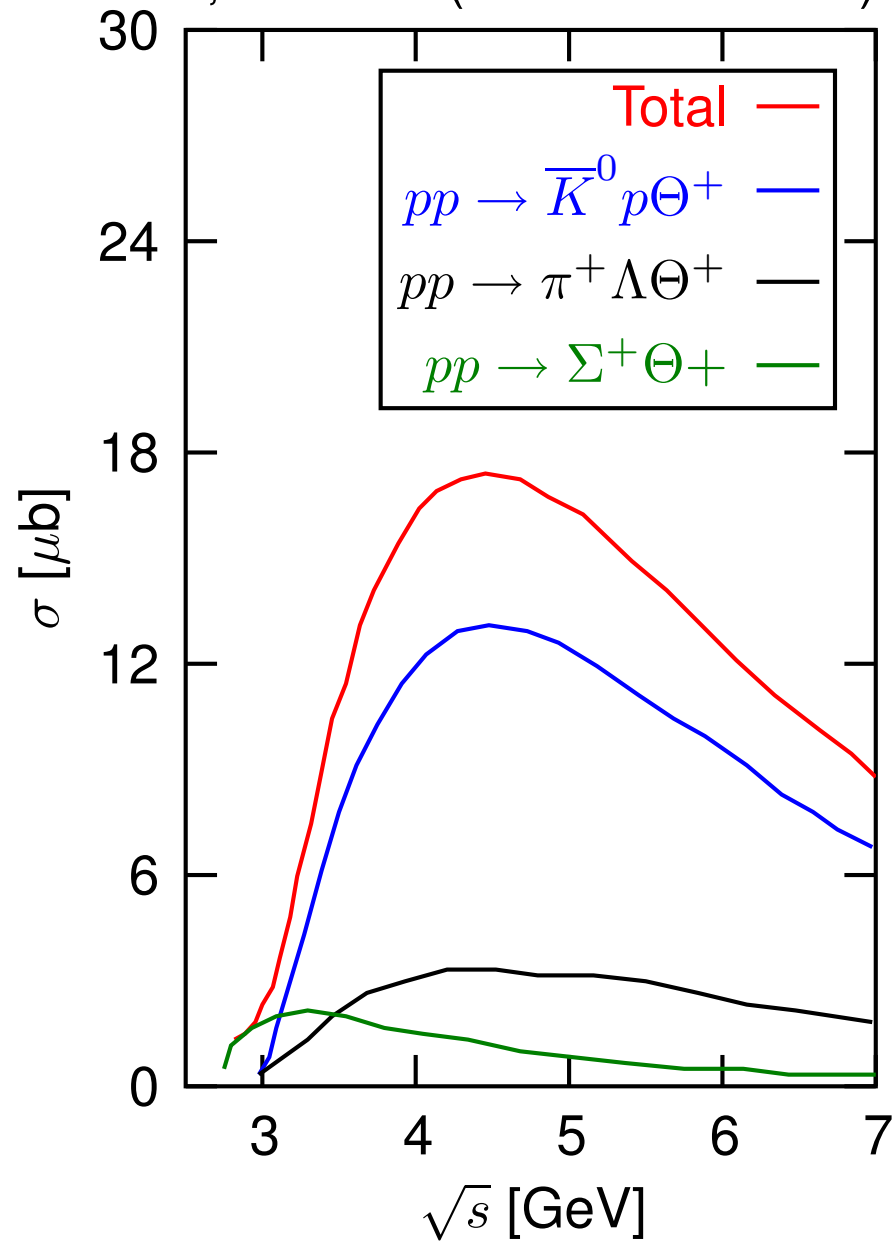
Nukleáris reakciók: későbbiek vagy eredménytelenek

Nukleáris reakciók rosszabbak a Θ^+ megfigyeléséhez?

Miért rosszak a nukleáris reakciók?

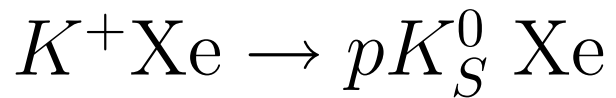
- ▶ Túl sok háttér (az energiával növekszik)
- ▶ Θ^+ keltési h.keresztszmet csökken az energiával?
(NA49: $\sqrt{s} = 17$ GeV
RHIC: $\sqrt{s} = 200$ GeV)

W. Liu, C.M. Ko (nucl-th/0308034)



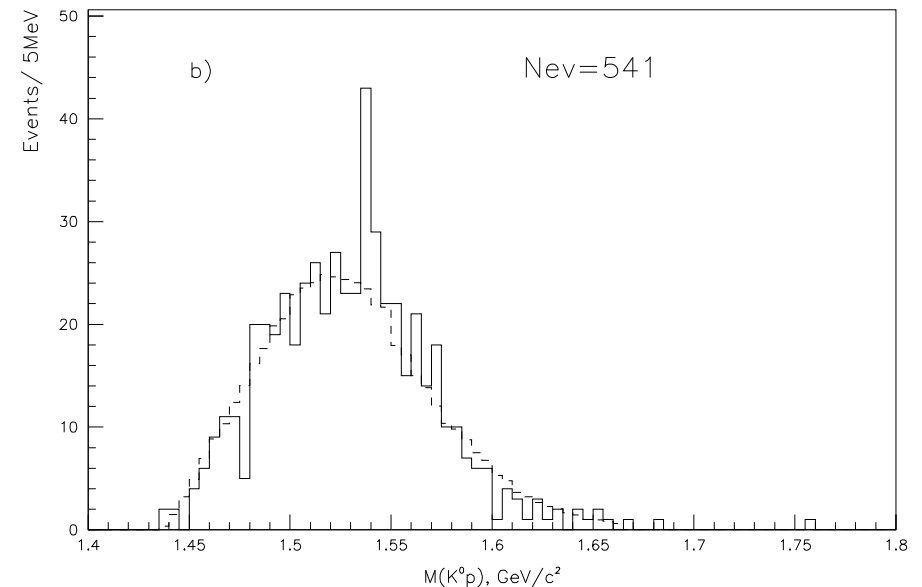
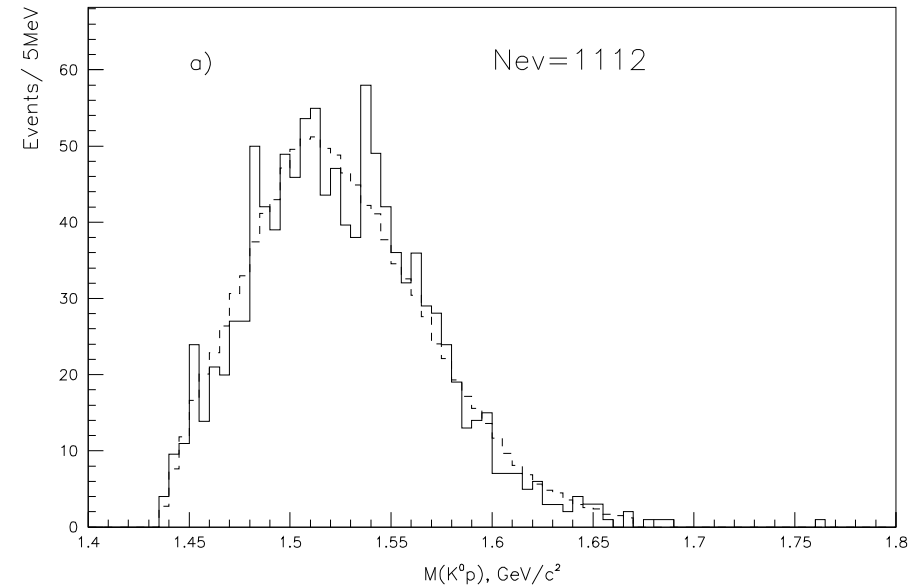
Miért rosszak a nukleáris reakciók?

► DIANA kísérlet:



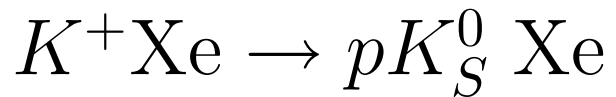
a jel csak akkor szignifikáns, ha K_S^0 or p nem szóródik a magban

K_S^0 és p back-to-back a transzverz síkban \implies



Miért rosszak a nukleáris reakciók?

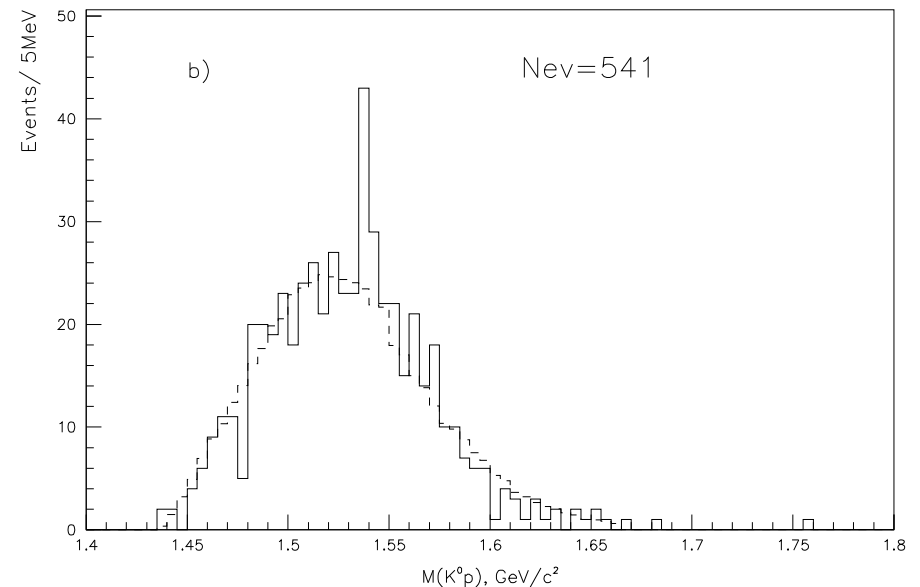
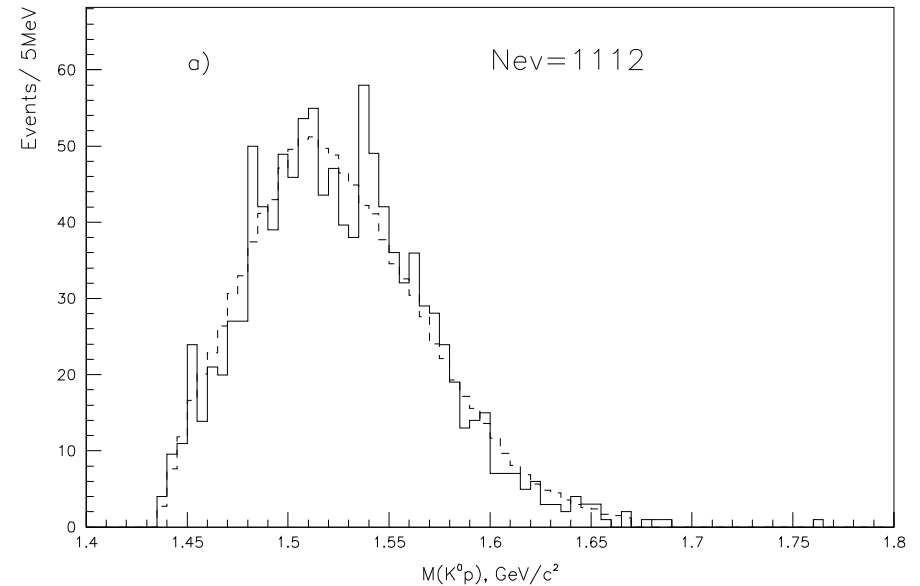
► DIANA kísérlet:



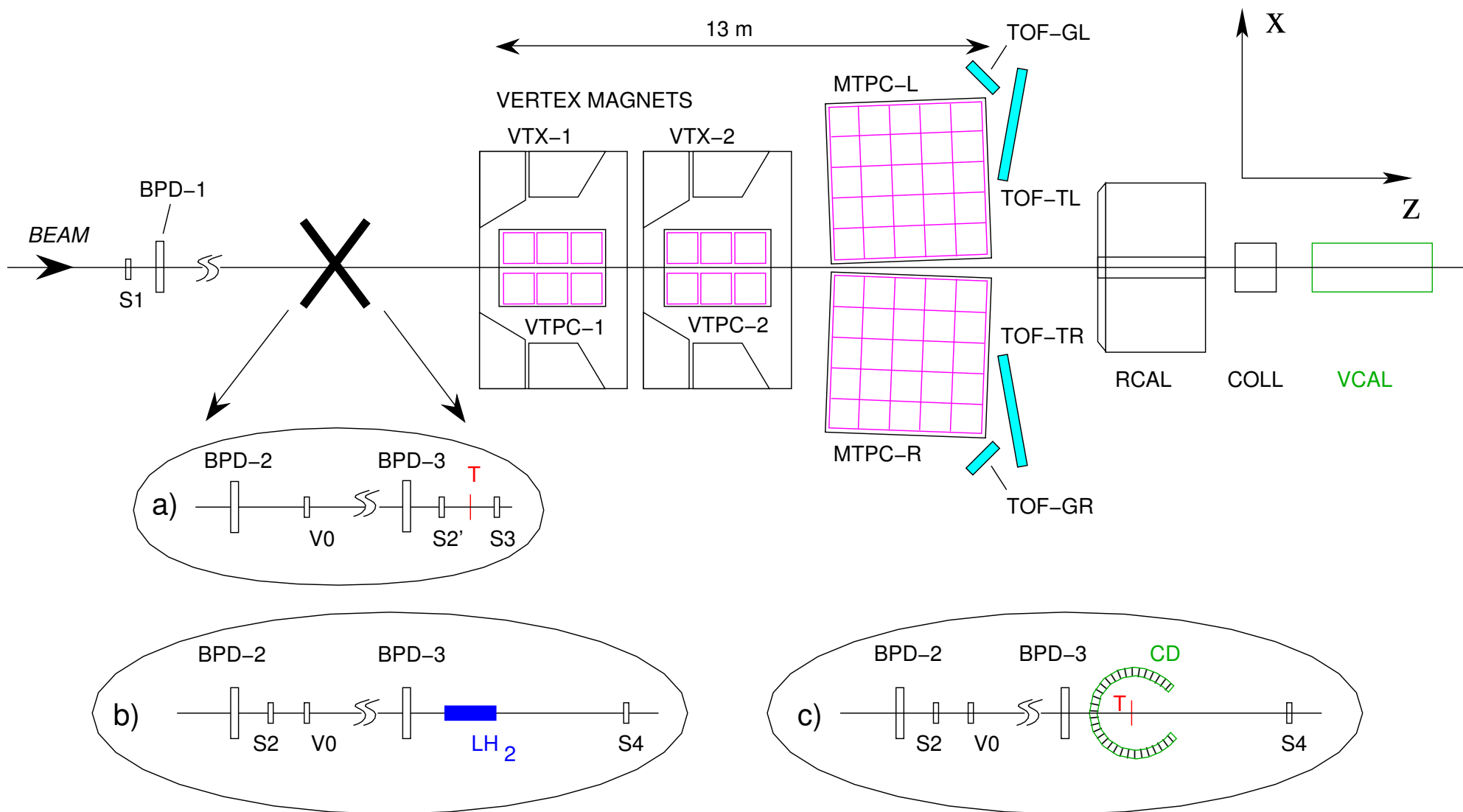
a jel csak akkor szignifikáns, ha K_S^0 or p nem szóródik a magban

K_S^0 és p back-to-back a transzverz síkban \implies

► Phenix: jel csak periférikus d+Au ütközésekben látható



Az NA49 kísérlet



NA49: adatok és célok

p+p ütközések $\sqrt{s} = 17.2$ GeV energián

Eseményválogatás után (elsődleges vertex helye, stb)

3.76 M events

A vágyott részecskék:

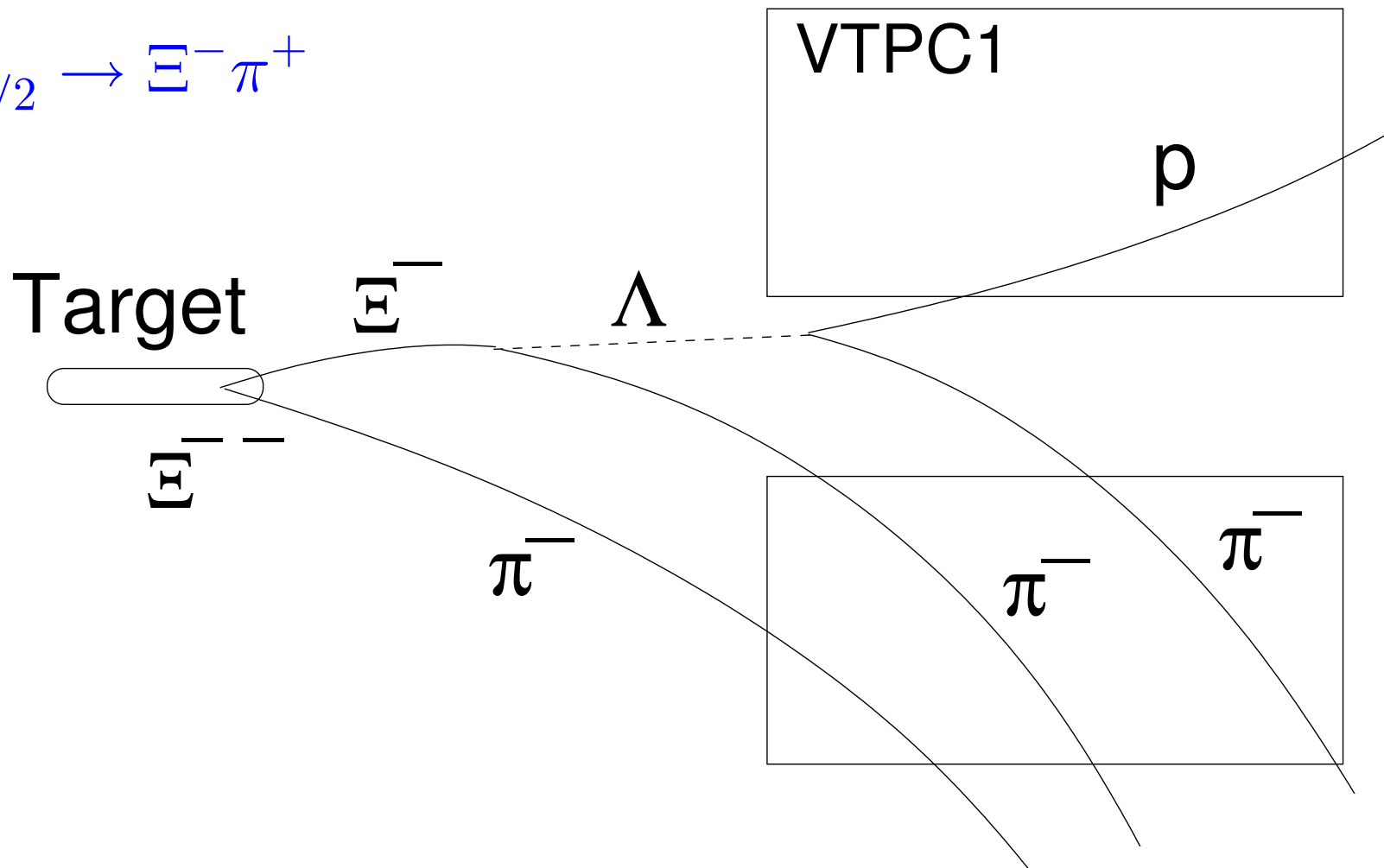
▶ $\Xi_{3/2}^-$

▶ Θ^+

$\Xi_{3/2}$ bomlási topológia

$$\Xi_{3/2}^{--} \rightarrow \Xi^{-} \pi^{-}$$

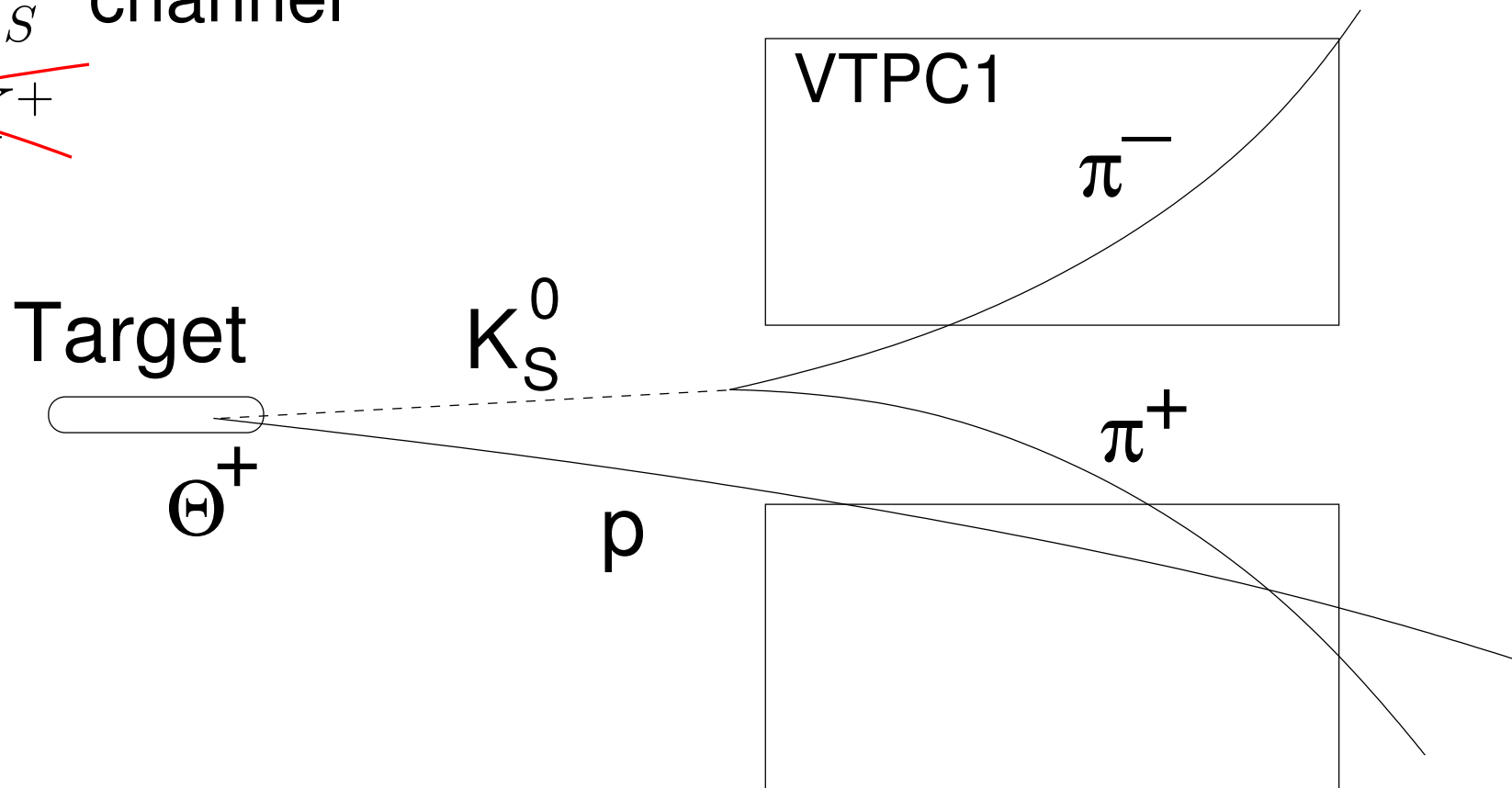
$$\Xi_{3/2}^0 \rightarrow \Xi^{-} \pi^{+}$$



Θ^+ bomlási topológia

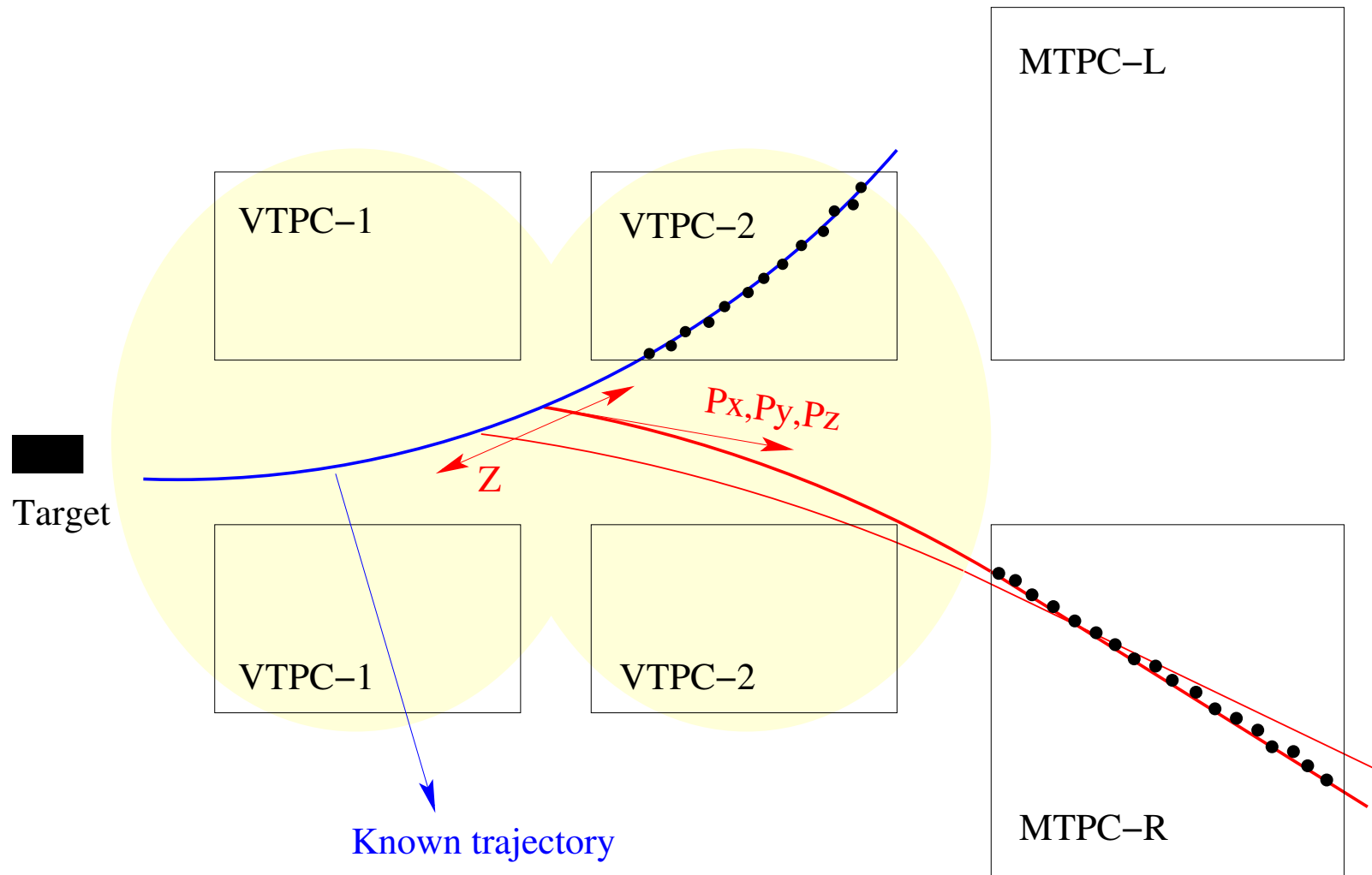
$\Theta^+ \rightarrow pK_S^0$ channel

~~$\Theta^+ \rightarrow nK^+$~~

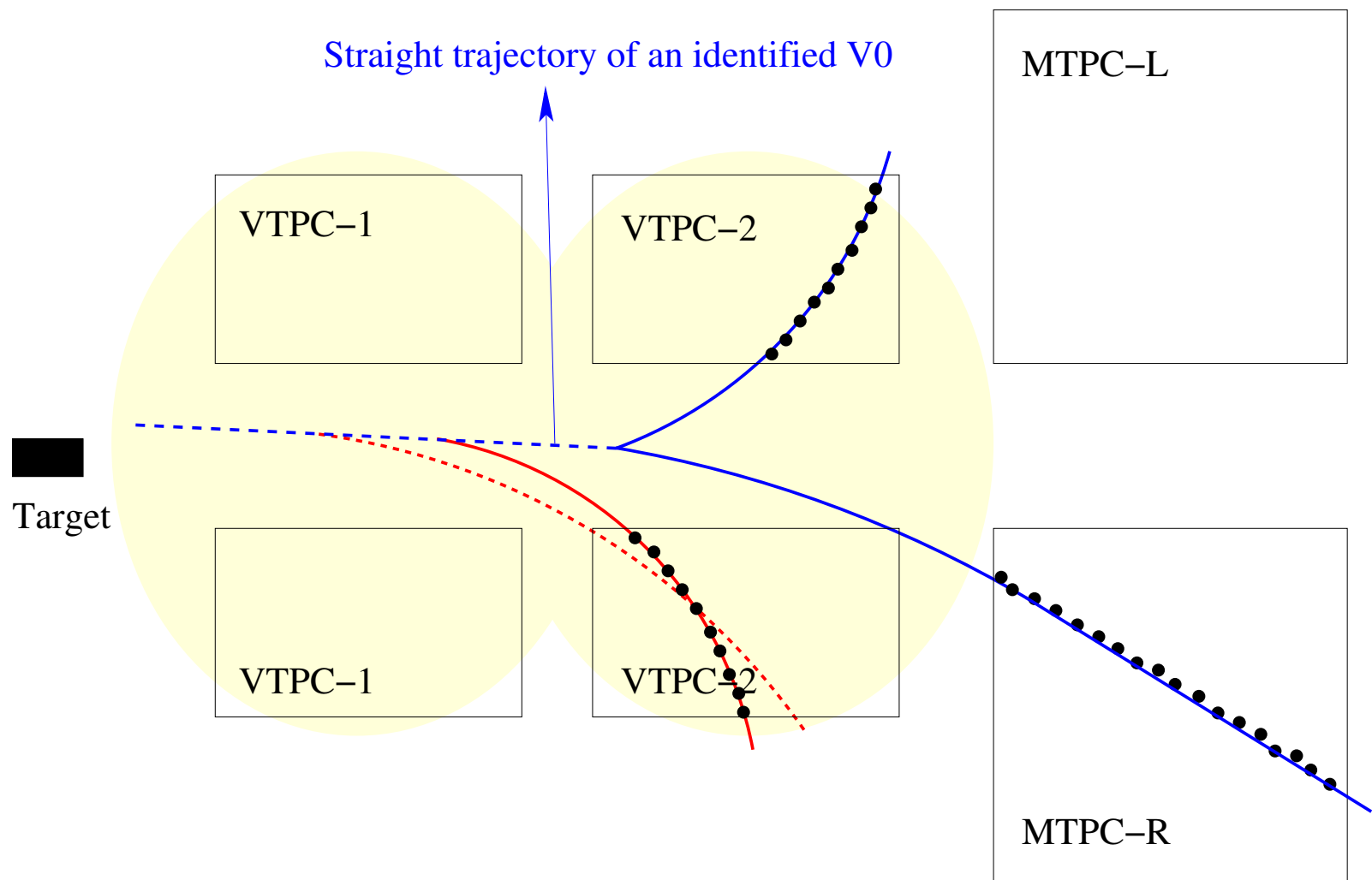


Mindkét részecskéhez szükség van V^0 (és kaszkád) rekonstrukcióra!

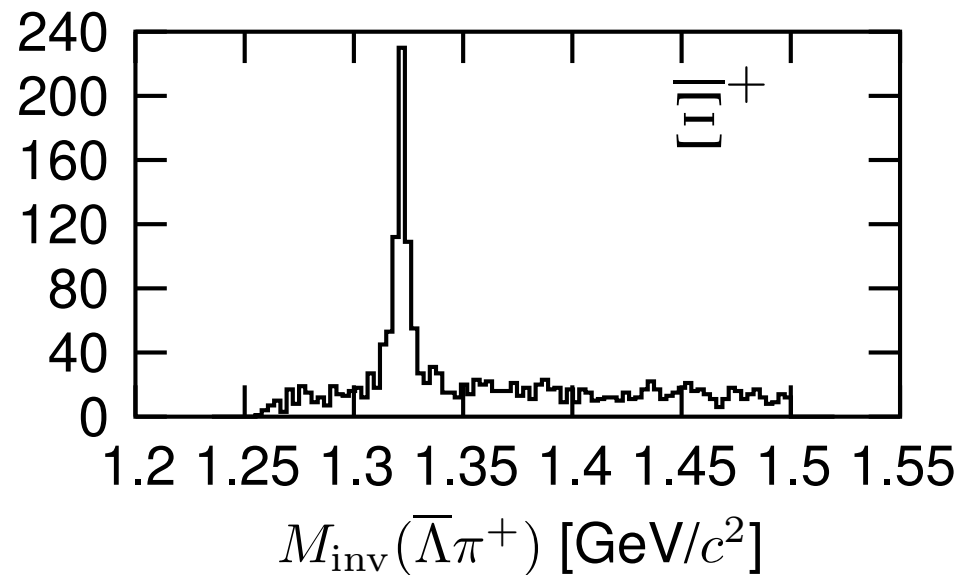
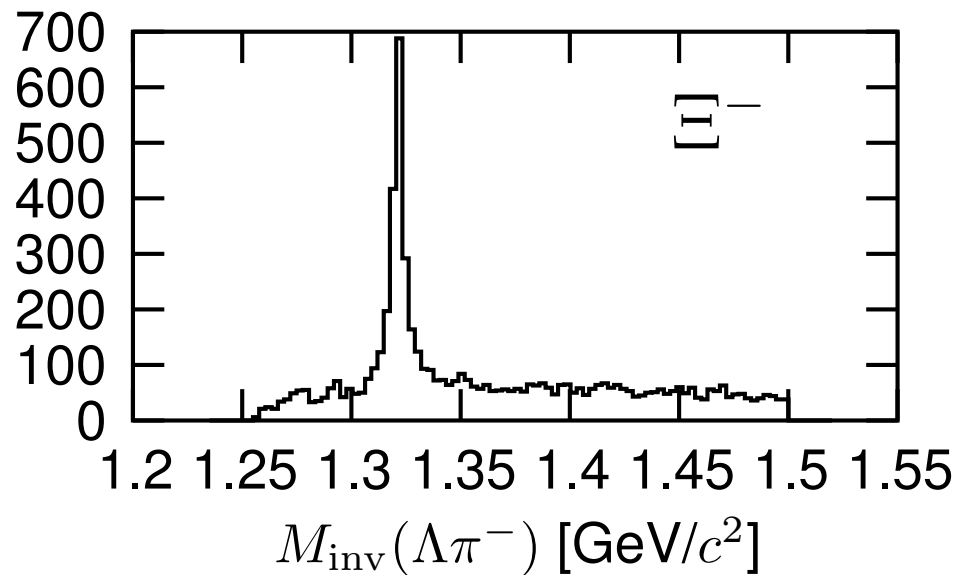
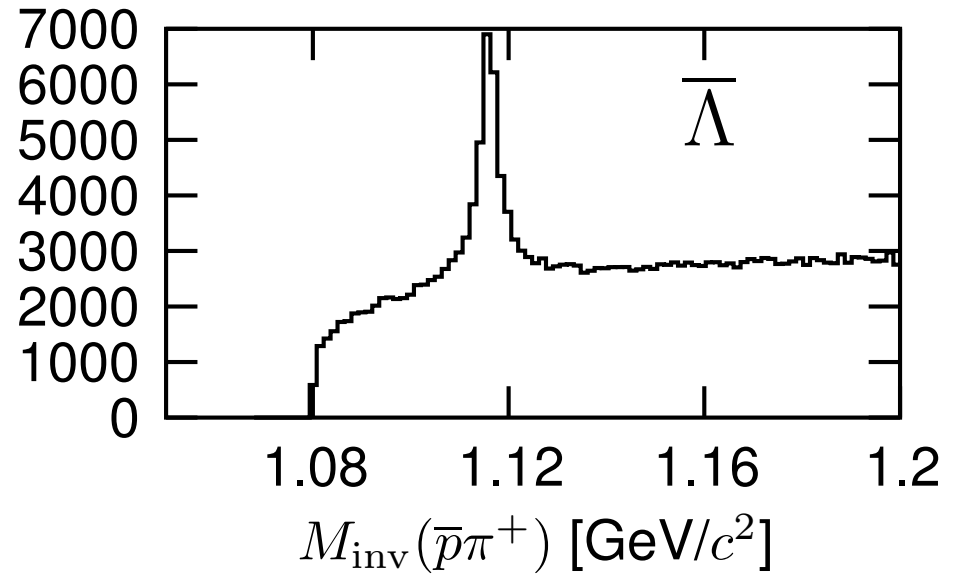
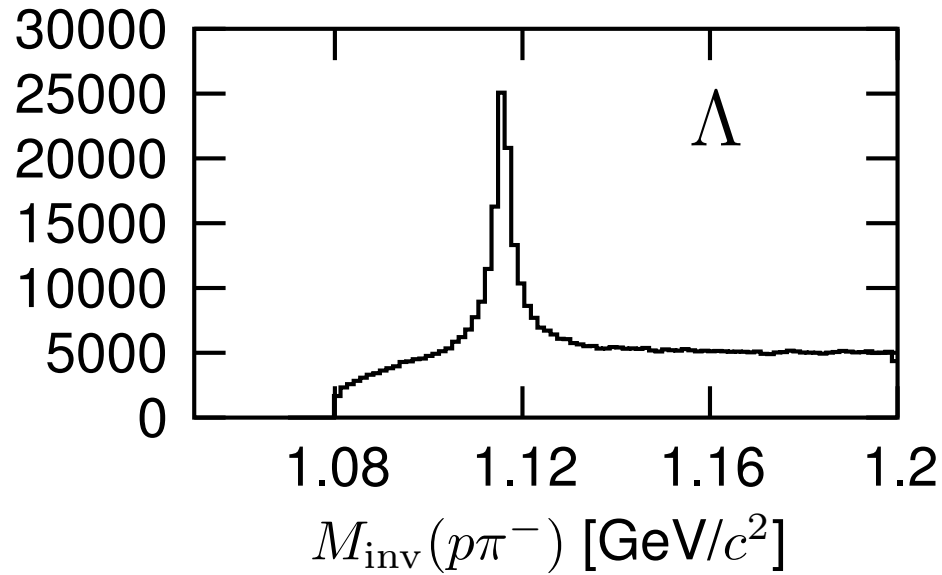
NA49: V^0 rekonstrukció



NA49: Kaszkád rekonstrukció



NA49: Ξ , Λ invariáns tömegspektrumok



NA49: $\Xi - \pi$ spektrumok – vágások

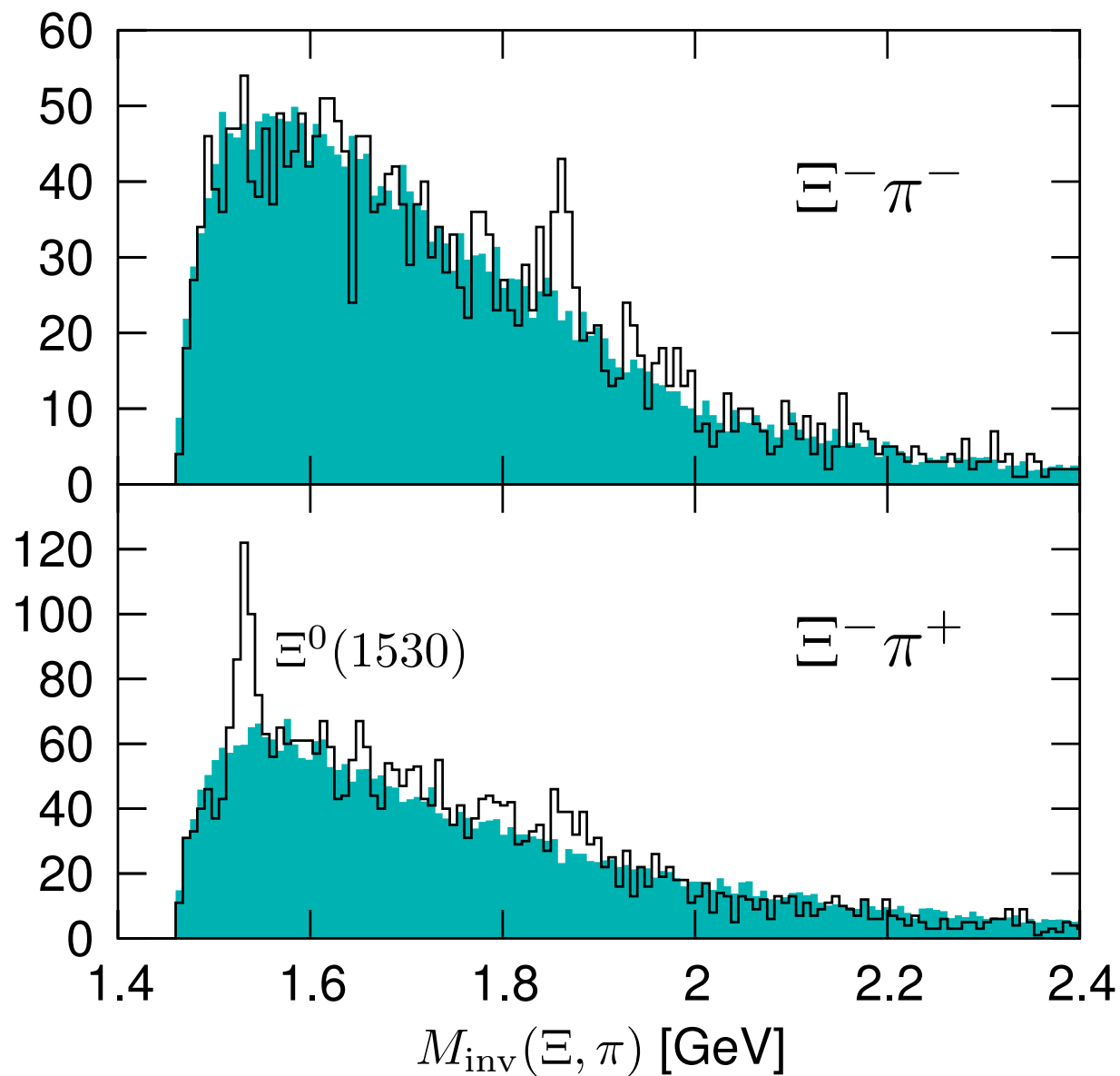
A Ξ -re:

- ▶ $z > z(\text{mainvertex}) + 12 \text{ cm}$
- ▶ $|M_\Lambda - 1115| < 15 \text{ MeV}$
- ▶ $|M_\Xi - 1321| < 15 \text{ MeV}$
- ▶ Bomlástermékek dE/dx : 3σ Bethe-Bloch görbe körül
- ▶ Impact paraméter vágások

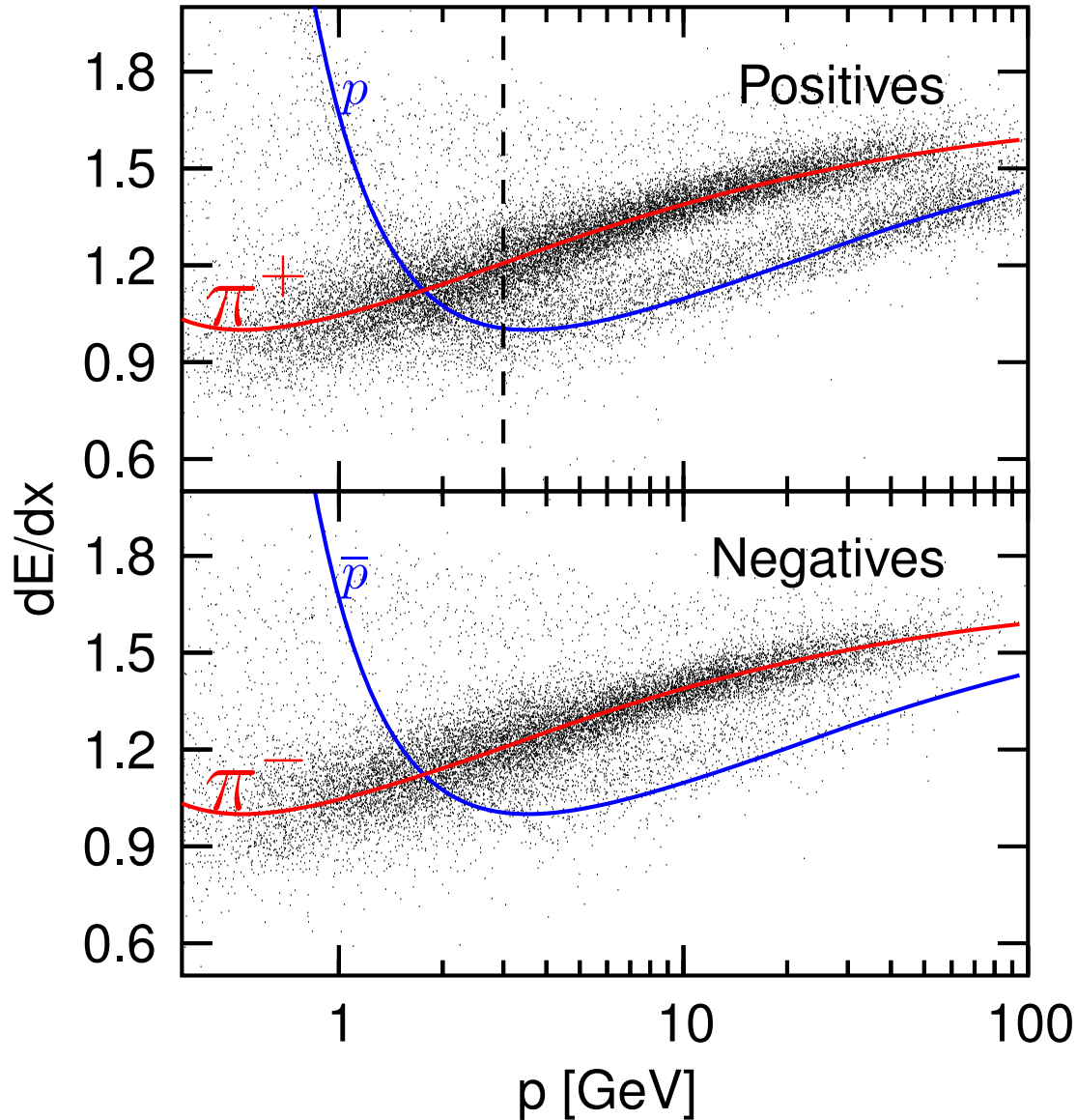
Az elsődleges π -re:

- ▶ Visszafele extrapolált pálya a main-vertex-nél:
 $|b_x| < 1.5 \text{ cm}, \quad |b_y| < 0.5 \text{ cm}$
- ▶ dE/dx : Bethe-Bloch görbe mellett $\pm 1.5\sigma$ -n belül

NA49: $\Xi - \pi$ invariáns tömegspektrumok

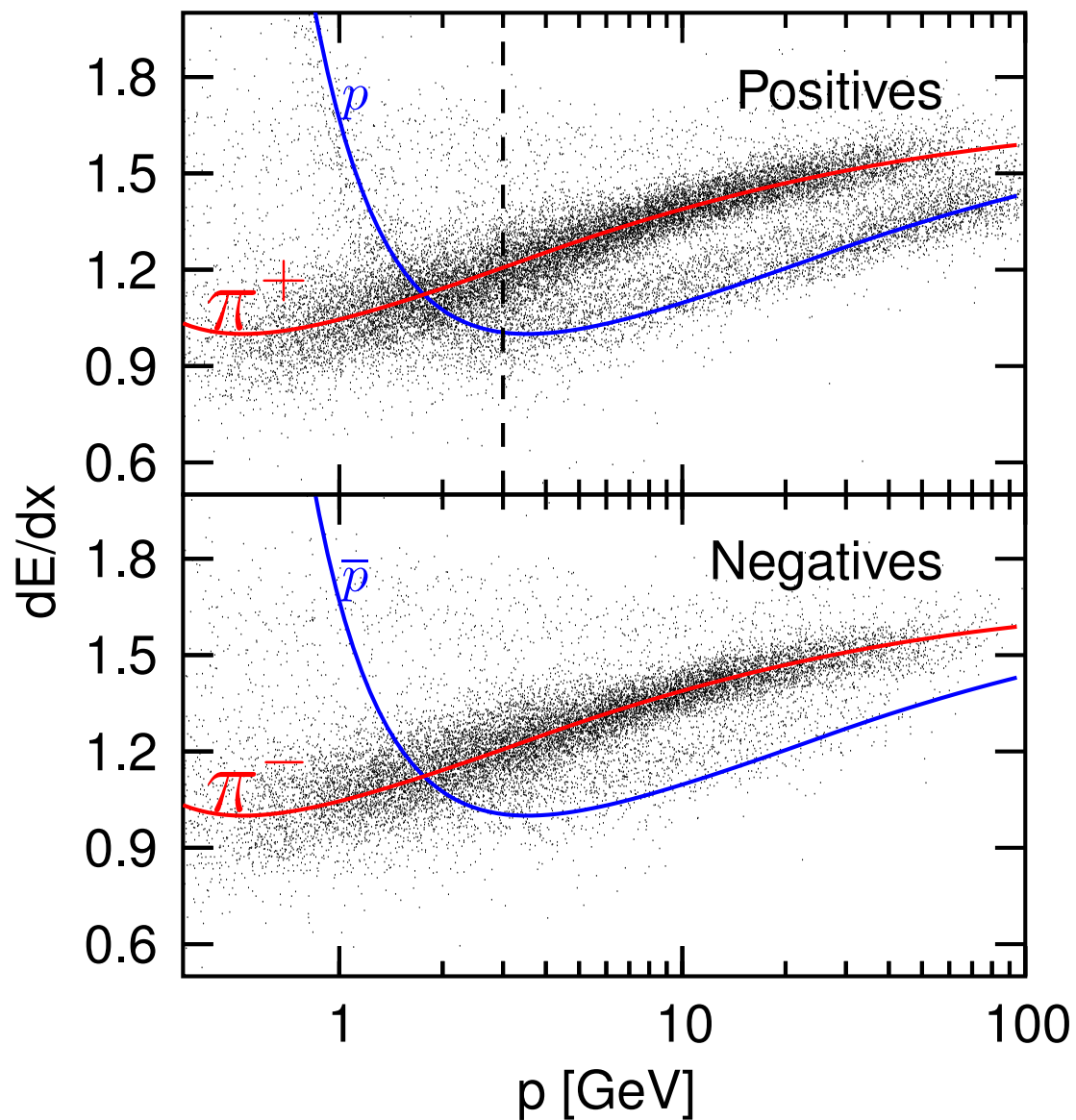


NA49: további vágások a π -re



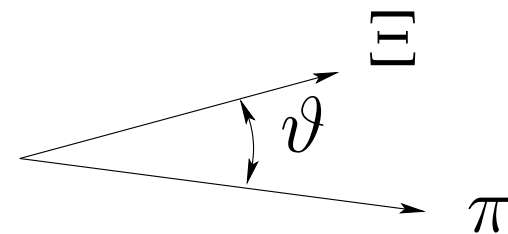
► π^+ -ra: $p > 3$ GeV
(hogy kiszűrjük a protonokat)

NA49: további vágások a π -re

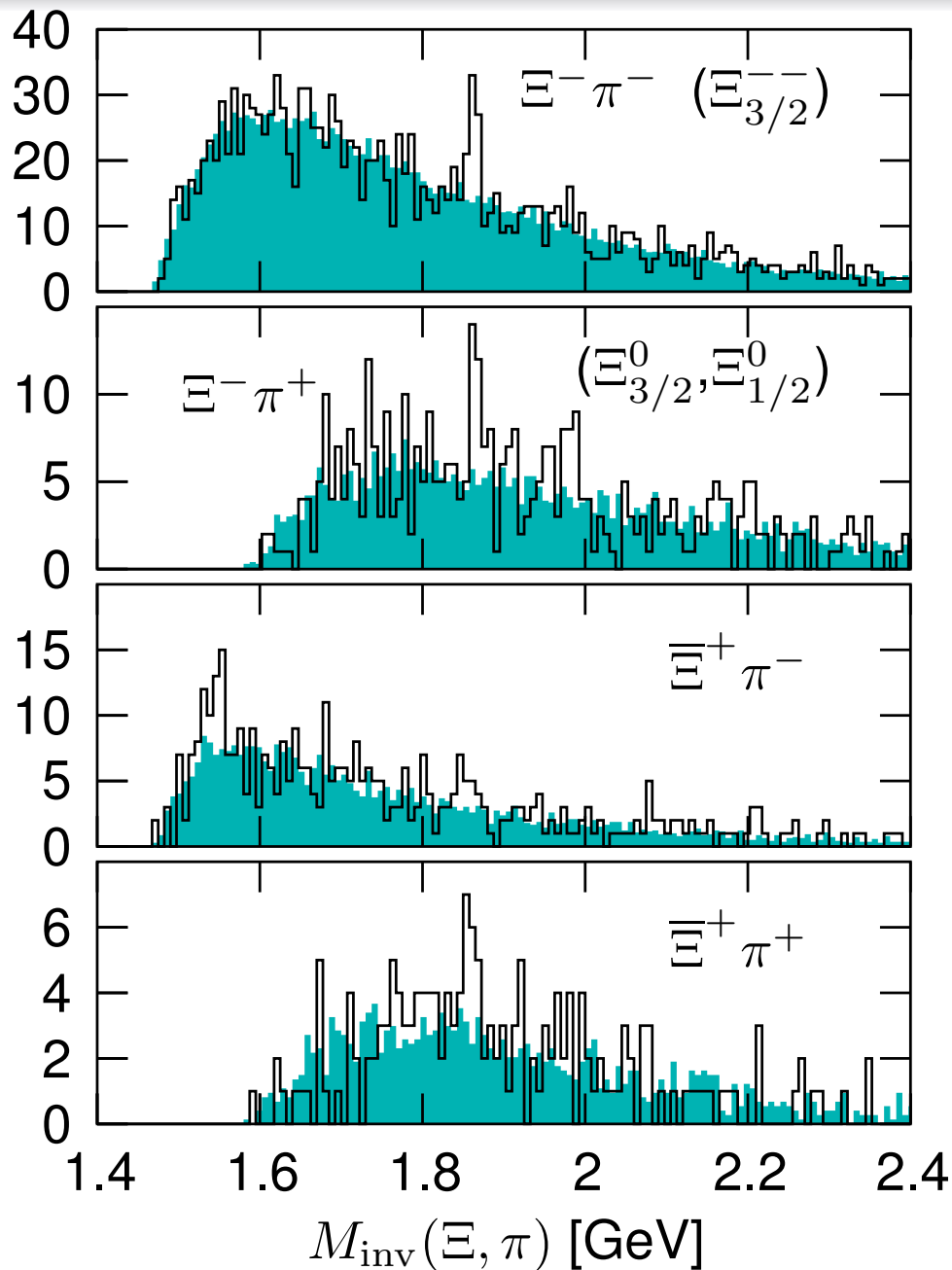


► π^+ -ra: $p > 3$ GeV
(hogy kiszűrjük a protonokat)

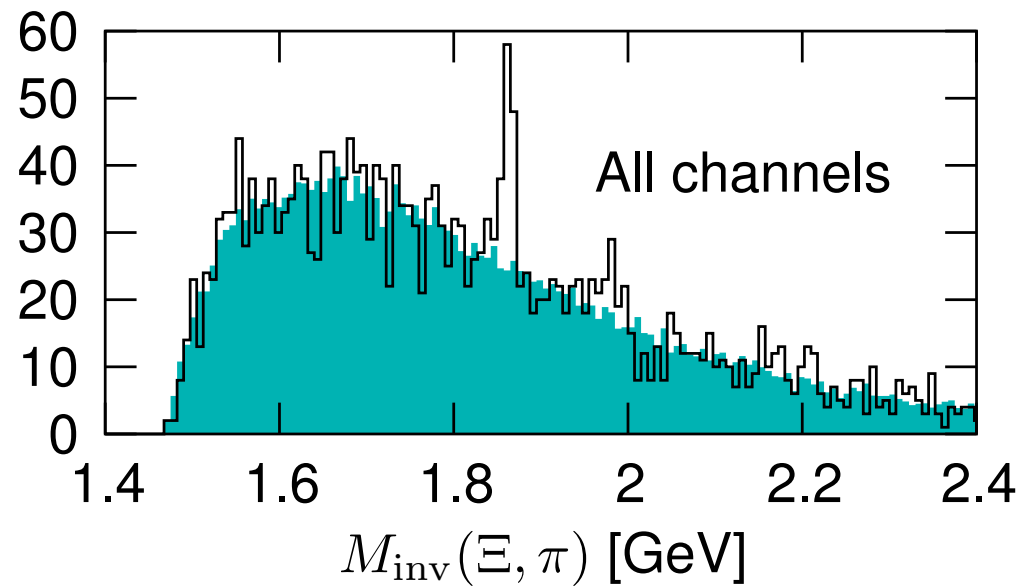
► Szimulációból:
nyílásszögre:
 $\vartheta_{\Xi, \pi} > 4.5^\circ$



NA49: a végső $\Xi - \pi$ spektrumok



Mind a négy csatornában van valami **1.862 GeV**-nál



$\Gamma \leq 18$ MeV (kis. felbontás)

Szignifikancia: 5.6σ

[arXiv:hep-ex/0310014](https://arxiv.org/abs/hep-ex/0310014),
PRL 92, 042003 (2004)

Más kísérletek a $\Xi_{3/2}$ -ről

STAR @ RHIC p+p, d+Au
és Au+Au ütközésekben :

- ▶ nincs jel
(bár még nem mutattak
ábrát ...)

Sevil Salur (STAR)

Poszter: QM2004

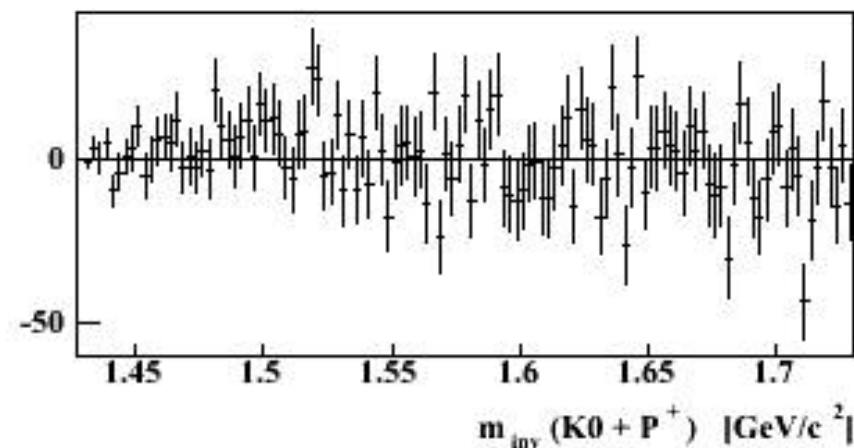
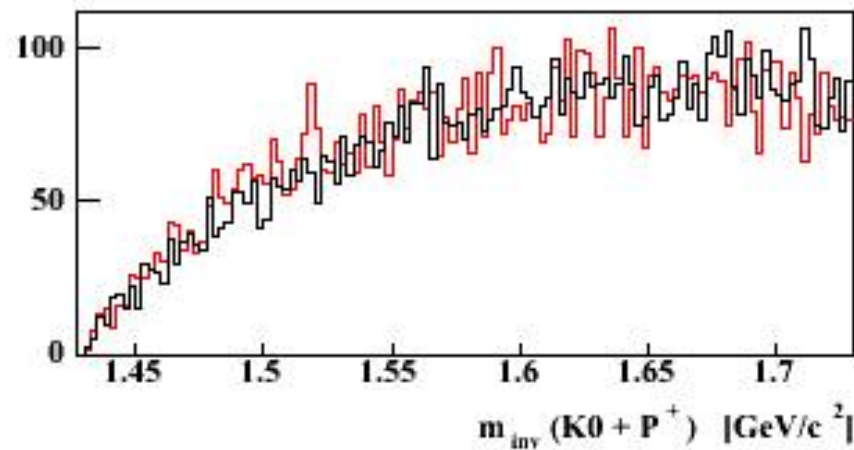
Más kísérletek a $\Xi_{3/2}$ -ról

STAR @ RHIC p+p, d+Au
és Au+Au ütközésekben :

- ▶ nincs jel
(bár még nem mutattak
ábrát ...)
- ▶ ... de a Θ^+ -t sem látják
⇒

Sevil Salur (STAR)

Poszter: QM2004

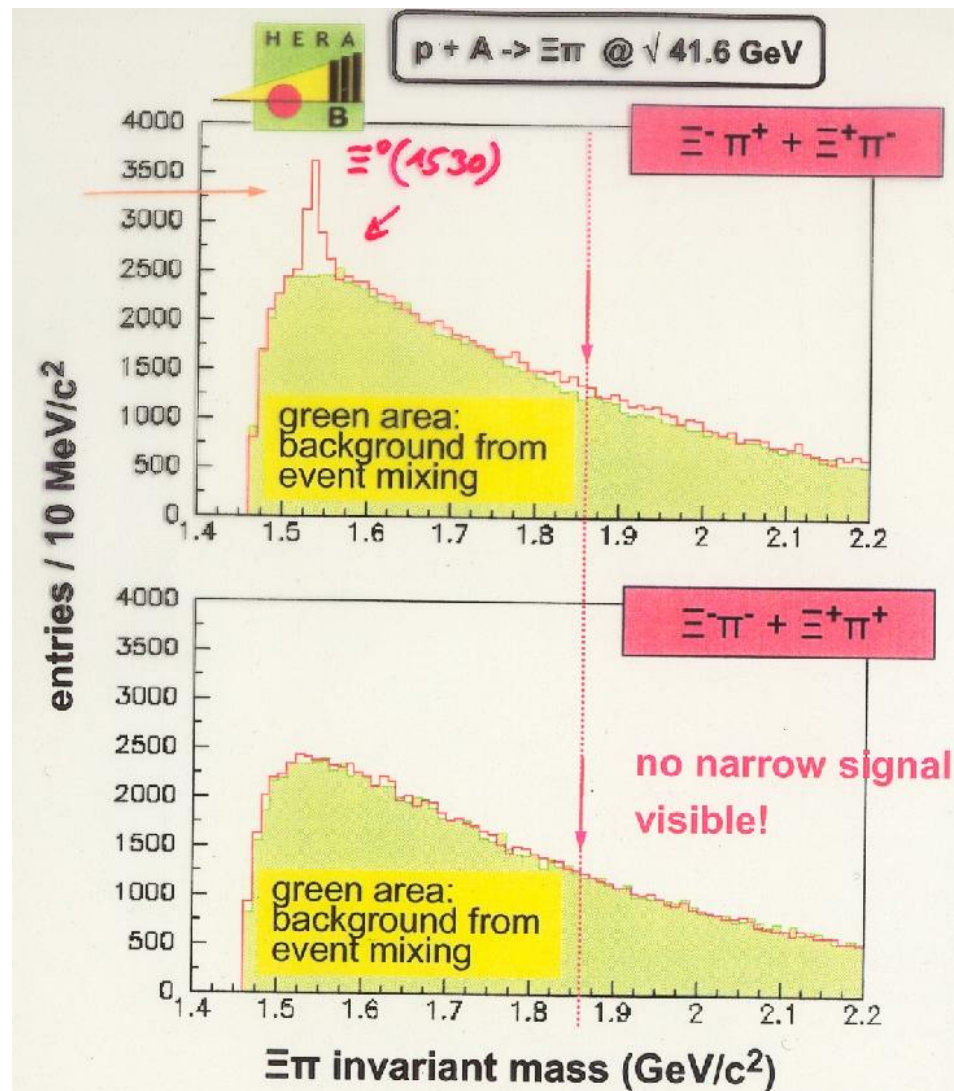


Más kísérletek a $\Xi_{3/2}$ -ról

HERA-B @ DESY p+C,
p+Ti, p+W ütközésekben

- ▶ Nem látnak jelet \Rightarrow
- ▶ ... de ők sem látják a Θ^{+-} -t

Karl-Tasso Knöpfle (HERA)
Poszter & beszély: QM2004



NA49: mi van a Θ^+ -val ????

Látjuk, de még sok megválaszolatlan kérdést kell tisztáznunk ...

KORÁBBI KÍSÉRLETI EREDMÉNYEK ???

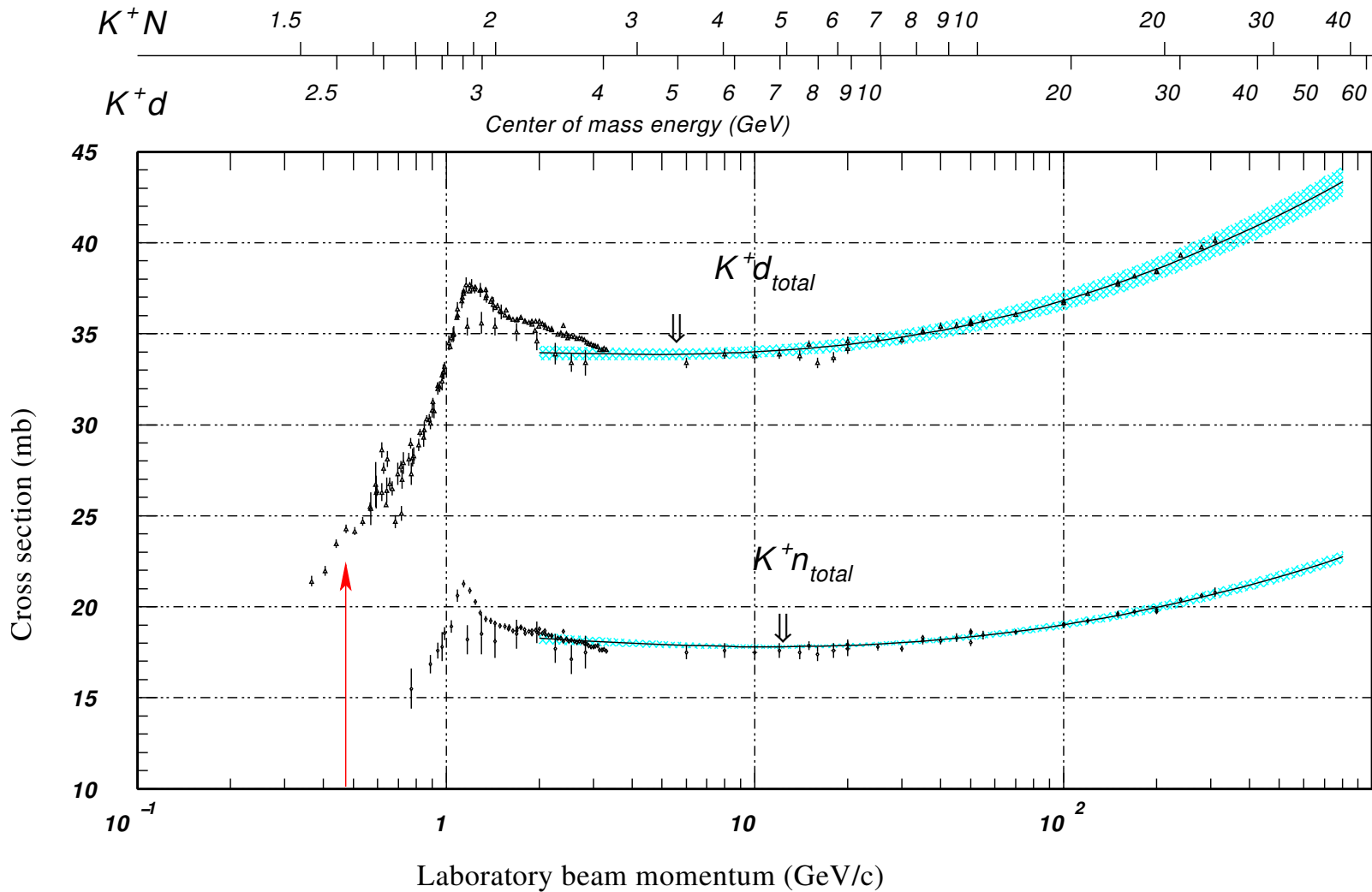
Θ^+ – korábbi kísérleti eredmények ???

Kísérleti eredmények

- ▶ A frissek: nK^+ és pK_S^0 tömegspektrumok \Rightarrow pozitív eredmények
- ▶ A régiek, amik szóba jönnek: főleg K^+d és K^+p szórás \Rightarrow nincs jel

Hogyan úszhatta meg eddig a Θ^+ , hogy megfigyeljék?

K^+n szórás ...



Nincs éles csúcs!

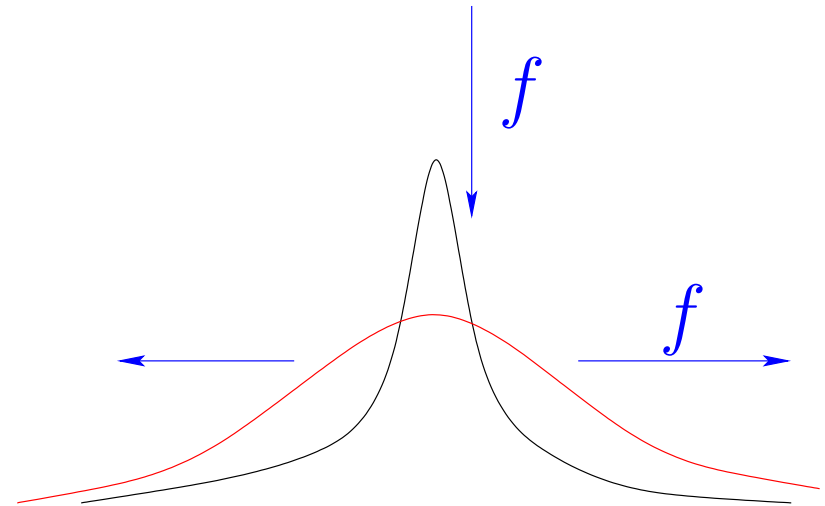
Fermi mozgás !

A Nussinov-becslés: Γ_{Θ^+}

arXiv:hep-ph/0307357

$$f = \frac{\Gamma_{\Theta} + \text{“100 MeV”}}{\Gamma_{\Theta}}$$

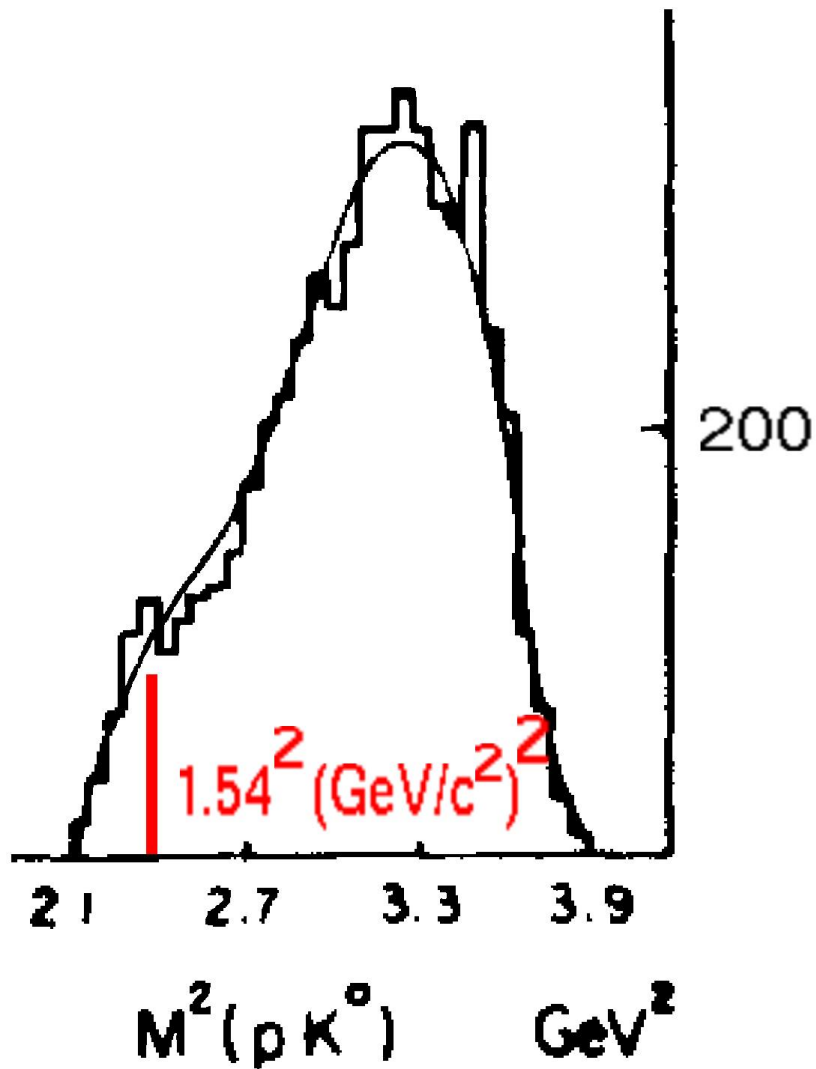
- ▶ kiszélesíti a csúcsot
- ▶ elnyomja a maximumát



Elméleti számol. \implies nem-elnyomott csúcs-maximum

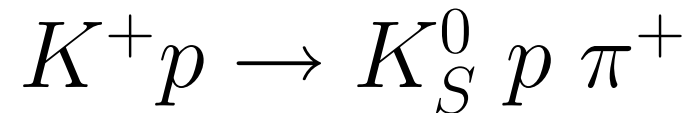
A K^+d szórási hatáskeresztmetszetben megfigyelt fluktuációk (~ 4 mb) $\implies \Gamma_{\Theta} < 6$ MeV

Θ^+ : pK_S^0 spektrumban már 1973-ban !!?



CERN 2 m hidrogén
buborékkamra

K^+ nyaláb, $p=1.69 \text{ GeV}/c$



Ha tudták volna, hogy
OTT KELL LEGYEN
egy részecske
1540 MeV-nél ..

Nucl. Phys. B64, 54-92 (1973)

Miért nem fedezték fel a Θ^+ -t eddig?

- ▶ A kísérletek nem voltak elég jók, stb. stb. stb

Miért nem fedezték fel a Θ^+ -t eddig?

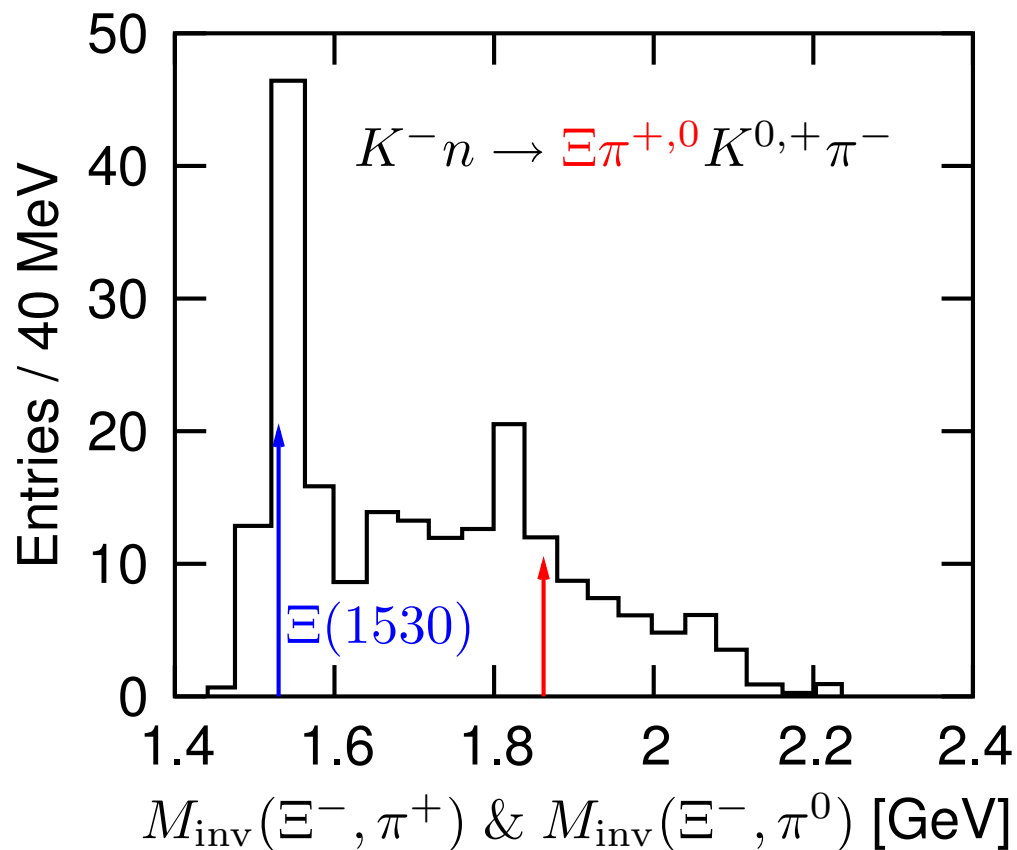
- ▶ A kísérletek nem voltak elég jók, stb. stb. stb
- ▶ Nem tudtuk, hogy fel kéne fedeznünk (és hogy hol)

Korábbi kísérletek: $\Xi-\pi$ spektroszkópia

BNL 80-in. buborékkamra (deuterium)

K^-n ütközések ($p_{\text{beam}}=3.6, 3.9$ GeV)

Phys.Rev.D1, 847 (1970)

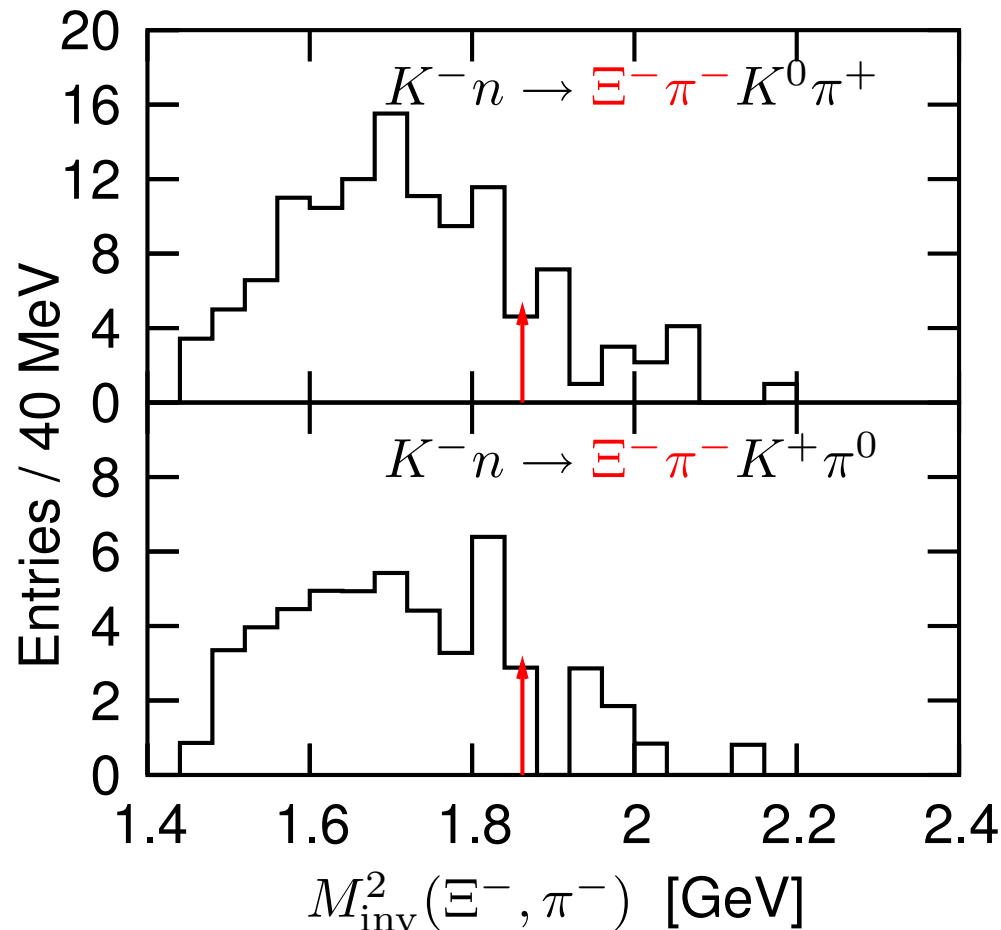
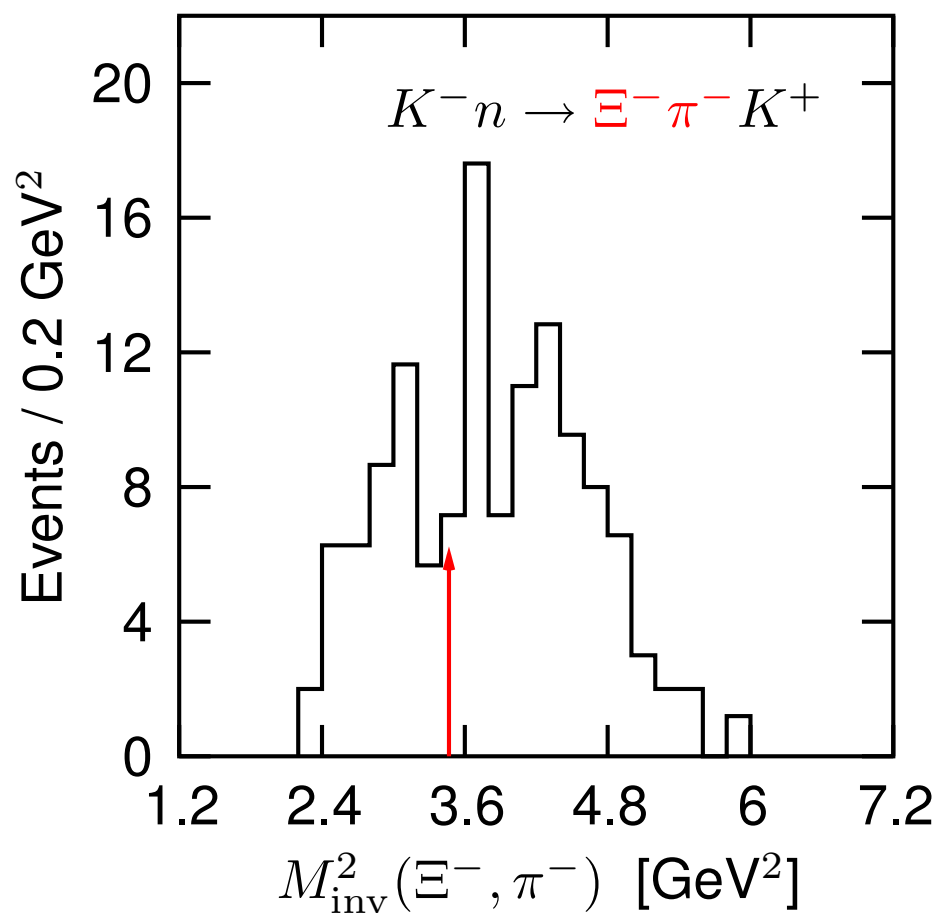


- ▶ $\Xi(1530)$ tisztán látható
- ▶ Nem látszik csúcs 1.86 GeV körül
- ▶ Igen kis statisztika (néhány beütés 40 MeV-es binekben)

Korábbi kísérletek: $\Xi-\pi$ spektroszkópia

BNL 80-in. buborékkamra (deuterium)

K^-n ütközések ($p_{\text{beam}}=3.6, 3.9$ GeV)



Korábbi kísérletek: $\Xi-\pi$ spektroszkópia

1. Korábbi (Ξ^-, π^-) spektrumok

- ▶ ritkák
- ▶ nagy binekkel, kis statisztikával

2. Van azonban néhány (Ξ^-, π^+) spektrum

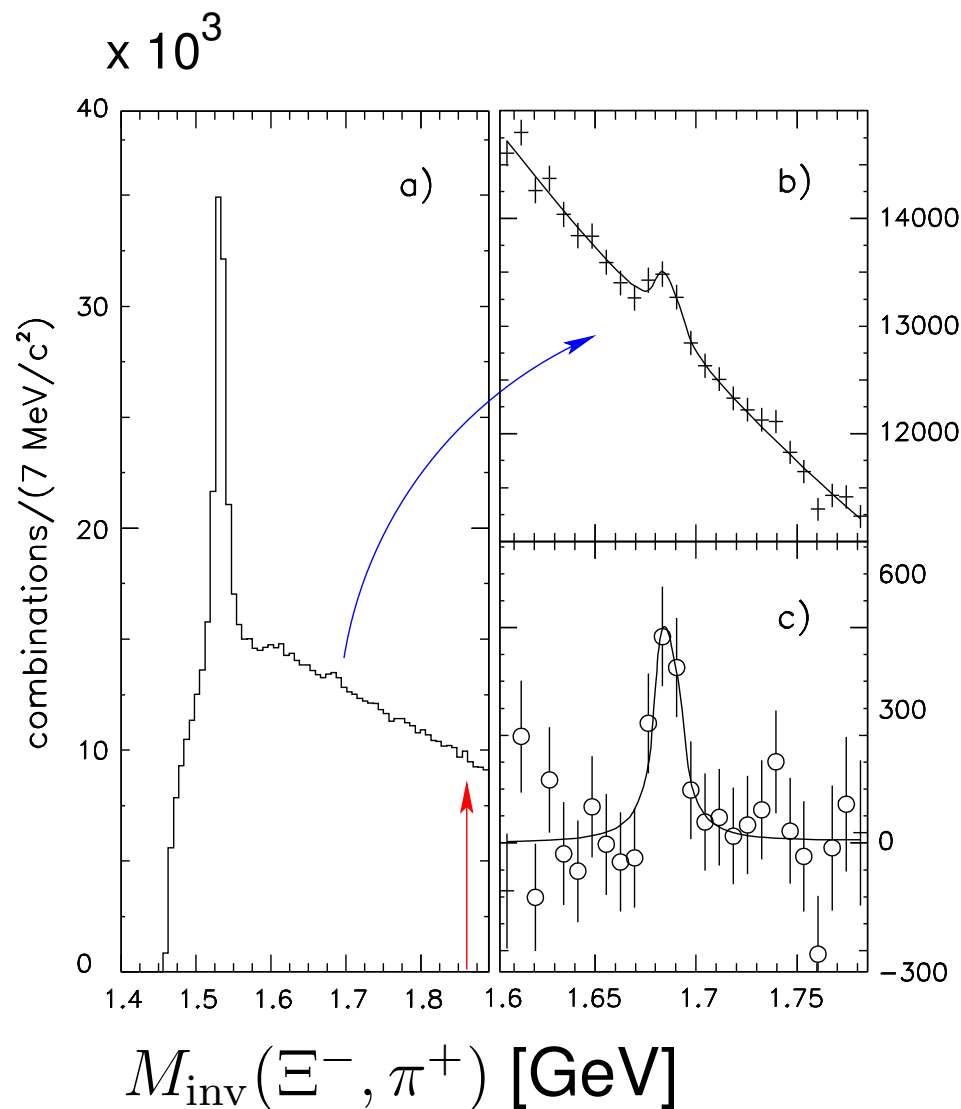
- ▶ Főleg K^-p ütközések
- ▶ Nagy statisztika

Korábbi kísérletek: $\Xi-\pi$ spektroszkópia

WA89 @ CERN (“Hyperon beam experiment”)

arXiv:hep-ex/9710024

- ▶ Reakció: $\Sigma^- + A \rightarrow \Xi^- \pi^+ X$
- ▶ $p_{\text{beam}}^{\Sigma^-} = 345 \text{ GeV}$
- ▶ Nincs csúcs 1860 MeV körül



Korábbi kísérletek: $\Xi-\pi$ spektroszkópia

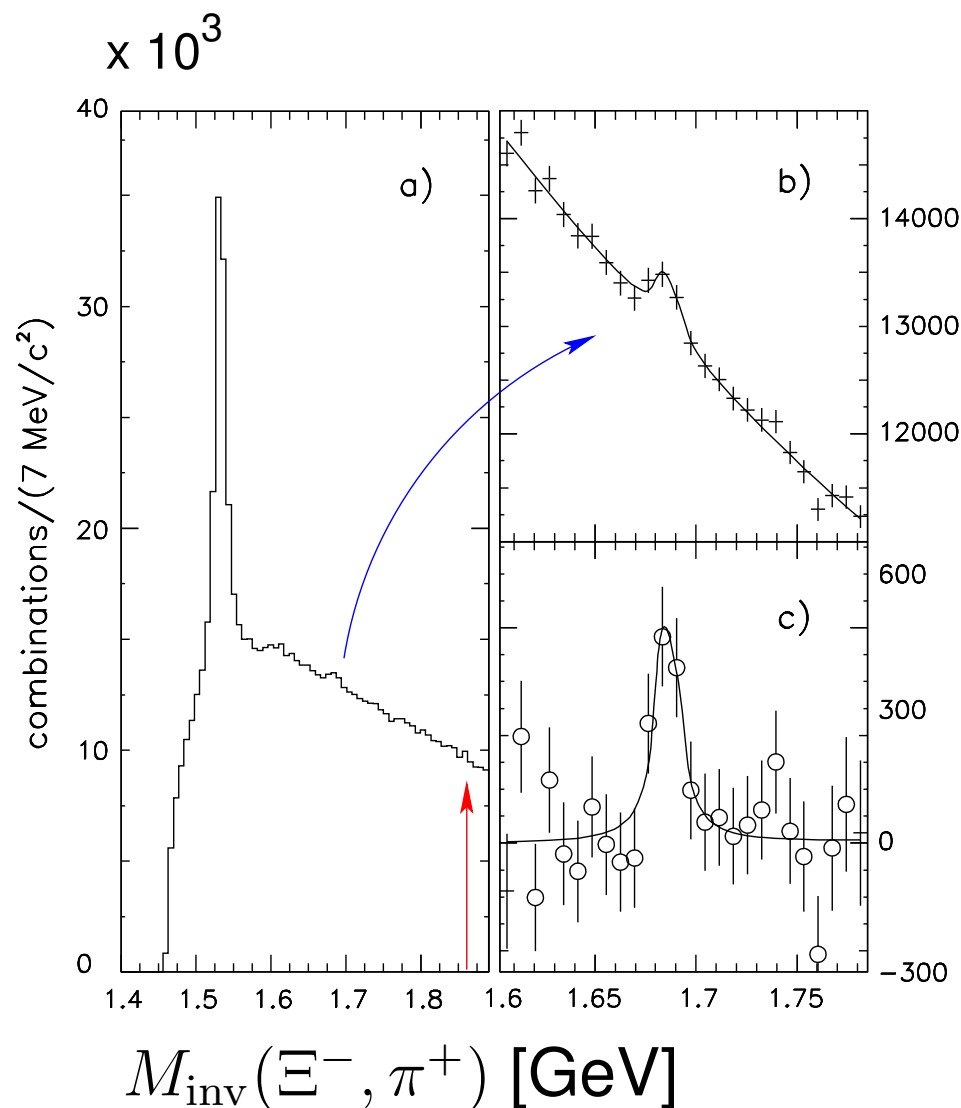
WA89 @ CERN (“Hyperon beam experiment”)

arXiv:hep-ex/9710024

- ▶ Reakció: $\Sigma^- + A \rightarrow \Xi^- \pi^+ X$
- ▶ $p_{\text{beam}}^{\Sigma^-} = 345 \text{ GeV}$
- ▶ Nincs csúcs 1860 MeV körül

NA49 – WA89 különbség:

- ▶ Energia
- ▶ Nyaláb
- ▶ Target
- ▶ Akceptancia



Erről maradtál le, ha későn érkeztél ...

- ▶ A Θ^+ létezését több kísérlet is megerősítette, konzisztens tömegmérésekkel, de
 - ★ Egyéb tulajdonságairól semmit nem tudunk
 - ★ Paritás ??? (jó út bizonyos modellek kizárására)
 - ★ Várható: dedikált kísérletek pontos tömeg, szélesség, paritás mérésre

- ▶ NA49: a másik jóslott exotikus részecske ($\Xi_{3/2}$)
 - ★ Várunk a megerősítésre
 - ★ Egyelőre nem látják mások! Miért?
 - ★ Más bomlási csatornák !!! (ΛK , ...)