

Neutrino Physics at CERN with the CHARM experiment

DIPARTIMENTO DI FISICA



SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA



Neutrino beams at CERN 400 GeV SPS

The main source of neutrinos at proton synchrotrons is from the decay of pions and kaons produced by protons striking a nuclear target.

In wide-band beams (WBB), the neutrino parent mesons are focused over a wide momentum range to obtain maximum neutrino intensity.

In narrow-band beams (NBB), the secondary particles are first momentum-selected to produce a monochromatic parent beam.

West Area Neutrino Facility (WANF) at CERN was operating a WBB and a NBB from 1977, for BEBC, CDHS and **CHARM**.

After 1985, only WBB was used, mainly by CHARM II and after 1992 WANF was rebuilt for CHORUS

Why neutrino beams and experiments?

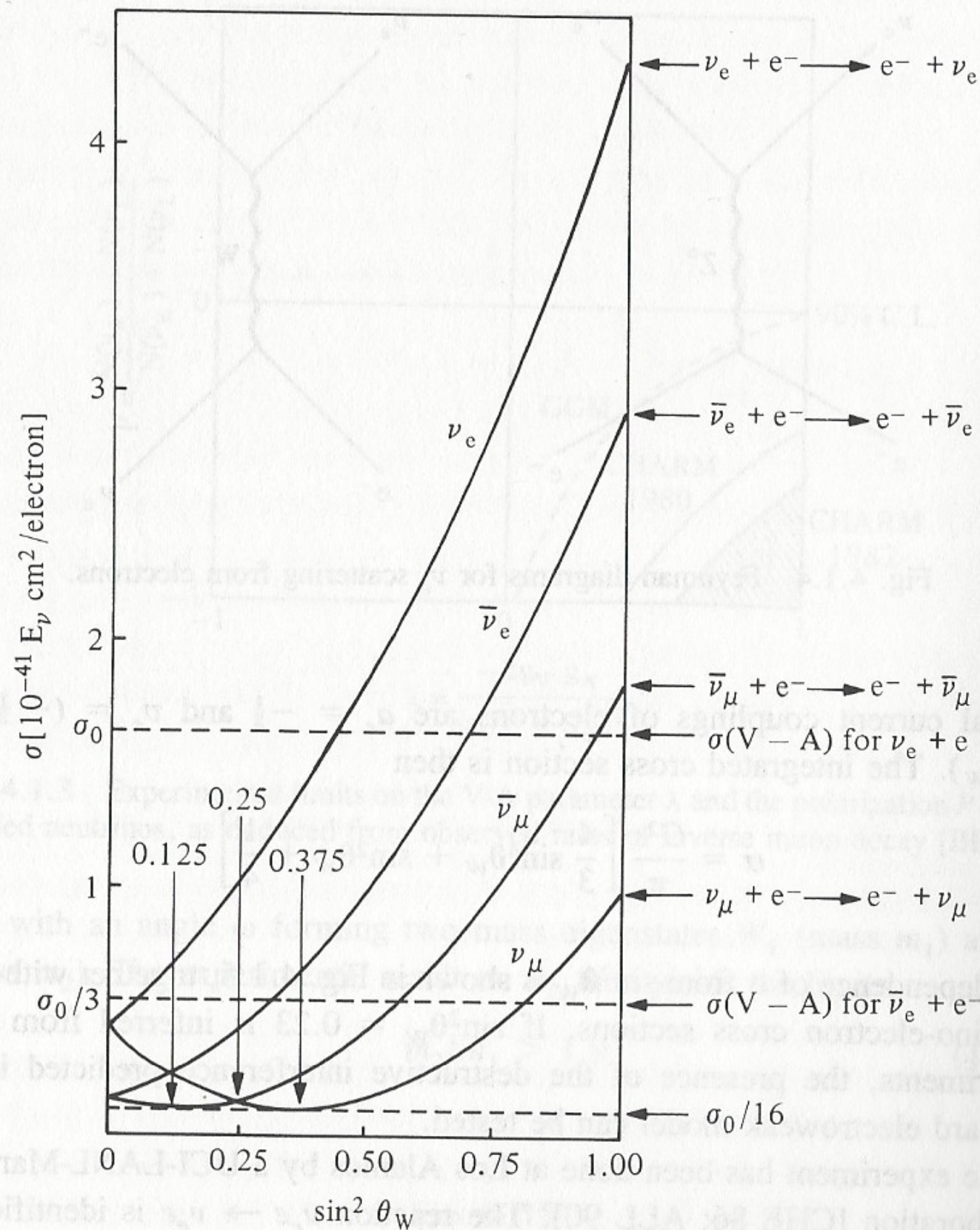
From 1967-1968, the years of electroweak unification theory (Glashow, Weinberg, Salam)

to 1983, Z and W discovery by UA1 and UA2 at CERN proton-antiproton collider

neutrino physics was the golden laboratory for experimental tests of the standard model

e.g., weak neutral currents predicted by GWS, were observed by GGM (and Aachen-Padova) at CERN, exposed to the PS WB neutrino beam in 1972-73

WANF was a flag project to exploit neutrino physics, in direct competition with US experiments



Cross sections for purely leptonic neutrino interactions, as a function of the Weinberg angle

Note the different contributions of CC, NC and their interference

semileptonic neutrino interactions

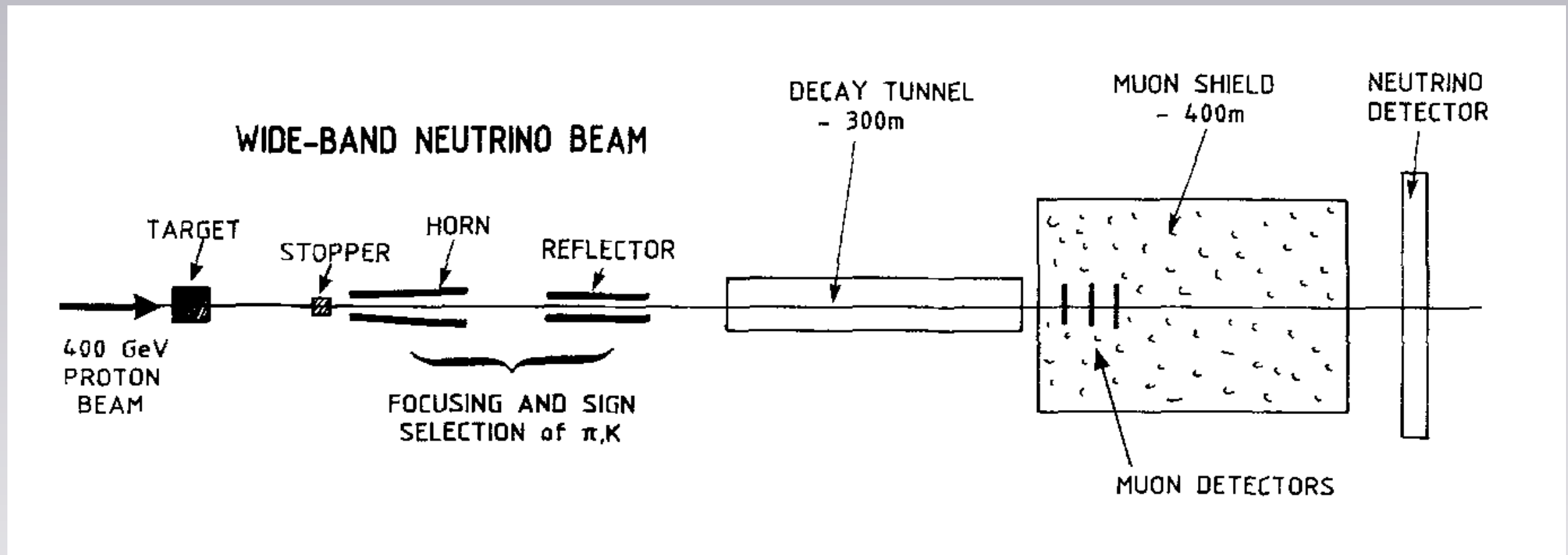
neutrino cross section proportional to $\sqrt{s} = 2 E_\nu M_t$,
 10^4 larger for nucleons than for electrons

but weak structure folded with parton distribution inside
the nucleons

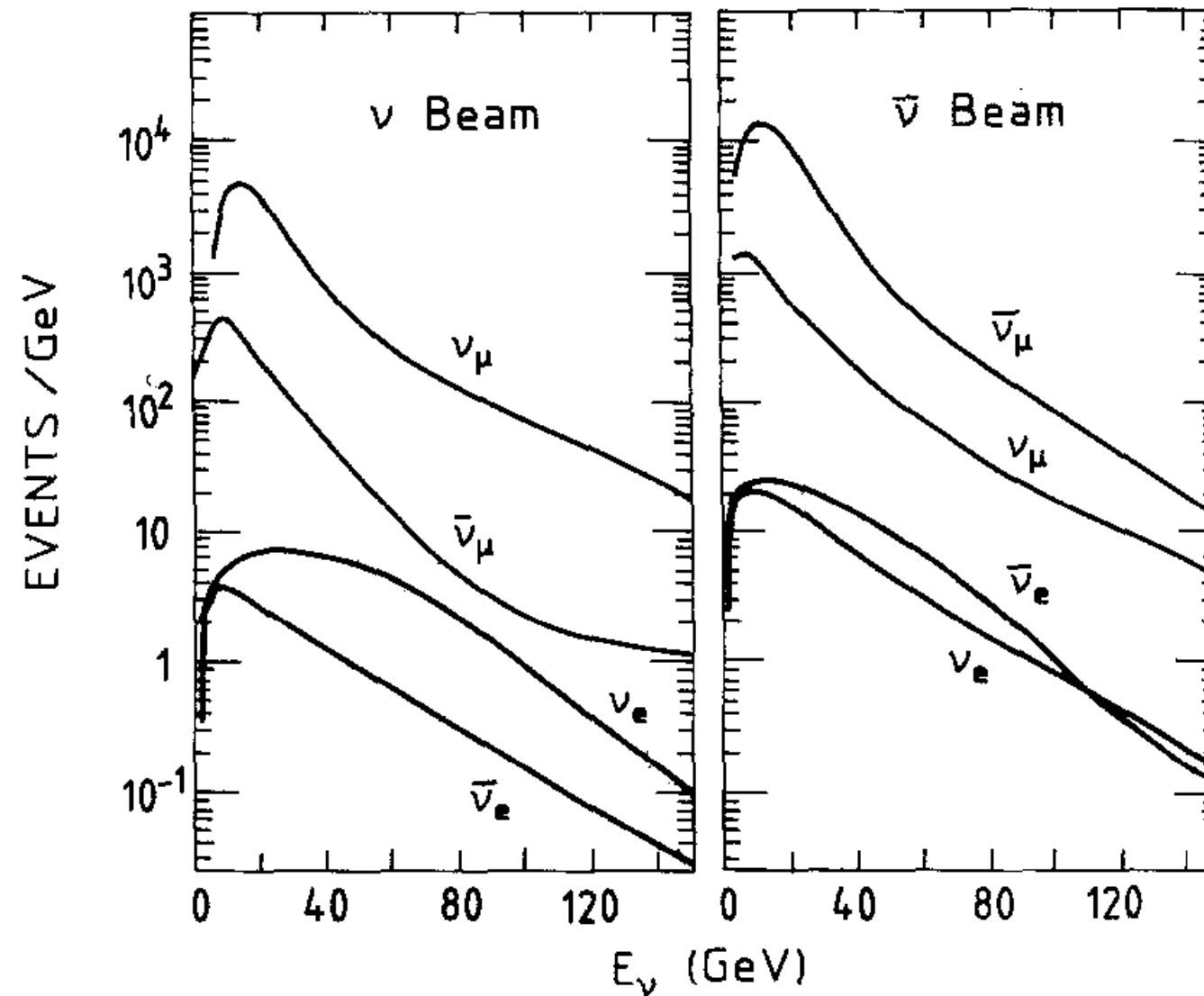
On the other hand, V-A structure of weak charged current
distinguishes fermions from antifermions

CC neutrino interactions probe antiquark content of the
nucleons

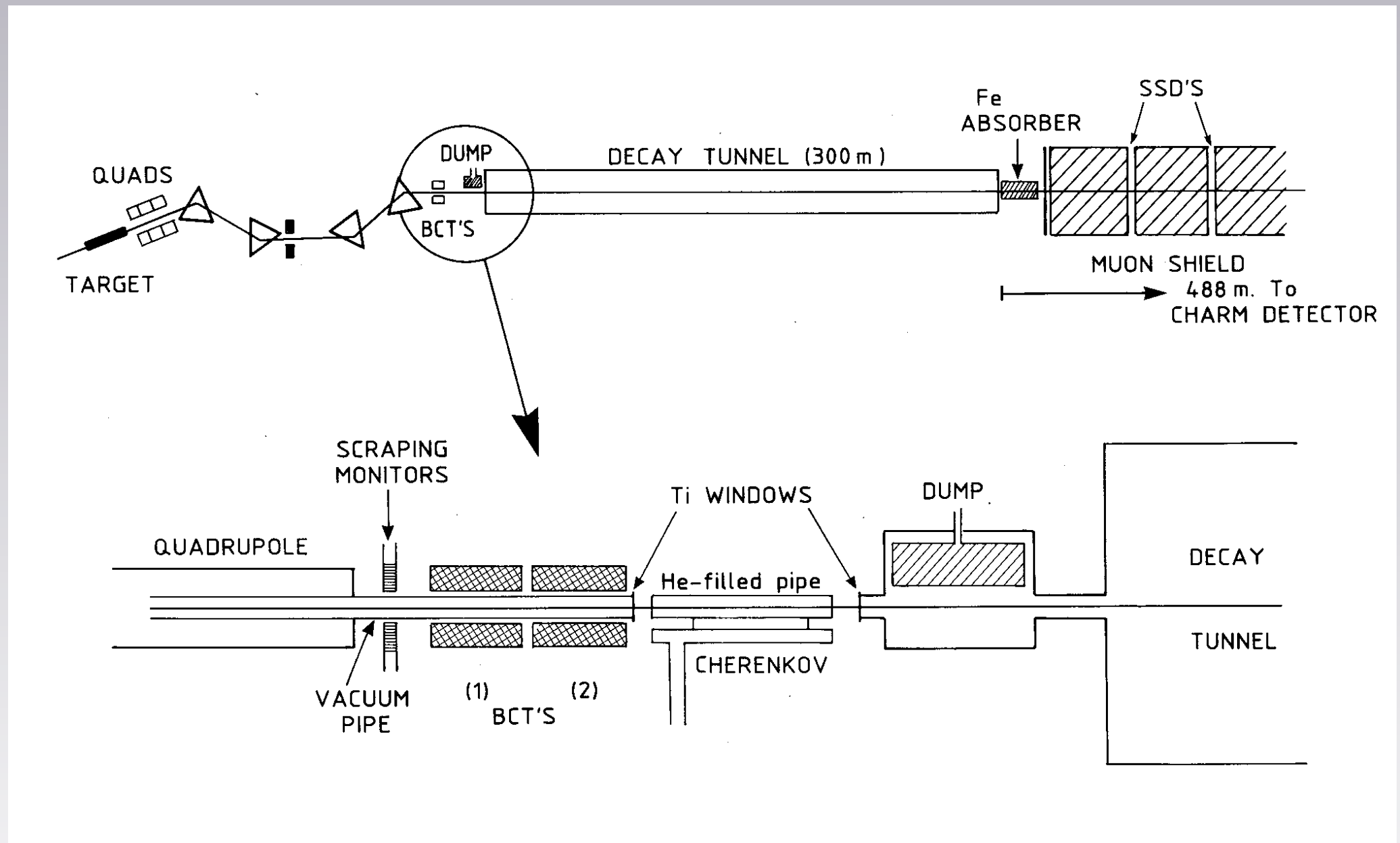
Schematics of the CERN WBB



The CERN WBB spectrum



Schematics of the CERN NBB



Dicromatic spectrum of the CERN NBB

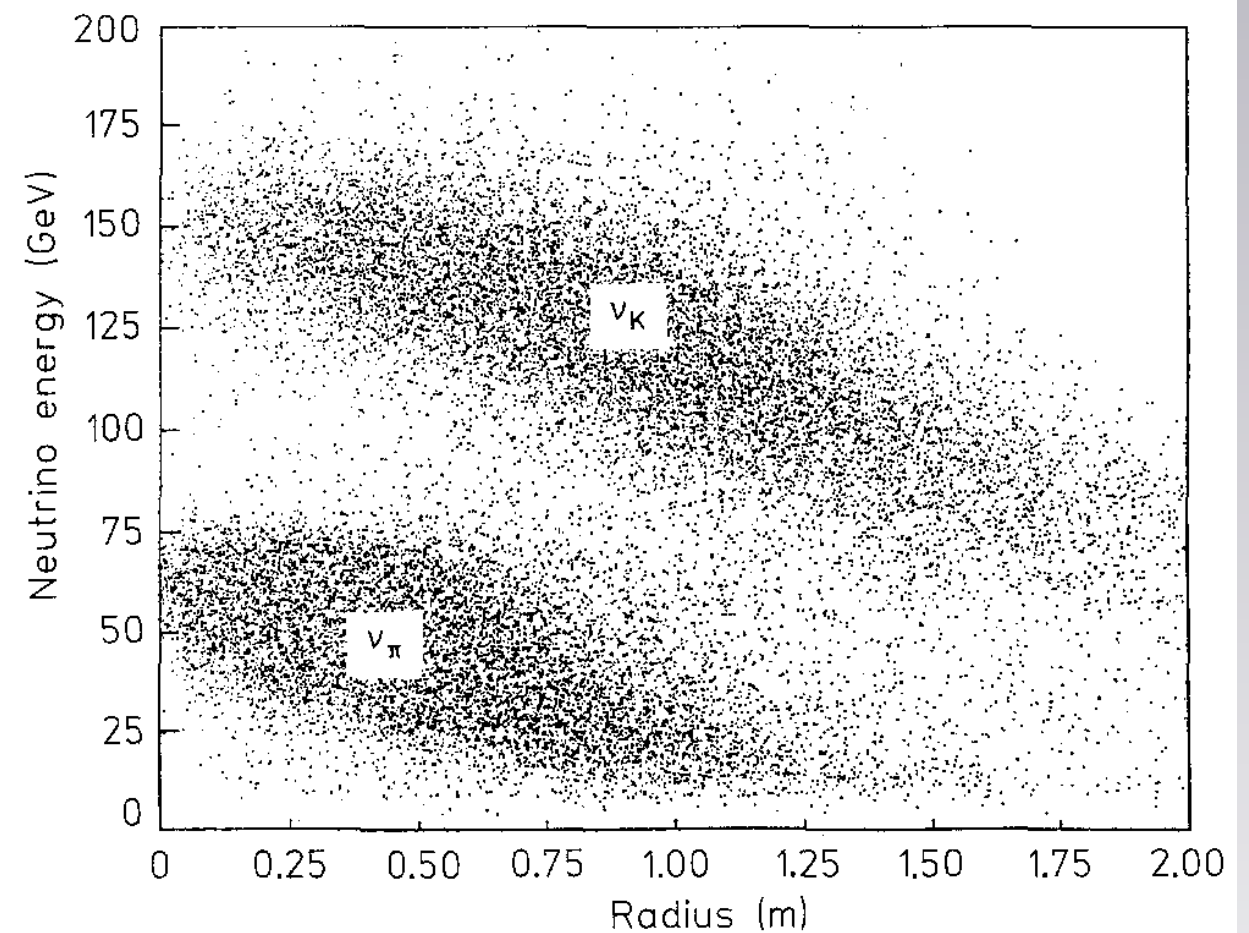
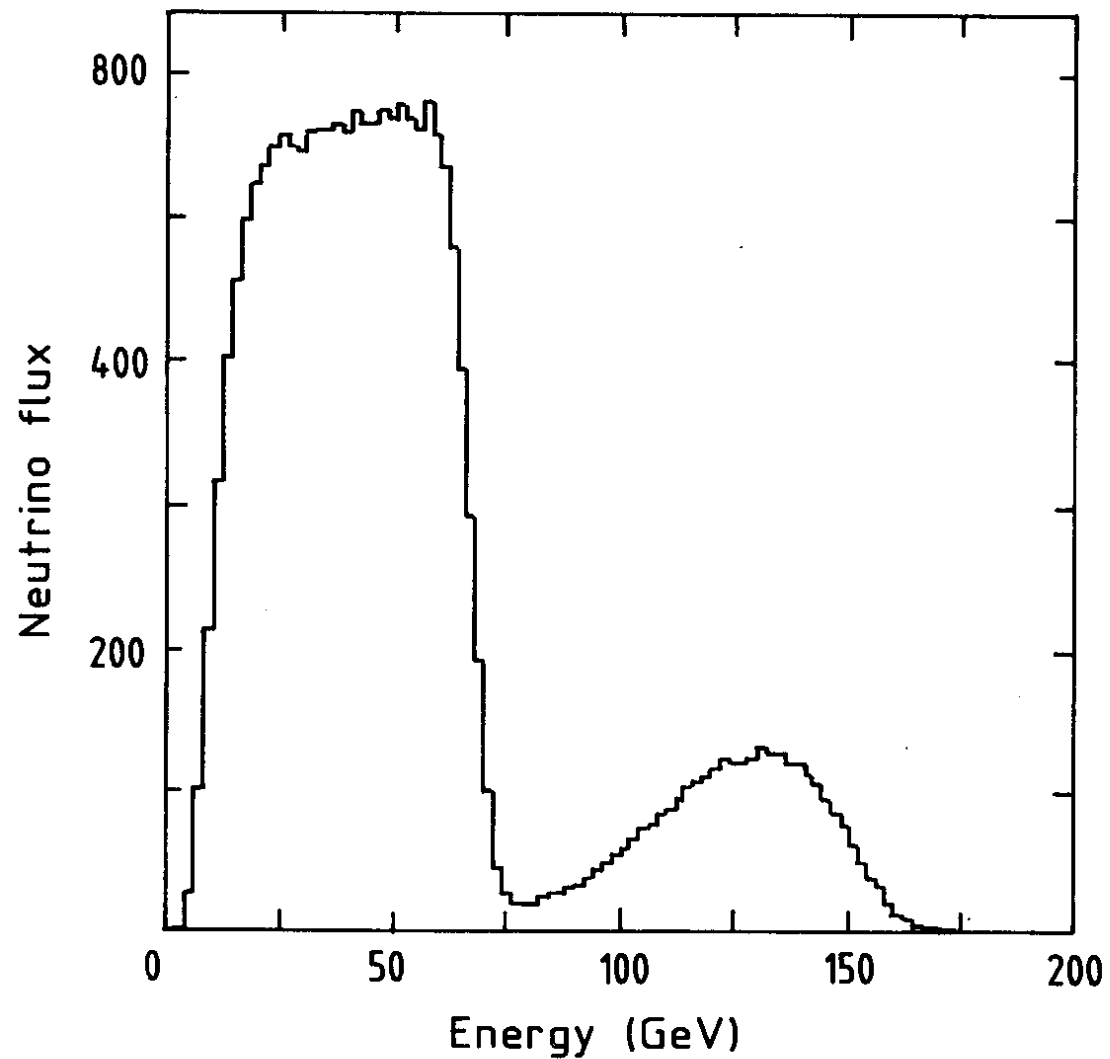


Fig. 8. Neutrino data from the 160 GeV beam as a function of measured energy $E_v = E_{\text{had}} + p_\mu$ and radial distance from the beam axis

The CHARM collaboration...

(CERN-Hamburg-Amsterdam-Rome-Moscow Collaboration)

CERN-EP/80-63
9 May 1980

A.N. Diddens, M. Jonker, J. Panman and F. Udo

NIKHEF, Amsterdam, The Netherlands

J.V. Allaby, U. Amaldi, G. Barbiellini¹⁾, A. Baroncelli, V. Blobel²⁾,
G. Cocconi, W. Flegel, W. Kozanecki, E. Longo, K.H. Mess, M. Metcalf,
J. Meyer, R.S. Orr, F. Schneider, A.M. Wetherell and K. Winter

CERN, Geneva, Switzerland

F.W. Büsser, P.D. Gall, H. Grote, P. Heine, B. Kröger, F. Niebergall,

K.H. Ranitzsch and P. Stähelin

II. Institut für Experimentalphysik der Universität^{*}), Hamburg, Germany

V. Gemanov, E. Grigoriev, V. Kaftanov, V. Khovansky and A. Rosanov

ITEP, Moscow, USSR

R. Biancastelli⁴⁾, B. Borgia³⁾, C. Bosio⁴⁾, A. Capone³⁾, F. Ferroni³⁾,
P. Monacelli³⁾, F. de Notaristefani³⁾, P. Pistilli³⁾,

C. Santoni⁴⁾ and V. Valente⁵⁾

INFN, Rome, Italy

The CHARM collaboration in Rome



The CHARM collaboration in Rome



The CHARM collaboration in Rome



... and in Moscow



... and in Moscow



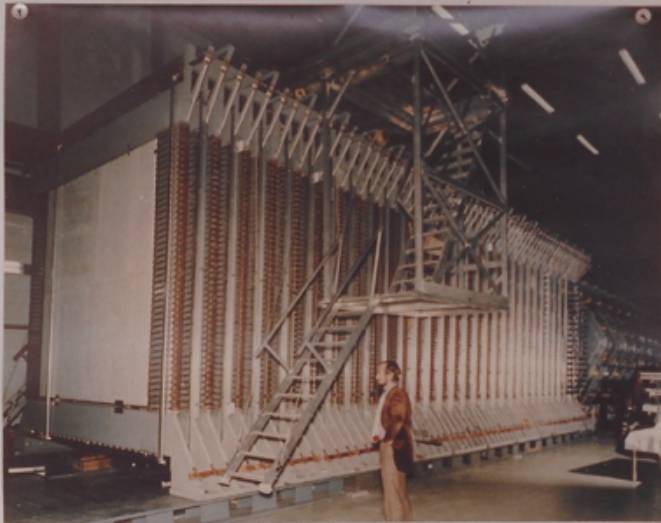
The CHARM concept

CHARM

COLLABORAZIONE CERN HAMBURG AMSTERDAM ROMA MOSCA

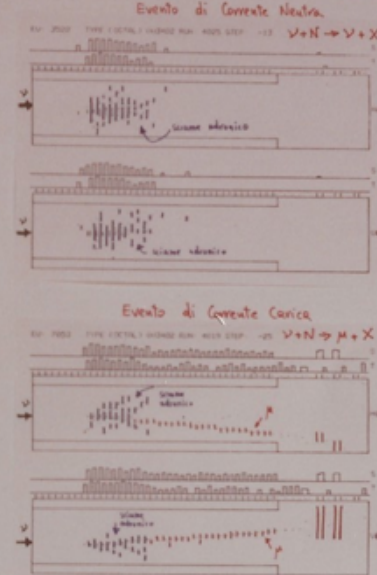
UN ESPERIMENTO PER LA RIVELAZIONE DI NEUTRINI

ROMA : A. Baroncelli, B. Borgia, C. Bosio, A. Capone, U. Dore, F. Ferroni, E. Longo,
L. Luminari, P. Monacelli, F. de Notaristefani, P. Pistilli, C. Santoni, V. Valente



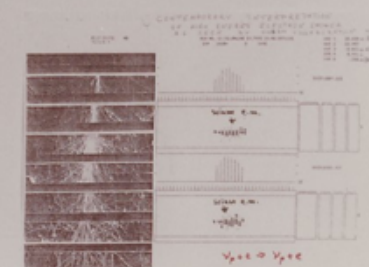
Il programma scientifico di questo esperimento, realizzato presso i Laboratori Internazionali del CERN di Ginevra, è quello di approfondire la problematica delle interazioni deboli e di studiare la struttura del nucleone. L'apparato è stato completato nel 1976; L'attuale programma di misure si estenderà sino al 1984.

L'apparato realizzato dalla collaborazione CHARM è un calorimetro atto a studiare le interazioni prodotte da un fascio di neutrini. Come è noto tali processi hanno una sezione d'urto molto piccola ($\approx 10^{-38} \text{ cm}^2/\text{GeV}$), e richiedono quindi un bersaglio di grande massa per raccogliere un numero di eventi significativo. Ciò impone che il sistema di rivelazione sia



incorporato nel bersaglio. Il nostro calorimetro è pertanto costituito da un insieme di piani di marmo (bersaglio) alternati a scintillatori, camere proporzionali, tubi a streamer (rivelatore) che permettono la misura dell'energia e della direzione dello sciame adronico. Esso è seguito da uno spettrometro magnetico che permette la ricostruzione del quadrimpulso del μ generato negli eventi di Corrente carica. La sua caratteristica principale è una alta risoluzione spaziale che permette di distinguere le differenti topologie degli stati finali. Ad esempio eventi di Corrente Neutra sono distinguibili da quelli di Corrente Carica, rivelando in questi ultimi il μ presente nello stato finale.

Inoltre l'apparato è in grado di distinguere gli sciame adronici da quelli elettromagnetici e questa proprietà permette lo studio di reazioni rare quali il processo parzialmente leptoneico: $\nu_\mu + e \rightarrow \nu_\mu + e$ da cui si ricava una misura dell'angolo di Weinberg. Nella figura si può confrontare uno sciame e.m. rivelato con tecniche "visualizzanti" con la ricostruzione elettronico-digitale di un analogo sciame nel vostro apparato.



CONTINUA

The CHARM concept

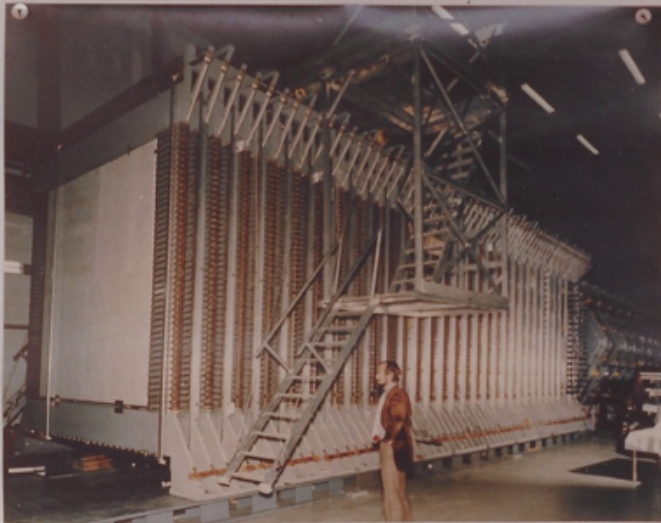
A fine-grained calorimeter, with marble (isoscalar) target plates interleaved with a fine-grained calorimeter made of scintillators, proportional chambers and streamer tubes, to measure the energy and the direction of the hadronic and e.m. showers, followed by a magnetic spectrometer to reconstruct the muon momentum

CHARM

COLLABORAZIONE CERN HAMBURG AMSTERDAM ROMA MOSCA

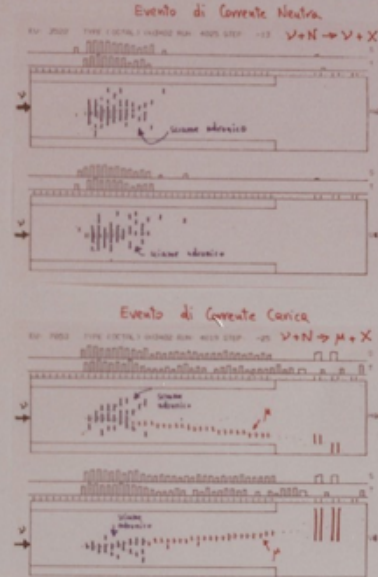
UN ESPERIMENTO PER LA RIVELAZIONE DI NEUTRINI

ROMA : A. Baroncelli, B. Borgia, C. Bosio, A. Capone, U. Dore, F. Ferroni, E. Longo, L. Luminari, P. Monacelli, F. de Notaristefani, P. Pistilli, C. Santoni, V. Valente



Il programma scientifico di questo esperimento, realizzato presso i Laboratori Internazionali del CERN di Ginevra, è quello di approfondire la problematica delle interazioni deboli e di studiare la struttura del nucleone. L'apparato è stato completato nel 1976; L'attuale programma di misure si estenderà sino al 1984.

L'apparato realizzato dalla collaborazione CHARM è un calorimetro alto a studiare le interazioni prodotte da un fascio di neutrini. Come è noto tali processi hanno una sezione d'urto molto piccola ($\sim 10^{-38} \text{ cm}^2/\text{GeV}$), e richiedono quindi un bersaglio di grande massa per raccogliere un numero di eventi significativo. Ciò impone che il sistema di rivelazione sia

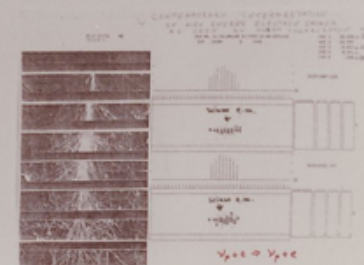


Inoltre l'apparato è in grado di distinguere gli sciame adronici da quelli elettromagnetici e questa proprietà permette lo studio di reazioni rare quali il processo paramente leptoneico: $\nu_\mu + e \rightarrow \nu_\mu + e$ da cui si ricava una misura dell'angolo di Weinberg.

Nella figura si può confrontare uno sciame e.m. rivelato con tecniche visualizzanti con la ricostruzione elettronico-digitale di un analogo sciame nel vostro apparato.



incorporato nel bersaglio. Il nostro è pertanto costituito da marmo (bersaglio) alternato a strati di scintillatori, camere proporzionali, tubi a streamer (rivelatori) che permettono la misura dell'energia e della direzione dello sciame adronico. Esso è seguito da uno spettrometro magnetico che permette la ricostruzione del quadrivettore del μ generato negli eventi di Corrente carica. La sua caratteristica principale è una alta risoluzione spaziale che permette di distinguere le differenti topologie degli stati finali. Ad esempio eventi di Corrente Neutra sono distinguibili da quelli di Corrente Carica, rivelando in questi ultimi il μ presente nello stato finale.



CONTINUA

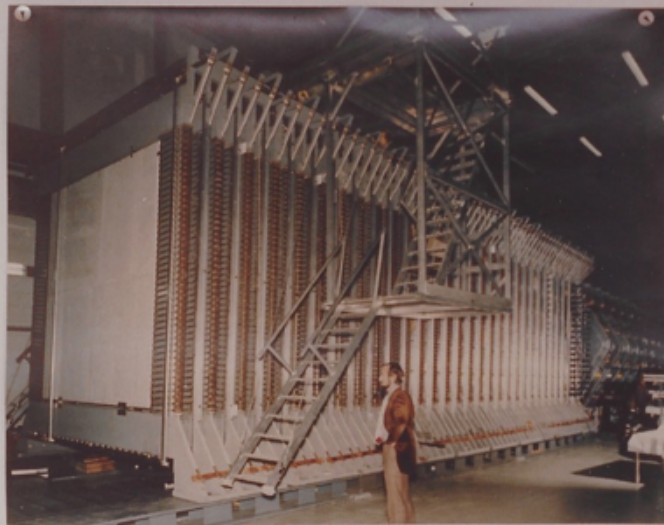
The CHARM concept

CHARM

COLLABORAZIONE CERN HAMBURG AMSTERDAM ROMA MOSCA

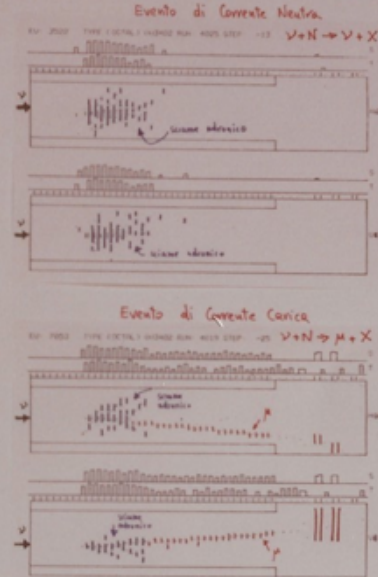
UN ESPERIMENTO PER LA RIVELAZIONE DI NEUTRINI

ROMA : A. Baroncelli, B. Borgia, C. Bosio, A. Capone, U. Dore, F. Ferroni, E. Longo,
L. Luminari, P. Monacelli, F. de Notaristefani, P. Pistilli, C. Santoni, V. Valente



Il programma scientifico di questo esperimento, realizzato presso i Laboratori Internazionali del CERN di Ginevra, è quello di approfondire la problematica delle interazioni deboli e di studiare la struttura del nucleone. L'apparato è stato completato nel 1976; L'attuale programma di misure si estenderà sino al 1984.

L'apparato realizzato dalla collaborazione CHARM è un calorimetro alto a studiare le interazioni prodotte da un fascio di neutrini. Come è noto tali processi hanno una sezione d'urto molto piccola ($\sim 10^{-38} \text{ cm}^2/\text{GeV}$), e richiedono quindi un bersaglio di grande massa per raccogliere un numero di eventi significativo. Ciò impone che il sistema di rivelazione sia

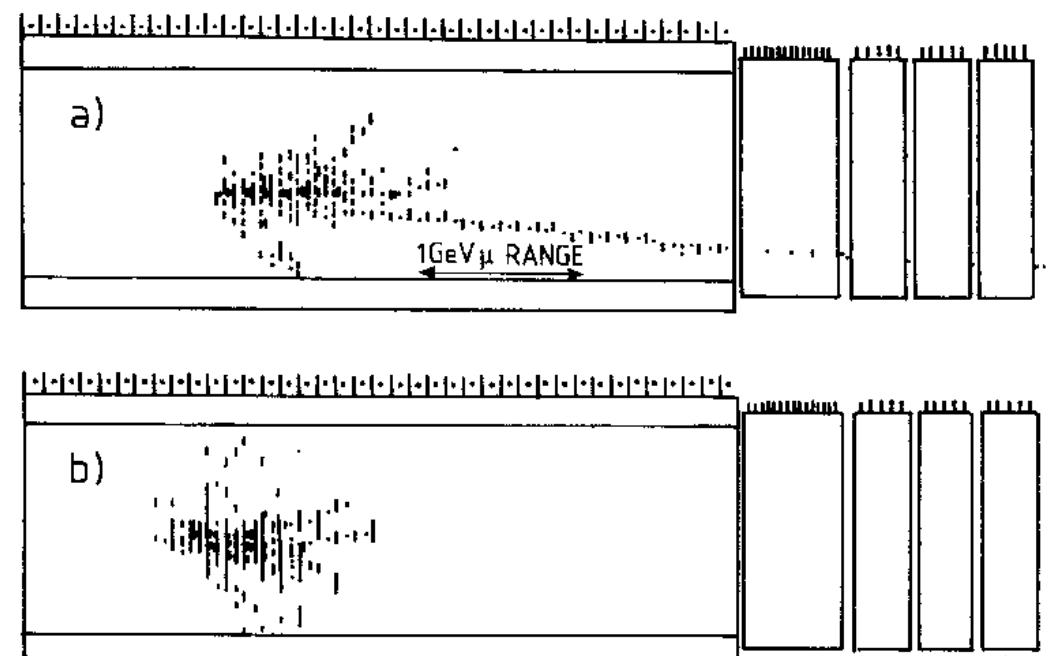


Inoltre l'apparato è in grado di distinguere gli sciami adronici da quelli elettromagnetici e questa proprietà permette lo studio di reazioni rare quali il processo paramente leptonico: $\nu_\mu + e \rightarrow \nu_\mu + e$ da cui si ricava una misura dell'angolo di Weinberg. Nella figura si può confrontare uno sciame e.m. rivelato con tecniche "visualizzanti" con la ricostruzione elettronico-digitale di un



incorporato nel bersaglio. Il nostro calorimetro è pertanto costituito da un insieme di piani di marmo (bersaglio) alternati a scintillatori, camere proporzionali, tubi a streamer (rivelatore) che permettono la misura dell'energia e della direzione dello sciame adronico. Esso è seguito da un calorimetro magnetico che permette la ricostruzione del μ generato negli eventi di corrente carica. La sua caratteristica principale è una alta risoluzione spaziale che permette di distinguere le differenti topologie degli stati finali. Ad esempio eventi di Corrente Neutra sono distinguibili da quelli di Corrente Carica, rivelando in questi ultimi il μ presente nello stato finale.

Its main characteristic is a high spatial resolution, allowing to distinguish different event topologies: e.g., a charged current neutrino interaction is distinguished from a neutral current interaction by the presence of a muon



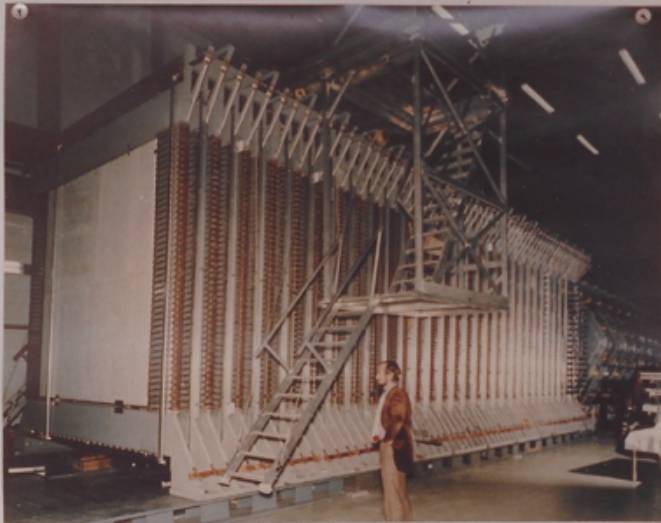
The CHARM concept

CHARM

COLLABORAZIONE CERN HAMBURG AMSTERDAM ROMA MOSCA

UN ESPERIMENTO PER LA RIVELAZIONE DI NEUTRINI

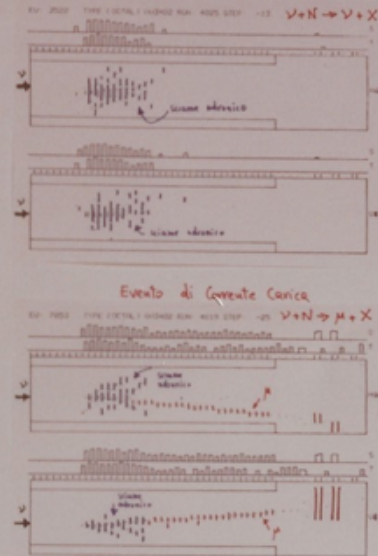
ROMA : A. Baroncelli, B. Borgia, C. Bosio, A. Capone, U. Dore, F. Ferroni, E. Longo,
L. Luminari, P. Monacelli, F. de Notaristefani, P. Pistilli, C. Santoni, V. Valente



Il programma scientifico di questo esperimento, realizzato presso i Laboratori Internazionali del CERN di Ginevra, è quello di approfondire la problematica delle interazioni deboli e di studiare la struttura del nucleone. L'apparato è stato completato nel 1976; L'attuale programma di misure si estenderà sino al 1984.

L'apparato realizzato dalla collaborazione CHARM è un calorimetro alto a studiare le interazioni prodotte da un fascio di neutrini. Come è noto tali processi hanno una sezione d'urto molto piccola ($\sim 10^{-38} \text{ cm}^2/\text{GeV}$), e richiedono quindi un bersaglio di grande massa per raccogliere un numero di eventi significativo. Ciò impone che il sistema di rivelazione sia

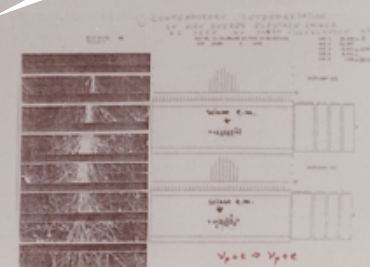
Evento di Corrente Neutra.



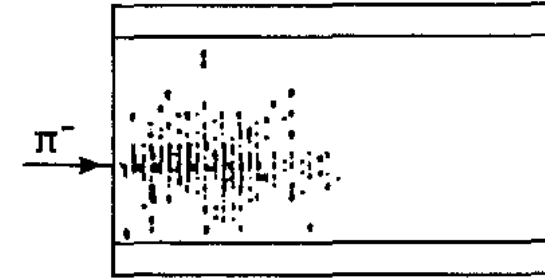
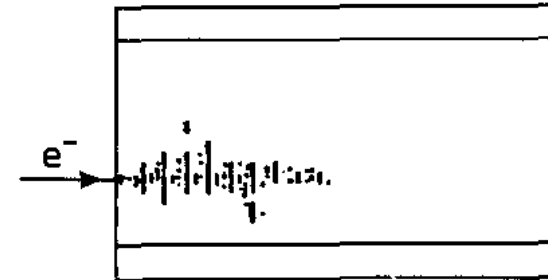
Inoltre l'apparato è in grado di distinguere gli sciami adronici da quelli elettromagnetici e questa proprietà permette lo studio di reazioni rare quali il processo parzialmente leptoneico: $\nu_\mu + e \rightarrow \nu_\mu + e$ da cui si ricava una misura dell'angolo di Weinberg.

Nella figura si può confrontare uno sciame e.m. rivelato con tecniche "visualizzanti"

con la ricostruzione elettronico-digitale di un analogo sciame nel vostro apparato.

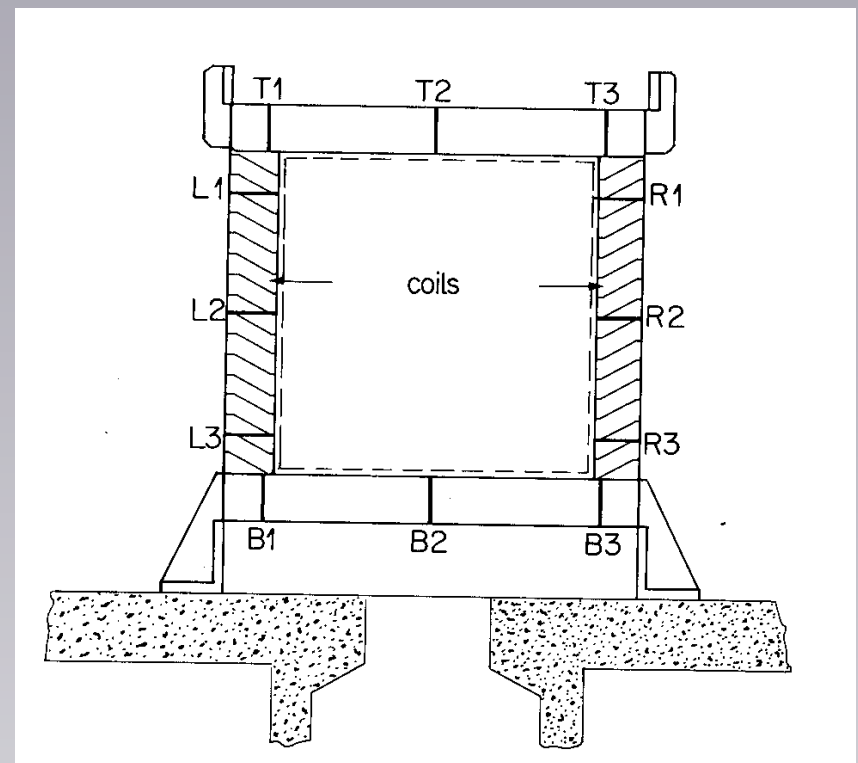
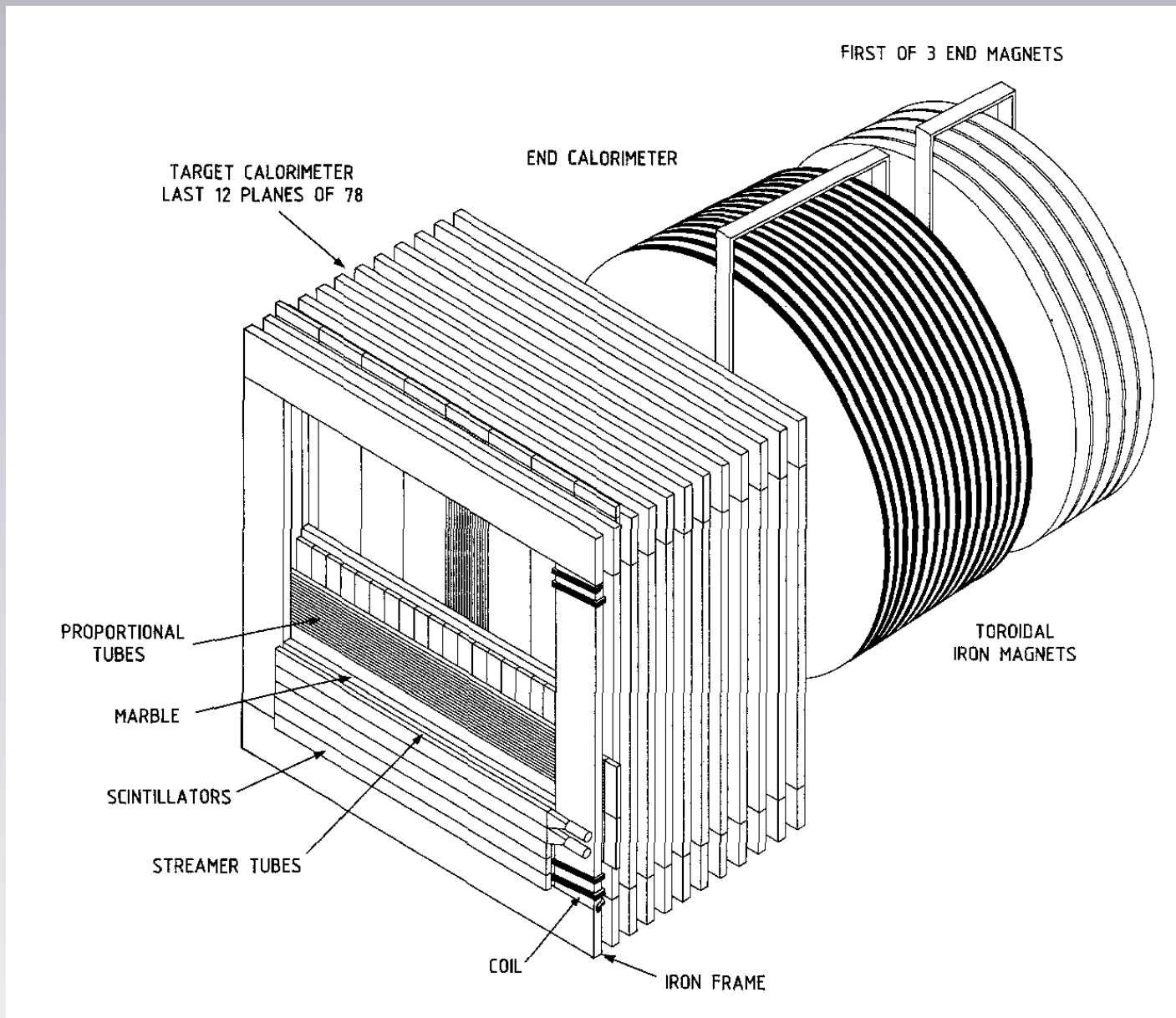


CONTINUA

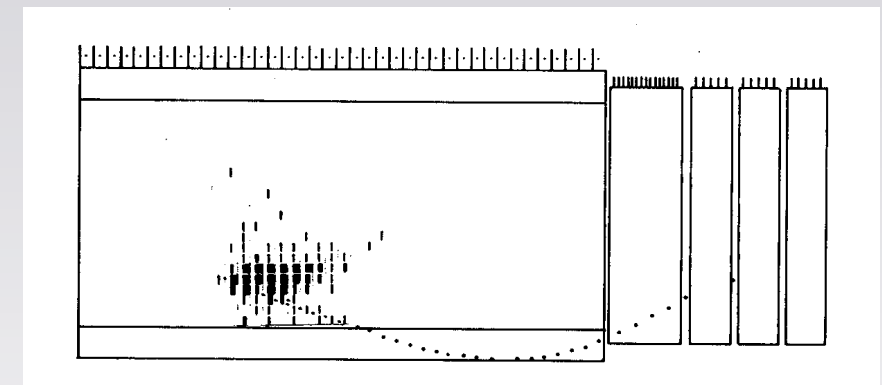


The detector is also able to distinguish hadronic from electromagnetic showers to detect neutrino-electron scattering

The CHARM detector



Iron frame providing either a toroidal field in iron, or a weak dipole field in the calorimeter region



The CHARM competitor

CDHS - WA1

target mass of 500 tons, running from 1976

CHARM - WA18

target mass of 150 tons, running from 1979

The CHARM competitor

CDHS - WA1

target mass of 500 tons, running from 1976

CHARM - WA18

target mass of 150 tons, running from 1979

a cumberson competitor...

CDHS vs CHARM: 3 times the mass, 3 years in advance,
lead by Jack Steinberger...

of course our experiment was better: more ambitious,
more sophisticated, but also more tricky to be tuned

The CHARM competitor

CDHS - WA1

target mass of 500 tons, running from 1976

CHARM - WA18

target mass of 150 tons, running from 1979

a cumberson competitor...

CDHS vs CHARM: 3 times the mass, 3 years in advance,
lead by Jack Steinberger...

of course our experiment was better: more ambitious,
more sophisticated, but also more tricky to be tuned
so, Guido and Jack...

The CHARM physics program

CHARM was a versatile experiment, with many choices:

- WWB vs NBB
- CC vs NC
- leptonic vs semileptonic neutrino interactions
- toroidal field vs dipole

moreover, other experimental configurations became available during the operation period:

- neutrino resulting from SPS beam dump
- a first attempt to observe neutrino oscillations with a far and a near detector

actually, many analyses and studies were going on in parallel...

The CHARM physics results

- 1 **A Precise Determination of the Electroweak Mixing Angle from Semileptonic Neutrino Scattering** Z.Phys. C36 (1987) 611
Cited by 312 records 250+
- 2 **A precise determination of the electroweak mixing angle from semi-leptonic neutrino scattering** Phys.Lett. B177 (1986) 446
Cited by 239 records 100+
- 3 **Experimental Study of Neutral Current and Charged Current Neutrino Cross-Sections** Phys.Lett. B99 (1981) 265
Cited by 190 records 100+
- 4 **Experimental Study of the Nucleon Structure Functions and of the Gluon Distribution from Charged Current Neutrino and anti-neutrinos Interactions** Phys.Lett. B123 (1983) 269
Cited by 150 records 100+
- 5 **A Search for Decays of Heavy Neutrinos in the Mass Range 0.5-{GeV} to 2.8-{GeV}** Phys.Lett. B166 (1986) 473-478
Cited by 119 records 100+
- 6 **Experimental Study of Prompt Neutrino Production in 400-{GeV} Proton - Nucleus Collisions** Phys.Lett. B96 (1980) 435
Cited by 110 records 100+
- 7 **Experimental Results On Neutrino - Electron Scattering** Z.Phys. C41 (1989) 567
Cited by 106 records 100+
- 8 **Experimental Study of Opposite Sign and Same Sign Dimuon Events Produced in Wide Band Neutrino and Anti-neutrino Beams** Phys.Lett. B107 (1981) 241
Cited by 102 records 100+
- 11 **A Search for Oscillations of Muon Neutrinos in an Experiment With $L/E = 0.7\text{-km/GeV}$** Phys.Lett. B142 (1984) 103-110
Cited by 94 records 50+

The weak mixing angle

$$\sin^2 \theta_w = 1 - m_W^2/m_Z^2.$$

- from semileptonic CC vs NC comparison
 - high statistics, quark content to be disentangled
- from purely leptonic, purely NC $\nu_\mu e \rightarrow \nu_\mu e / \nu_\mu e^- \rightarrow \nu_\mu e^-$
 - low statistics, very little systematics

The “semileptonic” mixing angle

From $g_L = 2(I_3 - q \sin^2 \theta_w),$ or $g_L^u = 1 - \frac{4}{3} \sin^2 \theta_w, \quad g_L^d = -1 + \frac{2}{3} \sin^2 \theta_w,$
 $g_R = -2q \sin^2 \theta_w.$ $g_R^u = -\frac{4}{3} \sin^2 \theta_w, \quad g_R^d = \frac{2}{3} \sin^2 \theta_w.$

one can derive

$$d^2 \sigma_{\text{NC}}^{\nu(\bar{\nu})}/dx dy = (\frac{1}{2} - \sin^2 \theta_w + \frac{5}{9} \sin^4 \theta_w) d^2 \sigma_{\text{CC}}^{\nu(\bar{\nu})}/dx dy + \frac{5}{9} \sin^4 \theta_w d^2 \sigma_{\text{CC}}^{\nu(\nu)}/dx dy.$$

so that $R^\nu = \sigma_{\text{NC}}^\nu / \sigma_{\text{CC}}^\nu = \frac{1}{2} - \sin^2 \theta_w + \frac{5}{9} \sin^4 \theta_w (1 + r),$
 where $r = \sigma_{\text{CC}}^{\bar{\nu}} / \sigma_{\text{CC}}^\nu.$

CHARM final result:

$$\sin^2 \theta_w = 0.236 + 0.012(m_c - 1.5) \pm 0.005(\text{exp.}) \pm 0.003(\text{theor.}),$$

compared with other
contemporary
neutrino results:

Group	Method	$\sin^2 \theta_w(\text{exp.})$
FMMF [29]	Event-by-event	0.246 ± 0.016
CCFR [31]	Event length	0.239 ± 0.010
CDHS [30]	Event length	0.225 ± 0.005
CHARM [32]	Event-by-event	0.236 ± 0.005

Results from $\nu_\mu e \rightarrow \nu_\mu e$

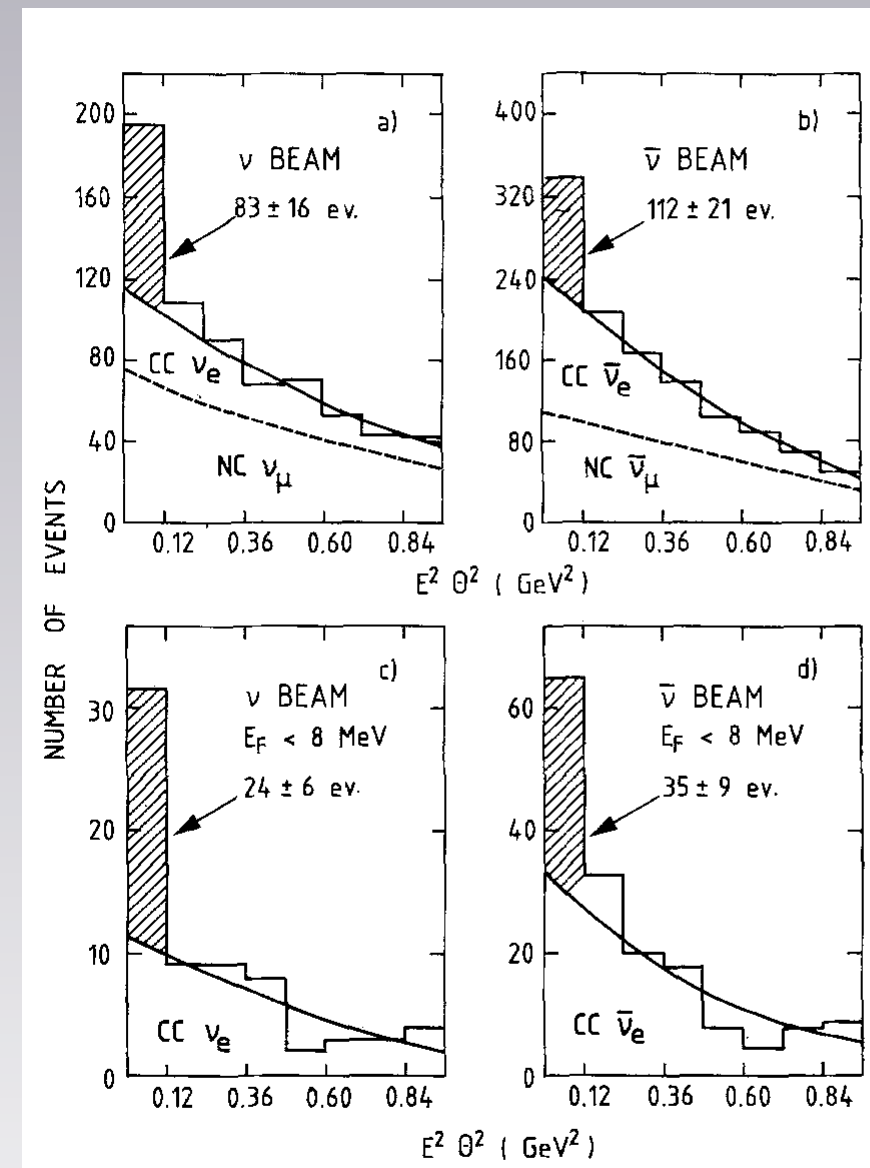
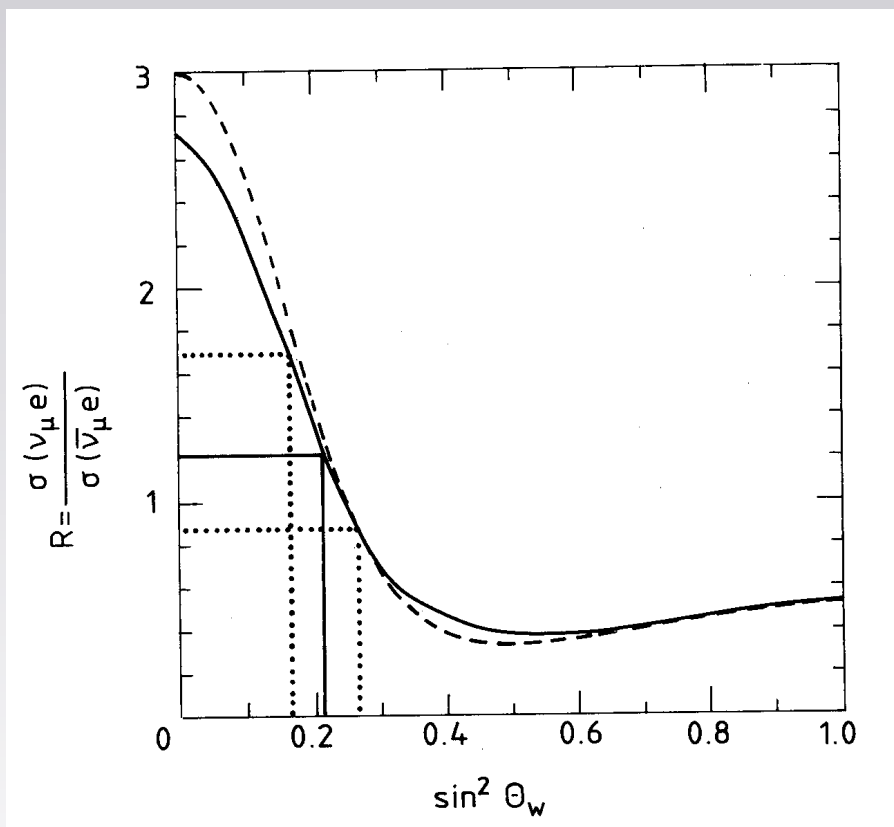
WBB exposure

select e.m. showers

measure the shower direction

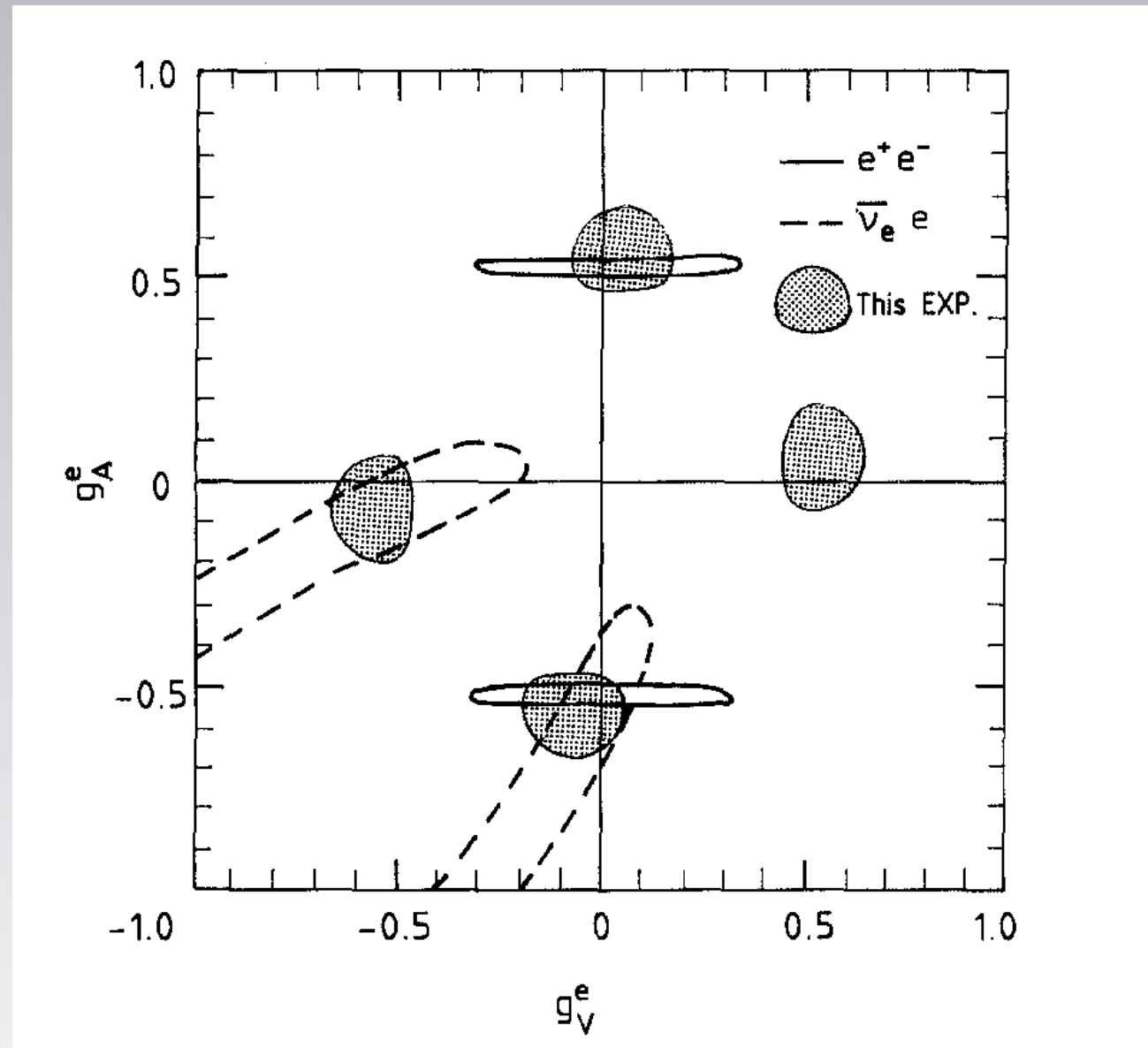
83 neutrino,

112 antineutrino events

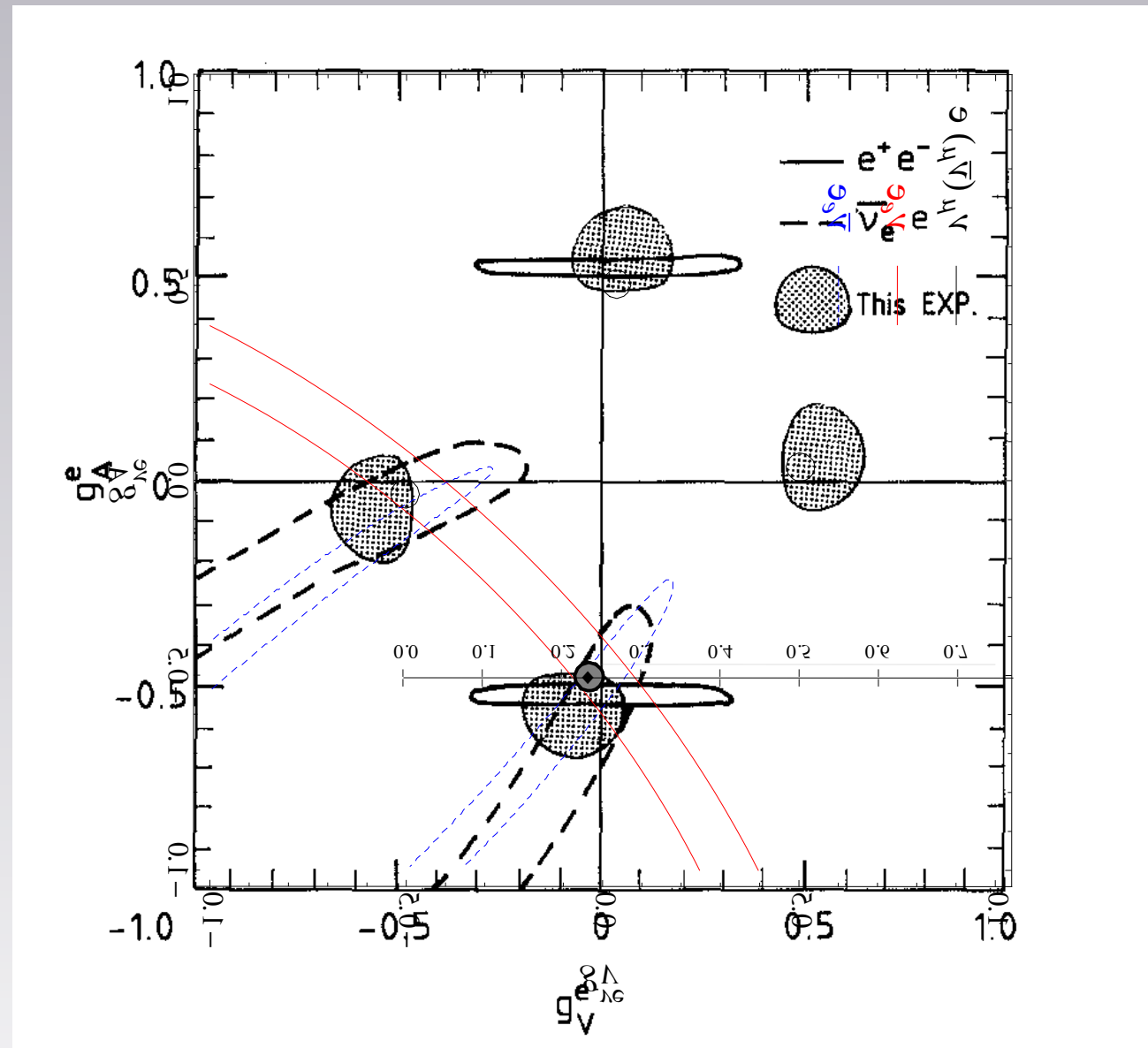


$$\sin^2 \theta_w = 0.211 \pm 0.037$$

Axial and vector e couplings



Axial and vector e couplings today



Nucleon structure functions and the gluon

CC from WBB exposure

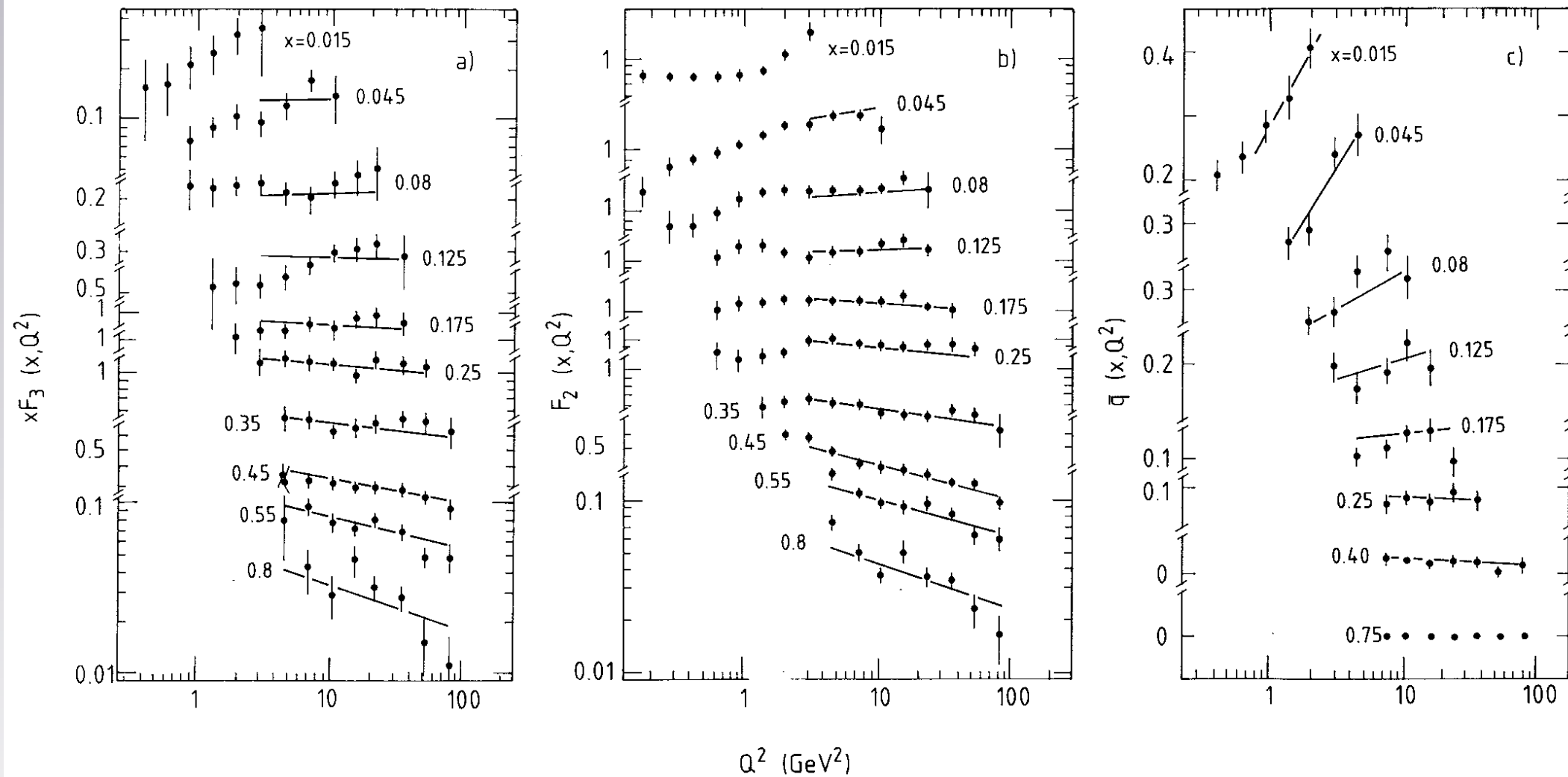
50000 neutrino, 110000 antineutrino interactions

Hadronic shower energies down to 2 GeV

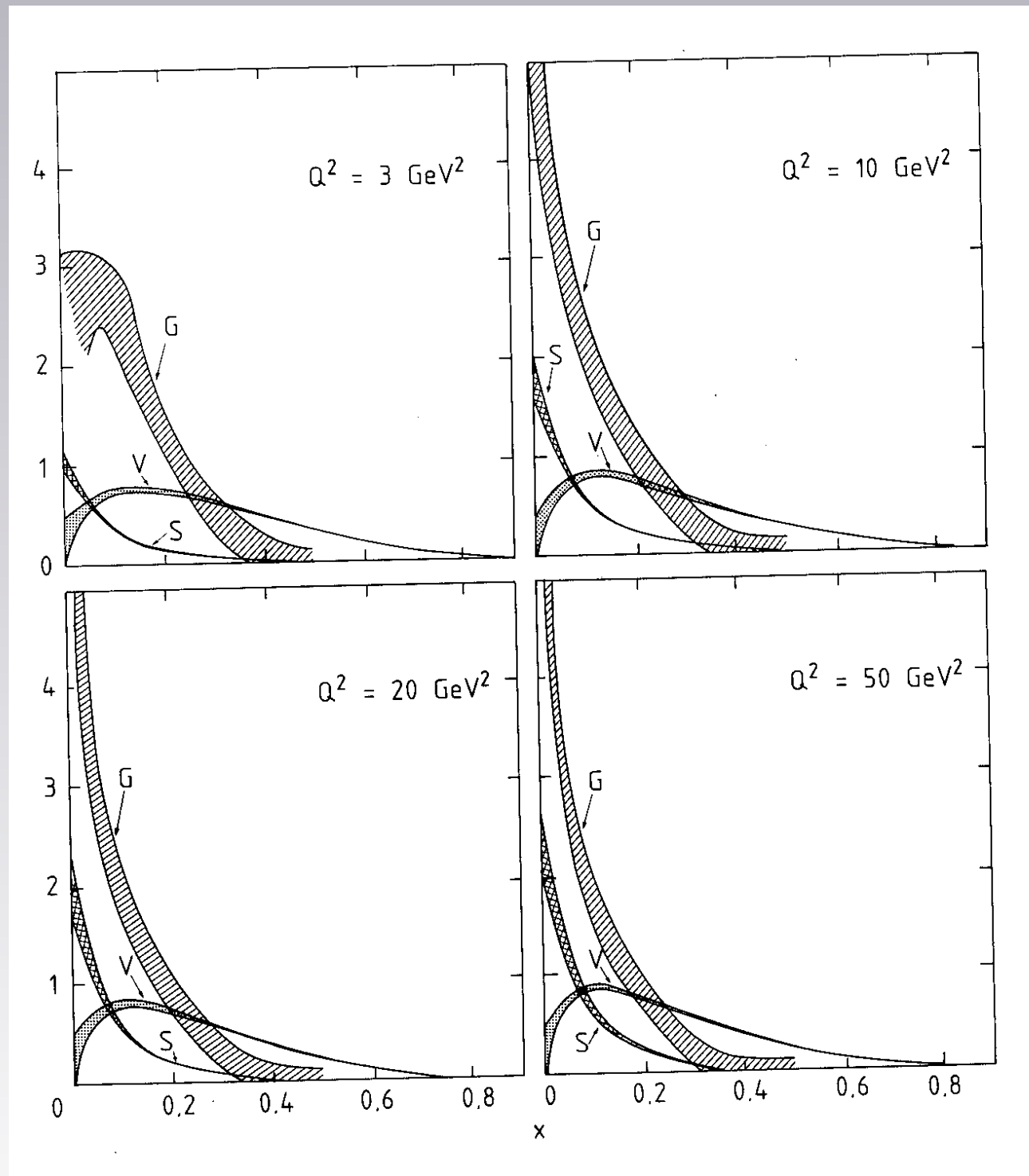
Muon momentum down to 1 GeV/c

Model independent unfolding of detector resolutions

Nucleon structure functions and the gluon



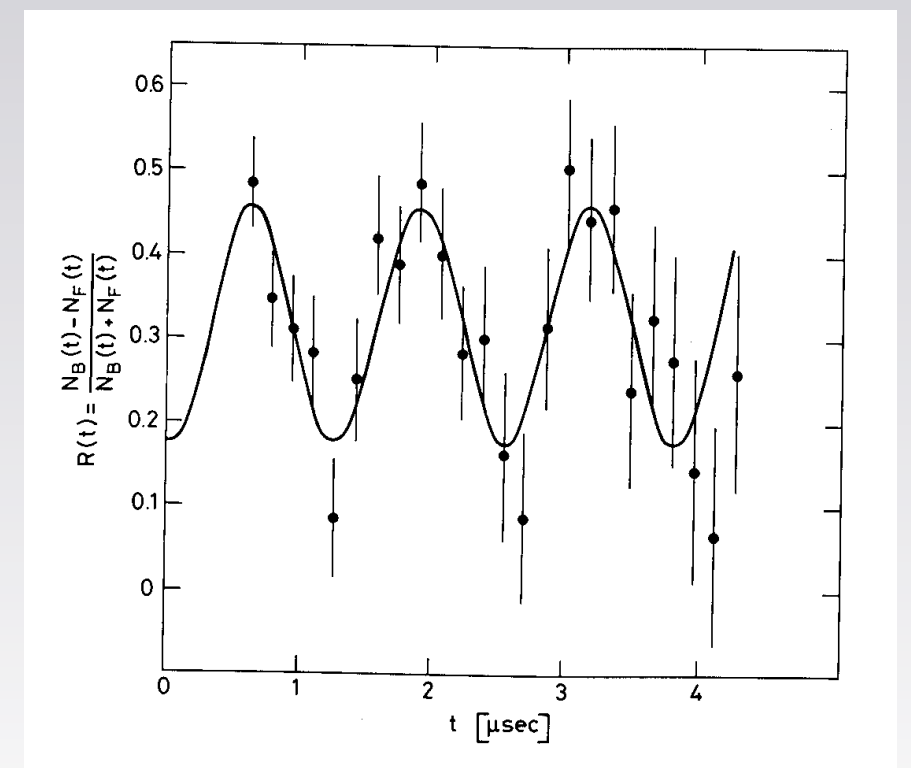
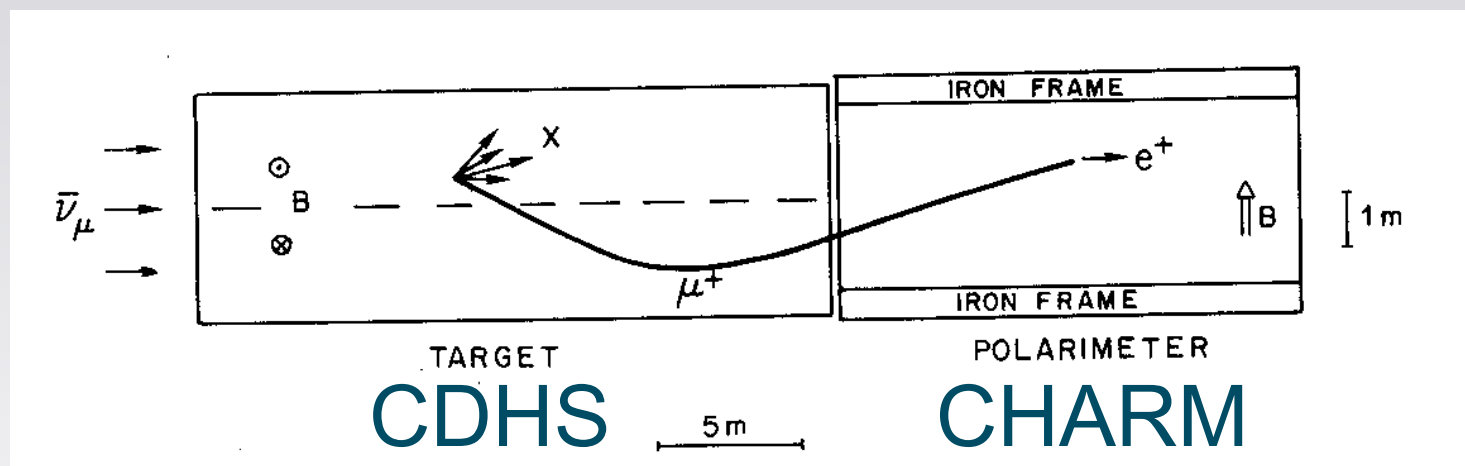
Nucleon structure functions and the gluon



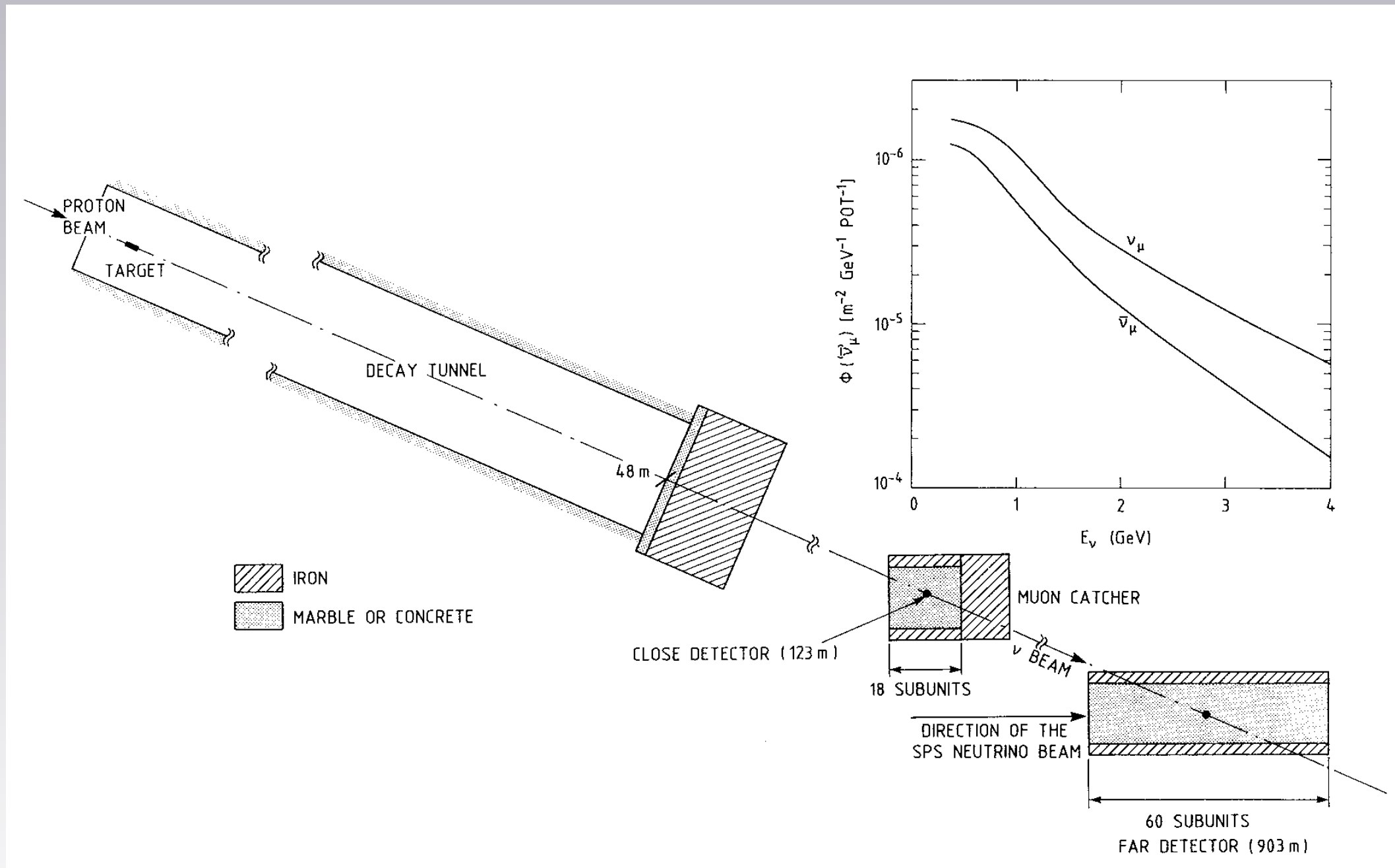
Muon polarisation

Parity violation in π - μ -e decay chain, measuring the longitudinal polarization of muons by precessing the muon spin in a magnetic field (Friedman and Telegdi 1957; Garwin, Lederman and Weinrich 1957)

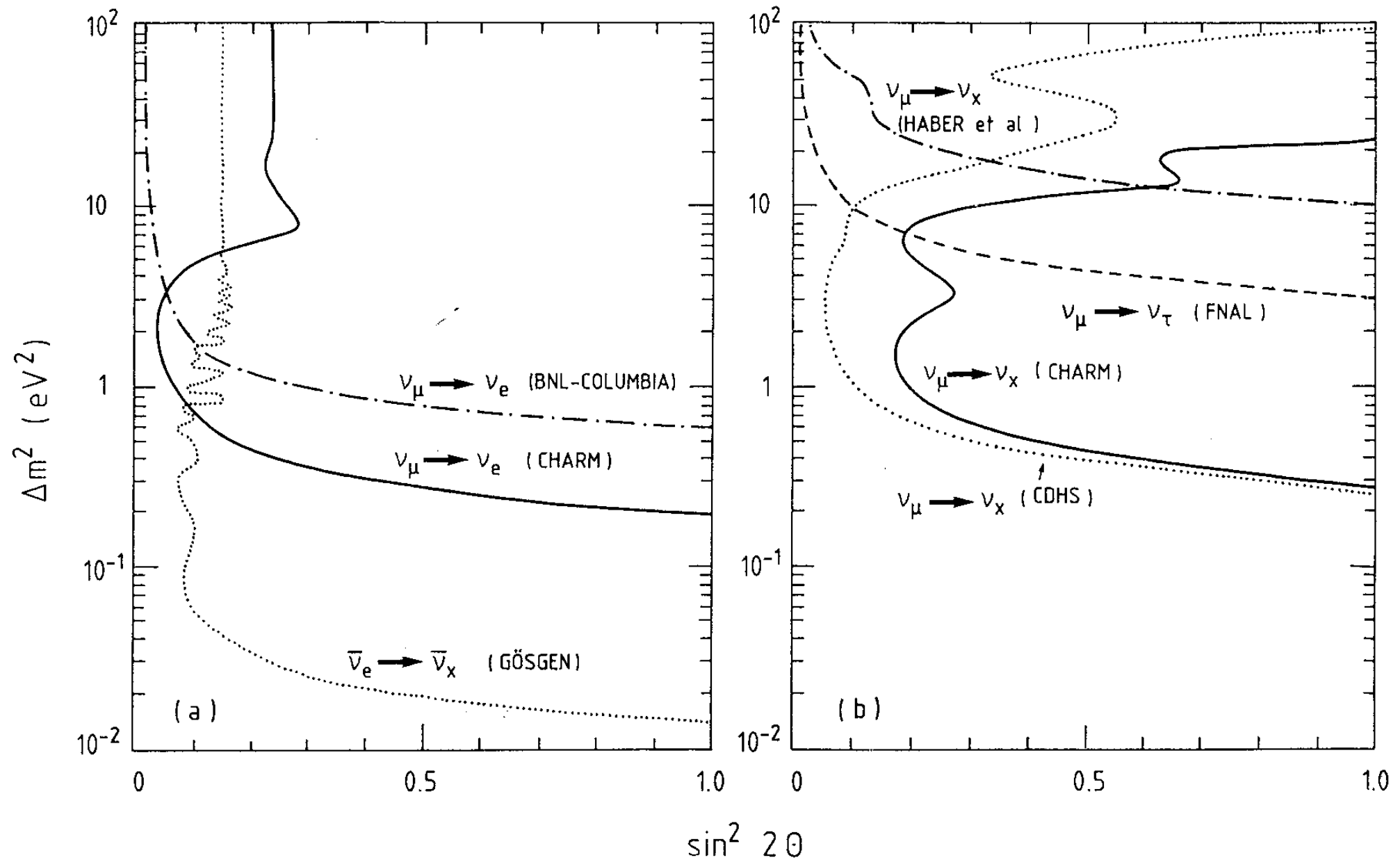
CHARM repeated the measurement for muons produced in neutrino interactions, using its dipole field configuration



The first “two-detectors” experiment on neutrino oscillations



The first “two-detectors” experiment on neutrino oscillations



The legacy of CHARM collaboration

The legacy of CHARM collaboration

- 40 papers (+ 20 conference proc.) from 1979 to 1989...

The legacy of CHARM collaboration

- 40 papers (+ 20 conference proc.) from 1979 to 1989...
...some of them still quoted nowadays

The legacy of CHARM collaboration

- 40 papers (+ 20 conference proc.) from 1979 to 1989...
...some of them still quoted nowadays
- H index of 28...

The legacy of CHARM collaboration

- 40 papers (+ 20 conference proc.) from 1979 to 1989...
...some of them still quoted nowadays
- H index of 28...
...to be compared to 32 of CDHS!

The legacy of CHARM collaboration

- 40 papers (+ 20 conference proc.) from 1979 to 1989...
...some of them still quoted nowadays
- H index of 28...
...to be compared to 32 of CDHS!
- It has been my first big experiment (though 10^2 times smaller than today)

The legacy of CHARM collaboration

- 40 papers (+ 20 conference proc.) from 1979 to 1989...
...some of them still quoted nowadays
- H index of 28...
...to be compared to 32 of CDHS!
- It has been my first big experiment (though 10^2 times smaller than today)
- For a young physicist a unique opportunity to work with distinguished physicists who taught me a lot

The legacy of CHARM collaboration

- 40 papers (+ 20 conference proc.) from 1979 to 1989...
...some of them still quoted nowadays
- H index of 28...
...to be compared to 32 of CDHS!
- It has been my first big experiment (though 10^2 times smaller than today)
- For a young physicist a unique opportunity to work with distinguished physicists who taught me a lot
- among them, Guido was a very special one, never attracted by leadership or competition, driven only by scientific curiosity and intellectual honesty, the first who made me feel like a physicist, rather than a pupil...

The legacy of CHARM collaboration

- 40 papers (+ 20 conference proc.) from 1979 to 1989...
...some of them still quoted nowadays
- H index of 28...
...to be compared to 32 of CDHS!
- It has been my first big experiment (though 10^2 times smaller than today)
- For a young physicist a unique opportunity to work with distinguished physicists who taught me a lot
- among them, Guido was a very special one, never attracted by leadership or competition, driven only by scientific curiosity and intellectual honesty, the first who made me feel like a physicist, rather than a pupil...
- ...I owe him a great deal

...happy birthday, Guido!

Prompt neutrino production

Same sign and opposite sign muon pair production

CC charm production

$$\nu_\mu + d \rightarrow \mu^- + c \quad \hookrightarrow \mu^+ + \nu_\mu + s(d)$$

$$\nu_\mu + s \rightarrow \mu^- + c \quad \hookrightarrow \mu^+ + \nu_\mu + s(d)$$

$$\bar{\nu}_\mu + \bar{s} \rightarrow \mu^+ + \bar{c} \quad \hookrightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu + \bar{s}(\bar{d})$$