

Pentaquarks: recenti indicazioni sperimentali

Marco Ripani
INFN - Genova

- **Multipletti barionici, quarks, stati esotici**
- **Aspetti teorici**
- **Principali risultati sperimentali**
- **Programma di ricerca al Jefferson Lab**
- **Conclusioni**



**Incontri di Fisica
delle Alte Energie
XVI Ciclo di Incontri
14-16 Aprile 2004 Torino**



Possono esistere Barioni con contenuto in quark diverso da qqq ?

- Numero barionico = 1, Spin = $N/2$
 \Rightarrow configurazione alternativa minima = $qqqq\bar{q}$ = **Pentaquark**
- La cromodinamica quantistica (QCD) non proibisce stati del tipo $q^4\bar{q}$
- Se i Pentaquarks esistono, **quelli che contengono un antiquark strano devono avere $S=+1$** \Rightarrow es. **risonanze in diffusione NK^+**

Però

- Modello a Quark Costituenti ipersemplificato da qqq a $q^4\bar{q}$
 \rightarrow masse Pentaquarks $> 1.7-1.9$ GeV
 \Rightarrow non ci si aspettava di trovare qualcosa a $M \approx 1.5$ GeV
- Evidenze sperimentali finora mancavano
 \Rightarrow ricerche passate tipicamente concentrate su $M > \approx 2$ GeV
- La situazione teorica è cambiata \rightarrow nuovi modelli con previsioni molto specifiche, masse inferiori

Preistoria dei barioni a $S=+1$

In the 1986 PDG (M. Aguilar-Benitez *et al*)
Phys. Lett. **B170**, 289 (1986)

- evidence for strangeness +1 baryon resonances reviewed in 1976 edition [1] and by Kelly [2] and Oades [3]. Two new partial-wave analyses [4] have appeared since PDG 1984 edition-both claiming that the P_{13} and perhaps other waves resonate.
- "the results permit no definite conclusion - the same story heard for 15 years. The standards of proof must simply be much more severe here than in a channel in which many resonances are already known to exist. The general prejudice against baryons not made of three quarks and the lack of any experimental activity in this area make it likely that it will be another 15 years before the issue is decided."

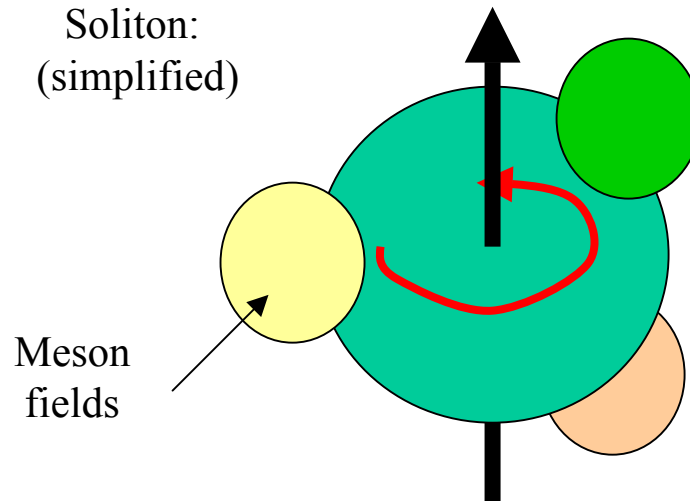
La novità del modello a solitoni

Un Pentaquark a $S=+1$, la Θ^+ , è stato predetto dal cosiddetto “chiral soliton model” (Diakonov, Petrov, Polyakov) come un singoletto di isospin

- **QCD di quark e gluoni** \rightarrow calcoli perturbativi \rightarrow stati legati non emergono in modo naturale. QCD su reticolo \rightarrow calcola stati legati con molte approssimazioni
- **Modelli efficaci** \rightarrow rappresentano QCD a basse energie tramite gradi di libertà rilevanti (es. pioni) \rightarrow calcoli (non perturbativi) di numerose osservabili \Rightarrow in alcuni casi particolari \rightarrow **calcolo dello spettro**
- **Modello chirale a solitoni** \rightarrow soluzioni classiche (solitoni) \rightarrow mostrano proprietà tipiche dei campi fermionici \rightarrow identificate coi barioni
- Quantizzando, i **barioni appaiono come eccitazioni rotazionali**, di cui la prima e la seconda corrispondono a ottetto e decupletto di barioni ordinari, mentre la terza...

Chiral soliton model:

Pentaquark comes out naturally \rightarrow rotational excitations of the **soliton** [rigid core (q^3) surrounded by meson fields ($q\bar{q}$)]



Il decupletto “esotico” predetto dal modello a solitoni

[Z. Phys. A359 (1997) 305]

$uudd\bar{s}$

$\Theta^+(1530)$

Stato chiaramente
esotico; $\Gamma < 15$ MeV

Stato esotico piú
difficilmente
rivelabile
(cascade)

$N(1710)$

Stati presenti nel
PDG la cui natura
esotica non
è evidente

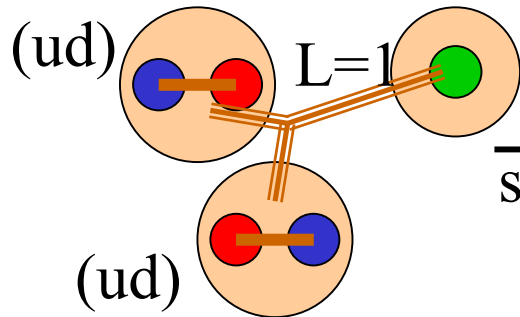
$\Sigma(1890)$

$ddss\bar{u}$

$\Xi(2070)$
 $uuss\bar{d}$

La Θ^+ sarebbe un singoletto di isospin con un *anti-quark strano* !
La previsione di massa è basata sulla $N^*(1710)$.

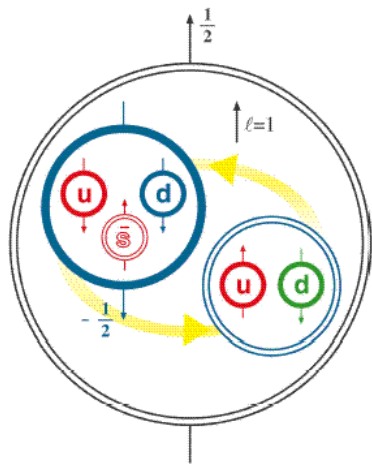
Pentaquark: altri modelli ?



Descrizione a Quark Correlati (Diquark → Jaffe, Wilczek)

$$[[Q_1 Q_2]_{\bar{3}_c} \otimes [Q_3 Q_4]_{\bar{3}_c}]_{\mathbf{3}_c} \otimes \bar{Q}_{\bar{3}_c}$$

Funzione d'onda Diquark-Diquark antisimmetrica nel colore
 ⇒ Parte spaziale antisimm. ⊗ antiquark ⇒ Parità + !



Descrizione a Cluster colorati
 (→ Karliner, Lipkin)

$$\left\{ \begin{array}{c} ud \\ \bar{3}_c \end{array} \right\} \left\{ \begin{array}{c} dus \\ 3_c \end{array} \right\}$$

Classificazione generale
 stati 5-quark, indipendente
 da modello specifico
 → Bijker, Giannini, Santopinto,
 hep-ph/0310281

Perchè sarebbero così stretti ?

Solitoni: Decadimento → transizione fra Θ e componente a 5 quark in f.ne d'onda nucleone con particolare struttura flavor → soppressa

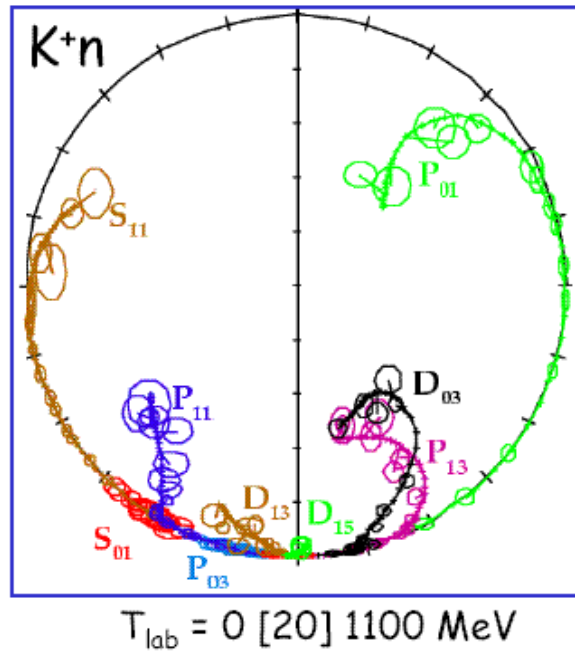
Modelli a Quark: Scarsa sovrapposizione f.ni d'onda Pentaquark e K-N
 oppure: Pentaquark contiene strutture colorate

Decadimento in particelle “bianche” → riarrangiamento colore
 → scambio molti gluoni → soppresso

Ma ovviamente sono esempi...

Cosa dicono le analisi di dati precedenti sulla diffusione K^+n ?

La Θ^+ avrebbe
 $S=+1$,
 carica=+1
 ⇒ dovrebbe essere
 visibile nella
 diffusione di K^+ su
 neutroni



• J.S. Hyslop, R. A. Arndt, L.D. Roper,
 R.L.Workman, Phys. Rev. D **46**, 961 (1992)

• Pole Positions

| Ampl | ReW (MeV) | -ImW (MeV) |
|----------|--------------|---------------|
| P_{01} | 1831 | 95 |
| D_{03} | 1788 | 170 |
| P_{13} | 1811 | 118 |
| D_{15} | 2074 | 253 |

• All suggested resonances are
 heavier and wider than Θ^+

- Per $I=0$**
- only one partial wave (P_{01}) allows for a resonance near 1545 MeV only with a narrow $\Gamma < 1 - 2$ MeV
 - other partial waves (S_{01} and P_{03}) do not show conclusive improvement in fit at any width

Alcuni Esperimenti con segnali di Pentaquark



- **Collaborazione LEPS al laboratorio Spring-8, Osaka**
- **Collaborazione HERMES, DESY**
- **Collaborazione ZEUS, DESY**
- **Esperimento COSY-TOF, laboratorio COSY, Jülich**
- **Collaborazione CLAS al Jefferson Lab, Newport News, USA**

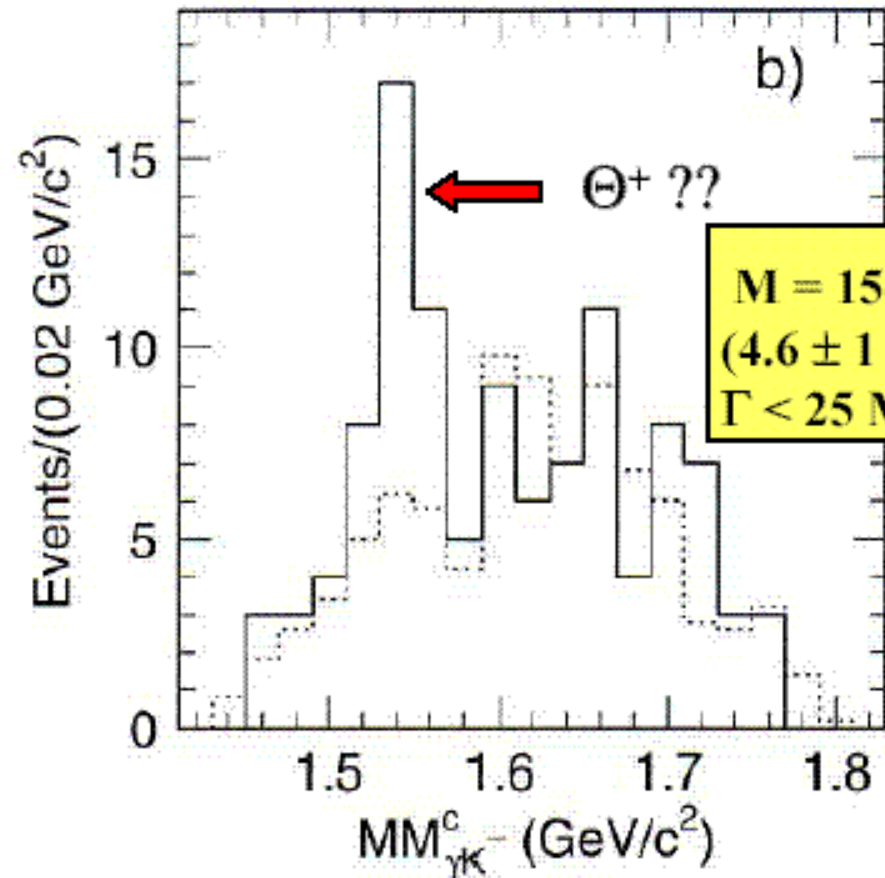
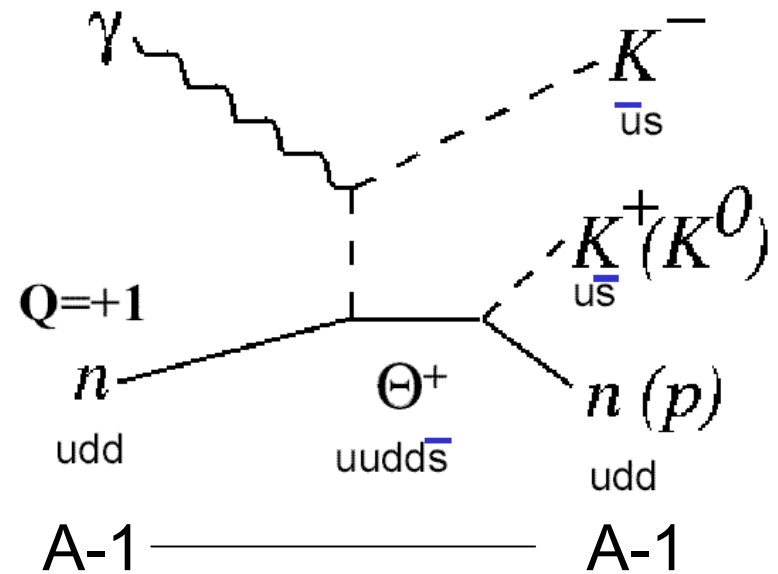


- **Collaborazione NA49, CERN**
 - **Collaborazione H1, DESY**
- + segnali controversi o mancanti
- **Collaborazione NA49, CERN → riesame critico**
 - **Collaborazione HERA-B, DESY**

risultati di LEPS dal Carbonio [PRL 91, 012002 (2003)]



Massa mancante rispetto al K^- (quantità nel grafico) \rightarrow sotto ipotesi diffusione quasi-libera da singolo nucleone \rightarrow equivalente a massa invariante sistema neutrone- K^+



- **Linea continua: veto sui protoni**
- **Linea tratteggiata: bersaglio di idrogeno**

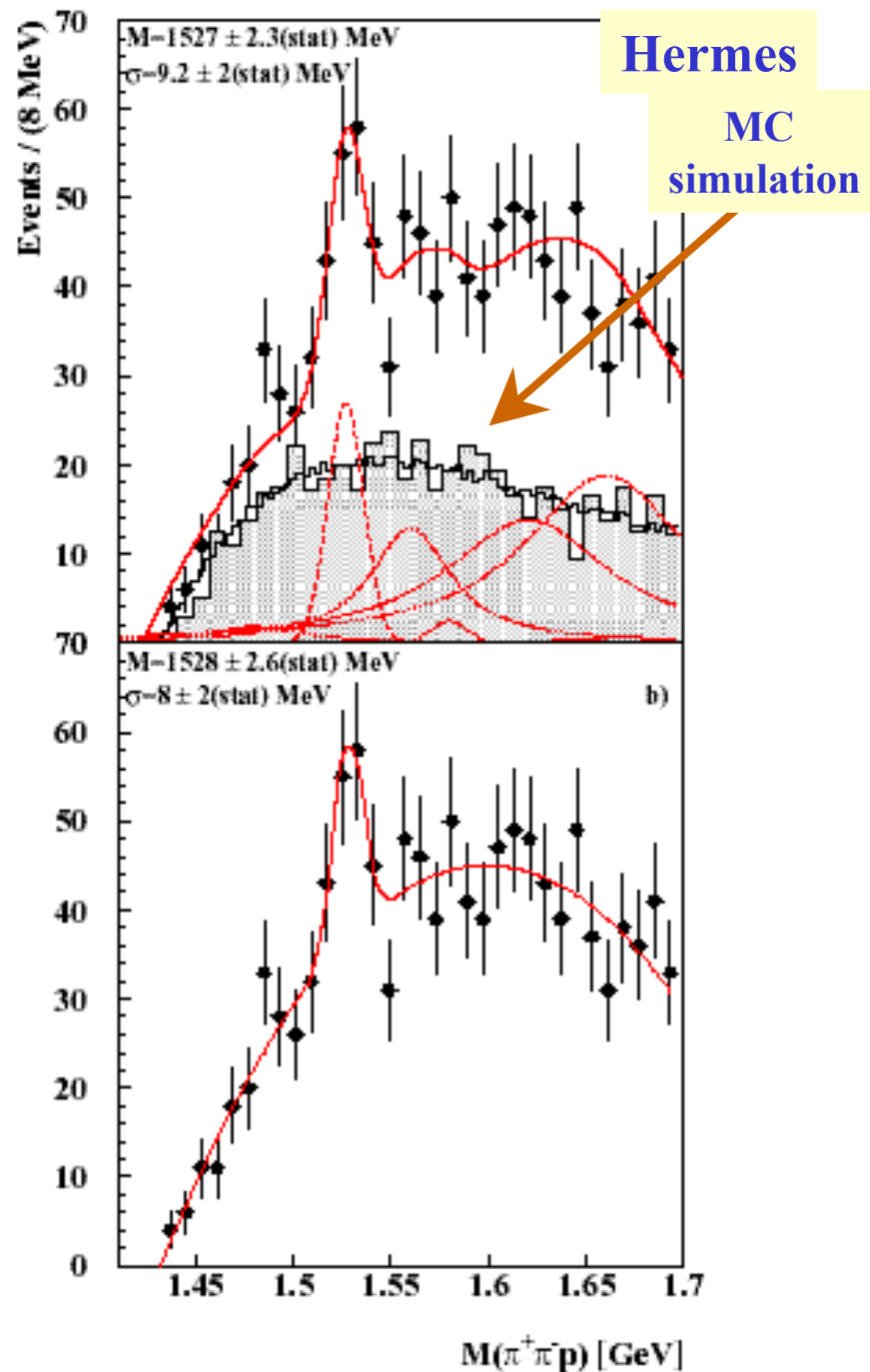
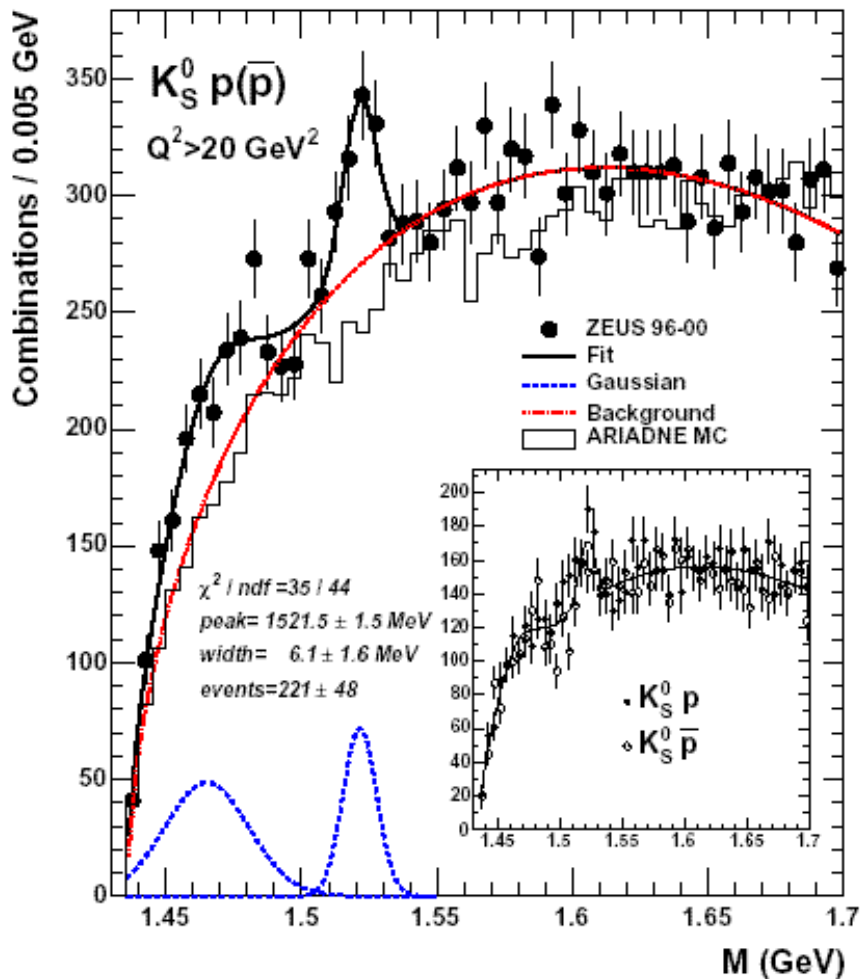
DESY: HERMES & ZEUS

$$\gamma_V D \longrightarrow pK^0(X) \longrightarrow \pi^+\pi^-p (X)$$

$$\gamma_V p \longrightarrow pK^0(X) \longrightarrow \pi^+\pi^-p (X)$$

($K^0 \rightarrow K^0_s \rightarrow \pi\pi \rightarrow$ stranezza non definita)

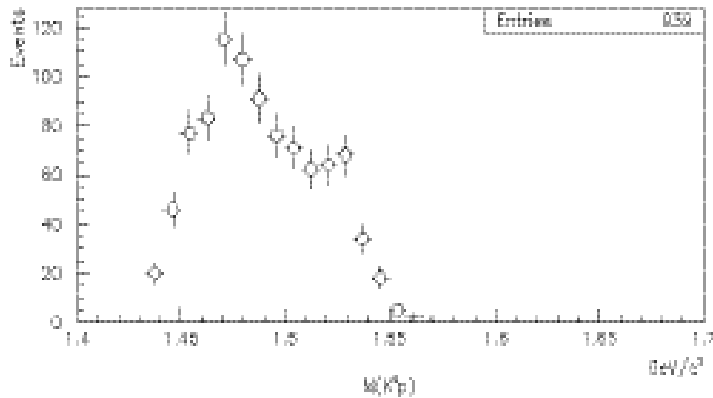
ZEUS



COSY-TOF (COSY, Jülich)

$p p \rightarrow \Theta^+ \Sigma^+ \rightarrow K^0 p \Sigma^+ \rightarrow \pi^+ \pi^- p p (\pi^0)_{\text{opp.}} \pi^+ \pi^- p (n) \pi^+$

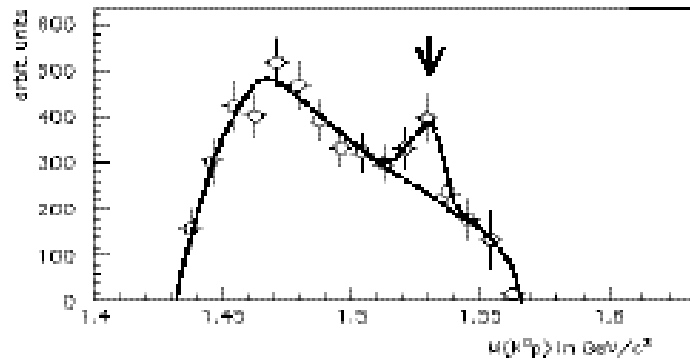
Impulso = 2.95 GeV/c



$M = 1530 \pm 5 \text{ MeV}$

$\Gamma < 18 \text{ MeV}$

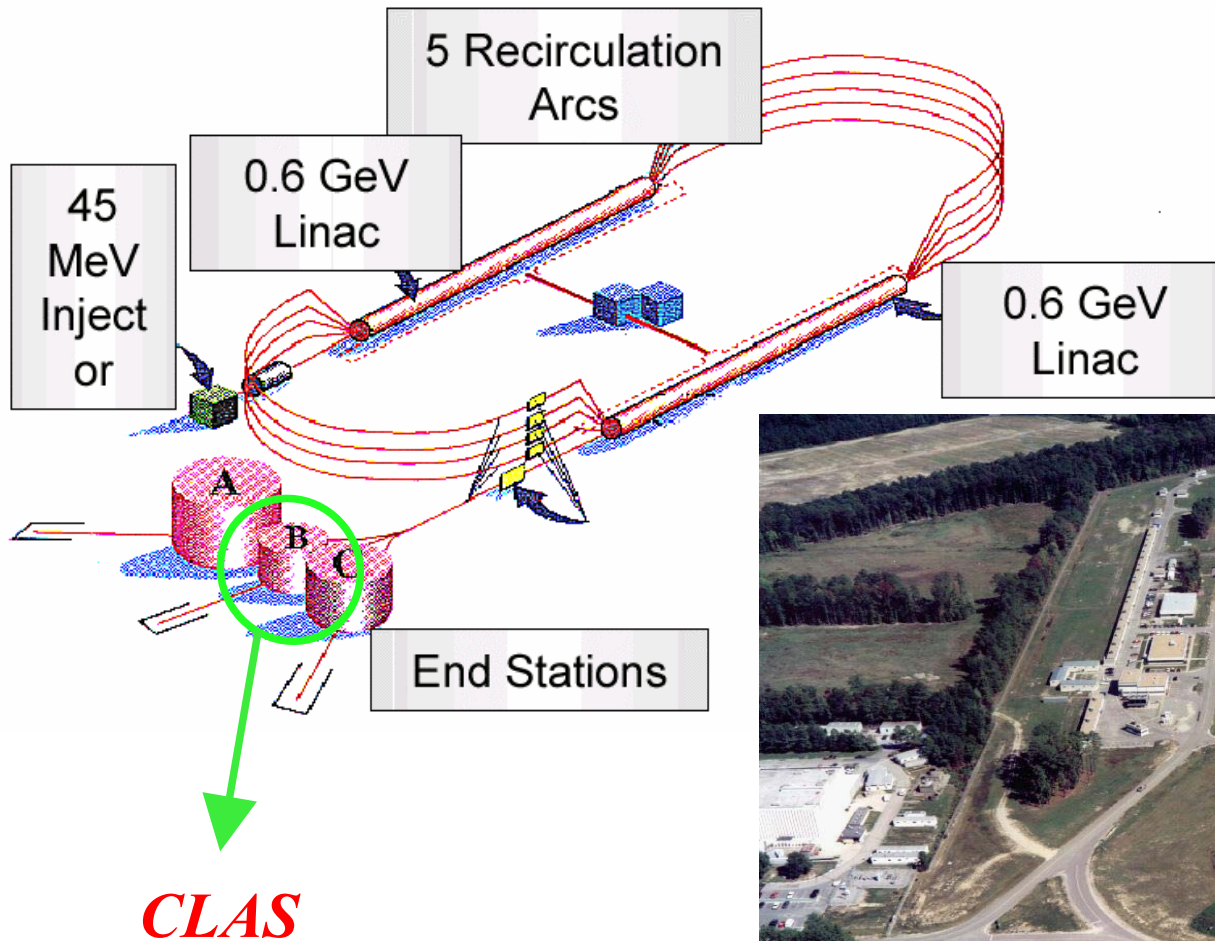
$\sigma = 0.4 \pm 0.1 \pm 0.1 \mu\text{b}$



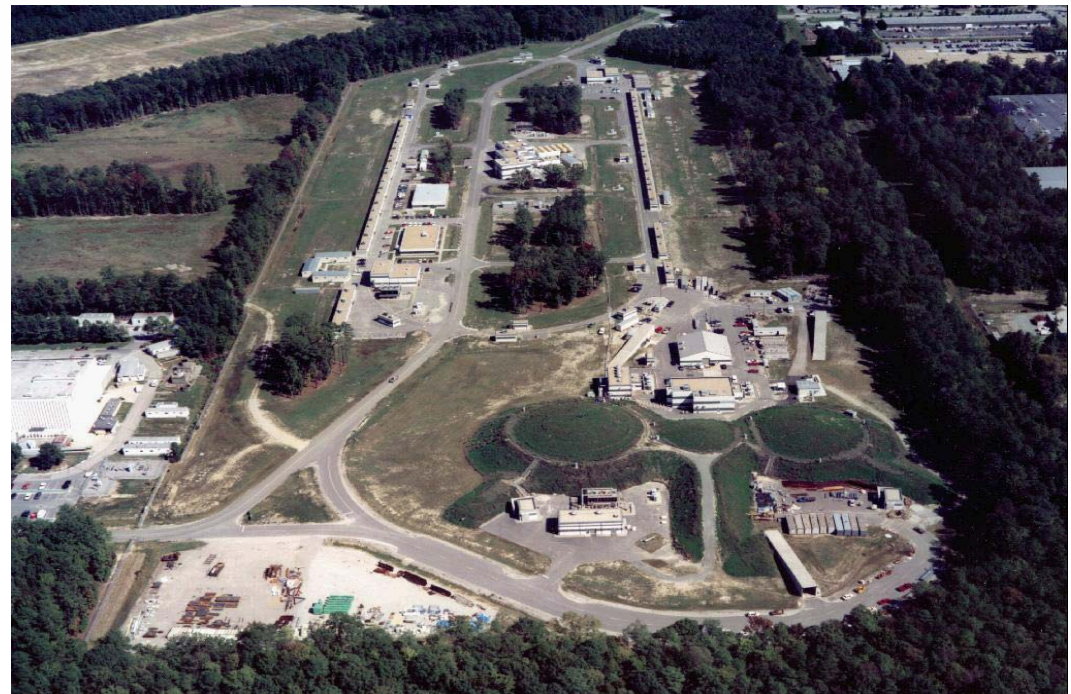
→ sezioni d'urto adroniche piccole !!

→ sezioni d'urto elettromagnetiche molto piccole !! (nanobarn)

II Jefferson Laboratory - CLAS



| | |
|-----------------------------|-----------------------------------|
| E_{\max} | $\sim 6 \text{ GeV}$ |
| I_{\max} | $\sim 200 \mu\text{A}$ |
| Duty Factor | $\sim 100\%$ |
| σ_E/E | $\sim 2.5 \cdot 10^{-5}$ |
| Beam P | $\sim 80\%$ |
| $E_{\gamma(\text{tagged})}$ | $\sim 0.8\text{-}5.5 \text{ GeV}$ |



CEBAF Large Acceptance Spectrometer

Torus magnet

6 superconducting coils

Liquid D_2 (H_2) target +

γ start counter; e monitorus

Drift chambers

argon/ CO_2 gas, 35,000 cells

Large angle calorimeters

Lead/scintillator, 512 PMTs

Gas Cherenkov counters

e/π separation, 216 PMTs

Electromagnetic calorimeters

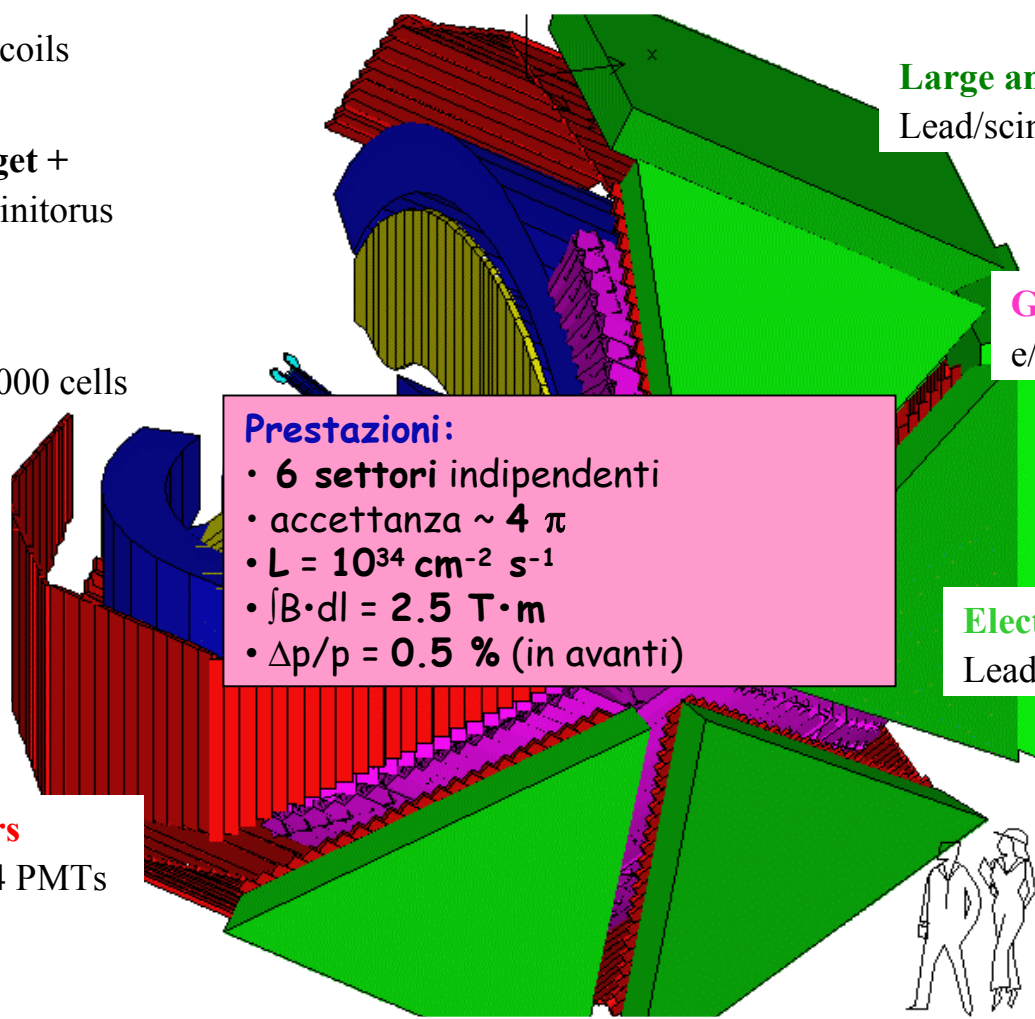
Lead/scintillator, 1296 PMTs

Time-of-flight counters

plastic scintillators, 684 PMTs

Prestazioni:

- 6 settori indipendenti
- accettazione $\sim 4 \pi$
- $L = 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
- $\int B \cdot dl = 2.5 \text{ T} \cdot \text{m}$
- $\Delta p/p = 0.5 \%$ (in avanti)



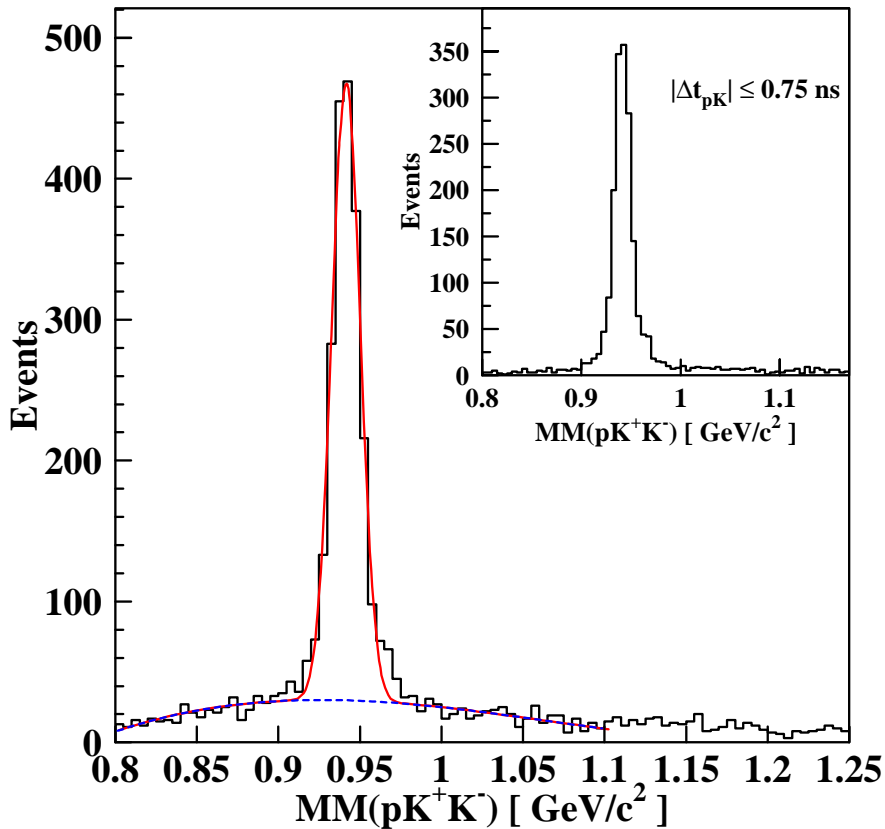
CLAS - La $\Theta^+(1540)$ su Deuterio



Reazione esclusiva !

Photon beam on deuterium

$$E_\gamma = 1 - 3 \text{ GeV}$$

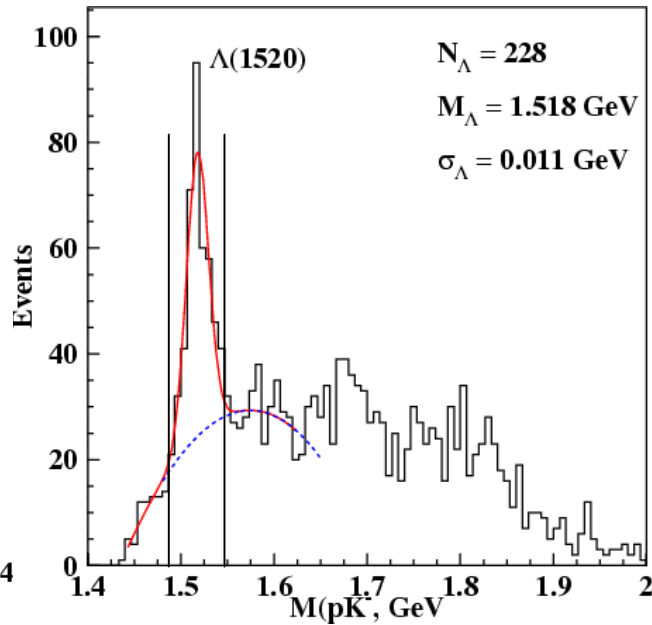
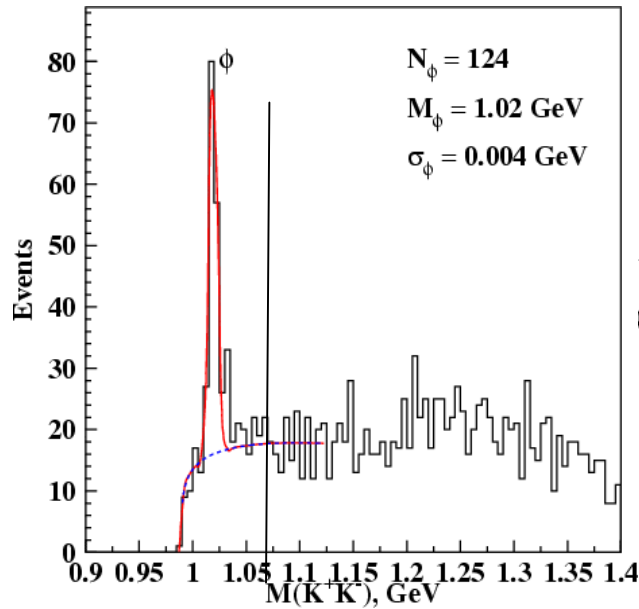


- Detected K⁺K⁻p
 - Reconstruct neutron via missing mass
 - $E_\gamma > 1.5 \text{ GeV}$
- ~15% background events under peak within 3σ range

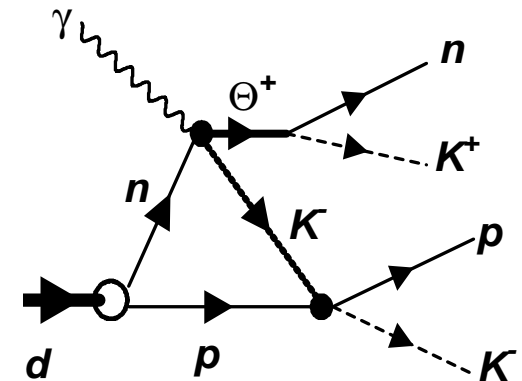
↑ Reconstructed Neutrons

CLAS - La $\Theta^+(1540)$ su Deuterio

| | | |
|--------------|-------------------------------|---|
| Cuts: | $M(K^+K^-) < 1.070$ GeV | - removes $\phi(1020)$ |
| | $1.485 < M(pK^-) < 1.551$ GeV | - removes $\Lambda(1520)$ |
| | $p_n < 80$ MeV/c | - removes spectator neutrons |
| | $p_{K^+} > 1$ GeV/c | - reduces background at $M(nK^+) > 1.7$ GeV |

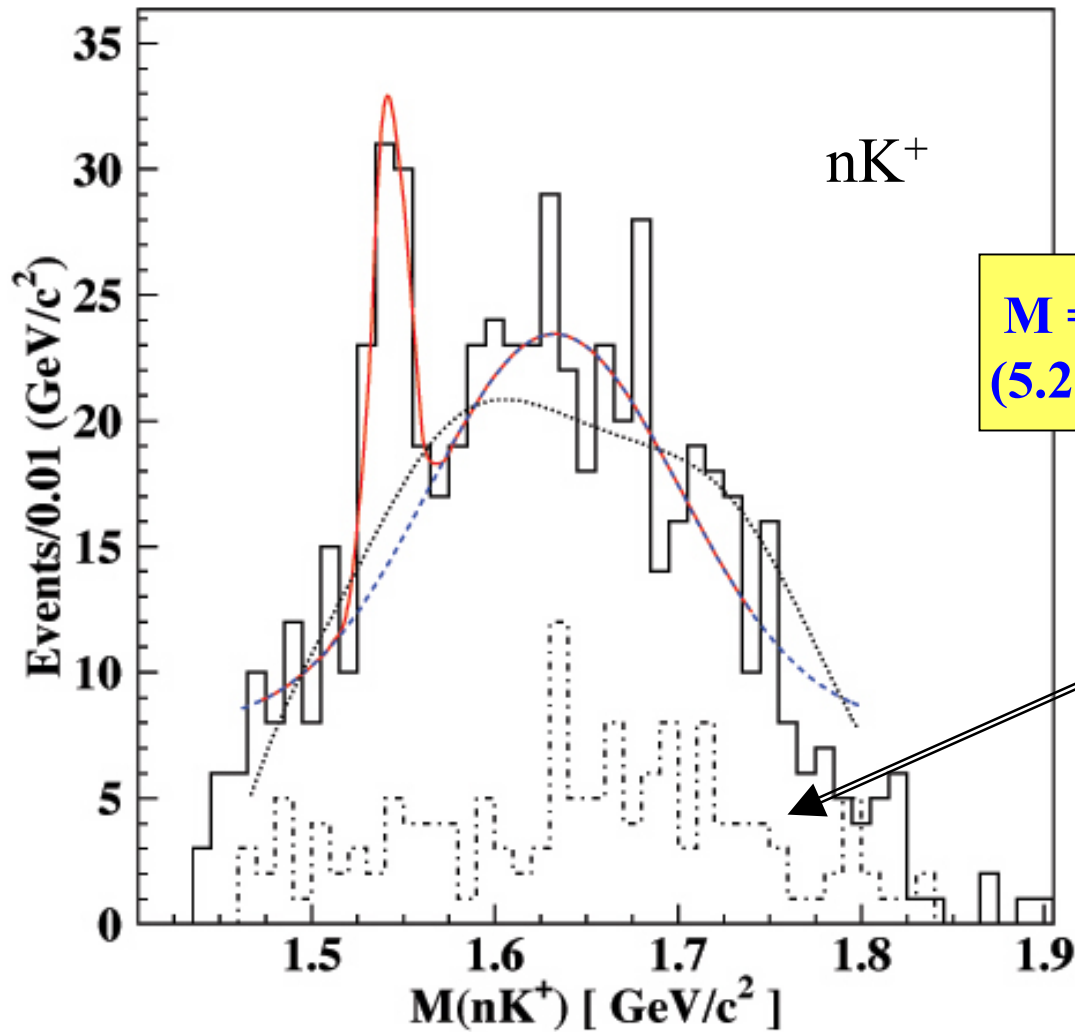


Possible diagram



a)

CLAS - La $\Theta^+(1540)$ su Deuterio



$M = 1542 \pm 5 \text{ MeV}$
(5.2 σ significance)

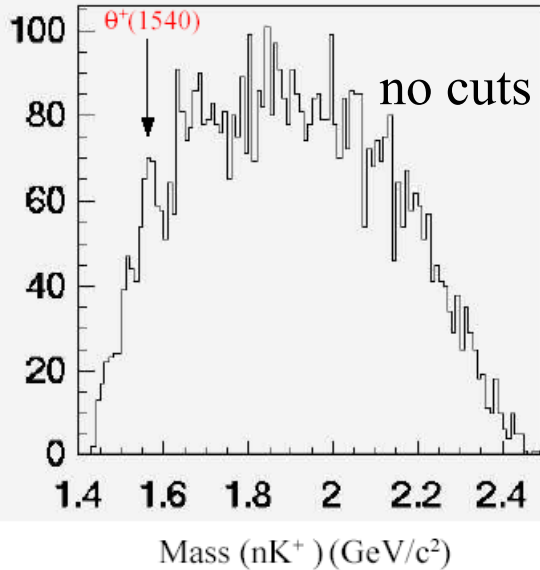
Fondo rimosso con
taglio su $\Lambda(1520)$

S.Stepanyan et al. PRL 91 252001 (2003)

CLAS – Produzione su Idrogeno (I)



$$4.8 < E_\gamma < 5.4 \text{ GeV}$$

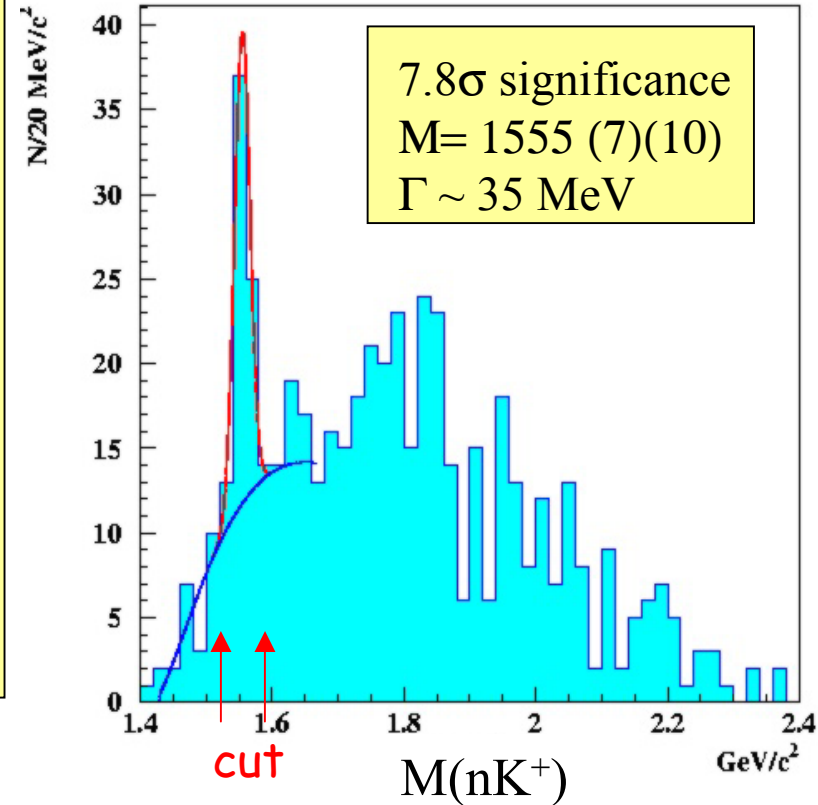


- Select t-channel process by tagging forward π^+ and reducing K^+ from other reactions

- $\cos\theta_{\pi^+}^* > 0.8$
- $\cos\theta_{K^+}^* < 0.6$

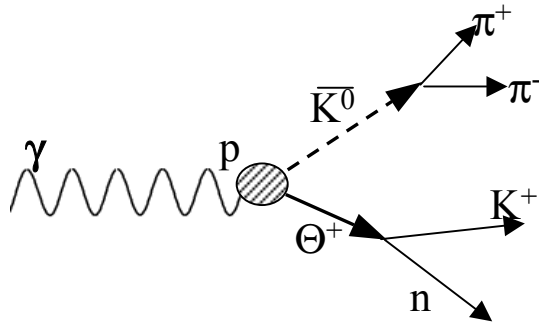
(in c.m. frame)

- Further cuts are motivated by assumptions on production mechanism.

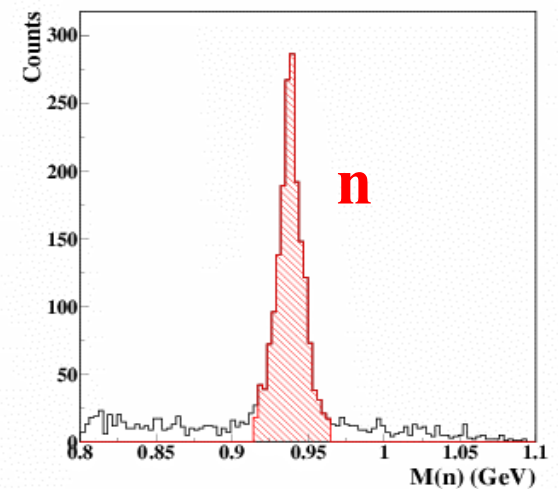
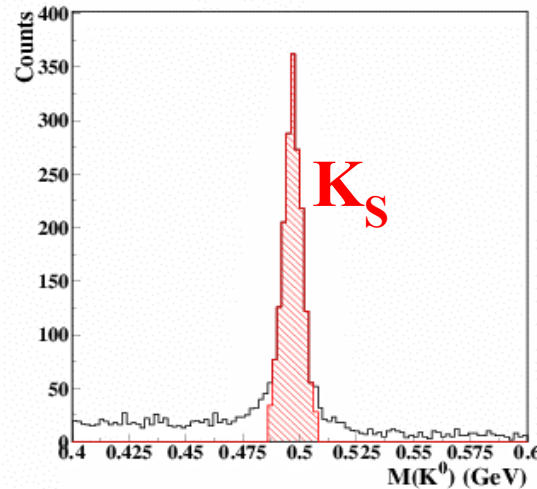
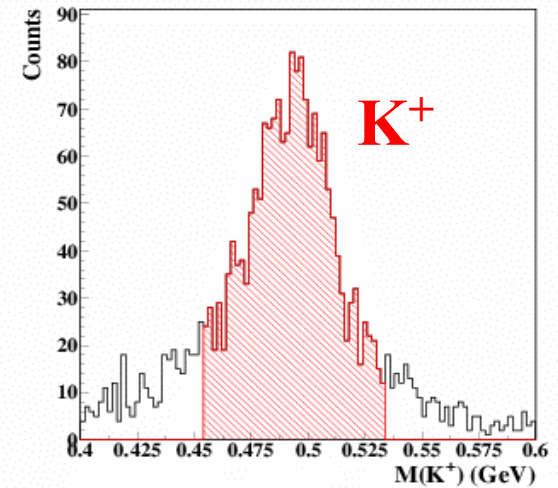
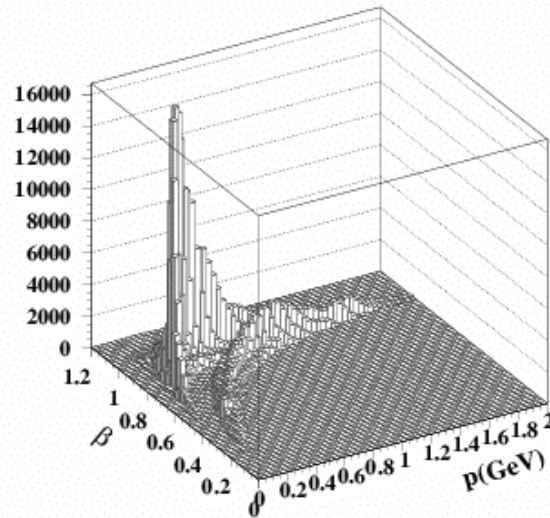


CLAS – Produzione su Idrogeno (II)

$\gamma p \rightarrow \Theta^+ \bar{K}^0 \rightarrow K^+ (n) \pi^+ \pi^-$ Particle ID and Channel Selection



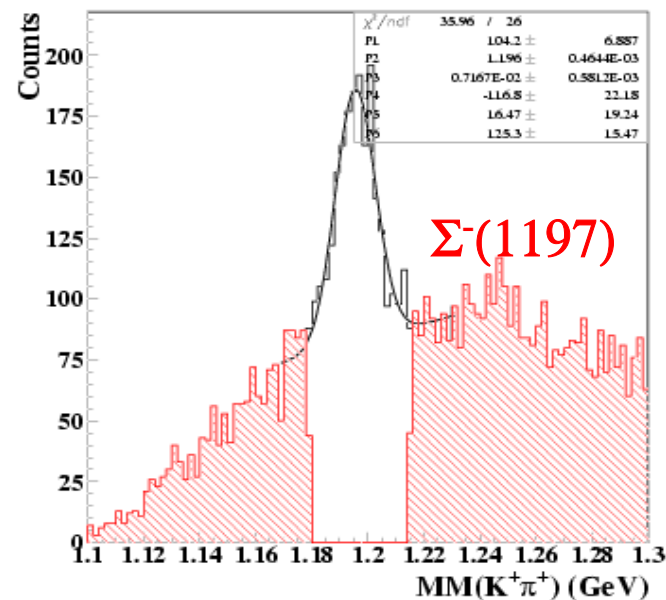
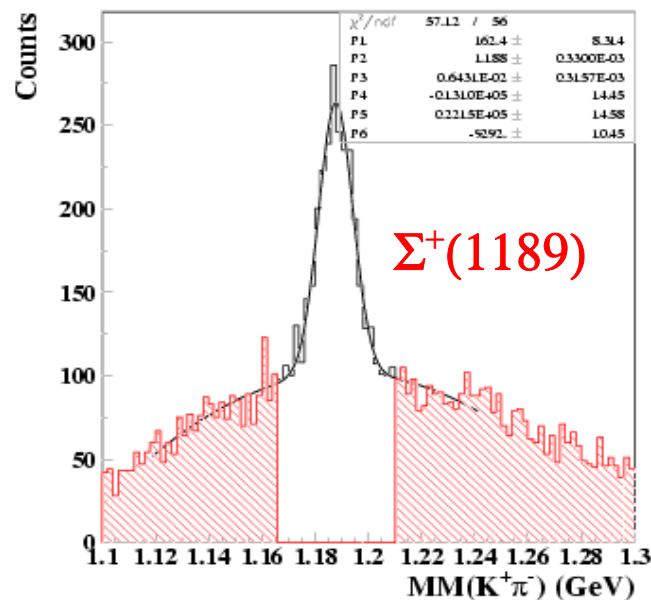
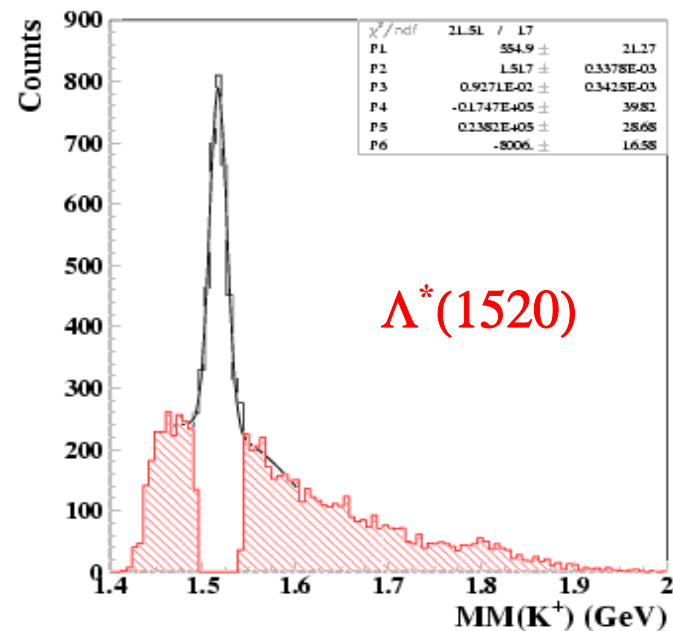
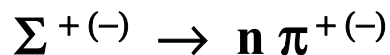
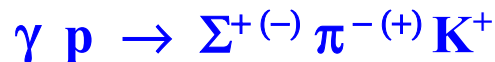
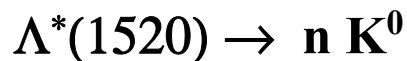
- ✓ the Θ^+ is searched in the $n K^+$ decay mode
- ✓ the \bar{K}^0 is detected via its K_S component decaying into $\pi^+ \pi^-$
- ✓ the final state is identified detecting the **three charged particles** and using the missing mass technique



CLAS – Produzione su Idrogeno (II)

Background Rejection

Background due to production of known hyperons decaying in this same final state was rejected cutting on the corresponding masses



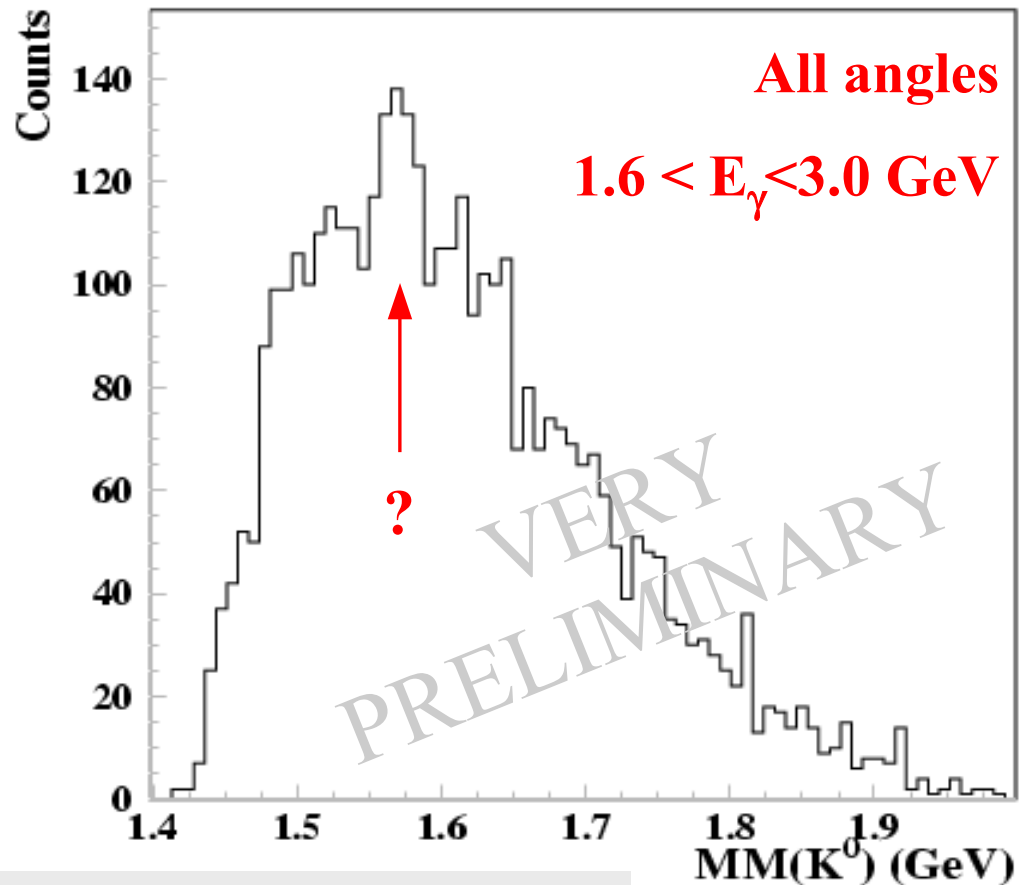
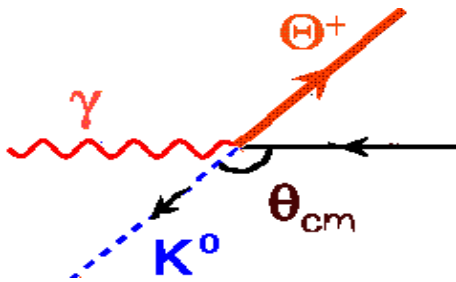
CLAS – Produzione su Idrogeno (II)

Results: $\gamma p \rightarrow \Theta^+ \bar{K}^0$

▶ Θ^+ should show up as a peak in the \bar{K}^0 missing mass spectrum

▶ a structure at ~ 1.57 GeV is visible in the integrated spectrum

▶ this is enhanced when the \bar{K}^0 is selected at backward angles in the $(\bar{K}^0 - \Theta^+)$ CM system



\Rightarrow Nuovo proposal a JLAB (vedi oltre)

Cosa dicono i modelli ?

- ▶ Existence of excited **pentaquark states** is predicted by theory
- ▶ Several models predicts **Θ^+ spin partners** in the same mass range

Soliton model

Borisyuk et al. hep-ph/0307370

- ▶ Θ^+ : $T=0$, $J^P= 1/2^+$ state
- ▶ New series of baryons Θ_1^{++} , Θ_1^+ , Θ_1^0 with $T=1$, $J^P= 3/2^+$
 $\Delta M(3/2-1/2) \sim 55 \text{ MeV}$

Constituent quark model

Dudek and Close hep-ph/0311258

- ▶ Spin-Orbit forces (L·S) responsible for the mass splitting

$$\Delta M(3/2-1/2) \sim 40 \text{ MeV}$$

$$[(\mathbf{ud})_{S=0} (\mathbf{ud})_{S=0} \bar{\mathbf{s}}] \quad \text{Jaffe and Wilczek hep-ph/0307341}$$

$$\Delta M(3/2-1/2) \sim 35-65 \text{ MeV}$$

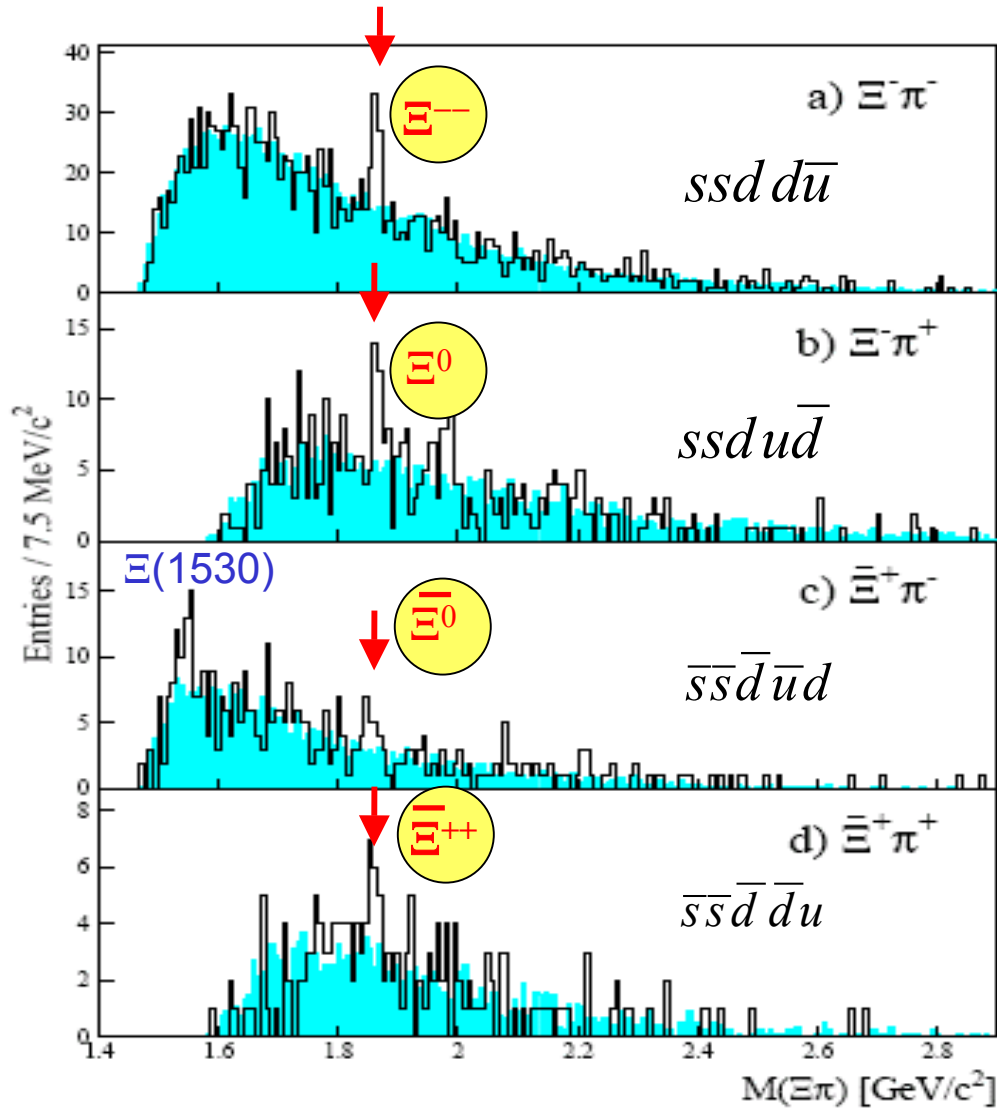
$$[(\mathbf{ud})_{S=0} ((\mathbf{ud})_{S=1} \bar{\mathbf{s}})] \quad \text{Karliner and Lipkin hep-ph/0307243}$$

Bijker Giannini Santopinto hep-ph/0310281

- ▶ Complete classification of $qqq\bar{q}q$ state in spin-flavour SU(6) representation

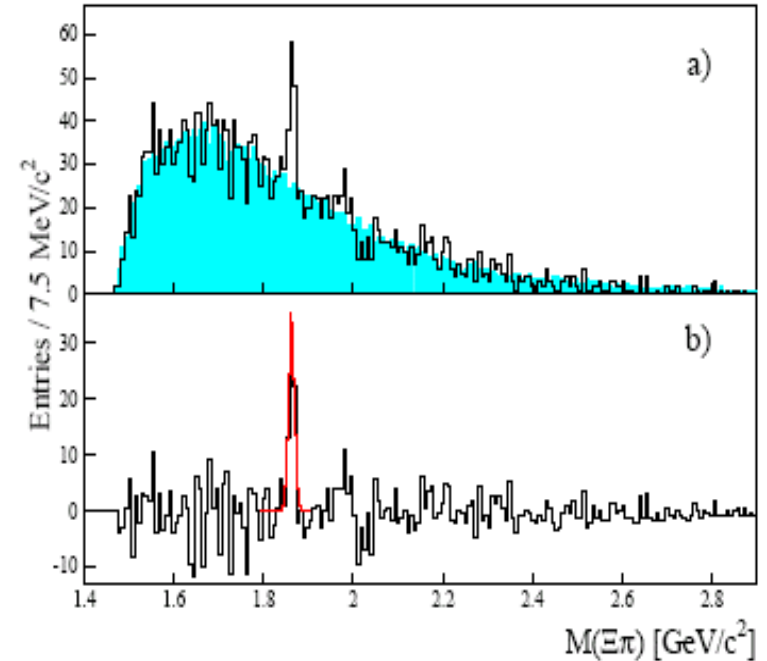
$$\Delta M(3/2-1/2) \sim 120 \text{ MeV}$$

NA49 – Osservazione della Ξ_5^{--}



$M=1.862 \pm 0.002$ GeV
 $\Gamma < 0.018$ GeV

Combined spectra

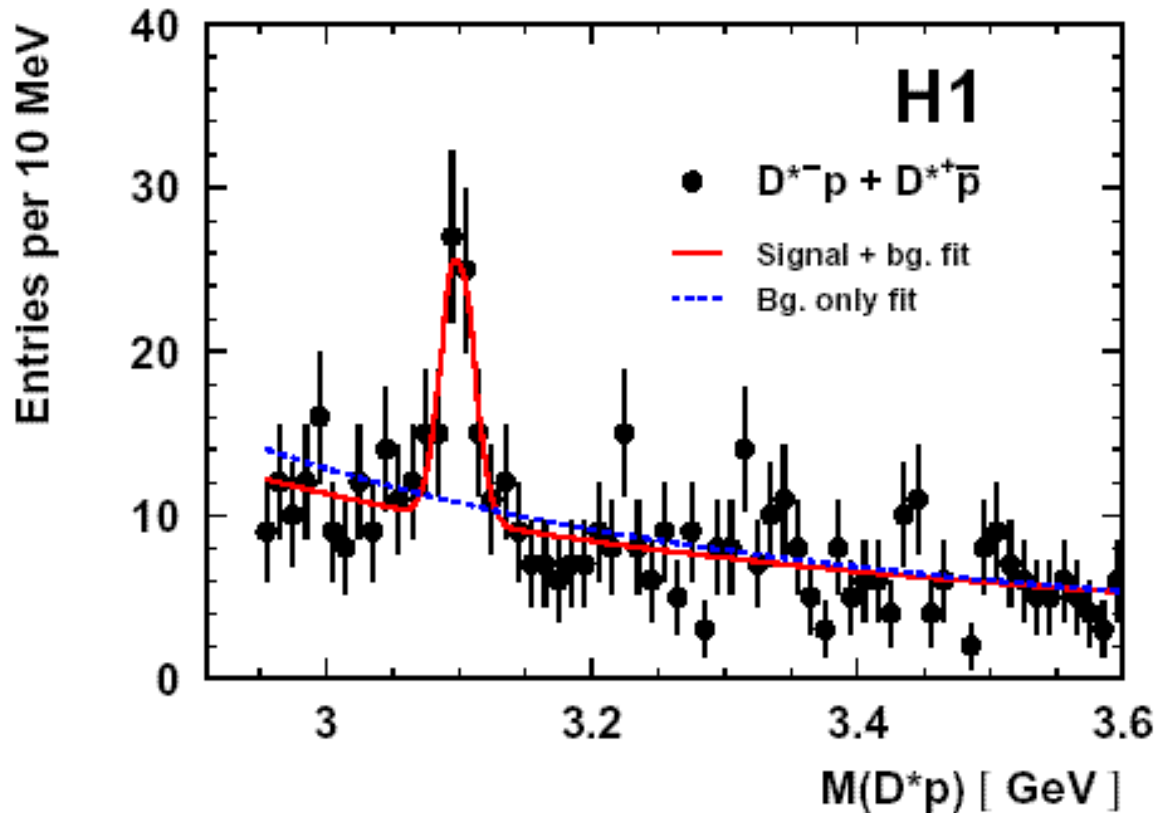


C. Alt, et al., Phys.Rev.Lett.92, 042003 (2004)

Pentaquark anti-charmato da H1 (DESY)

hep-ph/0403017

e-p collision at $\sqrt{s} \sim 300$ GeV



$$M = 3099 \pm 3 \pm 5 \text{ MeV}$$
$$\sigma = 12 \pm 3 \text{ MeV}$$

630 MeV above DN threshold.

Too narrow width?

Jaffe $\rightarrow M(\Theta_c) \approx 2.7$ GeV

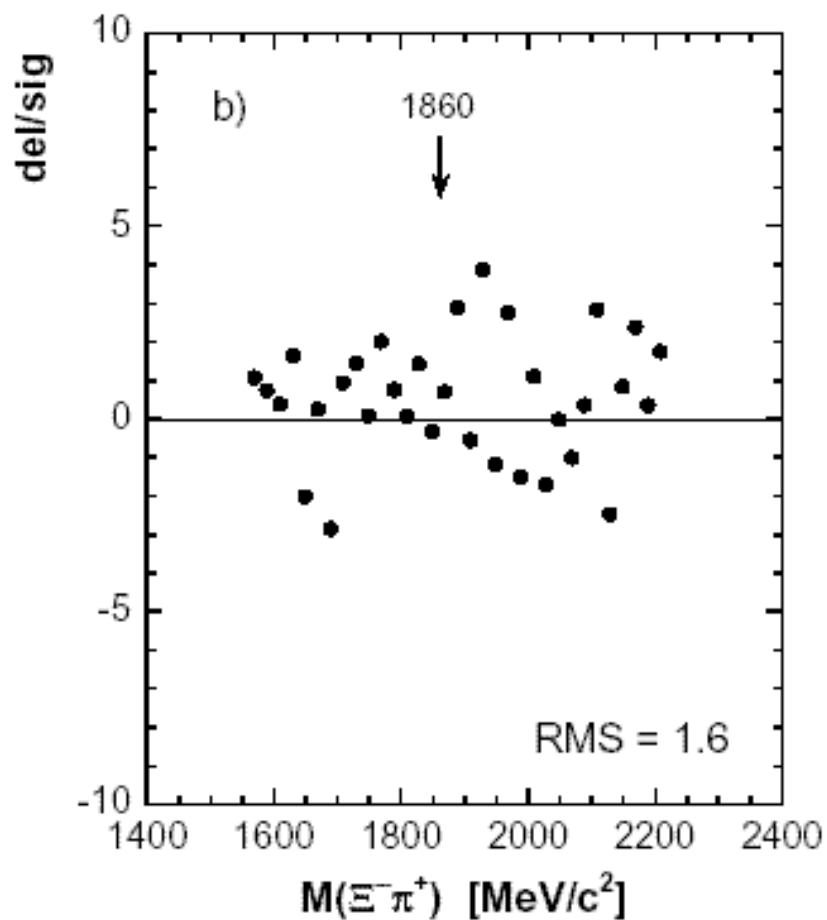
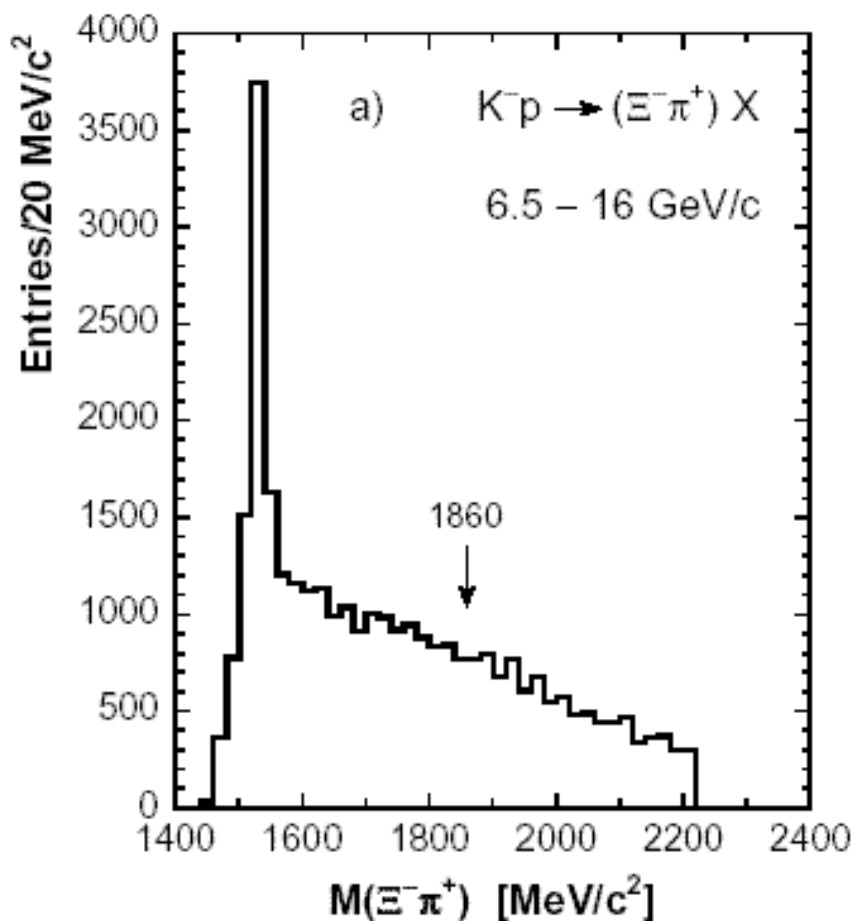
$\Theta_c \rightarrow N D, Q = -100$ MeV \Rightarrow Heavier pentaquarks progressively more stable?

Karliner-Lipkin $\rightarrow M(\Theta_c) \approx 3$ GeV

Searches are possible in hadron and $e+e-$ facilities

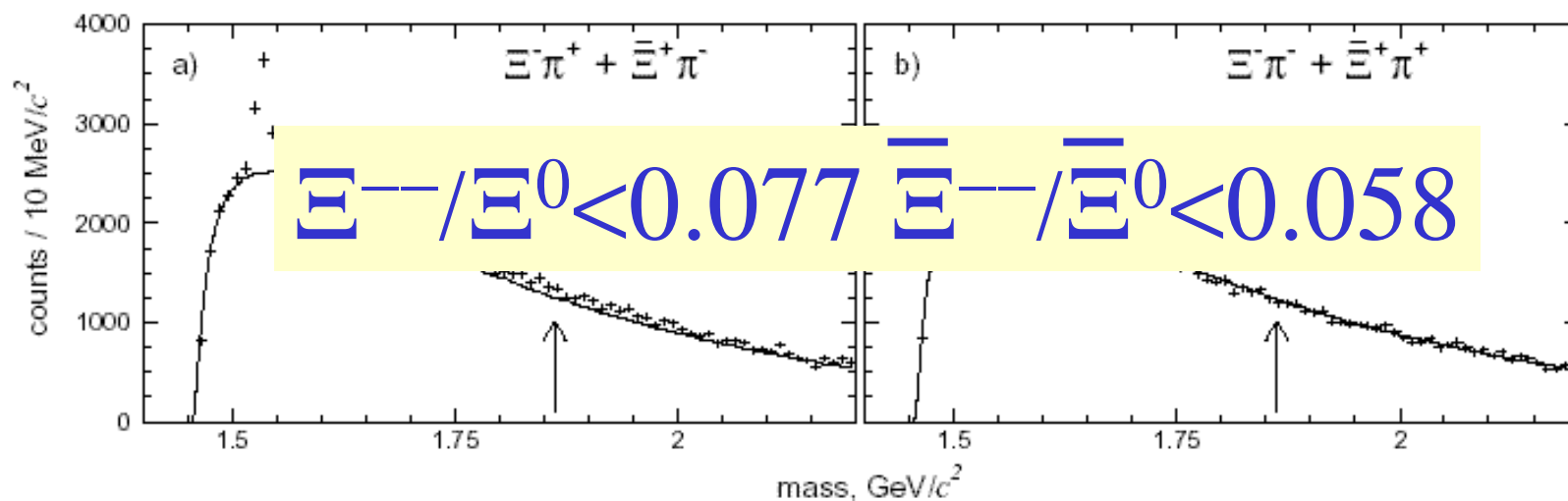
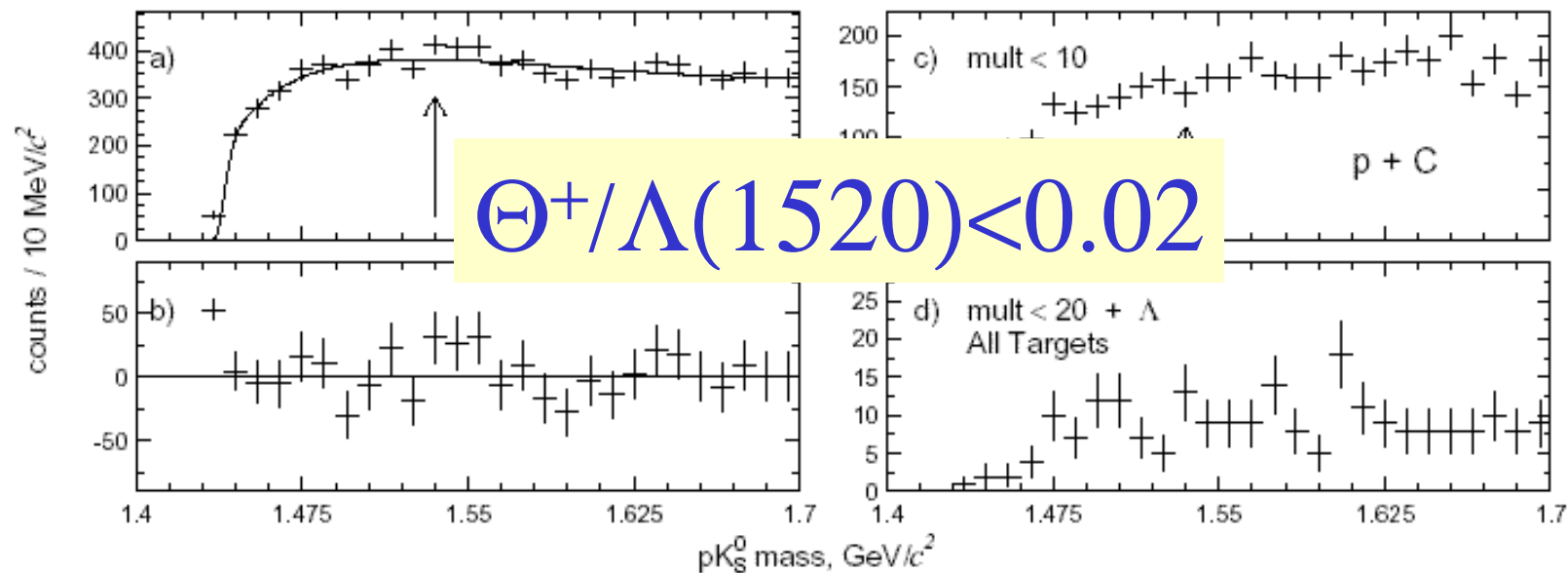
Riesame critico di dati precedenti ad NA49

H.G. Fischer and S. Wenig, hep-ex/0401014



Esperimenti precedenti \rightarrow dati ad alta statistica su varie reazioni \rightarrow no Ξ_5

HERA-B (collisioni p-nucleo)



Critiche e confronto esperimenti in prospettiva

- Considerazioni critiche su NA49 e risultato di HERA-B sono rilevanti, ma
- Attenzione a confrontare esperimenti differenti → energie, reazioni, accettanze in generale diverse
- I meccanismi di produzione in canali diversi possono essere differenti → sezioni d'urto possono differire drammaticamente
- Le energie del CM in diversi esperimenti sono pure molto diverse → sezioni d'urto ?
- Non sempre sufficiente ragionare sul “total yield” → a seconda dei meccanismi, tagli angolari e accettanze possono giocare un ruolo importante
- E' importante notare che i valori della massa osservata della Θ^+ non sono completamente compatibili → conferma ad alta statistica indispensabile
- Nell'immediato, solo Jefferson Lab potrà fornire dati ad alta statistica per confermare l'esistenza almeno della Θ^+

Programma al Jefferson Lab per la spettroscopia dei Pentaquarks

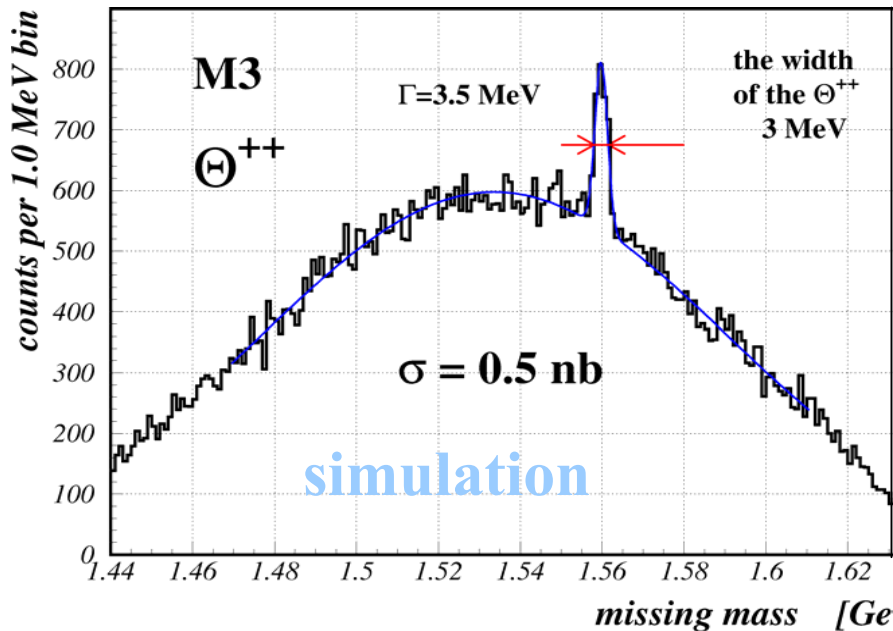
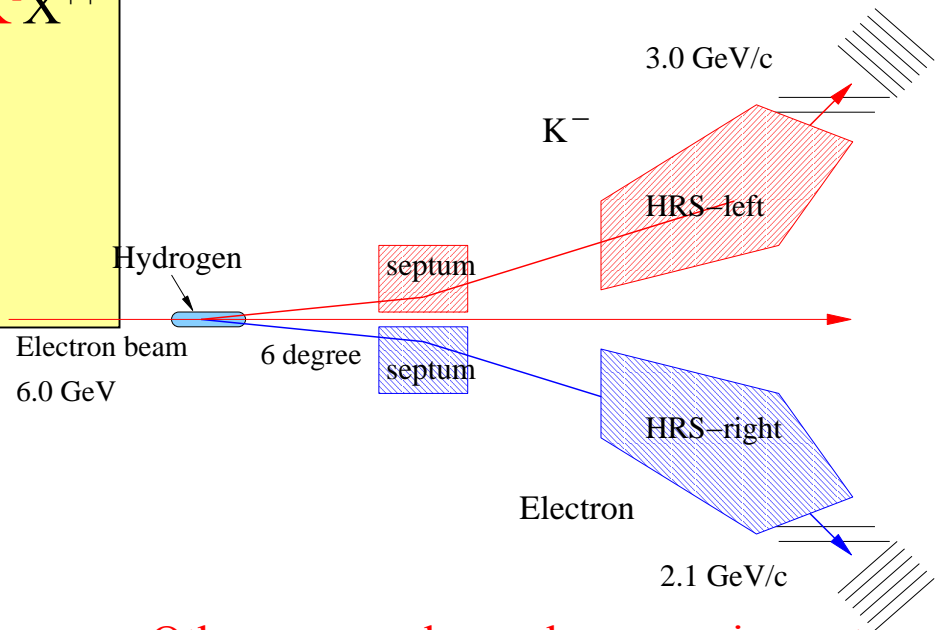
- High statistics search for the Θ^+
- Solving the issues of the $\Theta^+(1540)$
 - mass to < 2 MeV
 - spin $\frac{1}{2}$, isospin
 - parity?
 - natural width of the Θ^+ ?
 - production mechanism
- Are there excited states of the $\Theta^+(1540)$?
- How are pentaquark states related to N^* states?
 - Do N^* couple to Θ^+ ?
 - If so, are these 5-quark N^* ?
- Where are the other exotic members of the decuplet Ξ_5^- , Ξ_5^+ ? NA49 results not confirmed!
- Where are the non-exotic pentaquarks, N^* 's, Σ 's?

CLAS – Nuovo programma sperimentale

- **New measurement on deuterium**
 - $E_\gamma = 1 - 3.6 \text{ GeV}$
 - **Expect 10 times the statistics of published data**
 - **Run currently underway to run until May 2004**
- **New measurement on hydrogen**
 - $E_\gamma = 1 - 3.8 \text{ GeV}$
 - **Expect 10 times the statistics of published data**
 - **Run is scheduled for May-July 2004**
- **Measure angular distributions**
 - **reaction mechanism, spin (\rightarrow only CLAS can measure nearly complete angular distributions)**
- **Ricerca di Θ^{++} e Σ_5 nella Hall A di Jlab**
- **Ricerca di Ξ_5 con CLAS a Jlab**

Ricerca di Θ^{++} e Σ_5 nella Hall A di JLab

- Search for Θ^{*++} partners in $ep \Rightarrow e'K^-X^{++}$
 - Mass range: 1540 - 1620 MeV
- Search for Σ_5^0 in $ep \Rightarrow eK^+X^0$
 - Mass range: 1560 - 1860 MeV
- Mass resolution $\delta M \sim 1.75$ MeV



Other proposals need new equipment

- $eD \rightarrow eK^-nK^+X$
 - Θ^+ mass/widths ~ 2.9 MeV
- $eD \rightarrow eK^-p_{\text{soft}}X$
 - Θ^+ mass $\Delta M \sim 1.3$ MeV, $\Gamma \sim 3.4$ MeV

CLAS - Ricerca dei Pentaquark Ξ_5

The search for Ξ_5 states can be approached in at least two ways:

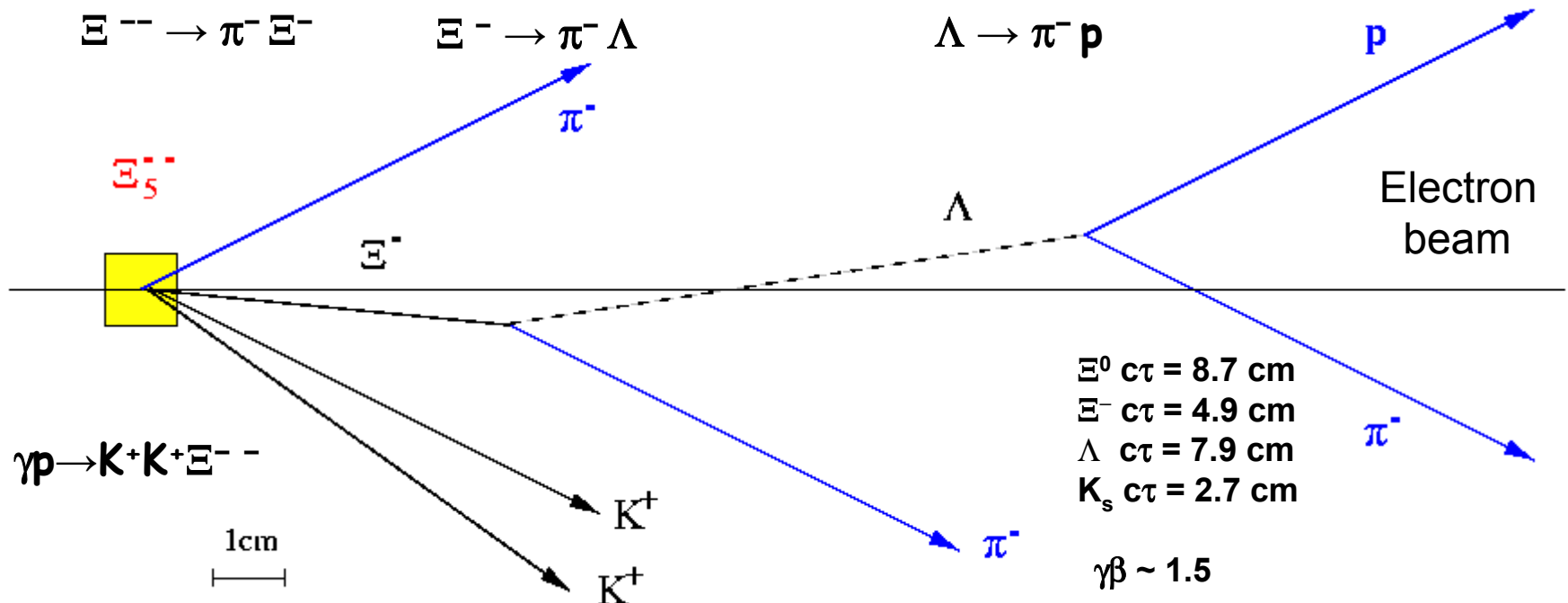
- Missing mass technique:

$$\gamma p \longrightarrow K^+ K^+ \Xi^- ; K^+ K^+ \pi^- \Xi^{--} \rightarrow \text{needs good resolution}$$

- Reconstruction of all decay particles:

$$\gamma n \longrightarrow K^+ K^+ \Xi^{--} \rightarrow \pi^- \Xi^- \rightarrow \pi^- \Lambda \rightarrow \pi^- p,$$

needs good acceptance and vertex resolution



Conclusioni

- ✓ Recentemente, il modello chirale a solitoni ha riaccessso l'attenzione sulla possibile esistenza di barioni esotici, in particolare pentaquark con $S=+1$ o $S=-2$
- ✓ Numerosi gruppi sperimentali hanno riportato l'evidenza di un barione a $S=+1 \rightarrow$ massa ≈ 1.53 GeV, larghezza \approx MeV
- ✓ Il nuovo esperimento ad alta statistica a LEPS su deuterio ha riconfermato la presenza del picco \rightarrow fluttuazione statistica sembra improbabile

JLab \rightarrow sforzo significativo nello studio dei Pentaquark
Analisi dati con diversi bersagli, reazioni, energie

- Evidenza della Θ^+ su idrogeno e deuterio, a differenti energie di fascio
 \rightarrow nuovo esperimento ad alta statistica su deuterio in corso
 - Segnale piú forte finora su idrogeno (con tagli cinematici)
 - Possibile indicazione di stati eccitati/spin-isospin partners dall'idrogeno
 \rightarrow nuovo esperimento ad alta statistica su idrogeno a maggio
- ✓ Altri esperimenti \rightarrow osservazione Ξ_5 ma qualche altro non vede né Θ né Ξ
 \Rightarrow quadro sperimentale complesso, non ovvio confrontare diversi dati
 \Rightarrow nuove misure indispensabili

Conclusioni (continua)

Jlab → programma a medio termine per la ricerca dei 5-quark:

- Stabilire con certezza l'esistenza della Θ^+ with con significatività molto alta, sia per idrogeno sia per deuterio
- Determininare la massa della Θ^+ con $\Delta M < 2$ MeV
- Migliorare/confermare il limite su $\Gamma \sim 8-9$ MeV
- Ricerca di uno stato eccitato stretto della Θ^+ → determinare la massa con $\Delta M < 2$ MeV e l'isospin
- Ricerca di isospin partners della Θ^+ → determinare Γ a ~ 3 MeV

Jlab → programma a medio/lungo termine:

- Ricerca di stati esotici e non-esotici del tipo Ξ^{--} , Ξ^- tramite ricostruzione completa dello stato finale
- Ricerca di stati Ξ_5 tramite massa mancante → testato su Ξ_3 note
- Programma globale di spettroscopia ad alta statistica a 6 GeV

Macchine adroniche ? Fasci di K ?

PDG:

“Existence ranges from very likely to certain, but
further confirmation is desirable” → *** definition