

## IL QUARK TOP ED IL RUOLO DELL'INFN

di Giorgio Bellettini

### I quark pesanti prima del quark top

Il quark top è l'ultimo nato dei "quark pesanti". I quark conosciuti sono 6 e dopo il top non ci si aspetta di trovarne altri, anche se non si può esserne certi. Sono stati chiamati "pesanti" i 3 quark scoperti dal 1974 in poi, perchè sono molto più massivi dei tre precedentemente noti. Essi si sono aggiunti ai quark "down" e "up" che hanno carica elettrica  $(-1/3)$  e  $(+2/3)$  e ( $e$  = carica del protone), e massa pari ad una piccola frazione della massa del protone, ed al quark "strange" che ha le stesse proprietà del down ma una massa più grande, circa  $1/5$  della massa del protone. In natura solo i quark down e up esistono stabili, ma sono confinati nei protoni e nei neutroni. Gli altri sono prodotti solo nelle interazioni di particelle e sono instabili.

La fisica dei quark pesanti nasce con "la rivoluzione del 1974", la storica scoperta del quark "charm". Questa scoperta avvenne con la osser-

vazione della particella  $J/\psi$  che è uno stato legato charm-anticharm. Il charm come tutti i quark appare puntiforme ma ha una massa pari a circa una volta e mezzo quella del protone. Gli altri due quark scoperti successivamente, il quark "beauty" ed il quark "top", sono ancora più pesanti. In particolare stupisce la enorme massa del quark top.

Il doppio simbolo attribuito alla particella  $J/\psi$  è dovuto al fatto che la scoperta fu annunciata contemporaneamente da due gruppi sperimentali, uno impegnato al laboratorio di Brookhaven che la chiamò  $J$ , ed uno a SLAC che la chiamò  $\psi$ . È rimasto celebre nella storia della nostra fisica l'episodio della precedente "non-scoperta" della  $J/\psi$  a Brookhaven da parte del gruppo diretto da Leon Lederman, dove nel 1972 era stata osservata fra 3 e 5 GeV una anomalia, che vista oggi appare veramente impressionante, nello spettro di massa delle coppie di muoni ( $\mu$ ) prodotti in avanti in interazioni di protoni su nuclei (figura 1, Ref.1).

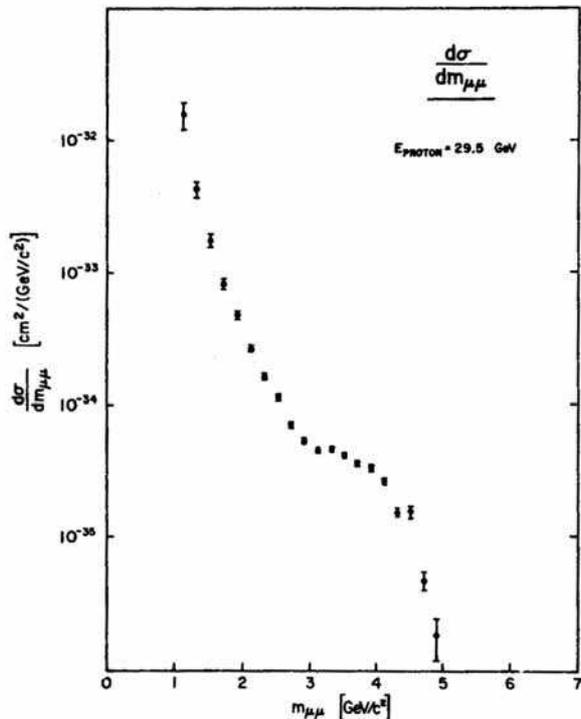


FIG. 6.  $d\sigma/dm$ . Proton energy = 29.5 GeV.

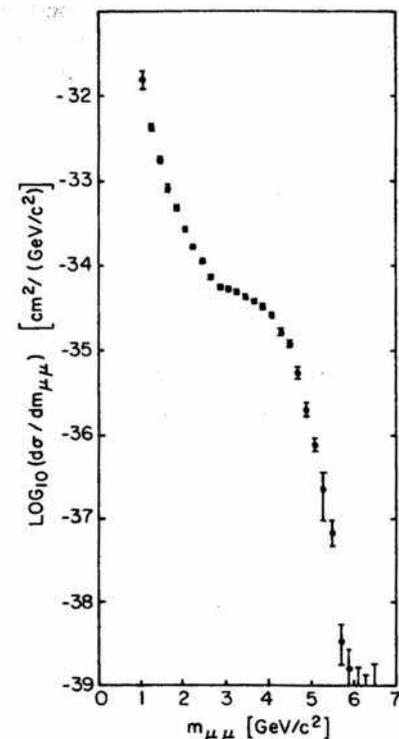


FIG. 10.  $d\sigma/dm$ . Weighted average of standard and "wide angle" events. Proton energy = 29.5 GeV.

Fig. 1

Lo spettro di coppie di muoni ottenuto da J. Christenson et al. (ref.1) dopo la sottrazione del fondo.

La "spalla" osservata sopra i 3 GeV, che appariva nei dati dopo la sottrazione di un fondo (peraltro enorme) di coincidenza accidentali, fu notata ma non considerata come segnale affidabile di un nuovo fenomeno. Essa invece era dovuta ad una risonanza stretta che appariva come un ampio bozzo a causa della povera risoluzione dell'esperimento. L'apparato sperimentale infatti era estremamente semplice. Il modulo dell'impulso dei  $\mu$  era misurato grossolanamente tramite il loro percorso in assorbitori.

La scoperta fu ottenuta due anni dopo nello

stesso laboratorio da un gruppo diretto da Samuel C.C. Ting, che scelse di studiare le coppie di elettroni e ne misurò l'impulso con un doppio spettrometro magnetico che forniva una risoluzione in massa delle coppie elettrone-positrone di gran lunga migliore di quella del precedente esperimento. Lo spettro dimostrava inequivocabilmente la presenza di una nuova particella (figura 2, Ref.2). Questa particella, che gli autori chiamarono  $J$ , fu presto interpretata come uno stato legato quark-antiquark di un nuovo quark, il quark charm.

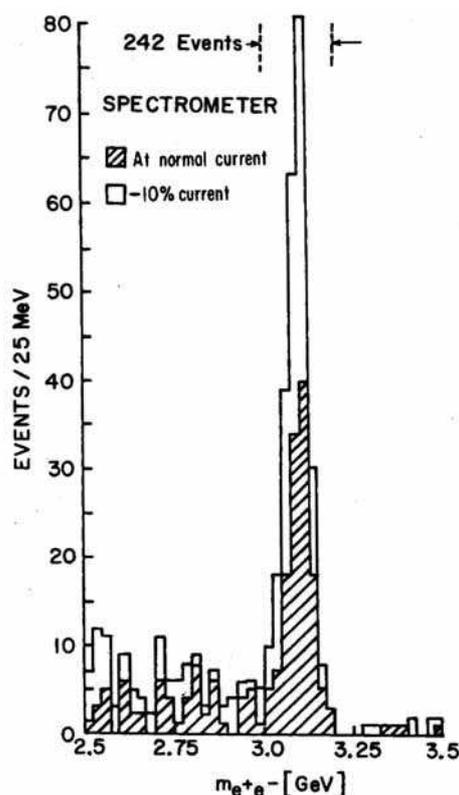


FIG. 2. Mass spectrum showing the existence of  $J$ . Results from two spectrometer settings are plotted showing that the peak is independent of spectrometer currents. The run at reduced current was taken two months later than the normal run.

Fig. 2.

Lo spettro di massa delle coppie elettrone-positrone reso pubblico da J.J. Aubert et al. il 11 novembre del 1974. (Ref.2)

Chi scrive era a quei tempi Direttore dei Laboratori Nazionali di Frascati. La notizia della scoperta mi giunse nella notte dell'11 novembre con una telefonata del gruppo di BNL. La nuova particella era stata scoperta anche allo Stanford Linear Accelerator Center con il rivelatore Mark1 dal gruppo diretto da Burton Richter che opera

sull'anello di collisione elettrone - positrone SPEAR. A questa particella gli autori diedero il nome  $\psi$ . La scoperta venne annunciata contemporaneamente con il gruppo di Brookhaven. La risonanza osservata dal gruppo di MARK1 alla energia della macchina di 3.1 GeV è mostrata in figura 3 (Ref. 3).

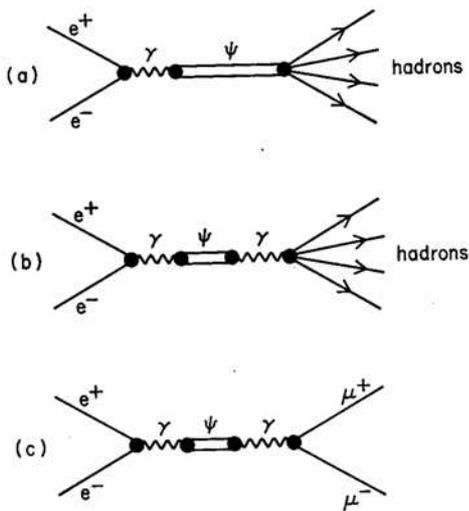


Fig. 7. Feynman diagrams for  $\psi$  production and (a) direct decay to hadrons, (b) second-order electromagnetic decay to hadrons, and (c) second-order electromagnetic decay to  $\mu^+\mu^-$ .

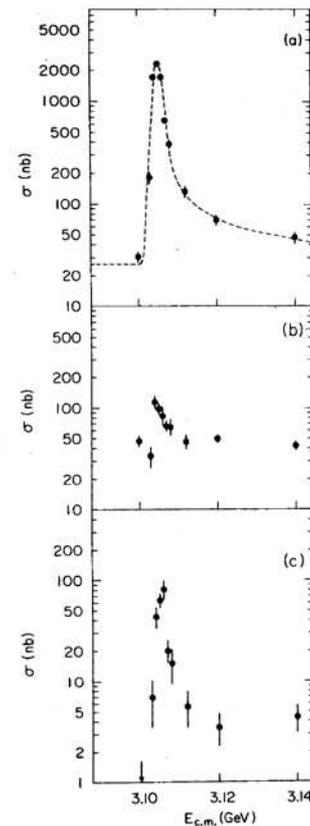


FIG. 1. Cross section versus energy for (a) multi-hadron final states, (b)  $e^+e^-$  final states, and (c)  $\mu^+\mu^-$ ,  $\pi^+\pi^-$ , and  $K^+K^-$  final states. The curve in (a) is the expected shape of a  $\delta$ -function resonance folded with the Gaussian energy spread of the beams and including 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.

Figura 3.

La particella  $\psi$  osservata a SPEAR nella sezione d'urto totale di annichilazione e nella annichilazione in coppie di muoni (Ref.3)

Per quanto il quadro della fisica subnucleare di quei tempi non suggerisse in modo evidente di mettere a rischio i magneti di Adone in una esplorazione della sezione d'urto di annichilazione elettrone-positrone ad energie sopra 3 GeV, sono rimasto amareggiato per la occasione persa dal Laboratorio. Con un pò più di intuizione da parte mia la fisica dei quark pesanti avrebbe potuto avere inizio anche a Frascati. Purtroppo, anche io non avevo dato abbastanza credito alla possibilità che la spalla osservata a BNL nel 1972 fosse dovuta ad una nuova particella che poteva essere raggiungibile anche ad Adone. Tuttavia, il primo articolo dei gruppi di Frascati sulle proprietà della  $J/\psi$ , che confermava chiaramente la esistenza della nuova particella (figura 4), apparve sul Physical Review Letters subito dopo quello del gruppo di SLAC (Ref. 4).

L'osservazione di stati eccitati della  $\psi$  a masse

superiori a 3.1 GeV, e successivamente la scoperta di nuovi mesoni contenenti un singolo quark charm legato ad un quark leggero fornirono presto una inequivocabile dimostrazione che questi stati contenevano un nuovo quark di carica elettrica  $(+2/3)e$ , la  $J/\psi$  essendo uno stato legato charm-anticharm. Il charm era dunque una ricorrenza del quark up, che assieme al quark strange di carica  $(-1/3)e$  che era già conosciuto da tempo completava un doppietto di quark instabili pesanti. Questo doppietto appariva come una ricorrenza del doppietto dei quark up and down contenuti nel protone e nel neutrone.

Naturalmente, il fatto che fossero stati osservati due doppietti di quark faceva sospettare che ne potessero esistere altri. Infatti, un quinto quark fu scoperto a Fermilab pochi anni dopo, nel 1977. Il gruppo di Leon Lederman estese oltre l'intervallo di massa raggiunto a BNL la

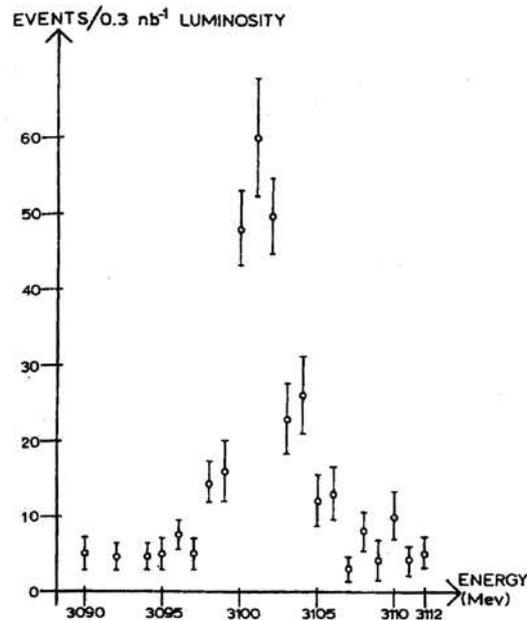


FIG. 1. Result from the Gamma-Gamma Group, total of 446 events. The number of events per  $0.3 \text{ nb}^{-1}$  luminosity is plotted versus the total c.m. energy of the machine.

Fig. 4

Il picco della  $J/\psi$  osservato da uno degli esperimenti ad Adone pochi giorni dopo l'annuncio della scoperta (Ref.4).

misura dello spettro delle coppie di muoni prodotte nella interazione di protoni, usando per la misura dell'impulso dei  $\mu$  un doppio spettrometro magnetico con risoluzione di gran lunga migliore di quella del precedente esperimento a BNL. Fu trovata una nuova risonanza a 9.5 GeV che fu chiamata  $Y$ . Come era accaduto per la  $J/\psi$ , l'esistenza di stati con massa di poco maggiore di quella della  $Y$  e la scoperta di mesoni ottenuti dal legame del nuovo quark con un quark leggero dimostrò presto che la  $Y$  era uno stato legato quark-antiquark di un nuovo quark di carica negativa, pari in questo caso a  $(-1/3)e$ .

Il nuovo quark fu chiamato "b" per "beauty" o anche "bottom". Lo spettro dell'esperimento di Fermilab che mostrò la scoperta della  $Y$  è mostrato in figura 5 (Ref. 5). La massa del b risultò di circa 4.2 GeV, approssimativamente tre volte quella del quark charm.

### La lunga caccia al quark top

Nel Modello Standard (MS) i quark interagiscono tramite scambi di portatori fra i loro doppietti. Pertanto la teoria dovrebbe essere abbandonata se un nuovo quark non fosse accompa-

gnato da un partner in un doppietto. Peraltro, furono presto trovate indicazioni sperimentali dirette che il b era lo stato inferiore di un doppietto. I suoi decadimenti nei quark più leggeri del suo stesso tipo (down, strange) sono proibiti, proprio come richiesto nel Modello Standard per i membri di un doppietto. La annichilazione elettrone-positrone in una coppia di b liberi, che fu studiata in SLAC, in Germania e in Giappone a collisionatori  $e^+ e^-$ , mostra che la loro distribuzione angolare possiede la asimmetria avanti-indietro prevista per un quark che sia lo stato inferiore di un doppietto. Il sesto quark doveva dunque esistere. Esso fu chiamato "top" in anticipo, ed è stato cercato dal 1977 in poi a tutti i collisionatori elettrone-positrone o protone-antiprotone dove poteva essere prodotto. Tuttavia, la scoperta è stata estremamente difficile, ed è arrivata solo 18 anni dopo la scoperta del b. Questo ritardo è stato dovuto sia alla sua enorme massa che ai suoi complicati canali di decadimento.

Nel MS le masse dei quark non sono previste, sono parametri liberi della teoria. La distribuzione delle masse dei cinque quark conosciuti nel 1977 non mostrava alcuna regolarità che potesse fornire empiricamente un indizio sulla massa del quark successivo. Va detto anche che la massa

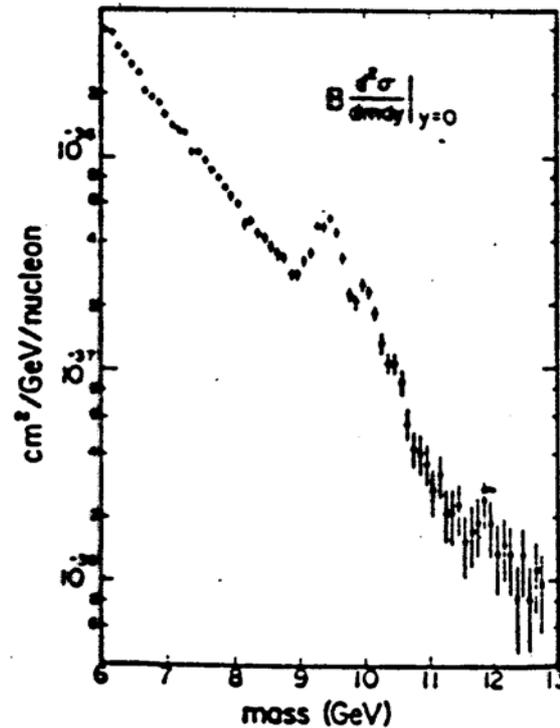


FIG. 1. Dimuon spectrum above 6 GeV.

Fig. 5.

Lo spettro di massa delle coppie di muoni della scoperta della Y (Ref.5)

dei quark non poteva essere misurata con precisione perchè essi si presentavano sempre fortemente legati in mesoni (un quark ed un anti-quark) o in barioni (tre quark).

Le masse dei quark conosciuti nel 1977 erano approssimativamente:

- down ~7 MeV      up      ~5 MeV
- strange ~150 MeV    charm ~1.400 MeV
- beauty ~4.200 MeV.

Nel 1984 nell'esperimento UA1 al collisionatore di protoni su antiprotoni del SpS del CERN apparve un piccolo segnale interpretabile come dovuto ad top di massa circa 40 GeV, ma fu un falso allarme (Ref. 7). Una dopo l'altra molte ricerche fornirono limiti inferiori sempre più alti alla massa del top:

- più di 22 GeV ai collisionatori  $e^+e^-$  PEP di SLAC e Petra di DESY (Amburgo) nel 1984;
- più di 26 GeV al collisionatore  $e^+e^-$  giapponese Tristan (Giappone) nel 1988;
- più di 41 GeV al collisionatore  $e^+e^-$  SLC di SLAC nel 1989;

- più di 45 GeV al collisionatore  $e^+e^-$  LEP del CERN nel 1989;
- più di 60 GeV all'esperimento UA2 al collisionatore p-antip del CERN nel 1989;
- più di 60 GeV a CDF al collisionatore p-antip Tevatron di Fermilab nel 1989;
- più di 69 GeV a UA2 nel 1990;
- più di 77 GeV a CDF nel 1990;
- più di 91 GeV a CDF nel 1992;
- più di 131 GeV all'esperimento D0 al Tevatron nel 1994.

Tanto tempo doveva passare fra la scoperta del beauty e quella del top in primo luogo perché essendo questo quark estremamente pesante esso poteva essere prodotto solo alle macchine più energetiche. La produzione era praticamente possibile solo al Tevatron di Fermilab e si è dovuto aspettare che questa macchina funzionasse a pieno ritmo perché la scoperta fosse almeno possibile. Inoltre questa appariva estremamente difficile anche al Tevatron. Nelle interazioni del Tevatron il meccanismo dominante di produzione del top è l'interazione forte fra i partoni dei fasci collidenti. La interazione forte ha la

proprietà di poter produrre quark solo come coppie quark-antiquark, aggravando così grandemente il bilancio energetico. Infine, se il top è più massivo del bosone intermedio  $W$  decade in questo ed in un quark  $b$ , per cui gli stati finali di una coppia di quark top sono molto complessi e difficili da individuare e da ricostruire.

Il primo run di presa dati di CDF, chiamato "Run zero", è durato dal 1988 al 1989. Il secondo, chiamato "Run1", iniziò quando anche l'esperimento D0 era stato installato sul Tevatron, nel 1993. CDF ha pubblicato la prima evidenza della scoperta del nuovo quark nel 1994, mentre D0 otteneva quell'anno un limite inferiore di 131 GeV alla sua massa. La scoperta definitiva è stata annunciata dai due esperimenti nel 1995, 18 anni dopo la scoperta del  $b$ .

Il fatto che la massa del top sia enorme ha conseguenze molto rilevanti. Dopo la produzione il top ha tempo sufficiente (circa  $10^{-25}$  s) per uscire dal volume di interazione, ma non sufficiente per legarsi con altri quark in mesoni o in barioni. Misurando i suoi prodotti di decadimento si può misurare la sua massa. Nella pratica il problema è lo stesso che si incontra quando si vuole misurare la massa di una qualunque particella instabile. Di questo quark e di questo soltanto, si può pertanto misurare accuratamente la massa. Questo vantaggio però non

compensa il prezzo che si deve pagare – in primo luogo la energia di cui si deve disporre - per produrre una particella così pesante.

Inoltre lo stato finale della coppia (top)+(anti-top) è molto complesso. Assumendo valido il MS, i due top decadono in  $(b+W^+) + (\text{antib}+W^-)$ . Successivamente, i due  $W$  decadono indipendentemente in  $e+\text{neutrino}$ , oppure in  $\mu+\text{neutrino}$ , oppure nel leptone pesante  $\tau+\text{neutrino}$ , oppure in due quark leggeri. Lo stato finale contiene comunque 6 osservabili fisiche generate nel decadimento dei due top, che sono però di natura diversa a seconda del decadimento scelto dai bosoni  $W$ . Sono presenti a volte sei getti adronici, a volte leptoni carichi e neutrini che non sono direttamente rivelabili. Sono presenti sempre due quark  $b$ , che sono accompagnati a volte da nessun'altro quark, a volte da due, a volte da quattro quark leggeri. La figura 6 illustra la relativa frequenza delle varie configurazioni dello stato finale. Tutti i quark di decadimento sono prodotti con grande energia e si manifestano nel laboratorio come getti di particelle collimati attorno alla direzione del quark primario. Il problema sperimentale consiste pertanto nel misurare nello stesso evento diverse combinazioni di elettroni, muoni, leptoni  $\tau$ , svariati getti adronici, e nel rilevare in qualche modo la presenza di neutrini.

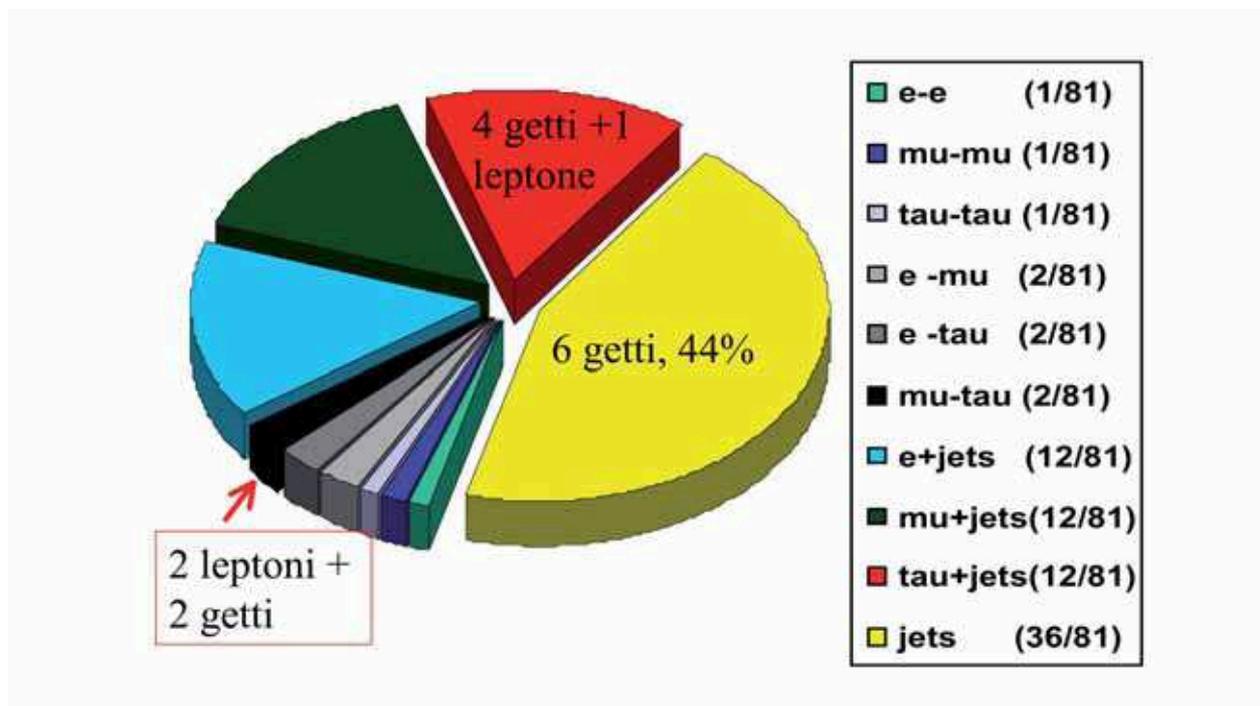


Fig. 6

Illustrazione della frequenza delle configurazioni dello stato finale delle coppie di quark top secondo il Modello Standard.

**Come scoprire un quark top così pesante**

Il rivelatore CDF misura le collisioni protone-antiprotone al Tevatron di Fermilab, la cui configurazione nel run1 è mostrata in figura 7. Il rivelatore è stato progettato per misurare direzione ed energia dei getti adronici, degli elettroni, dei muoni, e anche indirettamente (mediante il

bilancio dei flussi energia osservati nel piano trasverso ai fasci) l'impulso trasverso portato via dai neutrini. Tutte le diverse segnature delle coppie di top (salvo i decadimenti in leptoni tau, che hanno richiesto studi più lunghi e che sono stati identificati solo in seguito) sono state sfruttate per la scoperta. Uno schema di CDF come era nel run1 è mostrato in figura 8.

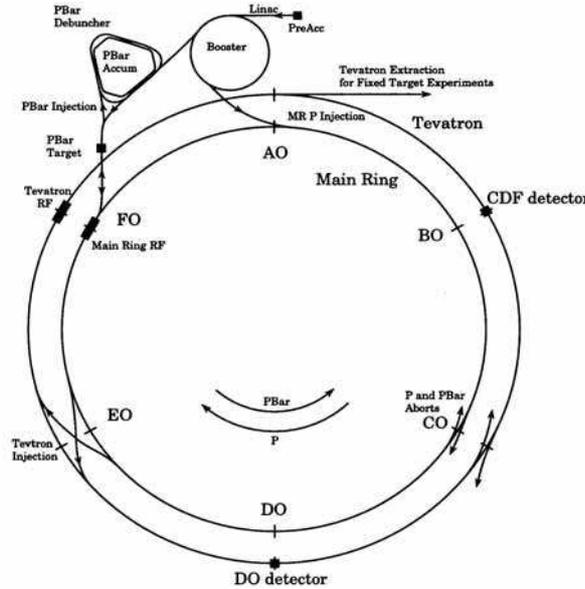


Figure 2.1: The Tevatron collider and the system of pre-accelerators.

Fig. 7

Schema del complesso di acceleratori di Fermilab nel run1, con la sorgente di antiprotoni ed il pre-acceleratore main ring nello stesso tunnel del Tevatron

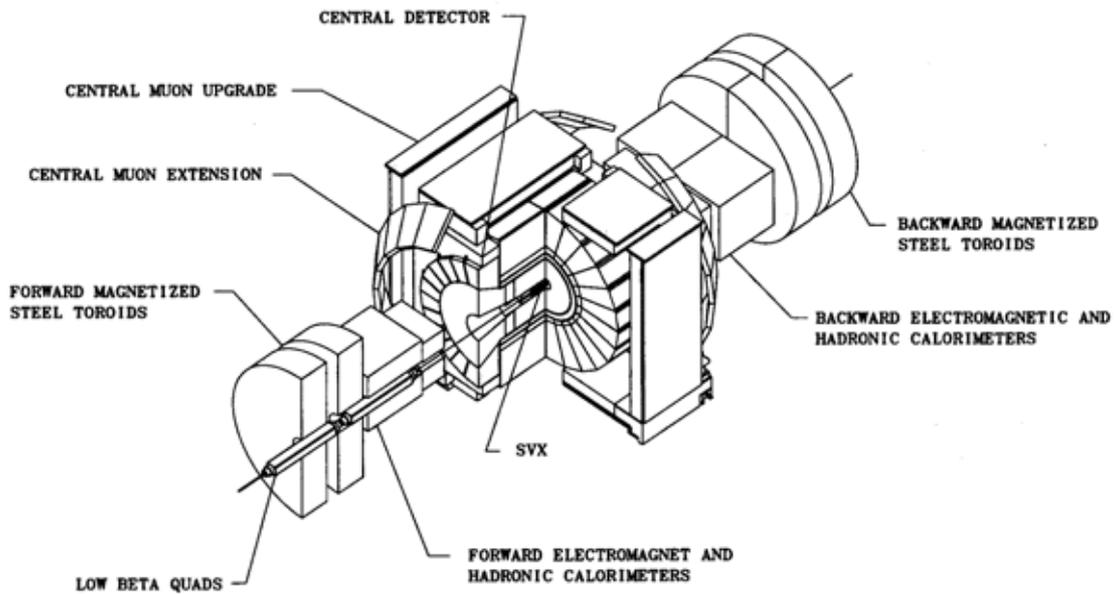


Fig. 8

Il rivelatore CDF durante il Run 1

La massa del top è stata misurata al meglio nel canale con quattro getti adronici, un elettrone o un muone, ed un neutrino. In questo canale tutti i 6 oggetti in cui decade la coppia sono misurabili, incluso il momento trasverso del neutrino tramite il bilancio della energia trasversa osservata nei calorimetri, come detto sopra. Nella ricostruzione di questi eventi una seria complicazione ("fondo combinatorio") è causata dal fatto che non si sa a priori se attribuire un getto al decadimento di un W oppure al precedente decadimento di un top. Tuttavia, i getti generati nel decadimento del top sono dovuti a quark b, quelli generati nel decadimento del W sono dovuti a quark leggeri. Le tracce lasciate dai prodotti di decadimento degli adroni contenenti un quark b provengono spesso da una distanza dell'ordine del millimetro dal vertice di genesi dell'evento. Questo accade perché la vita media degli adroni contenenti un quark b è sufficientemente lunga, ed è un segnale importante per separare il fondo perché la vita media degli adroni composti esclusivamente da quark leggeri è più breve per cui i loro prodotti di decadimento appaiono normalmente provenire dal vertice primario. CDF ha potuto distinguere efficientemente i getti di b sfruttando questa proprietà. Un prezioso rivelatore progettato dal gruppo italiano, il Silicon Vertex Detector (SVX), ha permesso di ottenere la necessaria precisione nel tracciamento delle particelle cariche attorno al vertice di interazione. Questo rivelatore è stato un pezzo di bravura, un "fiore all'occhiello" di CDF e del gruppo italiano.

### La nascita del collider detector a fermilab

Nel settembre 1979 Paolo Giromini ed io partecipammo alla Lepton-Photon Conference, una importante conferenza di fisica delle particelle che quell'anno si tenne a Fermilab. Nelle conversazioni a latere alcuni colleghi americani ci fecero molta pubblicità sulle prospettive aperte dal futuro collisionatore protone-antiprotone del laboratorio e ci sollecitarono a collaborare ad un esperimento che si stava cominciando a progettare. Paolo ed io eravamo in quel momento delusi dallo stallo in cui languiva da due anni il progetto ALA/MDA, che prevedeva la costruzione a Frascati di un anello di collisione  $e^+e^-$  di energia di poco superiore al GeV e di un apparato sperimentale dedicato allo studio di possibili nuove

risonanze adroniche che erano state intraviste in quella regione di energia. Ci sembrò che dedicandoci a quella nuova iniziativa avremmo trovato un modo costruttivo di uscire dallo stallo. Al ritorno in Italia ci impegnammo alla organizzazione di un gruppo dei LNF e di uno di Pisa per collaborare a CDF.

Il 13 dicembre 1979 io ebbi al CERN un incontro formale con Robert Diebold ed Alvin Tollestrup nel quale dichiarai il nostro interesse a collaborare. Si concordò che l'esperimento sarebbe stato progettato e costruito da una collaborazione fra USA, Giappone ed Italia. Ci proponemmo di ricercare al nostro rientro i necessari consensi nei tre Paesi coinvolti. Attorno alla fine dell'anno Alvin mi telefonò da Fermilab facendomi sapere che a Fermilab ed in Giappone c'era pieno consenso a collaborare con noi.

Anche il Gruppo1 dell'INFN, pur esprimendo disappunto per il contestuale abbandono del progetto ALA/MDA e perplessità perché l'esperimento appariva in forte ritardo rispetto agli esperimenti UA1 ed UA2 che nel 1982 avrebbero già scoperto i bosoni intermedi W e Z al collisionatore SpS del CERN, approvò il progetto. Fu fissato un limite totale di spesa per l'intero esperimento di 1.5 miliardi di lire, che doveva in seguito essere dimenticato e largamente superato.

A Frascati si formò in pochi giorni un gruppo con Sergio Bertolucci e Marco Cordelli. A Pisa il primo a farsi avanti fu Raffaele Del Fabbro, al quale seguirono nei primi mesi del 1980 Aldo Menzione, Luciano Ristori, Angelo Scribano, ed in estate del 1980 Franco Bedeschi. Per oltre un anno i fisici dei due gruppi lavorarono in simbiosi e a pieno ritmo per definire un rivelatore e per calcolarne le prestazioni. Nel 1981 fu scritto il primo documento di progetto del rivelatore, il "CDF Design Report". Il gruppo Frascati/Pisa era già diventato molto forte.

### Le tappe di cdf verso la scoperta del quark top

La strada percorsa da CDF verso la scoperta del top può essere contrassegnata da alcune tappe particolarmente significative.

Nel 1981, il CDF Design Report, con la firma di 56 fisici americani, 15 giapponesi, 16 italiani di Frascati e Pisa. Il gruppo di Frascati comprendeva S. Bertolucci, M. Cordelli, P. Giromini e P. Sermoneta.

Nel 1985, le prime collisioni che fornirono la

“prova di esistenza” della macchina.

Stefano Miscetti distinse ed analizzò per la sua tesi di laurea i soli 24(!) eventi che furono osservati in quel run.

Nel 1988 - 1989 si ebbe il primo turno di presa dati alla energia nel centro di massa di 1.8 TeV, che fu chiamato “Run0”. durante quel run CDF era il solo esperimento al Tevatron. Fu integrata una luminosità di  $\sim 4.7 \text{ pb}^{-1}$ .

Nel 1992 - 1996 si ebbe il “Run1” a 1.8 TeV. Al tracciatore di CDF era stato aggiunto il rivelatore di vertice SVX capace di misurare il parametro di impatto delle tracce cariche rispetto al vertice di interazione con la precisione di  $\sim 15 \mu\text{m}$ , che giocò un ruolo di primaria importanza nella scoperta del top. In quel run fu integrata una luminosità di  $\sim 107 \text{ pb}^{-1}$ . Si era aggiunto ed entrava in concorrenza con CDF un nuovo esperimento che utilizzava anch'esso un rivelatore a copertura totale installato attorno al punto di incrocio D0 del Tevatron.

### I contributi italiani alla costruzione del rivelatore

Il rivelatore CDF del Run1 è costituito da un insieme di camere traccianti a simmetria cilindrica contenuto in un solenoide che crea un campo magnetico parallelo ai fasci. Il solenoide è circondato da calorimetri che a loro volta sono seguiti da rivelatori di muoni sia a grandi angoli che in avanti.

Le principali componenti del rivelatore cui hanno contribuito gli italiani sono stati i calorimetri adronici centrali, la elettronica di trigger, i contatori di scintillazione per il trigger dei muoni, ed il tracciatore di vertice di rivelatori al silicio. Inoltre sono stati realizzati due spettrometri inseriti nel tubo della macchina attorno ai fasci uscenti per la misura dello scattering elastico e diffrattivo e della sezione d'urto totale. Fisici di Frascati e di Pisa, con Paolo Giromini e Stefano Belforte in posizione leader, si sono impegnati a lungo in questa rilevante impresa. Gli spettrometri sono stati progettati e costruiti in collaborazione con le università di Rockefeller e di Tsukuba. Oltre allo specifico programma di fisica con essi realizzato, le misure compiute con gli spettrometri in avanti sono servite a calibrare la luminosità del Tevatron.

La parte “viva” dei calorimetri adronici degli archi centrali e delle pareti di CDF è stata pro-

gettata e costruita da Frascati e Pisa in stretta collaborazione. In questa impresa Paolo Giromini ha svolto un ruolo primario, e contributi di grande rilievo sono stati dati da Sergio Bertolucci, Franco Cervelli, Aldo Menzione, e Angelo Scribano. Sono stati prodotti gli scintillatori, le guide di luce, gli alimentatori controllati da calcolatore ed il sistema di calibrazione mediante luce laser distribuita a ciascun fotomoltiplicatore. Il calorimetro è stato realizzato in collaborazione con Purdue, che costruì la struttura in ferro, con Argonne che costruì la parte frontale elettromagnetica, e con Fermilab che produsse i disegni di progetto e curò l'assemblaggio e l'installazione del calorimetro su CDF. I quattro archi del calorimetro centrale comprendono ciascuno 12 spicchi azimutali con 8 torri proiettive. Furono costruiti 50 spicchi, di cui due utilizzati per calibrazioni su fasci di prova. La figura 9 mostra uno degli spicchi, con il marchio Purdue – INFN – ANL - Fermilab in evidenza. La figura 10 mostra un tecnico di Frascati impegnato nel controllo delle guide di luce di uno spicchio del calorimetro. La figura 11 mostra alcuni fisici italiani impegnati in una sala di Fermilab nella messa in opera dei fotomoltiplicatori. 48 spicchi vennero montati a formare 4 archi di  $180^\circ$  circondanti a sinistra e a destra il solenoide dell'esperimento.

I calorimetri delle pareti erano di struttura simile e di dimensioni più modeste, con il solo settore adronico. L'intera parte viva di questi fu costruita dagli italiani, con la responsabilità primaria assegnata al gruppo di Pisa.

La luce prodotta nelle lastre di scintillatore era raccolta dai lati e spostata in frequenza da sbarrette di plastica opportunamente drogato. Essa era poi trasportata all'esterno da guide di luce di plexiglass. Le guide di luce delle torri calorimetriche centrali, ingegnosamente concepite da Paolo Giromini, avevano una struttura complessa a molte “dita” al fine di assicurare una raccolta pressoché uniforme della luce dal corpo delle torri. Il taglio e l'assemblaggio delle guide ha costituito una impresa di straordinaria bravura, realizzata a Frascati sotto la guida di Sergio Bertolucci. La figura 12 mostra una delle guide in costruzione a Frascati. La figura 13 mostra il rivelatore centrale di CDF nella sala montaggio di Fermilab pronto per il run di prova del 1985. Le tre bandiere appese al soffitto della sala onorano i tre Paesi costruttori, che a quel tempo erano i soli in CDF.

Luciano Ristori, Paola Giannetti e Mauro Del-



Fig. 9

Uno specchio del calorimetro centrale di CDF.



Fig. 10

Un tecnico di Frascati al lavoro per la messa in opera delle guide di luce del calorimetro adronico centrale



Fig. 11

Fisici italiani al lavoro a Fermilab per la installazione dei fotomoltiplicatori del calorimetro adronico centrale

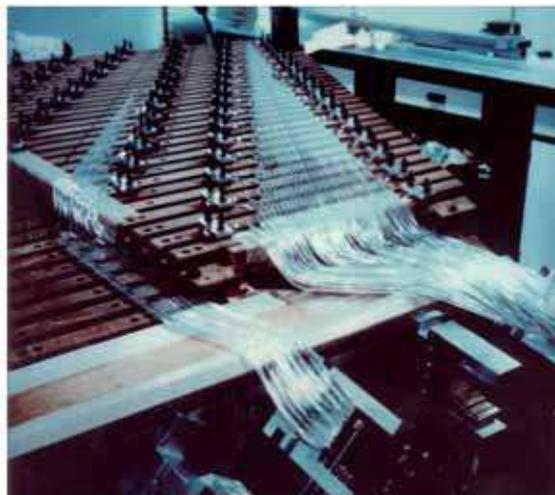


Fig. 12

Fabbricazione a Frascati delle guide di luce del calorimetro adronico centrale

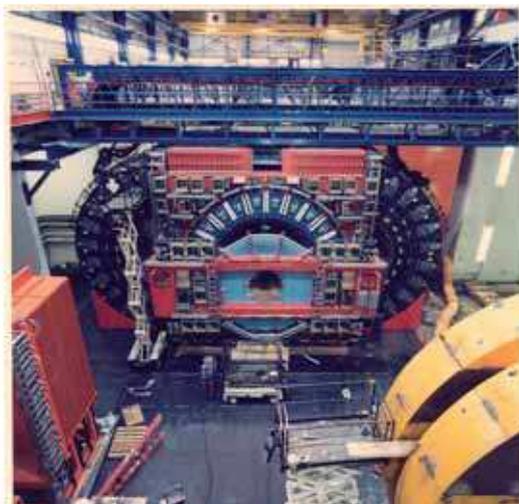


Fig. 13

Il corpo centrale di CDF nel 1985

l'Orso con il contributo di altri fisici pisani hanno progettato e costruito elementi della elettronica di trigger, collaborando con i gruppi di Fermilab e di Chicago che aveva la responsabilità primaria del progetto. Le lastre di plastico scintillatore utilizzate nel trigger dei muoni, oltre 500 in totale realizzate in collaborazione con Dubna, sono stati costruite a Pisa sotto la supervisione di Angelo Scribano e di Franco Cervelli.

La quantità di materiale lavorato e preparato in Italia per la realizzazione dei calorimetri adronici e dei contatori dei muoni e di altre parti di CDF è stata straordinaria. Fra il 1983 ed il 1985, ben 5 containers sono partiti da Frascati e da Pisa e spediti via nave da Livorno agli USA per proseguire fino a Fermilab. Enorme è stato anche il lavoro necessario per il montaggio di tutti questi manufatti. I tecnici delle due Unità operative INFN si sono prodigati con encomiabile dedizione. Il supporto del personale amministrativo è stato all'altezza dei "tempi eroici" dell'INFN. Al di là dell'intelligente lavoro fatto per sveltire acquisti, consegne e spedizioni, più di uno dei membri del personale amministrativo delle due Unità Operative dell'INFN si sono rimboccati le mani e hanno aiutato i fisici ed i tecnici nella rifinitura e nella installazione dei rivelatori.

Dopo il successo di CDF dimostrato con il Run0 del 1988 - 1989 il contingente italiano si è progressivamente rafforzato con l'ingresso nell'esperimento di gruppi di altre Università. Un gruppo di Padova è entrato nella collaborazione nel 1990 ed un gruppo di Bologna nel 1992. Questi gruppi hanno partecipato a pieno titolo alla scoperta del top. Successivamente un gruppo di Trieste/Udine è entrato nel 1997 ed un gruppo di Roma nel 1999.

Un balzo in avanti nelle prestazioni dell'esperimento, in particolare nelle misure di fisica dei quark pesanti e specificamente nella ricerca del quark top, è stato fatto nel 1992 con l'installazione al centro delle camere traccianti del rivelatore SVX (per Silicon Vertex Detector) comprendente quattro strati di sensori con elettrodi stampati su sostrato di silicio semiconduttore. Questo è stato il primo "rivelatore di vertice" che ha funzionato su un collisionatore adronico. Tutti gli esperimenti ai collisionatori ne hanno poi impiegato versioni adattate e perfezionate.

Lo schema di principio di SVX era stato inserito per insistenza degli italiani, con Aldo Menzione prima forza trainante, già nel Design Report del 1981.

Giorgio Chiarelli, a quel tempo mio giovane laureando, presentò a Pisa il 27 marzo 1995 la sua tesi di Laurea discutendo il potenziale di SVX per la identificazione di quark pesanti e la scoperta di nuove particelle al Tevatron (Ref. 8). Gli italiani reclamizzarono il progetto con relazioni a Conferenze (Ref. 9), e con la approvazione e l'incoraggiamento del INFN presentarono una proposta dettagliata alla Collaborazione nel 1985. Dopo anni di discussioni e perplessità, la proposta fu accettata dal DOE nel 1988. Fu steso un "Memorandum of Understanding" fra Pisa, Fermilab ed il Lawrence Radiation Laboratory di Berkeley per la realizzazione del progetto, con Aldo Menzione come coordinatore. La responsabilità della produzione dei moduli di rivelatori al silicio e della elettronica di preamplificazione fu affidata a Franco Bedeschi. La costruzione del rivelatore a Fermilab durò alcuni anni e l'installazione su CDF avvenne nel 1991.

Lo SVX era diviso in due settori longitudinali lunghi ciascuno ~ 25 cm, uno dei quali è mostrato in fotografia nella figura 14. Attualmente, una di queste unità è conservata in bacheca al Dipartimento di Fisica della Università di Pisa, la seconda è in mostra nel museo del grattacielo di Fermilab.

### La "evidence" e la "observation" del quark top

Nel 1994, dopo aver integrato  $19 \text{ pb}^{-1}$ , CDF annunciò la presumibile esistenza del nuovo quark basandosi sulla osservazione di un numero anomalo di eventi con le configurazioni tipiche dei decadimenti di una coppia top-antitop. Uno i questi eventi, candidato del canale con un solo leptone, è mostrato in figura 15, come ricostruito dall'informazione del sistema di tracciatura. Eventi come questo illustrano bene le prestazioni del rivelatore di vertice SVX' di seconda generazione, a cui il gruppo di Padova entrato in CDF nel 1990 aveva dato un importante contributo. D0 dichiarò di non avere dati sufficienti per confermare o contraddire CDF. Nel canale dileptonico furono osservati 2 eventi a fronte di un fondo previsto di 0.54 eventi. Nel canale con un solo leptone e 3 o 4 getti furono osservati 13 getti con vertici secondari attribuibili al decadimento di adroni contenenti il quark b, contro i 5.4 attesi dal fondo. La figura 16 mostra il numero dei vertici secondari nei dati confrontato con le attese per il fondo. La probabilità combinata

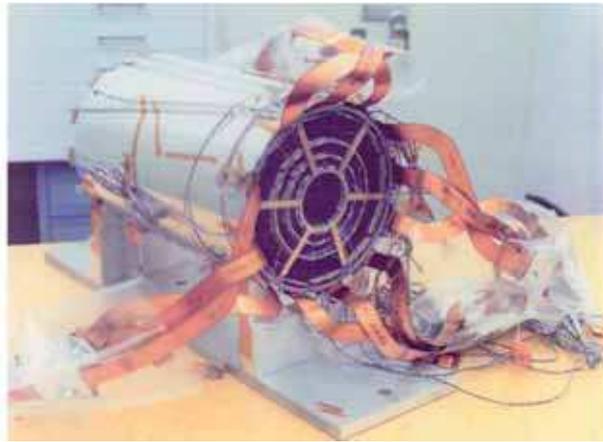


Fig. 14  
Fotografia di una metà del rivelatore SVX del Run1

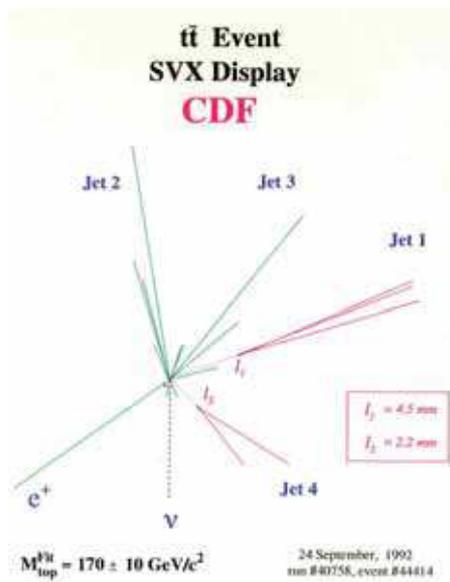


Fig. 15  
Un probabile evento top-antitop nel canale con un solo leptone

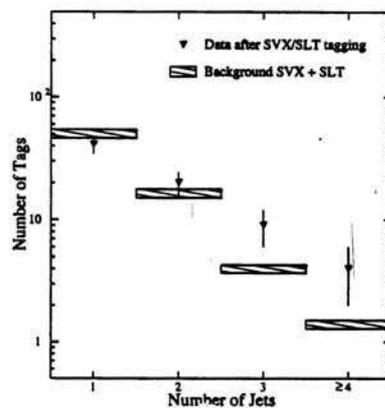


Figure 34: The sum of CDF SVX and soft lepton tags observed in W + jets data compared with background estimates. The three-jet and four-jet bins are the  $t\bar{t}$  signal region.

Fig. 16  
Numero di vertici secondari negli eventi di tipo leptonic singolo in funzione del numero di getti nell'evento, confrontati con il fondo simulato

che queste osservazioni fossero dovute ad una fluttuazione del fondo era del 0.26%. Questo dava al risultato il significato di una forte indicazione – “evidenza” - ma non era abbastanza per una sicura scoperta.

Peraltro, 7 eventi con un leptone e 4 getti contenevano informazione sufficiente per ricostruire completamente la coppia top-antitop e misurare la massa del nuovo quark. La loro distribuzione indicava un chiaro picco (figura 17), la cui analisi fornì come valore della massa del quark top  $m_t = 174 \pm 17 \text{ GeV}/c^2$  (Ref. 10).

Nella stessa giornata in cui fu annunciata in un seminario a Fermilab la evidenza del nuovo quark e fu spedita la relativa lettera al Physical Review Letters, fu resa pubblica una nota interna della Università di Pisa (figura 18) nella quale si descrive la evidenza per la esistenza di un quark top pesante ottenuta da una analisi puramente cinematica degli eventi candidati di tipo leptonic singolo fatta da un gruppo italiano. Questo risultato era stato disponibile da lungo tempo, ma la Collaborazione ritenne che il primo annuncio su una rivista scientifica ufficiale

dovesse necessariamente basarsi su indicazioni fornite dai vertici secondari. I risultati della analisi cinematica, estesa alla maggiore statistica accumulata nel frattempo, furono pubblicati nel 1995 (Ref. 11).

Nella primavera del 1995, dopo aver integrato  $67 \text{ pb}^{-1}$ , CDF aveva raccolto un numero sufficiente di eventi di tipo top per poter annunciare definitivamente la scoperta. Lo stesso fece D0. La massa del top fu misurata in un campione di 19 eventi, e risultò  $m_t = 176 \pm 13 \text{ GeV}/c^2$  (Ref. 12), del tutto consistente con il valore trovato l'anno precedente. La distribuzione in massa trovata da CDF è mostrata in figura 19. D0 trovò  $m_t = 199 \pm 20$  (errore statistico)  $\pm 22$  (errore sistematico)  $\text{GeV}/c^2$ . Gli autori italiani di questa pubblicazione sono stati 8 del gruppo di Bologna guidato da Franco Rimondi, 5 del gruppo di Frascati guidato da Paolo Giromini, 11 del gruppo di Padova guidato da Dario Bisello, e 35 del gruppo di Pisa guidato da Aldo Menzione. Allora come in seguito il numero di fisici dell'INFN si è mantenuto costantemente attorno al 13% dei membri della Collaborazione.

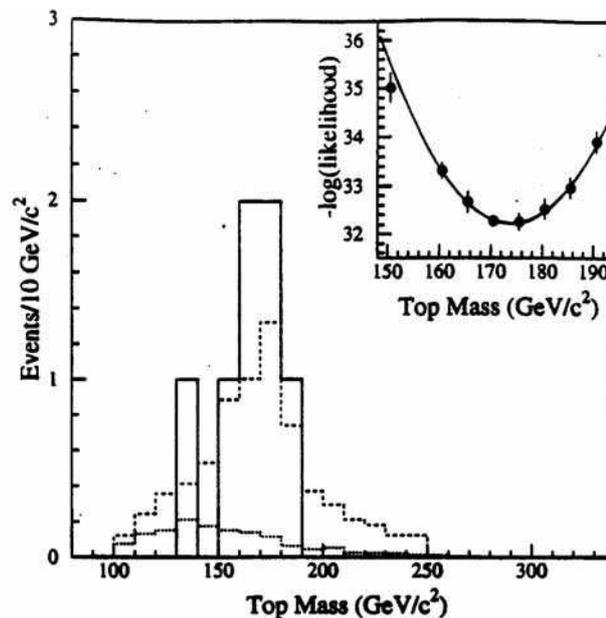


Figure 35: CDF top mass distribution (solid histogram) compared with the W + jets background prediction (dots) and the predicted signal+background distribution normalized to the data for  $m_t = 175 \text{ GeV}$  (dashed). The inset shows the likelihood fit results.

Fig. 17

Spettro di massa del quark top negli eventi ricostruibili del campione della “evidence”.

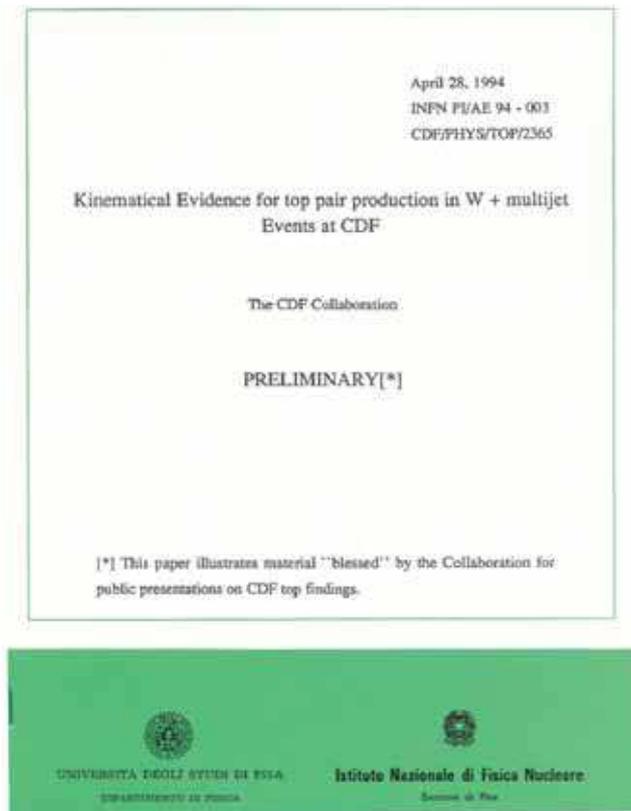


Fig. 18

La nota interna della Università di Pisa pubblicata nello stesso giorno dell’annuncio della “Evidence” a Fermilab.

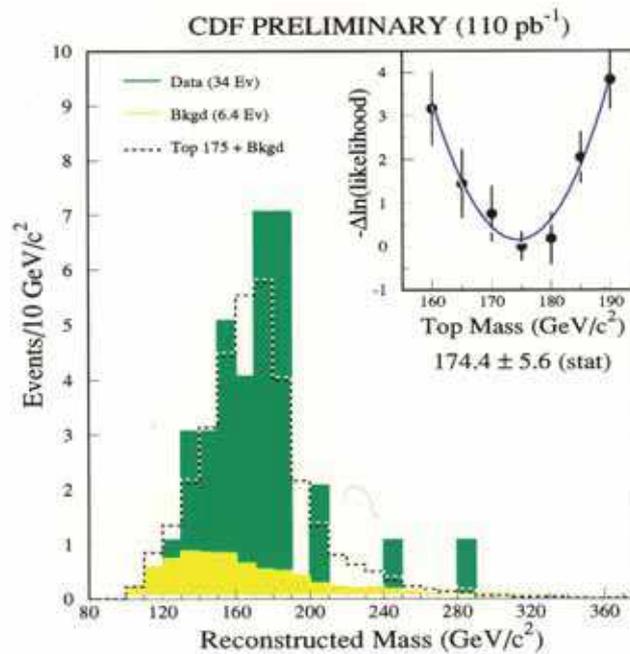


Fig. 19

La massa del top ricostruita al tempo della “Observation”. Il fit indicò  $M_{top} = 175.9 \pm 6.9 \text{ GeV}/c^2$ .

## I contributi italiani alla analisi dati per la scoperta del top

Il contributo intellettuale dei fisici dell'INFN all'esperimento è stato enorme e non gli si può rendere giustizia indicando le attività in un particolare settore di studi. Specificamente per la ricerca del top il gruppo italiano è stato impegnato in molteplici studi di eventi simulati, nello studio di processi fisici che potevano generare un fondo nel campione di eventi candidati top, e nella ricerca diretta del segnale. Fra le analisi dove l'impegno italiano nel periodo anteriore al 1995 è stato più intenso citerò lo sviluppo di algoritmi per la individuazione dei vertici secondari nei getti da quark beauty ed del software di ricostruzione delle tracce in SVX, la calibrazione della energia dei getti adronici misurati nei calorimetri, la ricerca degli eventi "candidati top" contenenti due leptoni e due getti, e la analisi cinematica degli eventi candidati top contenenti un solo leptone e tre o più getti.

Franco Bedeschi fu il supervisore di tesi di dottorato di Simone Dell'Agnello e di laurea di Giovanni Punzi, con i quali assieme ad alcuni altri giovani pisani sviluppò il primo algoritmo capace di segnalare vertici secondari nei getti, detto "algoritmo D- $\phi$ ". Questo gruppo scrisse tutto il software per la ricostruzione delle tracce in SVX. Nella sua tesi di dottorato Simone Dell'Agnello presentò nell'autunno del 1994 i risultati della ricerca del top nel canale con un elettrone o un muone utilizzando l'algoritmo D- $\phi$  per la selezione dei getti da quark b. Assieme a Giorgio Chiarelli e al giovanissimo Francesco Tartarelli, Franco Bedeschi collaborò poi attivamente allo sviluppo del codice SECVTX che divenne il codice standard per la ricerca dei vertici secondari di CDF.

Il gruppo di Pisa si è a lungo impegnato nella selezione dei getti adronici e nella determinazione della loro energia e della loro localizzazione. La corretta valutazione della energia dei getti gioca un ruolo essenziale nello studio degli eventi di produzione di quark top.

A Pisa Hans Grassmann applicò alla analisi dei dati di CDF un metodo simile a quello già utilizzato da UA1 nella ricerca del top al collisionatore SpS, nel quale si sfruttava la proprietà di un top pesante di decadere in getti energetici a grande angolo. sotto la sua guida e con la mia supervisione, Marina Cobal ha studiato una semplice funzione scalare della energia dei getti con un forte potere discriminante degli eventi di

top dal fondo. la prima evidenza della esistenza di una componente di top nei dati di CDF, disponibile già nel 1993, è apparsa nella sua tesi di dottorato nel marzo del 1994. i risultati della analisi cinematica completa sono apparsi in una delle prime pubblicazioni di CDF sulla scoperta del top (ref. 8). Infine, la ricerca di eventi di top nel canale con due leptoni è stata l'argomento della tesi di dottorato che Sandra Leone ha presentato nell'autunno del 1994, anch'essa sotto la guida di Hans Grassmann e la mia supervisione.

## Il contributo finanziario dell'InfN

Il contributo finanziario alla costruzione del rivelatore è stato valutato in 6.920.000 dollari nel periodo 1980-1995, pari al 12% del costo totale di costruzione. Tuttavia, va rilevato che il valore di questo contributo può essere stimato solo approssimativamente per molti motivi. Il costo di materiali e il valore dei manufatti nel mercato americano sono stati spesso diversi da quello nel mercato italiano. il cambio della lira rispetto al dollaro ha molto fluttuato. Infine, la contabilità in molte occasioni non è stata accurata. Dopo la scoperta del quark top, dal 1996 in poi l'INFN ha fornito un contributo valutabile in 1 milione di euro per aggiunte e miglioramenti del rivelatore in vista del run2, e ha continuato a finanziare la attività dei gruppi italiani a CDF ad un livello di circa 2 milioni di euro/anno. Questo finanziamento è sceso a circa 1.5 milioni negli ultimi anni, dopo che i lavori per nuove costruzioni erano terminati.

## Conclusioni

La straordinaria massa del quark top imporrà in futuro questa particella, assieme ai bosoni W e Z, come uno dei segnali da cui partire per approfondire lo studio delle proprietà delle interazioni subnucleari. Tramite studi sempre più accurati degli eventi di produzione di quark top e di eventi simili, CDF coltiva la speranza di scoprire tracce del meccanismo che ha dato massa ai bosoni intermedi ed ai quark. Questo appare oggi come un passo decisivo per diradare uno dei molti misteri che sono ancora insiti nel modello standard delle interazioni fondamentali. A questo sforzo gli italiani di CDF hanno dato e continuano a dare, con i fisici dei Laboratori Nazionali di Frascati in prima fila, un contributo decisivo.

**APPENDICE**

Fisici dell'INFN autori della pubblicazione di Ref. 9:

Dipartimento di Fisica e Sezione di Bologna dell'INFN:

Luca Breccia, Milena Deninno, Irene Fiori, Carmine Pagliarone, Giovanni Maria Piacentino, Franco Rimondi, Stefano Zucchelli.

Laboratori Nazionali di Frascati dell'INFN:

Sergio Bertolucci, Marco Cordelli, Paolo Giromini, Stefano Miscetti, Andrea Sansoni.

Dipartimento di Fisica e Sezione di Padova dell'INFN:

Patrizia Azzi, Nicola Bacchetta, Dario Bisello, Giovanni Busetto, Andrea Castro, Michele Gallinaro, Maurizio Loreti, Luisa Pescara, Antonio Ribon, Luca Stanco, Jeff Wyss.

Dipartimento di Fisica, Scuola Normale Superiore e Sezione di Pisa dell'INFN:

Roberto Amendolia, Paolo Bartalini, Franco Bedeschi, Stefano Belforte, Valeria Bolognesi, Franco Cervelli, Giorgio Chiarelli, Marina Cobal, Simone Dell'Agnello, Mauro Dell'Orso, Simone Donati, Guido Gagliardi, Stefano Galeotti, Paola Giannetti, Giovanni Grieco, Marco Incagli, Nicola Labanca, Sandra Leone, Donatella Lucchesi, Michelangelo Mangano, Aldo Menzione, Emilio Meschi, Riccardo Paoletti, Giovanni Pauletta, Giovanni Punzi, Luciano Ristori, Lorenzo Santi, Gianfranco Sciacca, Angelo Scribano, Arnaldo Stefanini, Francesco Tartarelli, Nicola Turini, Anna Maria Zanetti, Francesco Zetti.

**Referenze**

- 1, J.H.Christenson et al., Phys. Rev. D8, 2016 (1973)
- 2, J.J.Aubert et al., Phys.Rev.Lett.33, 1404 (1974)
- 3, J.E.Augustin et al., Phys.Rev.Lett.33, 1406, (1974)
- 4, C.Bacci et al., Phys.Rev.Lett. 33, 1408, (1974)
- 5, S.W.Herb et al., Phys.Rev.Lett.39, 252, (1977)
- 7, G.Arnison et al., Phys.Letters B147, 493, (1984)
- 8, G. Chiarelli, "Detection of Heavy Flavors and New Particles at the Tevatron Collider", University of Pisa Master Thesis and INFN PI/AE/85/2, March 27, 1985
- 9, F. Bedeschi, et al., INFN Sezione di Pisa, " A Silicon Vertex Detector for CDF", IEEE Nuclear Science Symposium, San Francisco, October 1985
- 10, The CDF Collaboration, Phys.Rev.Lett.73, 225, (1994), Phys.Rev.50D, 2966, (1994)
- 11, The CDF Collaboration, Phys.Rev.51D, 4623 (1995)
- 12, The CDF Collaboration, Phys.Rev.Lett.74, 2626 (1995)