

Contributo dello scambio di due fotoni al  
processo  $e^+e^- \rightarrow p\bar{p}$   
e  
spettroscopia dei mesoni leggeri

Simone Pacetti  
INFN Laboratori Nazionali di Frascati

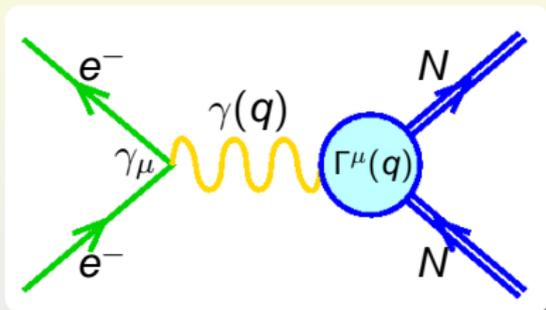
*Road-Map* INFN: Fisica  $e^+e^-$  a LNF

Milano 4 Novembre 2005

- 1 Contributo  $\gamma\gamma$  in  $e^+e^- \rightarrow p\bar{p}$ 
  - Introduzione
  - Contributo  $\gamma\gamma$  time-like
  
- 2 Spettroscopia dei mesoni leggeri a E687
  - Fotoproduzione diffrattiva dello stato finale  $3\pi^+3\pi^-$
  - Fotoproduzione diffrattiva dello stato finale  $2\pi^+2\pi^-$



# Fattori di Forma dei Nucleoni



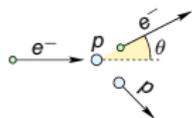
Operatore corrente dei nucleoni (Dirac e Pauli)

$$\Gamma^\mu(q) = \gamma^\mu F_1(q^2) + \frac{i}{2M_N} \sigma^{\mu\nu} q_\nu F_2(q^2)$$

Fattori di forma elettrico e magnetico

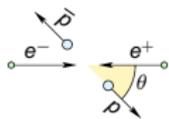
$$G_E(q^2) = F_1(q^2) + \tau F_2(q^2) \quad \tau = \frac{q^2}{4M_N^2}$$

$$G_M(q^2) = F_1(q^2) + F_2(q^2)$$



Diffusione elastica (Rosenbluth)

$$\frac{d\sigma}{d\omega} = \frac{\alpha^2 E_e' \cos^2 \frac{\theta}{2}}{4E_e^3 \sin^4 \frac{\theta}{2}} \left[ G_E^2 - \tau \left( 1 + 2(1 - \tau) \tan^2 \frac{\theta}{2} \right) G_M^2 \right] \frac{1}{1 - \tau}$$

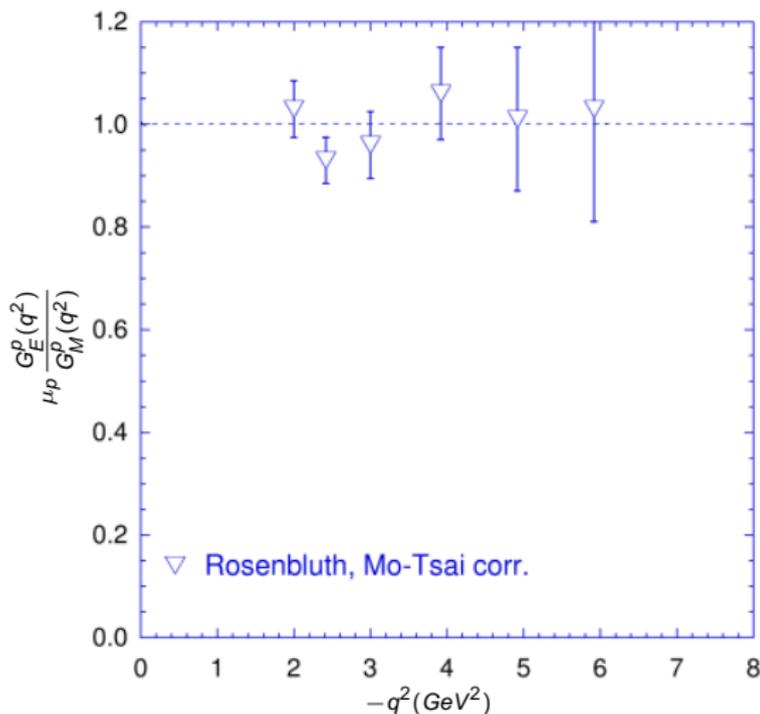


Annichilazione

$$\frac{d\sigma}{d\omega} = \frac{\alpha^2 \sqrt{1 - 1/\tau}}{4q^2} \left[ (1 + \cos^2 \theta) |G_M|^2 + \frac{1}{\tau} \sin^2 \theta |G_E|^2 \right]$$

# Incompatibilità tra Rosenbluth e Polarizzazione

## Dati space-like



## Legge di "scaling"

$$G_E^p \simeq G_M^p / \mu_p$$

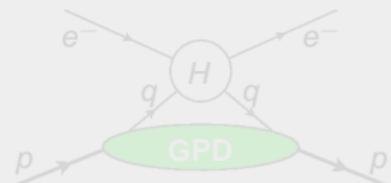
Misura a Jlab

Polarizzazione del nucleone

$$\frac{G_E^p(q^2)}{G_M^p(q^2)} = -\sqrt{\frac{-2\epsilon}{\tau(1+\epsilon)}} \frac{P_{\parallel}}{P_{\perp}}$$

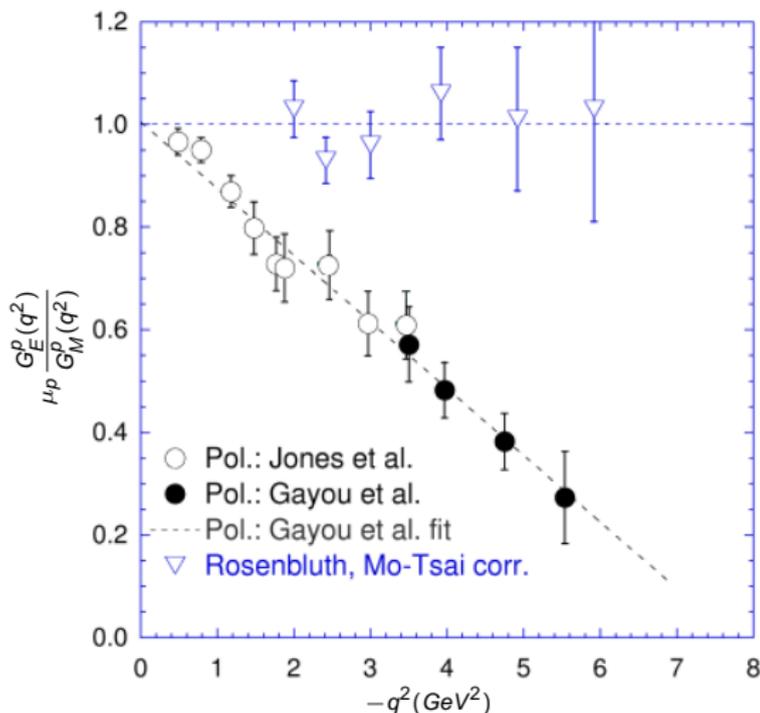
$$\frac{1}{\epsilon} = 1 + 2(1 - \tau) \tan^2\left(\frac{\theta}{2}\right)$$

Correzione  $2\gamma$ +GPD



# Incompatibilità tra Rosenbluth e Polarizzazione

## Dati space-like



## Legge di "scaling"

$$G_E^p \simeq G_M^p / \mu_p$$

## Misura a Jlab

Polarizzazione del nucleone

$$\frac{G_E^p(q^2)}{G_M^p(q^2)} = -\sqrt{\frac{-2\epsilon}{\tau(1+\epsilon)}} \frac{P_{\parallel}}{P_{\perp}}$$

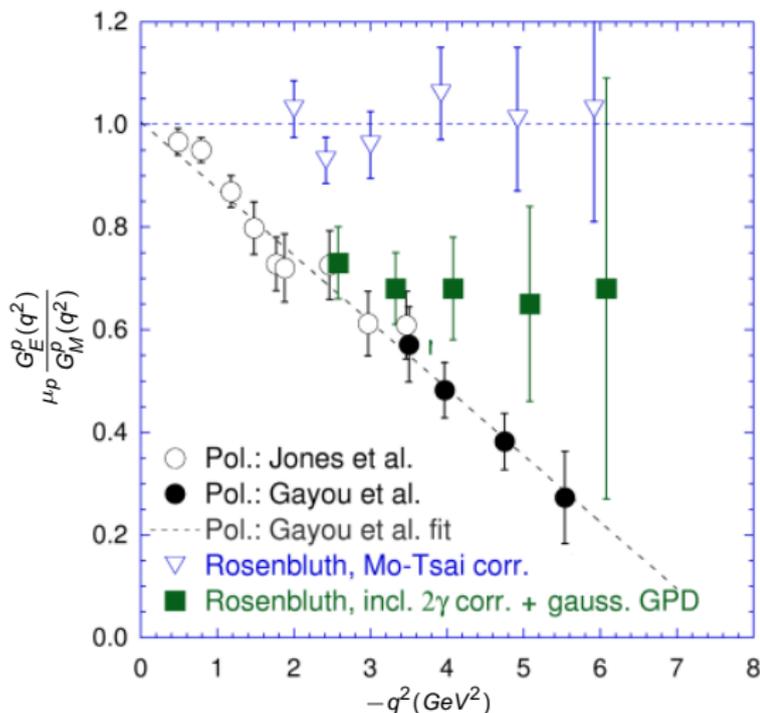
$$\frac{1}{\epsilon} = 1 + 2(1 - \tau) \tan^2\left(\frac{\theta}{2}\right)$$

## Correzione $2\gamma$ +GPD



# Incompatibilità tra Rosenbluth e Polarizzazione

## Dati space-like



## Legge di "scaling"

$$G_E^p \simeq G_M^p / \mu_p$$

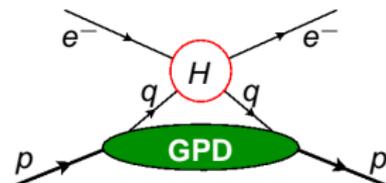
## Misura a Jlab

Polarizzazione del nucleone

$$\frac{G_E^p(q^2)}{G_M^p(q^2)} = -\sqrt{\frac{-2\epsilon}{\tau(1+\epsilon)}} \frac{P_{\parallel}}{P_{\perp}}$$

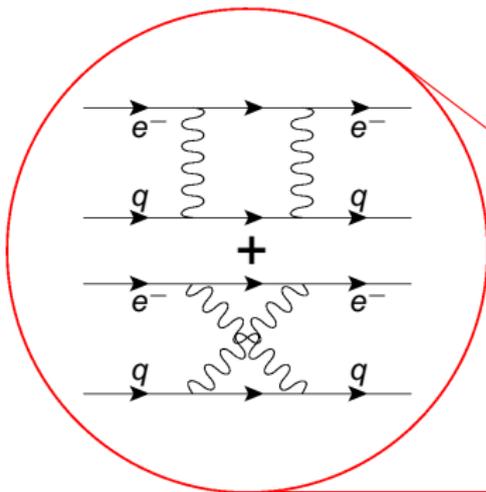
$$\frac{1}{\epsilon} = 1 + 2(1 - \tau) \tan^2\left(\frac{\theta}{2}\right)$$

## Correzione $2\gamma$ +GPD



# Incompatibilità tra Rosenbluth e Polarizzazione

## Diagrammi quark-elettrone del "blob" $H$



Legge di "scaling"

$$G_E^p \simeq G_M^p / \mu_p$$

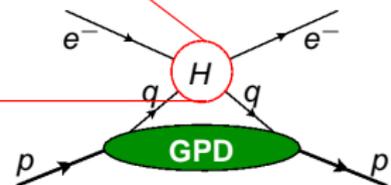
Misura a Jlab

Polarizzazione del nucleone

$$\frac{G_E^p(q^2)}{G_M^p(q^2)} = -\sqrt{\frac{-2\epsilon}{\tau(1+\epsilon)}} \frac{P_{\parallel}}{P_{\perp}}$$

$$\frac{1}{\epsilon} = 1 + 2(1 - \tau) \tan^2\left(\frac{\theta}{2}\right)$$

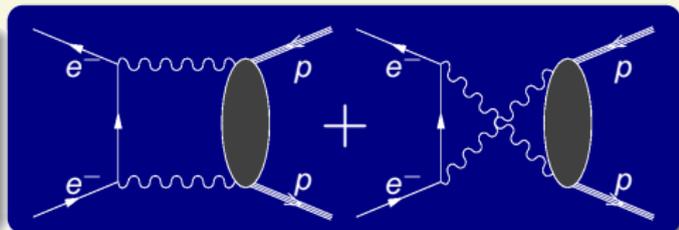
Correzione  $2\gamma$ +GPD



# La regione time-like

Nella regione time-like il problema della modellizzazione del "blob" dei nucleoni può essere aggirato utilizzando i dati di

$$\gamma\gamma \rightarrow p\bar{p}$$



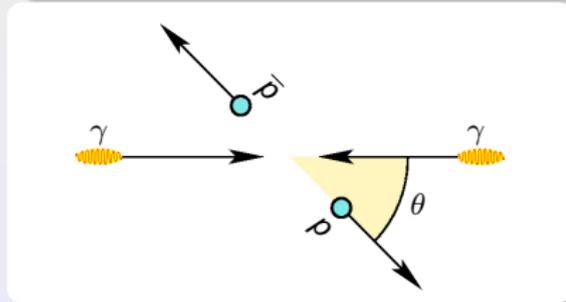
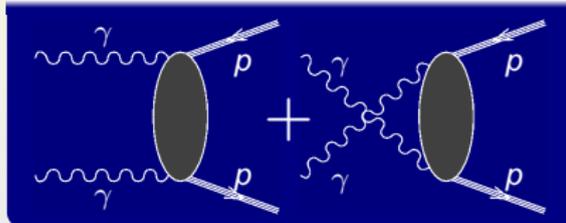
Regola di Cutkosky

$$2\text{Im} \left( \text{Diagram 1} + \text{Diagram 2} \right) = \sum \left( \text{Diagram 3} \right) \times \left( \text{Diagram 4} \right)^*$$



# Generalizzazione della corrente $\gamma\gamma$ dei nucleoni

$$\gamma(k_1) + \gamma(k_2) \rightarrow p(q_1) + \bar{p}(q_2)$$



## Corrente $\gamma\gamma$ Lorentz invariate

Ampiezza:

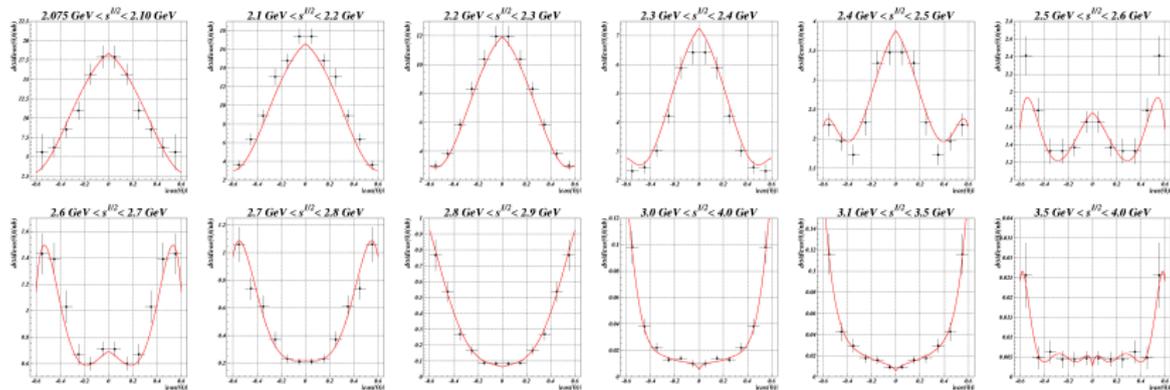
$$\mathcal{A} = \bar{u}(q_1) \Gamma^{\mu\nu}(s, x) v(q_2) \epsilon_\mu(k_1) \epsilon_\nu(k_2)$$

dove:

- $s = (k_1 + k_2)^2$  e  $x = \cos \theta$
- $\Gamma^{\mu\nu}(s, x) = \sum_{i=1}^6 b_i^{\mu\nu}(s, x) A_i(s, x)$
- $\{b_i^{\mu\nu}(s, x)\}$  è una base dello spazio  $M(4 \times 4)^{\mu\nu}$
- $A_i(s, x)$  sono fattori di forma

# Estrazione dei fattori di forma $A_i(s, x)$ dai dati di

## Distribuzioni angolari e fit



## Sezione d'urto $\gamma\gamma \rightarrow p\bar{p}$

$$\frac{d\sigma}{d|x|} = \frac{\alpha^2}{32\pi} \frac{1}{s} \sqrt{1 - \frac{4M_p^2}{s}} \sum_{i,j=1}^6 A_i(s, x) A_j^*(s, x) c_{i,j}(s, x)$$

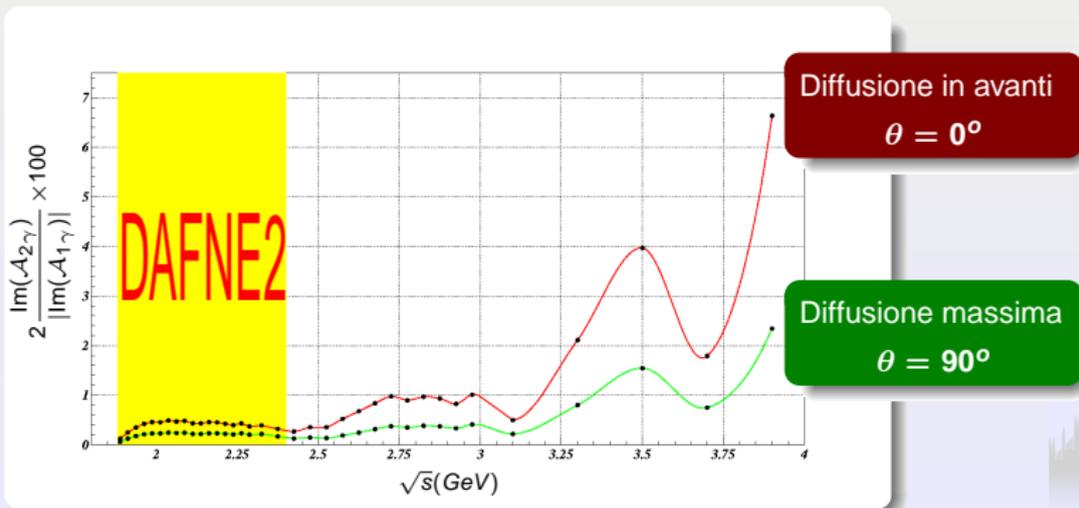
I coefficienti  $c_{i,j}(s, x)$  sono noti, le funzioni  $A_i(s, x)$  sono da determinare

# Calcolo della correzione

Sezione d'urto  $e^+e^- \rightarrow p\bar{p}$

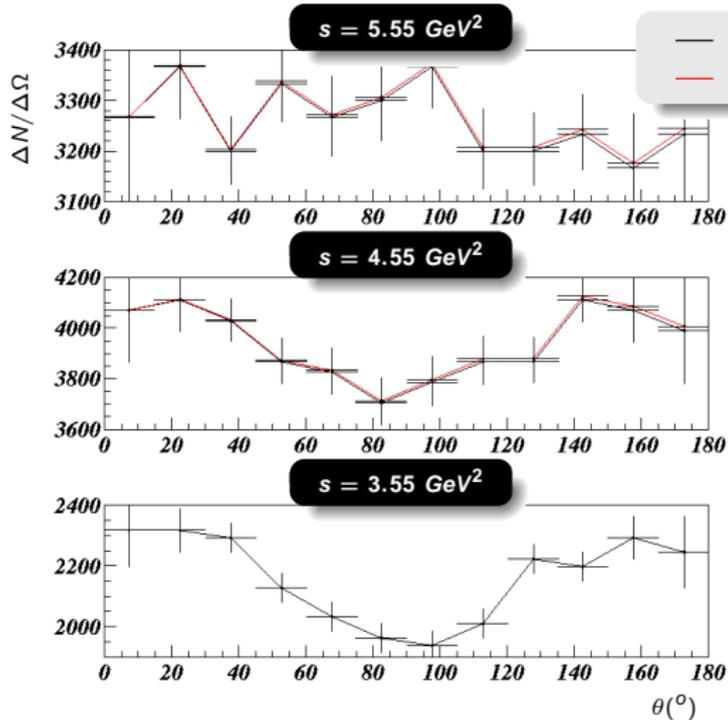
$$\frac{d\sigma}{d\Omega} \simeq \left[ \frac{d\sigma}{d\Omega} \right]_{1\gamma} \left( 1 + 2 \frac{\text{Re}(\mathcal{A}_{1\gamma}\mathcal{A}_{2\gamma}^*)}{|\mathcal{A}_{1\gamma}|^2} \right) \simeq \left[ \frac{d\sigma}{d\Omega} \right]_{1\gamma} \left( 1 + 2 \frac{\text{Im}(\mathcal{A}_{2\gamma})}{|\text{Im}(\mathcal{A}_{1\gamma})|} \right)$$

La seconda identità è conseguenza di:  $\mathcal{A}_{1\gamma}(s) \simeq \text{Im}[\mathcal{A}_{1\gamma}(s)]$  per  $s \geq 4M_p^2$



## Distribuzioni angolari (FINUDA)

(M. Mirazita "Workshop on Nucleon Form Factors", Frascati, 2005)



### Condizioni

- $|G_M| = |G_E|$
- Luminosità:  $\mathcal{L} = 100 \text{ pb}^{-1}$
- Efficienza:  $\epsilon = 80\%$

# Dalla regione time-like a quella space-like

Sezione d'urto  $e^+e^- \rightarrow p\bar{p}$ :  $\text{Im}[A_{2\gamma}(s)]$  può essere misurata per  $s > 4M_p^2$

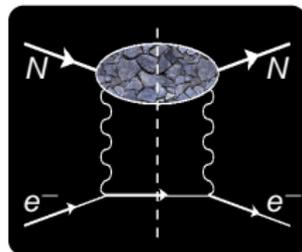
$$\frac{d\sigma}{d\Omega} \simeq \left[ \frac{d\sigma}{d\Omega} \right]_{1\gamma} \left( 1 + 2 \frac{\text{Re}(\mathcal{A}_{1\gamma}\mathcal{A}_{2\gamma}^*)}{|\mathcal{A}_{1\gamma}|^2} \right) \simeq \left[ \frac{d\sigma}{d\Omega} \right]_{1\gamma} \left( 1 + 2 \frac{\text{Im}(\mathcal{A}_{2\gamma})}{|\text{Im}(\mathcal{A}_{1\gamma})|} \right)$$

## Relazioni di dispersione

Per usare le relazioni di dispersione

$$\mathcal{A}_{2\gamma}(q^2) = \frac{1}{\pi} \int_{s_{\text{th}}}^{\infty} \frac{\text{Im}[\mathcal{A}_{2\gamma}(s)] ds}{s - q^2}$$

al fine di legare valori time-like ( $s > 0$ ) e space-like ( $q^2 < 0$ ) di  $\mathcal{A}_{2\gamma}(s)$  è necessario richiedere che il "blob" dei nucleoni non possa essere "tagliato", ovvero che  $\mathcal{A}_{2\gamma}(q^2)$  space-like sia **reale**.

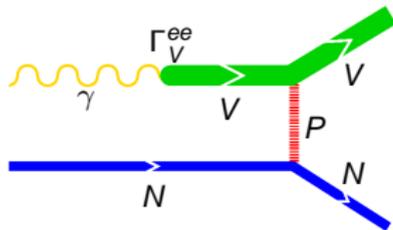


Sezione d'urto  $e^-p \rightarrow e^-p$  ( $q^2 < 0$ )

$$\frac{d\sigma}{d\Omega}(q^2) \simeq \left[ \frac{d\sigma}{d\Omega}(q^2) \right]_{1\gamma} \left( 1 + 2 \frac{\text{Re}[\mathcal{A}_{1\gamma}(q^2)]\mathcal{A}_{2\gamma}(q^2)}{|\mathcal{A}_{1\gamma}(q^2)|^2} \right)$$

# Connessione tra fotoproduzione e annichilazione $e^+e^-$

Fotoproduzione diffrattiva



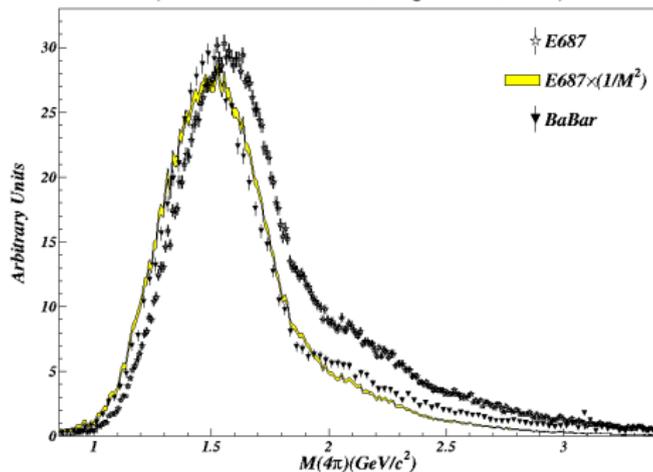
$$\sigma_{\gamma V \rightarrow VN}^{\text{diff}} \propto \Gamma_V^{ee} \cdot \sigma_{VN \rightarrow VN}$$

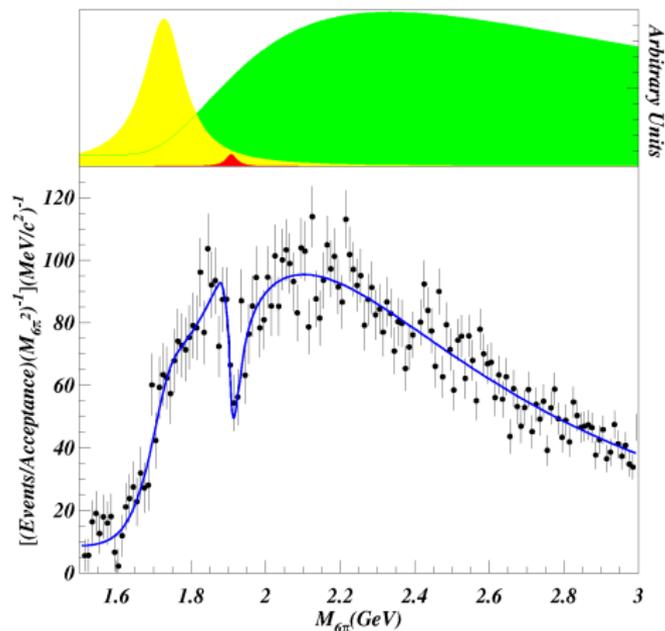
$$\Gamma_V^{ee} \propto \int M^2 \sigma_{e^+e^- \rightarrow V}(M) dM$$

$$\frac{1}{M^2} \frac{d\sigma^{\text{diff}}}{dM} \propto \sigma_{e^+e^-}(M)$$

$$\sigma(e^+e^- \rightarrow 2\pi^+2\pi^-) \propto \frac{1}{M^2} \frac{d\sigma(\gamma N \rightarrow 2\pi^+2\pi^- N)}{dM}$$

(P. Lebrun *Hadron '97*, Aug. 25-30, 1997)



Stato finale  $3\pi^+3\pi^-$  a E687Fotoproduzione di  $3\pi^+3\pi^-$  scalata per  $1/M_{6\pi}^2$ 

## Caratteristiche del fit

Funzione ( $s = M_{6\pi}^2$ ):

$$f(s) = |BW_0(s) + BW_1(s) + JS(s)|^2$$

●  $JS(s)$  funzione Jacob-Slansky●  $BW_0(s)$   $BW_1(s)$  risonanze

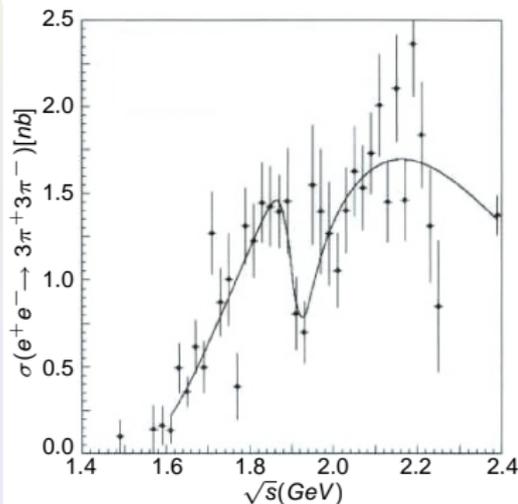
## Parametri del fit

Ris.	$M(\text{MeV})$	$\Gamma(\text{MeV})$
$V_0$	$1910 \pm 10$	$37 \pm 13$
$V_0(\text{PLB514})$	$1911 \pm 4$	$29 \pm 11$
$V_1$	$1730 \pm 34$	$315 \pm 100$

# Altre misure dello stato finale $3\pi^+3\pi^-$ ( $2\pi^+2\pi^-2\pi^0$ ) in annichilazione $e^+e^-$

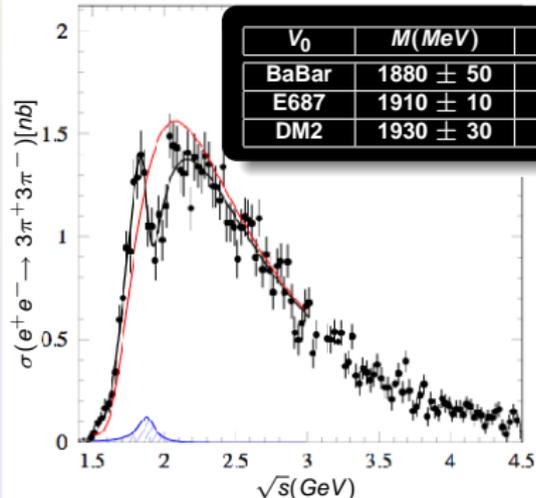
## DM2

"Fenice" Workshop, Frascati, 1988



## BaBar ( $3\pi^+3\pi^-$ ) E. Solodov

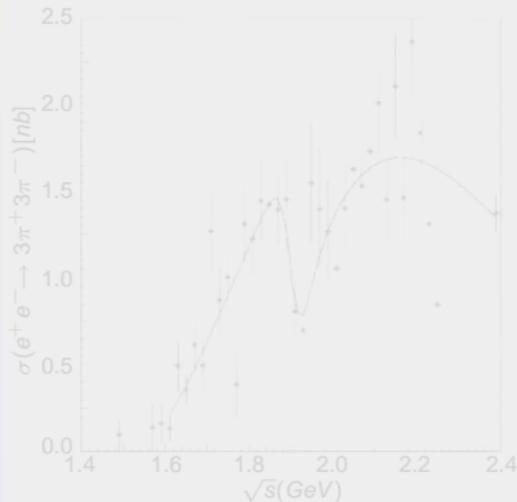
"Workshop on Nucleon Form Factors", Frascati, 2005



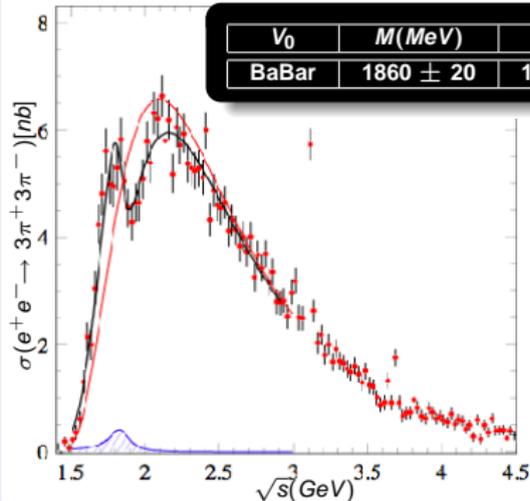
# Altre misure dello stato finale $3\pi^+3\pi^-$ ( $2\pi^+2\pi^-2\pi^0$ ) in annichilazione $e^+e^-$

DM2

"Fenice" Workshop, Frascati, 1988

BaBar ( $2\pi^+2\pi^-2\pi^0$ ) E. Solodov

"Workshop on Nucleon Form Factors", Frascati, 2005



# 6 $\pi$ : sommario

## Numeri quantici del $\rho(1900)$

$$J^{PC} = 1^{--}$$

$$G = +1$$

$$\text{Isospin} = 1$$

L'evidenza di DM2 è stata osservata da E687 e confermata da BaBar

## Possibili interpretazioni

- Lo stato legato  $N\bar{N}$  sembra escluso
  - OBELIX non ha visto nulla in  $p\bar{n} \rightarrow 3\pi^+2\pi^-\pi^0$
  - La massa è maggiore rispetto al valore di soglia:  $2M_p \sim 1.87 \text{ GeV}$

### ● Stato legato ibrido $q\bar{q}g$

- Ibridi non-strani sono previsti con  $M \sim 1.9 \text{ GeV}$
- Hanno accoppiamento e.m. piccolo ma non nulla (dip)
- Ci sono regole di selezione che favoriscono decadimenti in canali ad alta molteplicità e accoppiamento debole ( $6\pi$ )

Rimane la discrepanza con la larghezza trovata da BaBar

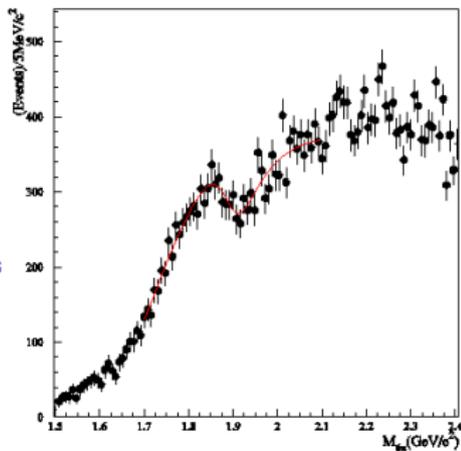
$$\Gamma_{\text{BaBar}} = 130(160) \pm 30(20) \text{ MeV} \quad \Gamma_{\text{E687}} = 37 \pm 13 \text{ MeV}$$

Una recente analisi dei dati di E831 sembra dare larghezze maggiori...

E831:  $3\pi^+3\pi^-$  analisi in corso

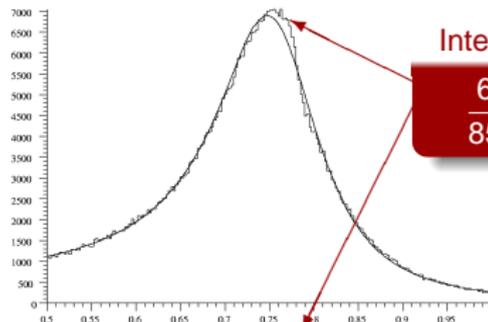
## FOCUS PRELIMINARY FOR YOUR EYES ONLY

- $\gamma N \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^+\pi^-\pi^+\pi^-$
- Fit a la E687, only stat. errors
- $M_{\rho(1900)} = 1.898 \pm 0.016 \text{ GeV}/c^2$
- $\Gamma_{\rho(1900)} = 98 \pm 21 \text{ MeV}/c^2$



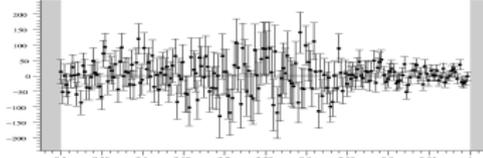
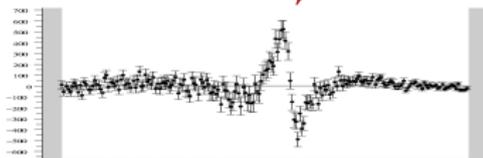
# Metodo di analisi nel caso dello stato finale $\pi^+\pi^-$

## Risonanza del $\rho(770)$ in $\pi^+\pi^-$



Interferenza  $\rho - \omega$

$$\frac{650}{8500} = 0.075$$



## Metodo

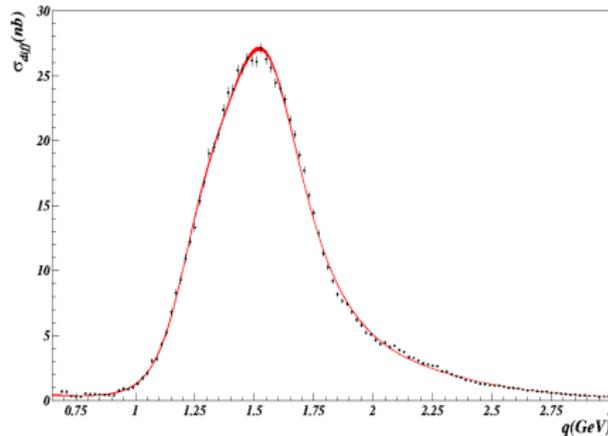
-  Fare il fit con le strutture principali (totale)
-  Calcolare il residuo "dati meno fit"
-  Fittare il residuo con termini d'interferenza



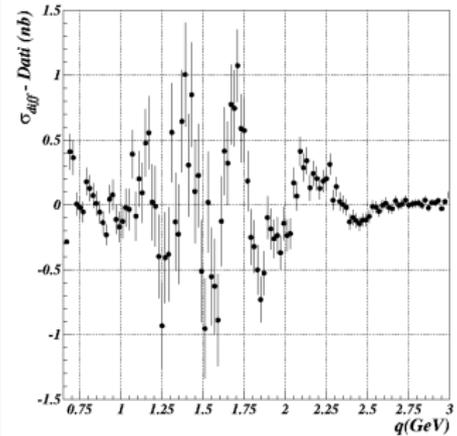
# Stato finale $2\pi^+2\pi^-$ (P. Lebrun, "Hadron 97")

## fit totale e residuo

Fit totale con 3 Breit-Wigner

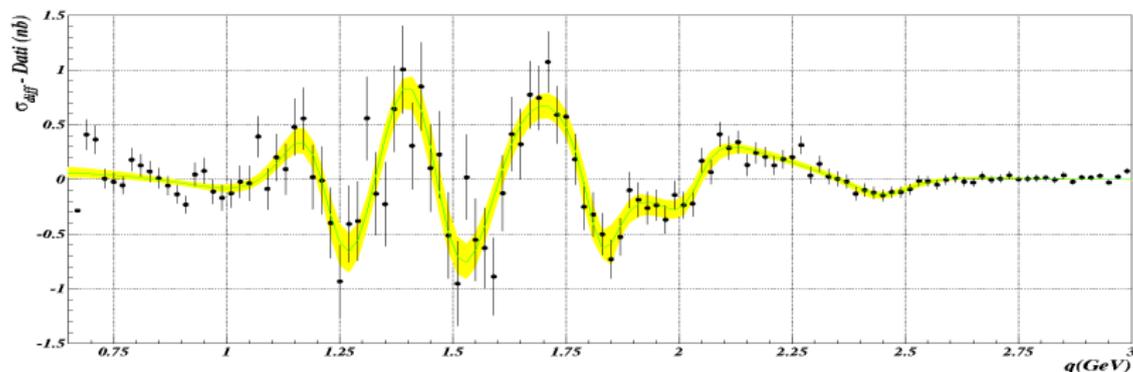


Residuo



Fit del residuo  $2\pi^+2\pi^-$  e possibili risonanze

## Residuo e fit dei termini d'interferenza



Res.	$\Gamma_{e^+e^-j} B_{j2\pi^+2\pi^-}$ (KeV)	$M$ (MeV)	$\Gamma$ (MeV)	$\phi$ (rad)
$V_1$	$(4 \pm 2) \times 10^{-2}$	$1209 \pm 6$	$218 \pm 16$	$2.56 \pm 0.04$
$V_2$	$(5 \pm 2) \times 10^{-2}$	$1465 \pm 8$	$265 \pm 23$	$4.26 \pm 0.08$
$V_3$	$(1.1 \pm 0.6) \times 10^{-3}$	$1820 \pm 25$	$100 \pm 30$	$0.7 \pm 0.6$
$V_4$	$(3 \pm 2) \times 10^{-3}$	$2030 \pm 20$	$170 \pm 80$	$2.6 \pm 0.4$
$V_5$	$(1.3 \pm 0.7) \times 10^{-3}$	$2460 \pm 24$	$190 \pm 60$	$2.5 \pm 0.3$

## 4 $\pi$ : sommario

L'analisi dei dati di E687 per lo stato finale  $2\pi^+2\pi^-$  suggerisce la possibile presenza di alcune sottostrutture con accoppiamento elettromagnetico  $\Gamma_{e^+e^-}$  debole.

Comunque, l'interpretazione di queste strutture in termini di risonanze necessita una statistica di almeno un **ordine di grandezza** superiore a quella attuale.

