

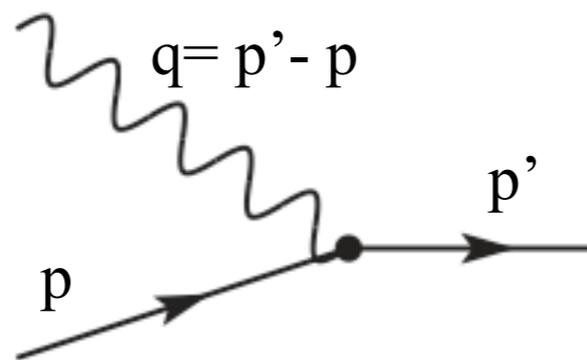
Luciano Maiani:
Lezione Fermi 13
La rivoluzione dei Partoni

Sommario

1. Materia dura e materia soffice
2. I fattori di forma di p e n
3. Diffusione profondamente inelastica
4. I “partoni” di Feynman
5. La crisi del momento e i partoni “neutri”: chi sono?
6. Partoni nel protone, in dettaglio

1. Materia puntiforme e non

- L'interazione base della QED e' il vertice elettrone-elettrone-fotone che abbiamo gia' incontrato
- l'ampiezza di questo processo non dipende dai momenti esterni: e' semplicemente una costante, come confermato dall'accordo tra le proprieta' dell'elettrone e i dati (es. l'anomalia magnetica, a_e , e quella del muone).

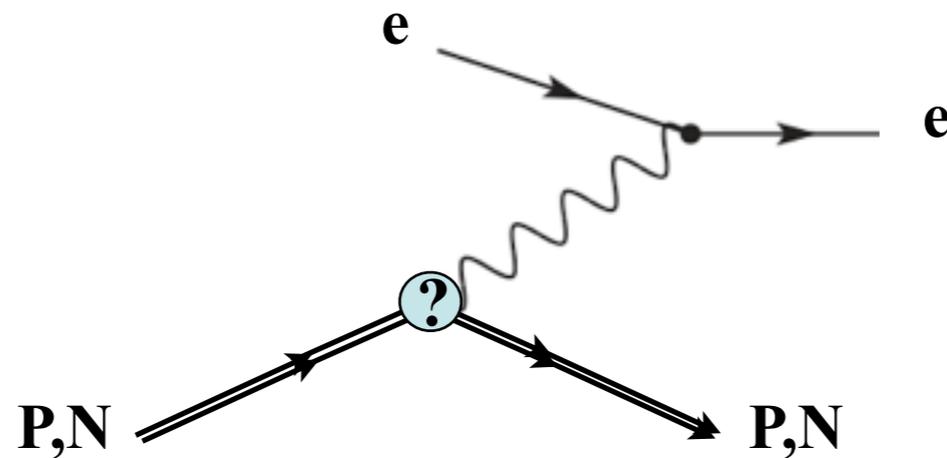


Nota. Ad alta energia:
 $q^2 = p^2 + p'^2 - 2(pp') = 2m_e^2 - 2(pp') =$
 $\approx -2(pp') = -2E_e E_e' (1 - \cos\theta) =$
 $= -4E_e E_e' \sin^2 \theta / 2$

- Relativita' Speciale e Invarianza di gauge permetterebbero una dipendenza dell'ampiezza dal quadrato del "momento trasferito" dal fotone agli elettroni, indicato con q^2 , vedi figura.
- sono permesse due funzioni, in gergo due "fattori forma", che descrivono la distribuzione, nello spazio, della carica elettrica e della magnetizzazione dell'elettrone;
- $F(q^2) = 1$ corrisponde a distribuzioni di carica/magnetizzazione concentrate in un punto dello spazio: una particella "puntiforme"

I fattori di forma del Protone

- Lanciando elettroni (puntiformi) su protoni o neutroni e misurando le probabilità di rimbalzo elastico a differenti angoli, possiamo confrontare l'osservazione con quanto previsto per un protone puntiforme e, se ci sono deviazioni, “misurare” i fattori di forma elettrici e magnetici di protone e neutrone.



- Le prime misure sono state fatte negli anni '50 da Robert Hofstadter, con l'acceleratore lineare di elettroni costruito presso l'Università di Stanford, California.
- Le misure danno una stima del raggio entro cui è contenuta la carica del protone, se fosse una sferetta uniformemente carica,
- Hofstadter otteneva: $R \approx 0.8 \cdot 10^{-13} \text{ cm} = 0.8 \text{ fermi}$, con $F(q^2) \rightarrow 0$ rapidamente per $q^2 \rightarrow -\infty$
- per queste misure, R. H. ha ottenuto il Premio Nobel per la Fisica nel 1961.

The Beginnings

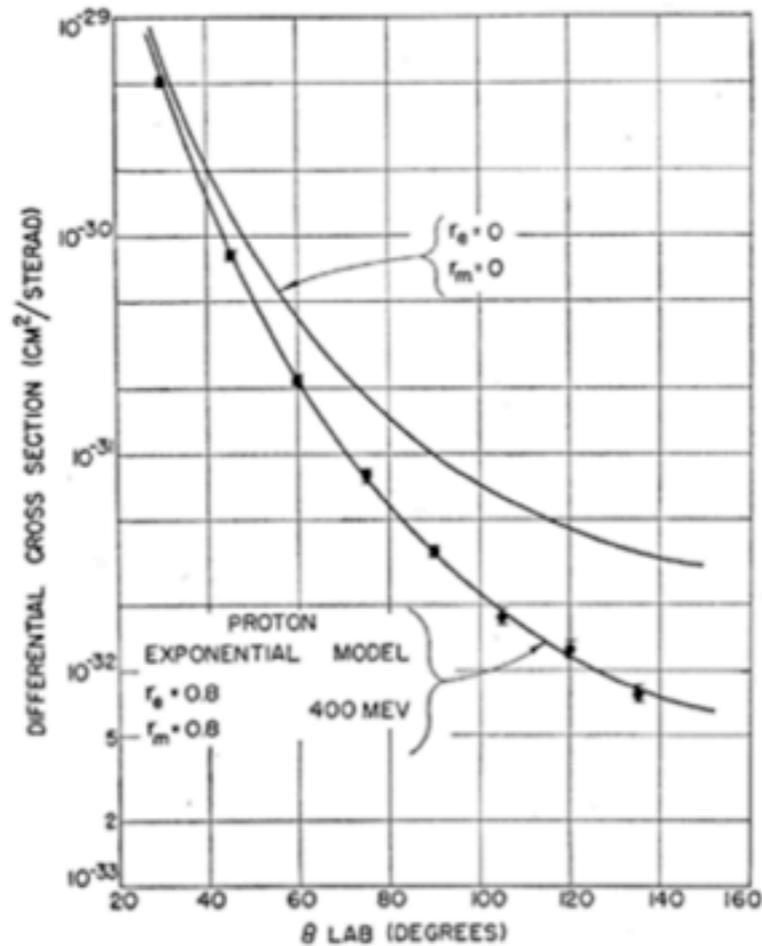


FIG. 26. Typical angular distribution for elastic scattering of 400-Mev electrons against protons. The solid line is a theoretical curve for a proton of finite extent. The model providing the theoretical curve is an exponential with rms radii $= 0.80 \times 10^{-13}$ cm.

R. Hofstadter, Rev. Mod. Phys. 56 (1956) 214

ed-elastic
Finite size + nuclear structure

Robert Hofstadter
Nobel prize 1961



ep-elastic
Finite size of the proton

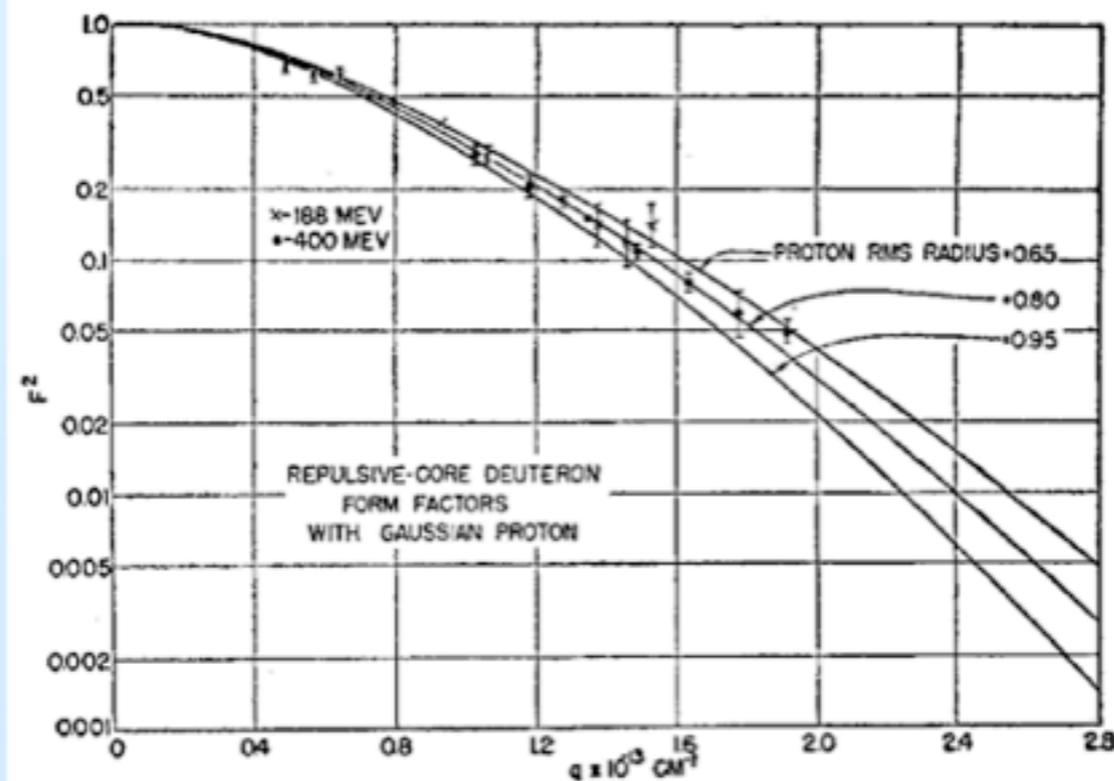
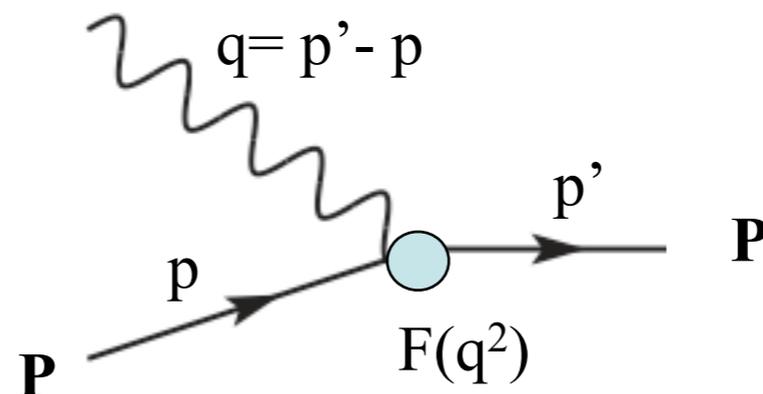


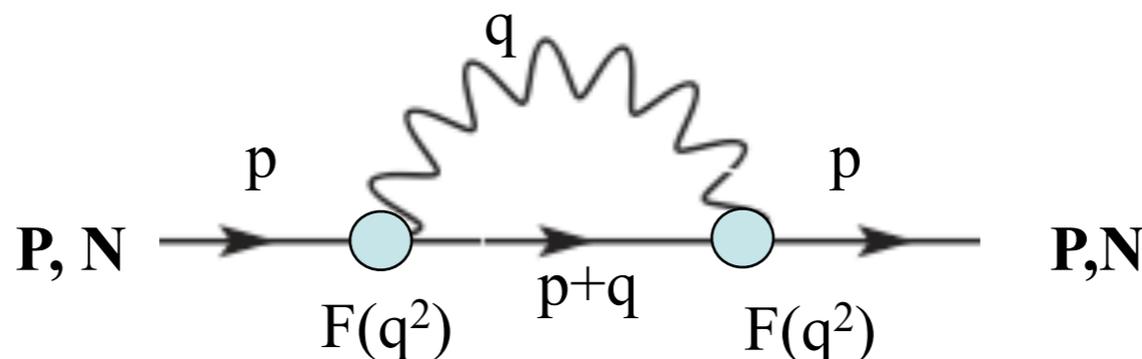
FIG. 31. Introduction of a finite proton core allows the experimental data to be fitted with conventional form factors (McIntyre).

La materia subnucleare e' soffice?

- A causa del fattore di forma, l'interazione di protone e neutrone con il fotone decresce rapidamente di intensita' con il momento trasferito



- gli effetti virtuali adesso sono rappresentati da integrali convergenti e (forse) calcolabili? ad es. la differenza di massa neutrone-protone (=1.4 MeV)?

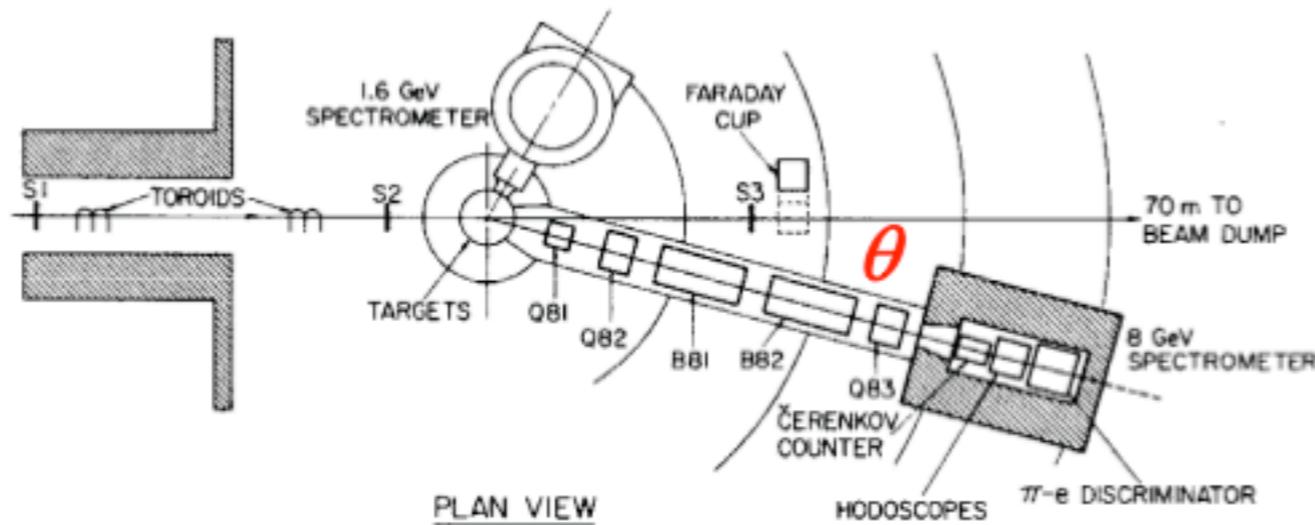
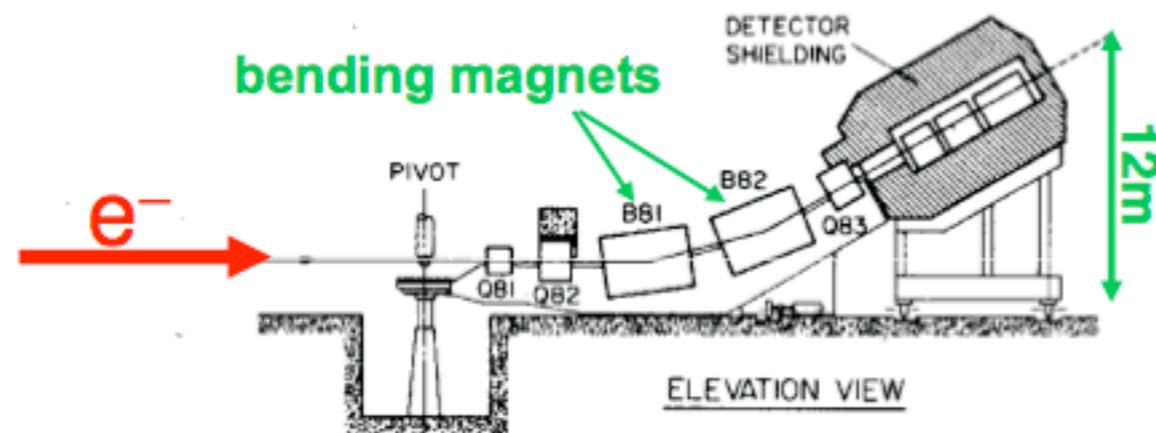


- esplorando la materia adronica ad alti valori di q^2 , secondo alcuni, si sarebbero incontrati processi sempre piu' rari, a differenza di quanto succede con le particelle puntiformi: elettrone e muone;
- Prob $(e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-) \approx 1/|q^2|$ mentre Prob $(e^+e^- \rightarrow \text{adroni})$ avrebbe dovuto crollare appena sopra il GeV: era il ... "deserto adronico" (J. J. Sakurai)

Higher Energy Electron-Proton Scattering

★ Use electron beam from SLAC LINAC: $5 < E_{\text{beam}} < 20 \text{ GeV}$

- Detect scattered electrons using the "8 GeV Spectrometer"



High $q^2 \rightarrow$ Measure $G_M(q^2)$

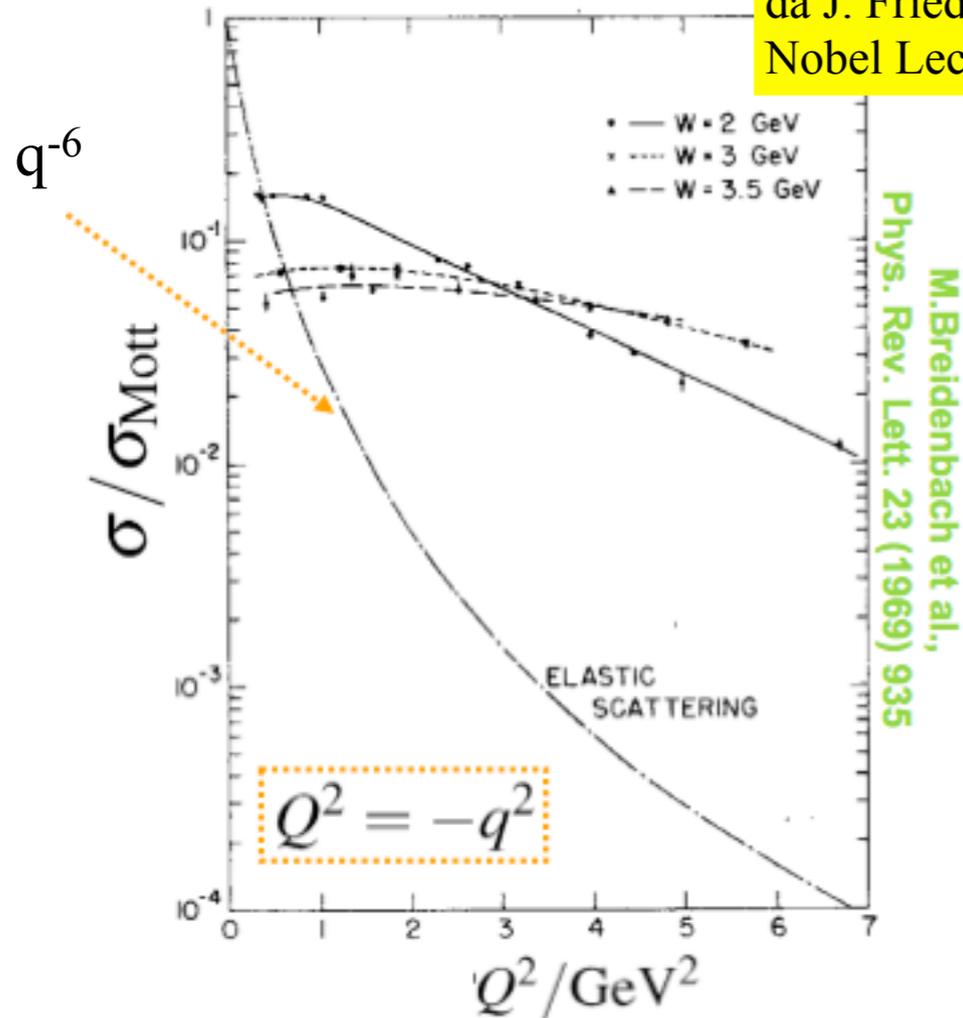
P.N.Kirk et al., Phys Rev D8 (1973) 63

Diffusione profondamente inelastica di elettroni su protoni

- Fine 1968. Misure di diffusione di elettroni su protoni all'acceleratore lineare di Stanford, al laboratorio SLAC, nella regione 'profondamente inelastica', definita da:
 - valori del momento trasferito dall'elettrone, $|q^2| \gg 1 \text{ GeV}^2$;
 - energia ceduta al protone nel sistema del laboratorio: $(qP) = Mv = M(E_e' - E_e) \gg 1 \text{ GeV}$
 - rapporto fisso tra le due quantità: $x = |q^2| / (2Mv) = \text{fissato}$
- doveva essere nel pieno del 'deserto adronico', ma le misure di J. Friedmann, H. Kendall e R. Taylor trovarono probabilità di diffusione simili a quelle di particelle puntiformi
- in particolare, confermavano la previsione fatta da J. Bjorken a partire dalla proprietà della corrente elettromagnetica dei quark, che la probabilità sarebbe stata solo funzione del rapporto adimensionale x (proprietà detta dello 'scaling' di Bjorken)
- in particolare, la probabilità, a parte fattori cinematici, dipendeva da una funzione, denominata $F_2(x)$, che avrebbe dovuto dipendere da q^2 e v , ma di fatto dipendeva solo dalla variabile adimensionale x .

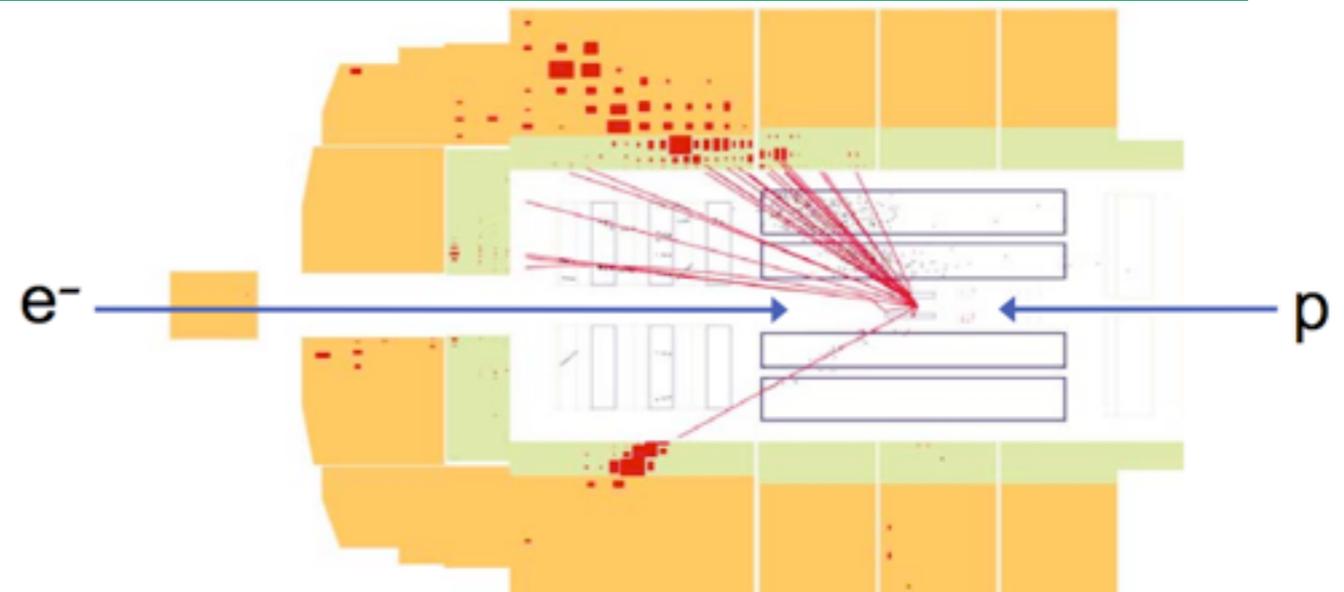
Diffusione profondamente inelastica di elettroni su protoni

da J. Friedmann,
Nobel Lecture, 1990

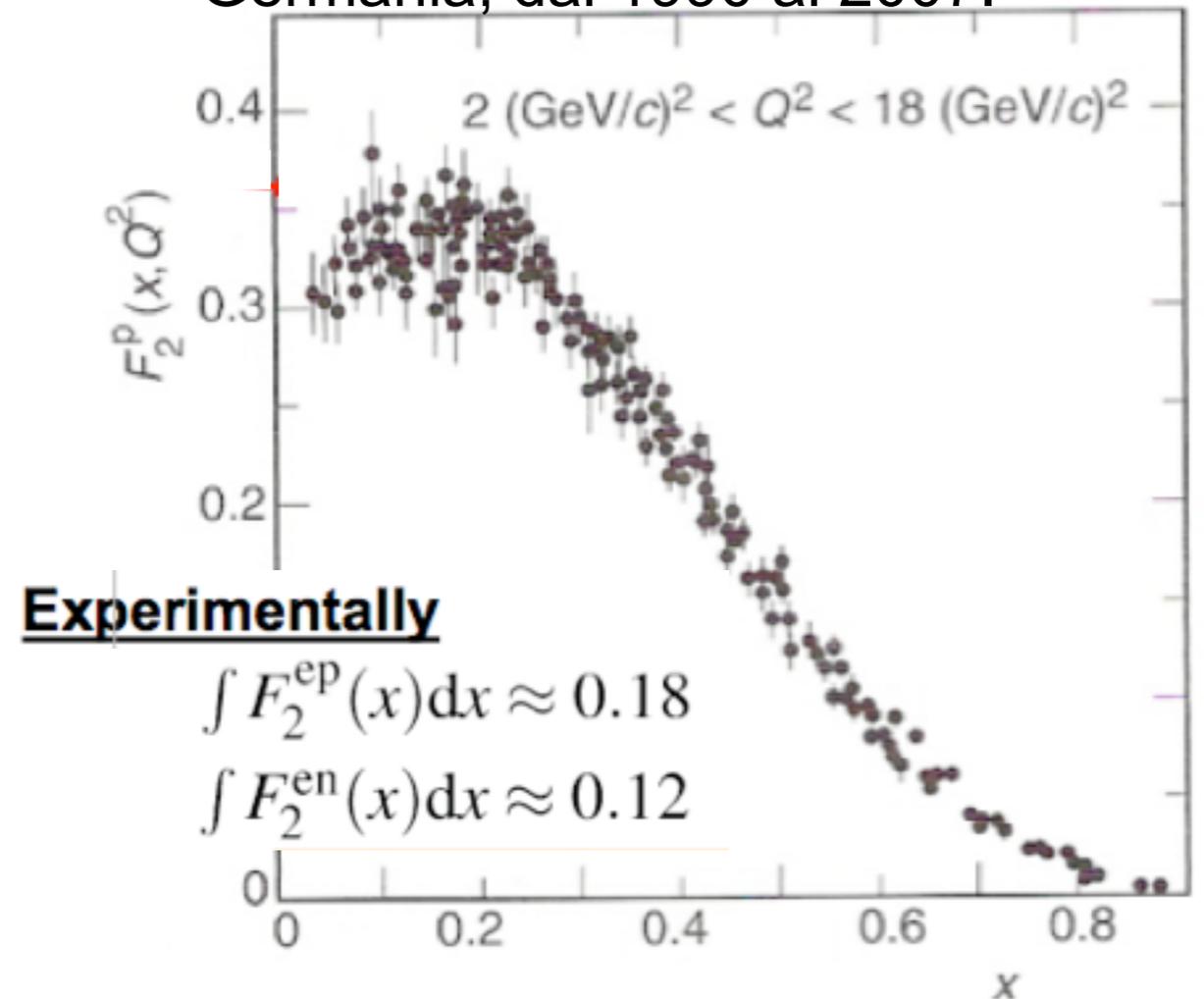


... It was quite the most incredible event that has ever happened to me in my life. It was almost incredible as if you fired a 15-inch shell at a piece of tissue paper and it came back and hit you. (E. Rutherford, 1936)

....la stessa sorpresa, ma nel 1968 ..
..non sarebbe stata l'unica...



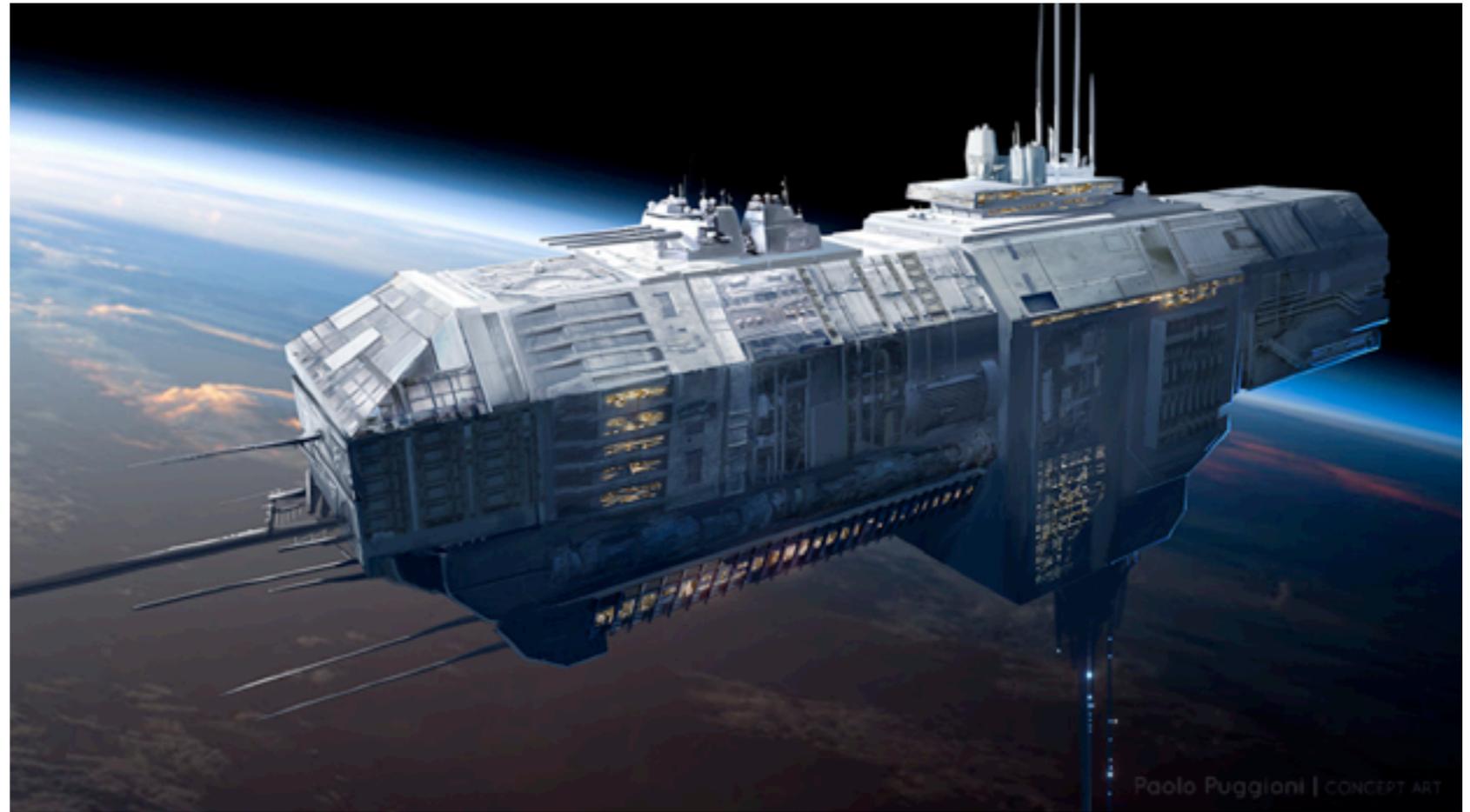
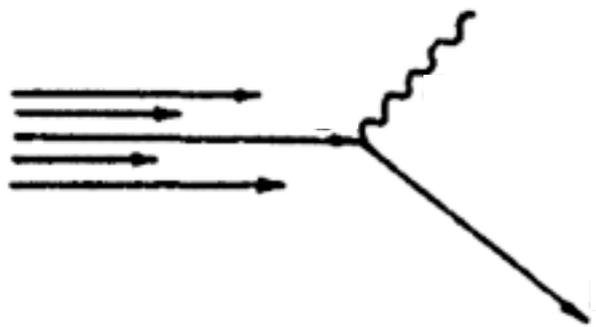
L'esperimento H1 al Collisore HERA, e-p, in funzione a DESY, Amburgo, Germania, dal 1990 al 2007.



Guardando dentro i finestrini di una nave spaziale che passa...

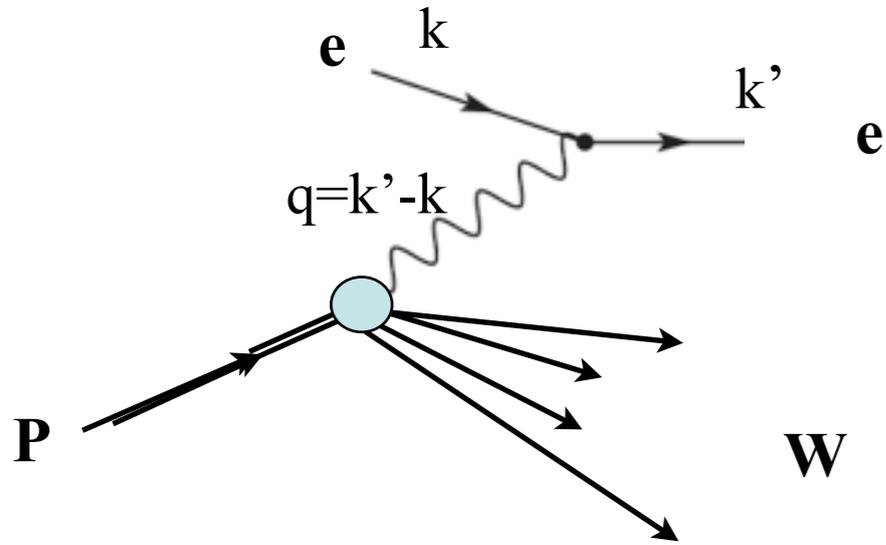
- ... a velocità prossima a quella della luce
- vedremo i passeggeri muoversi lentissimamente....
- e' la dilatazione relativistica del tempo (Lorentz-Einstein)
- (ricordate il paradosso dei gemelli nel Pianeta delle Scimmie?)
- il fattore di dilatazione dei tempi e':

$$\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \rightarrow \infty \text{ per } v \rightarrow c$$

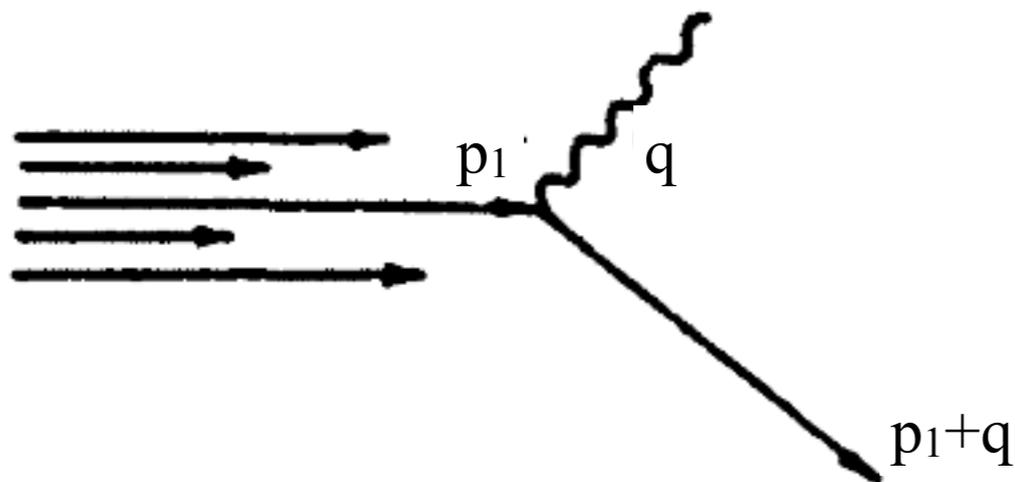


- la stessa cosa avviene se “guardiamo” un protone che viaggia con un momento $P \gg \gg Mc^2$
- le interazioni tra i costituenti rallentano
- un fotone di frequenza abbastanza grande prende un'istantanea del protone in cui i costituenti e i quanti delle forze sono “congelati” in un fermo fotogramma

4. I “partoni” di Feynman (1970)



- i costituenti un protone di alta energia si “muovono” molto lentamente, a causa della dilatazione del tempo di Lorentz
- un protone di alta energia appare come un fascio di “partoni” di massa nulla, ciascuno con una frazione, x , del momento totale, P : sono i *costituenti* del protone ma anche i *quanti del campo di forze* che li tengono insieme;
- nell’urto con un partone carico, il fotone fa una “istantanea” del protone, selezionando il partone che ha la frazione “giusta” del momento



$m_{parton} \approx 0$, momento trasverso ≈ 0 ,

$$p = xP,$$

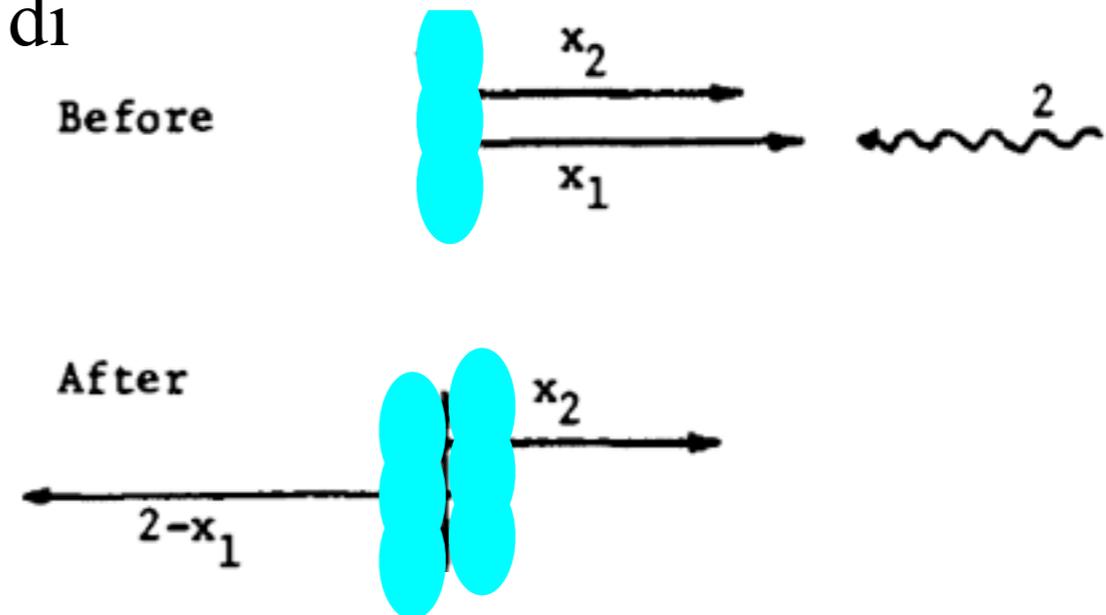
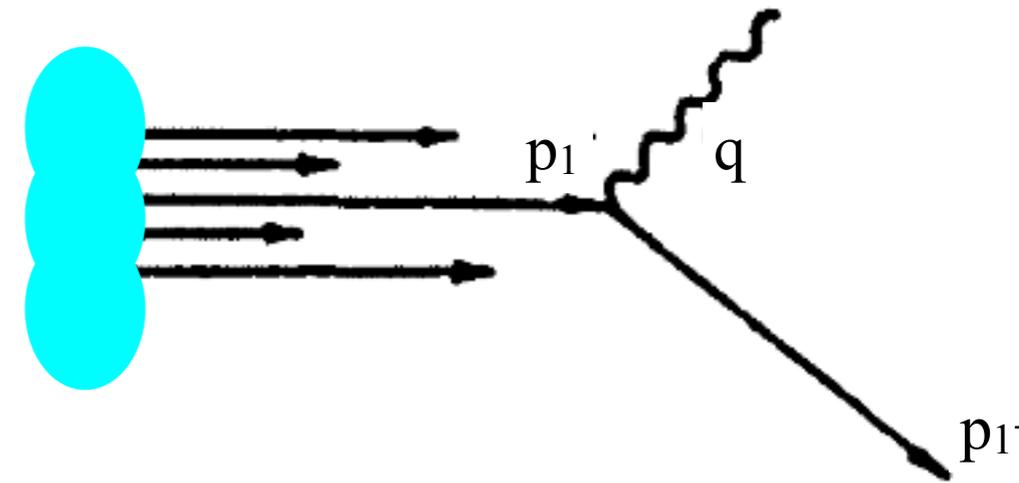
$$(xP + q)^2 = q^2 + 2xPq = q^2 + 2M\nu x = m_{parton}^2 \approx 0$$

$$\rightarrow x = \frac{-q^2}{2M\nu}$$

la variabile di scala di Bjorken e' la frazione di momento del partone !

I partoni “soffici” (wee partons)

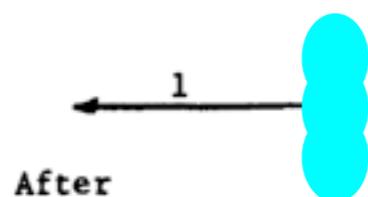
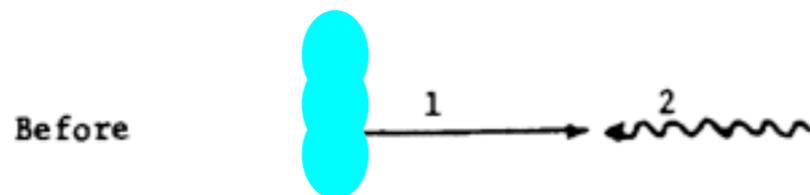
- i partoni “duri” ($x \sim 0.2-0.8$) sono accompagnati da una nuvola di partoni con momenti piccolissimi (wee)
- quando l’urto manda un partone “fuori dal coro” i partoni soffici ricostruiscono un getto di adroni normali



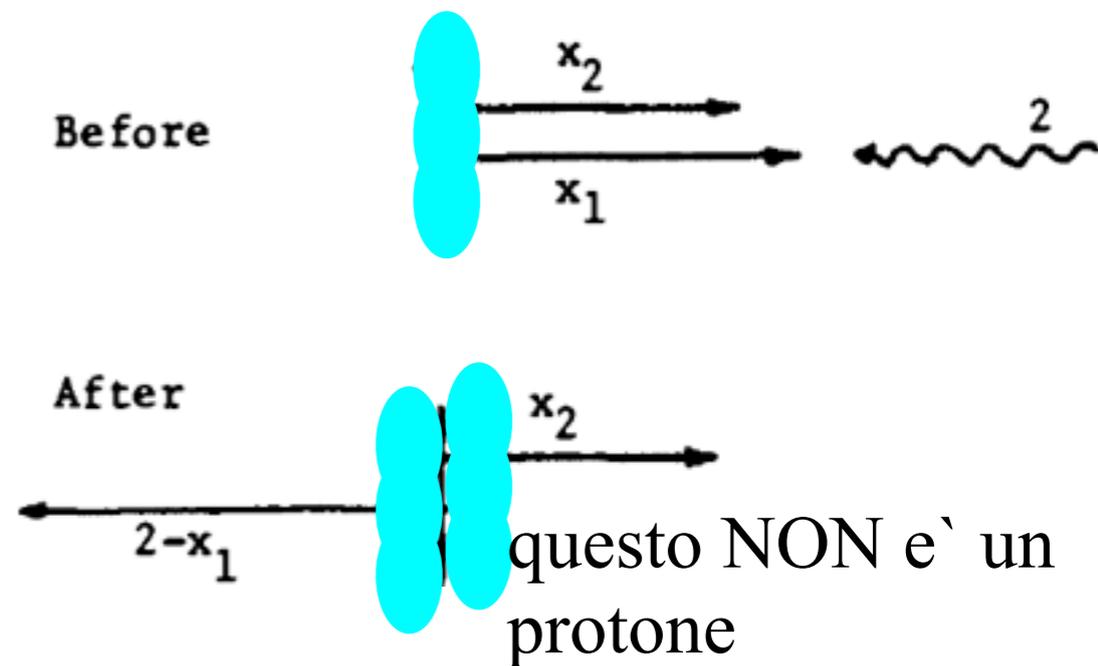
- per questo i quark non “si vedono” tra i prodotti delle collisioni di alta energia (e non perche’ hanno una massa grande!!!)

Il Fattore di forma del Protone

- per ottenere la diffusione elastica del protone, devo partire da uno stato con un solo partone duro



questo e' un protone...
 ..che rimane tale, poiche' i partoni soffici
 possono andare sia avanti che indietro



- ma la probabilita' di trovare nel protone solo un partone duro tende rapidamente a zero con P e quindi con q),
- questo spiega la decrescita precipitosa dei fattori di forma

5. La crisi dei momenti:

i partoni neutri sono i quanti delle forze tra quark?

$P(x)$ = Probabilità di trovare un partone con frazione x di momento

$$F_2(x) = \sum_i Q_i^2 x_i P(x_i)$$

Experimentally

$$\int F_2^{\text{ep}}(x) dx \approx 0.18$$

$$\int F_2^{\text{en}}(x) dx \approx 0.12$$

- l'integrale di $F_2(x)$ da' il momento medio di ogni tipo partone, pesato con la carica elettrica al quadrato
- supponiamo che i partoni siano i quark, con il protone =uud
- u dovrebbe portare 2/3 del momento, da cui:
- d porta 1/3 del momento
- totale: $(F_2^p)_{\text{quark}} = 9/27 = 3/9$
- analogamente: $(F_2^n)_{\text{quark}} = 4/9 * 1/3 + 1/9 * 2/3 = 6/27 = 2/9$
- $(F_2^p/F_2^n)_{\text{quark}} = 3/2$ ottimo!
- ma $(F_2^p)_{\text{quark}}$ e' solo $0.18/(1/3) = 54\%$ di F_2^p
- circa il 46% del momento del protone e' portato da partoni neutri, che non interagiscono con il fotone: ???

$$F_{2u}^p = \frac{4}{9} \times \frac{2}{3} = \frac{8}{27}$$

$$F_{2d}^p = \frac{1}{9} \times \frac{1}{3} = \frac{1}{27}$$

$$(F_2^p)_{\text{quark}} = \frac{9}{27} = \frac{3}{9}$$

$$(F_2^n)_{\text{quark}} = \frac{1}{9} \times \frac{2}{3} + \frac{4}{9} \times \frac{1}{3} = \frac{2}{9}$$

6. Partoni nel protone , in dettaglio

La composizione del protone in partoni si ottiene dalle sezioni d'urto di elettroni insieme a quelle di neutrini e antineutrini.

Nella vita reale, ci sono violazioni dello scaling, ma solo logaritmiche: $P(x, \log Q^2)$.

Composizione in Partoni dei protoni di Alta Energia:
a SLAC ($Q^2=20$) e a LHC ($Q^2=10.000$)

Ad LHC, il protone e' fatto soprattutto di glue e non e' molto diverso da un antiprotone: p-p va altrettanto bene che p-pbar.

