

Fisica Nucleare e Subnucleare II

Lezioni n. 5, 6

- Richiami di argomenti da considerare già noti:
 - Decadimenti di particelle, vita media, frazioni di decadimento
- Interazioni tra adroni a basse energie. Sezione d'urto per interazione forte.
 - Risonanze

Decadimenti di particelle e vita media

Solamente p ed e in natura sono *stabili* (tempo di decadimento molto superiore all'età dell'Universo).

Per tutte le altre particelle il processo di decadimento è rappresentato da una unica legge con un unico parametro libero: *la vita media* τ . Sia P la probabilità che una

particella al tempo t decada nell'intervallo successivo Δt : $P(\Delta t) = \frac{\Delta t}{\tau}$ Se

abbiamo N particelle identiche il numero di quelle che decadono in Δt è

$$NP(\Delta t) = \frac{N\Delta t}{\tau} = -\Delta t \frac{dN}{dt} \rightarrow \frac{dN}{dt} = -\frac{N}{\tau} \Rightarrow N(t) = N_0 e^{-\frac{t}{\tau}}$$

Un *decadimento* non è altro che una *transizione* da uno stato definito ad *uno dei possibili stati finali* tenendo conto delle varie leggi di trasformazione.

Si ha che $W = \frac{1}{\tau}$ dove quindi τ risulta definito da $\tau = \frac{\int t \cdot N(t) \Delta t}{\int N(t) \Delta t}$

τ è definita nel S.R. in cui la particella decade da ferma.

Vita media e modi di decadimento

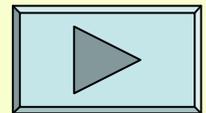
La vita media della particella dipende dal tipo di interazione che caratterizza il processo (debole, forte, elettromagnetica, ...) e dal numero di modi in cui il decadimento può avvenire.

Il muone decade secondo le $\mu^+ \rightarrow e^+ \bar{\nu}_\mu \nu_e$; $\mu^- \rightarrow e^- \nu_\mu \bar{\nu}_e$ nel 100% dei casi.



Il pione carico, ad es. π^+ , ha un modo di decadimento preferito

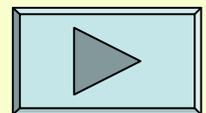
$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$$
 ; $\pi^- \rightarrow \mu^- \bar{\nu}_\mu$



ma anche altri canali di decadimento.

Il pione neutro decade in modo totalmente diverso:

$$\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$$



Per ogni canale di decadimento si può definire una specifica “vita media”

definita come $\tau_{canale} = \frac{\tau_{Totale}}{\Gamma_{canale}}$ dove Γ_{canale} indica con quale probabilità si

presenta quello specifico canale (branching ratios)

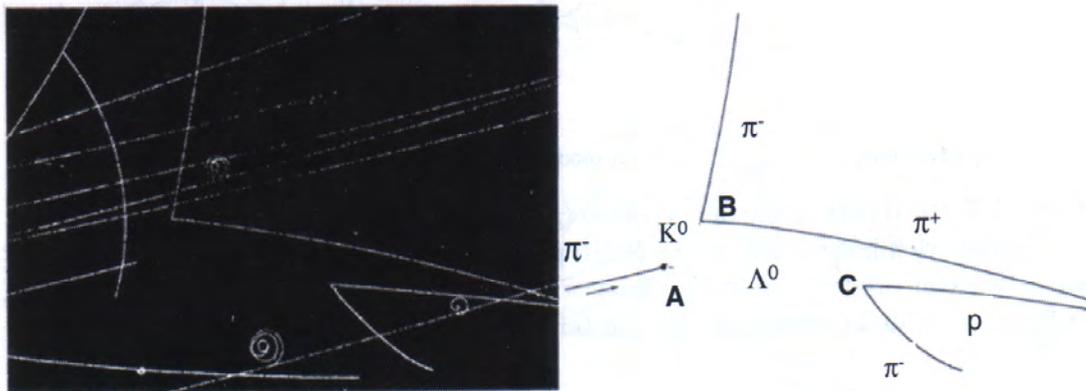
Tempo ed intensità dell'interazione (ed. es. decadimento)

Le particelle “strane” vennero così definite in quanto erano prodotte copiosamente (grande probabilità d'interazione \Leftrightarrow interazione forte) ma decadevano con vite medie più lunghe di quelle caratteristiche delle interazioni forti.

Tipicamente si ha:

Interazioni forti:	vita media $\sim 10^{-23}$ s
Interazioni elettromagnetiche:	vita media $\sim 10^{-16} \div 10^{-20}$ s
Interazioni deboli:	vita media $\sim 10^{-6} \div 10^{-13}$ s

da notare che una particella con $\gamma=1$ in 10^{-23} s percorre $3 \cdot 10^8$ m/s 10^{-23} s = $3 \cdot 10^{-15}$ m = 3fm



Esempio di produzione associata di due particelle strane (il mesone K^0 e il barione Λ^0) e del loro decadimento. In A avviene la produzione associata $\pi^- p \rightarrow \Lambda^0 K^0$. Il mesone K^0 viaggia da A a B, dove decade in due particelle cariche ($K^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$); il barione Λ^0 viaggia da A a C, dove decade, $\Lambda^0 \rightarrow p \pi^-$.

Le due particelle “strane” prodotte decadono con tempi diversi (distanze diverse dal vertice di produzione)

$$\tau_{K^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-} = \frac{\tau_{Totale}}{\Gamma_{canale}} = \frac{8.935 \cdot 10^{-9}}{0.686} = 13 ns$$

$$\tau_{\Lambda^0 \rightarrow p \pi^-} = \frac{\tau_{Totale}}{\Gamma_{canale}} = \frac{26.32 \cdot 10^{-9}}{0.639} = 41 ns$$

ma simili tra di loro, in entrambe i decadimenti $\Delta S \neq 0$, sono decadimenti deboli.

$$k^0 \begin{cases} d\bar{s} \\ S = 1, C = B = 0 \\ I(J^P) = \frac{1}{2}(0^-) \\ m_{k^0} = 498 MeV \end{cases}$$

$$\Lambda^0 \begin{cases} uds \\ S = -1, I = 0 \\ m_{\Lambda^0} = 1115.7 MeV \\ I(J^P) = 0(\frac{1}{2}^+) \end{cases}$$

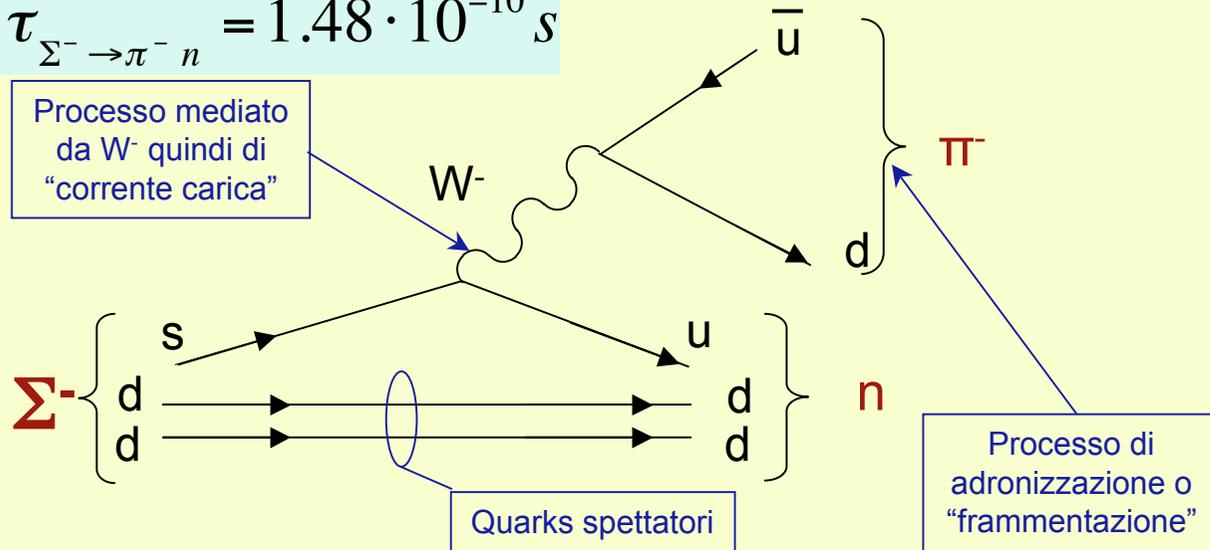
Prendiamo in esame particelle con masse simili ma con decadimenti caratterizzati da diverse interazioni per capire che relazione che sussiste con la loro vita media

Decadimento dell'iperone Σ^- (interazione debole)

$$\Sigma^- \rightarrow \pi^- n$$

$$\tau_{\Sigma^- \rightarrow \pi^- n} = 1.48 \cdot 10^{-10} s$$

Processo mediato da W^- quindi di "corrente carica"



$$\Sigma^- \begin{cases} dds \\ S = -1, I = 1 \\ m_{\Sigma^-} = 1197.5 MeV \\ I(J^P) = 1(\frac{1}{2}^+) \end{cases}$$

E' un processo che conserva l'isospin forte ma presenta una non conservazione della "stranezza":
 $S_{\Sigma^-} = -1, S_n = 0, S_{\pi^-} = 0,$
 quindi non puo' essere un processo mediato da interazione forte

Decadimento dell'iperone Σ^0 (interazione elettromagnetica)

$$\Sigma^0 \rightarrow \Lambda^0 \gamma$$

$$\tau_{\Sigma^0 \rightarrow \Lambda^0 \gamma} = 7.4 \cdot 10^{-20} s$$

$$\Lambda^0 \begin{cases} uds \\ S = -1, I = 0 \\ m_{\Lambda^0} = 1115.7 MeV \\ I(J^P) = 0(\frac{1}{2}^+) \end{cases} \quad \text{mentre} \quad \Sigma^0 \begin{cases} uds \\ S = -1, I = 1 \\ m_{\Sigma^0} = 1192.2 MeV \\ I(J^P) = 1(\frac{1}{2}^+) \end{cases}$$

Ricordiamo ora che

$$\tau = \frac{1}{W} \approx \frac{1}{\sigma} \approx \frac{1}{\alpha^2 \text{accoppiamento}}$$

Dal confronto fra le vite medie dei due decadimenti possiamo dedurre:

$$\frac{\tau_{EM}}{\tau_{debole}} \approx \frac{\alpha_{debole}^2}{\alpha_{EM}^2} \Rightarrow \alpha_{debole}^2 \sim \alpha_{EM}^2 \frac{\tau_{EM}}{\tau_{debole}} \Rightarrow \alpha_{debole} \sim 2.2 \cdot 10^{-5} \alpha_{EM}$$

... e si ottiene una stima di $\alpha_{debole} \sim 1.6 \cdot 10^{-7}$

Energia dell'int. elettrostatica rapportata alla energia corrispondente alla massa a riposo dell'e

$$\alpha_{EM} = \frac{1}{4\pi} \frac{e^2}{\hbar mc} = \frac{e^2}{4\pi\hbar c} = \frac{1}{137}$$

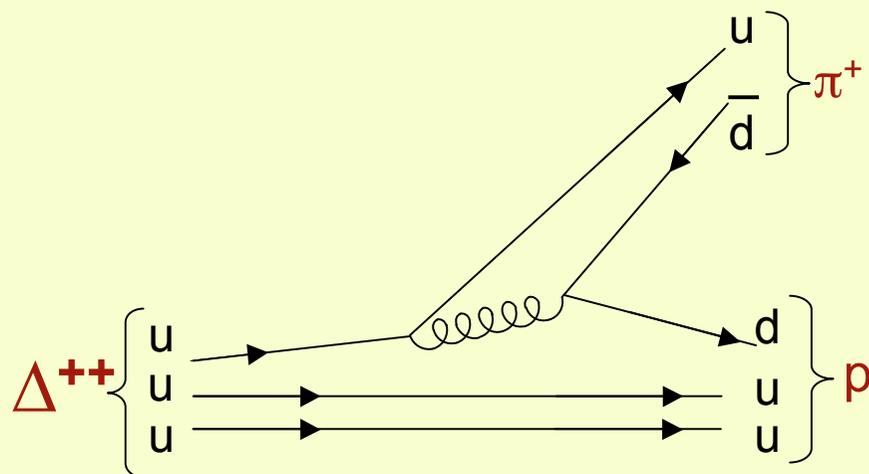
... ancora su decadimenti

Un tipico decadimento dovuto ad interazione forte

$$\Delta^{++} \rightarrow p\pi^+$$

$$\Delta^{++} \begin{cases} uuu \\ m_{\Delta^{++}} = 1232 \text{ MeV} \\ I(J^P) = \frac{3}{2}(\frac{3}{2}^+) \end{cases}$$

$$\tau_{\Delta^{++} \rightarrow p\pi^+} \approx 10^{-23} \text{ s}$$



Il “branching ratio” in questo canale è $\sim 100\%$

Confrontando decadimenti “debole” e “forte”

Analogamente confrontando il decadimento “forte” della Δ^{++} con il decadimento “debole” della Σ^- abbiamo

$$\frac{\tau_{debole}}{\tau_{strong}} \approx \frac{\alpha_{strong}^2}{\alpha_{debole}^2} \Rightarrow \alpha_{debole}^2 \sim \alpha_{strong}^2 \frac{\tau_{strong}}{\tau_{debole}} \Rightarrow \alpha_{debole} \sim \sqrt{\frac{10^{-23}}{1.48 \cdot 10^{-10}}} \alpha_{strong}$$

... quindi ponendo $\alpha_{strong} = 1$ si ottiene $\alpha_{debole} \sim 2.6 \cdot 10^{-7}$
valore molto vicino a quello valutato in precedenza

La sezione d'urto per l'interazione forte

Misurare la sezione d'urto di un evento porta ad avere informazioni sul potenziale d'interazione. Per l'interazione forte (potenziale di Yukawa a "corto range"), per un proiettile con dimensioni trascurabili rispetto al bersaglio, ci aspettiamo che la sezione d'urto coincida con l'area efficace "geometrica" del bersaglio: $\sigma = \pi R_0^2$.

Proiettile = funzione d'onda con

$$\lambda = \frac{\hbar}{p} = \frac{1.24}{2\pi} \frac{1}{p[\text{Gev}/c]} \text{fm}$$

quindi se $p \gg 1 \text{ GeV}/c$ la dimensione del proiettile $\ll R_0 \sim 1 \text{ fm}$.

Dobbiamo considerare:

- diffusioni elastiche (proiettile e bersaglio mantengono la loro natura) $\Rightarrow \sigma_{el}$
- diffusioni anelastiche (nello stato finale particelle diverse) $\Rightarrow \sigma_{inel}$

In generale: $\sigma_{tot} = \sigma_{el} + \sigma_{inel}$

ma a cosa son dovute queste grandi variazioni della σ a bassa energia ??

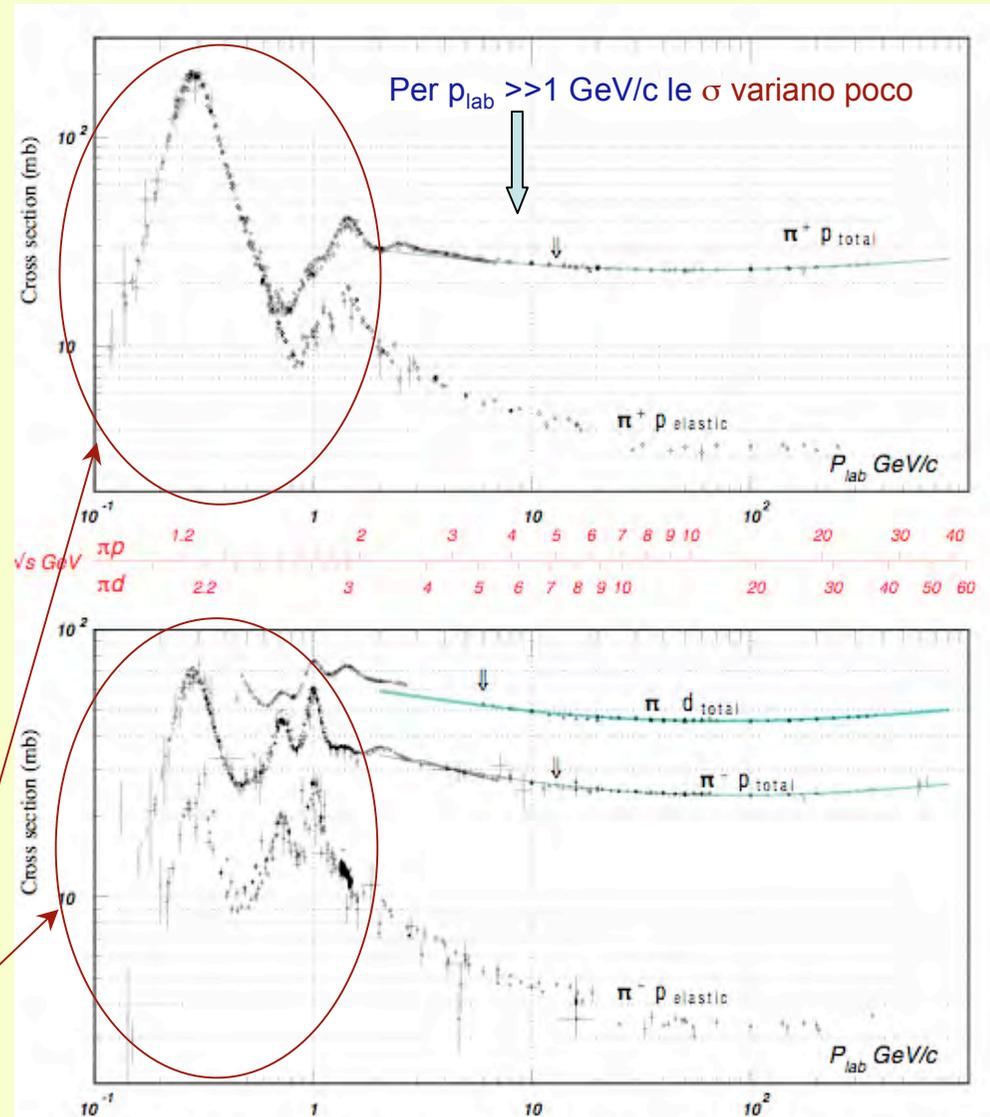


Figure 40.13: Total and elastic cross sections for $\pi^+ p$ and $\pi^- d$ (total only) collisions as a function of laboratory beam momentum and total center-of-mass energy. Corresponding computer-readable data files may be found at <http://pdg.lbl.gov/current/xsect/>. (Courtesy of the COMPAS Group, IHEP, Protvino, August 2005)

dimensione del protone

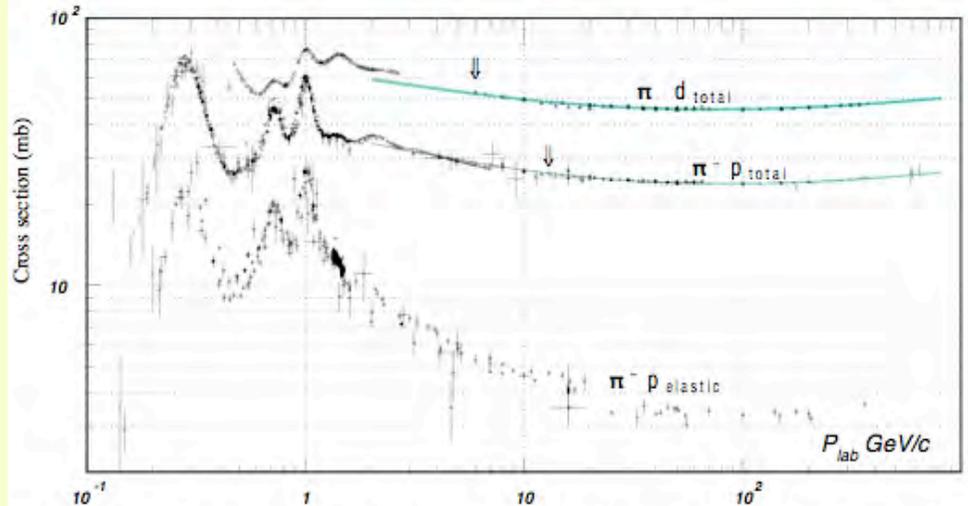
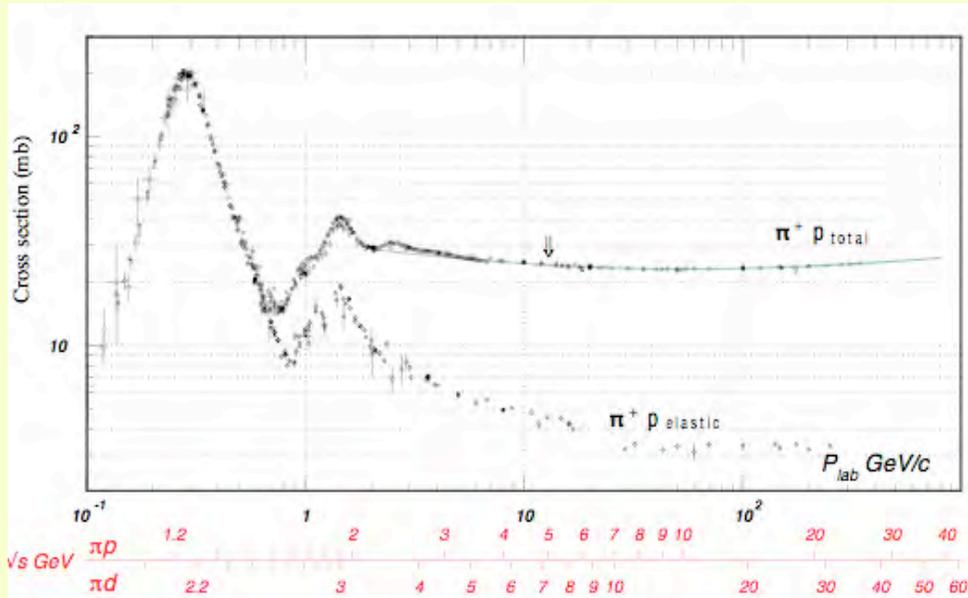


Figure 40.13: Total and elastic cross sections for $\pi^+ p$ and $\pi^+ d$ (total only) collisions as a function of laboratory beam momentum and total center-of-mass energy. Corresponding computer-readable data files may be found at <http://pdg.lbl.gov/current/xsect/>. (Courtesy of the COMPAS Group, IHEP, Protvino, August 2005)

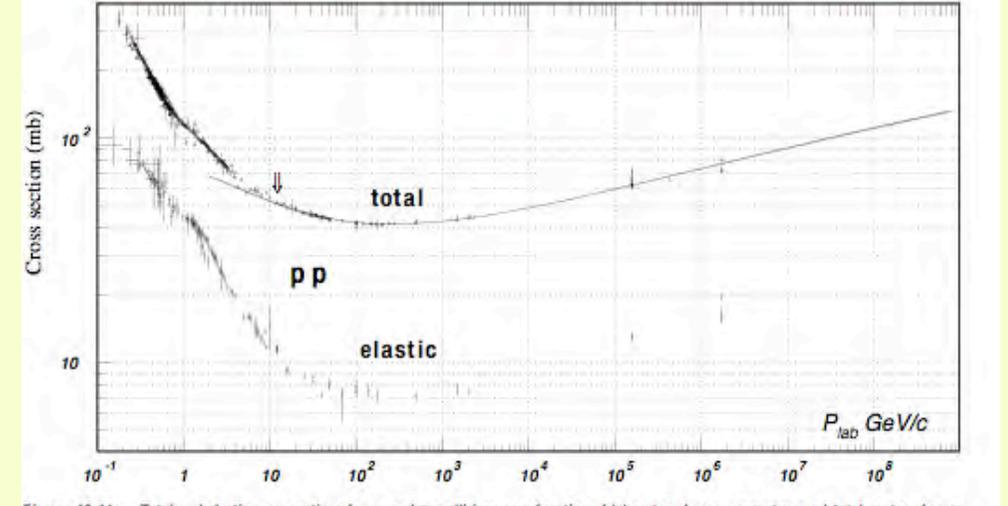
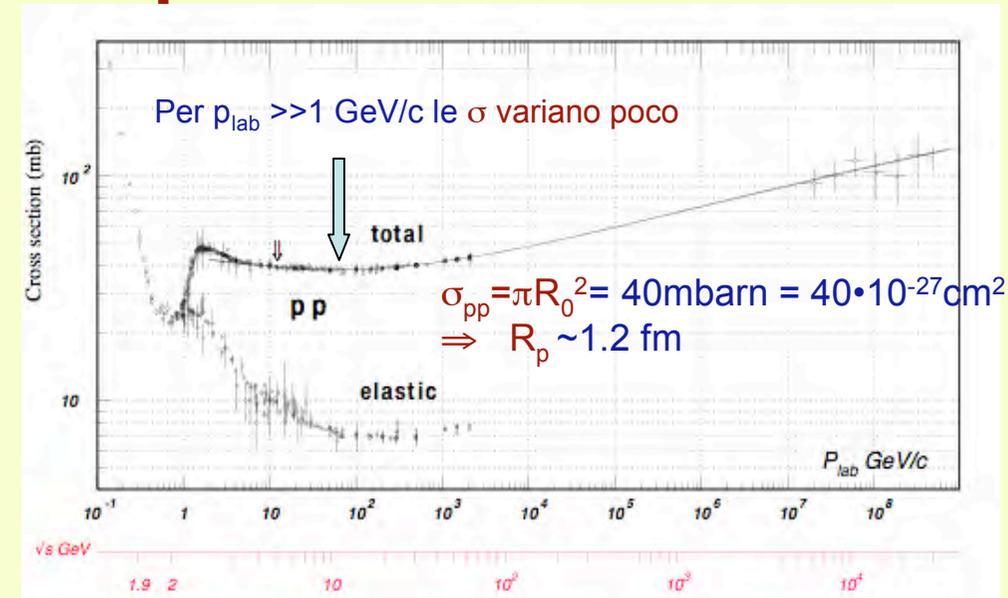
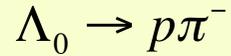


Figure 40.11: Total and elastic cross sections for pp and πp collisions as a function of laboratory beam momentum and total center-of-mass energy. Corresponding computer-readable data files may be found at <http://pdg.lbl.gov/current/xsect/>. (Courtesy of the COMPAS group, IHEP, Protvino, August 2005)

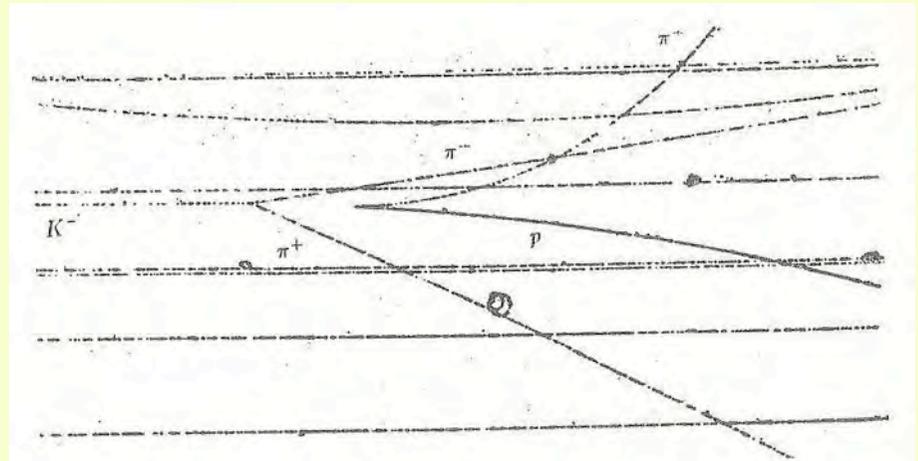
Per $p_\pi \gg 1$ GeV/c $\Rightarrow \sigma_{pp} = \pi R_0^2 = 25 \text{ mbarn} = 25 \cdot 10^{-27} \text{ cm}^2$
 \Rightarrow avendo stimato $R_p \sim 1.2 \text{ fm}$ la dimensione del π è inferiore

Le risonanze

osservato in camera a bolle:



L'alta probabilità di verificarsi di questo evento ha fatto pensare che l'evento procedesse, ad esempio, in questo modo:



Interazione di un mesone K^- di 4.2 GeV/c in camera a bolle a idrogeno. Nell'interazione vengono prodotti due pioni carichi e la Λ^0 , che poi decade in un protone e un pione negativo (da R.T.Van de Walle, Foto CERN, Ginevra).

Raccolta una sufficiente statistica di eventi, misurando le variabili cinematiche delle particelle prodotte si è verificata l'ipotesi che lo stato $\Lambda_0 \pi^+$ corrispondesse effettivamente ad una particella di massa definita.

$$m^2_{\Lambda_0 \pi^+} = E^2_{\Lambda_0 \pi^+} - p^2_{\Lambda_0 \pi^+} = (E_{\Lambda_0} + E_{\pi^+})^2 - (\vec{p}_{\Lambda_0} + \vec{p}_{\pi^+})^2 =$$

$$E^2_{\Lambda_0} + E^2_{\pi^+} + 2E_{\Lambda_0} E_{\pi^+} - p^2_{\Lambda_0} - p^2_{\pi^+} - 2p_{\Lambda_0} p_{\pi^+} \cos \theta_{\Lambda \pi}$$

Con tanti eventi si può verificare come si distribuisce la quantità: massa invariante modo (Dalitz) per evidenziare l'accumularsi di eventi con la stessa massa invariante.

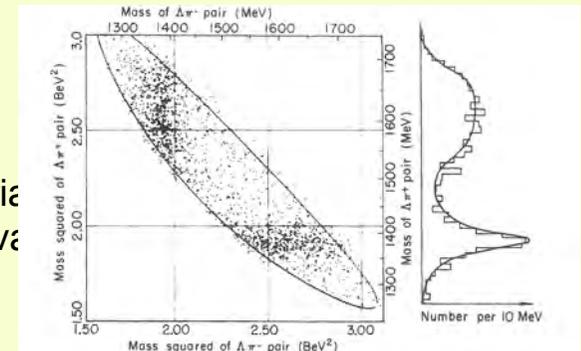


Diagramma bidimensionale (detto di Dalitz) degli eventi $K^- p \rightarrow \Lambda^0 \pi^+ \pi^-$ per K^- incidenti aventi impulso 1.22 GeV/c. Ogni evento è rappresentato con un punto. È mostrata anche, come proiezione lungo l'asse y, la distribuzione della massa invariante $\Lambda^0 \pi^+$: notare il picco a 1385 MeV e la struttura a circa 1600 MeV, che è una "riflessione" del picco in $\Lambda \pi^-$ a massa 1385 MeV; la linea intera delimita lo spazio delle fasi, ossia la regione di valori permessa dalla conservazione dell'energia. [63S1]

Il decadimento del muone (interazione debole)

μ^- DECAY MODES

μ^+ modes are charge conjugates of the modes below.

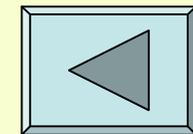
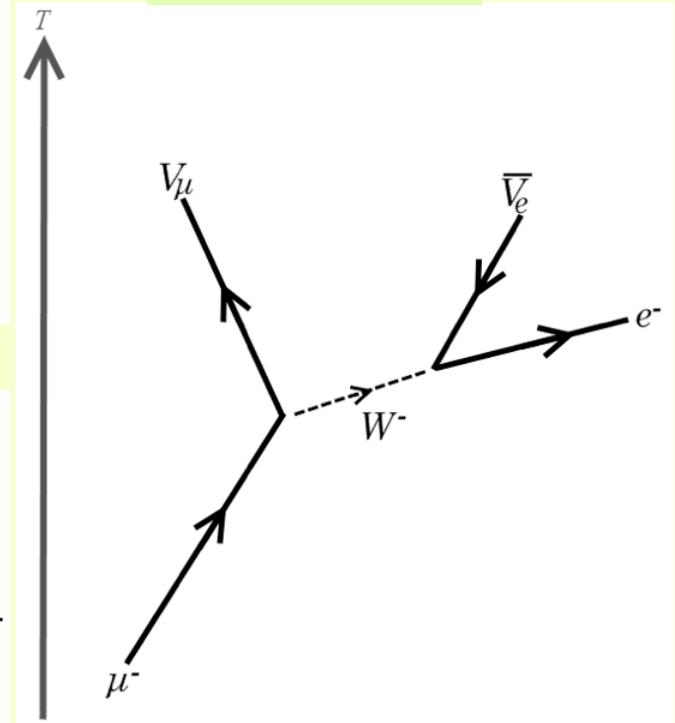
Mode	Fraction (Γ_i/Γ)	Confidence level
Γ_1 $e^- \bar{\nu}_e \nu_\mu$	$\approx 100\%$	
Γ_2 $e^- \bar{\nu}_e \nu_\mu \gamma$	[a] $(1.4 \pm 0.4) \%$	
Γ_3 $e^- \bar{\nu}_e \nu_\mu e^+ e^-$	[b] $(3.4 \pm 0.4) \times 10^{-5}$	

μ MEAN LIFE τ

Measurements with an error $> 0.001 \times 10^{-6}$ s have been omitted.

VALUE (10^{-6} s)	DOCUMENT ID	TECN	CHG	COMMENT
2.197034 ± 0.000021 OUR AVERAGE				Error includes scale factor of 1.2.
$2.197083 \pm 0.000032 \pm 0.000015$	BARCZYK	08	CNTR +	Muons from π^+ decay at rest
$2.197013 \pm 0.000021 \pm 0.000011$	CHITWOOD	07	CNTR +	Surface μ^+ at PSI

$$\mu \begin{cases} J = \frac{1}{2} \\ m_\mu = 105.7 \text{ MeV} \end{cases}$$



Il decadimento dei π^\pm (interazione debole)

π^+ DECAY MODES

π^- modes are charge conjugates of the modes below.

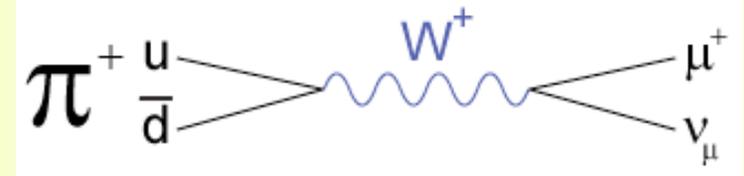
For decay limits to particles which are not established, see the appropriate Search sections (Massive Neutrino Peak Search Test, A^0 (axion), and Other Light Boson (X^0) Searches, etc.).

Mode	Fraction (Γ_i/Γ)	Confidence level
Γ_1 $\mu^+ \nu_\mu$	[a] (99.98770 \pm 0.00004) %	
Γ_2 $\mu^+ \nu_\mu \gamma$	[b] (2.00 \pm 0.25) $\times 10^{-4}$	
Γ_3 $e^+ \nu_e$	[a] (1.230 \pm 0.004) $\times 10^{-4}$	
Γ_4 $e^+ \nu_e \gamma$	[b] (1.61 \pm 0.23) $\times 10^{-7}$	
Γ_5 $e^+ \nu_e \pi^0$	(1.036 \pm 0.006) $\times 10^{-8}$	
Γ_6 $e^+ \nu_e e^+ e^-$	(3.2 \pm 0.5) $\times 10^{-9}$	
Γ_7 $e^+ \nu_e \nu \bar{\nu}$	< 5 $\times 10^{-6}$	90%

π^\pm MEAN LIFE

Measurements with an error $> 0.02 \times 10^{-8}$ s have been omitted.

VALUE (10^{-8} s)	DOCUMENT ID	TECN	CHG	COMMENT	
2.6033 \pm 0.0005 OUR AVERAGE	Error includes scale factor of 1.2.				
2.60361 \pm 0.00052	¹⁰ KOPTEV	95	SPEC	+	Surface μ^+ 's
2.60231 \pm 0.00050 \pm 0.00084	NUMAO	95	SPEC	+	Surface μ^+ 's
2.609 \pm 0.008	DUNAITSEV	73	CNTR	+	

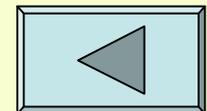


$$\tau_{\pi \rightarrow \mu \nu} = \frac{\tau_{Totale}}{\Gamma_{\pi \rightarrow \mu \nu}} = \frac{26.03 \cdot 10^{-9}}{0.999877} \approx 26.03 ps$$

$$\tau_{\pi \rightarrow e \nu} = \frac{\tau_{Totale}}{\Gamma_{\pi \rightarrow e \nu}} = \frac{26.03 \cdot 10^{-9}}{1.23 \cdot 10^{-4}} \approx 200 \mu s$$

Il decadimento nel canale $e \nu_e$ è descritto dallo stesso diagramma ma è soppresso per conservazione dell'elicità

$$\pi^\pm \begin{cases} I^G(J^P) = 1^-(0^-) \\ m_{\pi^\pm} = 139.6 MeV \end{cases}$$



Il decadimento dei π^0 (interazione elettromagnetica)



$$\pi^0 \begin{cases} (u\bar{u} - d\bar{d})/\sqrt{2} \\ S = C = B = 0, I = 1 \\ I^G(J^{PC}) = 1^-(0^{-+}) \\ m_{\pi^0} = 135 \text{ MeV} \end{cases}$$

π^0 MEAN LIFE

Measurements with an error $> 1 \times 10^{-17}$ s have been omitted.

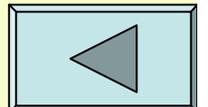
VALUE (10^{-17} s)	EVTS	DOCUMENT ID	TECN	COMMENT
8.4 ± 0.6	OUR AVERAGE	Error includes scale factor of 3.0. See the ideogram below.		

π^0 DECAY MODES

For decay limits to particles which are not established, see the appropriate Search sections (A^0 (axion) and Other Light Boson (X^0) Searches, etc.).

Mode	Fraction (Γ_i/Γ)	Scale factor/ Confidence level
Γ_1 2γ	$(98.823 \pm 0.034) \%$	S=1.5
Γ_2 $e^+ e^- \gamma$	$(1.174 \pm 0.035) \%$	S=1.5
Γ_3 γ positronium	$(1.82 \pm 0.29) \times 10^{-9}$	
Γ_4 $e^+ e^+ e^- e^-$	$(3.34 \pm 0.16) \times 10^{-5}$	
Γ_5 $e^+ e^-$	$(6.46 \pm 0.33) \times 10^{-8}$	
Γ_6 4γ	$< 2 \times 10^{-8}$	CL=90%
Γ_7 $\nu\bar{\nu}$	[a] $< 2.7 \times 10^{-7}$	CL=90%
Γ_8 $\nu_e \bar{\nu}_e$	$< 1.7 \times 10^{-6}$	CL=90%
Γ_9 $\nu_\mu \bar{\nu}_\mu$	$< 1.6 \times 10^{-6}$	CL=90%
Γ_{10} $\nu_\tau \bar{\nu}_\tau$	$< 2.1 \times 10^{-6}$	CL=90%
Γ_{11} $\gamma\nu\bar{\nu}$	$< 6 \times 10^{-4}$	CL=90%

Attenzione al valore estremamente piccolo della vita media del π^0 , $8.4 \cdot 10^{-17}$ s !!!



Simboli

Ad una particella si associa l'informazione

$IG(JPC)$

Isospin forte

Momento
angolare
totale

Parità della particella

“G parità”: numero quantico moltiplicativo che descrive il comportamento di un multipletto di particelle per “coniugazione di carica”

$$\mathcal{G} \begin{pmatrix} \pi^+ \\ \pi^0 \\ \pi^- \end{pmatrix} = \eta_G \begin{pmatrix} \pi^+ \\ \pi^0 \\ \pi^- \end{pmatrix}$$

dove $\eta_G = \pm 1$ è l'autovalore della G-parità.
In generale: $\eta_G = \eta_C (-1)^I$

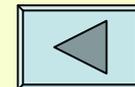
“parità di carica”: numero quantico moltiplicativo che descrive il comportamento della particella per “coniugazione di carica” (cambia una particella nella sua antiparticella).

Tale operazione **cambia segno** a:

- carica elettrica
- numero barionico/leptonico
- numero quantico di “flavour” (stranezza, charm, beauty, top)
- terza comp. dell'isospin (I_z)

mentre lascia inalterati:

- massa
- momento
- spin



Decadimento debole della Σ^+

$$\Sigma^+ \rightarrow \begin{cases} \pi^+ n & (48.3\%) \\ \pi^0 p & (51.6\%) \end{cases}$$

$$\tau_{\Sigma^+ \rightarrow \pi^+ n} = \frac{0.802 \cdot 10^{-10} \text{ s}}{0.483} = 1.66 \cdot 10^{-10} \text{ s}$$

$$\tau_{\Sigma^+ \rightarrow \pi^0 p} = \frac{0.802 \cdot 10^{-10} \text{ s}}{0.516} = 1.56 \cdot 10^{-10} \text{ s}$$

$$\Sigma^+ \begin{cases} uus \\ S = -1, I = 1 \\ m_{\Sigma^+} = 1189.4 \text{ MeV} \\ I(J^P) = 1(\frac{1}{2}^+) \end{cases}$$

