

Fisica Nucleare e Subnucleare II

Lezioni n. 23 e 24

- Interazioni $e^+ \rightarrow \leftarrow e^-$:
 - le macchine acceleratrici $e^+ \rightarrow \leftarrow e^-$
 - interazioni elettromagnetiche e deboli;
 - risultati sperimentali con acceleratori $e^+ \rightarrow \leftarrow e^-$
 - $e^+e^- \rightarrow \mu^+ \mu^-$
 - $e^+e^- \rightarrow$ adroni
 - la scoperta della J/ψ

Le macchine acceleratrici e⁺e⁻ (1)

- Il primo prototipo di **Anello di Accumulazione (AdA)** per e⁺e⁻ è stato pensato (Bruno Touschek) e costruito (Laboratori INFN di Frascati) in Italia negli anni '60.
- Per macchine acceleratrici a→←b in cui le due particelle hanno pari impulso, dai due quadrimpulsi nel S.R. del c.d.m. $p_1^* = (E_1^*, \vec{p})$, $p_2^* = (E_2^*, -\vec{p})$ possiamo scrivere l'energia totale s (invariante relativistico)

$$s = (p_1^* + p_2^*)^2 = (E_1^* + E_2^*, \vec{p} - \vec{p})^2 \Rightarrow \sqrt{s} = E_{cm} = (E_1^* + E_2^*)$$

se $m_a = m_b$ (ad esempio e⁺e⁻)

$$E_1^* = E_2^* = T^{cm} + m_e = T^{cm} + m_e \Rightarrow \sqrt{s} = E_{cm} = 2T^{cm} + 2m_e$$

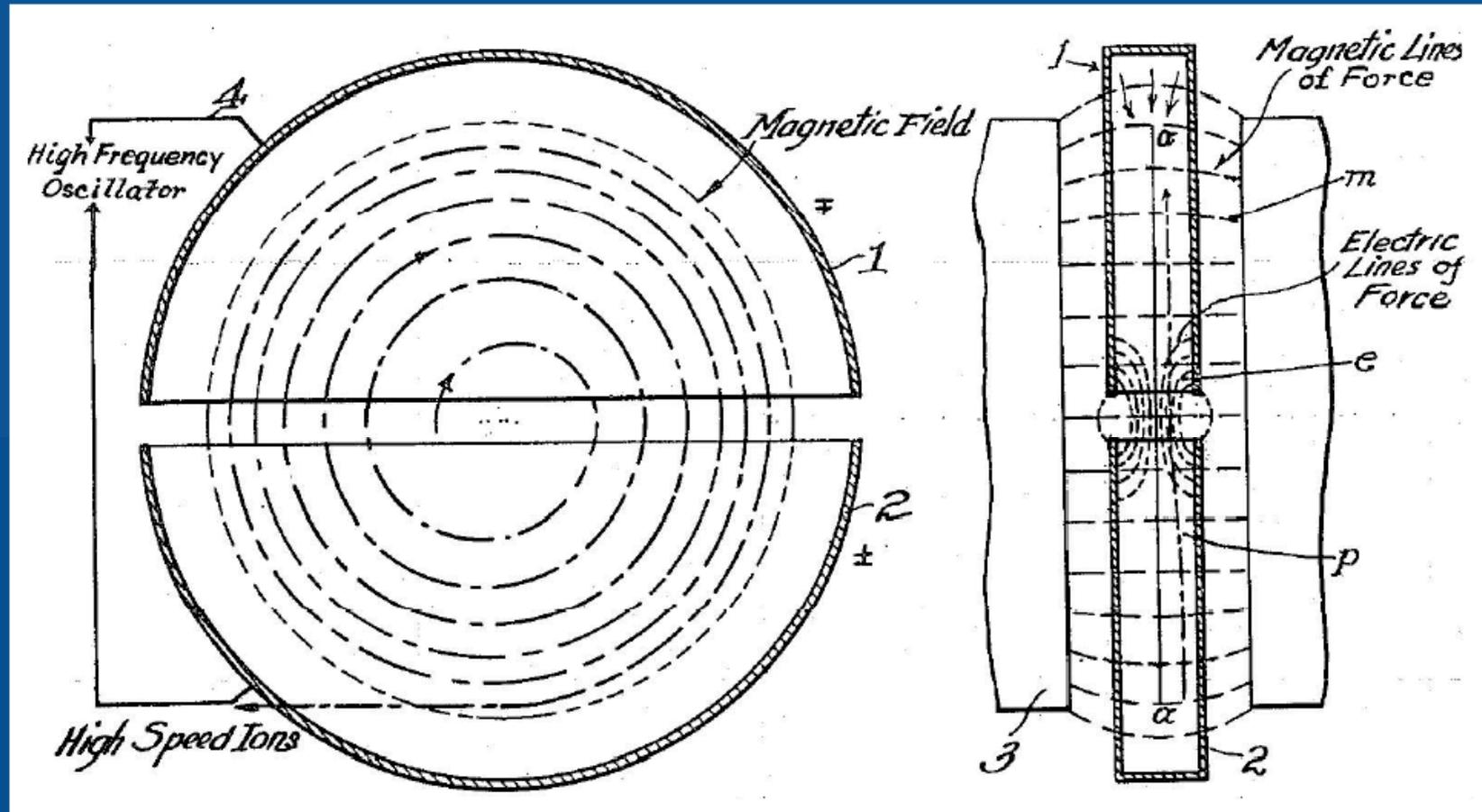
e per produrre nello stato finale una particella di massa X è necessario avere $s_{soglia} \geq m_X^2$. Ben presto quindi si è cercato di produrre macchine acceleratrici con energia nel c.m. sempre maggiore.

- Fu costruito **Adone** $\sqrt{s} \sim 3\text{GeV}$ a Frascati e diverse altre macchine e⁺e⁻ fino ad energie nel c.m. pari a $\sim 200\text{GeV}$

Il ciclotrone

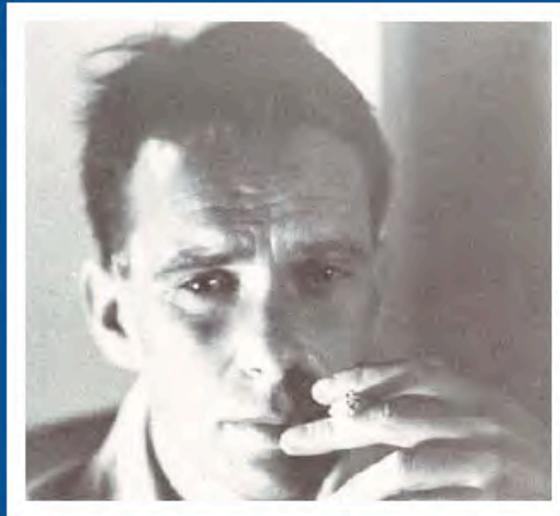
Campo elettrico alternato
accelera le particelle

Campo magnetico le confina
su traiettorie circolari

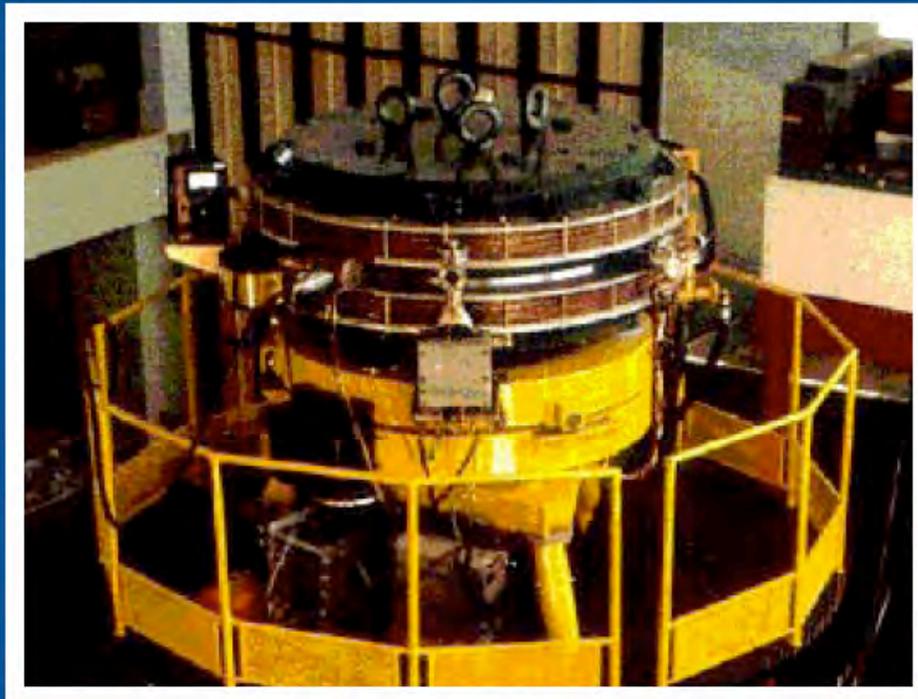


maggior cammino compensato
da maggiore velocità
(solo in regime non relativistico)

-> stessa frequenza di rivoluzione!
 $2\pi f = qB / m$



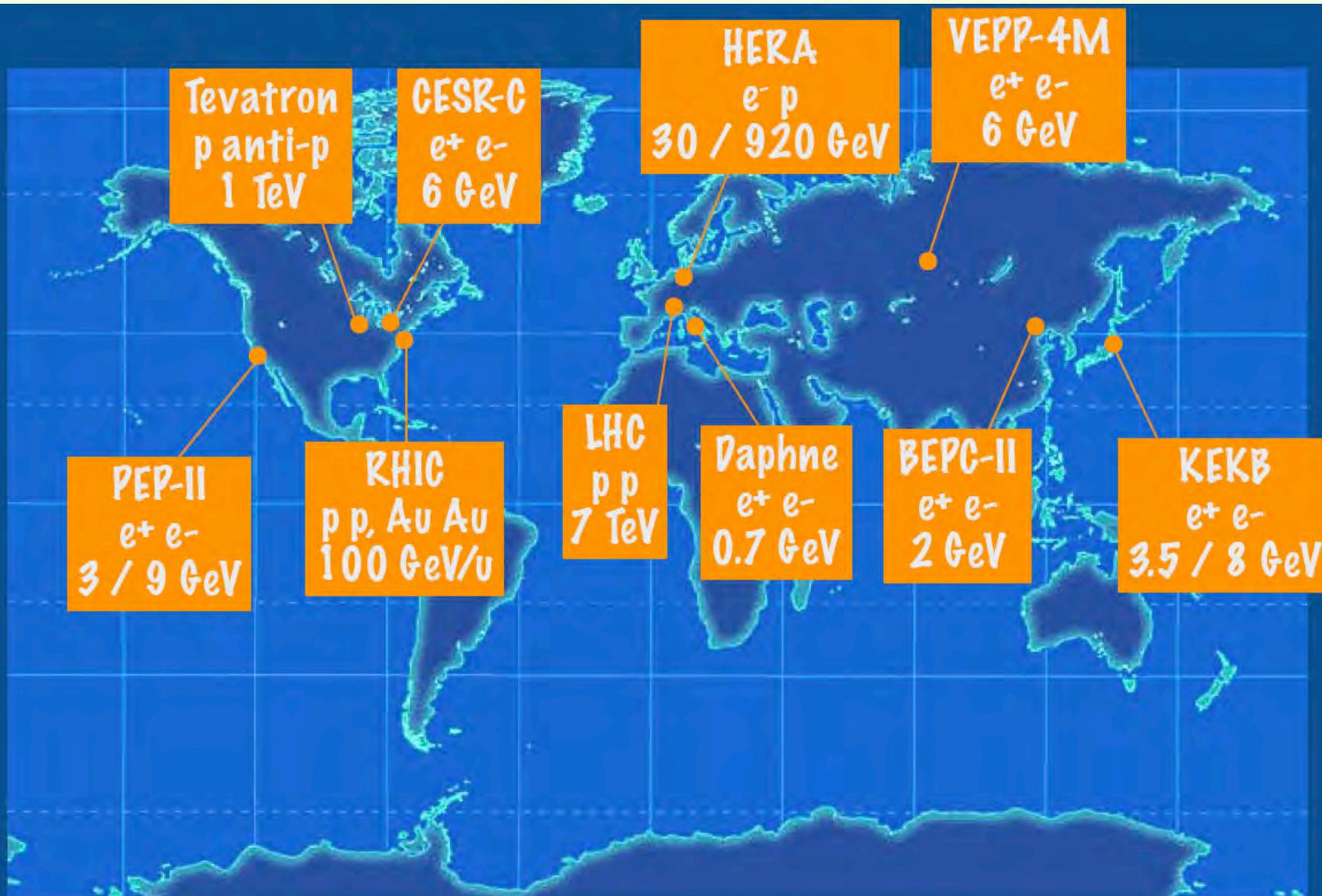
Bruno Touschek (1921-1977)



**AdA (Anello di Accumulazione)
primo anello di collisione elettroni-positroni
250 MeV, diametro 130 cm
Frascati (Italia) 1961 -> Orsay (Francia) 1964**

Acceleratori di particelle

Nome	Tipo	Ente	Nazione	Energia (GeV) s ²	Luminosità (10 ³³ cm ⁻² s ⁻¹)
LHC	pp	CERN	Europa	14000	10
DAΦNE	e ⁺ e ⁻	INFN	Italia	1,05	0,43
BEPC	e ⁺ e ⁻		Cina	2,2	0,01
BEPC-II	e ⁺ e ⁻		Cina	3,1	1,00
CESR	e ⁺ e ⁻		USA	5,3	1,28
CESR-C	e ⁺ e ⁻		USA	2,1	0,08
PEP	e ⁺ e ⁻	SLAC	USA	10,58	12,07
KEK-B	e ⁺ e ⁻		Giappone	10,58	17,12
LEP	e ⁺ e ⁻	CERN	Europa	90	0,1
Tevatron	p ⁺ p ⁻	Fermilab	USA	1800	0,29
HERA	e ⁻ p ⁺		Germania	300	0,08
Stanford Linear Collider	e ⁺ e ⁻ lineare	SLAC	USA	100	20,00



I principali anelli di collisione utilizzati in fisica delle alte energie

Le macchine acceleratrici e^+e^- (2)

- interazioni e^+e^-
 - numeri quantici del vuoto
 - particelle elementari senza composizione interna (tutta l'energia trasportata dalle particelle accelerate, più semplice l'analisi degli eventi)
 - interazioni coulombiane + interazioni deboli
 - Difficile raggiungere elevatissime energie: elevata perdita di energia per irraggiamento dovuta al piccolo valore di m_e (grande quantità di potenza irraggiata)

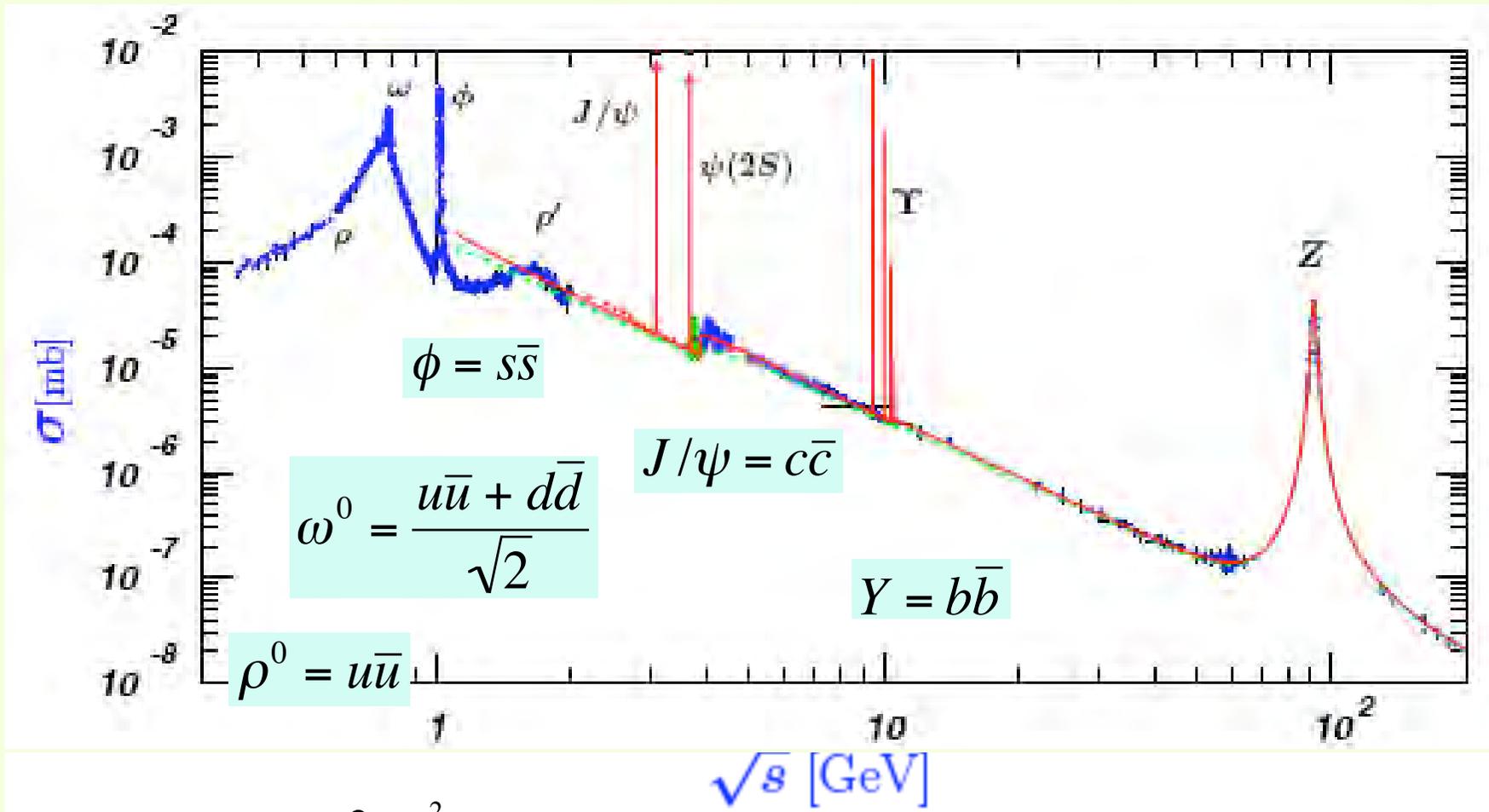
$$e^+e^- \rightarrow f\bar{f} \text{ (leptoni, quarks) oppure } \rightarrow GG'$$

dove G può essere un bosone γ , Z^0 , (in tal caso $G=G'$) o W, (in tal caso $GG'=W^+W^-$)

- $e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma$ solo interazione elettromagnetica: QED
- $e^+e^- \rightarrow \nu\bar{\nu}$ solo interazione debole
- $e^+e^- \rightarrow \ell^+\ell^-$ interaz. EM (quasi unicamente se $\sqrt{s} \leq 30\text{GeV}$) e debole
- $e^+e^- \rightarrow q\bar{q}$ interazioni elettromagnetica e debole ma anche le interazioni forti necessarie per descrivere l'intero processo

Risultati sperimentali con interazioni $e^+e^- \rightarrow \text{adroni}$ (1)

La sezione d'urto totale $\sigma(e^+e^- \rightarrow q\bar{q} \rightarrow \text{adroni})$ diminuisce all'aumentare di \sqrt{s} ma mostra dei "picchi": produzione di "risonanze"

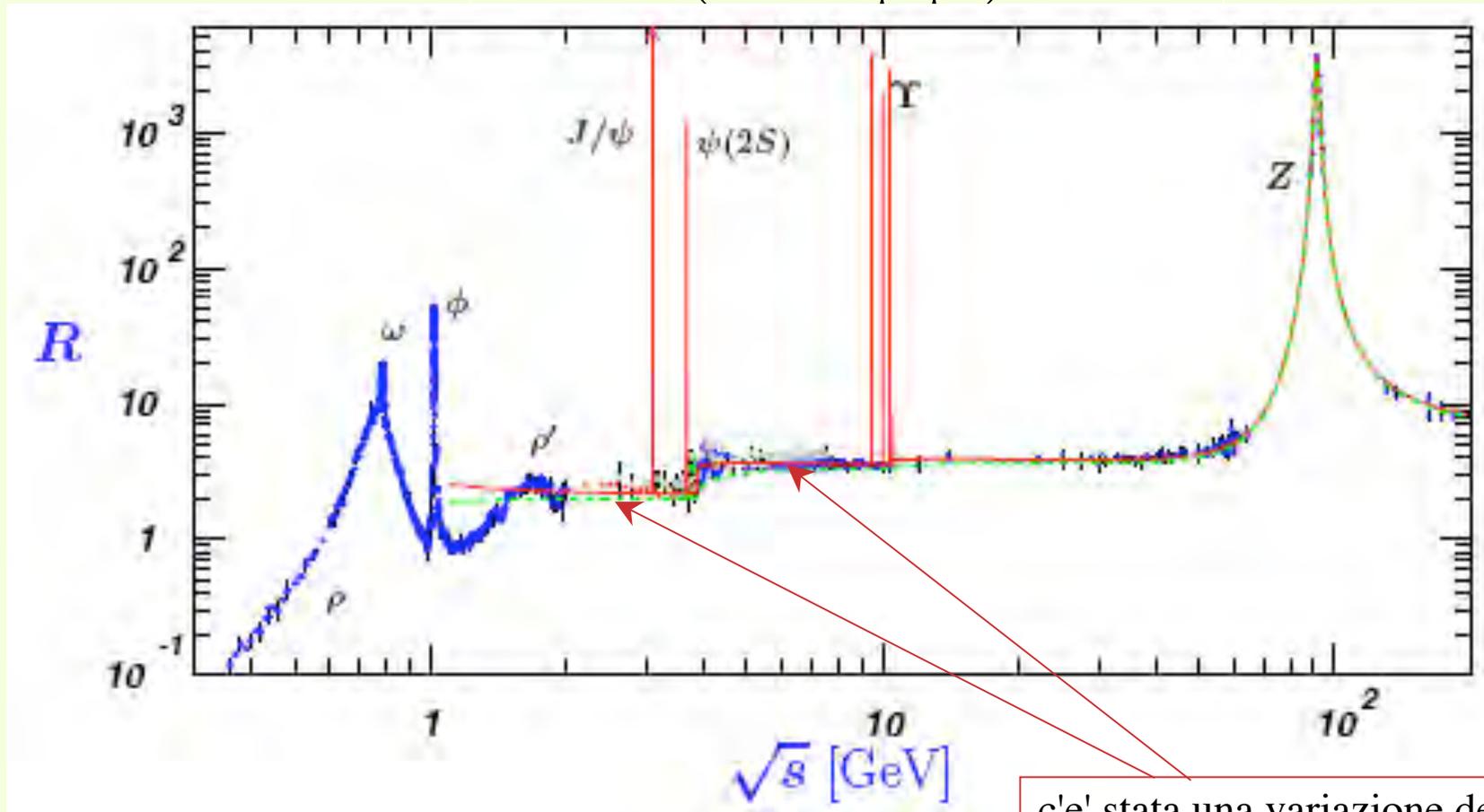


La $\sigma(e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma) = \frac{2\pi\alpha_{em}^2}{s} \ln\left(\frac{s}{m_e^2}\right) = \sigma_T$ (solo int. EM) diminuisce continuamente al crescere di \sqrt{s}

Risultati sperimentali con interazioni $e^+e^- \rightarrow \text{adroni}$ (2)

Confronto fra la σ in quarks (int. EM, debole e forte) quella in $\mu^+\mu^-$ (int. EM, debole) :

$$R = \frac{\sigma(e^+e^- \rightarrow q\bar{q} \rightarrow \text{adroni})^{\text{misurata}}}{\sigma(e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-)^{\text{calcolata}}}$$



c'e' stata una variazione della σ !!

Interazioni $e^+e^- \rightarrow$ adroni (1)

Nello stato finale di $e^+e^- \rightarrow d\bar{d}, u\bar{u}, s\bar{s}, c\bar{c}, b\bar{b}, t\bar{t}$ ovviamente non possiamo aver nello stato finale due quarks liberi: ogni singolo quark si ricombina con un altro quark (opportunamente creato dal "vuoto" legandosi in un processo, detto "*adronizzazione*" dominato da interazioni forti, a formare ad esempio dei mesoni (π, ρ, ω, \dots). Tale processo è descritto dalla "*funzione di frammentazione*"

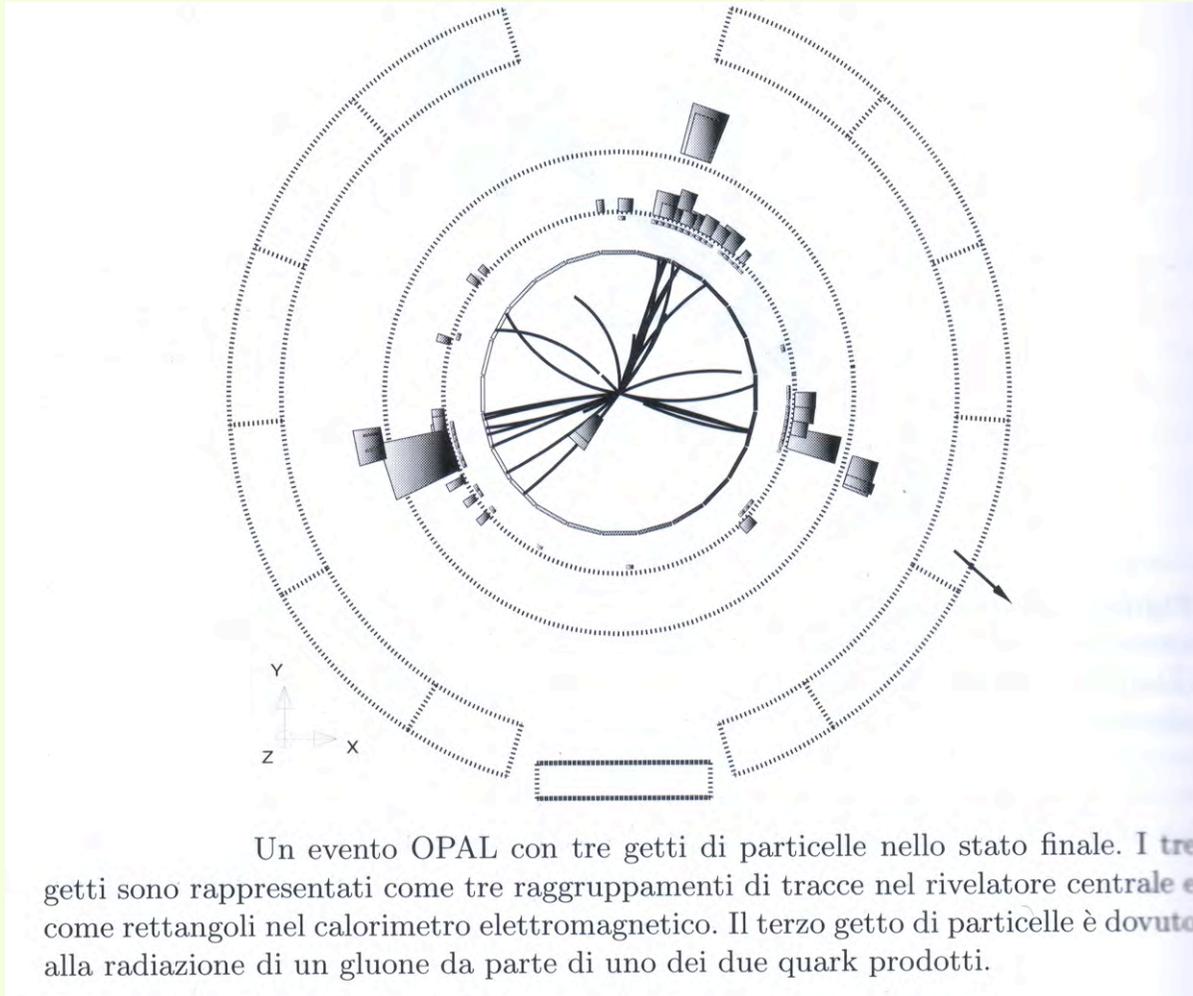
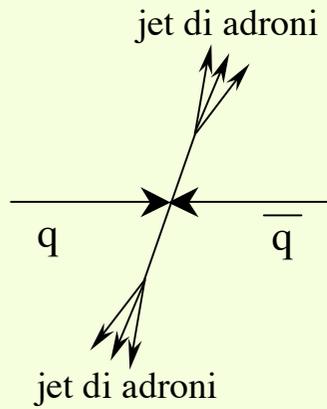
$$D_q^{mesone}(z) = \frac{1}{N} \frac{dN}{dz}$$

dove $z = E_{mesone}/E_{quark}$ è la frazione di energia del quark trasferita al mesone così formato.

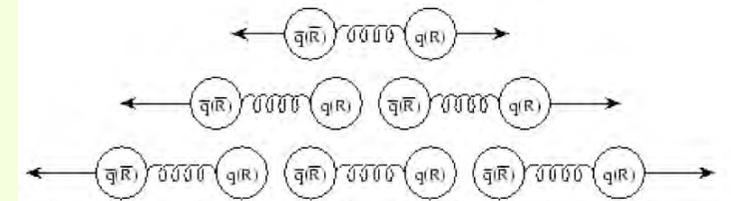
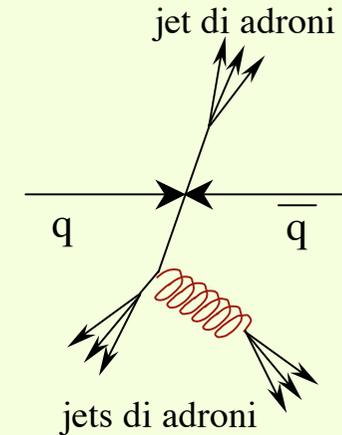
I quarks possono anche eventualmente *irraggiare un gluone* (o più gluoni). Le particelle così create formano "*getti di adroni*" (*jets*), due o più jets più o meno distinti fra di loro.

Gli eventi $e^+e^- \rightarrow$ jets hanno fornito una chiara prova dell'esistenza dei quarks ($e^+e^- \rightarrow q\bar{q} \rightarrow 2 jets$) e dei gluoni ($e^+e^- \rightarrow q\bar{q}g \rightarrow 3 jets$)

evento $e^+e^- \rightarrow 2$ e 3 jets a LEP



Un evento OPAL con tre getti di particelle nello stato finale. I tre getti sono rappresentati come tre raggruppamenti di tracce nel rivelatore centrale e come rettangoli nel calorimetro elettromagnetico. Il terzo getto di particelle è dovuto alla radiazione di un gluone da parte di uno dei due quark prodotti.



formazione dei jet: aumenta il numero di coppie quark-antiquark via via che la coppia iniziale si allontana

Interazioni $e^+e^- \rightarrow$ leptoni, adroni $e^+e^- \rightarrow d\bar{d}, u\bar{u}, s\bar{s}, c\bar{c}, b\bar{b}, t\bar{t}$

Nell'andamento della $\sigma(e^+e^- \rightarrow q\bar{q} \rightarrow \text{adroni})$ ad energie nel cm < 30 GeV sono evidenti dei "massimi" della σ per E_{cm} prossima alla massa di mesoni vettoriali. A queste energie l'evento viene interpretato come:

$$\sigma(e^+e^- \rightarrow \gamma \rightarrow q\bar{q} \rightarrow \text{adroni})$$

ad energie del c.m. maggiori contribuiscono anche interazioni deboli (produzione di un Z^0 intermedio "virtuale").

La scoperta della J/ψ (~ 3100 MeV) nei canali:

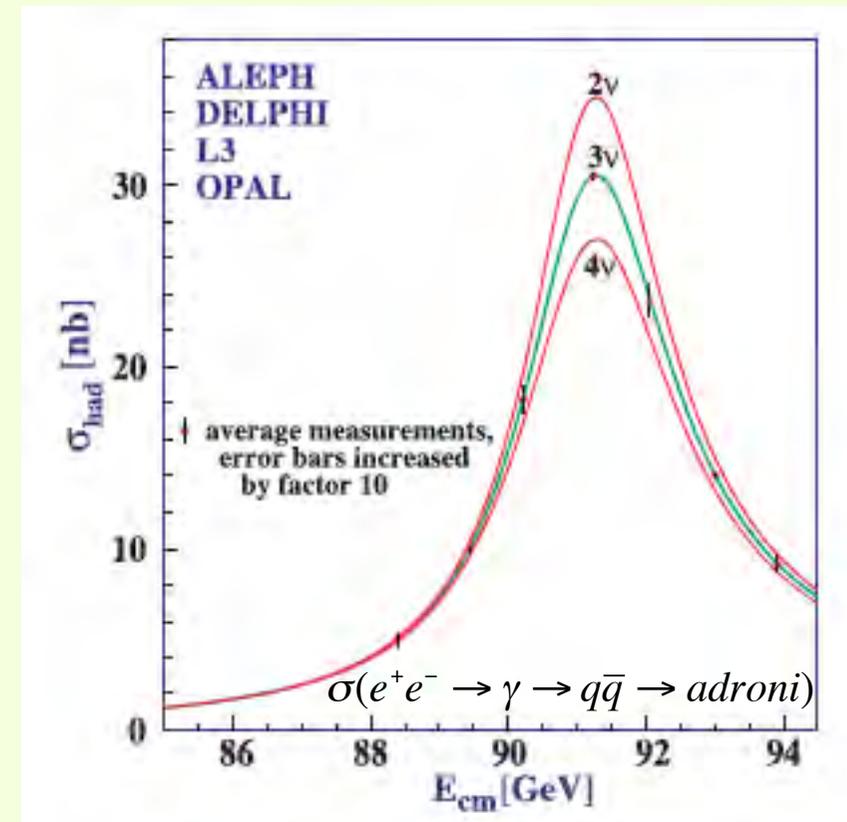
$$e^+e^- \rightarrow J/\psi \rightarrow e^+e^-, \mu^+\mu^-, \text{adroni}$$

ha aperto la strada allo studio dei mesoni vettoriali composti da quarks "charm" pesanti (1974).

Nel 1977 fu osservata (in $p\text{Be} \rightarrow Y \rightarrow \mu^+\mu^-$ la produzione di Y (~ 9460 MeV) poi studiata con :

$$e^+e^- \rightarrow Y \rightarrow e^+e^-, \mu^+\mu^-$$

Quando nel cm si raggiunge $\sim m_{Z^0}$ la σ mostra un sensibile aumento: si ha produzione "risonante" del bosone Z^0 (anni ~ 1990 LEP)

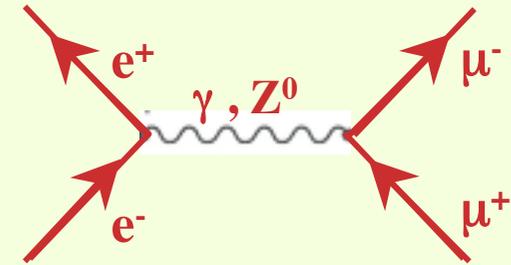


Confronto $e^+e^- \rightarrow \mu^+ \mu^-$, adroni

Il confronto fra $\sigma(e^+e^- \rightarrow \gamma \rightarrow \mu^+ \mu^-)$ e $\sigma(e^+e^- \rightarrow \gamma \rightarrow q\bar{q} \rightarrow \text{adroni})$ può aiutarci a comprendere le proprietà dei quarks prodotti.

A basse energie ($E_{\text{cm}} \ll m_{Z^0}$):

$$\sigma(e^+e^- \rightarrow \gamma \rightarrow \mu^+ \mu^-) = \frac{4\pi\alpha_{em}^2 (\hbar c)^2}{3} \frac{1}{s} = \frac{86.8 \text{ nb}}{s[\text{GeV}^2]}$$

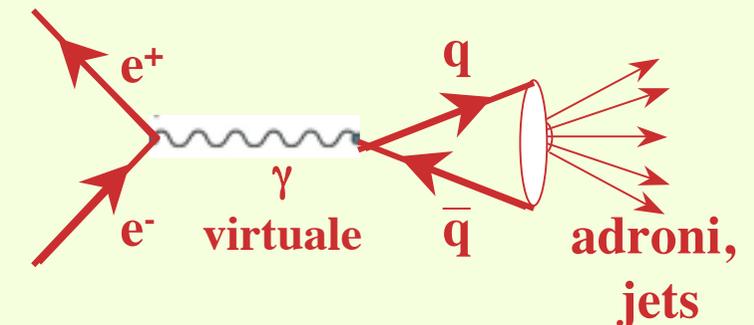


e quindi, per analogia, considerando che l'interazione è puramente E.M., per ogni tipo di "sapore" di quark di carica Q_{quark} **potremmo** scrivere (**attenzione non sarebbe corretto!**)

$$\sigma(e^+e^- \rightarrow \gamma \rightarrow q\bar{q} \rightarrow \text{adroni}) = \frac{4\pi\alpha_{em}^2 Q_{quark}^2 (\hbar c)^2}{3} \frac{1}{s}$$

ma i quark "differiscono" anche per il "colore" e quindi ogni "sapore" di quark contribuisce 3 volte alla sezione d'urto (3 gradi di libertà). Quindi se N sono i quarks che possono essere prodotti data l'energia nel c.m. (\sqrt{s}) disponibile, si ha

$$\sigma(e^+e^- \rightarrow \gamma \rightarrow q\bar{q} \rightarrow \text{adroni}) = 3 \frac{4\pi\alpha_{em}^2 (\hbar c)^2}{3} \frac{1}{s} \sum_{n=1}^N Q_n^2$$

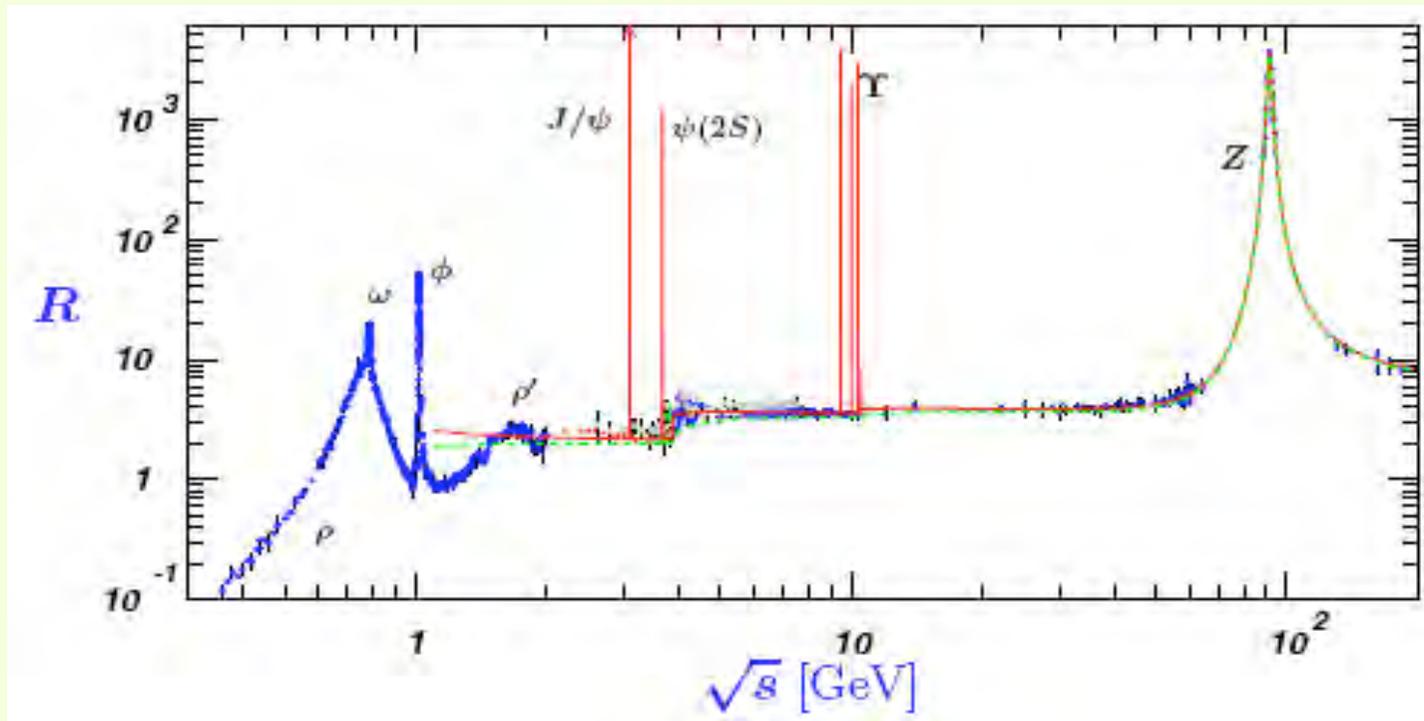


Confronto $e^+e^- \rightarrow \mu^+ \mu^-$, adroni

... e quindi il rapporto

$$R = \frac{\sigma(e^+e^- \rightarrow q\bar{q} \rightarrow \text{adroni})^{\text{misurata}}}{\sigma(e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-)^{\text{calcolata}}}$$

si può scrivere

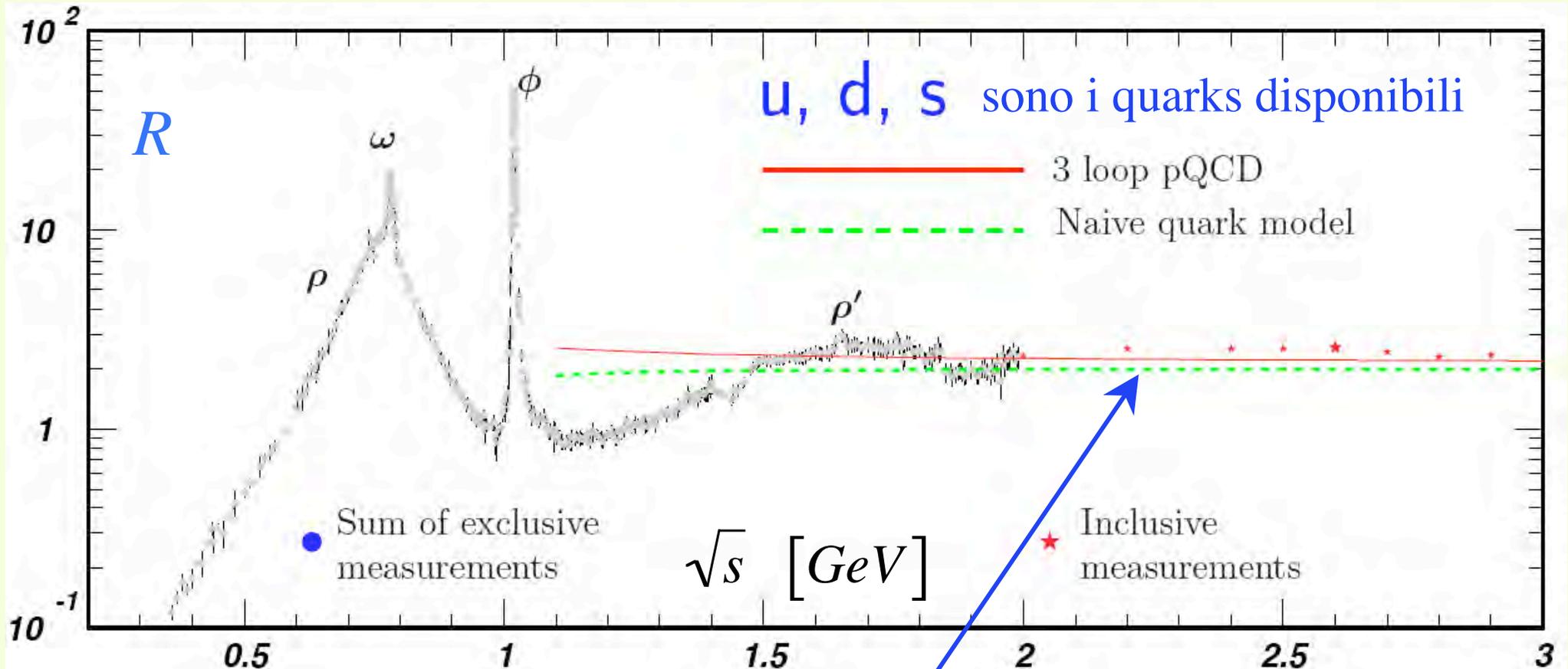


$$R = \frac{3 \frac{4\pi\alpha_{em}^2 (\hbar c)^2}{3 s} \sum_{n=1}^N Q_n^2}{\frac{4\pi\alpha_{em}^2 (\hbar c)^2}{3} \frac{1}{s}} = 3 \sum_{n=1}^N Q_n^2$$

Ricordiamo che nella somma entrano solo i quarks tali che
 $2m_{\text{quark}} \leq E_{\text{cm}}$

Il rapporto R per $E_{\text{cm}} < 3 \text{ GeV}$

$$R = \frac{\sigma(e^+e^- \rightarrow q\bar{q} \rightarrow \text{adroni})^{\text{misurata}}}{\sigma(e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-)^{\text{calcolata}}} = 3 \sum_{n=1}^N Q_n^2$$



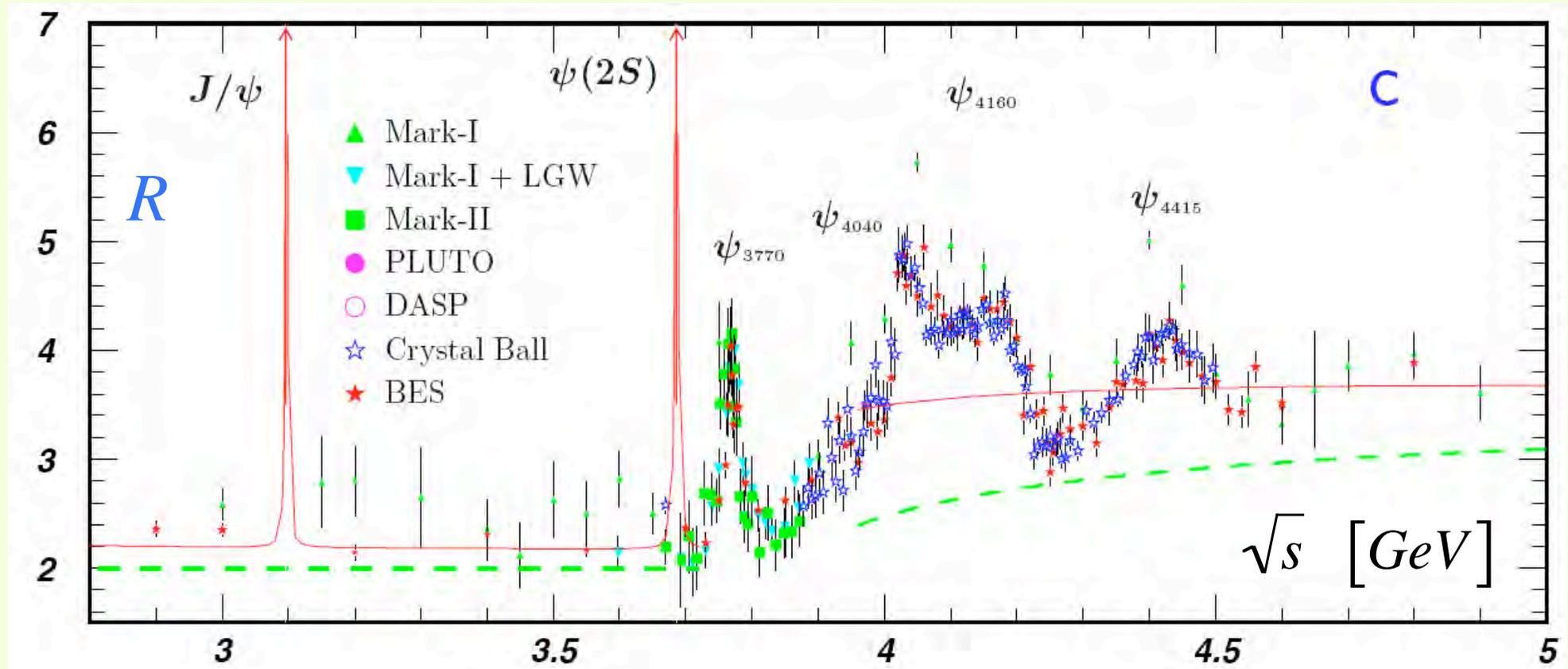
$$R = 3 \sum_{n=1}^N Q_n^2 = 3[Q_u^2 + Q_d^2 + Q_s^2] = 3\left(\frac{4+1+1}{9}\right) = 2$$

un'ulteriore prova della esistenza del "colore" !

Il rapporto R per $2.8 < E_{\text{cm}} < 5 \text{ GeV}$

$$R = \frac{\sigma(e^+e^- \rightarrow q\bar{q} \rightarrow \text{adroni})^{\text{misurata}}}{\sigma(e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-)^{\text{calcolata}}}$$

anche la coppia "charm+anticharm"
è ora sopra la soglia di produzione

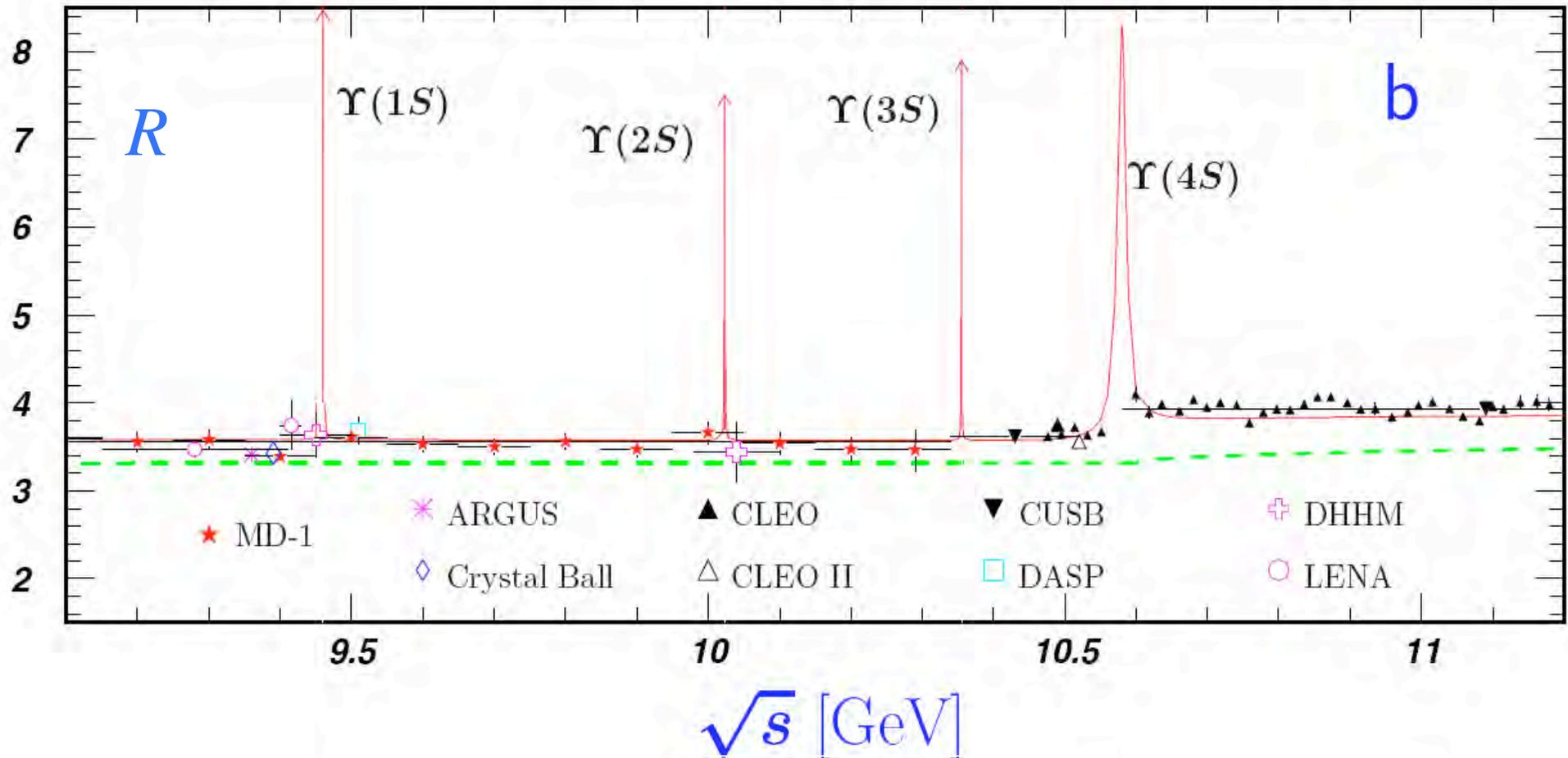


$$R = 3 \sum_{n=1}^N Q_n^2 = 3[Q_u^2 + Q_d^2 + Q_s^2 + Q_c^2] = 3\left(\frac{4 + 1 + 1 + 4}{9}\right) = \frac{10}{3}$$

Il rapporto R per $E_{cm} > 9 \text{ GeV}$

$$R = \frac{\sigma(e^+e^- \rightarrow q\bar{q} \rightarrow \text{adroni})^{\text{misurata}}}{\sigma(e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-)^{\text{calcolata}}}$$

anche la coppia "bottom+antibottom"
è ora sopra la soglia di produzione



$$R = 3 \sum_{n=1}^N Q_n^2 = 3[Q_u^2 + Q_d^2 + Q_s^2 + Q_c^2 + Q_b^2] = 3\left(\frac{4 + 1 + 1 + 4 + 1}{9}\right) = \frac{11}{3}$$

La scoperta della J/ψ

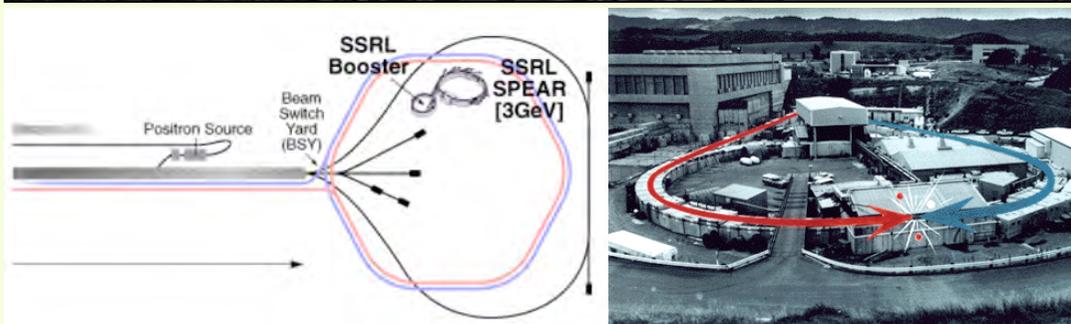
La scoperta risale al Novembre del 1974 ("The November revolution") in due esperimenti (uno a Brookhaven ed uno a SLAC) e fu confermata subito dagli esperimenti a Frascati (ADONE)

- J. J. Aubert et al., "Experimental Observation of a Heavy Particle J " Physical Review Letters, Vol. 33, 1404 (1974).
- J. -E. Augustin et al., "Discovery of a Narrow Resonance in e^+e^- Annihilation" Physical Review Letters, Vol. 33, 1406 (1974).
- C. Bacci et al., "Preliminary Result of Frascati (ADONE) on the Nature of a New 3.1 GeV Particle Produced in e^+e^- Annihilation" Physical Review Letters, Vol. 33, 1408 (1974)

At Brookhaven, the Alternating Gradient Synchrotron: $p \rightarrow \text{Be}$ target.

The Alternating Gradient Synchrotron was built on the innovative concept of the alternating gradient, or strong-focusing, principle, developed by Brookhaven physicists. This breakthrough concept in accelerator design allowed scientists to accelerate protons to energies that would have been otherwise unachievable. The AGS became the world's premiere accelerator

The AGS name is derived from the concept of alternating gradient focusing, in which the field gradients of the accelerator's 240 magnets are successively alternated inward and outward, permitting particles to be propelled and focused in both the horizontal and vertical plane at the same time. Capable of accelerating $25 \cdot 10^{12}$ protons with every pulse.



At SLAC $e^+ \rightarrow \leftarrow e^-$: SPEAR (Stanford Positron Electron Accelerating Ring), completed in 1972. SPEAR consists of a single ring some 80 meters in diameter, in which counter-rotating beams of electrons and positrons were circulated at energies up to 4 GeV.

La scoperta della J/ψ (2)

La scoperta risale al Novembre del 1974 (The November revolution) in due esperimenti (uno a Brookhaven ed uno a SLAC) e fu confermata subito dagli esperimenti a Frascati (ADONE)

- J. J. Aubert et al., "Experimental Observation of a Heavy Particle J " *Physical Review Letters*, Vol. 33, 1404 (1974).
- J. -E. Augustin et al., "Discovery of a Narrow Resonance in e^+e^- Annihilation" *Physical Review Letters*, Vol. 33, 1406 (1974).
- C. Bacci et al., "Preliminary Result of Frascati (ADONE) on the Nature of a New 3.1 GeV Particle Produced in e^+e^- Annihilation" *Physical Review Letters*, Vol. 33, 1408 (1974)

At Frascati, following the success of ADA ($e^+ \rightarrow \leftarrow e^-$), it was decided to build in the Frascati National Lab. a storage ring of the same kind, with larger top energy and intensity, with the aim of exploring the new energy range in subnuclear physics opened by the possibility of observing particle-antiparticle interactions with center of mass at rest: two beams accelerated by the same magnetic system (electrons and positrons), each beam accelerated up to 1.5 GeV

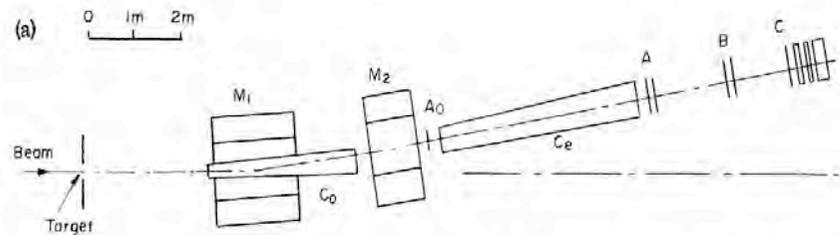


La scoperta della J/ψ a Brookhaven (1)

Il risultato di Brookhaven:

- Group was lead by Samuel Ting.
- They were studying e^+e^- pairs produced in $p + \text{Be}$ collisions.
- Proton beam at beryllium target.
- $p + \text{Be} \rightarrow ? + X \rightarrow e^+ + e^- + X$

1)



- 2 arms like this at an angle of 14.6° with respect to the proton beam.
- $9 * 1.78\text{mm}$ pieces of Be as target
- M_1 and M_2 are magnets to bend the particles.
- C_0 and C_e are Cherenkov counters filled with Hydrogen, C_0 has 1 atm, C_e has 0.8 atm.
- Setup calibrated with 6 GeV electrons
- 11 planes of proportional chambers (A_0, A, B and C) rotated at 20° with respect to each other

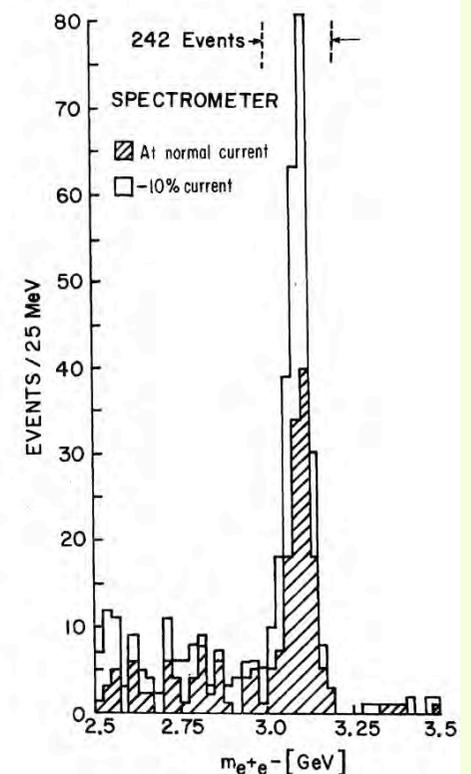
2)

- Required 2 beams to come from a single piece or the results were disallowed.
- Magnets bend the electron and positron 'beams' to separate them and to keep the detectors from the proton beam.
- Measuring the invariant mass of the e^+e^- pair.
- Spectrometer acceptance set to between 1 and 5 GeV

3)

- Invariant mass peaked at 3.1 GeV
- The group did many tests to confirm their results.
- The group took another set of data 2 months later, lowering the current by 10%, the same peak at 3.1 GeV was observed.

4)

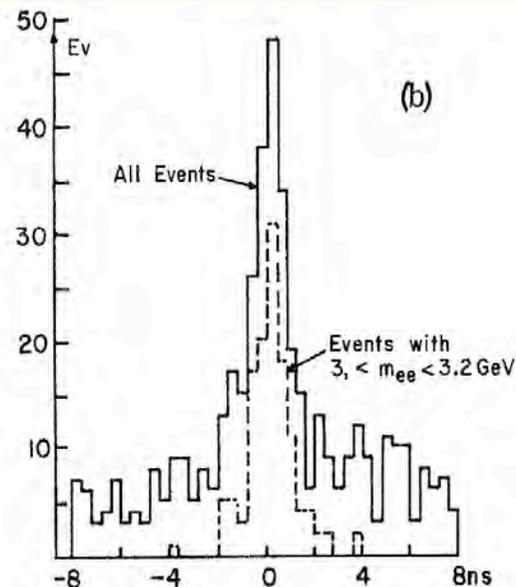


La scoperta della J/ψ a Brookhaven (2)

Il risultato di Brookhaven: una migliore selezione del segnale

- Time between hits on the e^+ and e^- arms.
- Clear peak at 1.5 ns.
- Means we can reject accidentals causing these events, the electron/positrons were moving at the same velocity.

5)



- Large peak between 3 GeV and 3.2 GeV Invariant mass
- Wanted to call it the J particle, some speculate because it was the letter before K, a known strange particle, others say it's because Ting's name in Chinese looks like a J (J)

La scoperta della J/ψ a SLAC

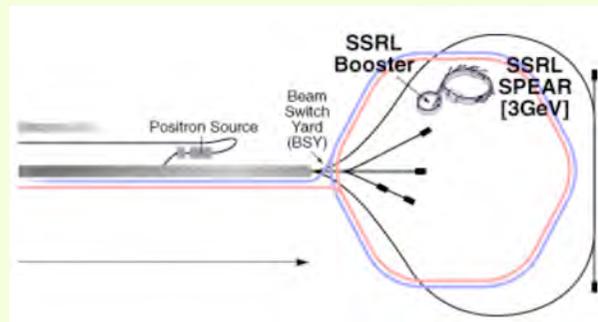
Il risultato di SLAC:

- Stanford Linear Accelerator Centre.
- Lead by Burton Richter.
- Studying e^+e^- annihilation.
- Mark I detector.
- These experiments were happening almost at the same time as Ting's and the MIT group at Brookhaven.

1)

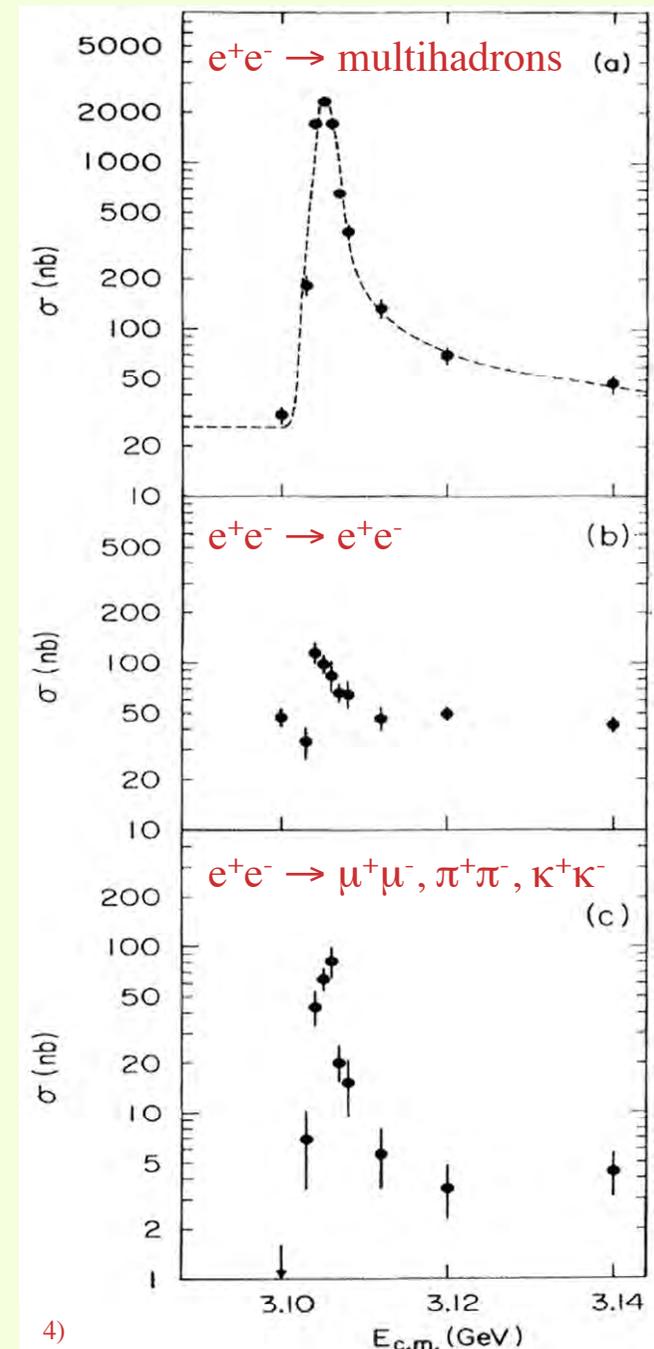
- Cross section of the annihilation peaks at $3.105\text{GeV} \pm 0.003\text{ GeV}$
- (a) shows the hadron final states, about 100 times the cross section outside of resonance

2)



- (c) Is more likely just the $\mu^+\mu^-$ channel, as the muon identification system was not functioning.
- Several decay modes.
- A second resonance was also discovered a week later at just under 3.7 GeV

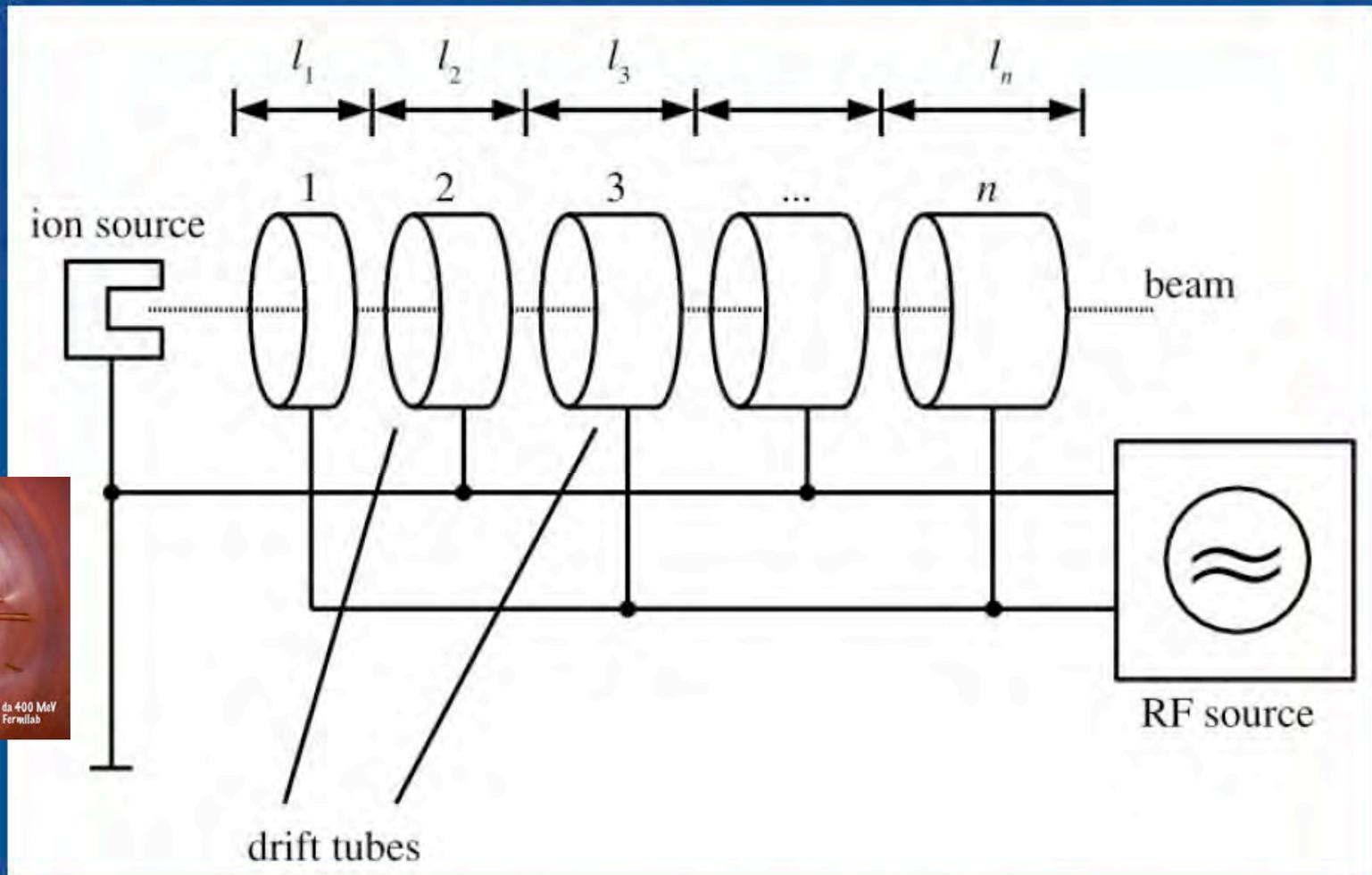
3)



4)

LINAC, acceleratori lineari

In principio, più semplice del ciclotrone (Ising 1924, Wideroe 1928)



Realizzato nel 1931 da Sloan e Lawrence per ioni pesanti (lenti).
Sorgenti ad alte frequenze disponibili solo nel dopoguerra.

SLAC, Stanford Linear Accelerator Center



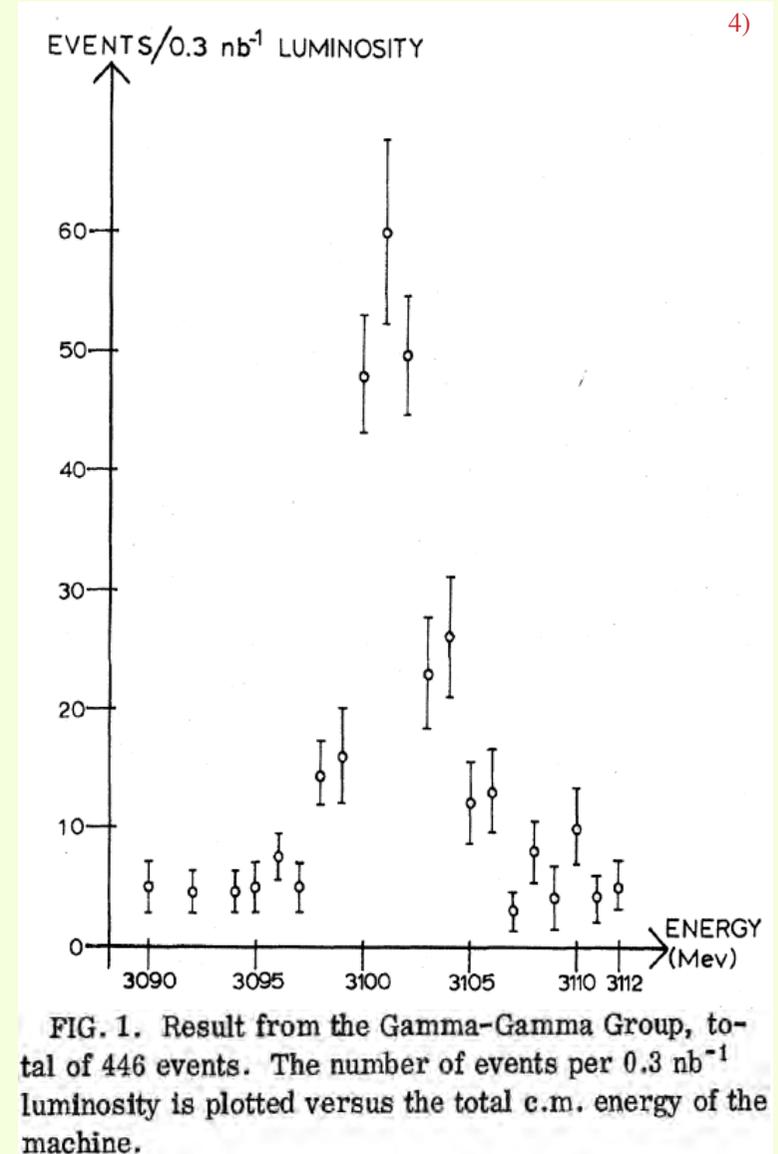
La J/ψ vista a Frascati

- Three groups did independent experiments.
- All confirmed the results Ting's group and Richter
- The Gamma-Gamma group results shown here, large peak at just over 3.1 GeV
- Ting's group at MIT gave Frascati their results before they were published.
- Pushed ADONE, the storage ring past its limits to collect this data

1)

Nel novembre del 1974, Giorgio Bellettini, direttore dei Laboratori di Frascati, fu informato della scoperta dallo stesso Samuel Ting. Si capì che, forzando al massimo le possibilità energetiche di ADONE, sarebbe stato possibile produrre la particella. E così fu. 2)

Testimonianza di Giorgio Salvini: "*Fui abbastanza saggio da pubblicare questo risultato dicendo: siamo stati avvisati di questa risonanza e l'abbiamo trovata; sicché il nostro articolo comparve contemporaneamente agli altri ma con questa dichiarazione iper-onesta, cosa di cui mi lodo ancora perché in queste cose non si può scherzare. Sicché siamo stati tra gli scopritori della J/ψ , ma grazie al suggerimento di chi l'aveva trovata prima*". 3)



Dopo la scoperta della J/ψ studiati i possibili stati legati del quark charm

Term symbol $n^{2S+1}L_J$	J^{PC}	Il Charmonium Particle	mass (MeV/c ²) [1]
1^1S_0	$0^+(0^{-+})$	$\eta_c(1S)$	2980.3±1.2
1^3S_1	$0^-(1^{--})$	$J/\psi(1S)$	3096.916±0.011
1^1P_1	$0^-(1^{+-})$	$h_c(1P)$	3525.93±0.27
1^3P_0	$0^+(0^{++})$	$\chi_{c0}(1P)$	3414.75±0.31
1^3P_1	$0^+(1^{++})$	$\chi_{c1}(1P)$	3510.66±0.07
1^3P_2	$0^+(2^{++})$	$\chi_{c2}(1P)$	3556.20±0.09
2^1S_0	$0^+(0^{-+})$	$\eta_c(2S)$, or η'_c	3637±4
2^3S_1	$0^-(1^{--})$	$\psi(3686)$	3686.09±0.04
1^1D_2	$0^+(2^{-+})$	$\eta_{c2}(1D)^\dagger$	
1^3D_1	$0^-(1^{--})$	$\psi(3770)$	3772.92±0.35
1^3D_2	$0^-(2^{--})$	$\psi_2(1D)$	
1^3D_3	$0^-(3^{--})$	$\psi_3(1D)^\dagger$	
2^1P_1	$0^-(1^{+-})$	$h_c(2P)^\dagger$	
2^3P_0	$0^+(0^{++})$	$\chi_{c0}(2P)^\dagger$	
2^3P_1	$0^+(1^{++})$	$\chi_{c1}(2P)^\dagger$	
2^3P_2	$0^+(2^{++})$	$\chi_{c2}(2P)^\dagger$	
$?^? ?_?$	$0^?(?^?)^\dagger$	$X(3872)$	3872.2±0.8
$?^? ?_?$	$?^?(1^-)$	$Y(4260)$	4260 ⁺⁸ ₋₉

Ψ' decaying to Ψ

- The Ψ' is the partner to the Ψ , it was discovered a week after the Ψ by the SLAC group.
- Ψ' has an energy of 3.685 GeV
- $\Psi' \rightarrow \Psi + \pi^+ + \pi^-$
- Then the Ψ quickly decays to:
- $\Psi \rightarrow e^+ + e^-$
- It looks like a Ψ , which is convenient 😊

