

Il sogno dei pionieri.



Signori del silicio.

Siamo qui oggi a celebrare Ettore e Marco. Il loro contributo alla costruzione del tracciatore di CMS è stato essenziale. È grazie alle splendide performance del suo tracciatore al silicio che CMS ha potuto scoprire il bosone di Higgs ed effettuare una quantità impressionante di misure di fisica.

Come spesso succede in imprese così complesse, alcuni ricercatori, è capitato a me, acquistano ruoli più visibili e hanno premi e riconoscimenti. Molti altri, per motivi spesso fortuiti, rimangono nell'ombra e spesso non ricevono i riconoscimenti che avrebbero ampiamente meritato per il loro lavoro sul campo.

Ma chi ha vissuto per intero quell'esperienza, chi ha condiviso ansie e preoccupazioni che ci hanno accompagnato per decenni, non dimentica. Siamo qui oggi per ricordare quei momenti, anche a beneficio dei più giovani.

Questa storia è cominciata ~ 50 anni fa.

Per capire meglio le sfide che Ettore e Marco hanno attraversato bisogna fare un salto indietro nel tempo di quasi cinquant'anni.



Lorenzo Foà

(Firenze 1937- Pisa 2014)

Siamo a Pisa intorno alla metà degli anni '70.

Un giovane professore Lorenzo Foà non ha ancora quarant'anni quando raccoglie in FRAMM, un gruppo di giovani ricercatori molto estrosi.

The November revolution



B. Richter

11 November 1974: S. Ting and B. Richter annunciano la scoperta di una nuova, risonanza stretta e pesante: la **J/Psi**.

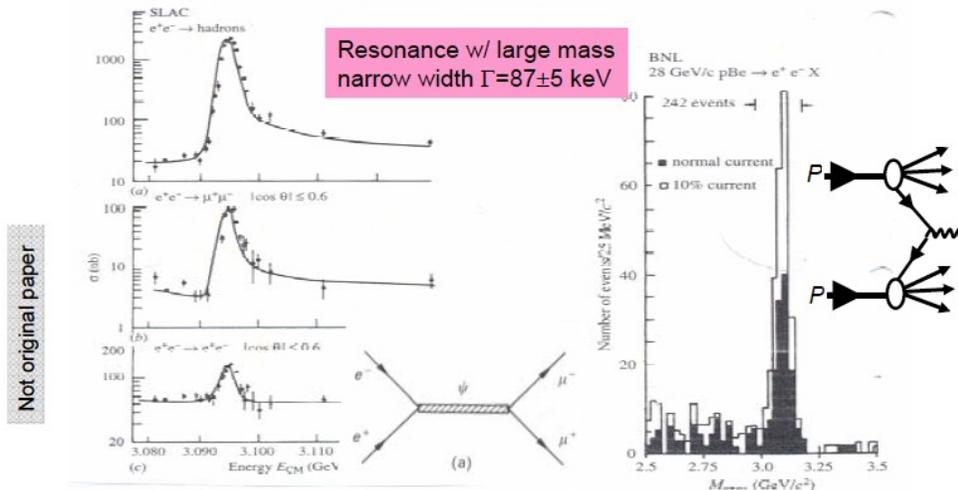
Entra in gioco un nuovo quark, il più pesante di tutti, estremamente instabile. Si scatena la corsa per misurarne tutte le caratteristiche.



S. Ting

SLAC $e^+e^- \rightarrow \text{hadrons}, e^+e^-, \mu^+\mu^-$

BNL $p(28 \text{ GeV}) + \text{Be} \rightarrow e^+e^- X$



Premio Nobel nel 1976

Firenze 12 Gennaio 2024

FRAMM

Pisa ha una forte tradizione di ricerca in fisica sperimentale ma l'approccio che Lorenzo incoraggia è molto aggressivo: costruiamo nuovi rivelatori e saremo capaci di misurare cose che nessuno prima di noi ha potuto osservare.

Lo spirito che si respira nel gruppo è di pensare “out-of-the-box”. Ciascuno è incoraggiato a produrre nuove idee e a sperimentarle direttamente producendo rivelatori con le proprie mani, detector fatti in casa.

Ettore, che si perfeziona alla Scuola Normale, diventa membro del gruppo, lavora assieme a Luciano Bosisio sotto la guida di Marcello Giorgi e a loro mi unisco anch'io qualche tempo dopo.



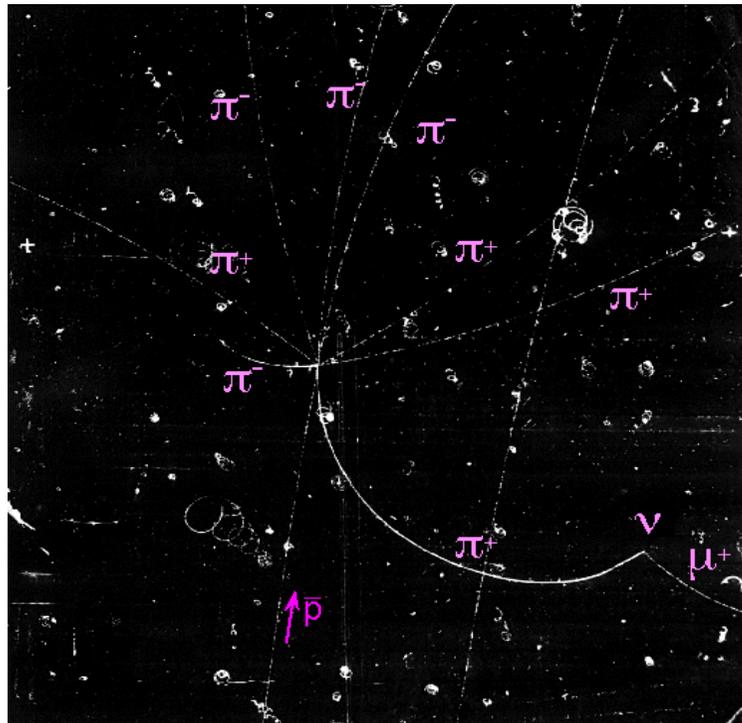
Aldo Menzione
(Massa 1943-Pisa 2013)



Marcello Giorgi

Gli anni '70s sono stati anche anni di sviluppi tecnici impressionanti nella fisica delle alte energie.

Le camere a bolle, come la gigantesca Gargamelle, erano rivelatori eccellenti nel visualizzare tracce e decadimenti con altissima precisione ma erano troppo lenti e avevano imponenti limiti di rate (qualche foto al secondo).

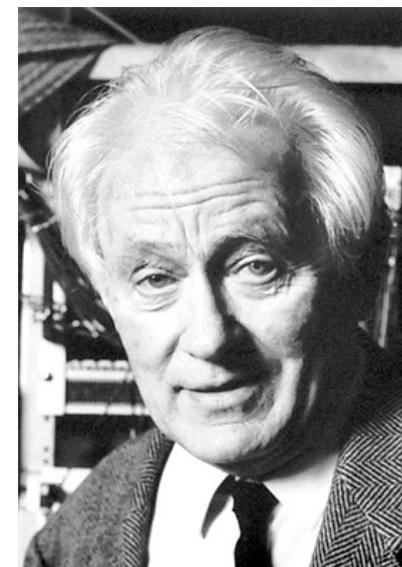
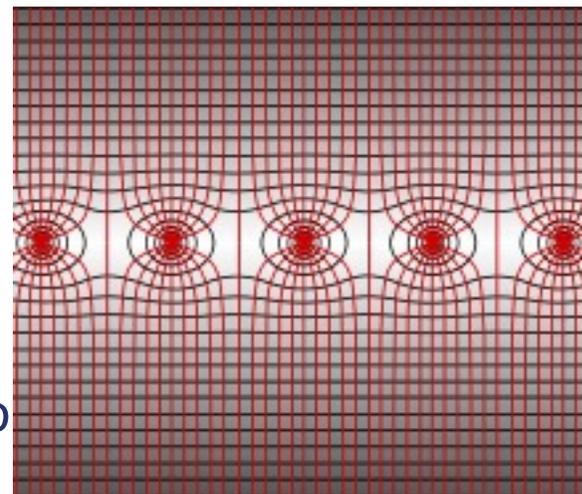


Multi Wire Proportional Chambers

Nel 1968 un fisico del CERN, George Charpak, sviluppa un nuovo rivelatore a gas: la MWPC, camera proporzionale a multifilo.

La tracce cariche di particelle ionizzanti possono essere visualizzate con $\sim 100\mu\text{m}$ di risoluzione ma sono possibili rate di acquisizione >1000 volte più elevati rispetto alle più avanzate camere a bolle.

È la nascita di tutti i moderni sistemi di tracciatura: camere e tubi a deriva, TPC, RPC etc. Il nuovo dispositivo ha un forte impatto anche sullo sviluppo dei moderni rivelatori a semiconduttore.



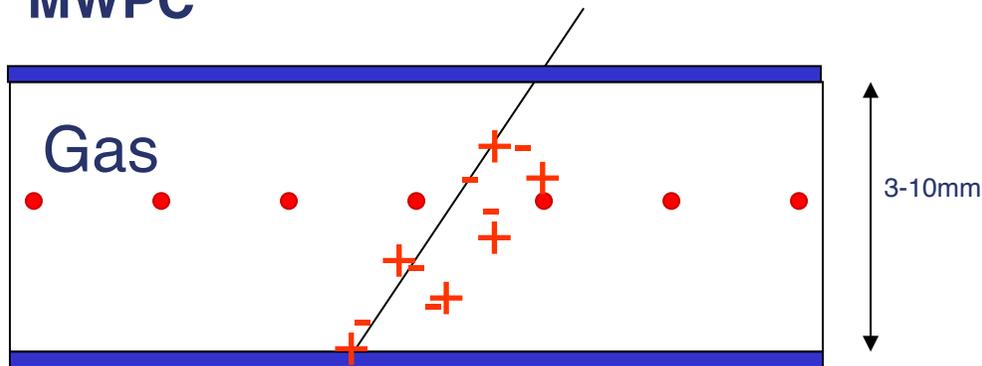
George Charpak, Premio Nobel nel 1992.

La folle idea di Marcello, Aldo e co.

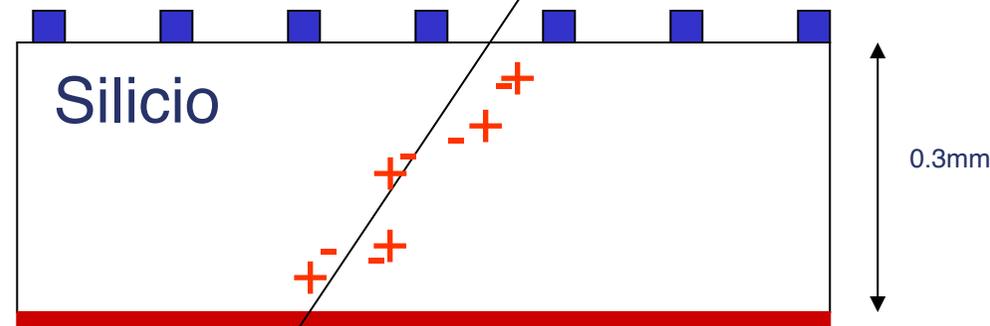
Riproducendo su piastrine di silicio la struttura tipica delle camere a filo si poteva migliorare la risoluzione di un fattore dieci. Nasceva l'attività pionieristica di sviluppo di una nuova generazione di dispositivi che avrebbe rivoluzionato il mondo della fisica delle alte energie.

A Pisa si cominciarono ad acquistare fette di silicio grezzo ad alta resistività, ci si organizzò con attrezzature per lapparle e lucidarle finemente. Vennero prodotte maschere rudimentali per la litografia e si misero in funzione vecchie pompe a vuoto per depositare oro e alluminio sulle superfici del wafer per realizzare diodi a barriera di superficie. E poi sviluppo dell'elettronica per leggere gli elettrodi, del daq per registrare i dati, attrezzature per test beam al Cern etc. **Tutto fatto in casa.**

MWPC



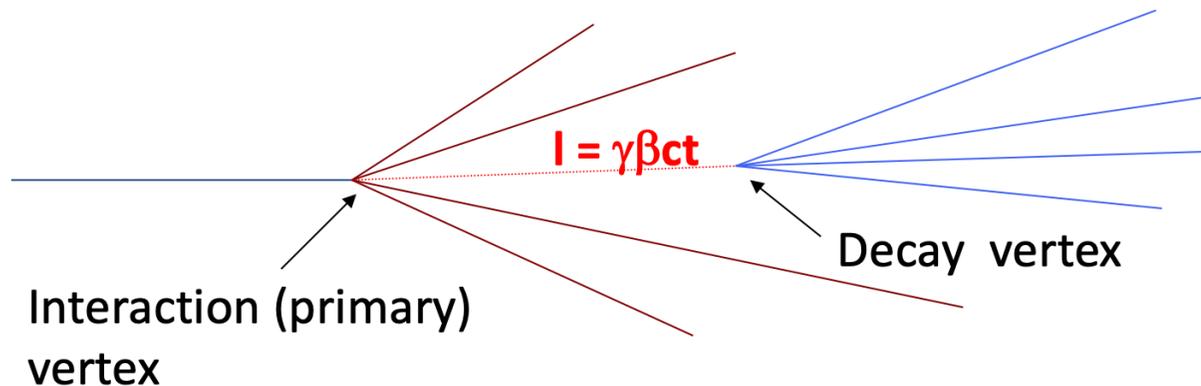
MESD Multi-Electrode Silicon Detector



Chiare motivazioni di fisica.

In High Energy Physics we want to reconstruct the particles produced in collisions and measure their characteristics, like: energy, momentum, charge, and their **lifetime** (if it applies)

Lifetimes of tau leptons, charm and beauty hadrons:
from **0.2 to 1.5 ps**

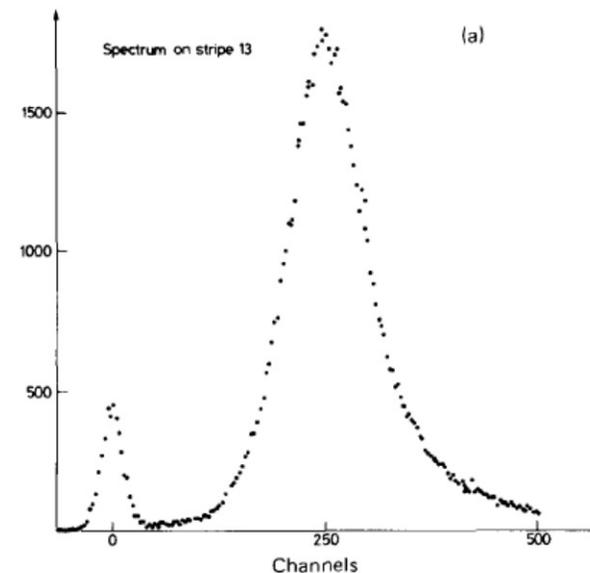
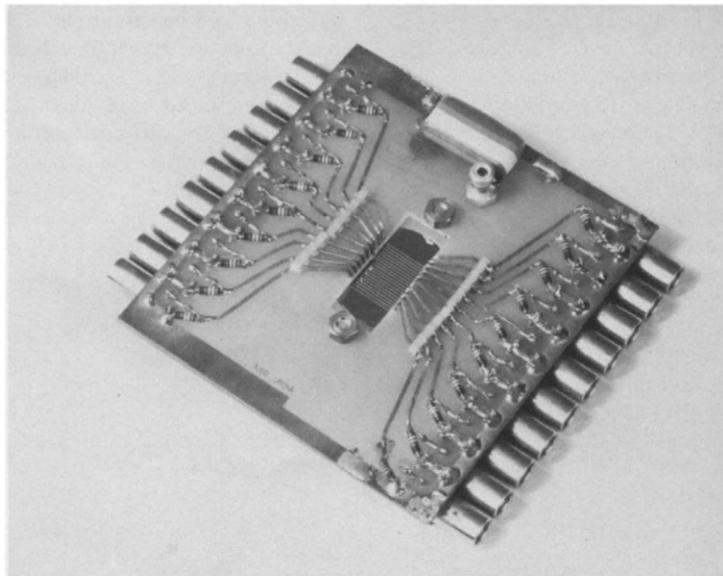
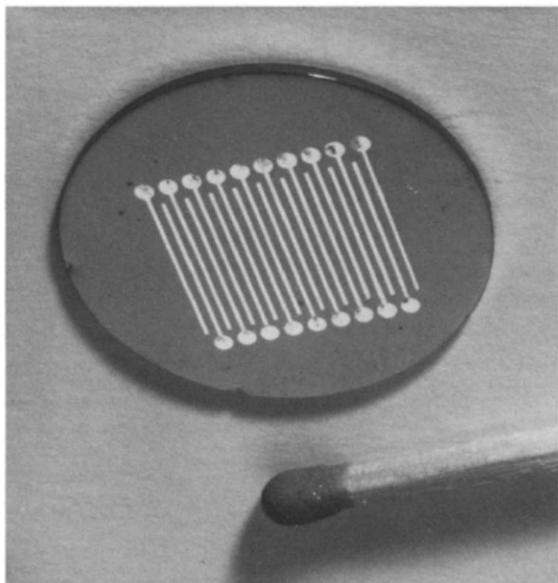


decay length $l = \gamma\beta ct$, so typically the decay vertex is at a distance **of single millimeters** from the interaction vertex

⇒ place detectors as close as possible

⇒ **detector with submillimeter precision is needed**

Multi-Electrode Silicon Detectors.



Elettrodi di 12mm di lunghezza separati $300\mu\text{m}$. Oro e alluminio depositati su silicio di alta resistività.

S.R. Amendolia et al. A Multi-Electrode Silicon Detector for High Energy Experiments Nucl. Instr. Meth. 176 (1980)

FRAMM- NA1: prima targhetta attiva a microstrisce di germanio.



EUROPEAN ORGANIZATION FOR NUCLEAR RESEARCH

CERN-EP/87-20
February 2nd, 1987

A MEASUREMENT OF D^0 LIFETIME

NA1 COLLABORATION

S.R. Amendolia²⁾, G. Bagliesi²⁾, G. Batignani²⁾, G.A. Beck⁴⁾, F. Bedeschi²⁾,
 E.H. Bellamy¹⁾, G. Bellini¹⁾, E. Bertolucci²⁾, D. Bettoni²⁾, A. Bizzeti²⁾, G. Bologna⁴⁾,
 S. Bonetti¹⁾, L. Bosisio²⁾, U. Bottigli²⁾, C. Bradaschia²⁾, M. Budinich⁵⁾, J. Carter⁶⁾,
 M.A. Ciocci³⁾, M. Dell'Orso²⁾, B. D'Ettorre Piazzoli⁴⁾, M. Enorini³⁾, F.L. Fabbri³⁾,
 F. Fidecaro²⁾, L. Foa²⁾, E. Focardi²⁾, P. Giannetti²⁾, M.A. Giorgi²⁾, M.G. Green⁶⁾,
 M.P.J. Landon⁶⁾, P. Laurelli³⁾, F. Liello⁵⁾, P.F. Manfredi¹⁾, G. Mannocchi⁴⁾,
 P.V. March⁶⁾, P.S. Marrocchesi²⁾, D. Menasce¹⁾, A. Menzione²⁾, E. Meroni¹⁾, L. Moroni¹⁾,
 E. Milotti⁵⁾, L. Perasso¹⁾, P. Picchi⁴⁾, D. Pedrini¹⁾, F. Ragusa¹⁾, G. Raso²⁾,
 L. Ristori²⁾, L. Rolandi⁵⁾, L. Sacks⁶⁾, S. Sala¹⁾, A.H. Sanjari⁶⁾, A. Scribano²⁾,
 P. Spillantini³⁾, A. Stefanini²⁾, J.A. Strong⁶⁾, R. Tenchini⁶⁾, G. Tonelli²⁾,
 G. Triggiani²⁾, M. Vittone¹⁾ and A. Zallo³⁾

Abstract

A measurement of the lifetime of D^0 mesons photoproduced coherently off a Germanium target is presented. Signals have been observed for the production of $D^0\bar{D}$ into several channels and for $D^{*+} \rightarrow D^0\pi^+$. A sample of 58 D^0 decays gives a lifetime of $(3.4 \pm 0.5) \cdot 10^{-13}$ s.

Submitted to Physics Letters B

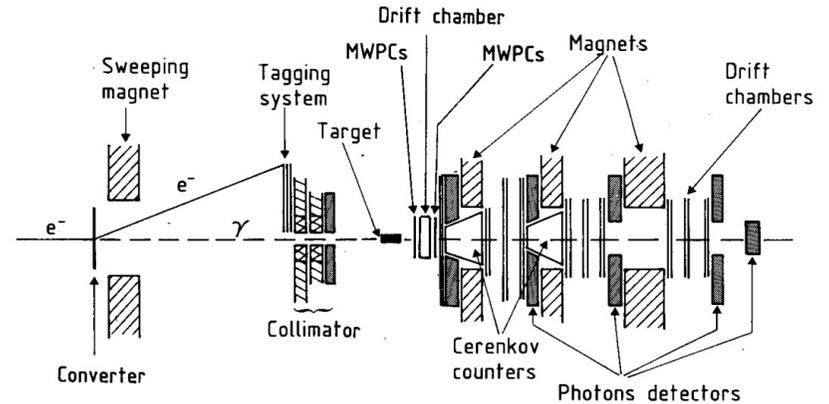
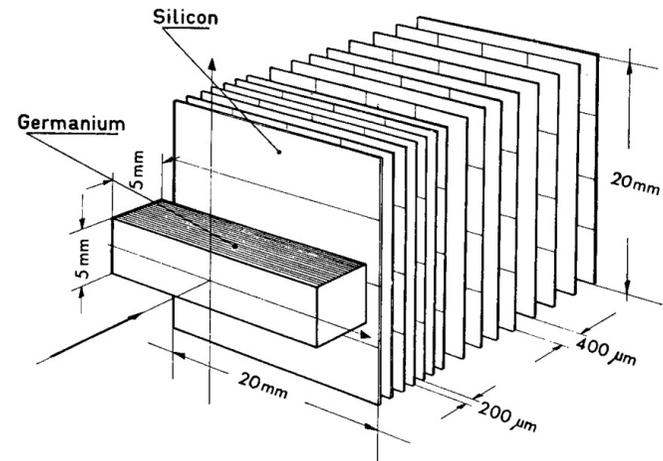
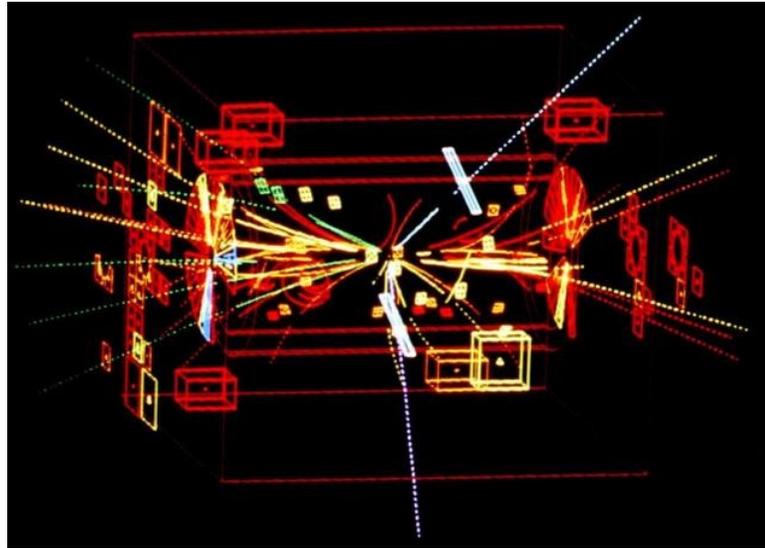


FIG. 1a



Anni '80.

Carlo Rubbia scopre al Cern i bosoni vettoriali intermedi W e Z.



Premio Nobel a Rubbia e Van der Meer in 1984.

È il trionfo del Modello Standard. Si progettano nuovi acceleratori, LEP e LHC, per studiare in dettaglio tutte le caratteristiche dei nuovi bosoni e per cercare di scoprire top e Higgs.

Un mare di nuove idee prodotte a Pisa:

Rivelatore di vertice al silicio per equipaggiare la zona di interazione di CDF.

140 IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol. 33, No. 1, February 1986

A SILICON VERTEX DETECTOR FOR CDF

Presented by F. Bedeschi

F. Bedeschi^{a)}, S. Belforte^{b)}, G. Bellettini, L. Bosisio, F. Cervelli, G. Chiarelli^{b)}, R. DelFabbro, M. Dell'Orso^{a)}, A. DiVirgilio, E. Focardi, P. Giannetti, M. Giorgi, A. Menzione, L. Ristori, A. Scribano, P. Sestini, A. Stefanini, G. Tonelli, F. Zetti

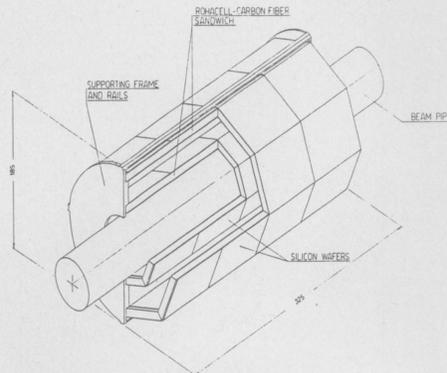
Istituto Nazionale di Fisica Nucleare
Pisa, Italy

Summary

The major reason for building a vertex detector for CDF is the tagging of decay vertices of particles with lifetime in the $10^{-13}/10^{-12}$ sec. range. This is a complementary approach to heavy flavour physics with respect to missing E_T and large p_T leptons. The method can be best applied to tag hadronic decays of heavy flavours, which have the largest branching ratios, but have eluded any specific tagging until now. It also works, although with somewhat reduced efficiency, in events with a semileptonic decay. All in all it promises to be a powerful tool in the search of rather elusive processes like Higgs, top, or fourth generation quark production [1].

The additional information provided by the vertex detector will also improve significantly the resolution of the CDF central tracking system [2].

The Detector



University of Pisa - G. Bellettini, R. Bertani, L. Bosisio, C. Bradaschia, R. DelFabbro, E. Focardi, M.A. Giorgi, A. Menzione, L. Ristori, A. Scribano, G. Tonelli

DESIGN REPORT

FOR THE
FERMILAB COLLIDER DETECTOR FACILITY

(CDF)

AUGUST, 1981

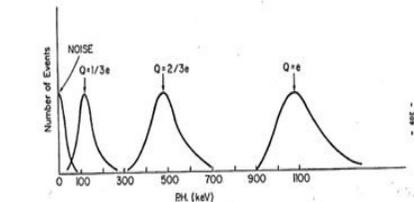
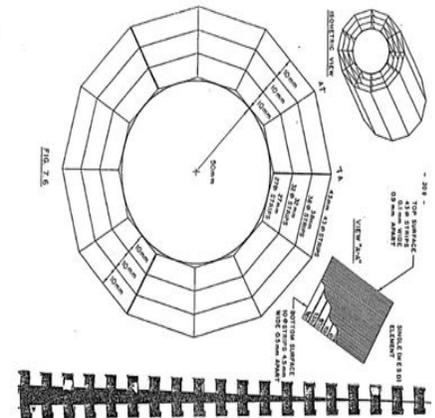
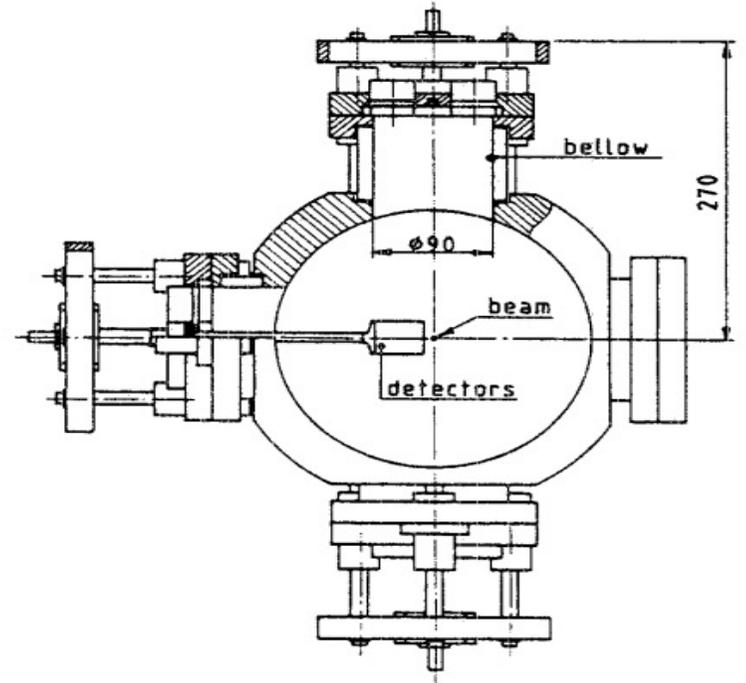
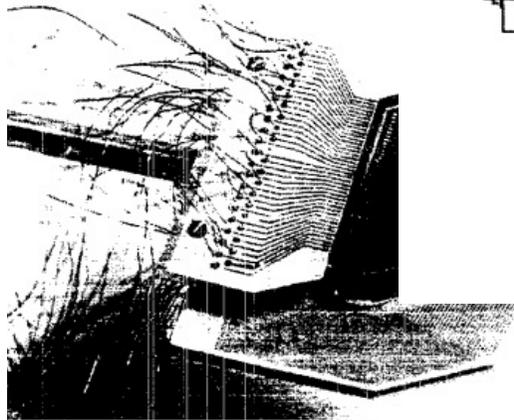
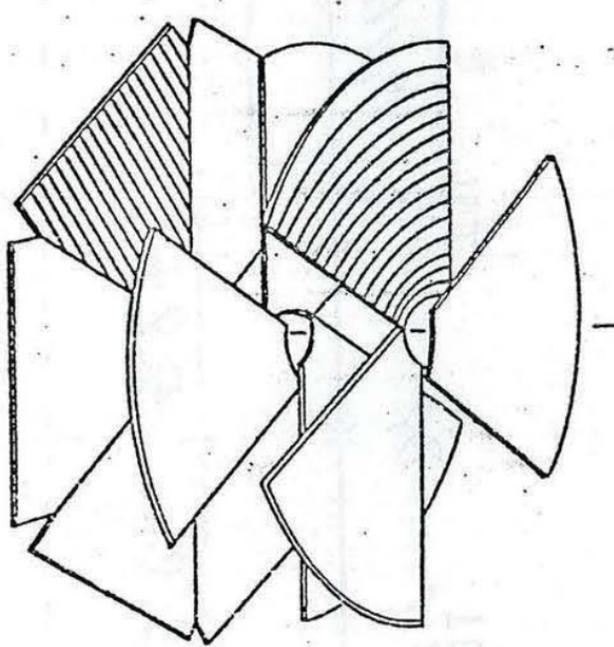


FIG. 77

Silici in forma di petali per lo spettrometro a piccolo angolo di CDF.



Disegno di Aldo Menzione che io ed Ettore realizziamo con l'aiuto di Filippo Bosi per la meccanica. Partecipazione in CDF.

ALEPH vertex detector.

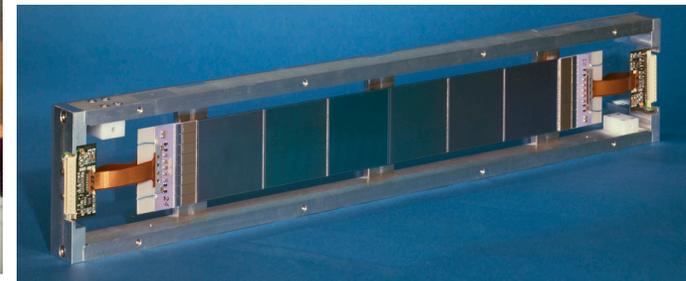
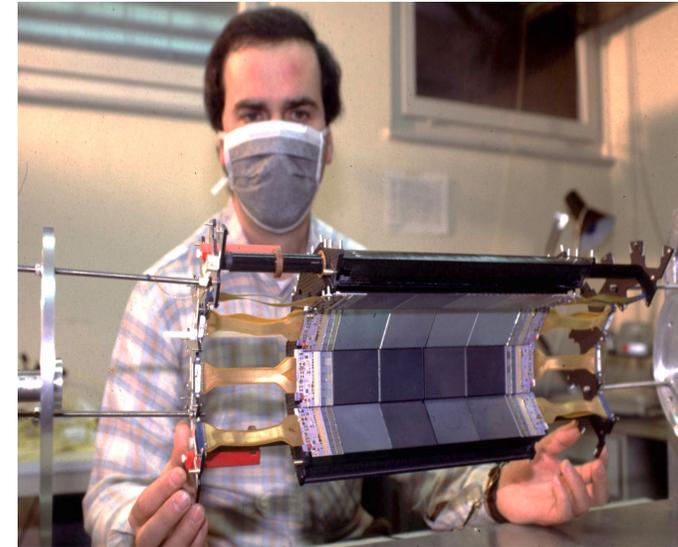
Ancora più avveniristico: primo vertex detector e rivelatori a micro-strisce con lettura sui due lati. (mai sviluppati prima).

Tecnologia troppo complicata per essere gestita in casa. Contatti con l'industria. Lavoro in comune per lo sviluppo della tecnologia più appropriata.



Guido Tonelli CERN/INFN/UNIFI

Firenze 12 Gennaio 2024



Il successo di ALEPH ci ha spinti a sognare ancora più in grande.

Ripetere nell'ambiente adronico più ostile (altissima luminosità, molteplicità di tracce cariche e flusso di radiazione) il successo ottenuto con i primi sistemi traccianti al silicio utilizzati a LEP ed al Tevatron Collider.

Ottima risoluzione in impulso (Higgs \rightarrow 4 μ ; tagli sulla massa della Z per ed utilizzo di masse invarianti in generale e ridurre al minimo i fondi irriducibili).

- $\Delta p_t/p_t = 0.15 p_t$ (TeV)

- Alta efficienza di ricostruzione di tracce sia isolate (muoni ed elettroni) che appartenenti a getti di alta energia trasversa (validazione del trigger di muoni, tagli di isolamento per fotoni singoli (H \rightarrow $\gamma\gamma$) e per tracce in generale).

- $\epsilon > 95\%$ per $p_t > 2\text{GeV}$

Equipaggiare in silicio il tracciatore centrale di CMS.

Magnete superconduttore

ECAL
PbWO4 cristalli

HCAL
Sandwich/ottone
scintillatore

FERRO

TRACKER

Silicio a Microstrip
Pixels

MUON BARREL

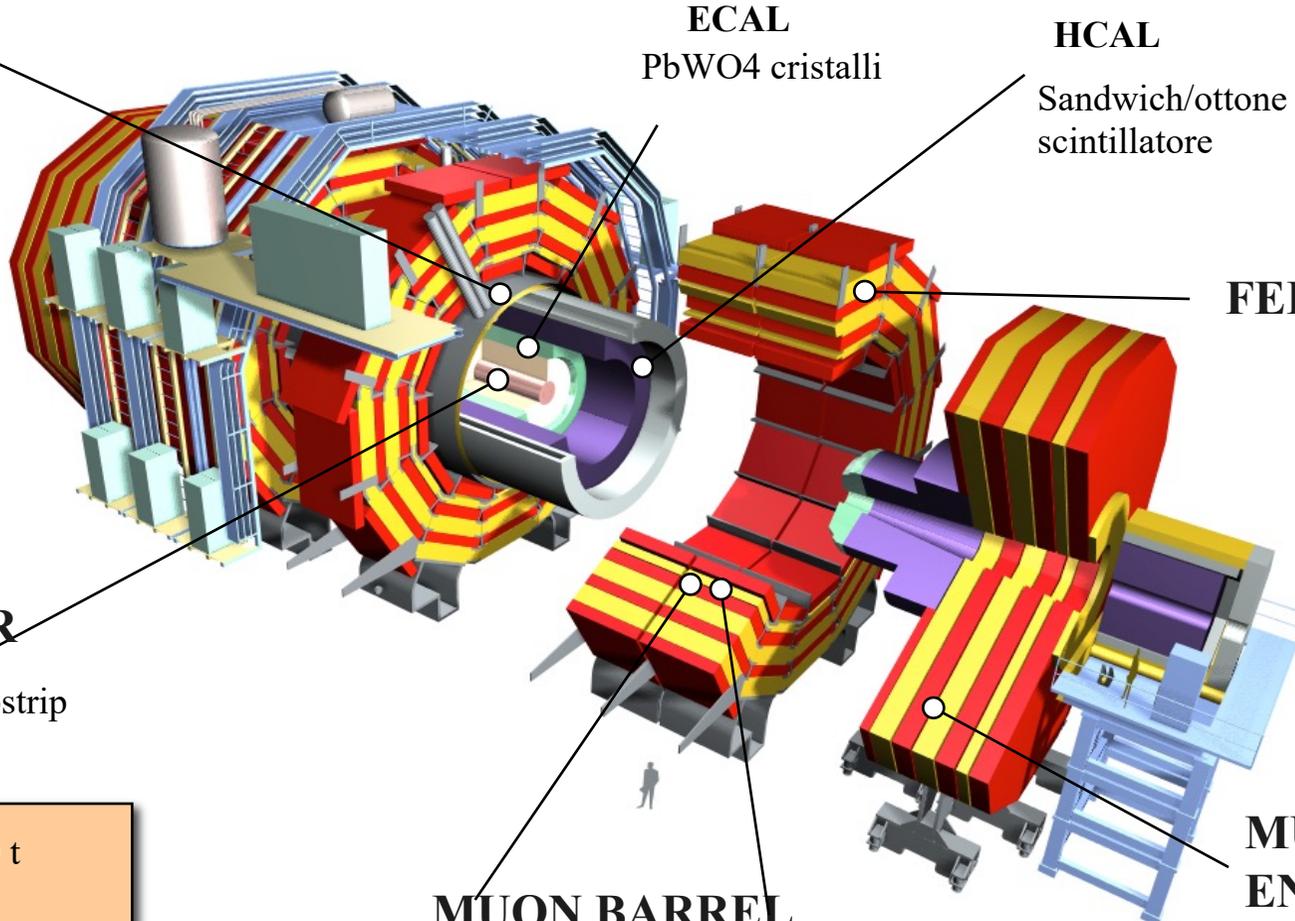
MUON
ENDCAPS

Drift Tube
(DT)

Resistive Plate

Cathode Strip Chambers (CSO)
Resistive Plate Chambers (RPC)

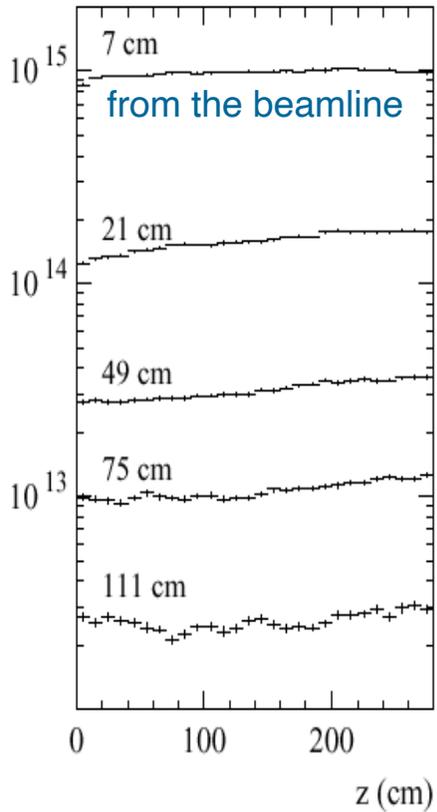
Peso Totale : 12,500 t
Diametro : 15 m
Lunghezza : 21.6 m
Campo Magnetico : 4 Tesla



Disegno del tracciatore di CMS

Fluence over 10 years

Ch. Hadrons (cm^{-2})



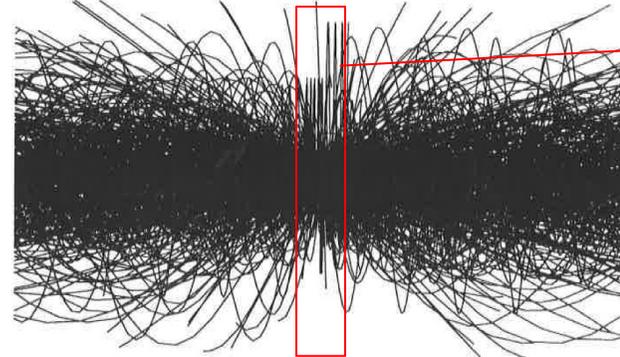
$\leq 4 \cdot 10^7 \text{ h}^\pm/\text{cm}^2/\text{s}$
pixels ($\approx 10^4 \mu\text{m}^2$)
occupancy $\approx 10^{-4}$

$\leq 4 \cdot 10^6 \text{ h}^\pm/\text{cm}^2/\text{s}$
Si μ -strip det.
($\approx 10 \text{ mm}^2$)
occupancy $\approx 1\%$

$\leq 4 \cdot 10^5 \text{ h}^\pm/\text{cm}^2/\text{s}$
Si or Gas detectors.
($\approx 1 \text{ cm}^2$)
occupancy $\approx 1\%$

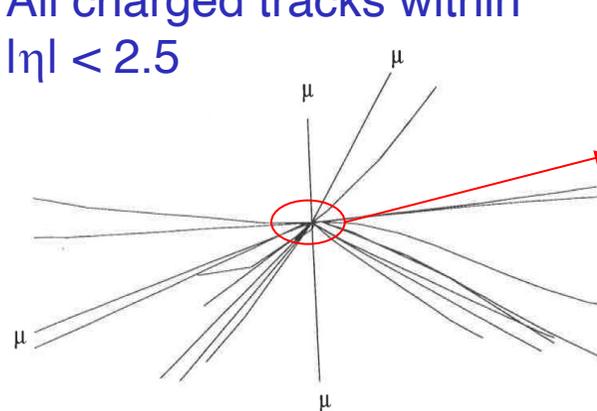
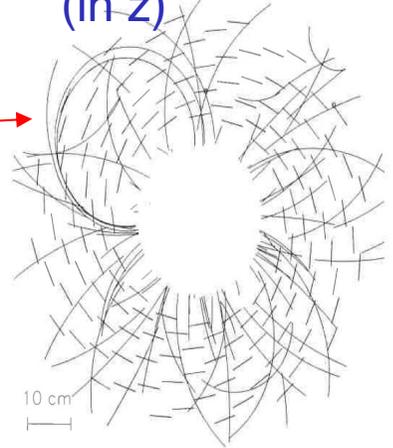
Eventually 200
 m^2 of Si
sensors!

4T Field
30 min bias events +
 $\text{H} \rightarrow \text{ZZ} (\text{Z} \rightarrow \mu\mu)$



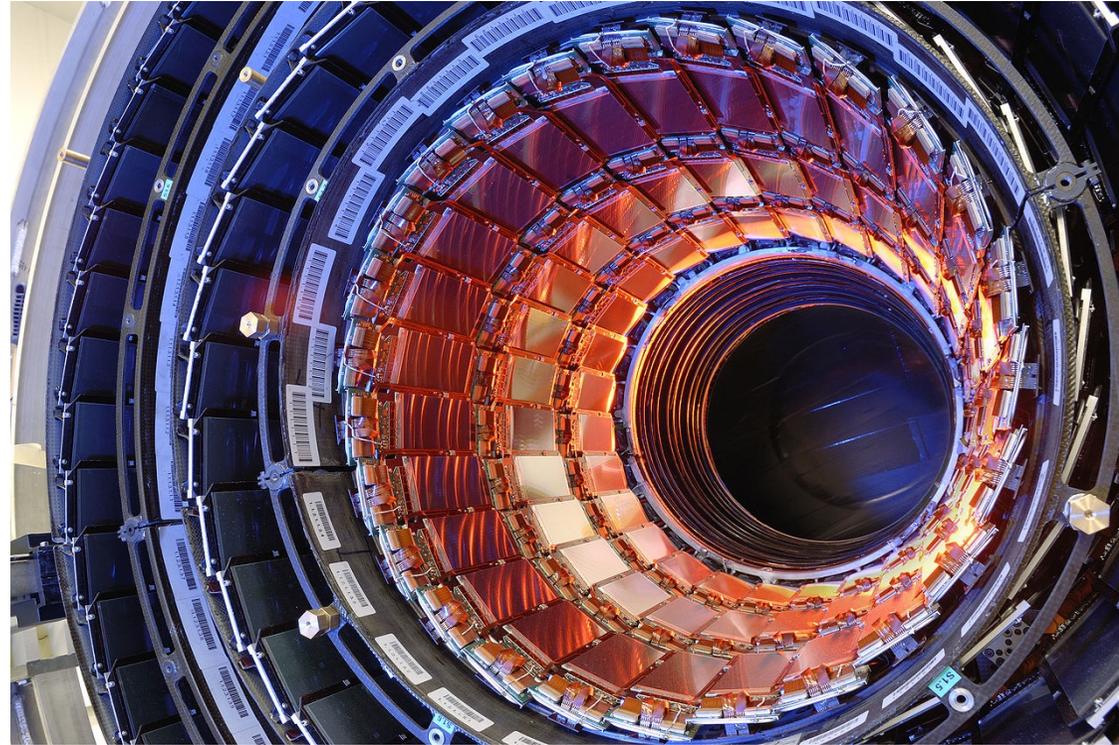
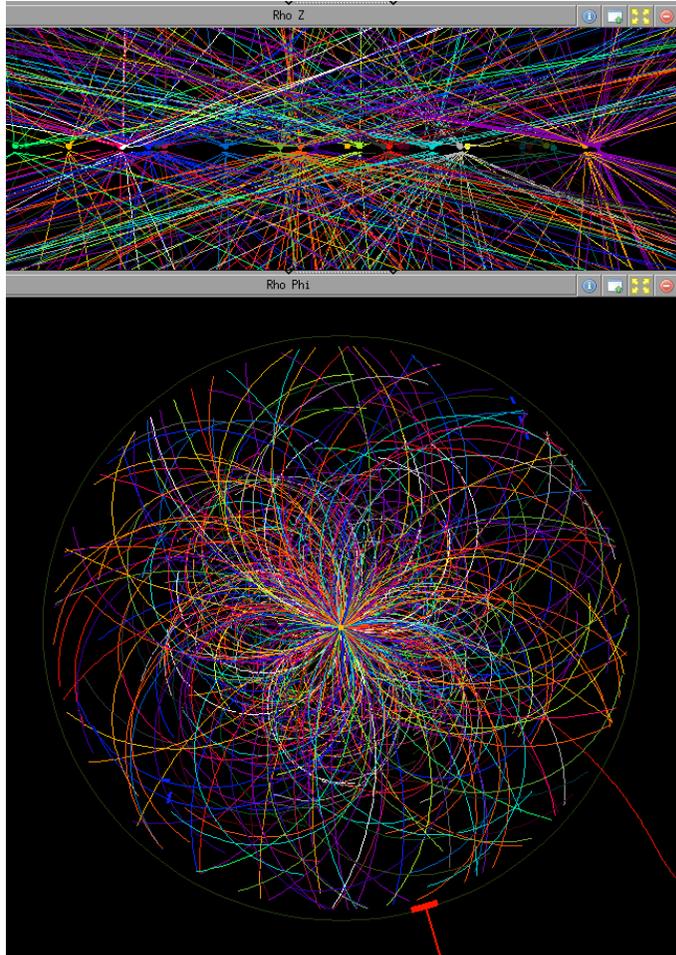
All charged tracks within
 $|\eta| < 2.5$

10 cm slice
(in-z)



Tracks with $p_T >$
2GeV

CMS era un concentrato di “missioni impossibili”. Costruire il tracciatore interno era considerata una vera e propria follia.



Disegnare, costruire, far funzionare ~25.000 rivelatori al silicio estremamente sofisticati, resistenti alla radiazione e capaci di sopravvivere per decenni nell'ambiente estremamente ostile delle collisioni di LHC.

La chiave per uscire da questo incubo:

**Cercare collaboratori, coinvolgere i
migliori esperti in tutto il mondo.**

**Coinvolgere le industrie, le migliori, in
tutto il mondo.**

È qui che entra in gioco Marco e il gruppo di Firenze.

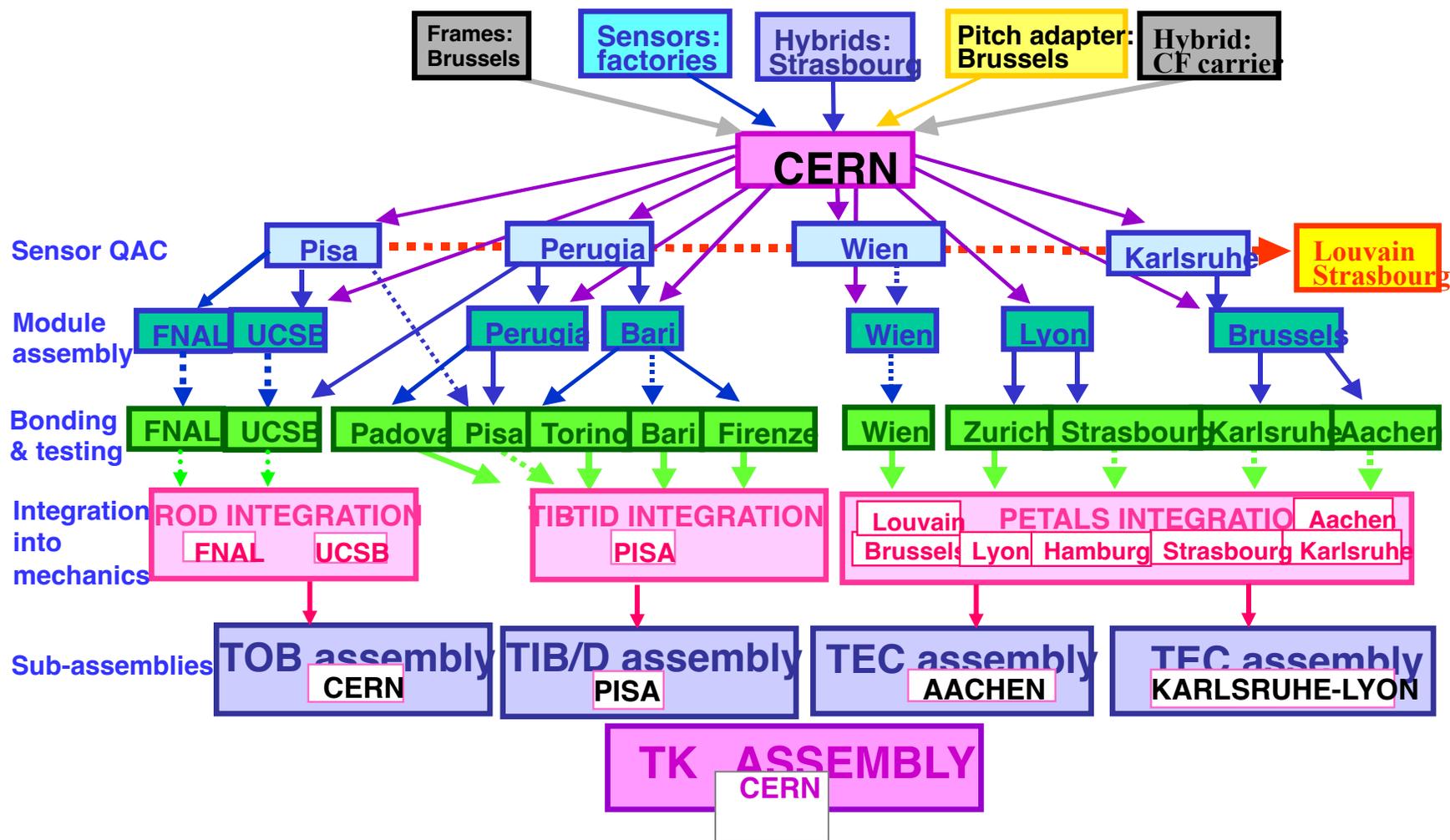


I ragazzi di L3 (con Marco Carlo e Raffaello) insieme ad Ettore e Giuliano Parrini si uniscono a CMS e subito si prendono la responsabilità di alcuni degli aspetti di sistema più importanti.

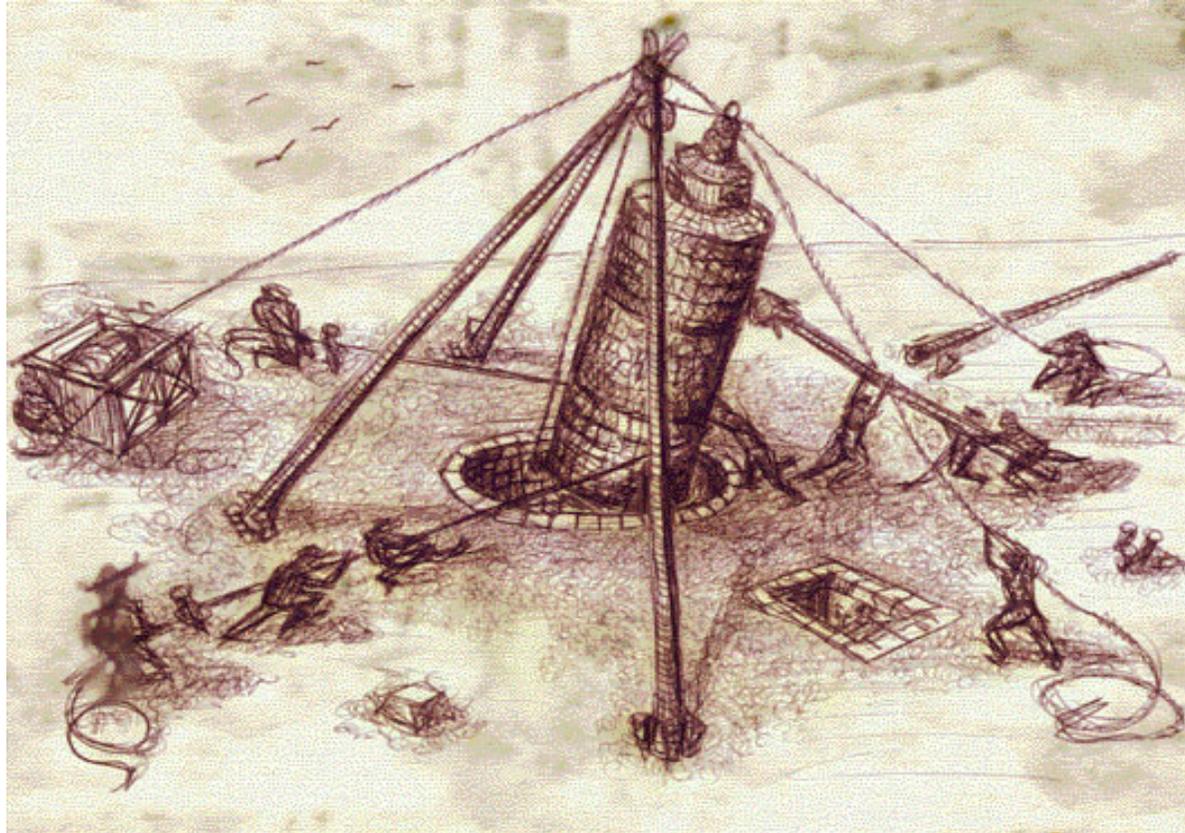
Il power supply, i cavi, le schede madri che devono gestire il colloquio fra moduli, lo schema di messa a terra, le schermature, i più sottili dettagli di funzionamento dell'elettronica di lettura sviluppata da Geoff Hall, Sandro Marchioro e François Vasey.

A Pisa e Firenze si uniscono Perugia, Padova, Torino, Bari, Catania: nasce il consorzio TIB/TID.

La costruzione del tracciatore di CMS.



E la storia di molte sfide tecnologiche.....



.....e di momenti in cui ti senti
messo al tappeto.

Le innumerevoli crisi che abbiamo attraversato.

- Adozione del tracciatore tutto silicio e ridisegno completo del tracker.
- Nuova elettronica di front-end in tecnologia 0.25 μm .
- Crisi dei sensori STM e sostituzione in corsa con sensori Hamamatsu.
- Anomalie nel funzionamento degli APV25 in presenza di particelle altamente ionizzanti.
- Crisi nella produzione degli ibridi.
- Crisi nei chip e nella produzione dei moduli a pixel.
- Problemi nell'installazione e nuovo layout nell'integrazione di cavi e servizi.

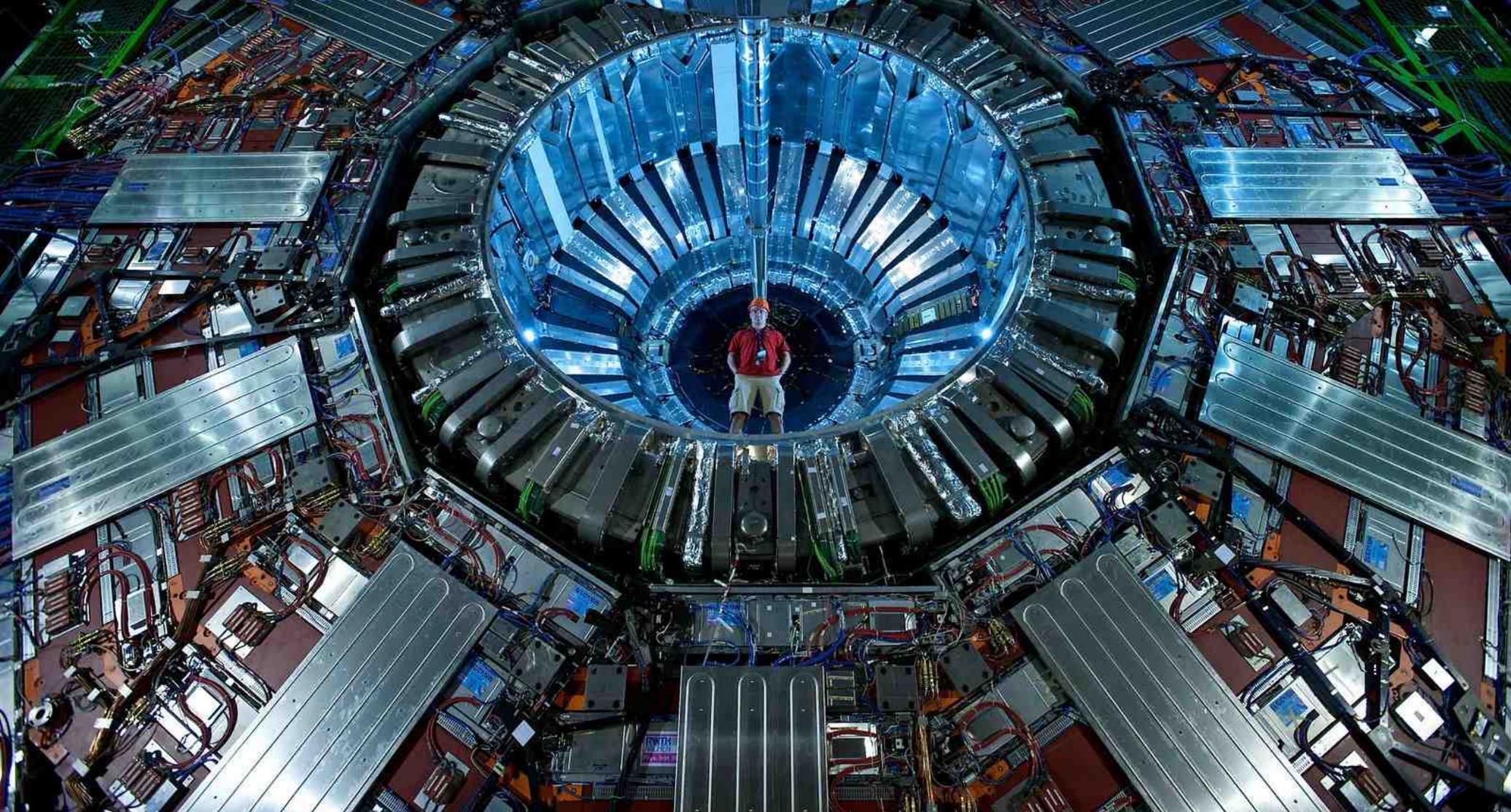
Momenti drammatici: 01:30 del 18 Dicembre 2007



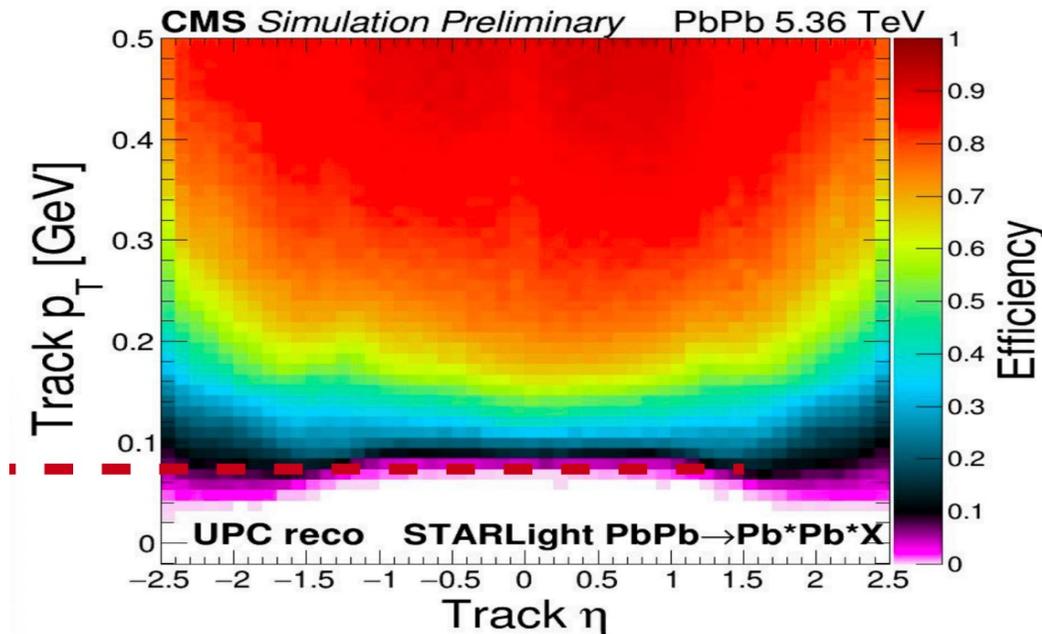
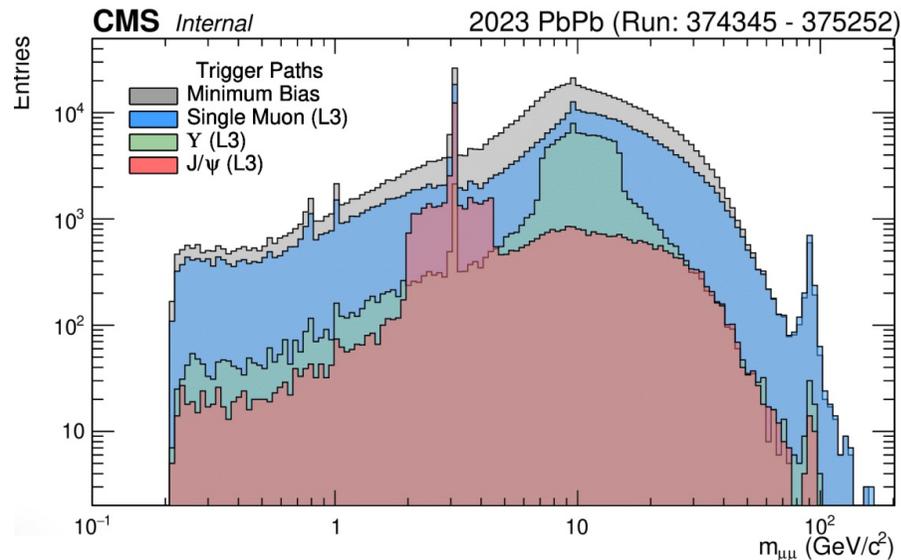
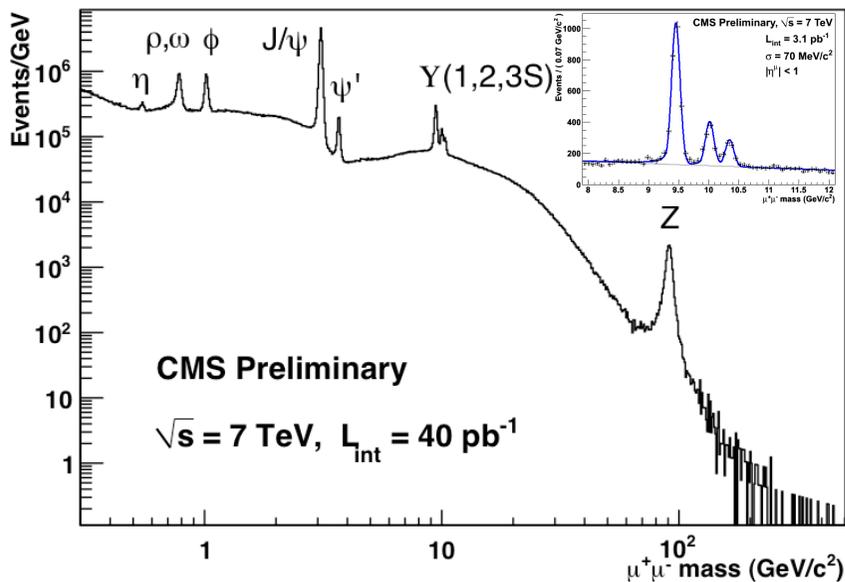
e attimi di gioia che saranno difficili da dimenticare.



Che ci hanno portato a costruire un rivelatore semplicemente fantastico.



Uno strumento capace di prestazioni inimmaginabili.



I tre project leaders.



Rino Castaldi

Gigi Rolandi

Peter Sharp (UK 1940-2011)

I tre project leaders che hanno portato a termine una delle imprese più impressionanti della moderna fisica delle alte energie.

Un grazie di cuore a Marco ed Ettore e con loro a tutti gli amici del gruppo di Firenze, compagni straordinari di un'impresa che ricorderemo tutti per sempre.



Un ricordo particolare di immensa stima e di grande affetto per Giuliano Parrini che purtroppo ci ha lasciato.

Sono sicuro che Giuliano sarebbe molto contento se oggi fosse qui con noi a festeggiare Ettore e Marco.



(Firenze 1941-2022)