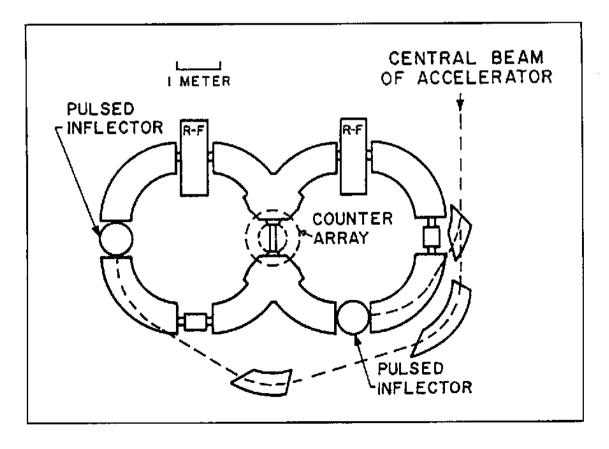
Collisionatori elettrone-positrone

Giorgio Bellettini Dipartimento di Fisica, Universita` di Pisa INFN, Sezione di Pisa

Lezione al Seminario sul Software della Fisica Nucleare, Subnucleare ed Applicata Alghero, 5 giugno 2008

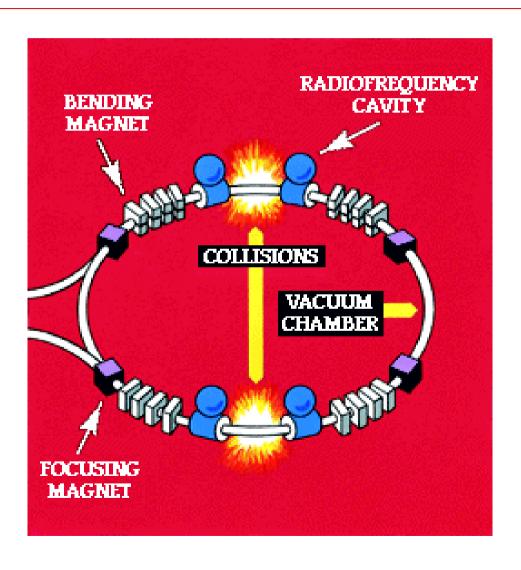
Il primo collisionatore: fasci di elettroni

Se i fasci hanno la stessa carica sono necessari due anelli.



Il primo collisionatore elettrone-elettrone fu costruito a SLAC nel 1960.

Collisionatori elettrone-positrone



AdA conservato a Frascati



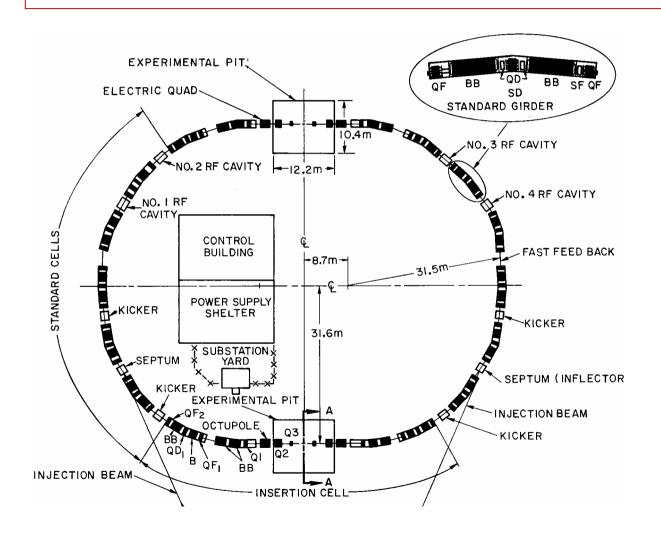
Nel 1971 AdA mostò che elettroni e positroni potevano collidere nello stesso anello. Si operò a √s=200 MeV



I più grandi successi ai collisionatori e+e-

- Scoperta del quark charm a SPEAR (1974)
- Scoperta del gluone a PETRA (1979)
- Le proprietà dello Z a LEP e SLC (1991)

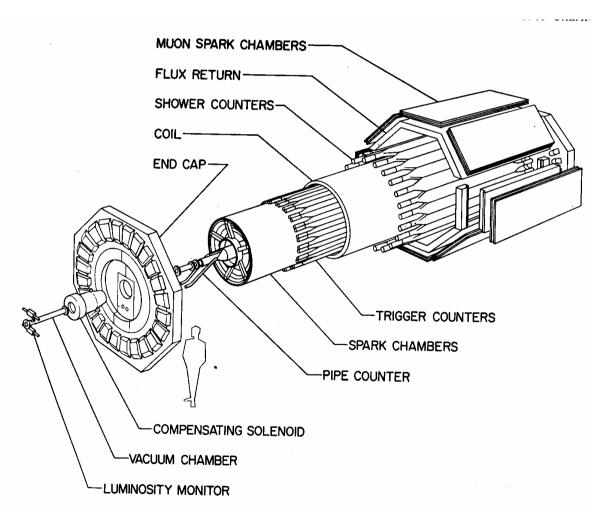
L'anello SPEAR di Stanford



Il raggio di SPEAR era di soli 40 metri.

Energia massima 8 GeV

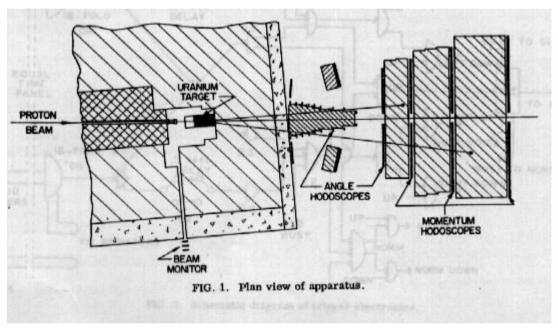
Il rivelatore Mark1



MARK1 era il solo rivelatore di SPEAR.

Lo spettro di coppie di μ di J.H.Christenson et al.

Phys Rev D8,2016,1973



Dal 1971 si sapeva di una anomalia osservata in un esperimento di produzione di coppie di µ a Brookhaven.

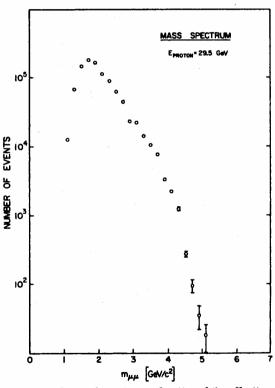


FIG. 4. Observed events as a function of the effective mass of the muon pair. Proton energy=29.5 GeV.

I dati di J.H.Christenson et al. dopo sottratto il fondo

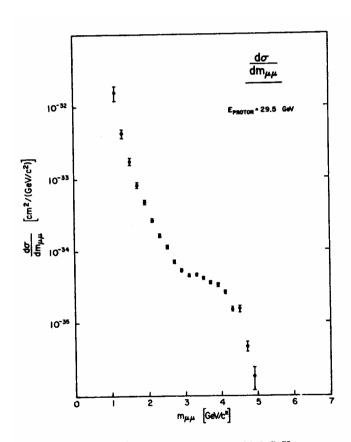


FIG. 6. $d\sigma/dm$. Proton energy = 29.5 GeV.

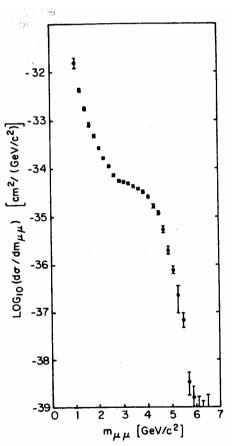


FIG. 10. $d\sigma/dm$. Weighted average of standard and "wide angle" events. Proton energy = 29.5 GeV.

Sottraendo il grosso fondo di accidentali appariva una notevole "spalla" nello spettro.

Il doppio spettrometro di BNL

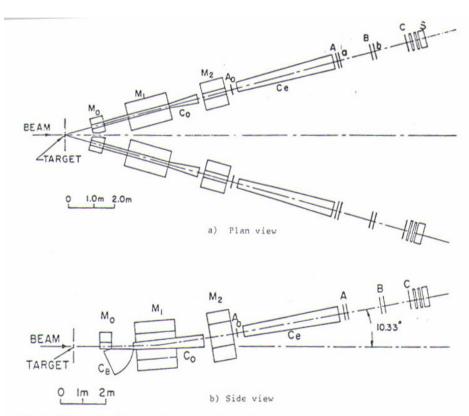


Fig. 5. Schematic diagram of the experimental set-up for the double-arm spectrometer used in our discovery of the J particle. M₀, M₁, and M₂ are dipole magnets; A₀, A, B, and C are 8000-wire proportional chambers; a and b are each 8 × 8 hodoscopes; S designates three banks of lead-glass and shower counters: C_B, C₀, and C₀ are gas Čerenkov counters.

Sam.C.C. Ting e collaboratori ritennero che quello spettro fosse degno di una misura molto più accurata.

Scelsero il canale e+ ee costruirono un doppio spettrometro magnetico ad alta risoluzione

Scoperta della particella J

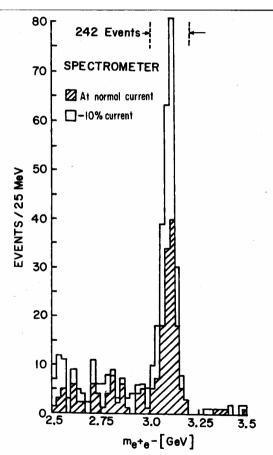


FIG. 2. Mass spectrum showing the existence of J. Results from two spectrometer settings are plotted showing that the peak is independent of spectrometer currents. The run at reduced current was taken two months later than the normal run.

Il picco della particella J fu reso noto il 11 novembre 1974.

e+e- in adroni

Customary view Quark model hypothesis $e^+e^- \rightarrow \gamma \rightarrow hadrons$ $e^+e^- \rightarrow \gamma \rightarrow q\bar{q} \rightarrow hadrons$

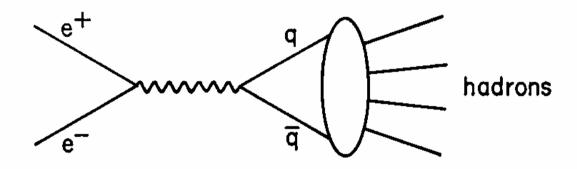


Fig. 16. Hadron production in the quark model.

Semplice stima nel modello a quark:

R= $\sigma(e^+e^-\rightarrow adroni)/\sigma(e^+e^-\rightarrow \mu^+\mu^-)=3\Sigma Q_q^2=2$ sommando u,d,s

$R=\sigma_h/\sigma_{uu}$ a ~3 GeV prima della scoperta della ψ

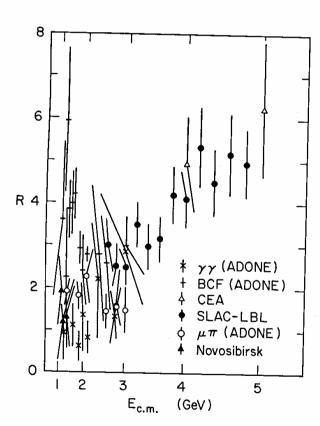


Fig. 3. The ratio R as of July 1974.

R ~ 2 ad Adone, anche se I dati erano confusi.

Dopo aver misurato alcuni valori di R fra 3 e 5 GeV, nell'estate 1974 MARK1 iniziò uno studio accurato da 3 GeV in poi, stimolato dallo strano incremento di R al di sopra di quella energia.

EW LETTERS

2 DECEMBER 1974

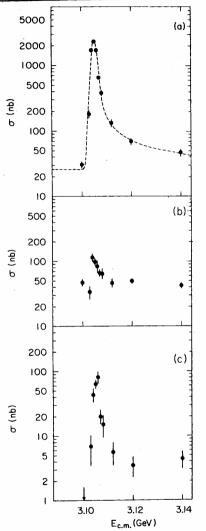
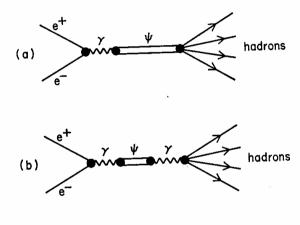


FIG. 1. Cross section versus energy for (a) multihadron final states, (b) e^+e^- final states, and (c) $\mu^+\mu^-$, $\pi^+\pi^-$, and K^+K^- final states. The curve in (a) is the expected shape of a δ -function resonance folded with the Gaussian energy spread of the beams and including radiative processes. The cross sections shown in (b) and (c) are integrated over the detector acceptance. The total hadron cross section, (a), has been corrected for detection efficiency.

Scoperta del quark charm (1974)



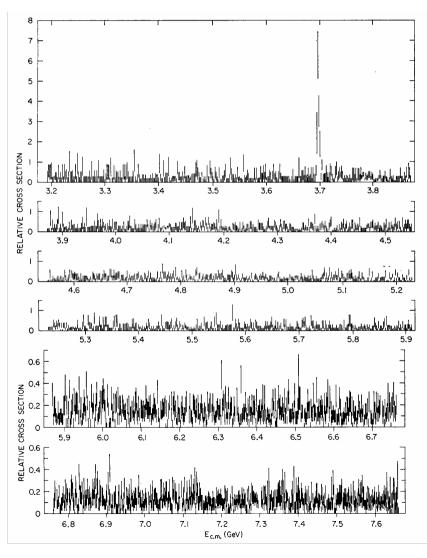
(c)

La ψ fu osservata come un enorme picco nella sezione d'urto di annichilazione a 3.1 GeV.

Si trattava di uno stato legato charm-anticharm

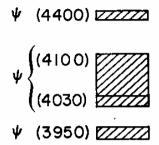
Fig. 7. Feynman diagrams for ψ production and (a) direct decay to hadrons, (b) second-order electromagnetic decay to hadrons, and (c) second-order electromagnetic decay to $\mu^+\mu^-$.

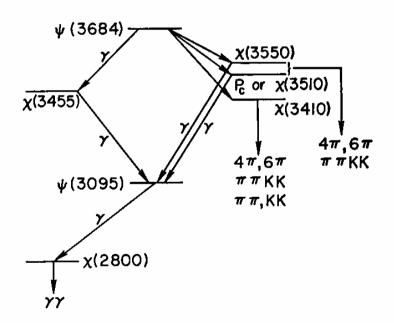
Ricerca di altre "risonanze strette"



Una seconda particella ψ` fu trovata a 3.7 GeV.

Fig. 9. The fine-scan data from our search for other narrow ψ -like states. The signal near 3.7 GeV is the ψ' .





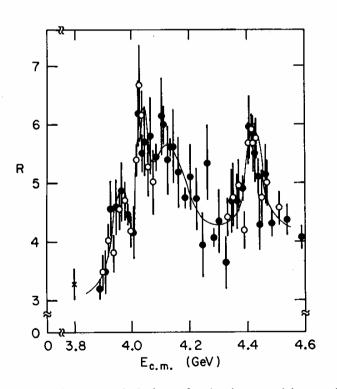
Lo spettro del "charmonio"

Si trovarono molti stati eccitati, in piena analogia con lo spettro del positronio.

Questa è una delle più chiare evidenze per la esistenza dei quarks.

Fig. 15. An energy-level diagram of the new particles. The many observed decay modes of the psi family have been omitted.

R attorno a 4 GeV



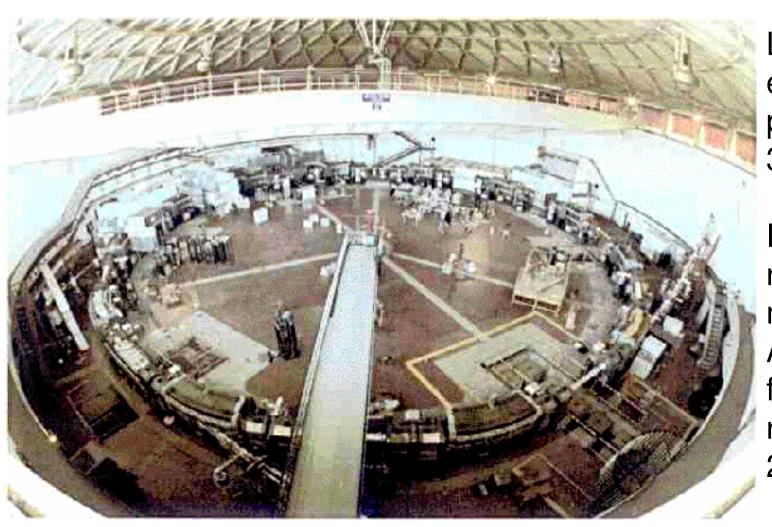
 $R = \sigma(adroni)/\sigma(coppie di \mu)$ misura in modo inclusivo la produzione di stati adronici.

Oltre la ψ ' apparvero risonanze più larghe che segnalavano stati di quark charm legati a quark leggeri in nuovi mesoni.

Questi stati dimostrarono che il charm era un quark di tipo "up"

Fig. 14. An expanded view of R in the transition region around 4 GeV.

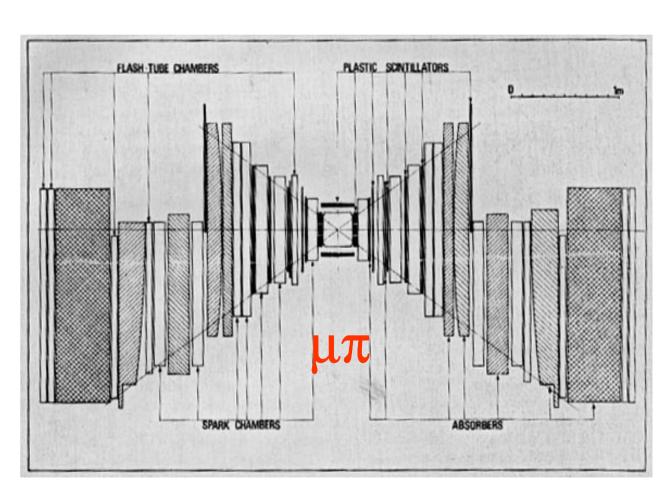
ADONE



La massima energia di progetto era 3.0 GeV.

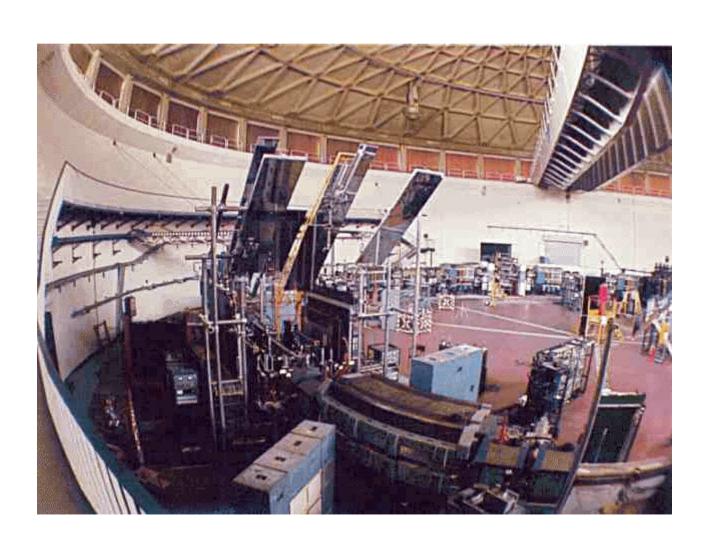
Per evitare rischi alla macchina Adone funzionò di regola a 2.8 GeV

Il rivelatore dell'esperimento " $\mu\pi$ "

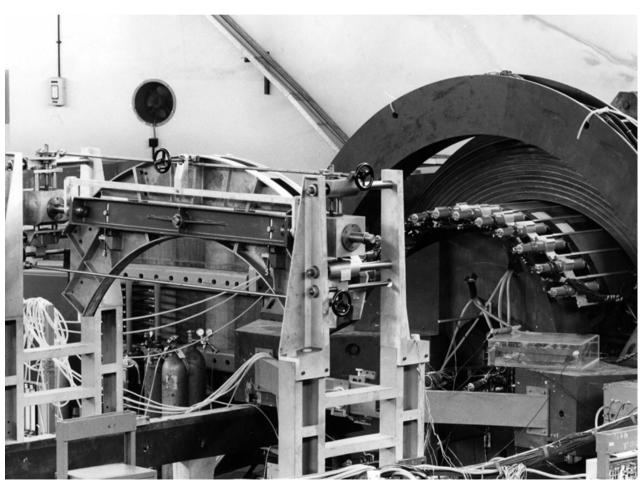


Un tipico rivelatore di Adone: due telescopi opposti di contatori di trigger e camere traccianti con limitata copertura

II rivelatore $\mu\pi$



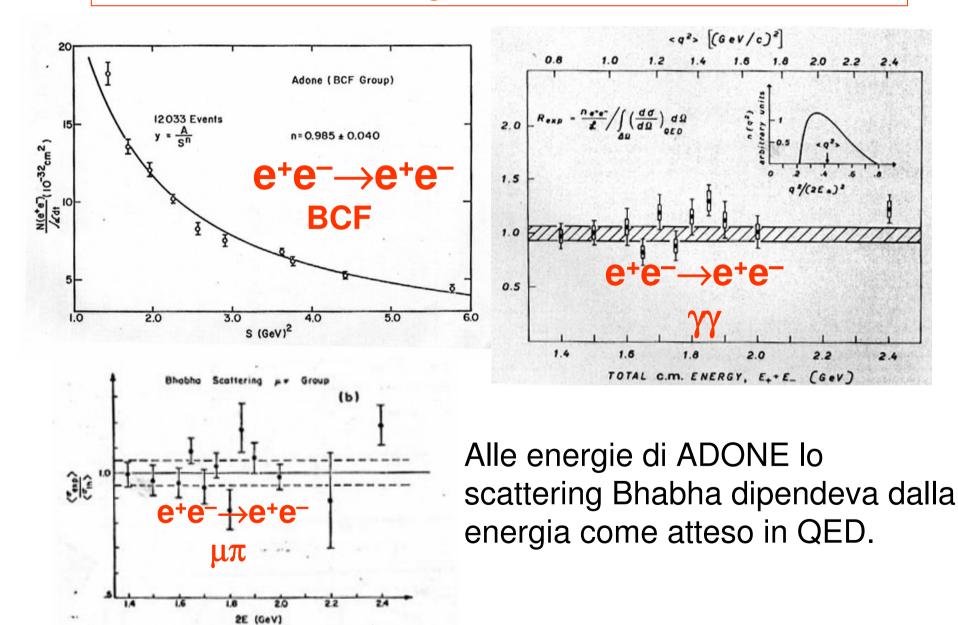
II rivelatore MEA



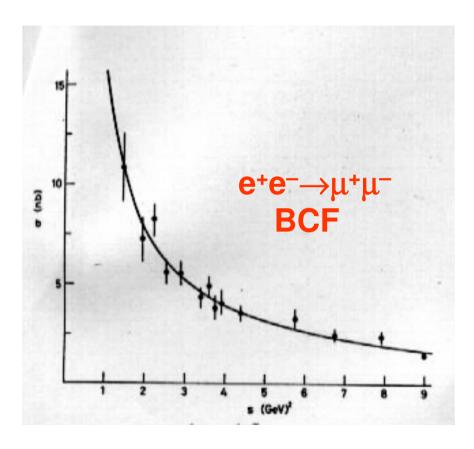
MEA aveva un campo magnetico ma il solenoide era ortogonale ai fasci per permettere di fotografare le camere a scintilla.

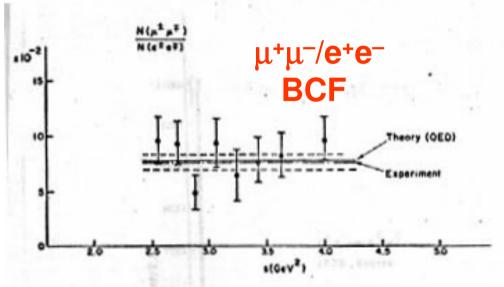
Lo scatting Bhabha ad Adone

2.4



$e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^- / e^+e^- \rightarrow e^+e^-$





Anche la annichilazione $e^+e^-\rightarrow \mu^+\mu^-$ dipendeva dalla energia come atteso in QED.

7 giorni dopo la ψ, la pubblicazione di ADONE

Telefonata di Sau Lan Wu a G.B.: 11 novembre 1974 Risonanza individuata ad ADONE: 13 Novembre Raccolta dati e scrittura dell'articolo: 17 novembre Articolo trasmesso per telefono: notte del 17 Novembre Articolo ricevuto dal P.R.L: 18 Novembre.

Preliminary Result of Frascati (ADONE) on the Nature of a New 3.1-GeV Particle Produced in e^+e^- Annihilation*

C. Bacci, R. Balbini Celio, M. Berna-Rodini, G. Caton, R. Del Fabbro, M. Grilli, E. Iarocci, M. Locci, C. Mencuccini, G. P. Murtas, G. Penso, G. S. M. Spinetti, M. Spano, B. Stella, and V. Valente

The Gamma-Gamma Group, Laboratori Nazionali di Frascati, Frascati, Raly

and

B. Bartoli, D. Bisello, B. Esposito, F. Felicetti, P. Monacelli, M. Nigro, L. Paolufi, I. Peruzzi, G. Piano Mortemi, M. Piccolo, F. Ronga, F. Sebastiani, L. Trasatti, and F. Vanoli

The Magnet Experimental Group for ADONE, Laboratori Nazionali di Frascati, Frascati, Raly

and

G. Barbarino, G. Barbiellini, C. Bemporad, R. Biancastelli, F. Cevenini, M. Celvetti, F. Costantini, P. Lariccia, P. Parascandalo, E. Sassi, C. Spencer, L. Tortora, U. Troya, and S. Vitale

The Baryon-Antibaryon Group, Laboratori Nazionali di Frascati, Frascati, Italy (Received 18 November 1974)

We report on the results at ADONE to study the properties of the newly found 3.1-BeV particle.

I buffi errori di ortografia nella lista degli autori.

La ψ vista a Frascati

C.Bacci et al., Phys.Rev.Lett. 33, 1408, 1974

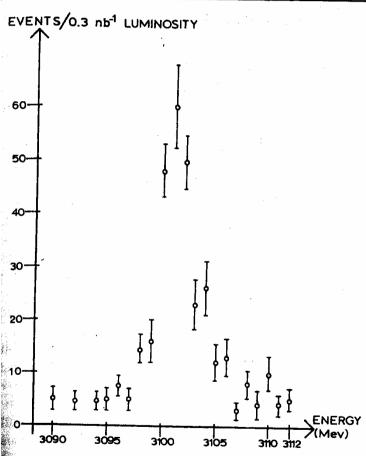
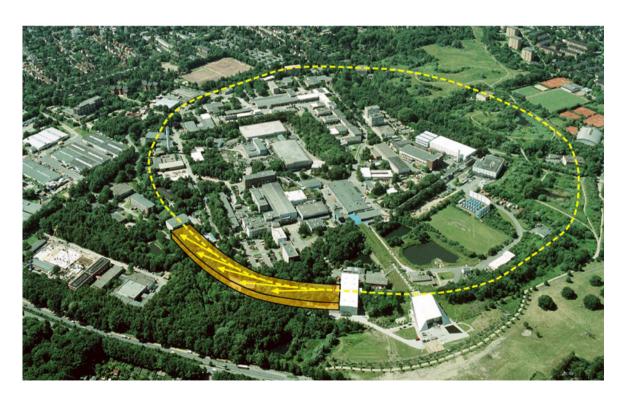


FIG. 1. Result from the Gamma-Gamma Group, total of 446 events. The number of events per 0.3 nb⁻¹ luminosity is plotted versus the total c.m. energy of the machine.

La figura è del gruppo γγ. I gruppi MEA e B-Bbar ottennero una distribuzione simile.

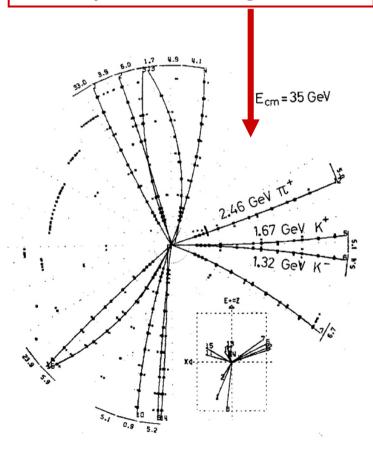
PETRA a DESY, Amburgo

Circonferenza 2,3 Km, energia 45 GeV

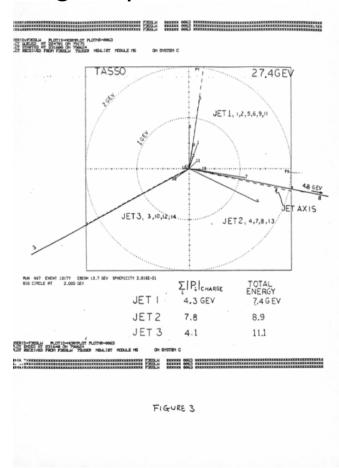


Scoperta del gluone a PETRA (1979)

Annichilazione e⁺ e⁻ in due quark e un gluone



I getti adronici segnalarono la emissione di un gluone nello scattering di quark.



Il tunnel sotterraneo di LEP



L'energia di LEP raggiunse 205 GeV.

Il tunnel sotterraneo evita appena il lago di Ginevra.

L'anello di LEP

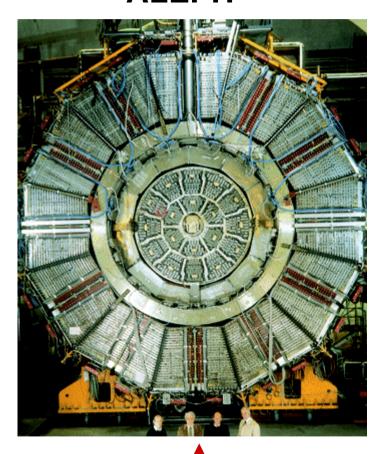


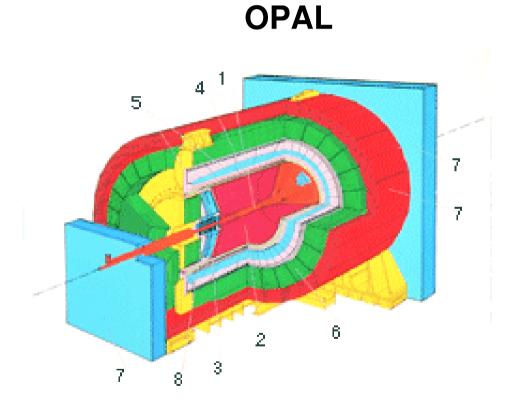
Con una circonferenza di oltre 27 Km la curvatura dell'anello di LEP era appena apprezzabile.

Il tunnel del LEP fu costruito con sezione e raggio maggiori del necessario con l'idea di poterlo riutilizzare in seguito per una nuova macchina di piu` grande energia.

Due dei quattro rivelatori a LEP

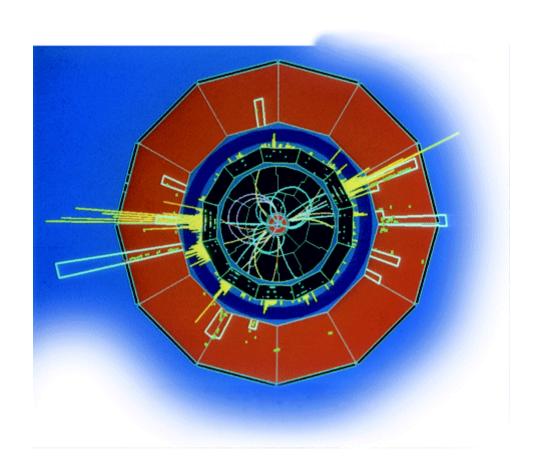
ALEPH



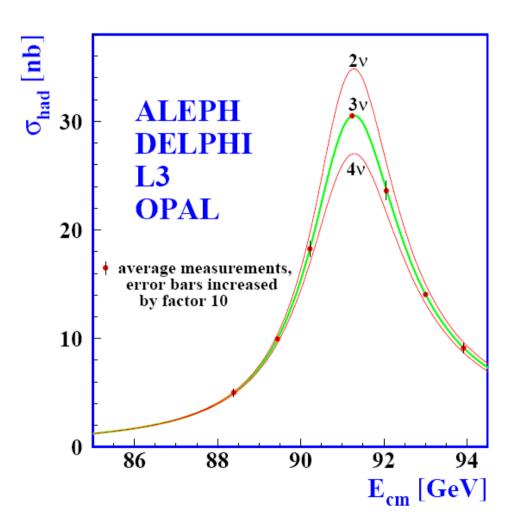




Un evento di ALEPH



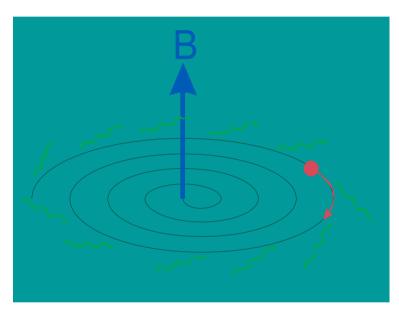
Il picco della Z a LEP



Lo Z può decadere in due neutrini. Se più stati finali sono accessibili lo Z decade più rapidamente e la sua definizione in energia peggiora.

La larghezza dello Z dimostrò che esistono tre specie di neutrini (leggeri).

Radiazione di sincrotrone

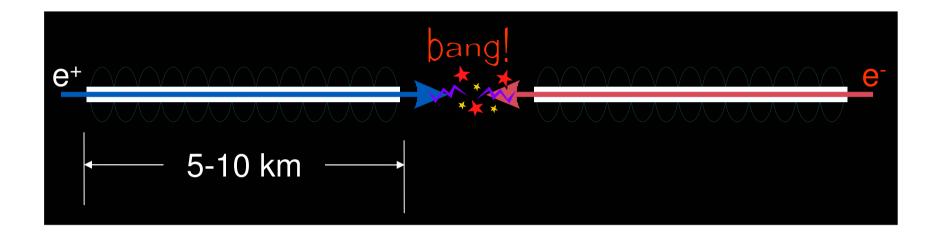


Le particelle cariche emettono radiazione elettromagnetica ("radiazione di sincrotrone") se vengono accelerate.

In un anello la perdita di energia per giro e' proporzionale a $(E/m)^4/R$ (E = energia, m = massa, R = raggio).

Collisionatori circolari di energia maggiore di LEP non sono realistici.

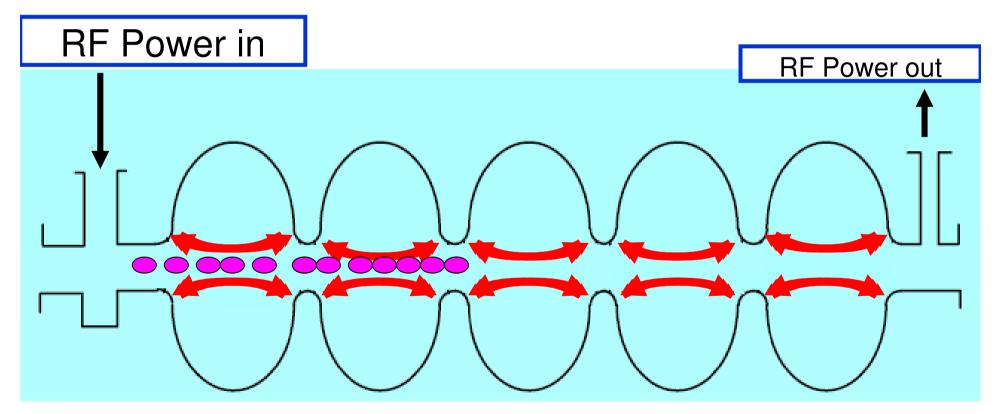
Per elettroni servono collisionatori lineari



- I linac possono accelerare elettroni con modeste perdite per irraggiamento
- Però per ottenere una energia di alcune volte quella di LEP ciascun linac dovrebbe essere lungo oltre 10 Km.

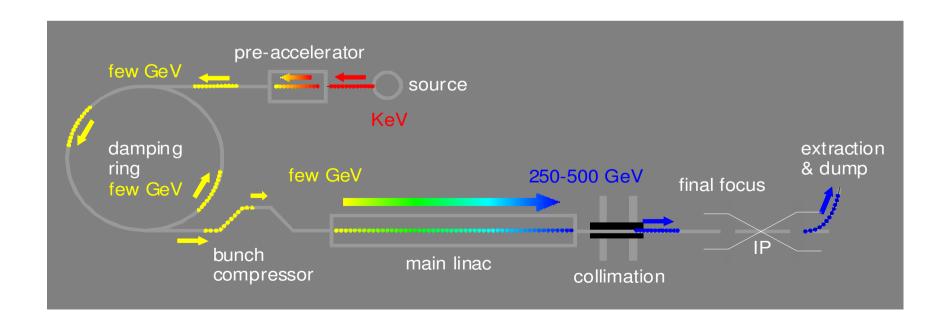
Accelerazione dei fasci in un linac

I campo elettrico si inverte da cella a cella



Elementi di un collisionatore lineare

Lo International Linear Collider che attualmente viene progettato sarà lungo ~15+15 Km. Si prevede che abbia una sola regione di interazione e due rivelatori "push-pull".



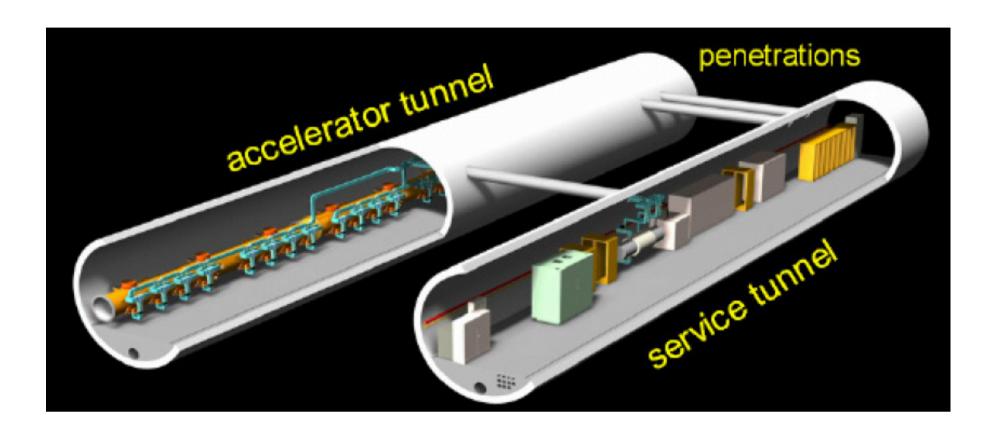
Lo International Linear Collider ILC

La comunità dei fisici subnucleari propone che il loro nuovo acceleratore sia un collisionatore fra un linac di elettroni ed uno di positroni.

Lo ILC inizierà alla energia di 500 GeV, aumentabile fino a circa 1000 GeV.

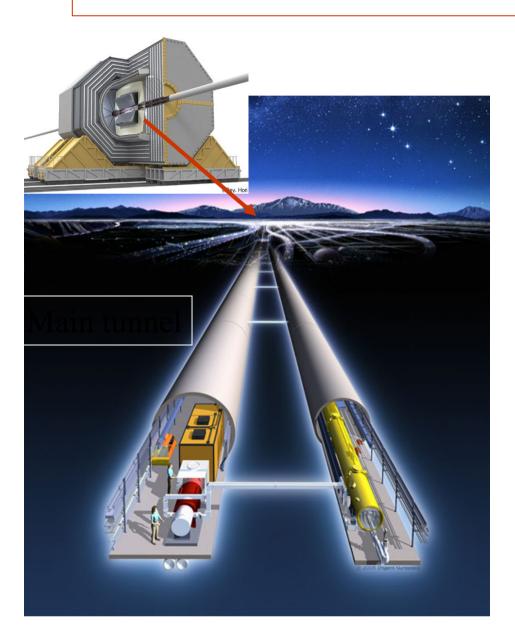
Il disegno costruttivo del progetto è in corso, ma la decisione di costruire la macchina dovrà attendere che i risultati di LHC assicurino che ci sia un ricco campo di nuovi fenomeni da studiare in questo intervallo di energia.

Disegno artistico di un linac del ILC



3-D Image of Main Linac Tunnel Configuration

Visione immaginaria di un ramo del ILC



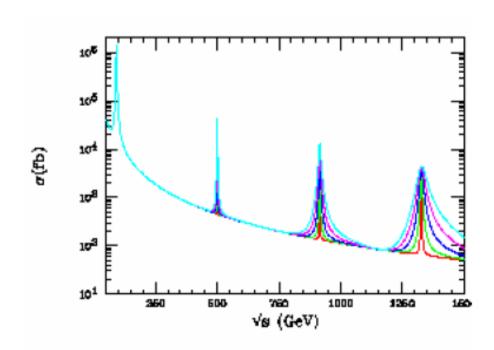
Un ILC da 500 GeV sarebbe lungo ~15+15 Km.

Parametri del ILC

- E_{cm} variabile da 200 500 GeV
- Luminosità $\rightarrow \int Ldt = 500 \text{ fb}^{-1} \text{ in 4 anni}$
- Precisione e stabilità in energia meglio di 0.1%
- Polarizzazione degli elettroni almeno 80%
- Possibilità di aumentare l'energia fino a ~ 1 TeV

Potrebbero esistere delle Z eccitate

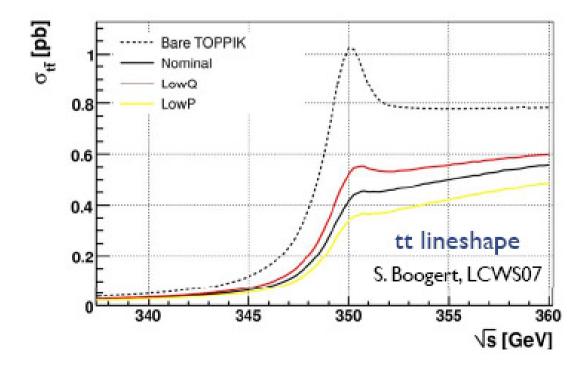
Other extra dimension models predict towers of Kaluza Klein states (similar to excited Z bosons). Increasing the energy reach gives more opportunity to observe.



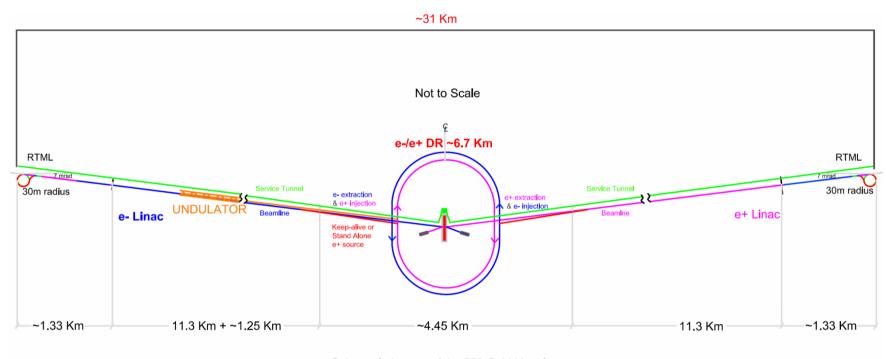
Se esistessero dei bosoni di grande massa simili allo Z sarebbe osservati e studiati al meglio ad un collisionatore lineare e+e-.

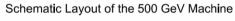
Una misura ovvia al ILC: e+e- → t+t-

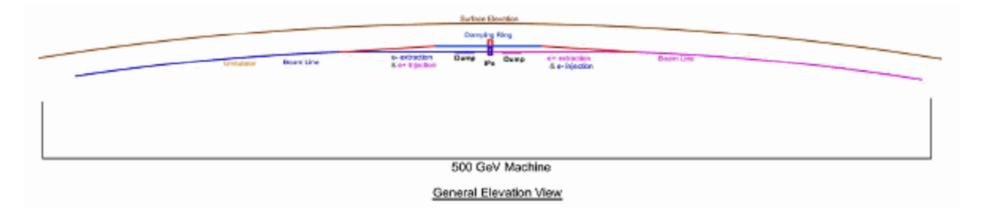
Spazzando in energia attrono a 350 GeV si potrebbe misurare la massa del quark top con un errore di circa 350 MeV.



ILC nello schema del Global Design Effort

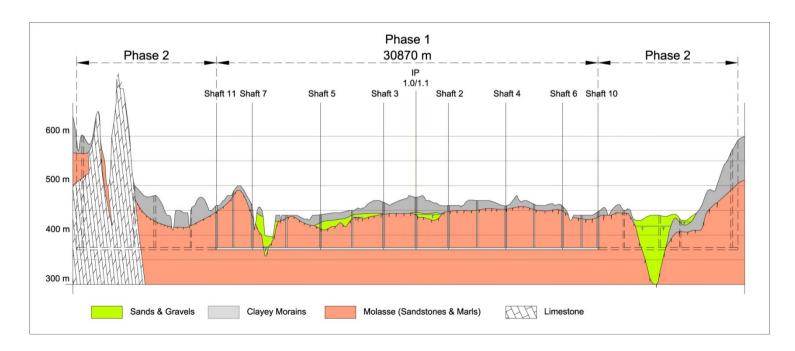






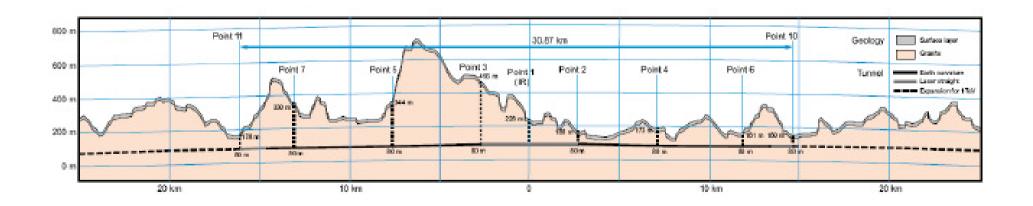
Un possibile sito in Europa (CERN)

Sfruttare la linea elettrica da 400 kV del CERN e le grandi linee di comunicazione esistenti . Letto di depositi sabbiosi. Bassa attività sismica. Profondità media del tunnel ~ 100 m (fino a ~ 30 Km.)

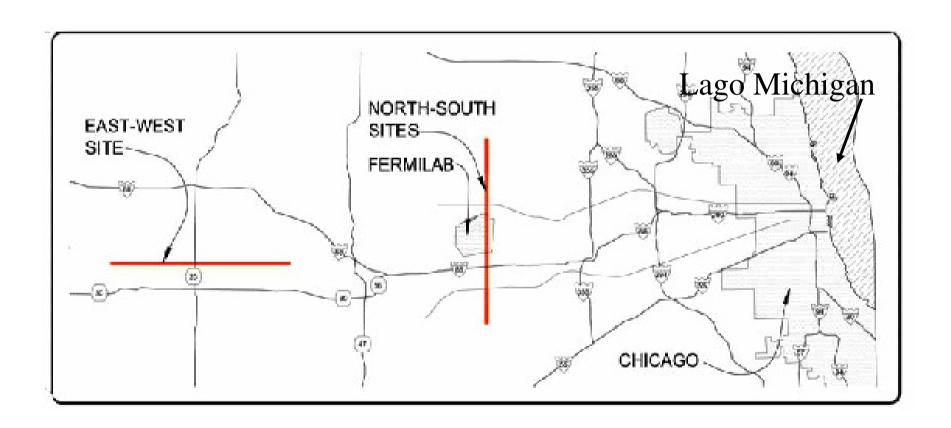


Un possibile sito in Giappone

Solido fondo di granite, oltre 50 km disponibili. Nessuna zona sismicamente attiva in vicinanza. Profondità massima del tunnel 600 m. Accesso tramite tunnels quasi orizzontali.

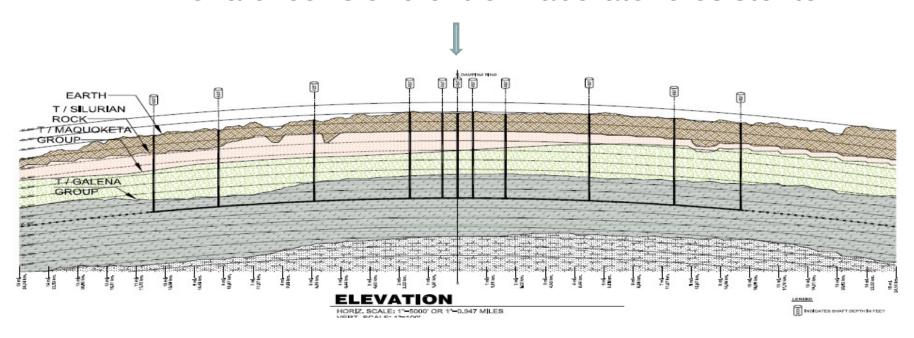


Possibili siti a Fermilab



Il sito nord-sud di Fermilab

Zona di collisione entro il laboratorio esistente

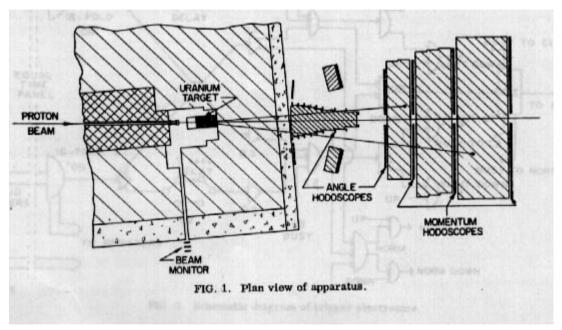


COMMENTO FINALE

- Lo ILC sarà proposto come futura macchina mondiale se dopo alcuni anni di operazione LHC confermerà il suo interesse per la fisica
- La sua realizzazione sarebbe una impresa di complessità tecnologica senza precedenti
- USA, Europa e Giappone? Nessuno può prevedere dove sarà costruita la macchina.

Lo spettro di coppie di μ di J.H.Christenson et al.

Phys Rev D8,2016,1973



Inoltre da oltre un anno si sapeva di una anomalia osservata in un esperimento di produzione di coppie di µ a Brookhaven.

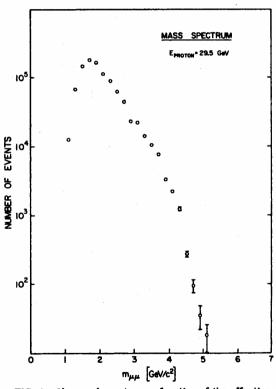


FIG. 4. Observed events as a function of the effective mass of the muon pair. Proton energy=29.5 GeV.

I dati di J.H.Christenson et al. dopo sottratto il fondo

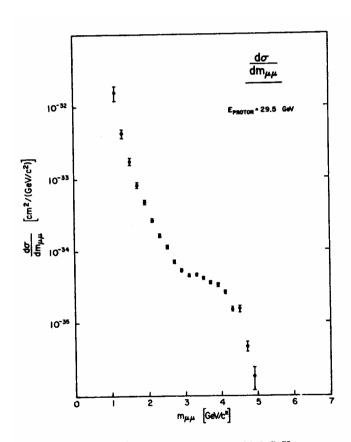


FIG. 6. $d\sigma/dm$. Proton energy = 29.5 GeV.

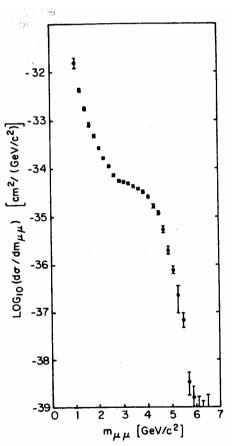


FIG. 10. $d\sigma/dm$. Weighted average of standard and "wide angle" events. Proton energy = 29.5 GeV.

Sottraendo il grosso fondo di accidentali appariva una notevole "spalla" nello spettro.

Il doppio spettrometro di BNL

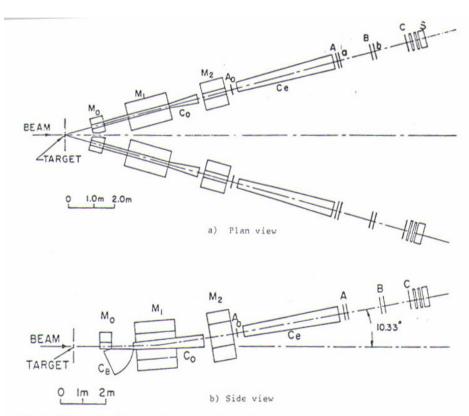


Fig. 5. Schematic diagram of the experimental set-up for the double-arm spectrometer used in our discovery of the J particle. M₀, M₁, and M₂ are dipole magnets; A₀, A, B, and C are 8000-wire proportional chambers; a and b are each 8 × 8 hodoscopes; S designates three banks of lead-glass and shower counters: C_B, C₀, and C₀ are gas Čerenkov counters.

Sam.C.C. Ting e collaboratori ritennero che quello spettro fosse degno di una misura molto più accurata.

Scelsero il canale e+ e- e costruirono un doppio spettrometro magnetico ad alta risoluzione

Scoperta della particella J

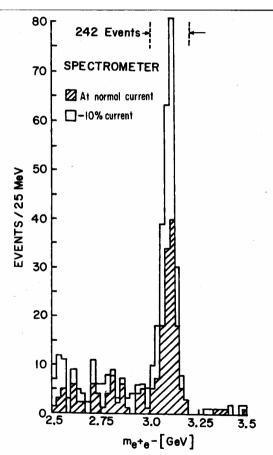


FIG. 2. Mass spectrum showing the existence of J. Results from two spectrometer settings are plotted showing that the peak is independent of spectrometer currents. The run at reduced current was taken two months later than the normal run.

Il picco della particella J fu reso noto il 11 novembre 1974.

e+e- in adroni

Customary view Quark model hypothesis $e^+e^- \rightarrow \gamma \rightarrow hadrons$ $e^+e^- \rightarrow \gamma \rightarrow q\bar{q} \rightarrow hadrons$

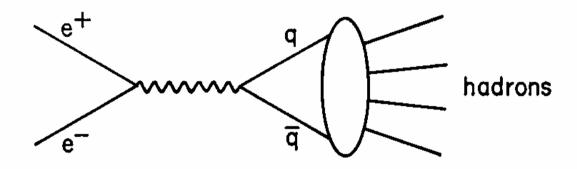


Fig. 16. Hadron production in the quark model.

Semplice stima nel modello a quark:

R= $\sigma(e^+e^-\rightarrow adroni)/\sigma(e^+e^-\rightarrow \mu^+\mu^-)=3\Sigma Q_q^2=2$ sommando u,d,s

$R=\sigma_h/\sigma_{uu}$ a ~3 GeV prima della scoperta della ψ

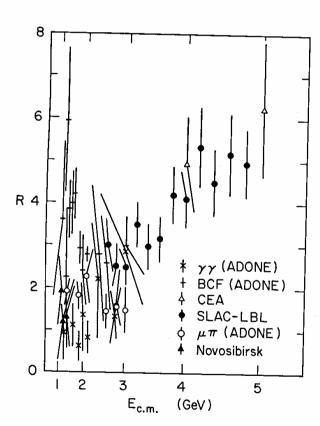


Fig. 3. The ratio R as of July 1974.

R ~ 2 ad Adone, anche se I dati erano confusi.

Dopo aver misurato alcuni valori di R fra 3 e 5 GeV, nell'estate 1974 MARK1 iniziò uno studio accurato da 3 GeV in poi, stimolato dallo strano incremento di R al di sopra di quella energia.

R a SPEAR senza le ψ 's

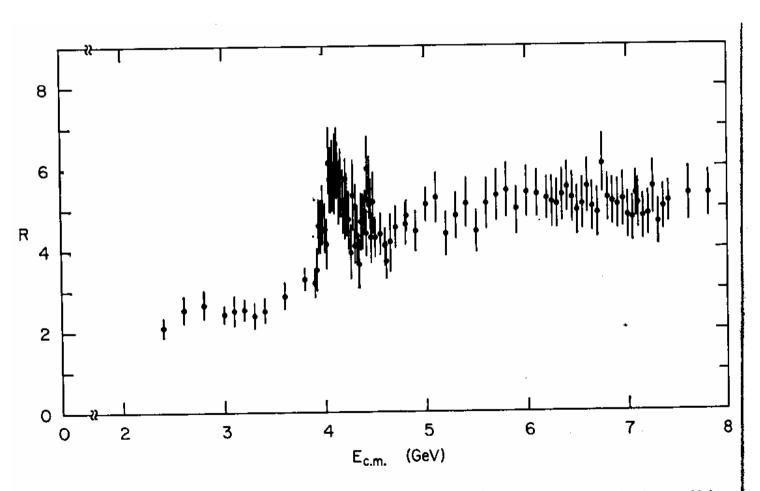


Fig. 13. The ratio R with the ψ and ψ' deleted (including their radiative tails).

Gli stati della famiglia ψ

Table II. Some of the low lying bound states of a fermion-antifermion system together with an assignment of the new particle to states with appropriate quantum numbers

State	L	S	$J^{ m PC}$	Particle	
1 ³ S ₁	0	1	1	J	
$2^{3}S_{1}$	0	1	1	₫,	
$3 {}^{3}S_{1}^{2}$	0	1	1	Ţ,,,	
$1 {}^{3}D_{1}$	2	1	1	Ū~,	
$2 {}^{3}D_{1}$	2	1	1	Ψ····	
$1 {}^{1}S_{0}$	0	0	0-+	X	
$2^{1}S_{0}$	0	0	0-+		
$1 {}^{3}P_{0}$. 1	1	0++	$\chi(3.45) \\ \chi(3.4)$	
$1 {}^{3}P_{1}$	1	1	1++	$\chi(3.5)$	
$1 {}^{3}P_{2}^{1}$	1	1	2++	$\chi(3.55)$	