Come si misura la diffusione profondamente anelastica

M. Arneodo
Universita' del Piemonte Orientale e INFN Torino, 28 maggio 2004

1. Introduzione sulla diffusione profondamente anelastica

2. Lo stato dell'arte: collisioni elettrone-protone con HERA a DESY
   a) il collider HERA
   b) il rivelatore ZEUS
   c) come si misura la sezione d'urto
   d) come si estraggono le funzioni di struttura F_2 e R

3. Un esperimento a bersaglio fisso degli anni 80 al CERN

4. I primi esperimenti a SLAC

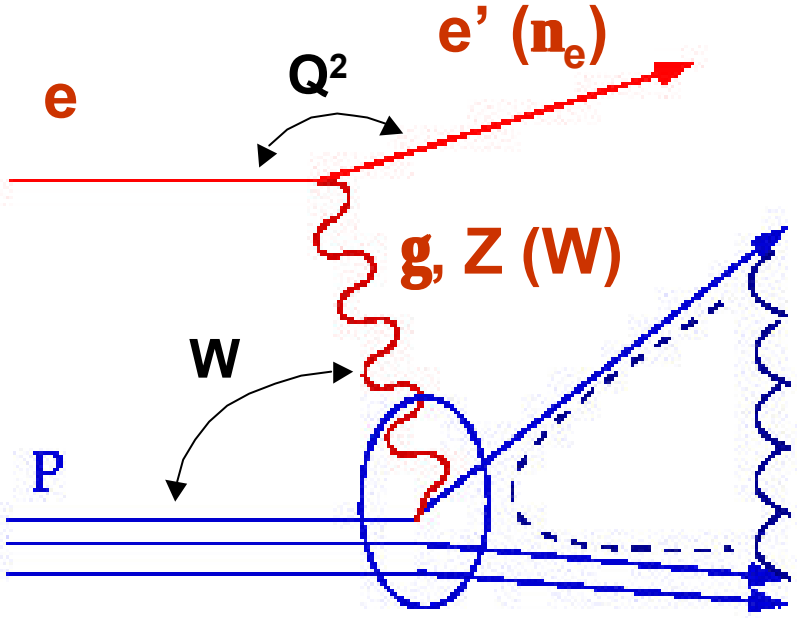
NB (Quasi) solo corrente neutra, scambio di fotoni

Introduzione:

- definizione delle variabili
- forma della sezione d'urto
- definizione di F_2, R
- risultati recenti

(Nulla di nuovo per ora)

Diffusione profondamente anelastica o Deep Inelastic Scattering (DIS)



N.B. gli elettroni si accoppiano a fotoni, ma anche a Z, W – in particolare per valori alti di Q^2

In un sistema in cui il protone e' veloce (sistema di Breit):

Q^2 = virtualita' del fotone = - (4-impulso scambiato al vertice e)^2 = risoluzione

W = energia nel centro di massa fotone-protone

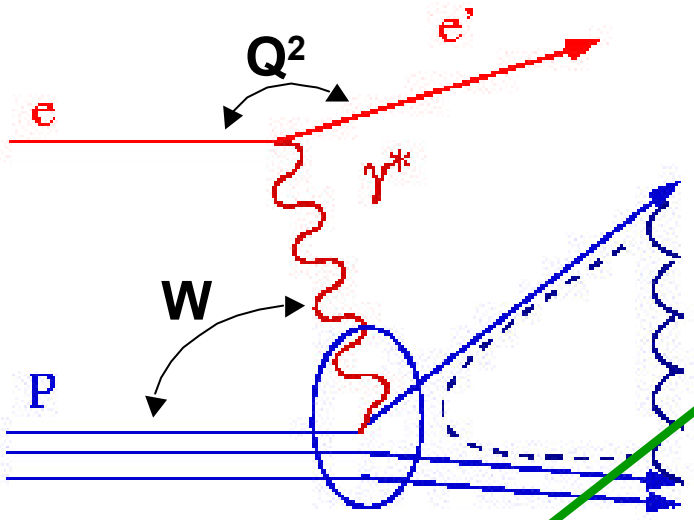
x = variabile di Bjorken = frazione dell'impulso del protone portata dal quark colpito $=Q^2/(W^2+Q^2)$

y = $W^2/s=Q^2/sx$

s = (energia nel centro di massa elettrone-protone)^2

Correnti neutre, scambio di fotoni

Per $Q^2 << M_Z^2$:



Propagatore del fotone

Contiene informazioni sulla struttura del protone

$$\frac{d^2s}{dxdQ^2} = \frac{4pa^2}{xQ^4}\left\{1 - y + \frac{y^2}{2[1+R(x,Q^2)]}\right\}F_2(x,Q^2)$$

$$\mathbf{F_2 = S_i[e_i^2 \times f_i(x,Q^2)]}$$

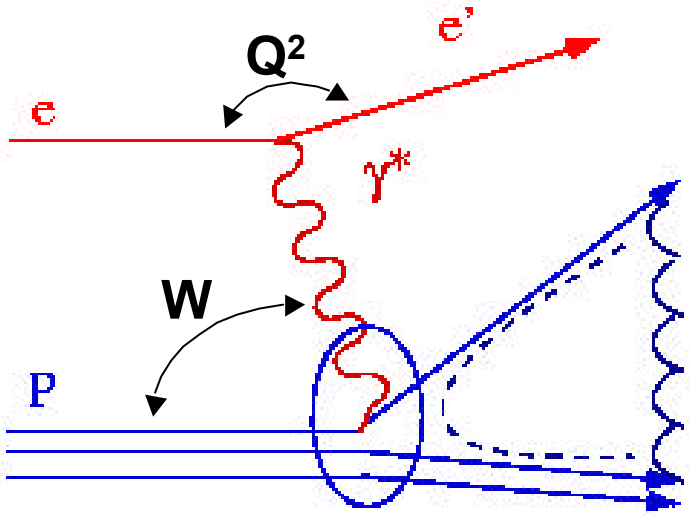
$f_i(x,Q^2)$=probabilita' che il quark di tipo i abbia impulso tra x e x+dx ("densita' partonica")

e_i=carica del quark di tipo i

Viene sondata la struttura partonica del protone

σ_L, σ_T, R, F_L

Per $Q^2 << M_Z^2$:



Flusso di fotoni polarizzati trasversalmente

$$\frac{d^2\sigma}{dxdQ^2} = \Gamma_T(x,Q^2)\sigma_T + \Gamma_L(x,Q^2)\sigma_L$$

Sezione d'urto per assorbimento di fotoni virtuali polarizzati trasversalmente

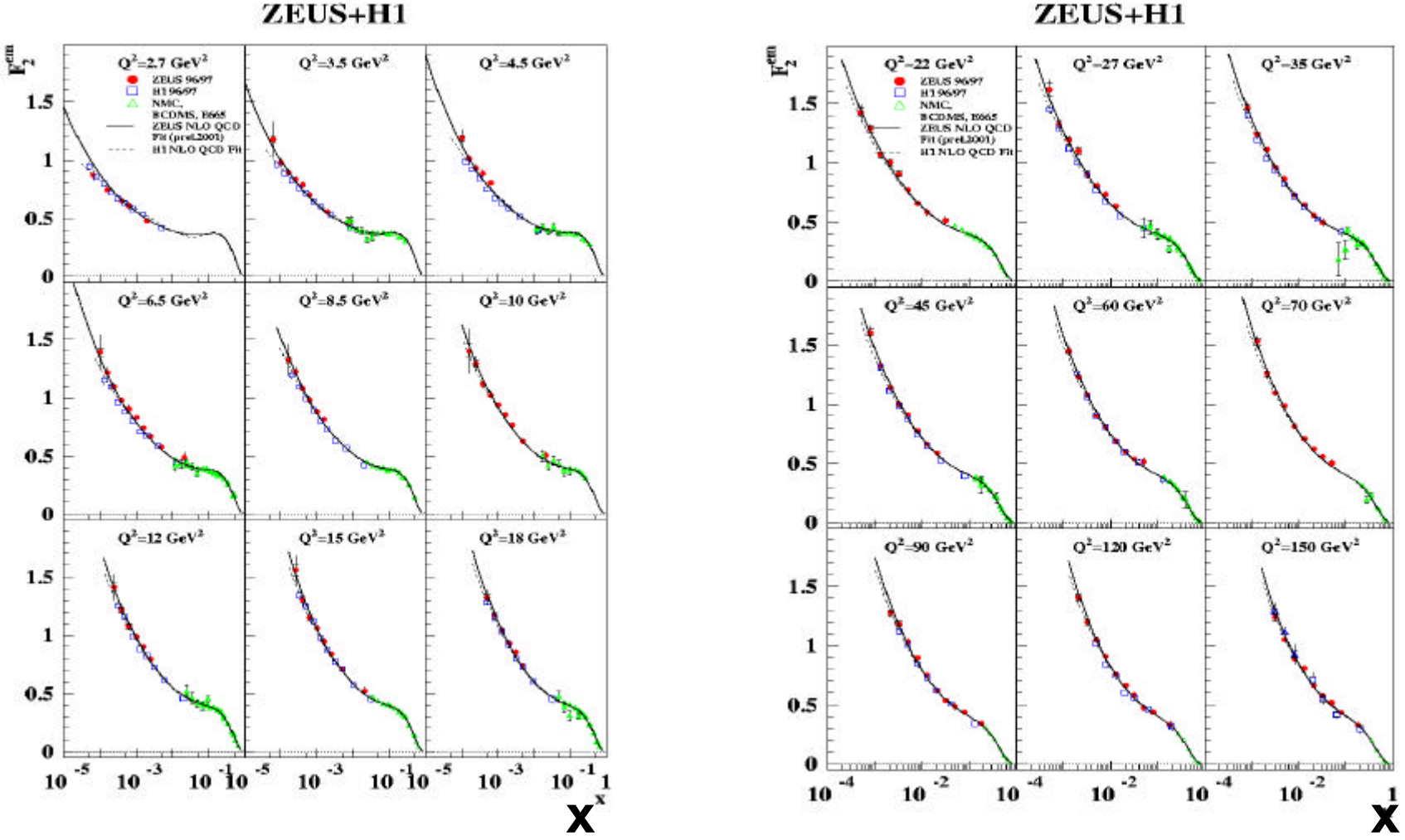
Flusso di fotoni polarizzati longitudinalmente

Sezione d'urto per assorbimento di fotoni virtuali polarizzati longitudinalmente

$R = \sigma_L/\sigma_T = F_L/(F_2-F_L)$

$R \to 0$ per Q^2, W grandi – se i quark hanno spin 1/2

F_2 vs x

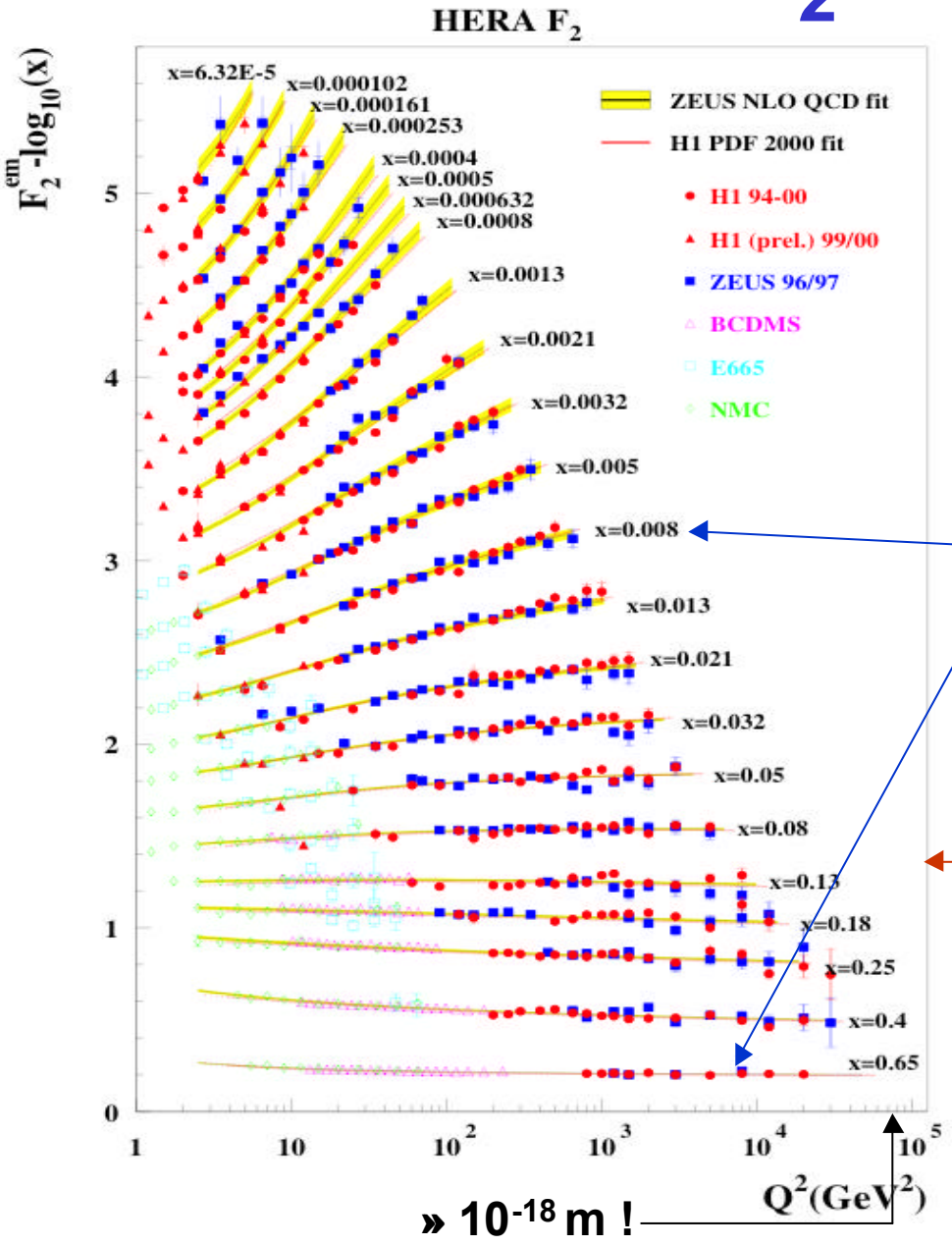


Q^2 = virtualita' del fotone = - (4-impulso scambiato al vertice e)^2 = risoluzione

x = variabile di Bjorken = frazione dell'impulso del protone portata dal quark colpito

Forte crescita a bassi x !

F_2 vs Q^2

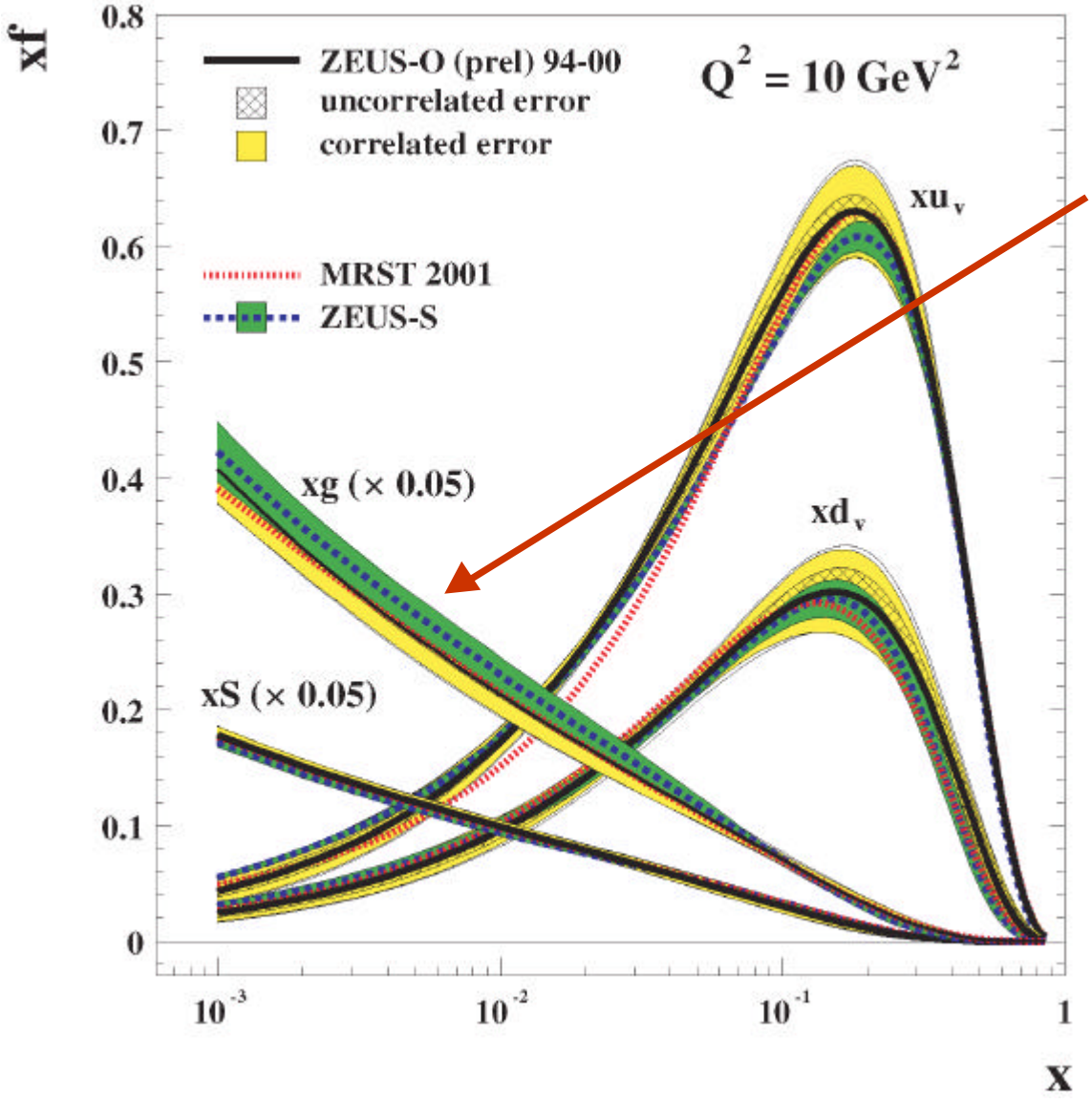


Violazioni di scaling

scaling

QCD prevede l'evoluzione di F_2 con Q^2. Puo' essere utilizzata per ottenere la distribuzione di quark e gluoni nel protone

Distribuzioni partoniche



La densita' di gluoni e quark del mare 'esplode' a basso x, forse uno dei risultati piu' significativi di HERA.

Ingredienti per la sezione d'urto

Per ottenere $d\sigma/dxdQ^2$ e' necessario:

- **Un fascio di elettroni (o positroni o muoni)**
- **un fascio di protoni, o un bersaglio di protoni (o protoni e neutroni)**
- **misurare, per ogni evento, x e Q^2**
- **da un adeguato campione di eventi, estrarre $d\sigma/dxdQ^2$**

Per quest'ultima sono anche necessari:

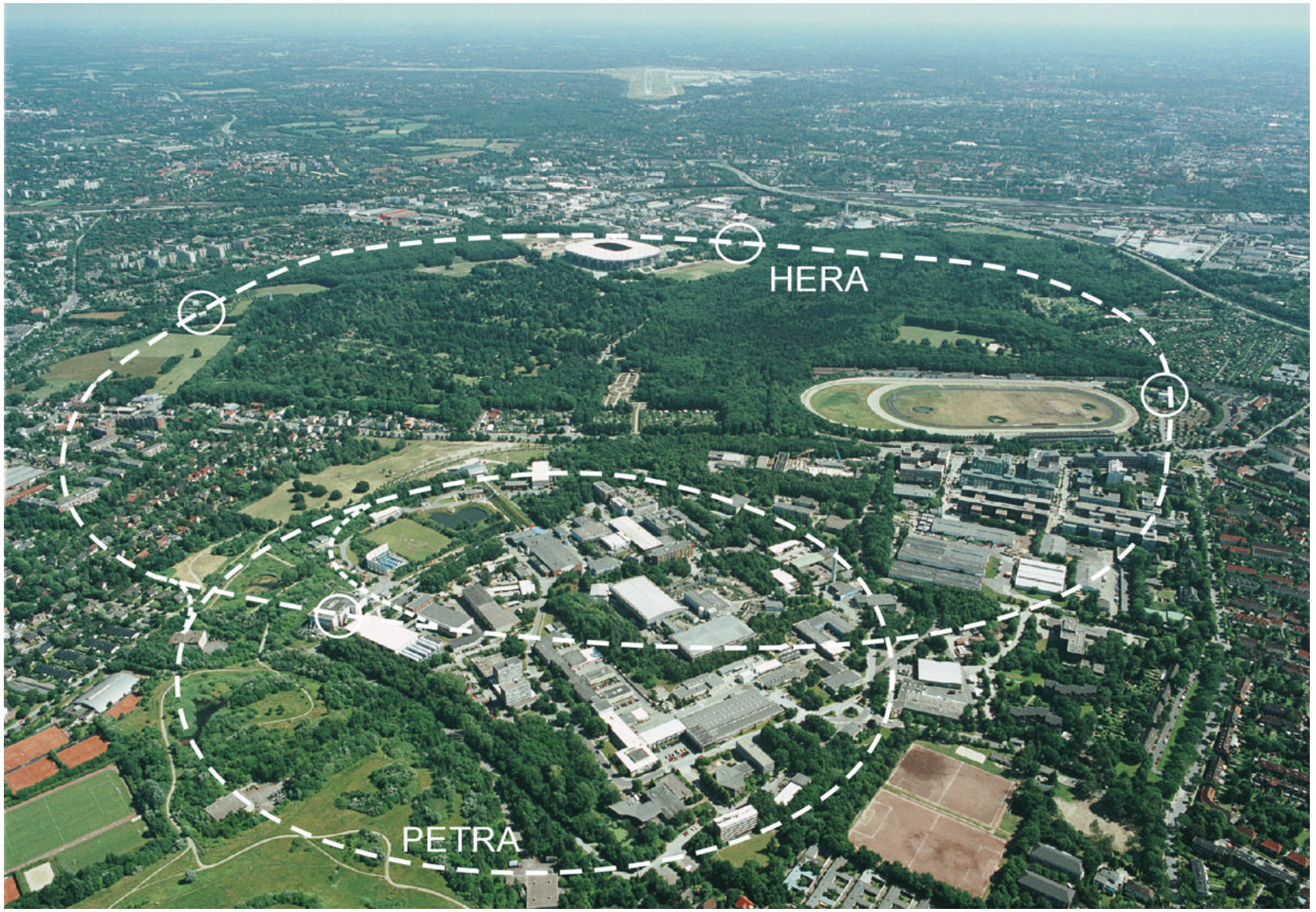
- **Accettanza dell'apparato**
- **Luminosita'**
- **Correzioni radiative**
- **Sottrazione dei processi di fondo**

Come si misura la diffusione profondamente anelastica al collider ep HERA a DESY

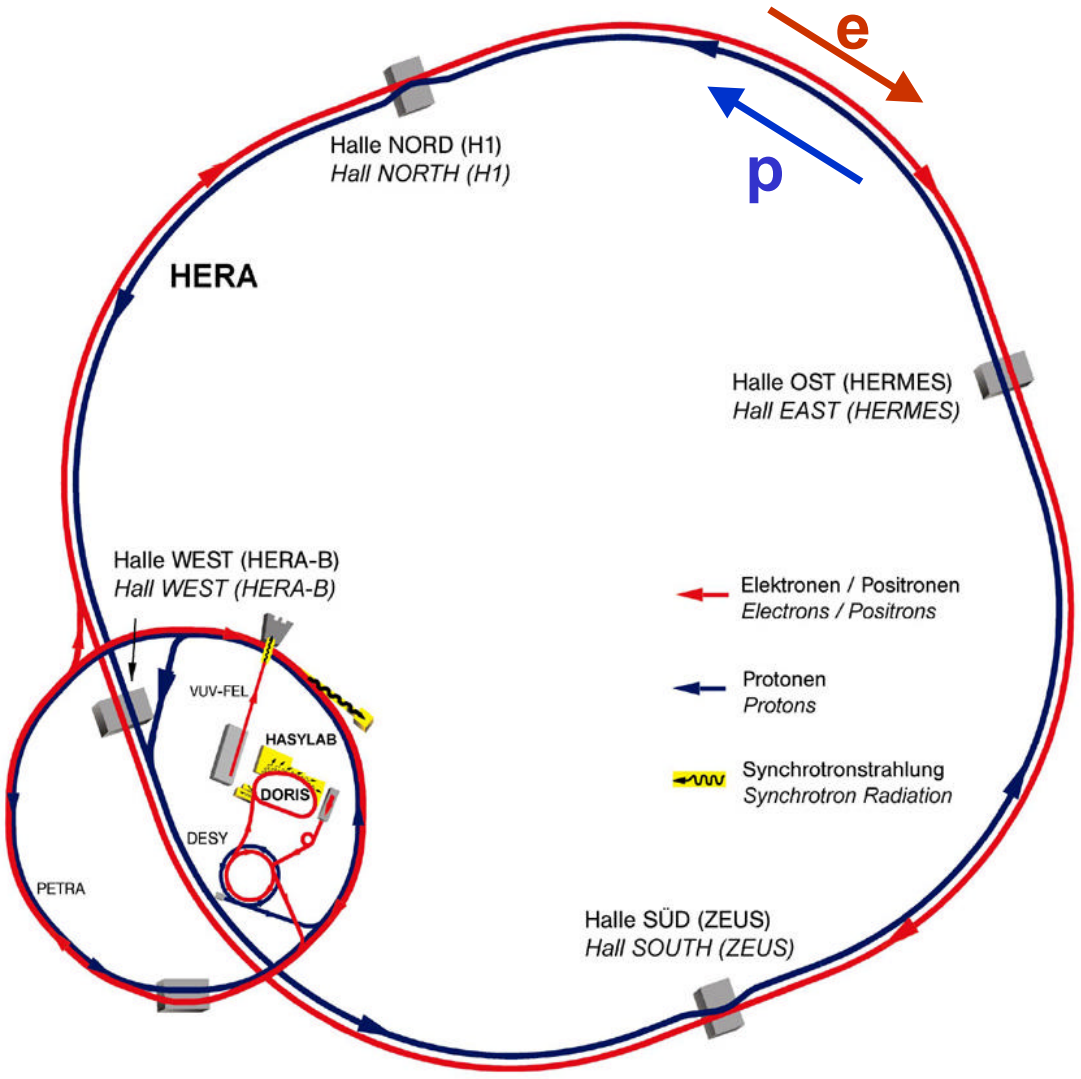
1) L'acceleratore HERA

2) Il rivelatore ZEUS

DESY ad Amburgo



HERA



Energia protoni = 920 GeV
Energia elettroni= 27.5 GeV
Ös=318 GeV

corrente p » 100 mA
corrente e » 60 mA

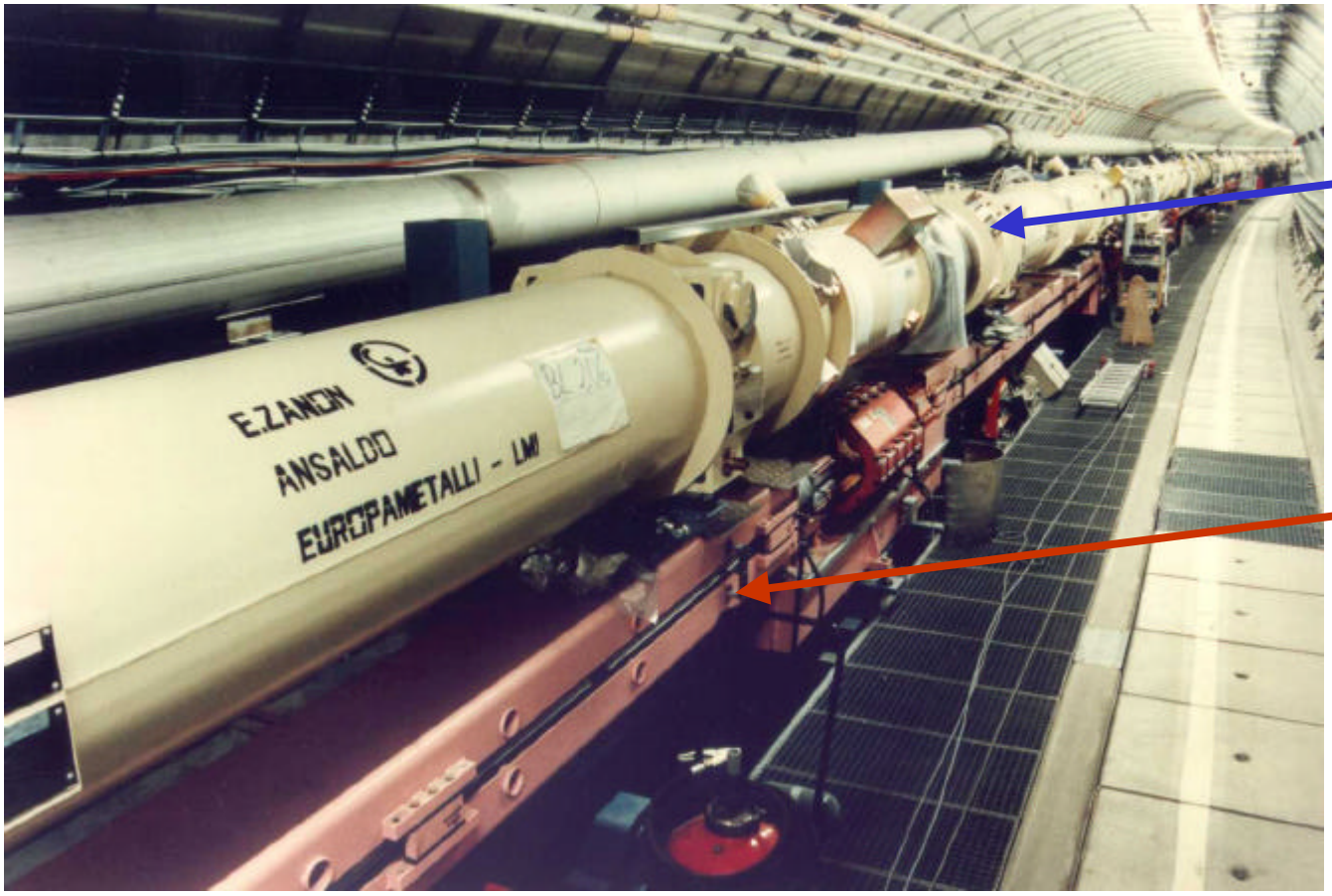
luminosita' istantanea max
» 10^{31} cm^{-2} s^{-1}

i fasci si incontrano ogni 96 ns !

Unico collider ep al mondo, in funzione dal 1992. Programma approvato fino al 2007

Puo' usare elettroni o positroni

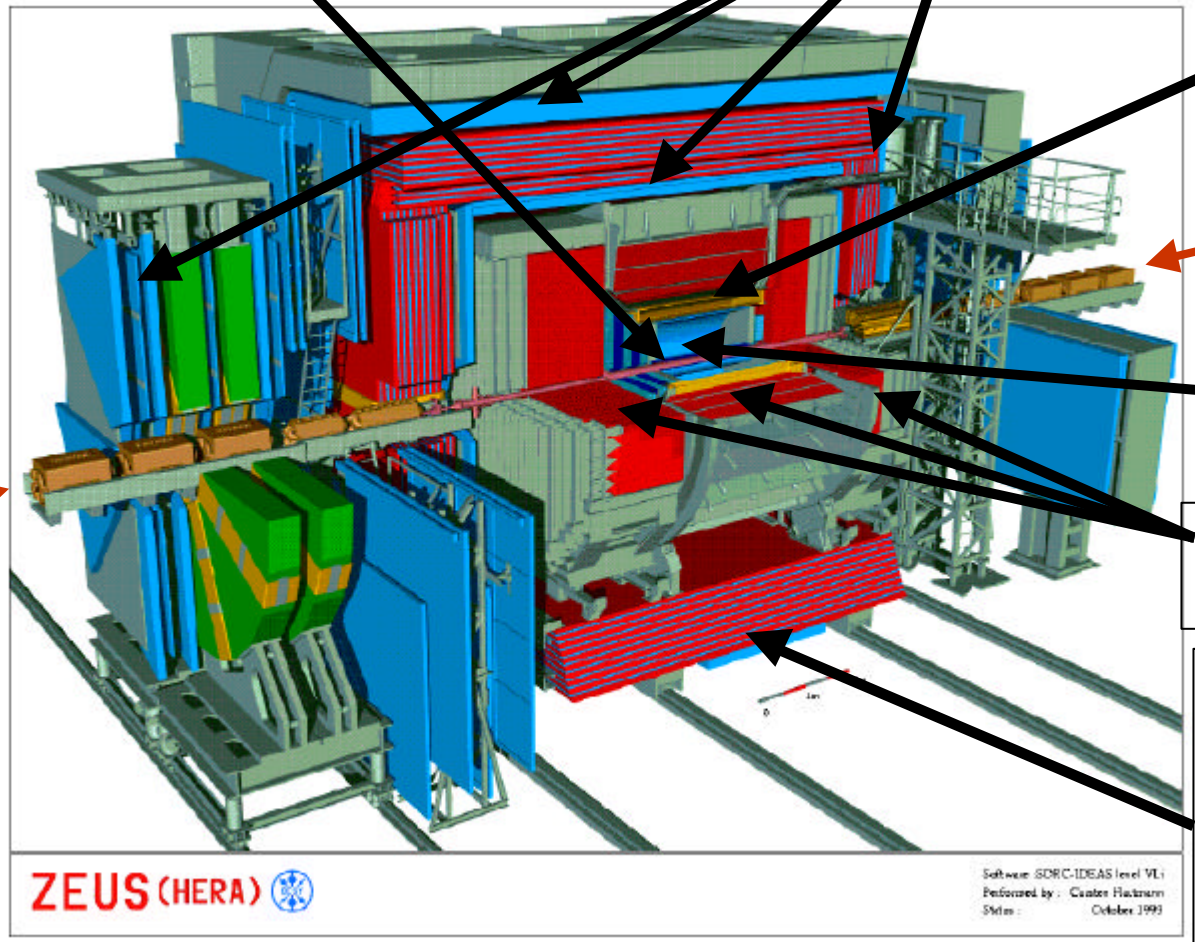
HERA



Protoni 920 GeV (magneti superconduttori)

Elettroni o positroni 27.5 GeV (magneti convenzionali)

Il rivelatore ZEUS



Micro-vertex detector (rivelatore al silicio)

Camere per muoni (tubi a streamer)

Solenoide superconduttore (1.4 T)

p

e

Central Tracking Detector (camera a drift)

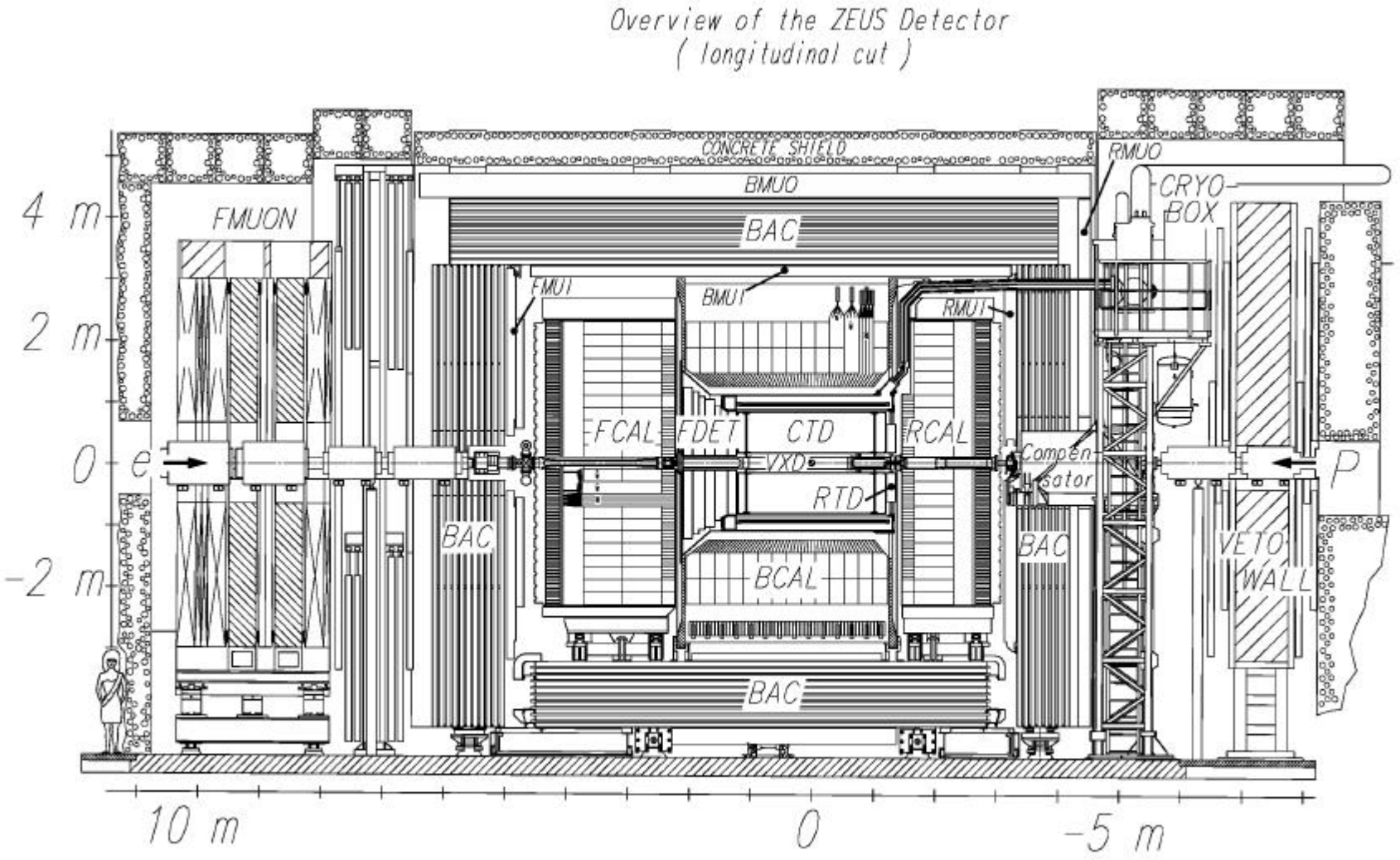
Calorimetro a uranio e scintillatore

Fe per il ritorno del flusso di B, con camere (fa da cal. per sciami non contenuti dal cal. a uranio)

Il rivelatore ZEUS

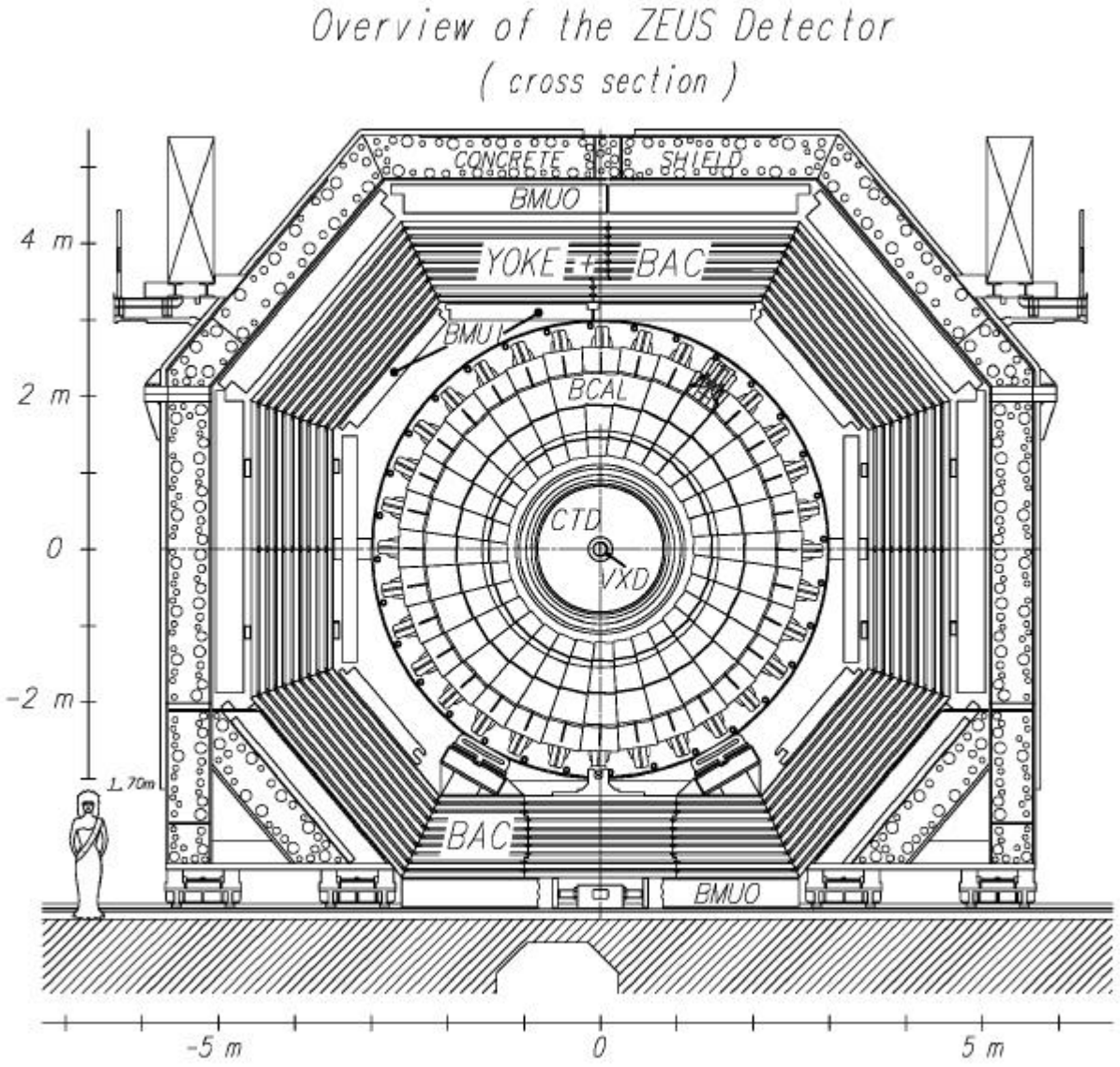
- Particelle cariche rivelate nel rivelatore di micro-vertice (rivelatori al Si, risoluzione » 50 mm)
- La curvatura delle particelle cariche nel campo B solenoidale di 1.4 T e' misurata dal Central Tracking Detector (CTD), camera a drift. Dalla curvatura si risale all'impulso
- Elettroni, adroni carichi e neutri, fotoni vengono assorbiti dal calorimetro a Uranio-scintillatore (CAL). La loro energia viene misurata con risoluzione DE/E»18%/ÖE (sciami e-m) e DE/E»35%/ÖE (sciami adronici). E' un calorimetro compensante: stessa risposta per sciami e-m e adronici
- Sciami adronici di altissima energia, non contenuti in CAL, vengono misurati dal Backing Calorimeter (BAC), Fe+camere a filo. Il Fe serve anche da giogo di ritorno del flusso di B
- Le uniche particelle cariche che attraversano i calorimetri sono muoni (alto potere di penetrazione !). Sono rivelati da tubi a streamer prima e dopo il BAC

Il rivelatore ZEUS

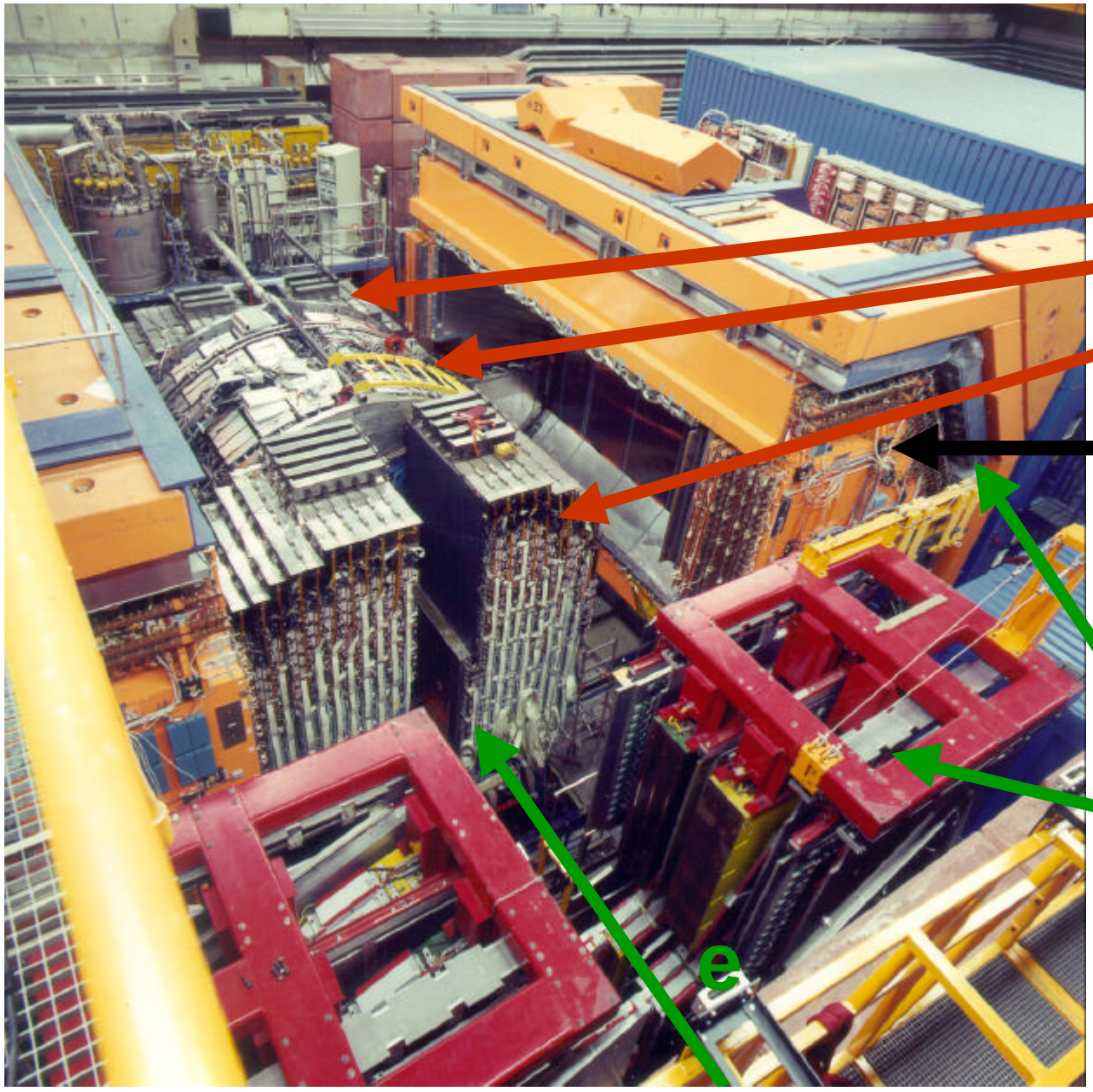


Si noti l'asimmetria ! (E_p >>E_e)

Il rivelatore ZEUS



Il rivelatore ZEUS (aperto...)

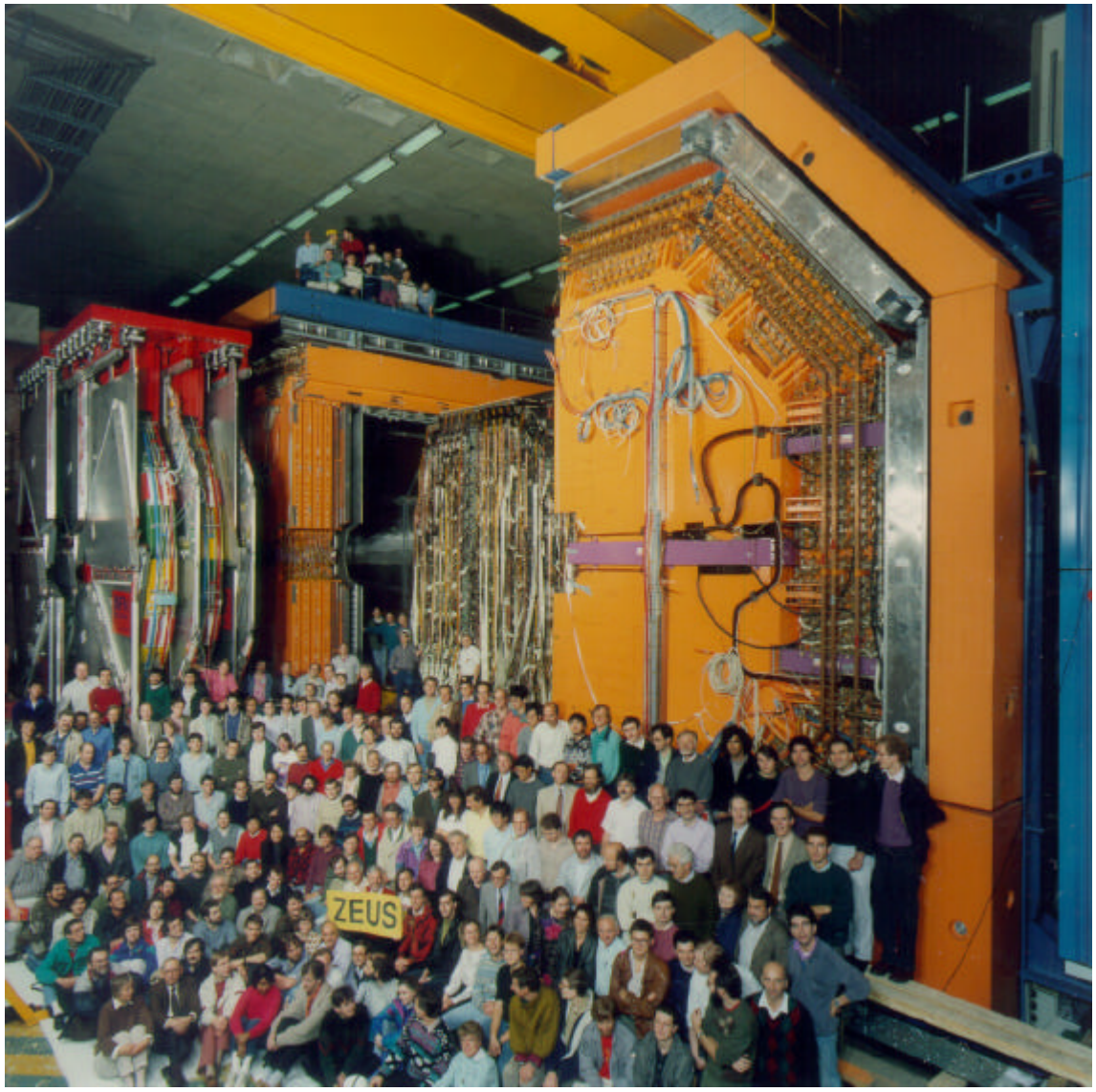


Calorimetro:
dietro (RCAL)
centrale (BCAL)
davanti (FCAL)

Backing
calorimeter
(BAC)

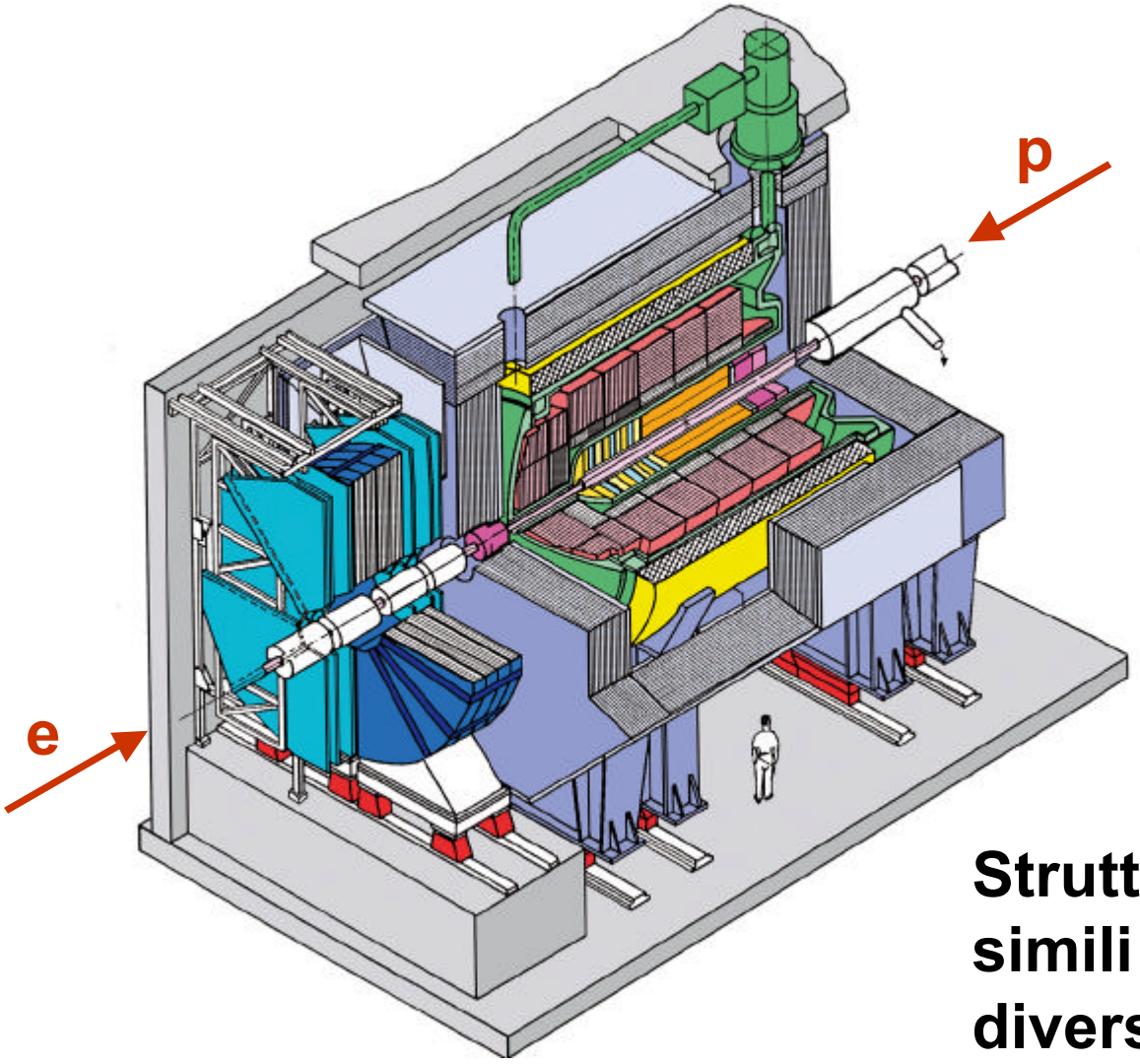
Rivelatore
di muoni

(Parte della) Collaborazione ZEUS



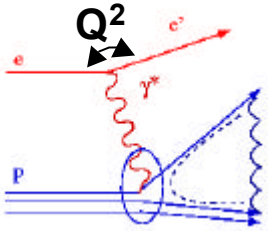
Circa 500 fisici da 50 universita'/laboratori di Canada, Corea, Germania, Giappone, Gran Bretagna, Italia, Israele, Kazakistan, Olanda, Polonia, Russia, Spagna, USA

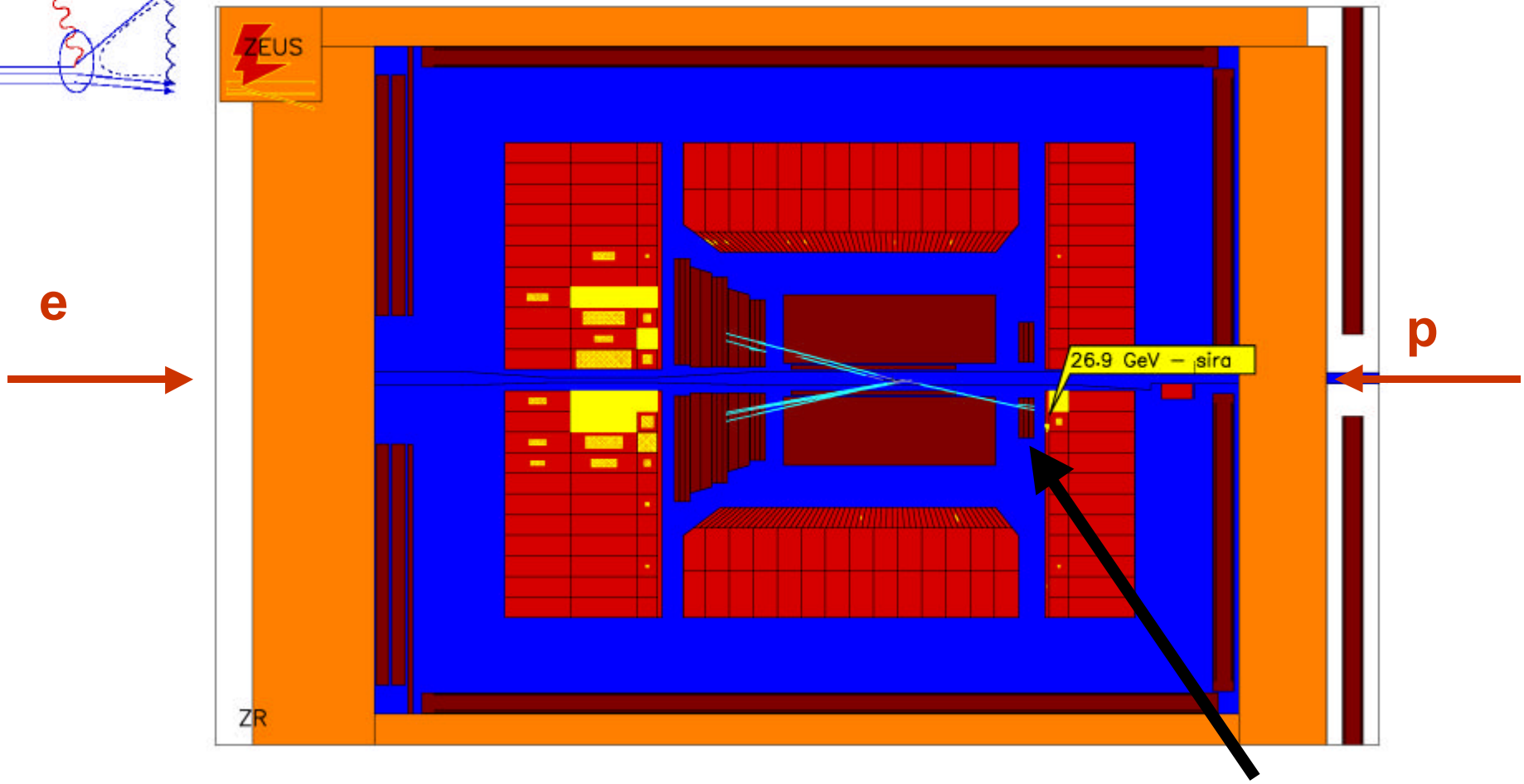
Il rivelatore H1



Struttura e caratteristiche simili a Zeus, tecnologie diverse (per es calorimetro centrale ad Ar liquido)

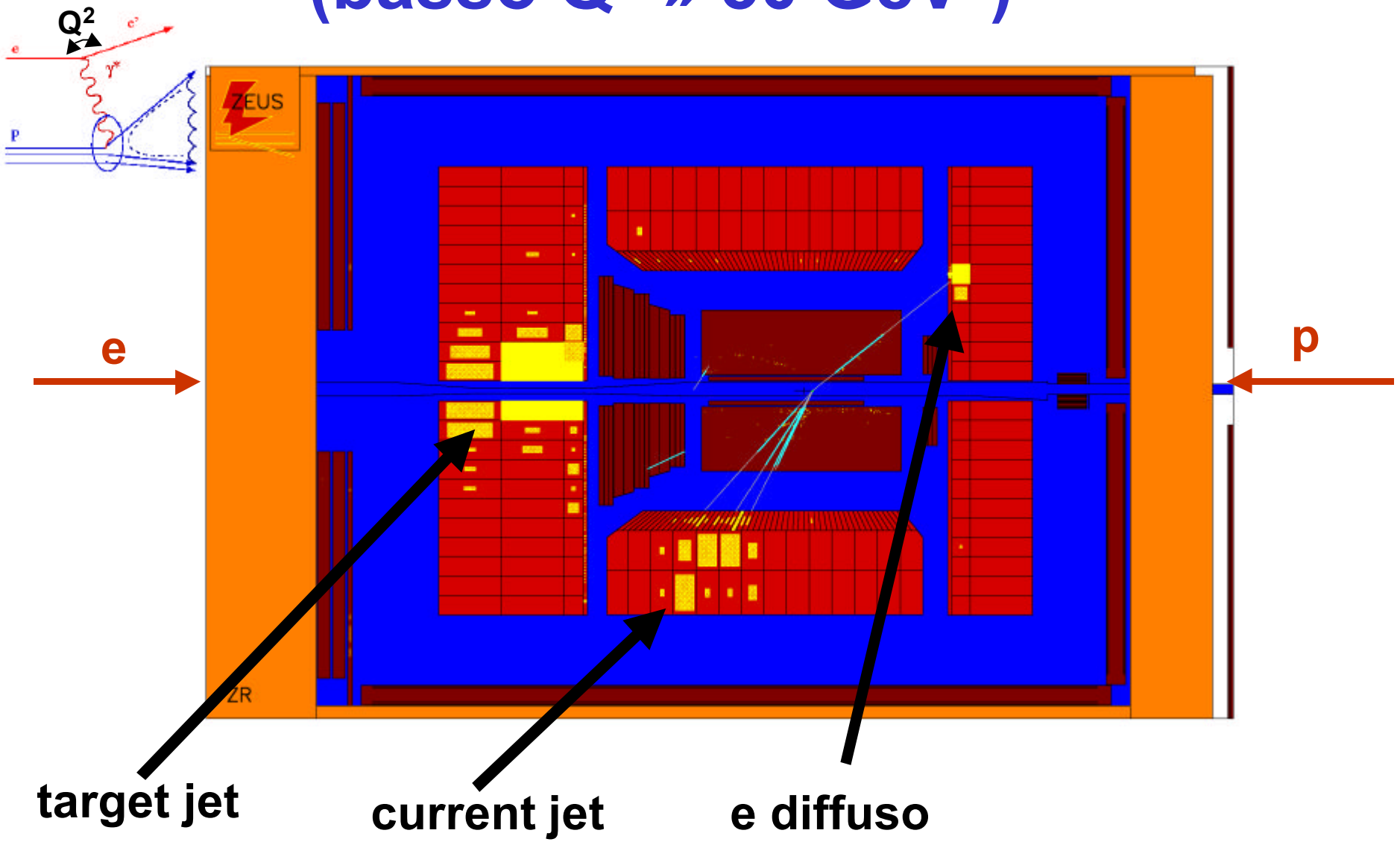
Evento DIS di corrente neutra (basso Q^2 » 10 GeV^2)



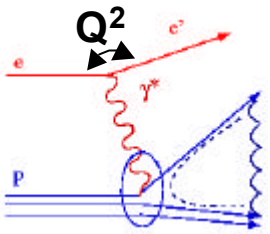


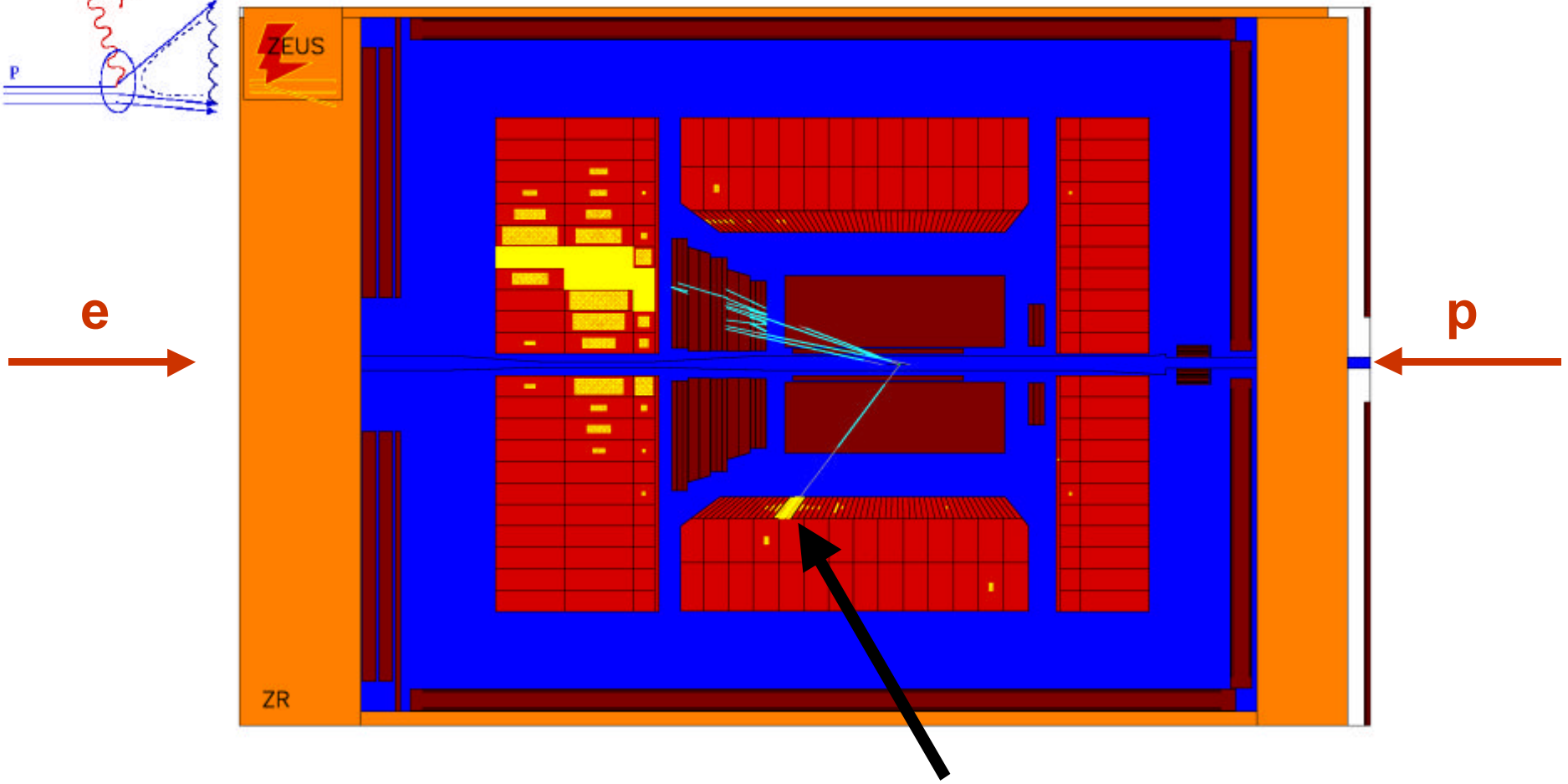
$Q^2 = 4E_eE_e'\sin^2(\theta_e/2) \approx E_eE_e'\theta_e^2$

Evento DIS di corrente neutra (basso Q^2 » 50 GeV^2)

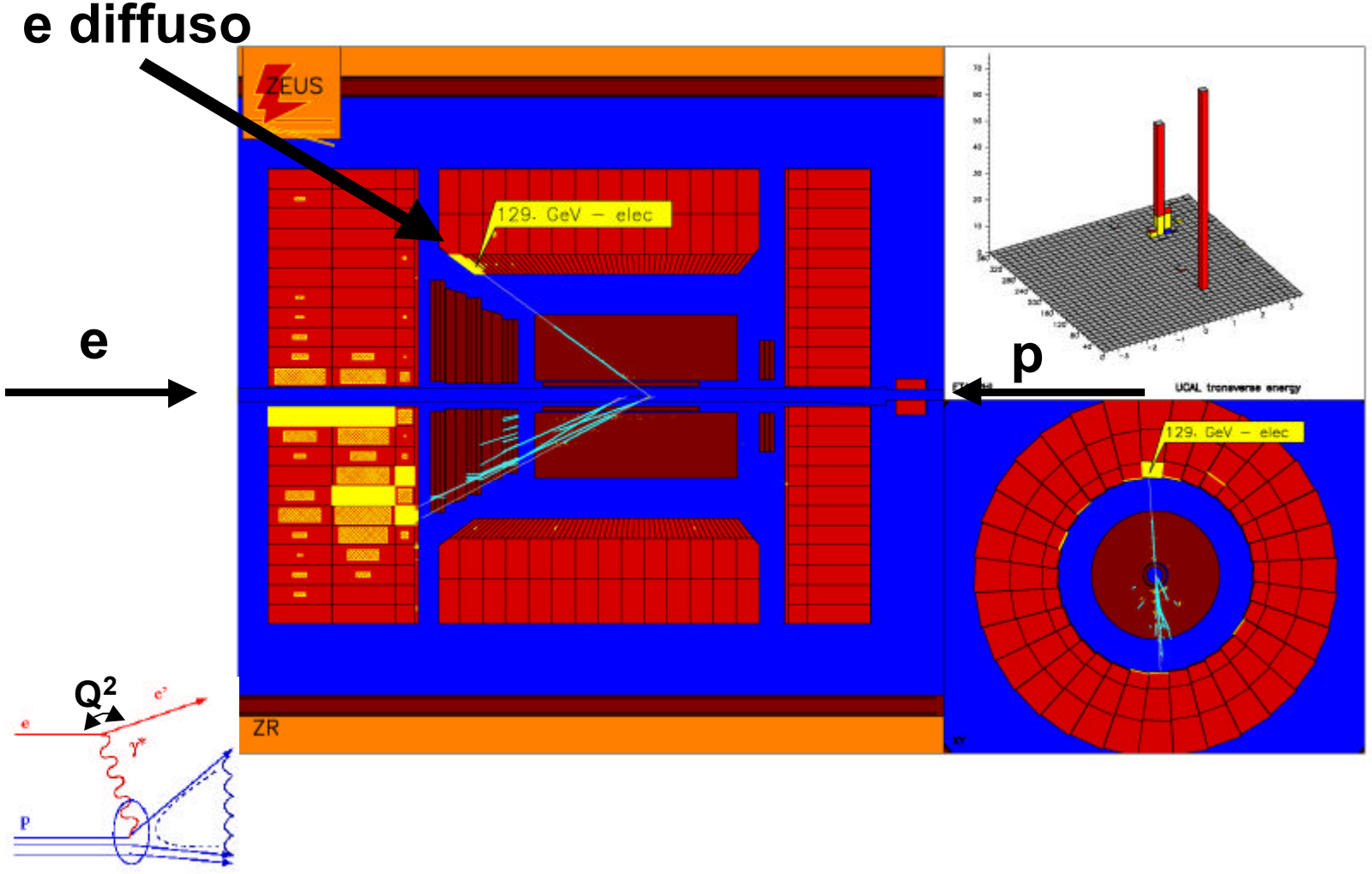


Evento DIS di corrente neutra (alto Q^2 » 5000 GeV^2)

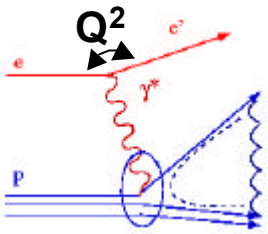


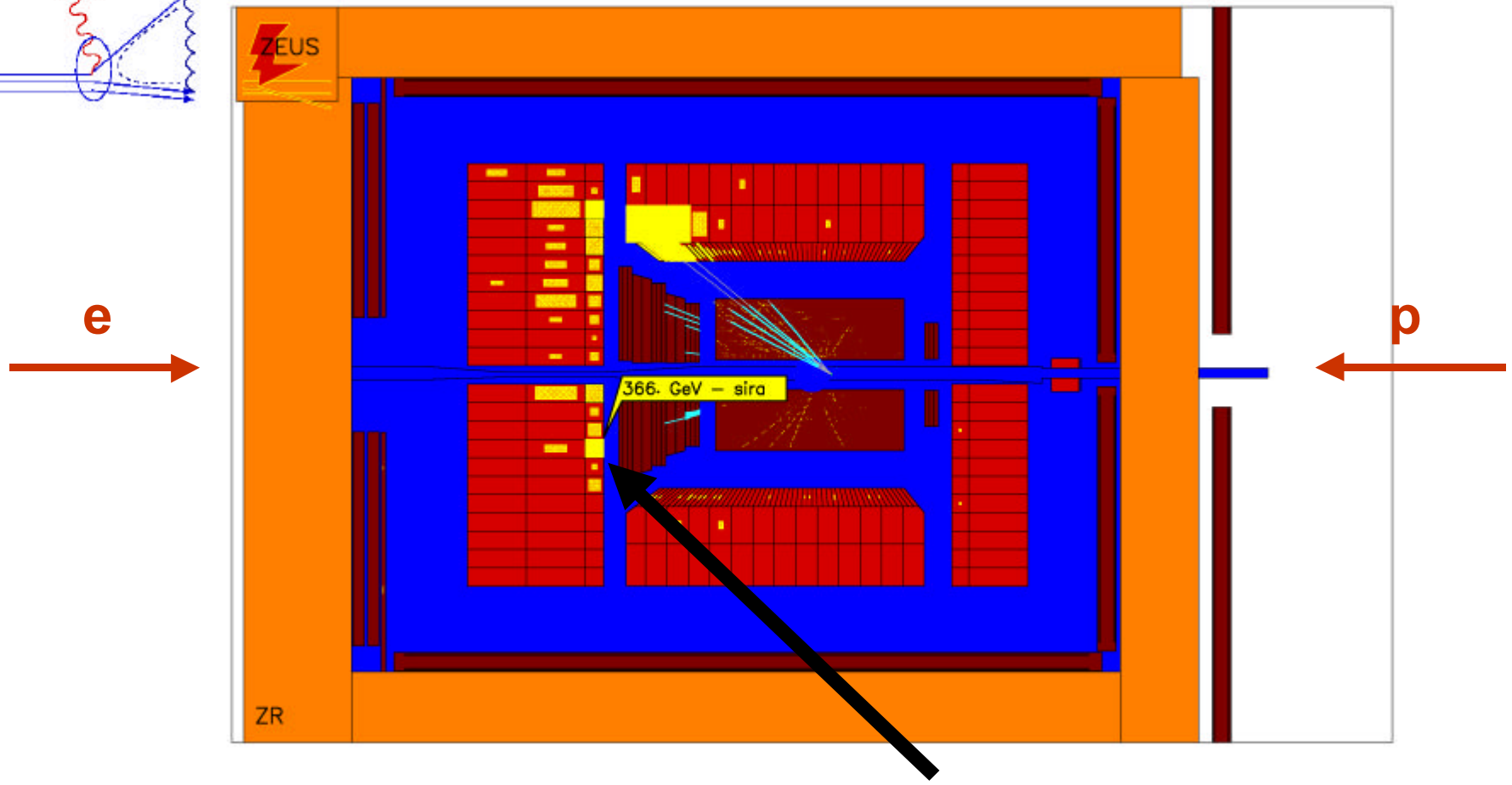


Evento DIS di corrente neutra (alto Q^2 » 10000 GeV^2)

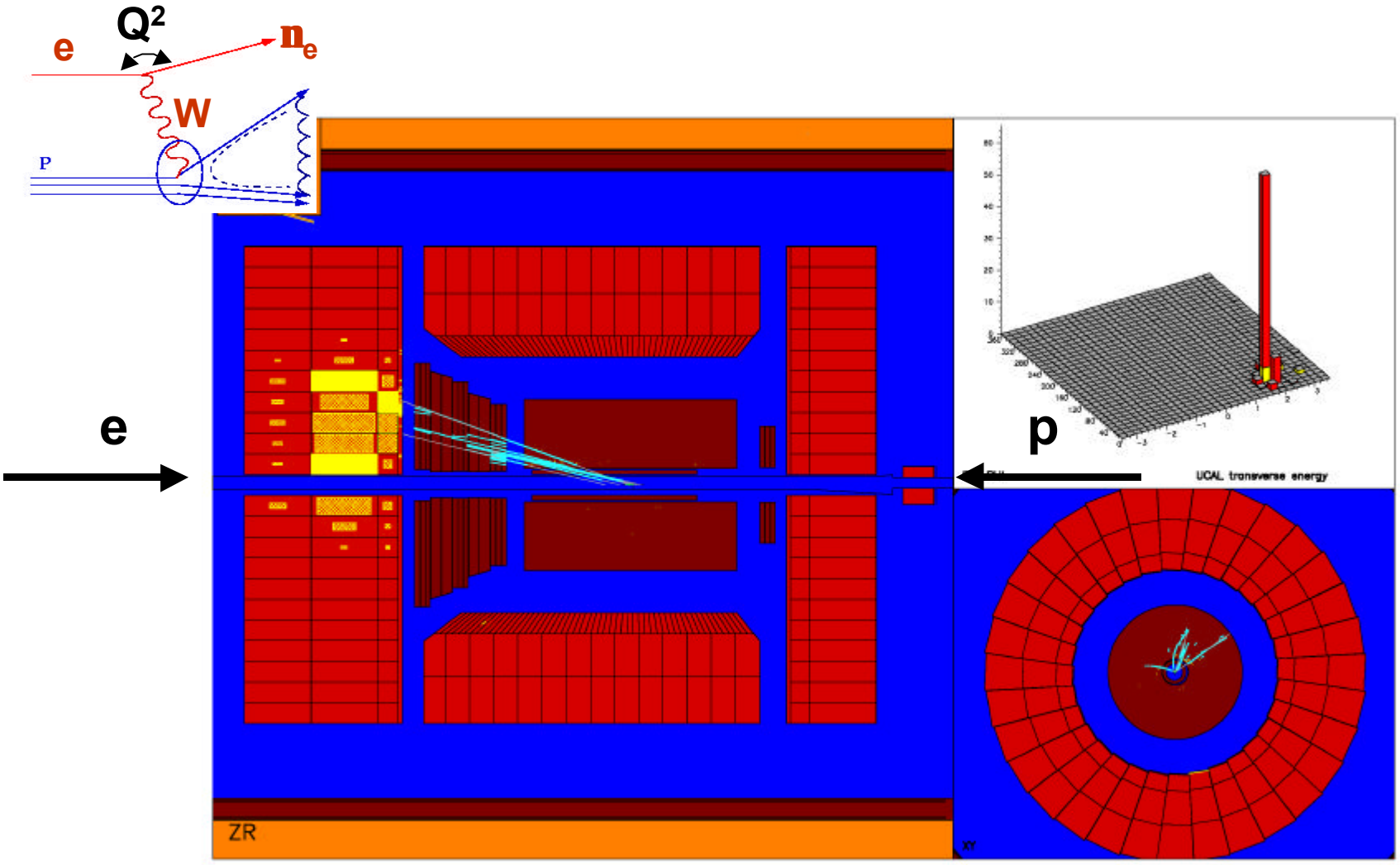


Evento DIS di corrente neutra (alto Q^2 » 20000 GeV^2)

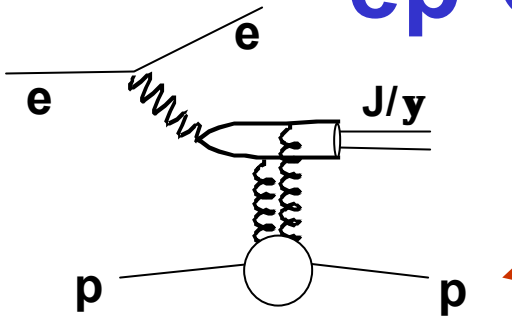




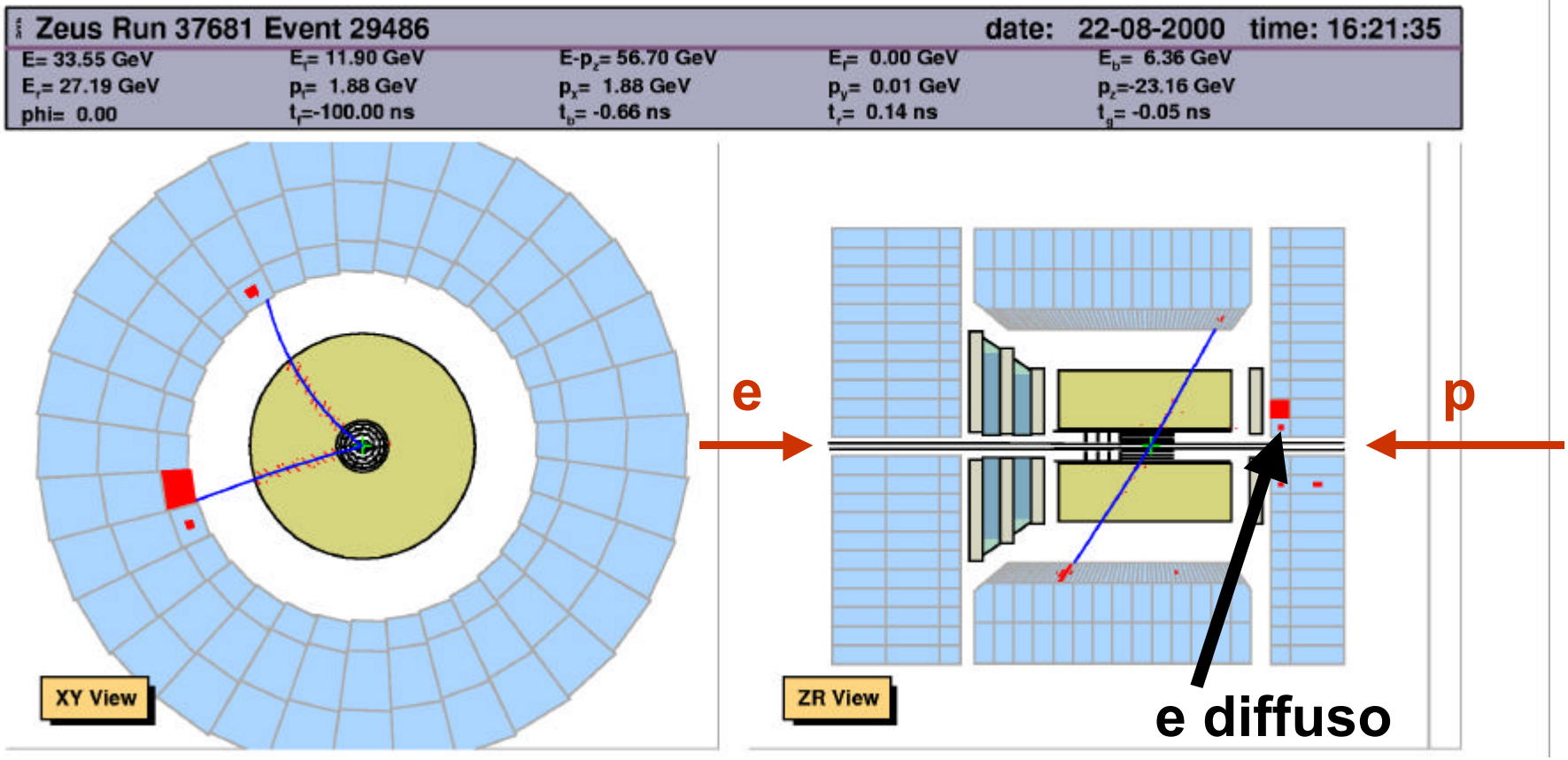
Evento DIS di corrente carica



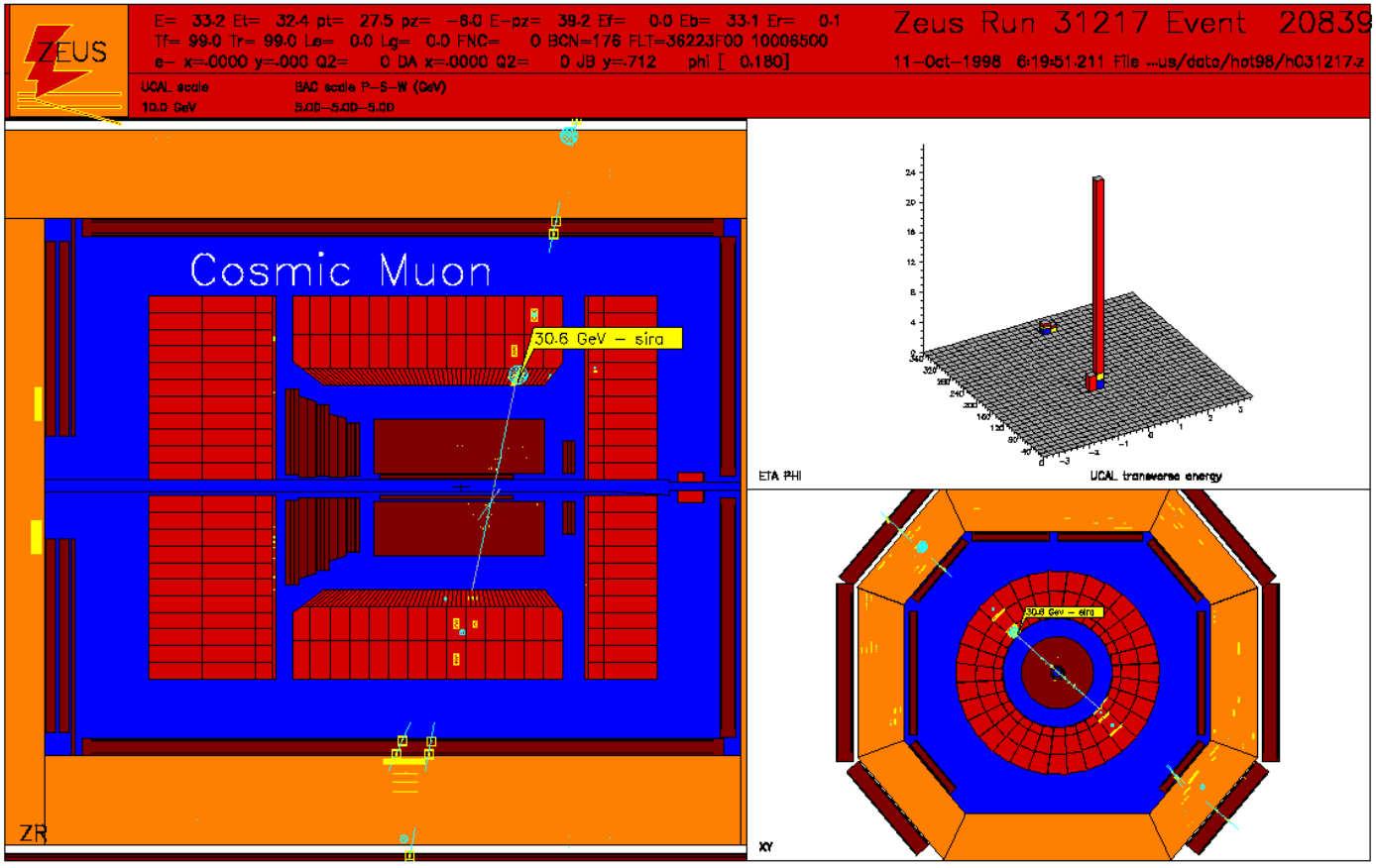
Produzione “diffrattiva” di J/y, ep ® e J/y p, (J/y ®e^+e^-)



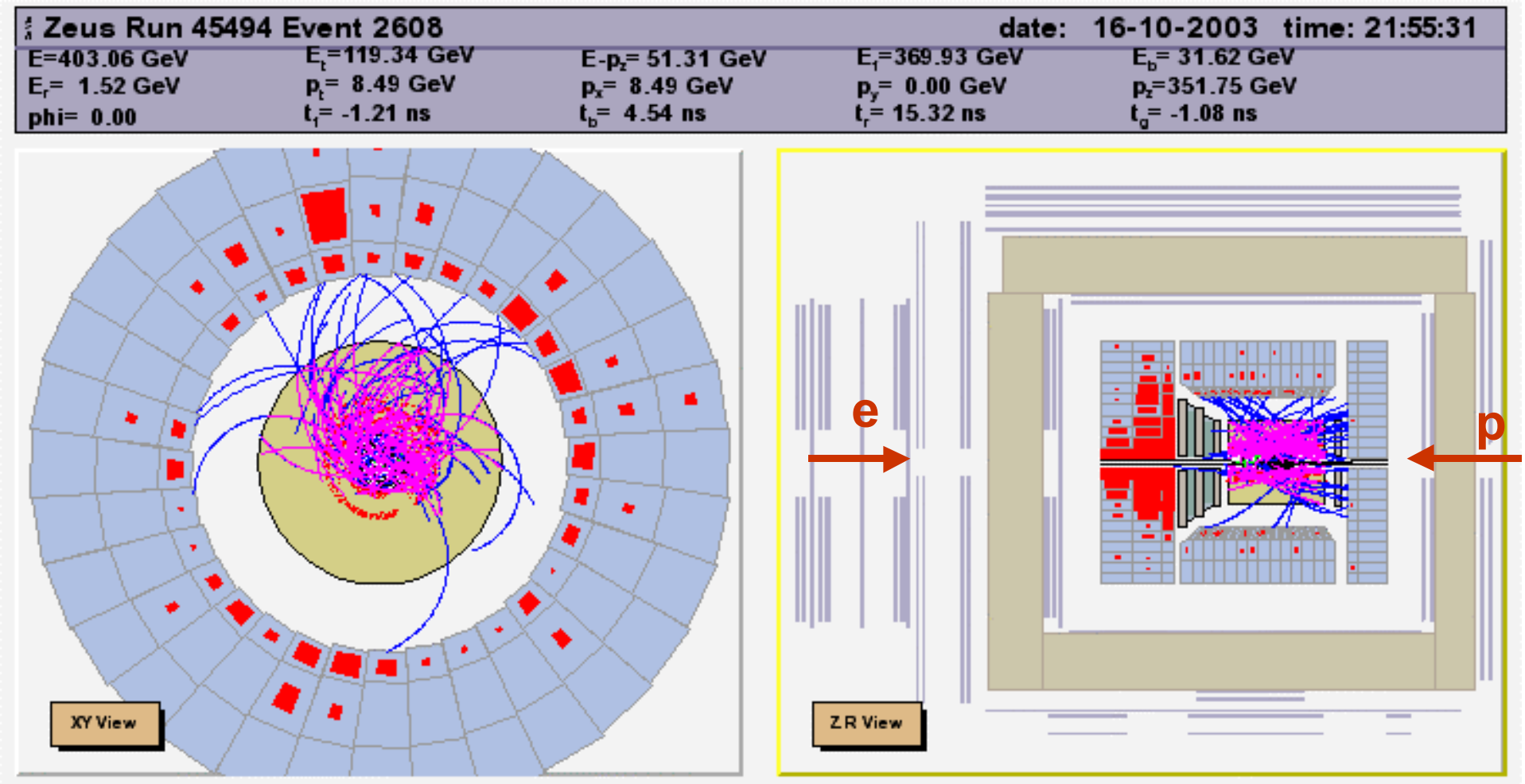
Protone intatto !



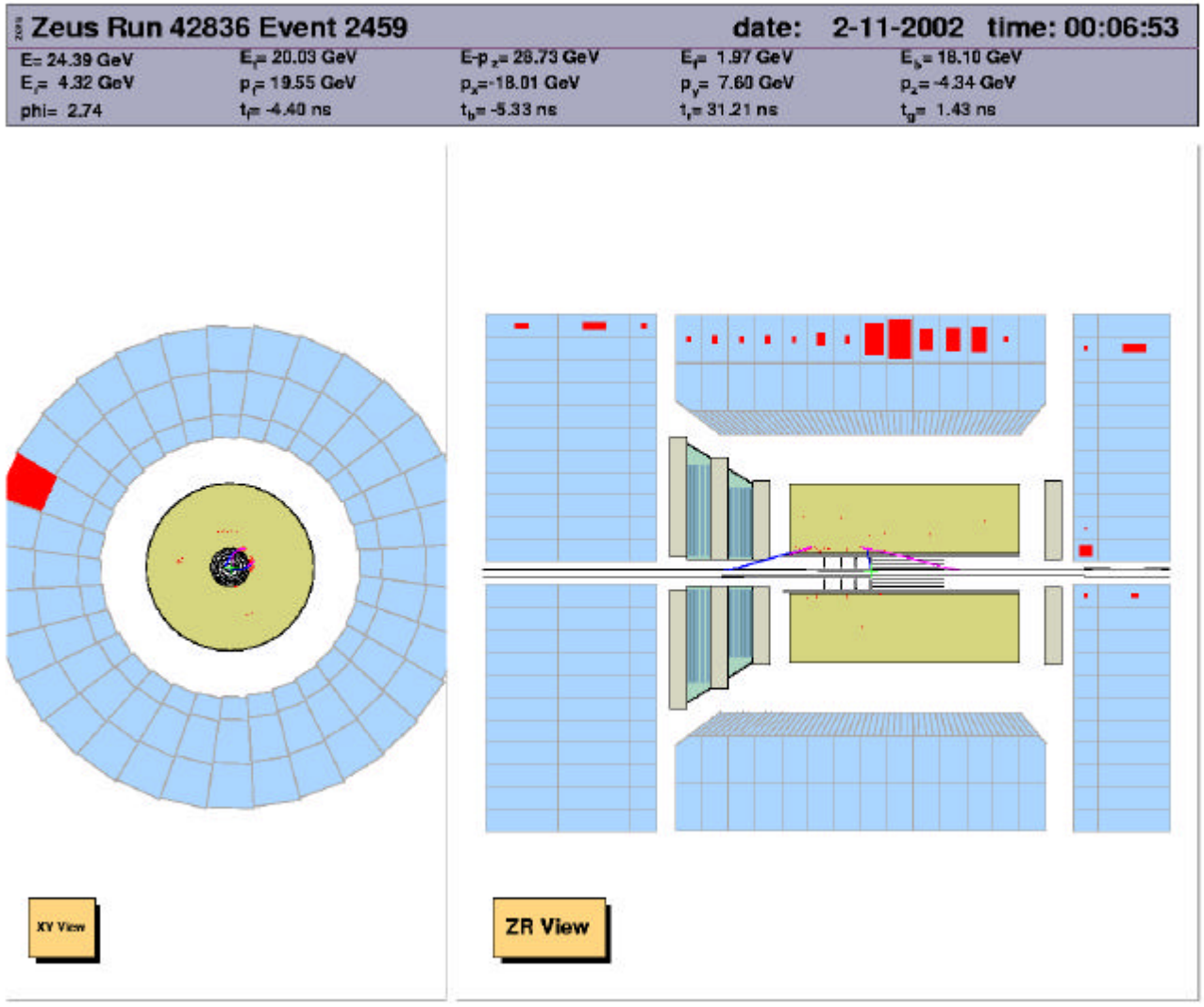
Muone cosmico...



Interazione tra protone e gas residuo nel tubo del fascio (“beam gas”)



Muone parallelo al fascio (“alone”)



Trigger

• I fasci di elettroni e protoni collidono ogni 96 ns !

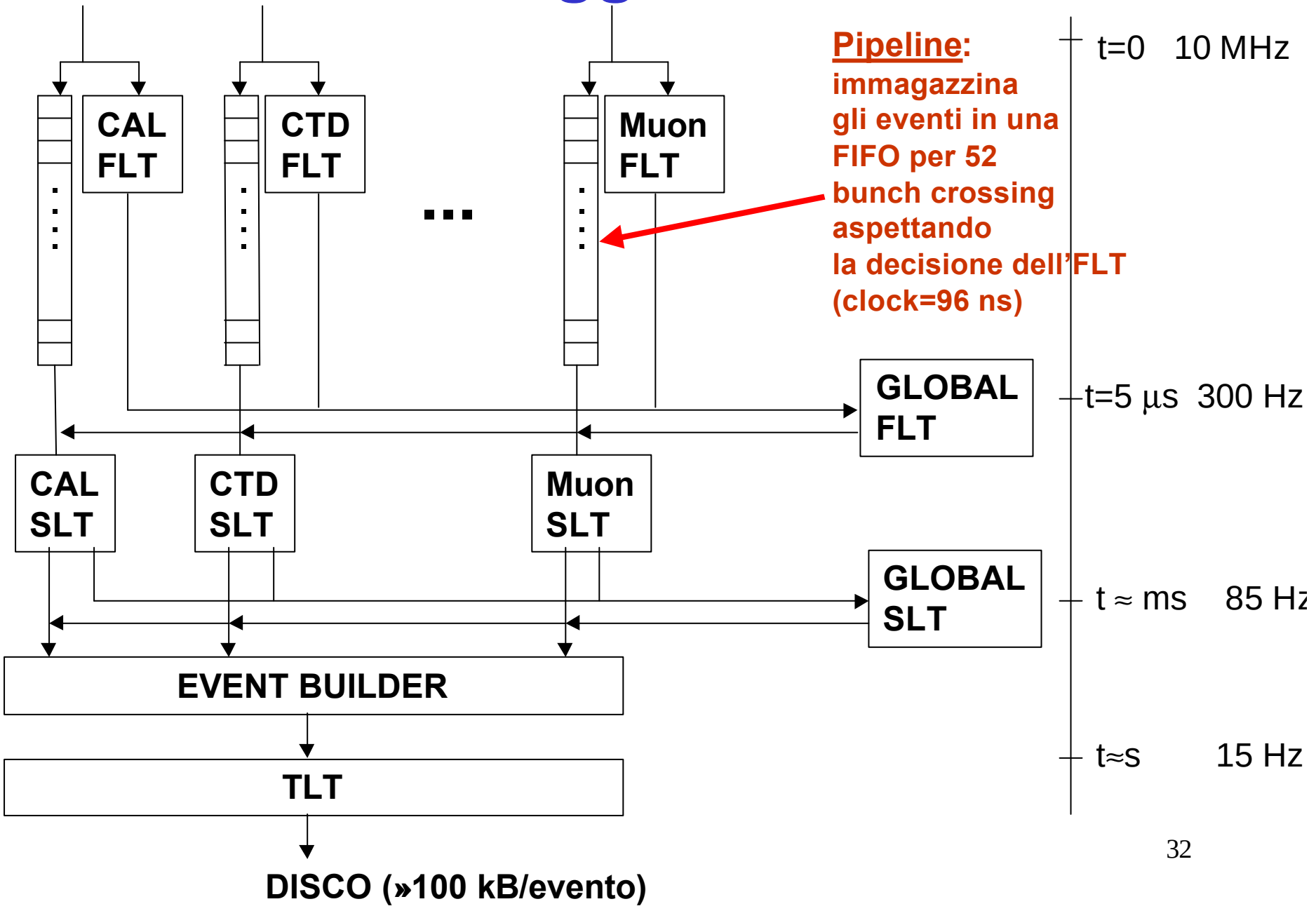
• La maggior parte degli eventi e' di fondo, tipicamente interazioni di protoni con il gas residuo nel tubo a vuoto del fascio (eventi di "beam-gas")

• Necessaria una procedura per selezionare gli eventi buoni 'online', prima che vengano scritti su disco

•Tre livelli di selezione:

1) trigger di primo livello (FLT), basato su una stima dell'energia depositata nel CAL e sulla presenza di tracce . Tempo max di decisione 5 ms. Livello hardware
2) trigger di secondo livello (SLT), usa processori 'veloci' (transputer), stima E, P . Tempo a disposizione » ms
3) trigger di terzo livello (TLT). Tutte le informazioni sono disponibili a questo livello, evento completamente ricostruito. Selezioni simili (ma piu' lasche) di quelle che verranno fatte offline.

Trigger

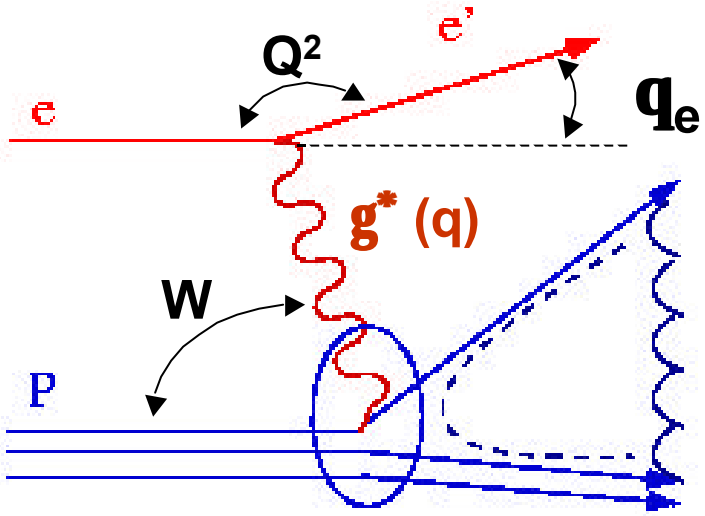

CAL FLT
CTD FLT
Muon FLT
...
Pipeline:
immagazzina gli eventi in una FIFO per 52 bunch crossing aspettando la decisione dell'FLT (clock=96 ns)
t=0 10 MHz
GLOBAL FLT
t=5 µs 300 Hz
CAL SLT
CTD SLT
Muon SLT
GLOBAL SLT
t ≈ ms 85 Hz
EVENT BUILDER
TLT
t≈s 15 Hz
DISCO (»100 kB/evento)

- **Come si misurano Q^2, x, W**
- **Come si distribuiscono gli eventi (nell'apparato e nel piano Q^2,x)**
- **Quali sono i fondi importanti**
- **Come si selezionano gli eventi**
- **Come si misura la sezione d'urto $d^2s/dxdQ^2$: accettanza, luminosita', correzioni radiative...**
- **Come si estraggono dai dati le funzioni di struttura F_2 e R**

Esempio:

ZEUS Collaboration; S. Chekanov et al.
Measurement of the neutral current cross section and F_2 structure function for deep inelastic e^+p scattering at HERA
The European Physical Journal C 21 (2001) 3, pp 443-471
basata su $30pb^{-1}$ raccolti nel 1996-97

Misura di Q^2, W, x dall'elettrone diffuso



$Q^2 = -q^2 = -(e' - e)^2$

$= 2E_eE_e'(1+\cos\theta_e)$

$= 4E_eE_e'\sin^2(\theta_e/2) \approx E_eE_e'\theta_e^2$

q = 4-impulso fotone virtuale

e, e' = 4-impulsi di elettrone incidente e diffuso

® necessario misurare impulso di elettrone incidente e uscente

In alternativa:

- Q^2, W, x da angolo di diffusione energia quark colpito (jet corrente)
- oppure dagli angoli di diffusione di elettrone e quark colpito (jet corrente)

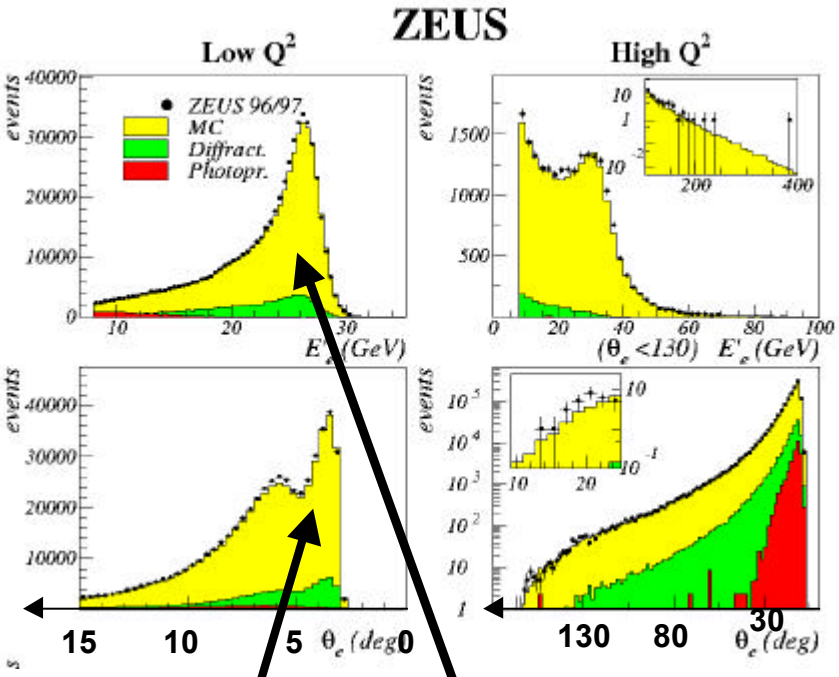
- $W^2=(q+P)^2$

P=4-impulso protone incidente

® necessario misurare impulso del protone incidente (noto da HERA)

- $x = Q^2/(W^2+Q^2)$

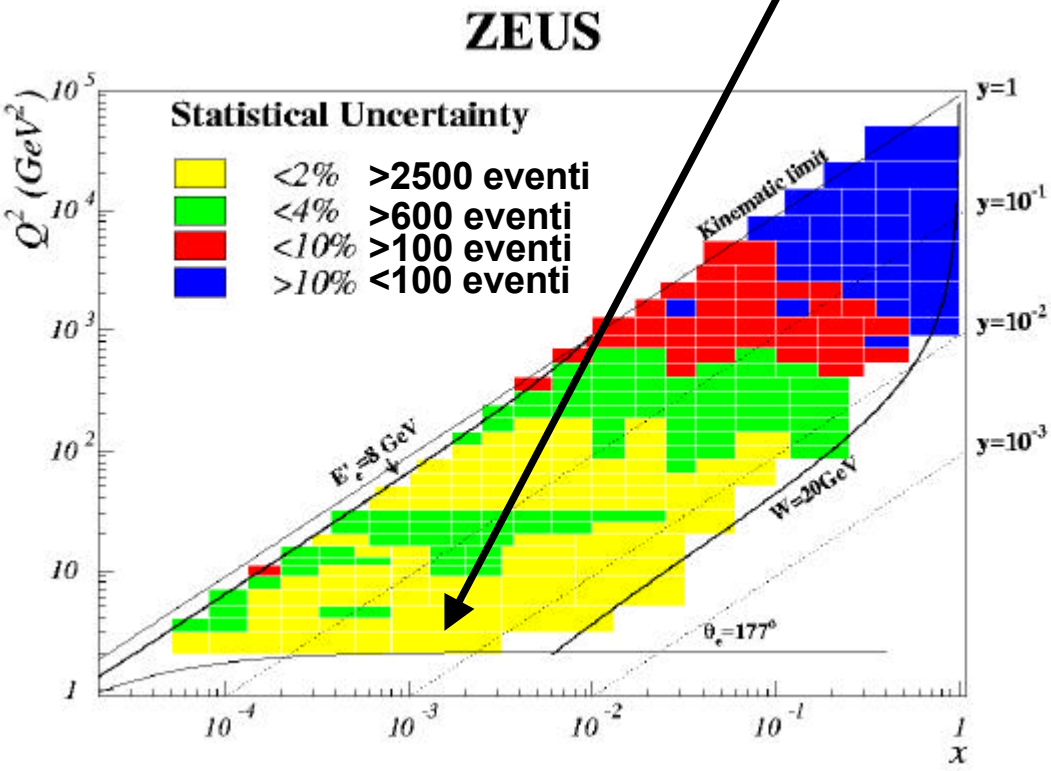
Come si distribuiscono gli eventi ?



La maggior parte degli eventi ha $E_e' \gg E_e$

La maggior parte degli eventi ha angoli di diffusione piccoli

Gli eventi si distribuiscono per lo piu' a basso Q^2 (effetto del propagatore $1/Q^4$) e basso x (effetto di F_2 grande a bassi x)

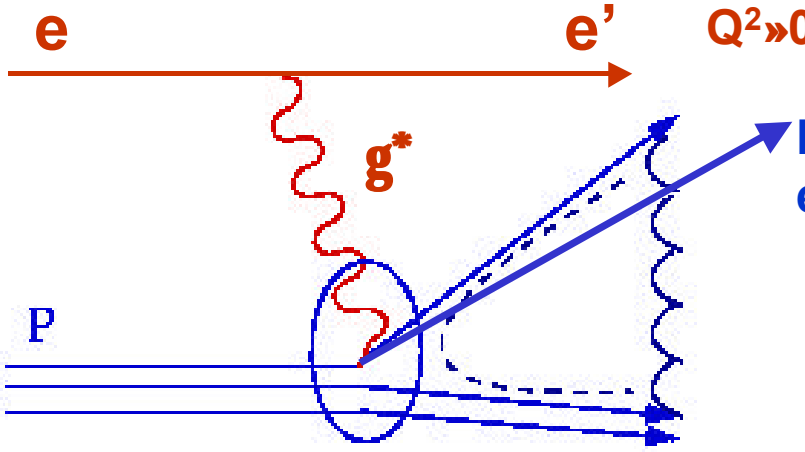


Processi di fondo: fotoproduzione

Finora abbiamo assunto che gli eventi osservati siano tutti 'buoni'.

Fondo principale: "fotoproduzione", ie eventi a $Q^2 \gg 0$

- **elettrone diffuso non misurato (procede quasi indisturbato nel tubo del fascio)**
- **una delle particelle nello stato adronico finale, per es pione di bassa energia, erroneamente considerato un elettrone**



$Q^2 \gg 0$ ® angolo di diffusione piccolo

Pione erroneamente considerato elettrone diffuso

Si elimina richiedendo conservazione di energia e impulso. Effetto residuo circa 1%.

Criteri di selezione

ONLINE (TRIGGER) – prima che i dati siano scritti su disco

- **Deposizione di energia (topologia e valore) in CAL compatibile con quella di un elettrone**

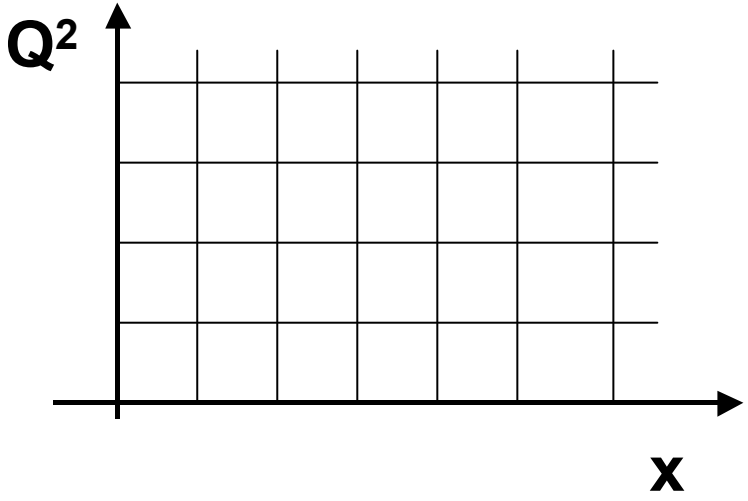
OFFLINE (ANALISI) – dopo che i dati sono stati scritti su disco

- **Un candidato elettrone diffuso misurato nel calorimetro con E_e'>8 GeV, isolato**
- **Conservazione di energia e impulso per sopprimere il fondo di fotoproduzione (ma anche beam-gas e per ridurre le correzioni radiative)**
- **-50 cm <Zvertice<50 cm**

- **Dati raccolti nel 96-97 (L=30 pb^{-1}) ® circa 2 x 10^6 eventi**

Binning degli eventi

- **Gli eventi (dopo la sottrazione del fondo) vengono raccolti (“binned”) in una griglia bidimensionale e vengono *contati***



Sezione d'urto e luminosita'

• Ricordo la definizione di **sezione d'urto**:

$N_{eventi} = \sigma \cdot$ Luminosita'

$[\sigma]$ = barn= 10^{-24} cm^2

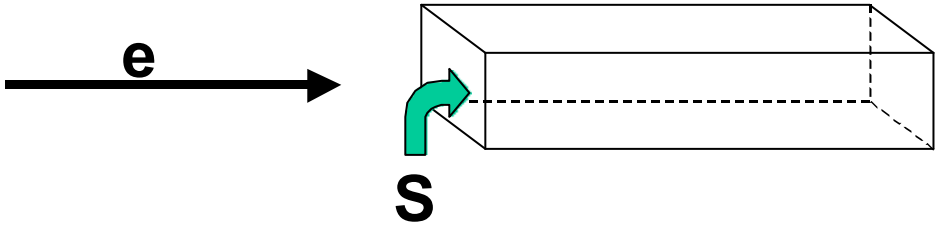
[Luminosita'] = $barn^{-1}$

• Luminosita' in un collider:

Luminosita'= (Numero di elettroni incidenti) · (numero di protoni incidenti)/S

S =area trasversa dei fasci nel punto di interazione

•Luminosita' in un esperimento a bersaglio fisso:



Luminosita'= (Numero di elettroni incidenti) · (numero di protoni nel bersaglio)/S

Estrazione della sezione d'urto differenziale

Tuttavia:

$N_{\text{eventi osservati}} = N_{\text{eventi}} \cdot A$ ← **Accettanza** **(dovuta al fatto che il rivelatore non e' perfetto, vd oltre)**

$$\frac{d^2 s}{dx dQ^2} = \frac{N_{\text{eventi osservati in un bin}}}{\Delta x \Delta Q^2} \frac{1}{A} \frac{1}{\text{Luminosita}}$$

Sezione d'urto differenziale misurata in un dato bin di x e Q^2

Ampiezze dei bin

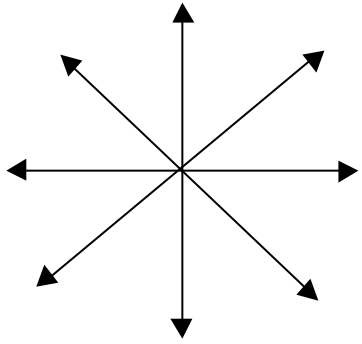
Digressione sulla determinazione dell'accettanza e della luminosita'

Accettanza

Un rivelatore (per quanto buono) non 'vede' mai tutti gli eventi che hanno luogo:

(i) efficienza geometrica <100%: il rivelatore copre solo una parte dell'angolo solido. Per es:

Sorgente isotropica di particelle



RIVELATORE

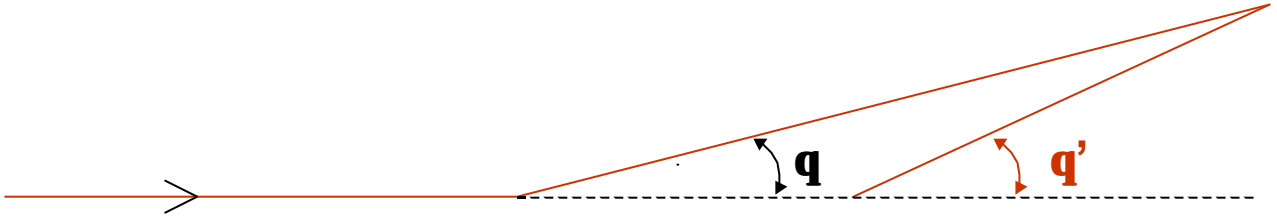
(ii) l'efficienza di rivelazione e' <100%: non tutte le particelle che arrivano al rivelatore vengono effettivamente viste

(iii) l'efficienza di ricostruzione e' <100%: il software che 'ricostruisce' le tracce, calcola il loro impulso o determina la loro energia a partire dai segnali nei singoli scintillatori, camere a filo, calorimetri etc puo' non essere perfettamente efficiente

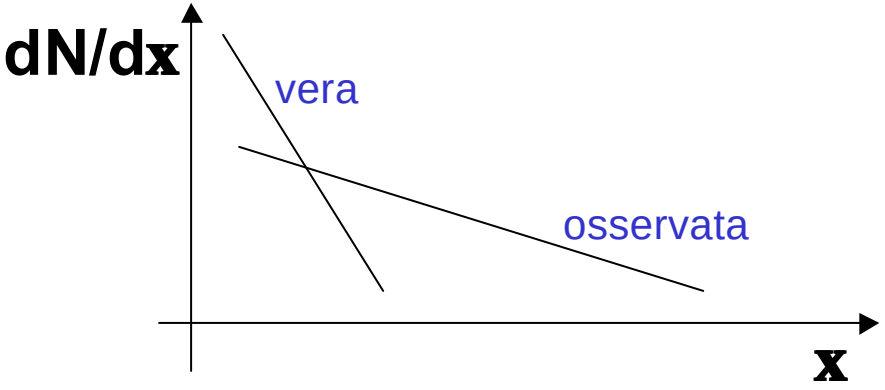
Accettanza/Risoluzione

Ogni variabile misurata e' affetta da un'incertezza – la risoluzione

Per es. la risoluzione sull'angolo di diffusione dell'elettrone dipende da quanto bene e' noto il punto di interazione e da quanto bene e' misurata la traccia dell'elettrone diffuso:



Gli effetti della risoluzione possono essere importanti:



Un evento con dato valore di x (vera) ha uguale probabilita' di essere osservato a un valore maggiore o uno minore.
Ma ci sono piu' eventi a basso x
® piu' eventi migrano da sinistra a destra che vice versa

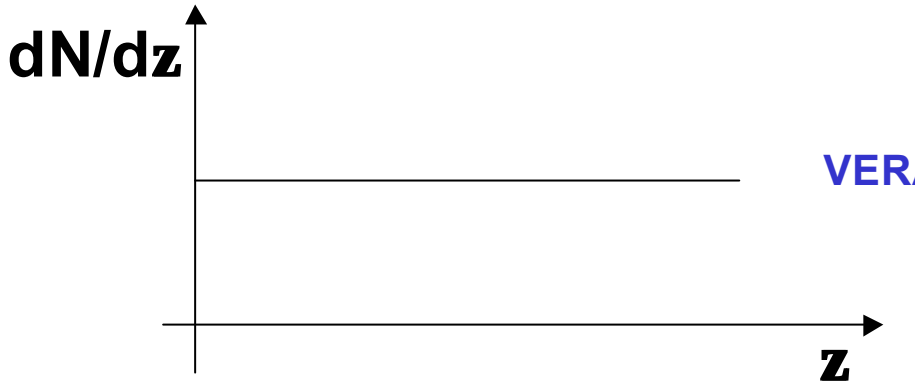
Correzione degli effetti di accettanza/risoluzione

Per determinare l'accettanza si usano programmi di simulazione (Monte Carlo)

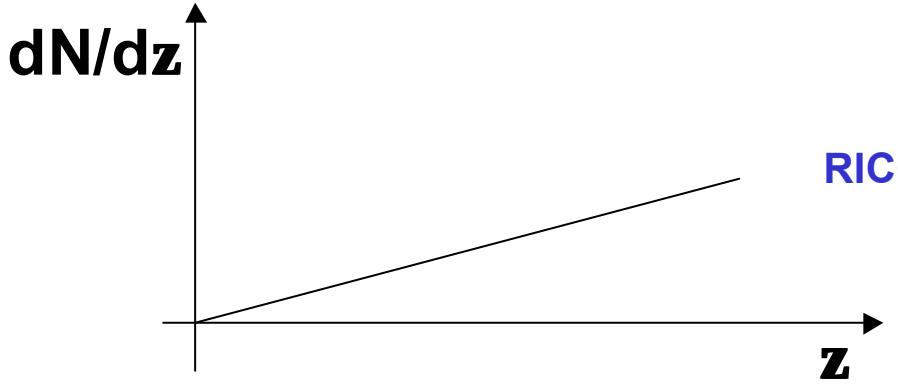
- **il programma contiene una descrizione completa dell'apparato**
- **vengono generati eventi del tipo in esame**
- **tutte le particelle vengono seguite attraverso l'apparato**
- **vengono simulati i segnali generati da ognuna delle particelle nei singoli rivelatori (scintillatore, rivelatore al silicio, camera a filo, etc) tenendo conto delle rispettive efficienze e risoluzioni**
- **gli eventi simulati vengono analizzati con lo stesso software di ricostruzione e analisi usati per i dati reali**

Affinche' l'accettanza sia determinata correttamente e' fondamentale che le distribuzioni simulate riproducano quelle dei dati ® processo iterativo

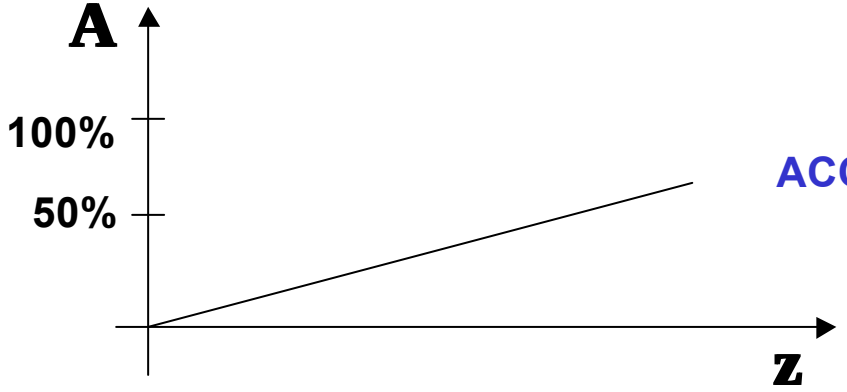
Correzione degli effetti di accettanza



VERA

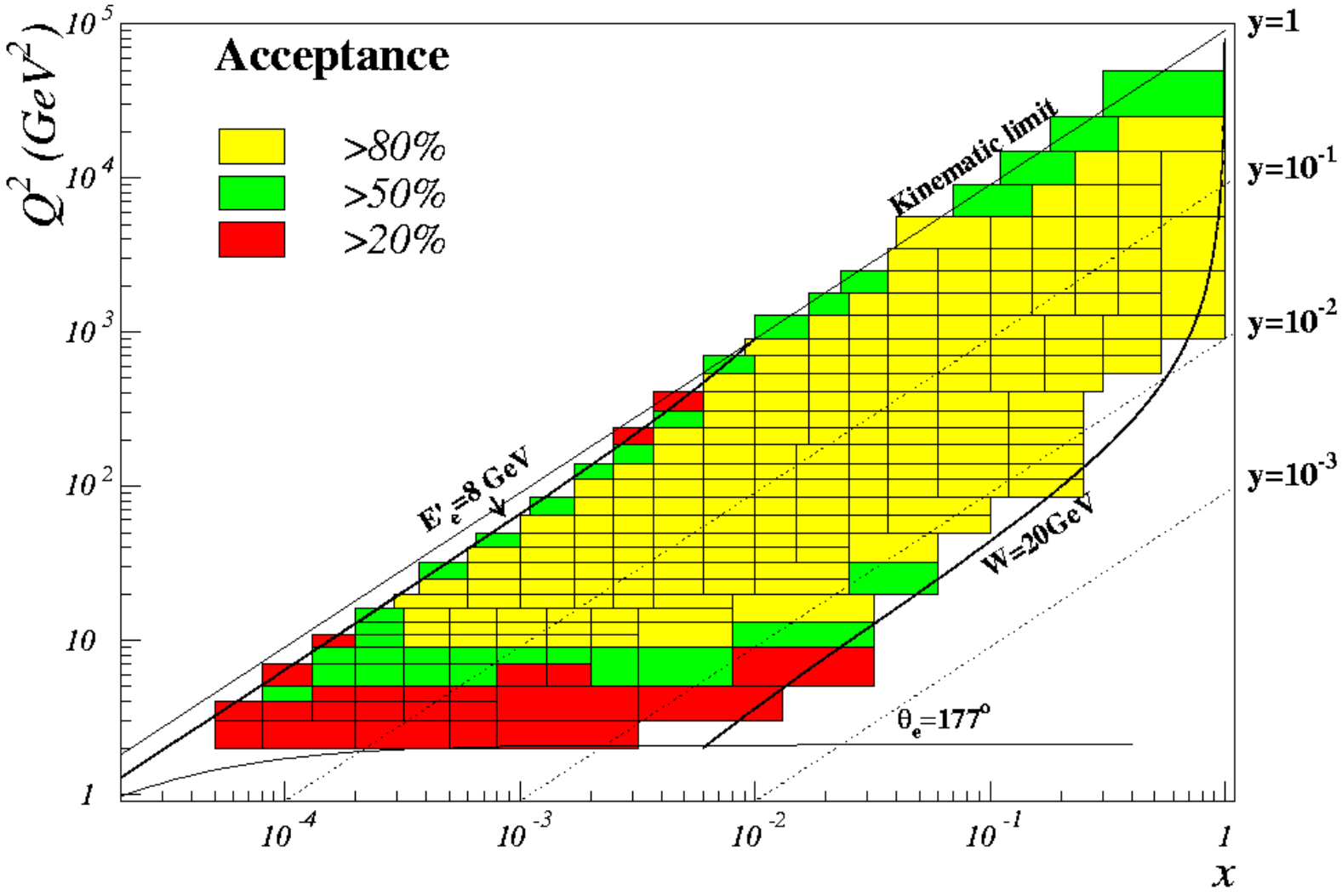


RICOSTRUITA



ACCETTANZA=RICOSTRUITA/VERA

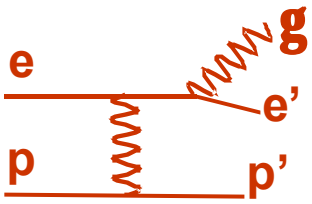
ACCETTANZA


Acceptance
>80%
>50%
>20%
Kinematic limit
E'e=8 GeV
W=20GeV
θe=177°
y=1
y=10-1
y=10-2
y=10-3
Q2 (GeV2)
x
10 5
10 4
10 3
10 2
10
1
10 -4
10 -3
10 -2
10 -1
1

Determinazione della luminosita'

Anziche' contare il numero di elettroni/protoni nei fasci (troppo impreciso) si preferisce misurare il numero di eventi per un processo la cui sezione d'urto e' molto ben nota:

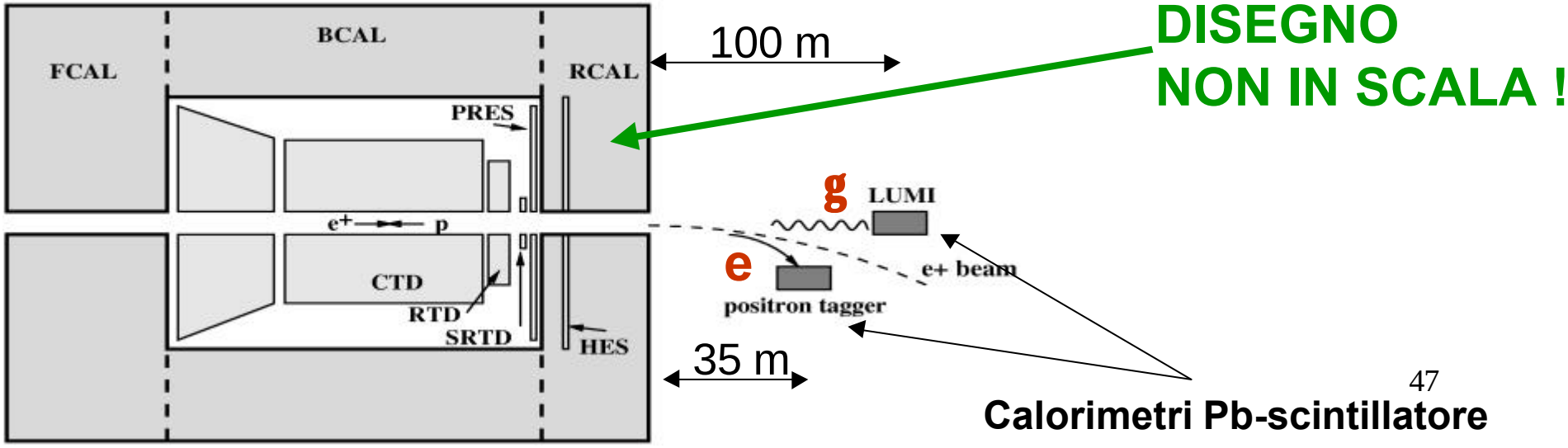
ep ® epg (Bremsstrahlung)



$$E_{e'}+E_g=E_e$$

$$\text{Luminosita'} = N_{\text{eventi Brems.}} / (\sigma_{\text{Brems.}} A_{\text{Brems.}})$$

incertezza tipica 1%



Estrazione della sezione d'urto differenziale

$$\frac{d^2\sigma}{dx\,dQ^2} = \frac{\mathrm{N}_{\text{eventi osservati in un bin}}}{\Delta x \Delta \mathrm{Q}^2} \frac{1}{A} \frac{1}{\text{Luminosita}}$$

Sezione d'urto differenziale misurata in un dato bin di x e Q^2

Ampiezze dei bin

Correzioni radiative

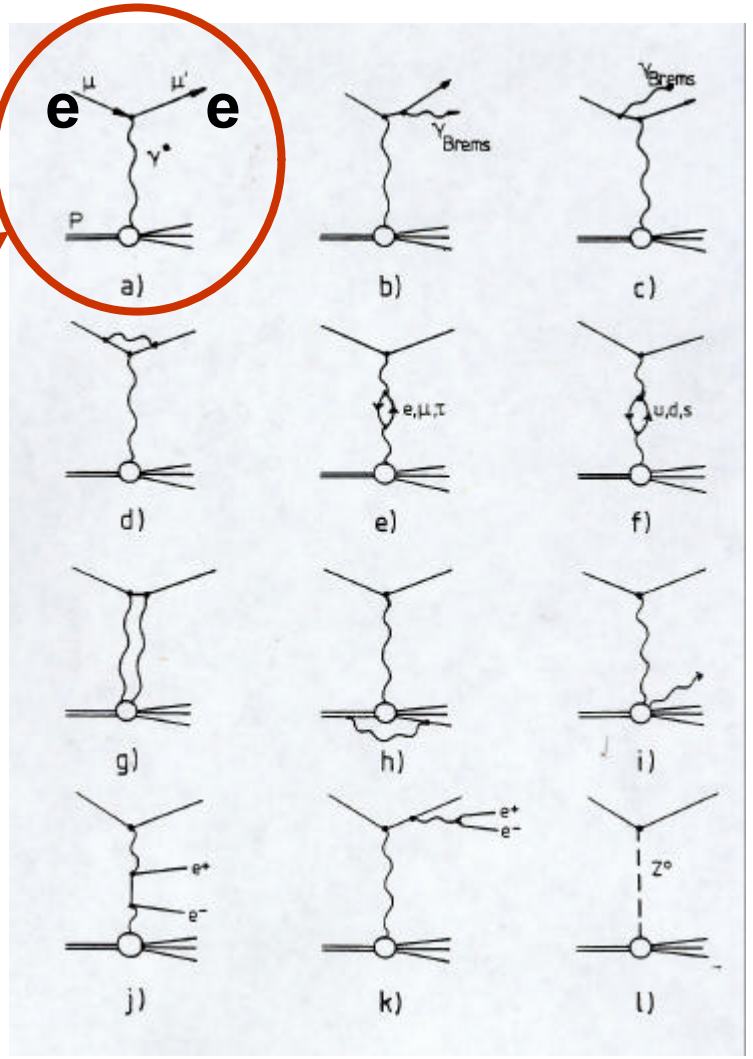
Ulteriore complicazione:

La sezione d'urto misurata riceve contributi da una serie infinita di diagrammi elettro-deboli…

Il diagramma di cui si vuole trovare la sezione d'urto e' quello con un solo fotone

E' necessario applicare delle "correzioni radiative" che correggono per il contributo dei diagrammi di ordine superiore.
Funzione di Q^2, x

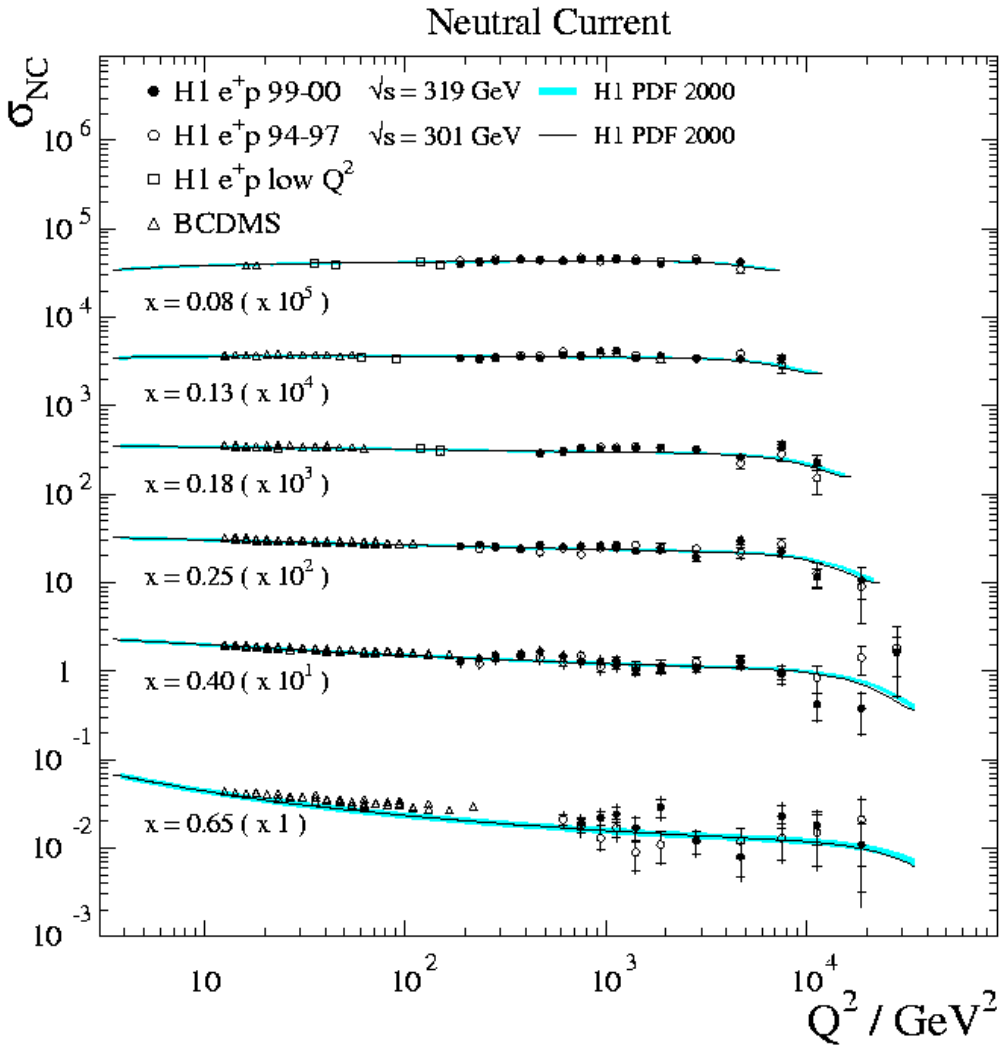
Calcolo 'trivial', ma in cui entra la distribuzione di impulso dei quark, e quindi F_2 (il fotone virtuale interagisce con un quark)
® Iterazione



A questo punto abbiamo tutti gli strumenti per estrarre la sezione d'urto differenziale:

$$\frac{d^2s}{dxdQ^2} = \frac{\mathrm{N}_{\text{eventi osservati in un bin}}}{\Delta Q^2 \Delta x} \frac{1}{A} \frac{1}{\text{Luminosita}}$$

$$\tilde{s}_{NC} = \frac{1}{1+(1-y)^2} \frac{xQ^4}{2pa^2} \frac{d^2s\,(e^+p)}{dxdQ^2}$$



Estrazione di F_2

$$\frac{d^2\sigma}{dxdQ^2} = \frac{4\pi\alpha^2}{xQ^4}\left\{1 - y + \frac{y^2}{2[1+R(x,Q^2)]}\right\}F_2(x,Q^2)$$

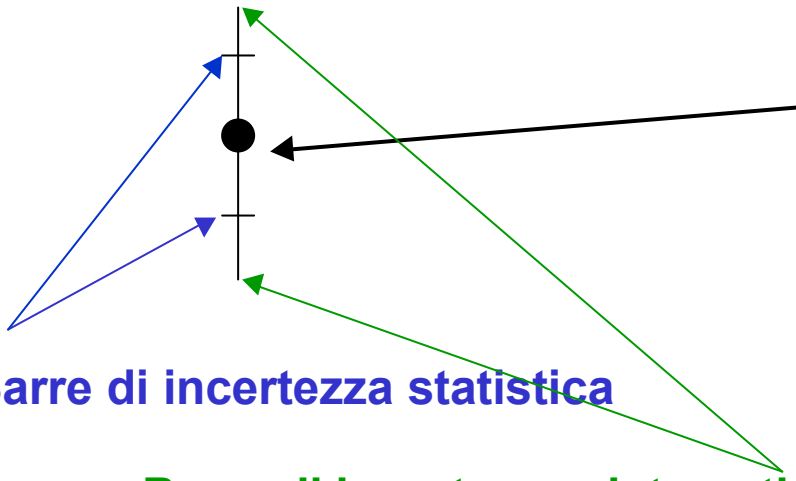
Da $d\sigma/dxdQ^2$ estraggo F_2 nella regione in cui il contributo di R (a priori ignoto) e' piccolo (y piccolo)

Per R uso, per es., predizioni di QCD (in assenza di misure)

Principali sorgenti di incertezza:

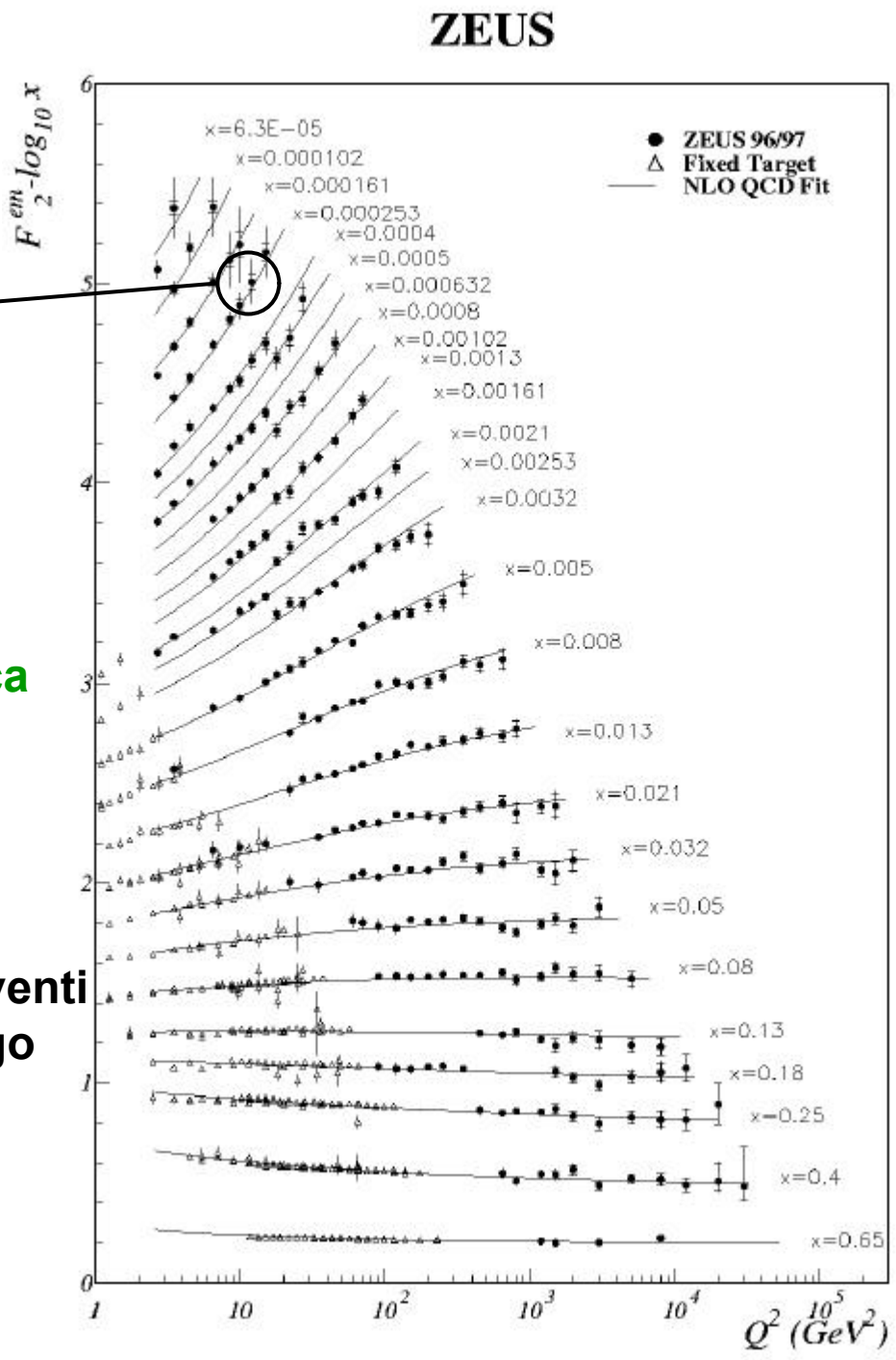
- **sottrazione del fondo di fotoproduzione (<10%)**
- **determinazione delle variabili cinematiche (<10%)**

Il risultato...



Barre di incertezza statistica

Barre di incertezza sistematica (statistica+sistematica in quadratura)



- **Incertezza statistica µ DN= ÖN (DN/N=ÖN/N=1/ÖN)**

si riduce aumentando il numero di eventi per bin – ossia misurando piu' a lungo e/o aumentando l'accettanza

- **Incertezza sistematica**

dipende da quanto bene e' calibrato l'apparato, quanto ben compresa e' l'accettanza etc.

Estrazione di R

Misurare F_2 e' complicato.

Misurare R e' ancora piu' complicato.

Estrazione di R

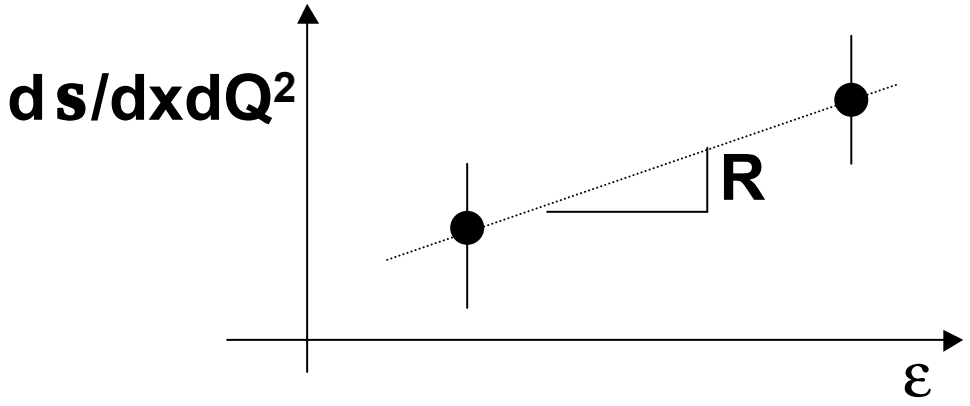
$$\frac{d^2\sigma}{dxdQ^2} = \Gamma_T(x,Q^2)\sigma_T + \Gamma_L(x,Q^2)\sigma_L = \Gamma_T(x,Q^2)[\sigma_T + \varepsilon\sigma_L]$$

$$\varepsilon = \frac{\Gamma_L}{\Gamma_T} = \frac{1-y}{1-y+y^2/2}$$

(rapporto tra flusso di fotoni polarizzati longitudinalmente e trasversalmente)

$$y = \frac{Q^2}{sx}$$

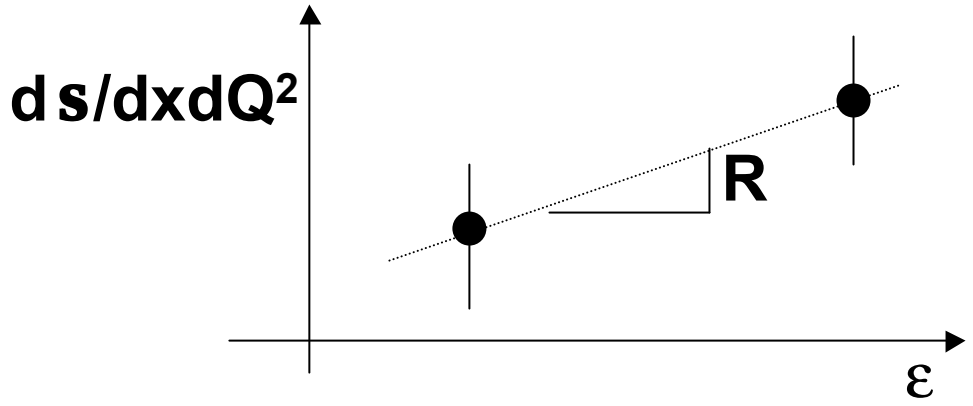
$$\frac{d^2\sigma}{dxdQ^2} = \Gamma_T(x,Q^2)\sigma_T[1+\varepsilon\frac{\sigma_L}{\sigma_T}] = \Gamma_T(x,Q^2)\sigma_T[1+\varepsilon R]$$



Estrazione di R

$$e = \frac{1-y}{1-y+y^2/2}$$

$$y = \frac{Q^2}{sx}$$



Difficolta':

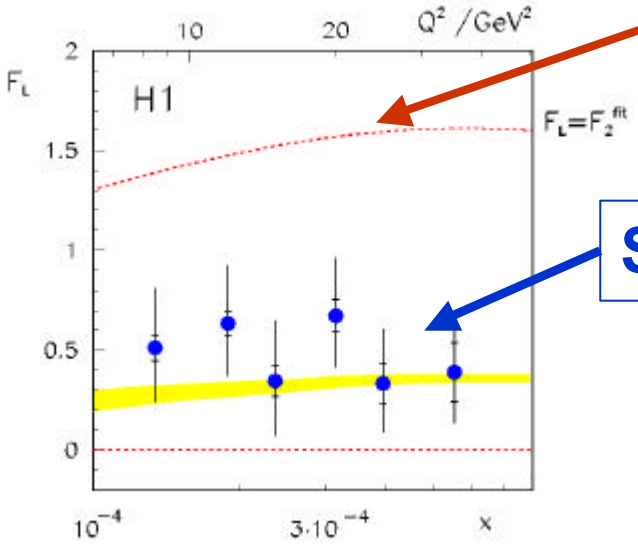
- **per cambiare e bisogna variare y. Cambiare y a Q^2 e x fissati significa cambiare s – ossia l'energia di almeno un fascio !**
- **Necessario paragonare sezioni d'urto prese con fasci diversi in in tempi diversi ® grandi incertezze sistematiche.**
- **R e' piccolo !**
- **Misura non ancora fatta a HERA**

Stime indirette di R a HERA

(solo per avere un'idea dell'ordine di grandezza)

$R = \sigma_L/\sigma_T = F_L/(F_2-F_L)$

$F_L = F_2\, R/(1+R)$

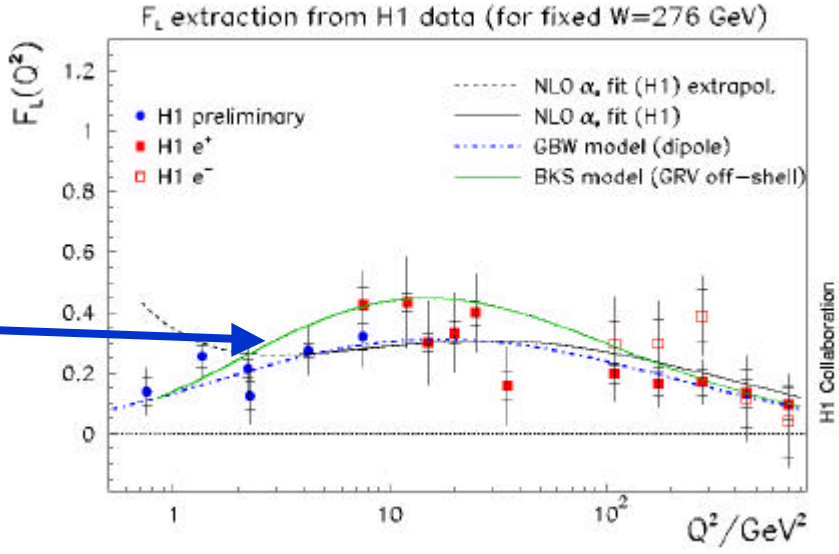


F_2

F_L piccolo rispetto a F_2
(R piccolo)

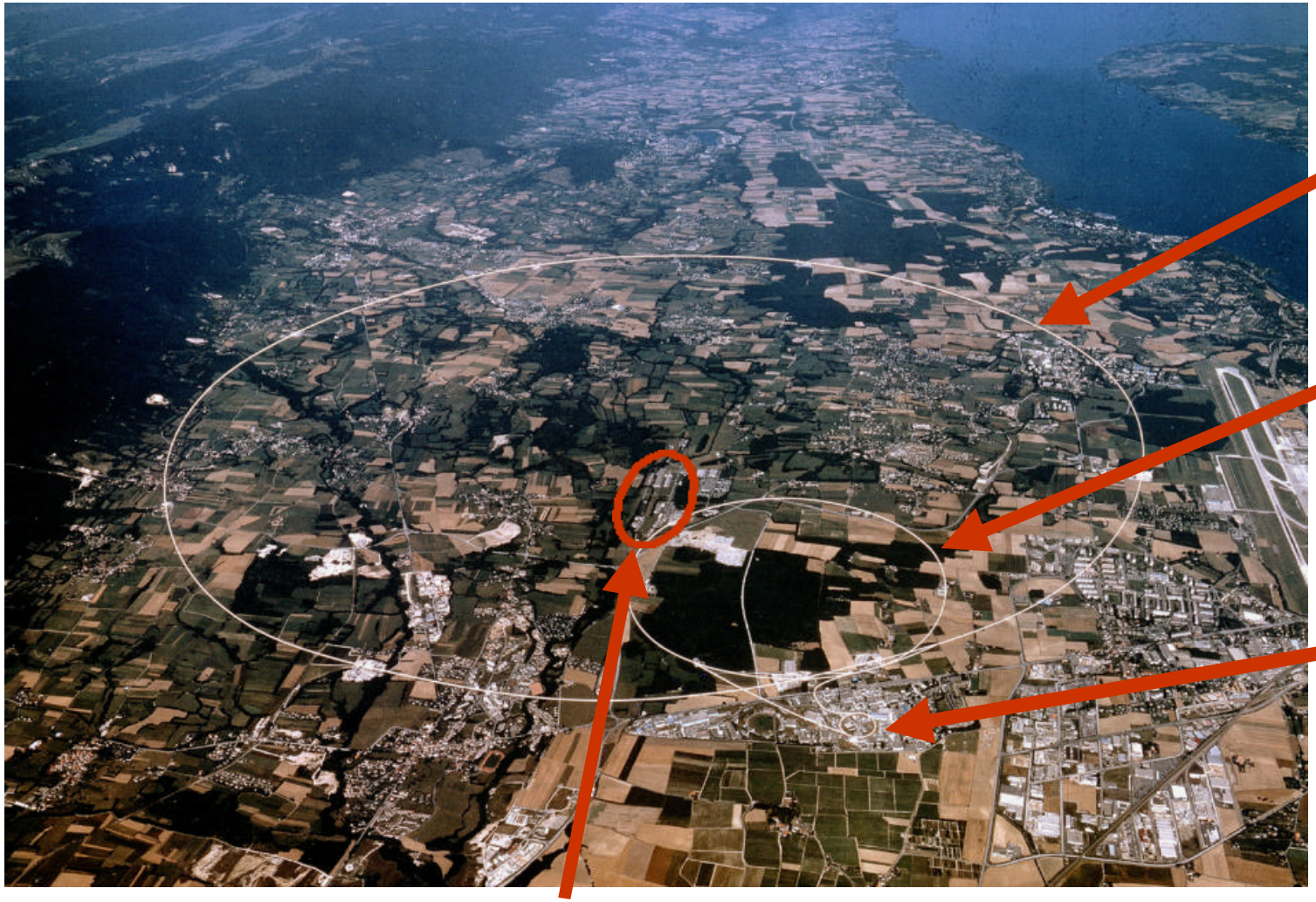
Stima di F_L

Stima di F_L



F_L ® 0 per Q^2 ® 0 e Q^2 ® ¥

Il CERN a Ginevra



Fascio di muoni, spettrometro NMC

Un esperimento di DIS con fascio di muoni e bersaglio fisso

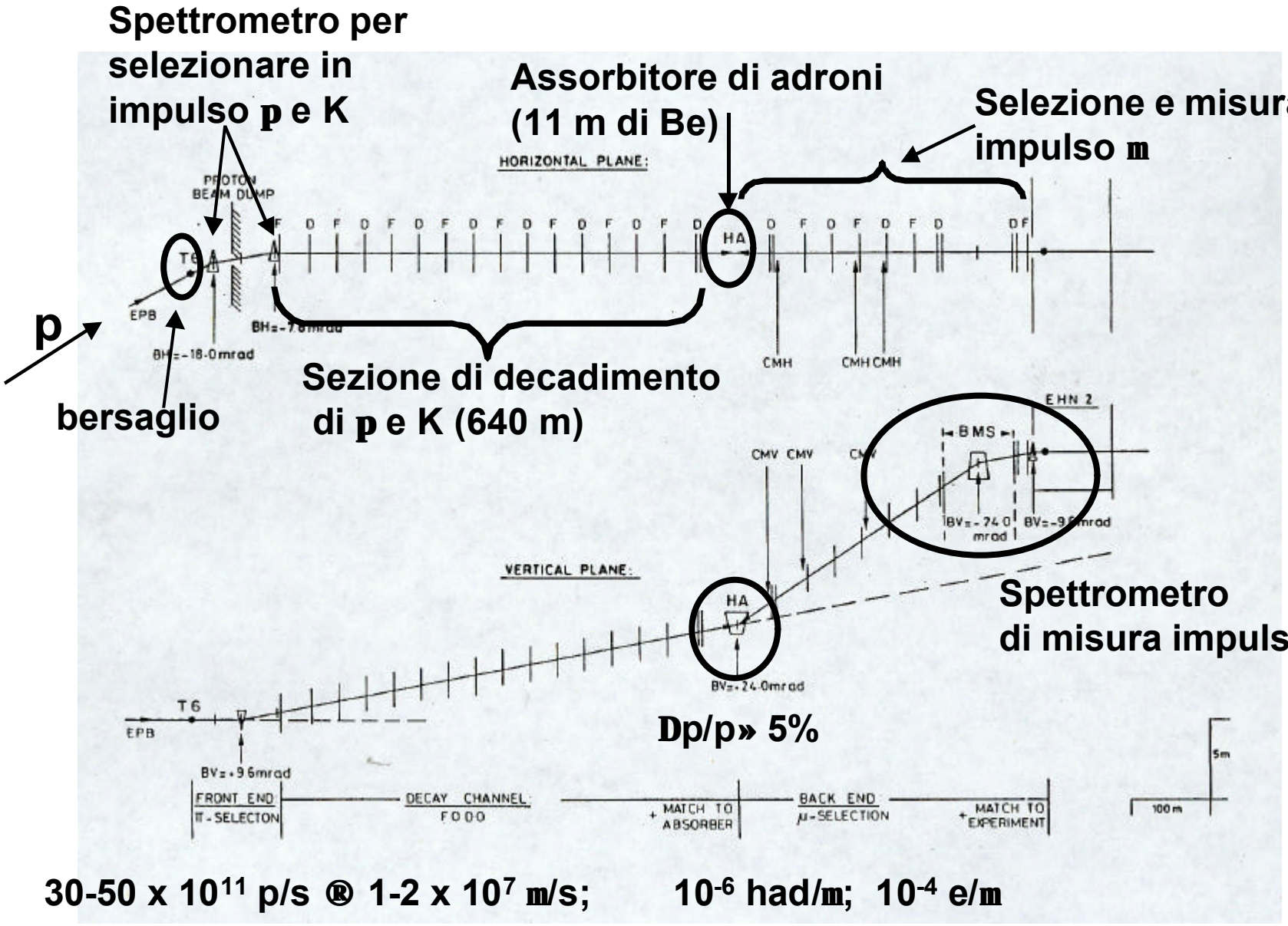
- **Fascio di muoni: ottenuto facendo incidere protoni dell'SPS su un bersaglio di tungsteno. Nella collisione si producono mesoni p e K. Si usano i decadimenti $p \to \mu\nu$, $K \to \mu\nu$ (N.B. necessario quasi un km perche' decadano)**

- **Intensita' » 10^7 m/s**

- **Energia variabile tra 90 e 280 GeV**

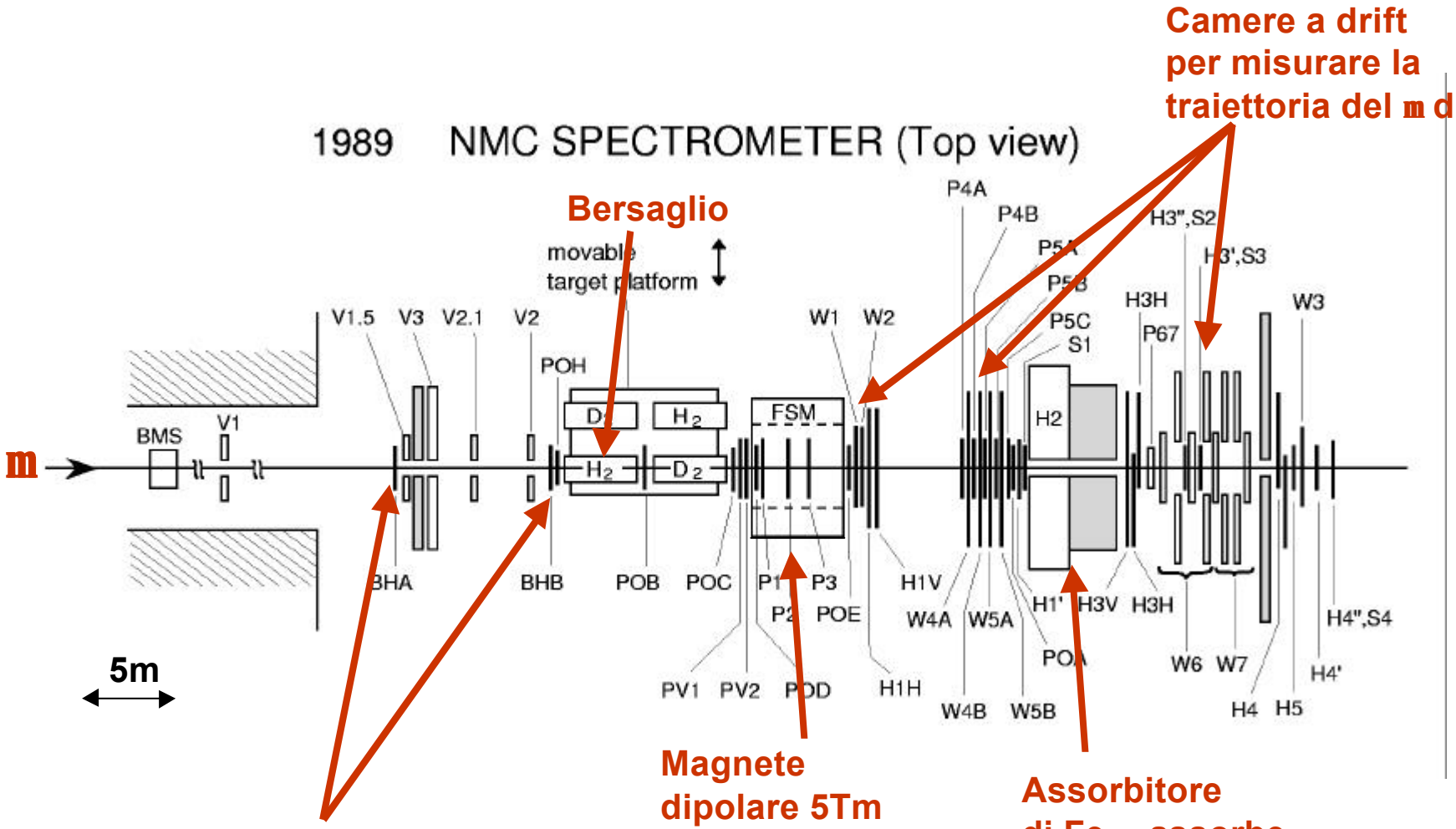
NB negli anni 70-00 ci sono stati una serie di esperimenti di DIS a bersaglio fisso:
CERN: BCDMS, EMC, NMC, SMC, COMPASS (fascio di muoni)
Fermilab: BFP, E665...(fascio di muoni)
SLAC: Esperimenti alla End-Station A (E49,…,E139, E140, E143, E143…)
DESY: HERMES (fascio di elettroni)

Fascio di muoni



30-50 x 10^{11} p/s ® 1-2 x 10^{7} m/s; 10^{-6} had/m; 10^{-4} e/m

Spettrometro della New Muon Collaboration (NMC)

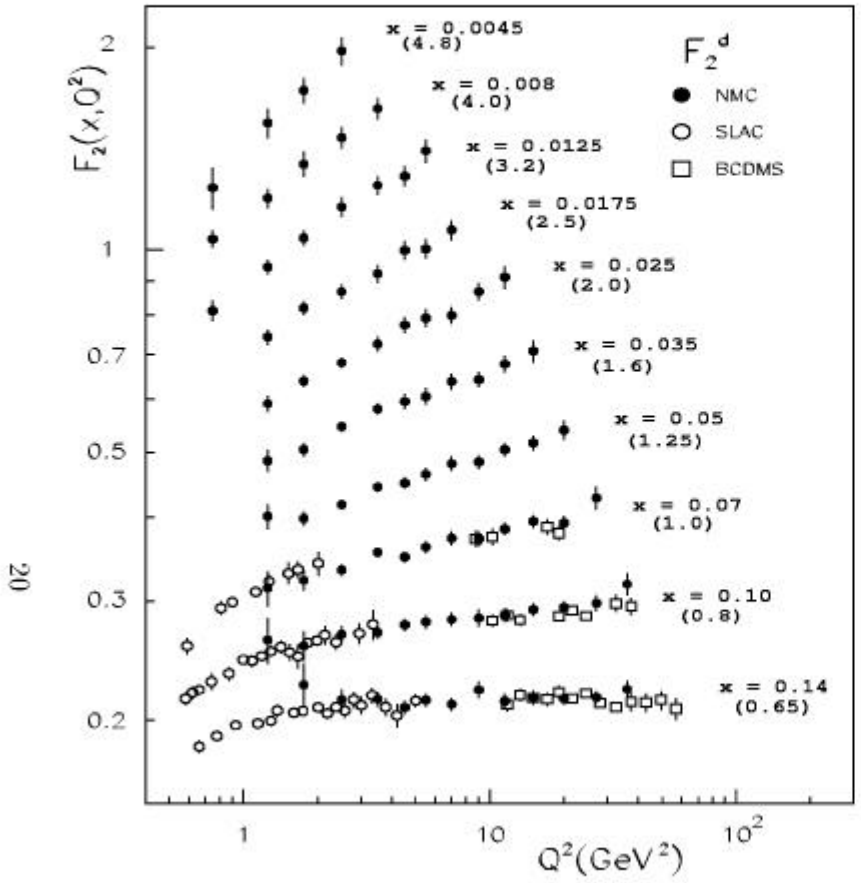


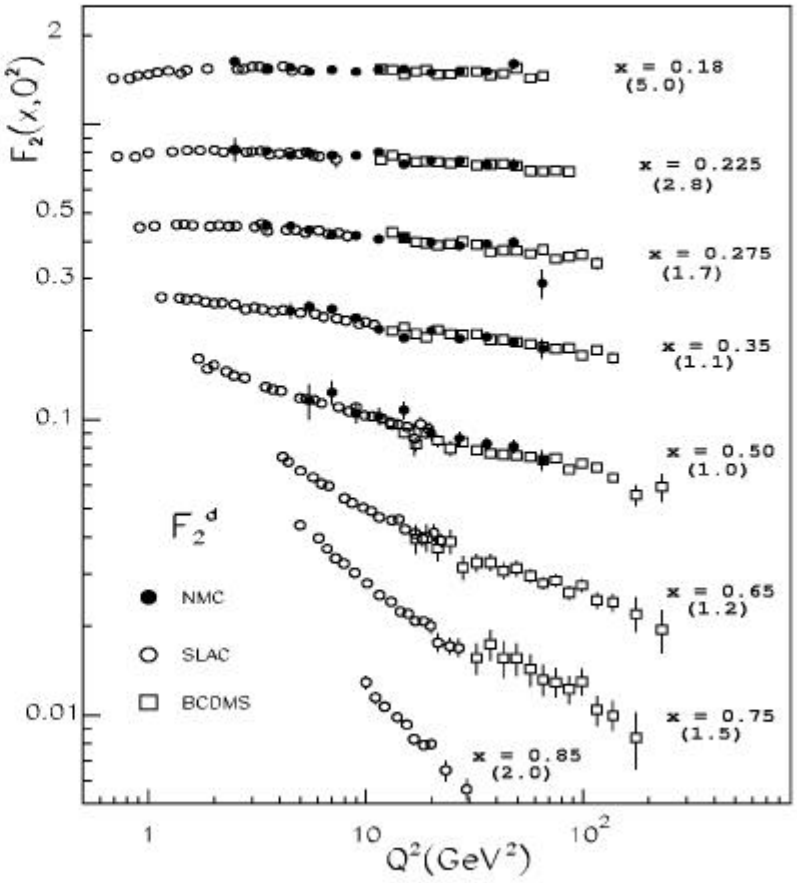
In funzione dal 1978 al 1995 (EMC, NMC, SMC)

Spettrometro della New Muon Collaboration (NMC)

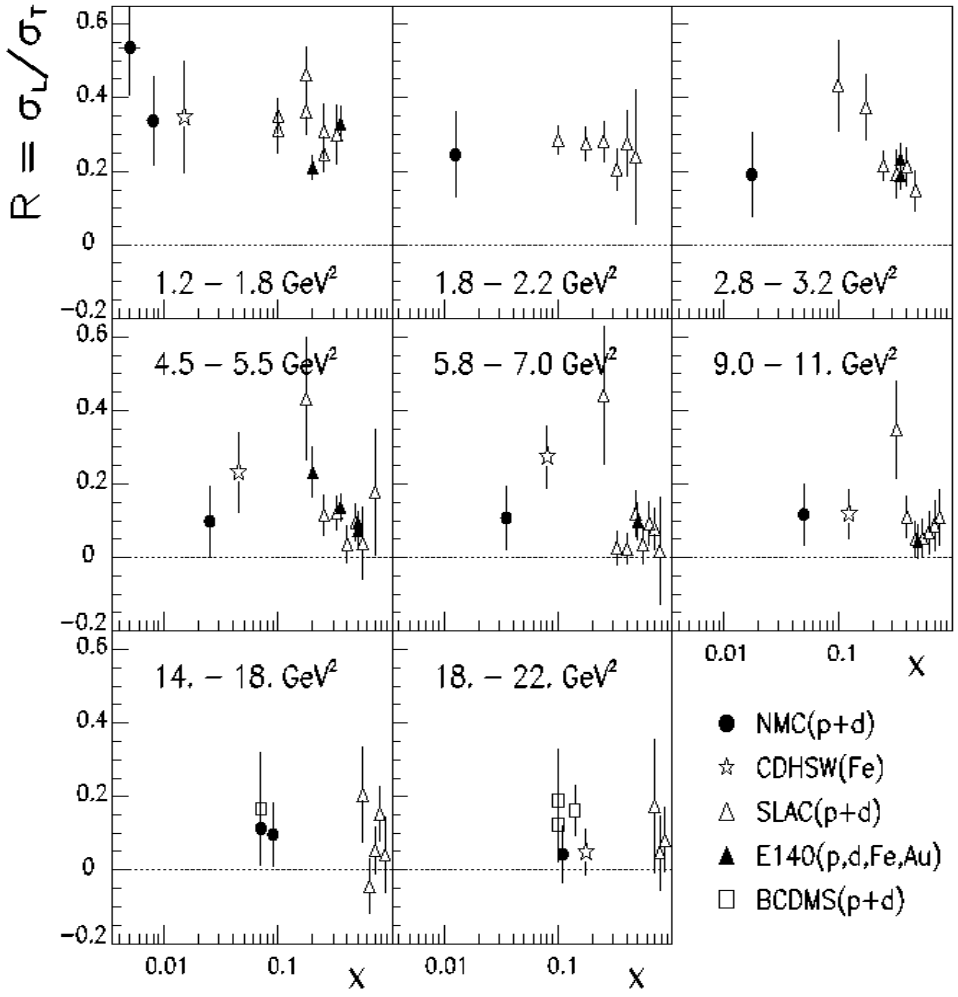
- Impulso del m incidente misurato dalla Beam Momentum Station (BMS) (spettrometro magnetico)
- Direzione del m incidente misurata da due gruppi di scintillatori a 10 m di distanza (odoscopi di fascio)
- m diffuso rivelato in camere proporzionali/a drift davanti, dentro e dopo un magnete dipolare da 5 Tm
- Impulso del m diffuso misurato dalla deflessione dovuta al magnete
- m diffuso identificato come la particella che attraversa un assorbitore di Fe lungo 2m (assorbe adroni, elettroni, fotoni)
- $\ddot{O}s_{max}$ » 24 GeV, Q^2_{max}»100 GeV^2, x_{min} » 10^{-2} a Q^2=10 GeV^2
- solo m diffuso e current jet visibili (non target jet)
- possibili bersagli nucleari

Risultati...

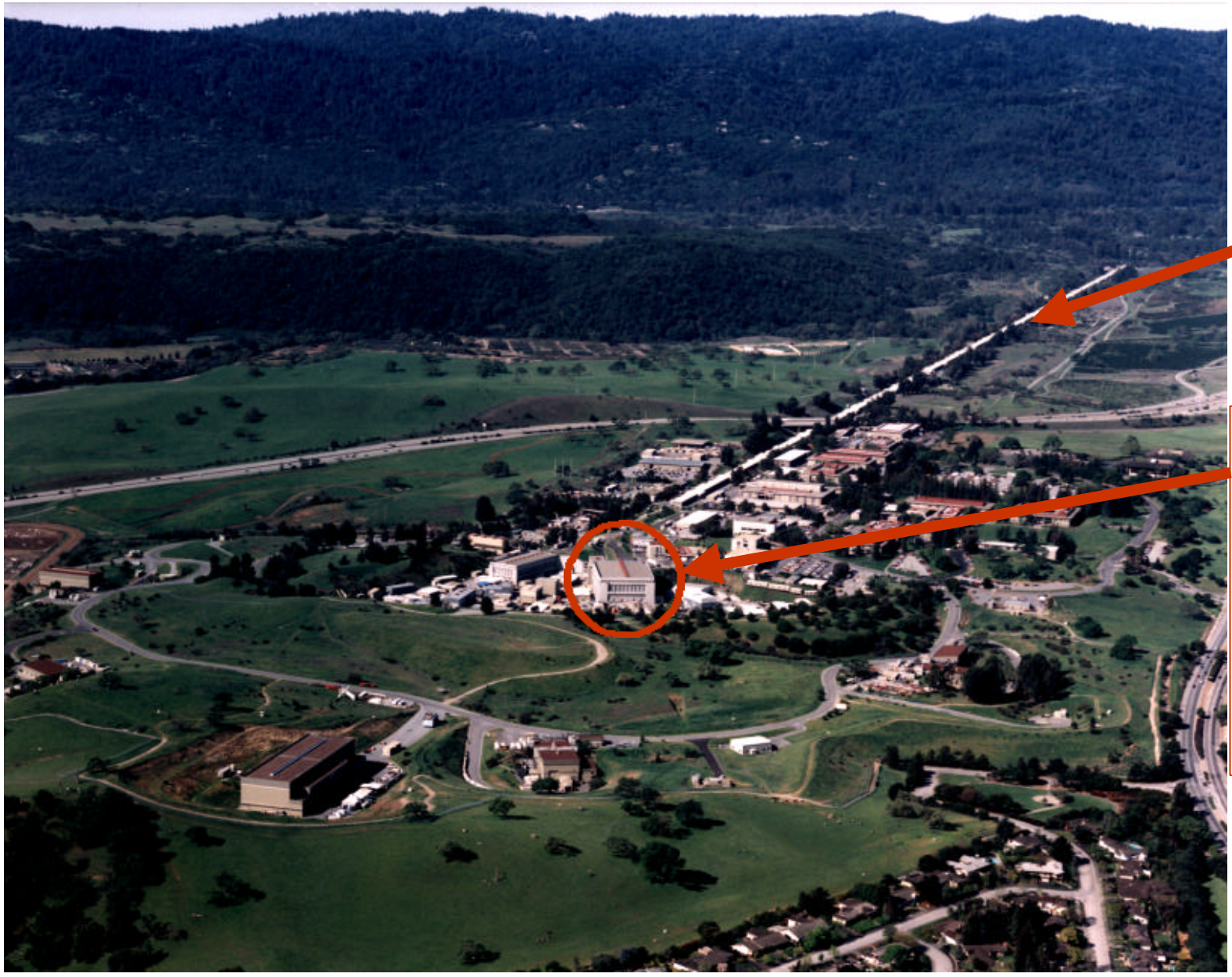

F_2^d
NMC
SLAC
BCDMS
x = 0.0045 (4.8)
x = 0.008 (4.0)
x = 0.0125 (3.2)
x = 0.0175 (2.5)
x = 0.025 (2.0)
x = 0.035 (1.6)
x = 0.05 (1.25)
x = 0.07 (1.0)
x = 0.10 (0.8)
x = 0.14 (0.65)
$F_2(x,Q^2)$
$Q^2(GeV^2)$


F_2^d
NMC
SLAC
BCDMS
x = 0.18 (5.0)
x = 0.225 (2.8)
x = 0.275 (1.7)
x = 0.35 (1.1)
x = 0.50 (1.0)
x = 0.65 (1.2)
x = 0.75 (1.5)
x = 0.85 (2.0)
$F_2(x,Q^2)$
$Q^2(GeV^2)$

Risultati...


R = σL/σT
1.2 – 1.8 GeV²
1.8 – 2.2 GeV²
2.8 – 3.2 GeV²
4.5 – 5.5 GeV²
5.8 – 7.0 GeV²
9.0 – 11. GeV²
14. – 18. GeV²
18. – 22. GeV²
0.6
0.4
0.2
0
−0.2
0.01
0.1
X
NMC(p+d)
CDHSW(Fe)
SLAC(p+d)
E140(p,d,Fe,Au)
BCDMS(p+d)

SLAC (California)



Linac per elettroni: 20 GeV

End-Station A

luogo di nascita del DIS... (1967)

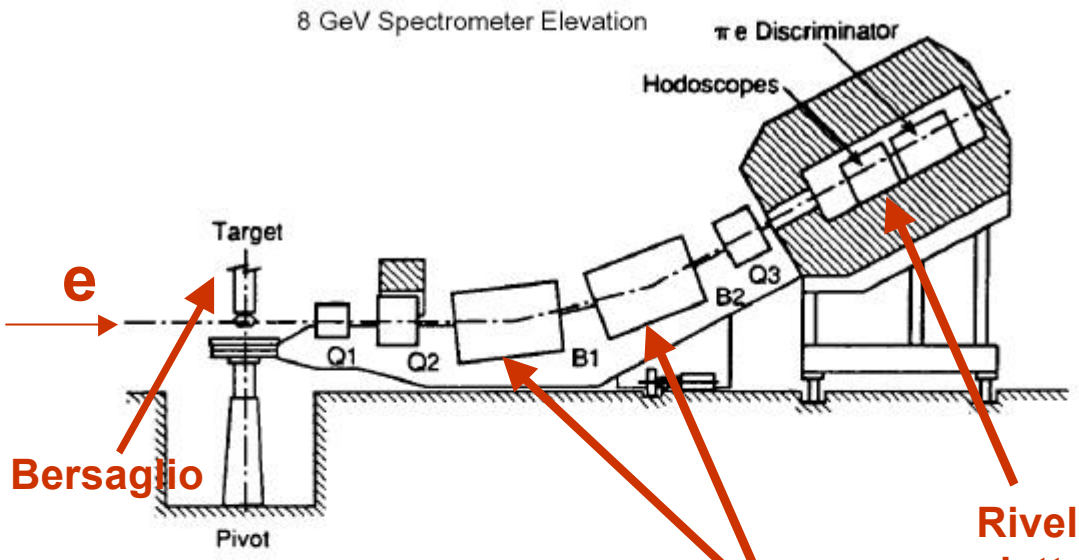
Spettrometri in End-Station A

Principio:

- **misurare l'elettrone diffuso con uno spettrometro magnetico di alta risoluzione ma bassa accettanza angolare**

- **ripetere la misura *spostando (!)* lo spettrometro intorno al bersaglio**

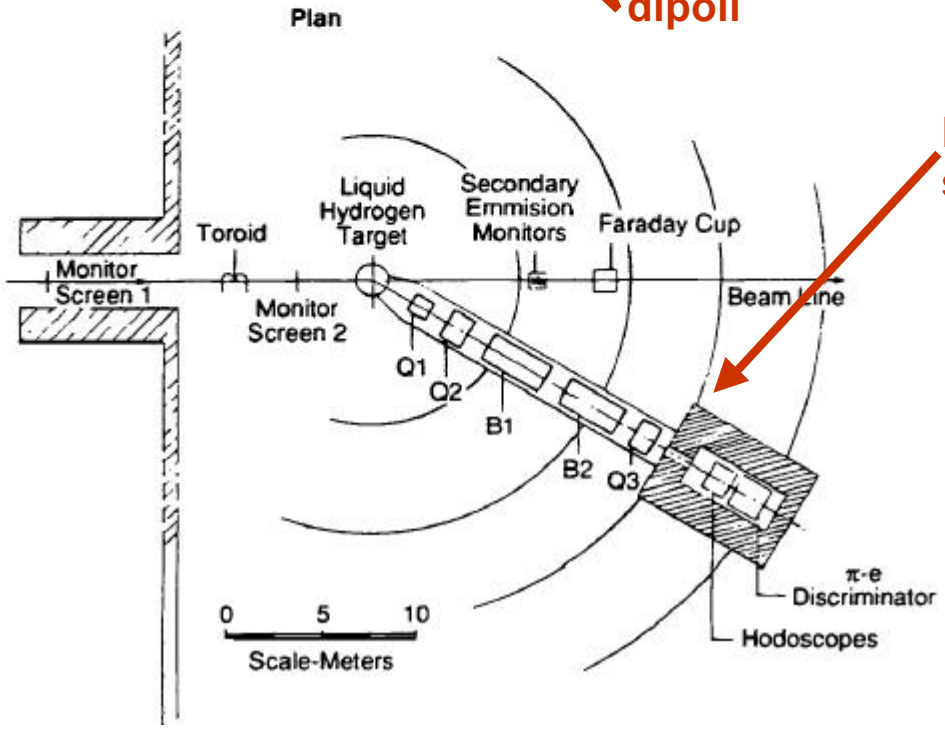
Spettrometro da 8 GeV



Bersaglio

dipoli

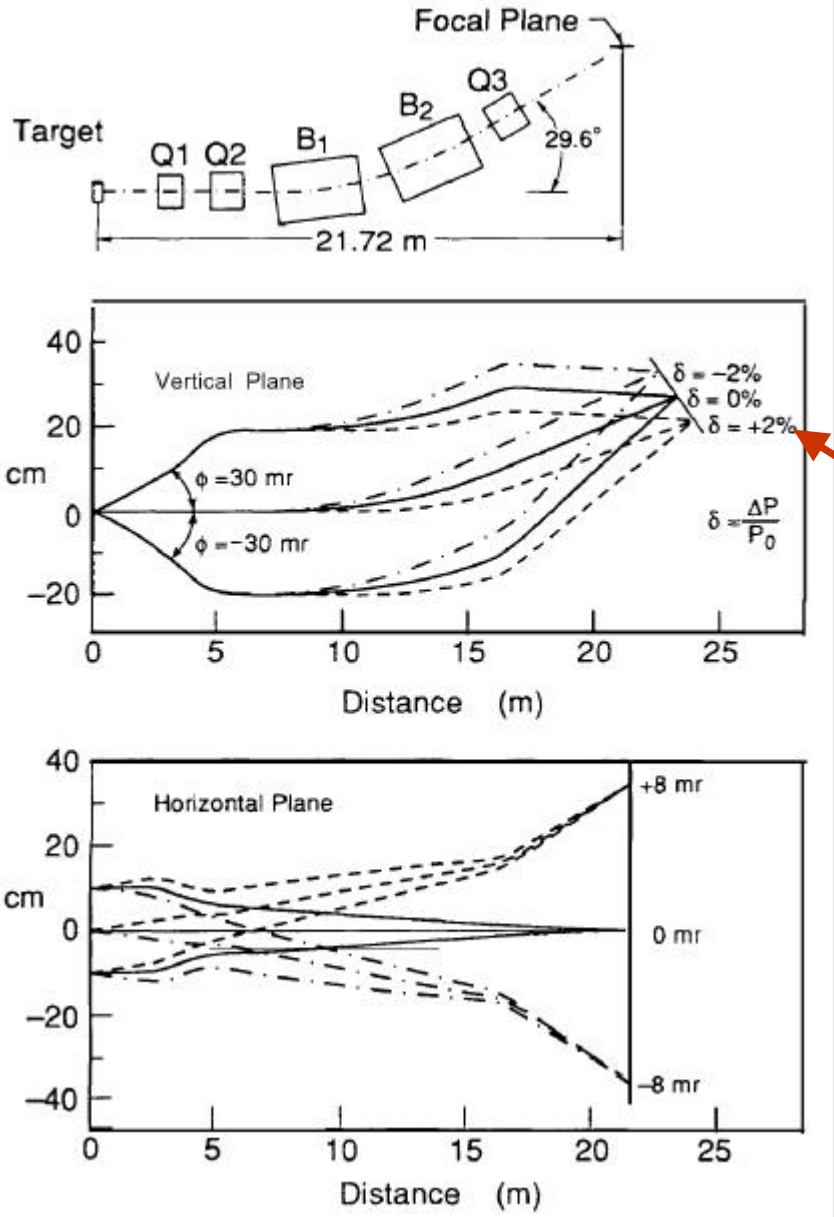
Rivelatori deflessione elettrone



L'intero spettrometro e' su rotaie !

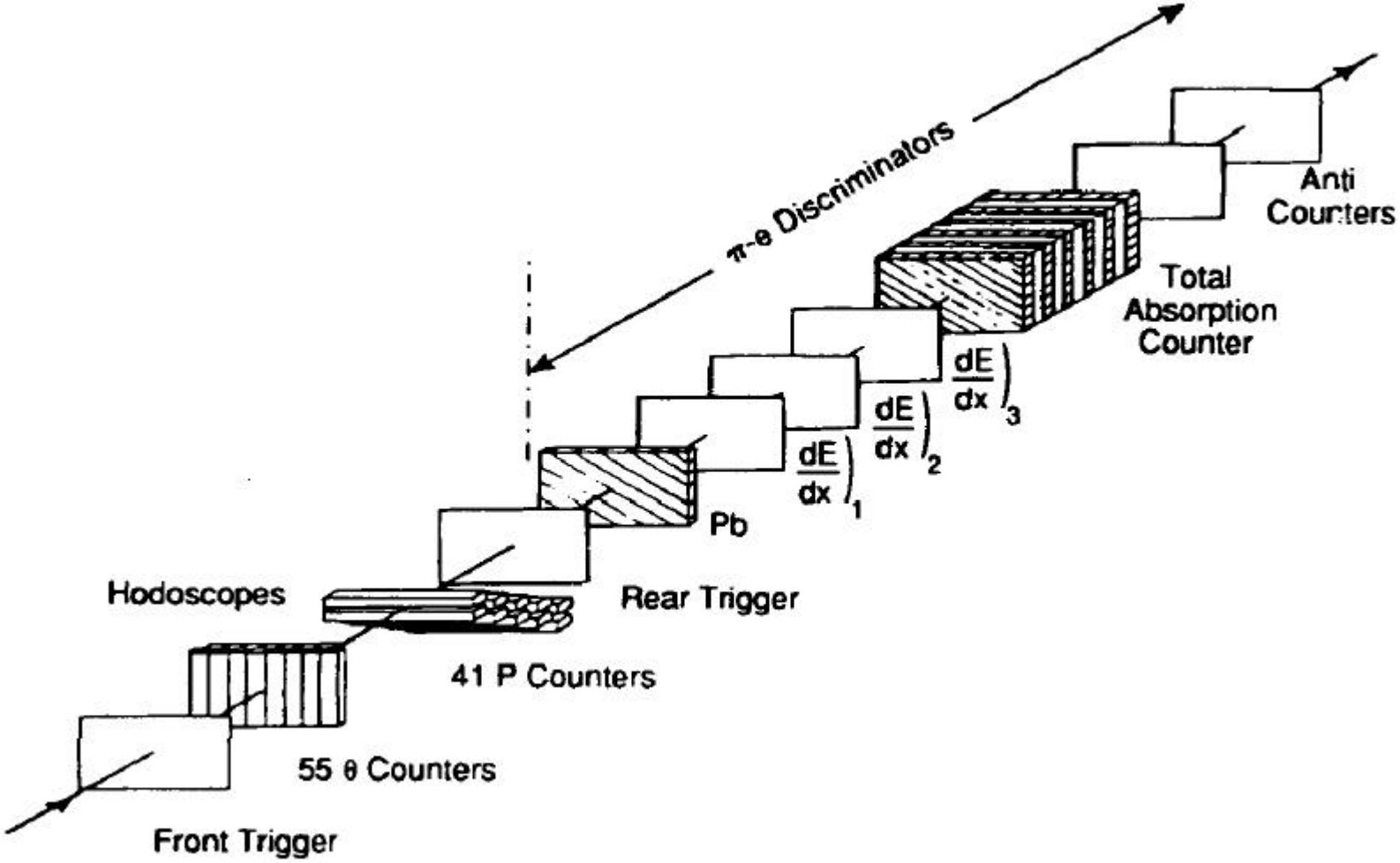
Massimo impulso misurabile 8 GeV. Per impulsi inferiori, viene ridotto il campo magnetico dei dipoli

Spettrometro da 8 GeV



Noto il campo magnetico, la deflessione degli elettroni e' proporzionale al loro impulso

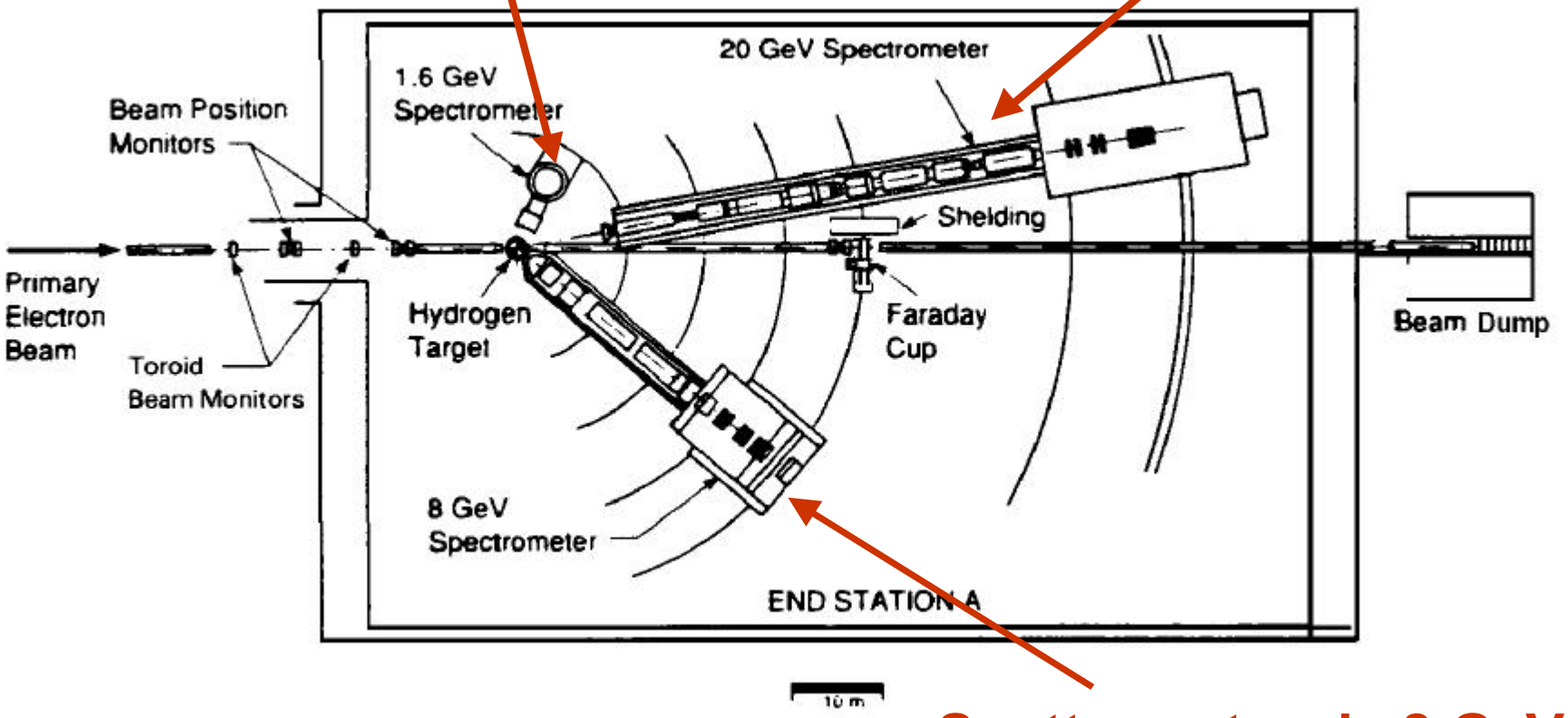
Stazione di misura dello spettrometro da 8 GeV



Spettrometri in End-Station A

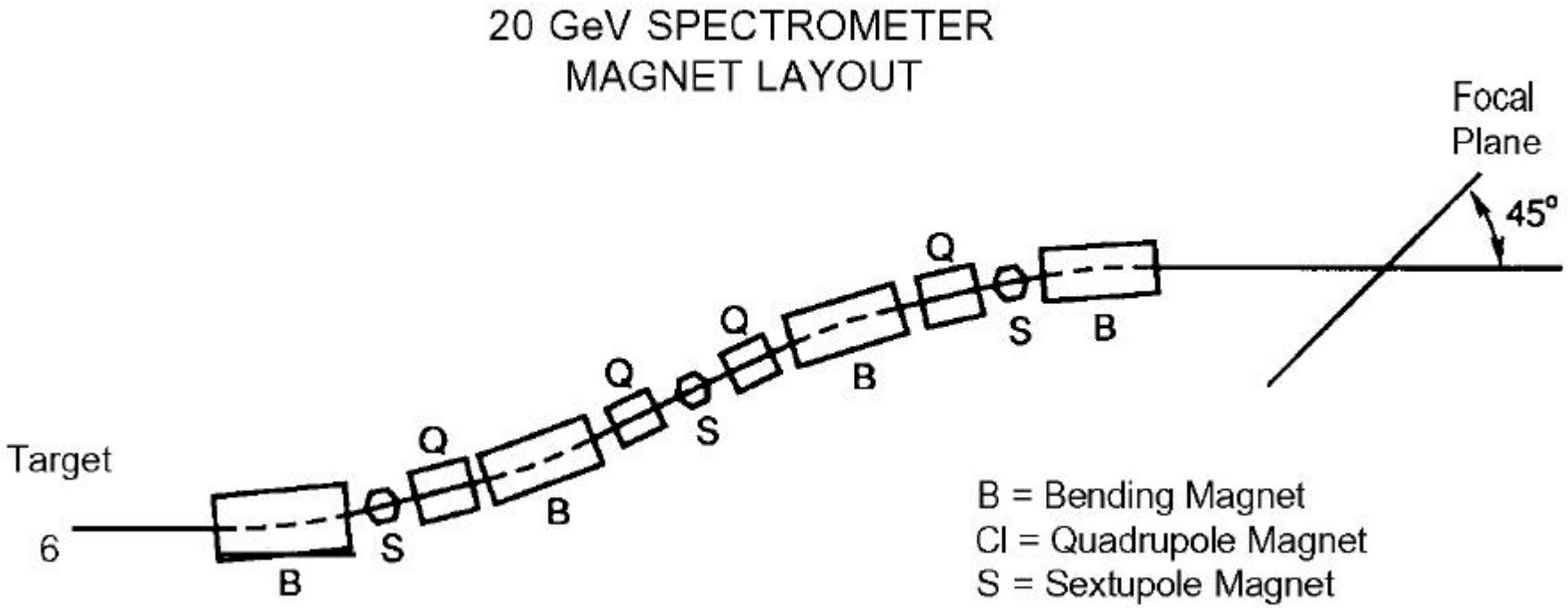
Spettrometro da 1.6 GeV

Spettrometro da 20 GeV

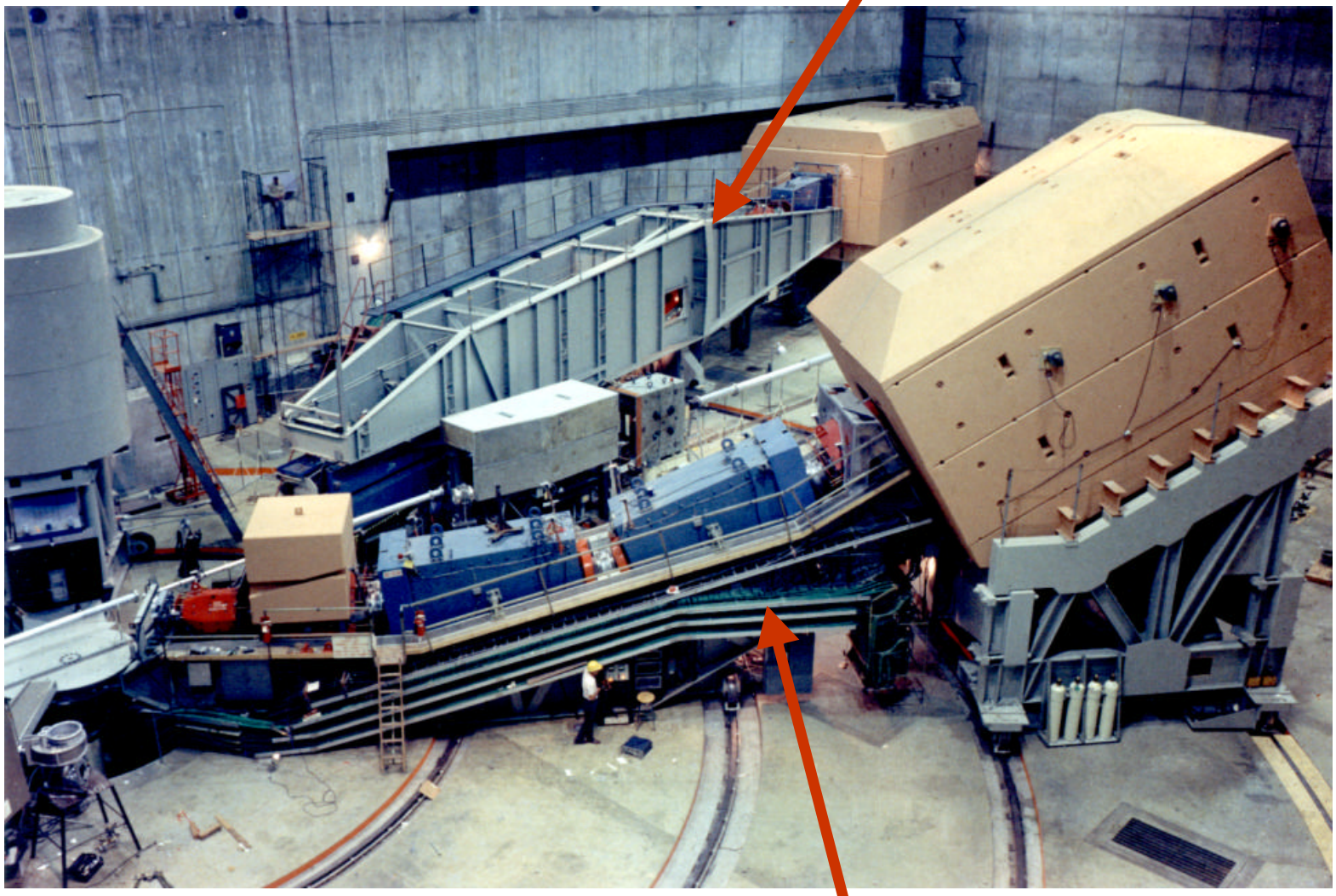


Spettrometro da 8 GeV

Spettrometro da 20 GeV

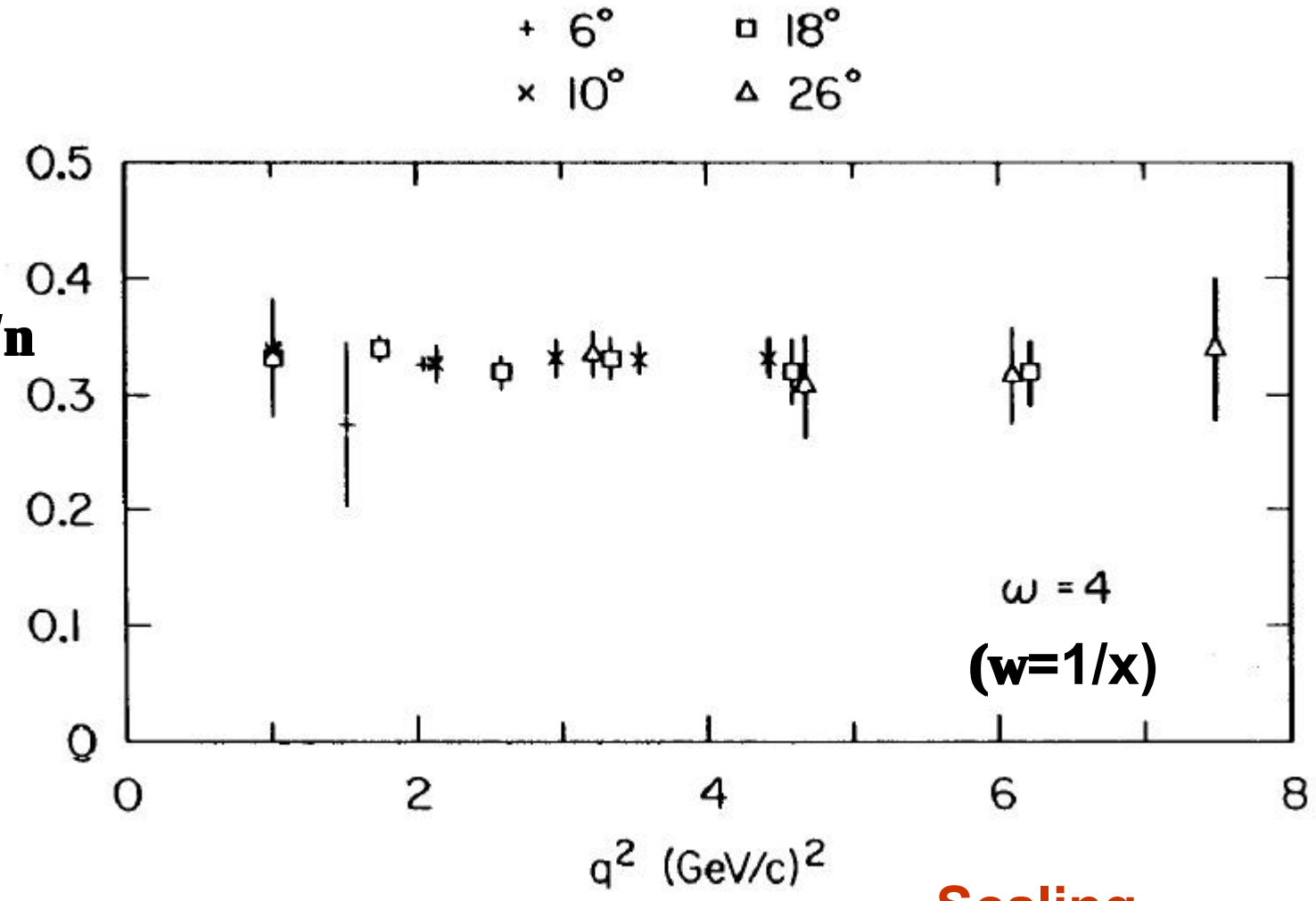


Spettrometro da 20 GeV



Spettrometro da 8 GeV

$W_2=F_2/n$



Scaling...

Bibliografia incompleta

SLAC:
R.E. Taylor, Rev. Mod. Phys. 63 (1991) 573
H.W. Kendall, Rev. Mod. Phys. 63 (1991) 597
J. I. Friedman, Rev. Mod. Phys. 63 (1991) 615

CERN:
EMC, J.P. Albanese et al., Nucl. Instr. and Methods 212 (1983) 111
T. Sloan, G. Smadja and R. Voss, Phys. Rep. 162 (1988) 45
NMC, M. Arneodo et al., Nucl. Phys. B483 (1997) 3
M. Arneodo, Phys. Rep. 240 (1994) 301 (solo effetti nucleari)

DESY:
H. Abramowicz and A. Caldwell, Rev. Mod. Phys. 71, 1275 (1999)
ZEUS Collab., S. Chekanov et al., Eur. Phys. J. C 21 (2001) 443
H1 Collab., C. Adloff et al., Eur. Phys. J. C30 (2003) 1

http://www-zeus.desy.de
http://www-h1.desy.de
http://www.desy.de