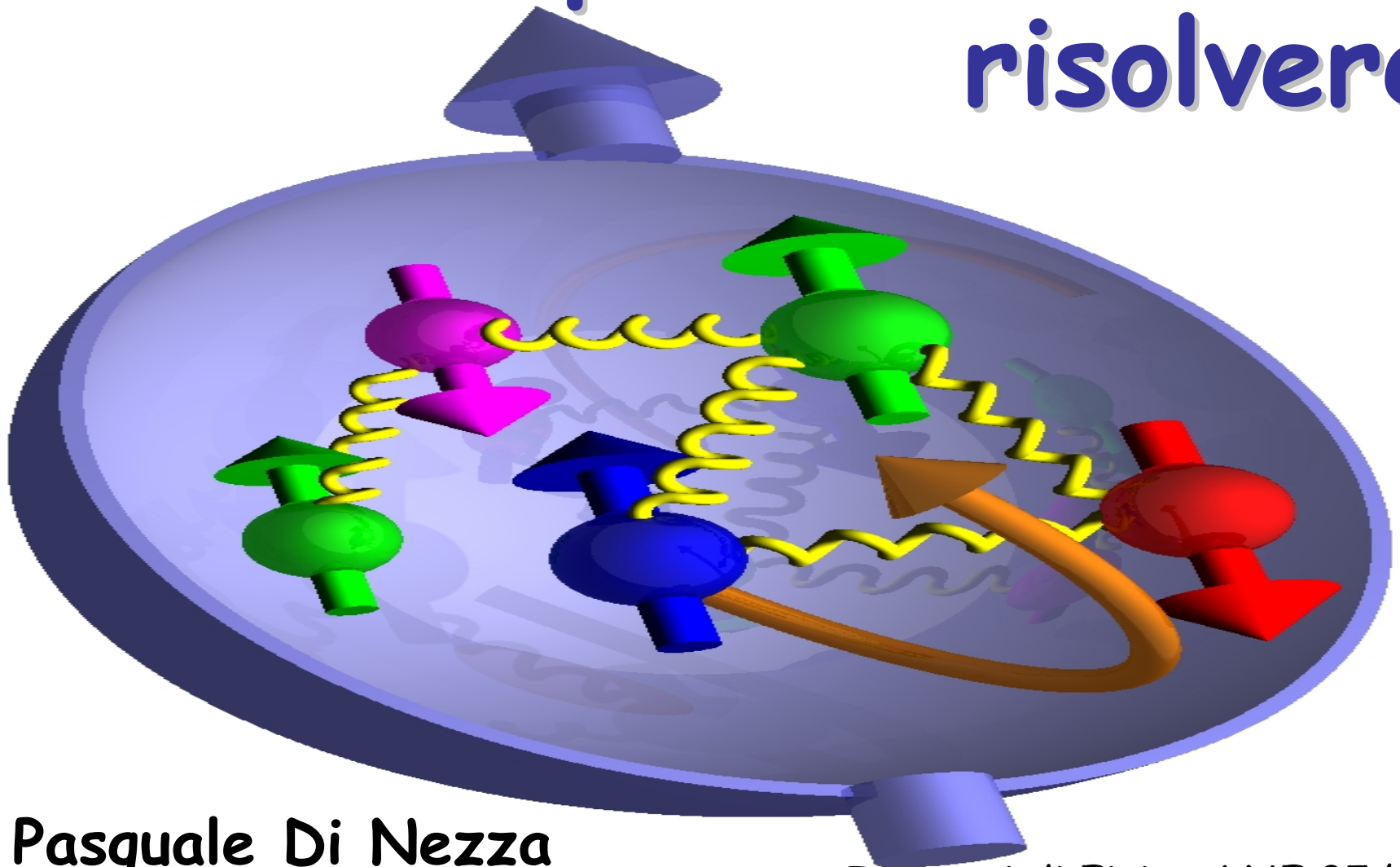


Lo Spin delle particelle: un puzzle ancora da risolvere?



Pasquale Di Nezza

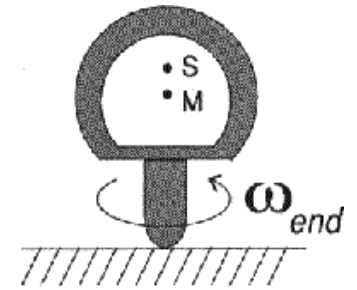
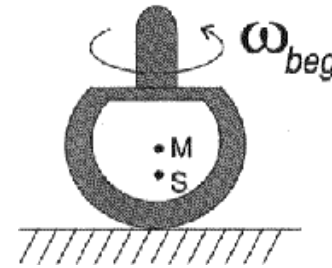
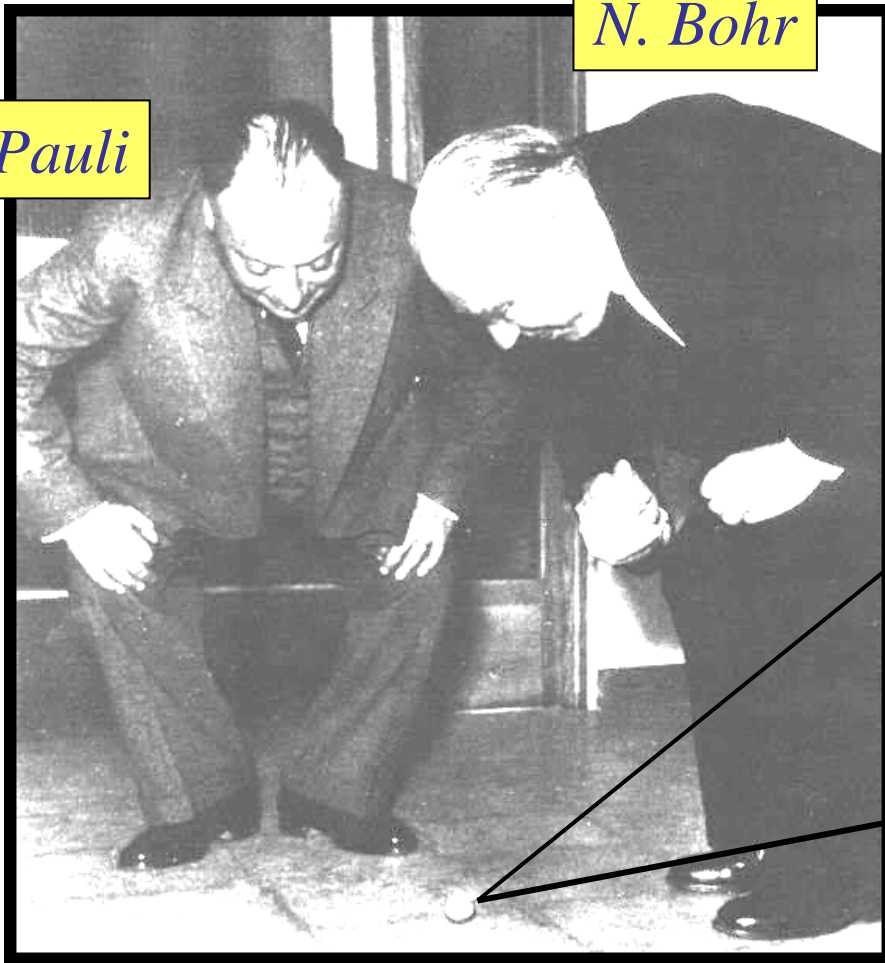
Incontri di Fisica, LNF 05/10/05

Affascinati dallo spin ...

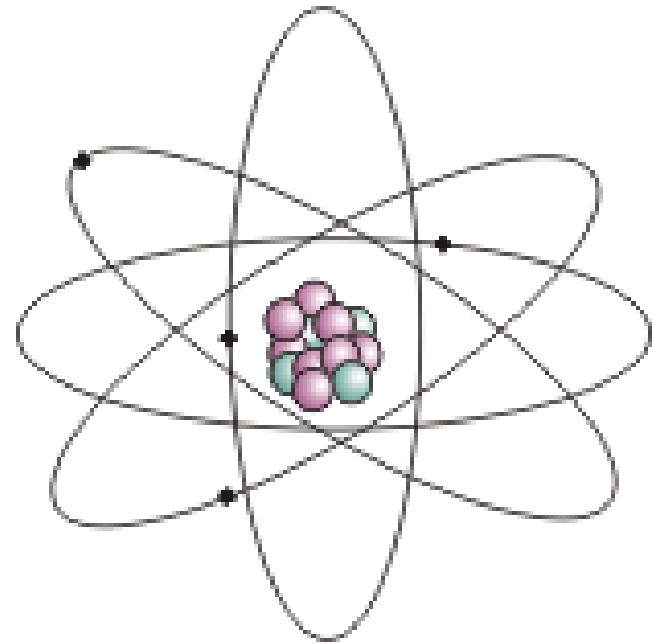
"Pensate di aver capito qualcosa? Ora aggiungete lo spin..." -- R. Jaffe

N. Bohr

W. Pauli

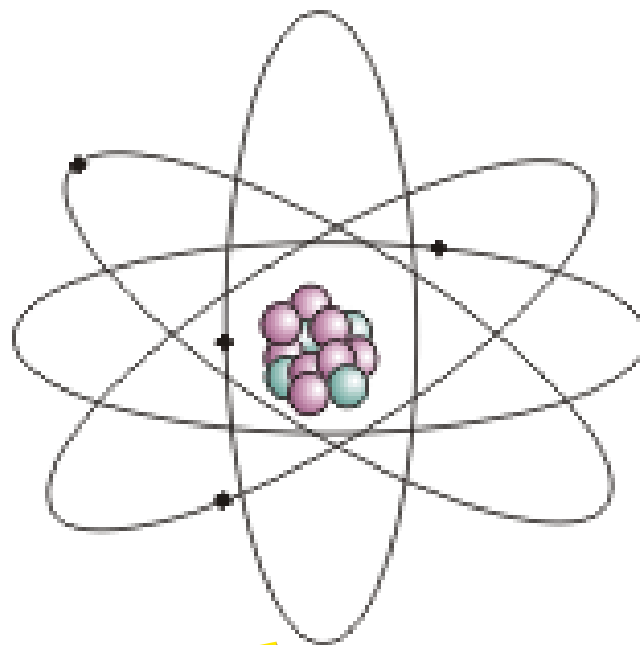
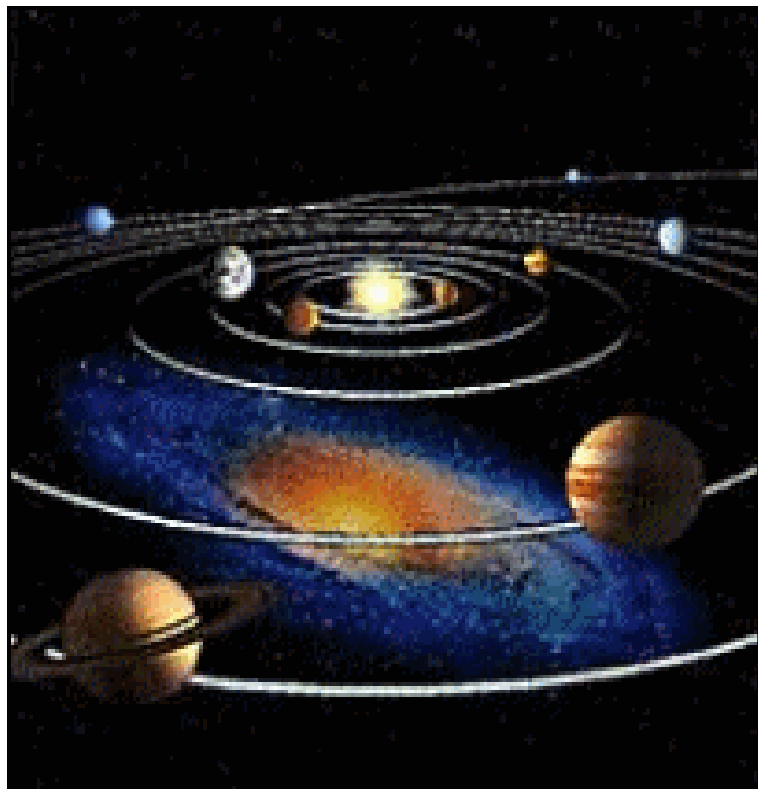


Affascinati dallo spin ... un'analogia



In tale analogia il nostro pianeta ha un **momento angolare orbitale** (intorno al Sole / il nucleo) e, in aggiunta, un **momento angolare di spin** (rotorazione intorno al proprio asse).

Affascinati dallo spin ... un'analogia

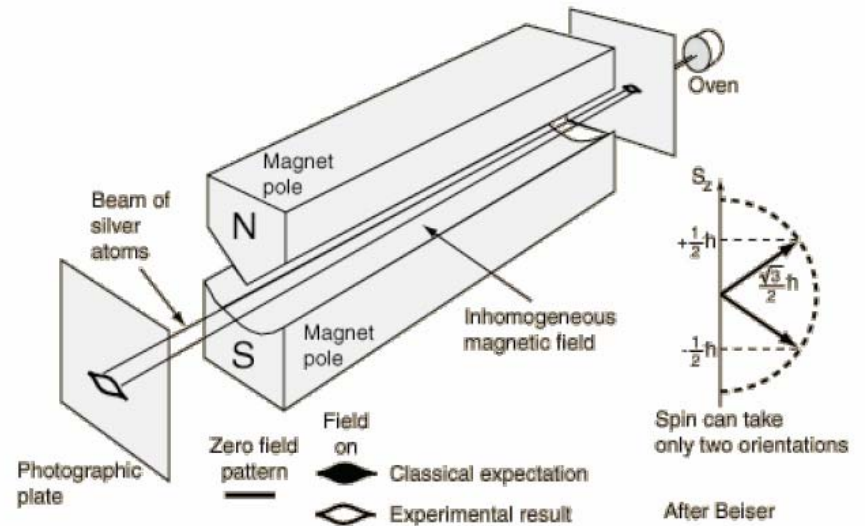


In tale analogia il nostro sistema ha un **momento angolare orbitale** (intorno al Sole) e, in aggiunta, un **momento angolare di spin** (rotazione intorno al proprio asse).

Troppo naive!

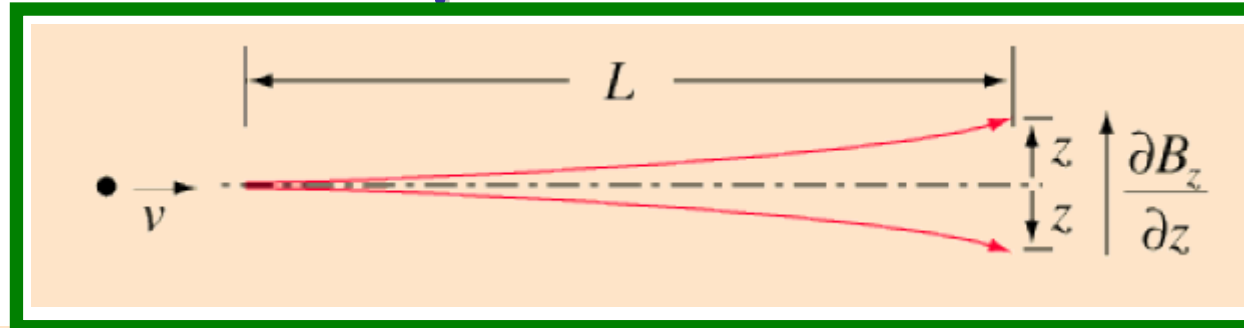
Cos'è lo Spin ?

- Stern-Gerlach (1921):



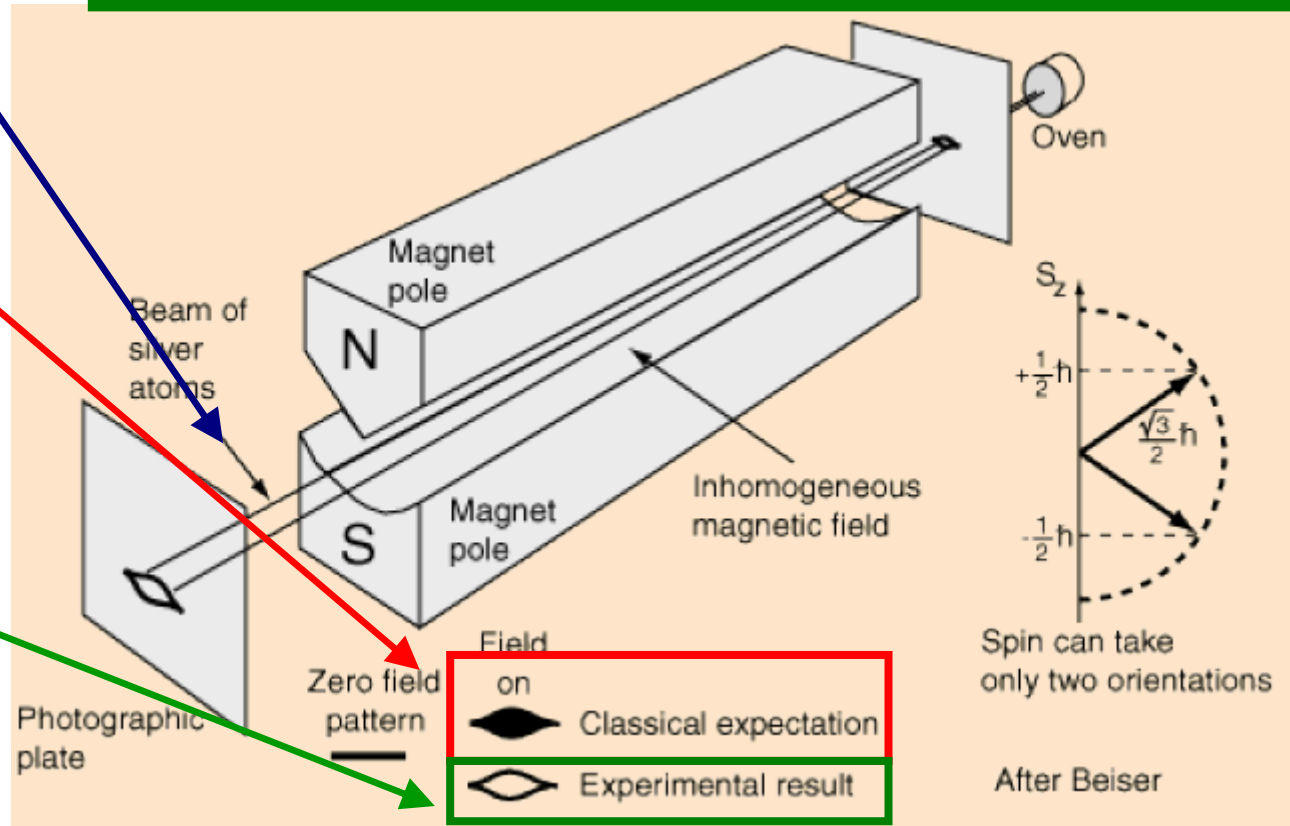
Cos'è lo Spin ?

Fascio di atomi di argento: è neutro, ha 1 elettrone nell'ultimo orbitale



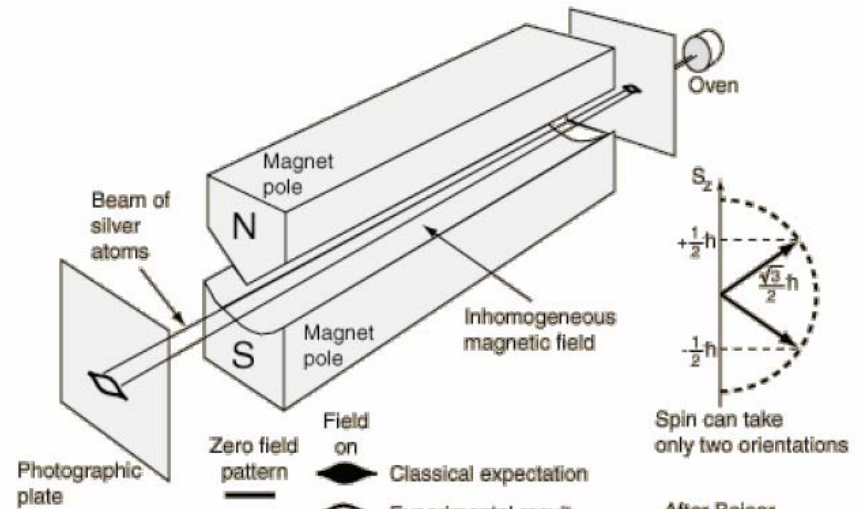
Aspettazione classica

Risultato sperimentale



Cos'è lo Spin ?

- Stern-Gerlach (1921):



- Uhlenbeck, Goudsmit: (1925)

spiegazione spettro atomico

numero quantistico: $m_s = 1/2$



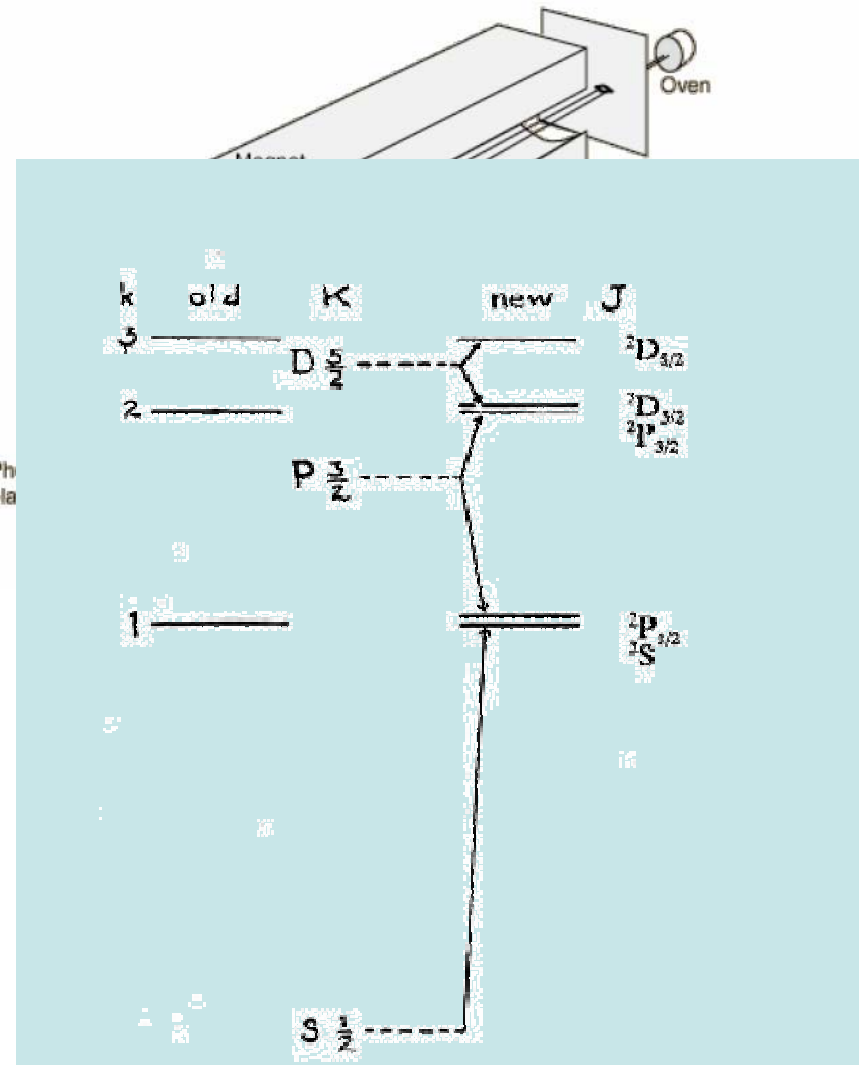
Cos'è lo Spin ?

- Stern-Gerlach (1921):

- Uhlenbeck, Goudsmit: (1925)

spiegazione spettro atomico

numero quantistico: $m_s = 1/2$





Cos'è lo Spin ?

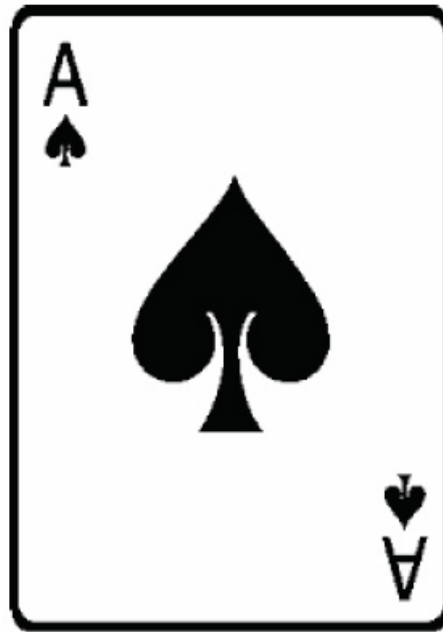
Spin e simmetrie: [S.Hawkins: Breve storia del tempo]

spin: 2



180°

spin: 1



360°

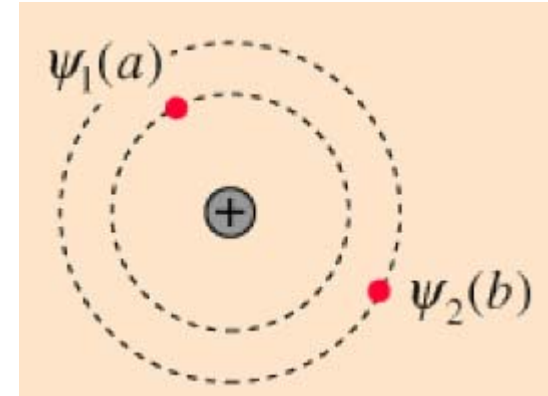
spin: $\frac{1}{2}$?

*funzione
d'onda
antisimmetrica*

2x360°

E' importante lo spin?

Principio di Pauli ...



$$\Psi = \Psi_1(a) \cdot \Psi_2(b)$$

Ampiezza probabilita'
che elettrone-1 e' in a
ed elettrone-2 in b

SBAGLIATO, gli
elettroni sono identici e
quindi indistinguibili

$$\Psi = \Psi_1(a) \cdot \Psi_2(b) - \Psi_1(b) \cdot \Psi_2(a)$$

La funzione d'onda
scompare se le
particelle occupano lo
stesso stato

E' importante lo spin?

Principio di Pauli ...

- Obediscono al principio di Pauli
- antisimmetriche nello scambio di particelle identiche
- Statistica di Fermi-Dirac:
Fermioni

- Non obediscono al principio di Pauli
- simmetriche
- Statistica di Bose-Einstein:
Bosoni

➔ SPIN semi-intero

MATERIA

➔ SPIN intero

FORZE



E' importante lo spin?

Principio di Pauli ...



➔ SPIN semi-intero

MATERIA

➔ SPIN intero

FORZE

FERMIONS			matter constituents spin = 1/2, 3/2, 5/2, ...		
Leptons spin = 1/2			Quarks spin = 1/2		
Flavor	Mass GeV/c ²	Electric charge	Flavor	Approx. Mass GeV/c ²	Electric charge
ν_e electron neutrino	$<1 \times 10^{-8}$	0	u up	0.003	2/3
e electron	0.000511	-1	d down	0.006	-1/3
ν_μ muon neutrino	<0.0002	0	c charm	1.3	2/3
μ muon	0.106	-1	s strange	0.1	-1/3
ν_τ tau neutrino	<0.02	0	t top	175	2/3
τ tau	1.7771	-1	b bottom	4.3	-1/3

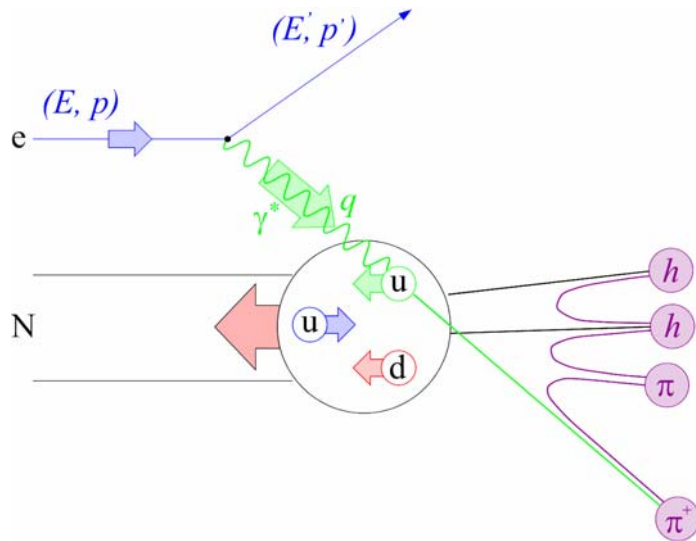
Pauli
bio

BOSONS			force carriers spin = 0, 1, 2, ...		
Unified Electroweak spin = 1			Strong (color) spin = 1		
Name	Mass GeV/c ²	Electric charge	Name	Mass GeV/c ²	Electric charge
γ photon	0	0	g gluon	0	0
W⁻	80.4	-1			
W⁺	80.4	+1			
Z⁰	91.187	0			

Pauli

Come studiare lo spin del protone ?

... deep-inelastic scattering (DIS)

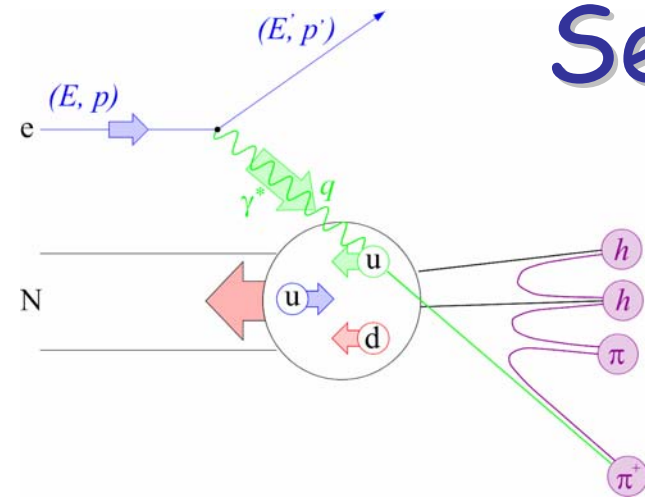


$$Q^2 = -q^2 = 2EE'(1 - \cos\theta) \quad \text{lab}$$

$$x = \frac{Q^2}{2M\nu} \quad \text{lab}, \quad \nu = E - E' \quad \text{lab}$$

- "deep" \leftrightarrow alta risoluzione: $Q^2 \gg M^2$
- "inelastic" \leftrightarrow $M_X^2 \neq M^2 \Rightarrow x < 1$

Sezione d'urto DIS



$$\sigma (ep \rightarrow eX)$$

$$\frac{d^2\sigma}{d\Omega dE'} = \frac{\alpha^2}{MQ^4} \frac{E}{E'} L_{\mu\nu} W^{\mu\nu}$$

$L_{\mu\nu}$ *parte leptonica della sezione d'urto*

- indipendente dalla struttura del protone
- puo' essere calcolato esplicitamente

$W_{\mu\nu}$ *parte adronica della sezione d'urto*

- contiene informazioni sulla struttura del protone+ effetti di interazioni forti

tensore adronico $W_{\mu\nu}$

→ parametrizzato dalle funzioni di struttura

(simmetria di Lorentz, corrente conservata, parità, ecc.)

$$W_{\mu\nu} = -g^{\mu\nu} F_1(x, Q^2) + \frac{p^\mu p^\nu}{\nu} F_2(x, Q^2) + i\varepsilon^{\mu\nu\lambda\sigma} \frac{q_\lambda}{\nu} \left(S_\sigma g_1(x, Q^2) + \frac{1}{\nu} (p \cdot q S_\sigma - S \cdot q p_\sigma) g_2(x, Q^2) \right)$$

tensore adronico $W_{\mu\nu}$

→ parametrizzato dalle funzioni di struttura

(simmetria di Lorentz, corrente conservata, parità, ecc.)

QPM:

$$F_1(x) = \frac{1}{2} \sum_i e_i^2 (q_i^+(x) + q_i^-(x)) = \frac{1}{2} \sum_i e_i^2 q_i(x)$$

distribuzione dei momenti dei quark

$$W_{\mu\nu} = -g^{\mu\nu} F_1(x, Q^2)$$

$$F_1(x, Q^2)$$

$$F_2(x, Q^2)$$

$q_i(x)$ = Funzione Distribuzione

connessa alla probabilità di avere un quark colpito con momento frazionario x

$$+ i \varepsilon^{\mu\nu\lambda\sigma} \frac{q_1(x, Q^2)}{v}$$

$$F_2(x, Q^2)$$

tensore adronico $W_{\mu\nu}$

→ parametrizzato dalle funzioni di struttura

(simmetria di Lorentz, corrente conservata, parità, ecc.)

QPM:

$$F_1(x) = \frac{1}{2} \sum_i e_i^2 (q_i^+(x) + q_i^-(x)) = \frac{1}{2} \sum_i e_i^2 q_i(x)$$

distribuzione dei momenti dei quark

$$W_{\mu\nu} = -g^{\mu\nu} F_1(x, Q^2)$$

$F_1(x, Q^2)$

$q_i^+(x)$ = Funzioni Distribuzione Polarizzata

connessa alla probabilità di avere un quark colpito con momento frazionario x e spin nella stessa direzione di quello del protone

tensore adronico $W_{\mu\nu}$

→ parametrizzato dalle funzioni di struttura

(simmetria di Lorentz, corrente conservata, parità, ecc.)

QPM:

$$F_1(x) = \frac{1}{2} \sum_i e_i^2 (q_i^+(x) + q_i^-(x)) = \frac{1}{2} \sum_i e_i^2 q_i(x)$$

distribuzione dei momenti dei quark

$$W_{\mu\nu} = -g^{\mu\nu}$$

$$F_1(x, Q^2)$$

v

$$F_2(x, Q^2)$$

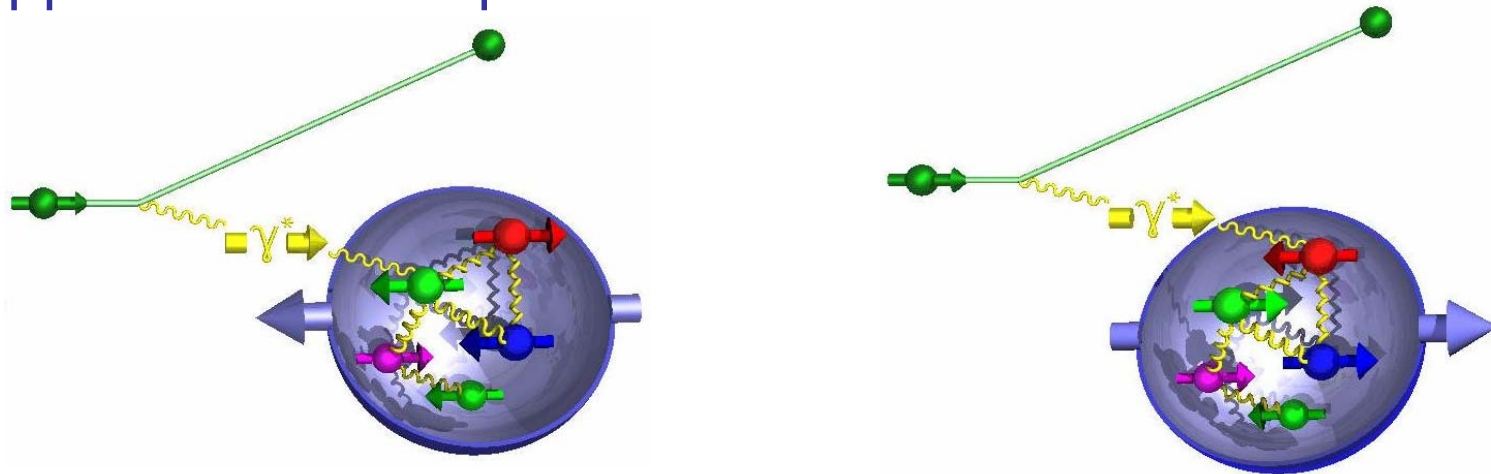
$$+ i\varepsilon^{\mu\nu\lambda\sigma} \frac{q_\lambda}{v} \left(S_\sigma g_1(x, Q^2) + \frac{1}{v} (p \cdot q S_\sigma - S \cdot q p_\sigma) g_2(x, Q^2) \right)$$

$$g_1(x) = \frac{1}{2} \sum_i e_i^2 (q_i^+(x) - q_i^-(x)) = \frac{1}{2} \sum_i e_i^2 \Delta q_i(x)$$

distribuzione di elicità dei quark

densita' di elicitita' Δq

A causa della conservazione dell'elicitita', il fotone virtuale si puo' accoppiare solo con quark con elicitita' opposta



$$S_\gamma + S_N = \frac{1}{2}$$

$$\sigma_{1/2} \approx q^+(x)$$

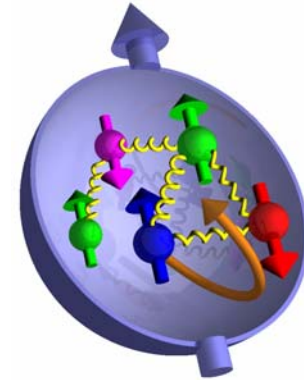
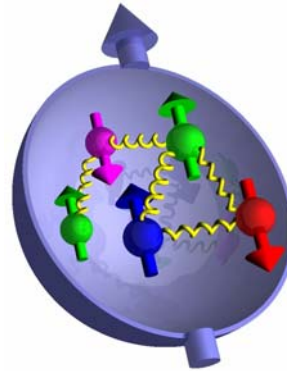
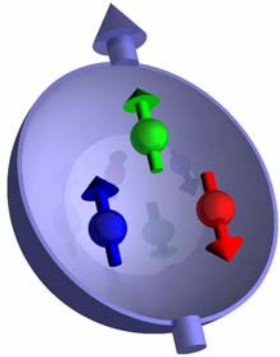
$$S_\gamma + S_N = \frac{3}{2}$$

$$\sigma_{3/2} \approx q^-(x)$$

cambiando l'orientazione dello spin del nucleone bersaglio o l'elicitita' del fascio leptonic incidente possiamo selezionare

$$q^+(x) \text{ oppure } q^-(x) \rightarrow \Delta q$$

La struttura di spin del nucleone



QPM:

$$\frac{1}{2} = \frac{1}{2} \underbrace{(\Delta u_v + \Delta d_v + \Delta q_s)}_{\Delta \Sigma = 1}$$

EMC ('89) $0.123 \pm \dots$

Spin Puzzle

I gluoni sono importanti !

$$\frac{1}{2} = \frac{1}{2} \Delta \Sigma + \Delta G$$

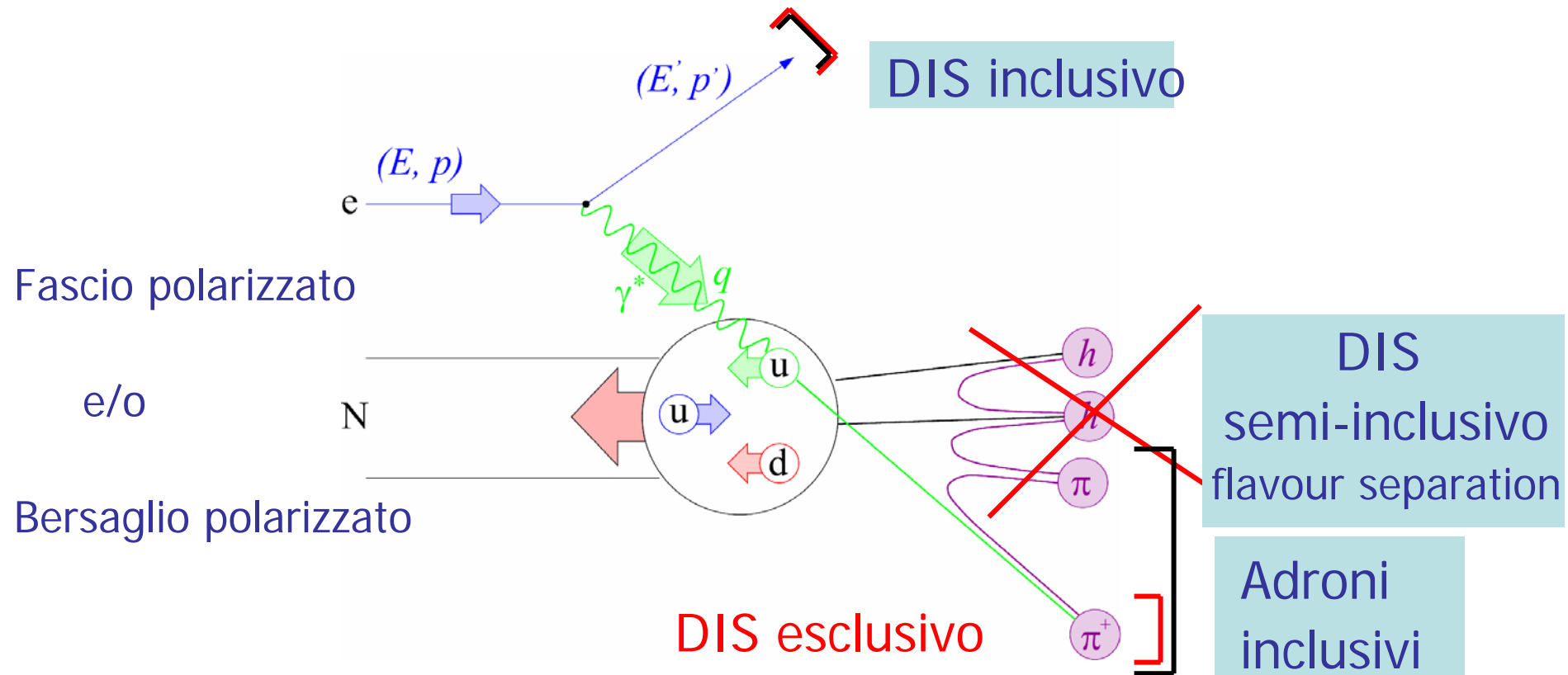
Non dimenticate il momento angolare orbitale!

$$\frac{1}{2} = \frac{1}{2} \Delta \Sigma + L_q + \Delta G + L_g$$

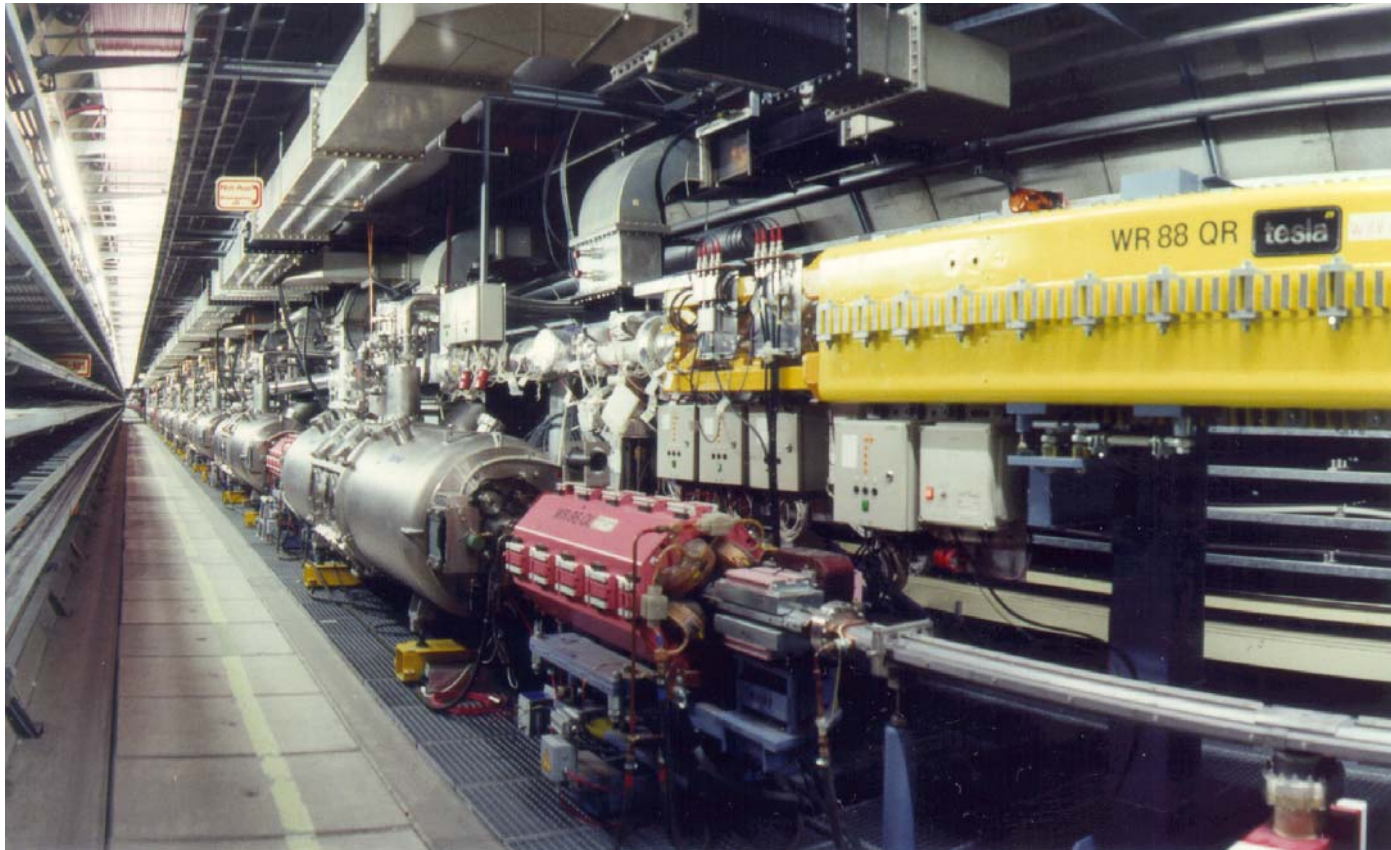
→ SLAC, CERN, DESY: 0.2-0.4

Interazione DIS polarizzata

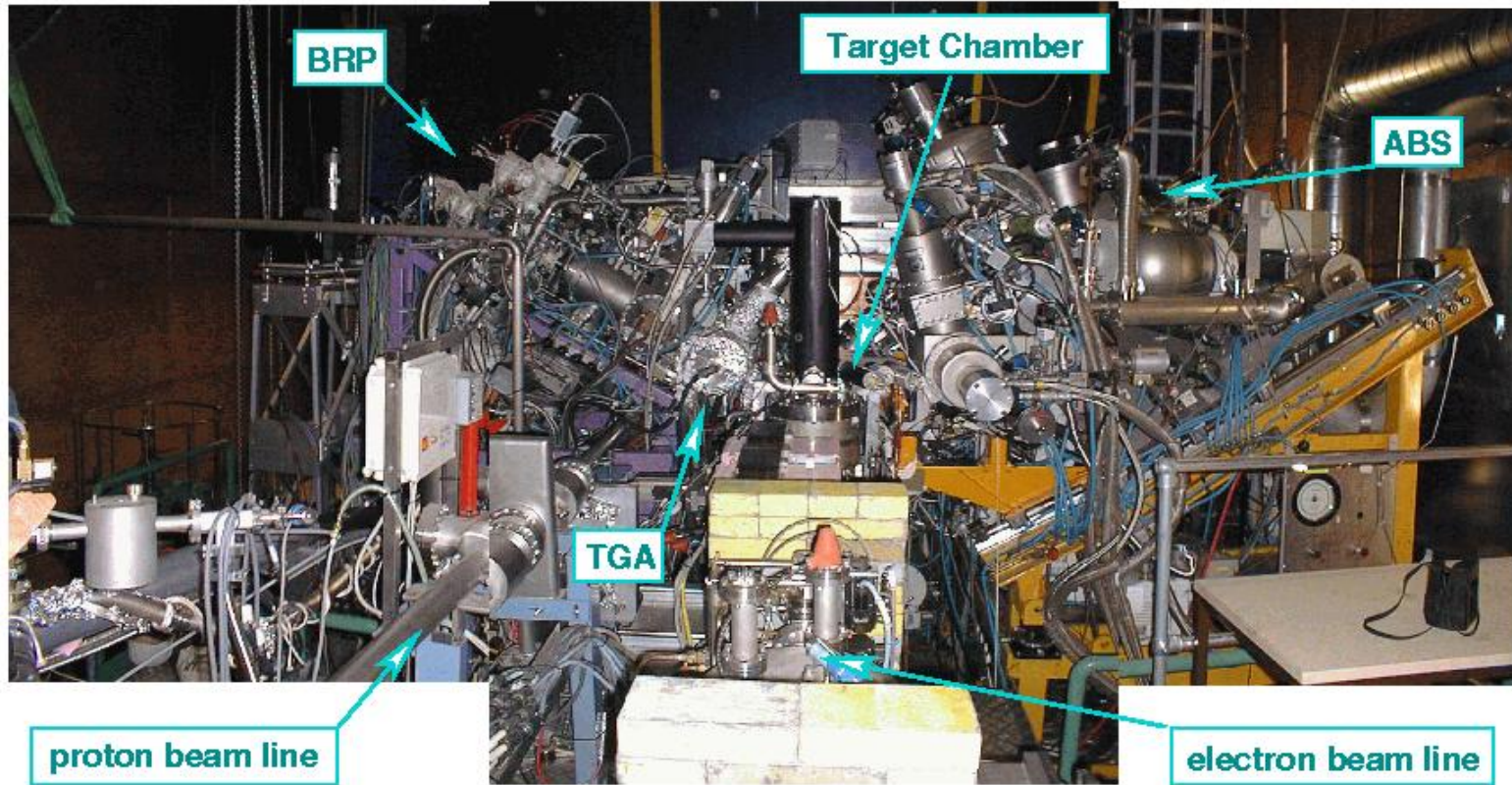
$$\frac{1}{2} = \frac{1}{2} \Delta\Sigma + L_q + \Delta G + L_g = J_q + J_g$$



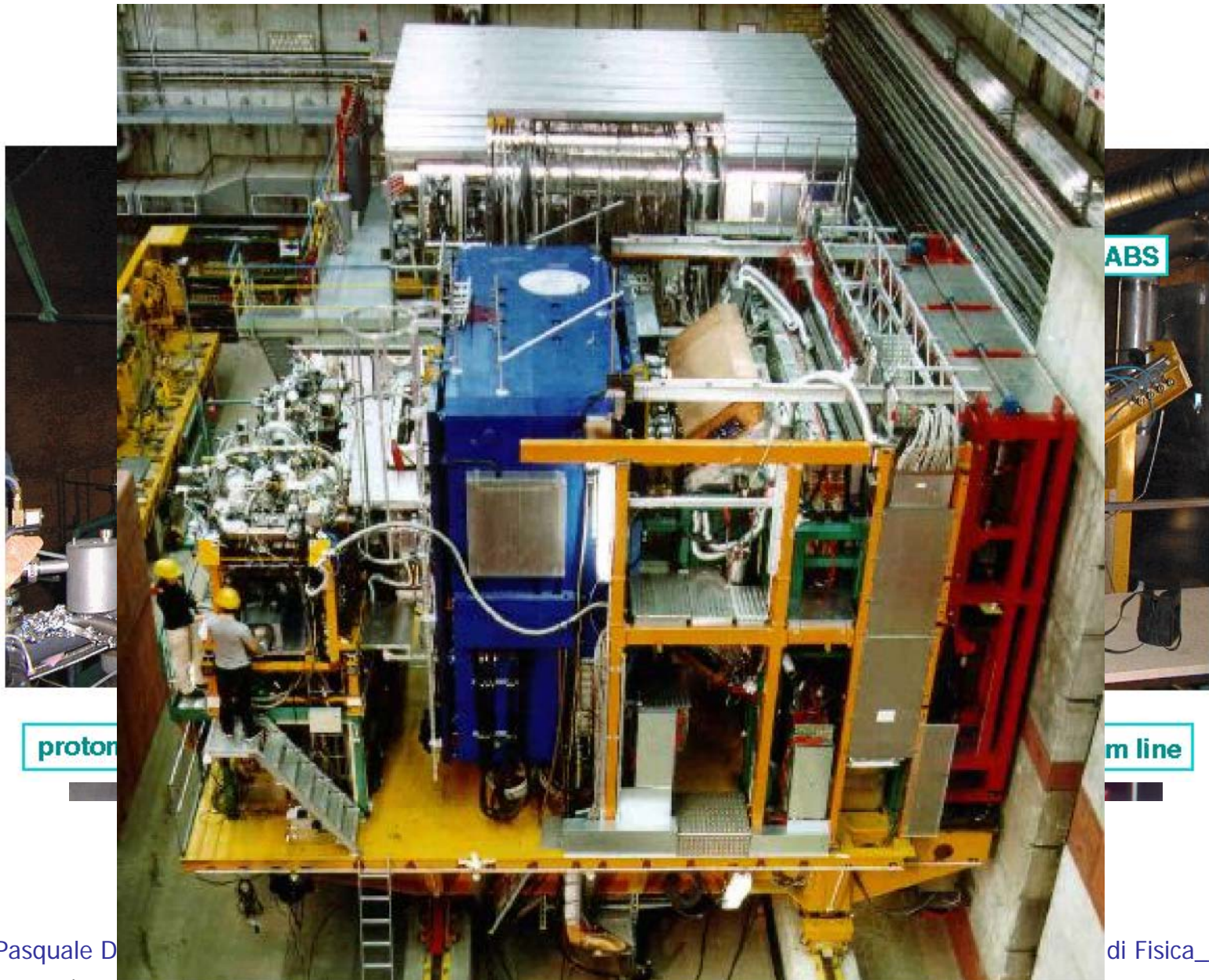
Hermes @ DESY



Hermes @ DESY



Hermes @ DESY

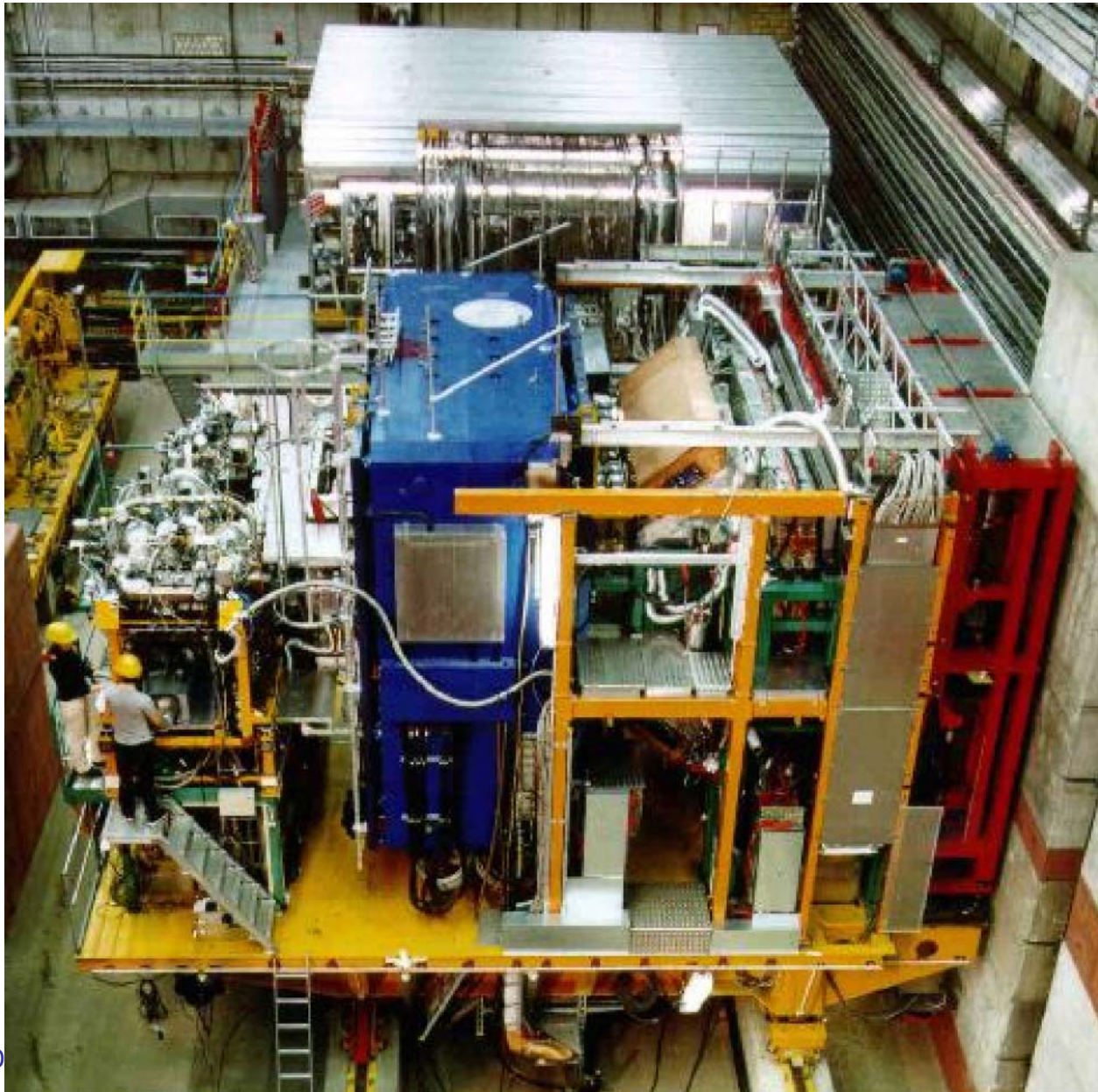


proton

ABS

m line

Hermes @ DESY



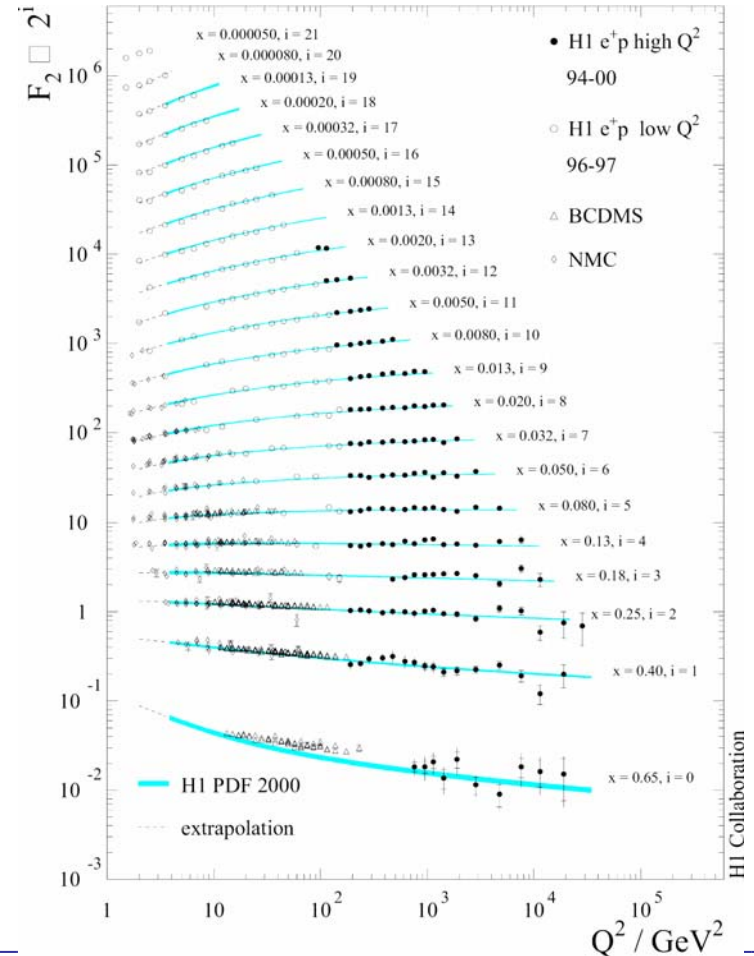
come misurare g_1

$$A_1 = \frac{\sigma_{1/2} - \sigma_{3/2}}{\sigma_{1/2} + \sigma_{3/2}} = \frac{g_1 - \gamma^2 g_2}{F_1} \approx \frac{g_1(x, Q^2)}{F_1(x, Q^2)} \approx \frac{1}{(1 + \gamma^2)D} A_{\parallel}(x, Q^2)$$

$F_1^{\text{param}}(x, Q^2)$:

$Q^2 : 1 - 10^5 \text{ GeV}^2$

$x : 0.000005 - 0.7$



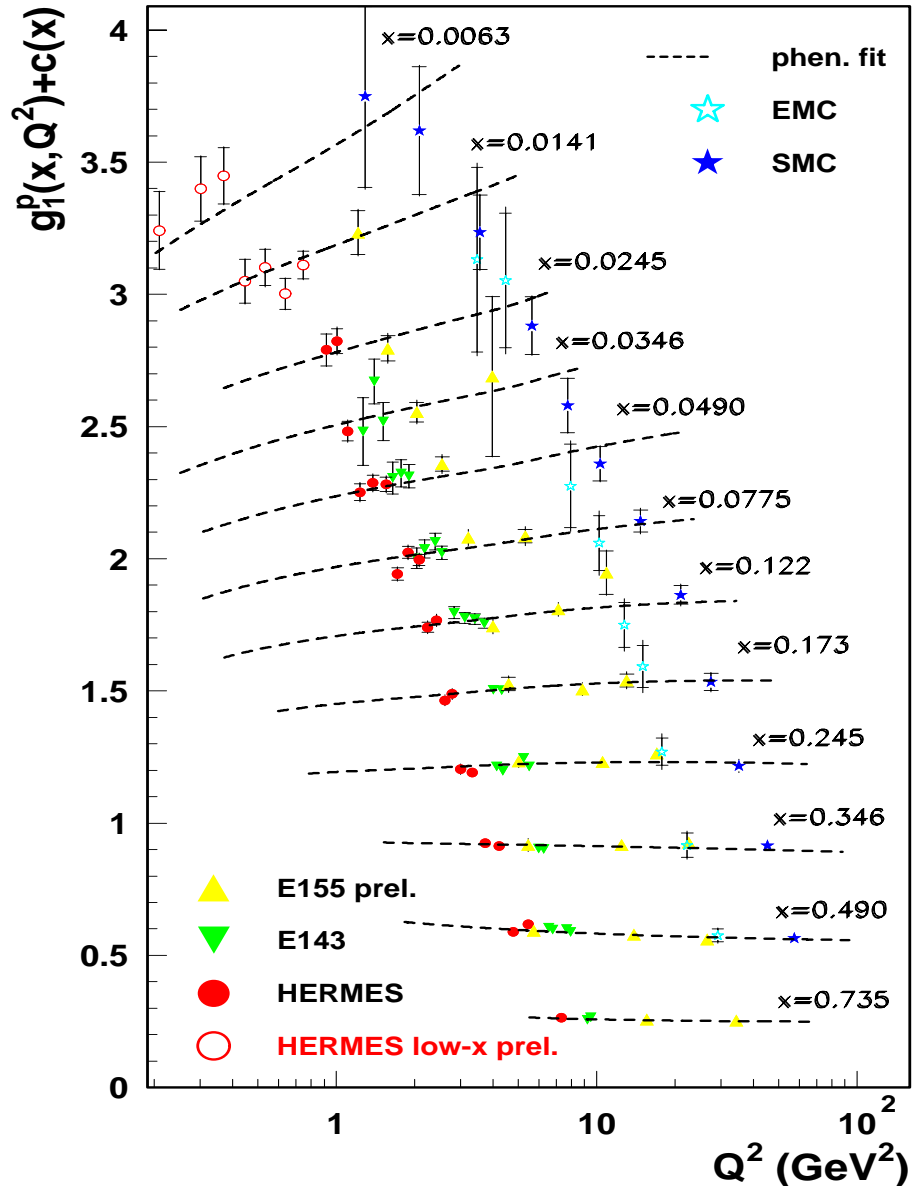
come misurare g_1

$$A_1 = \frac{\sigma_{1/2} - \sigma_{3/2}}{\sigma_{1/2} + \sigma_{3/2}} = \frac{g_1 - \gamma^2 g_2}{F_1} \approx \frac{g_1(x)}{F_1(x)}$$

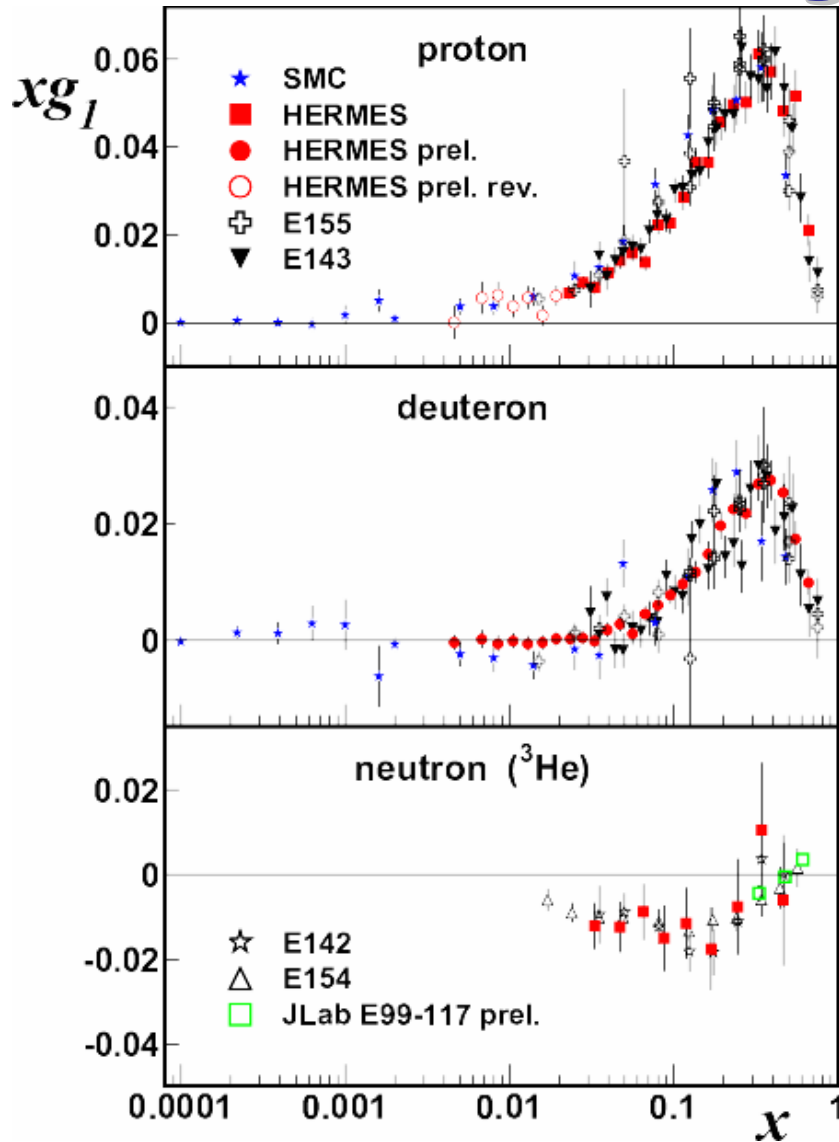
$$g_1^p(x, Q^2):$$

$$Q^2 : 1 - 10^2 \text{ GeV}^2$$

$$x : 0.006 - 0.75$$



l'integrale di g_1

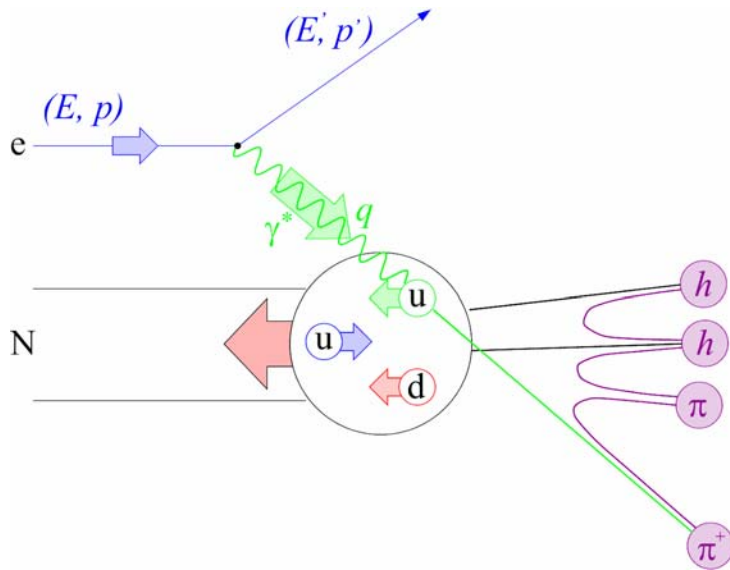


$$g_1(x) = \frac{1}{2} \sum_f e_f^2 (q_f^+(x) - q_f^-(x))$$

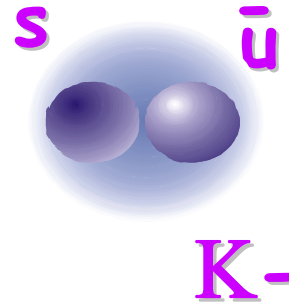
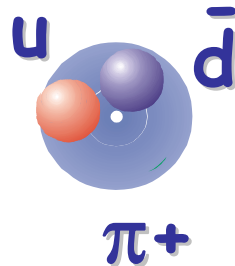
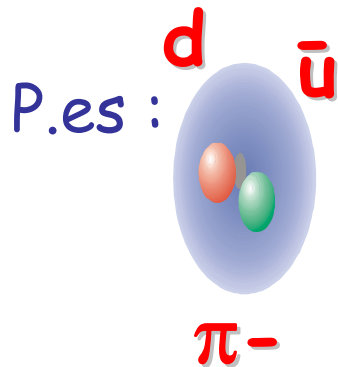
$$= \frac{1}{2} \sum_f e_f^2 \Delta q_f(x)$$

Distribuzioni di elicità'
(distribuz. di quark polarizzati)

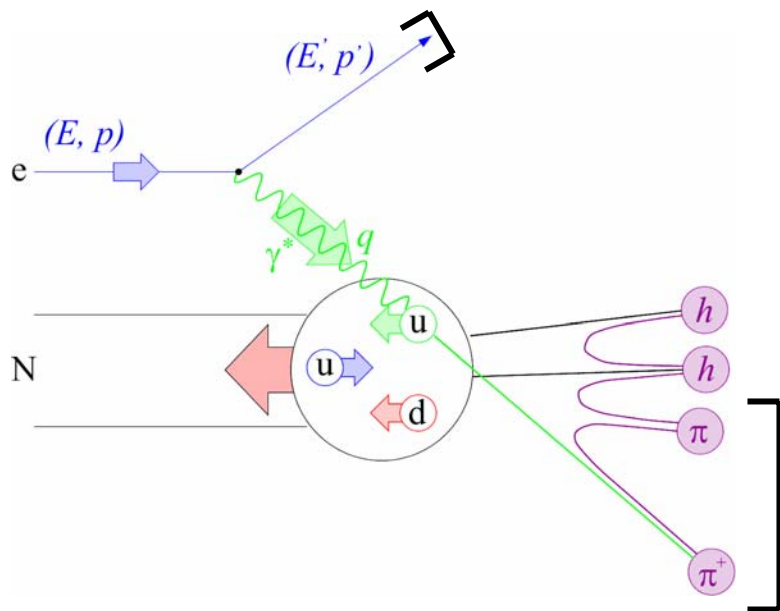
DIS semi-inclusivo polarizzato



Gli adroni prodotti portano l'informazione di spin dei quark (di valenza) che contengono



DIS semi-inclusivo polarizzato



Funzioni di distribuzione partoniche polarizzate !

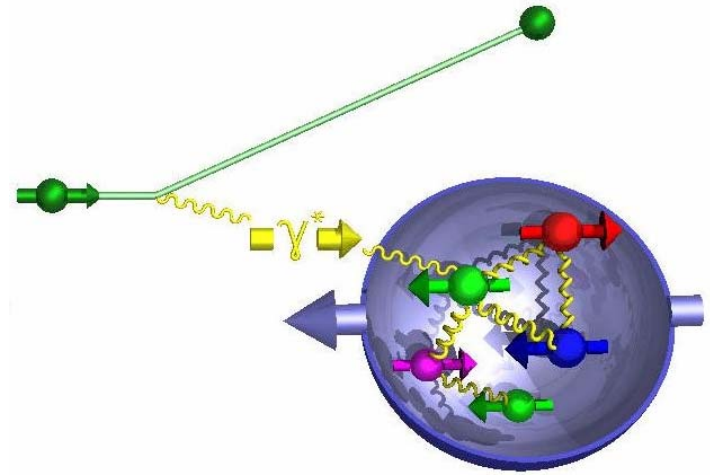
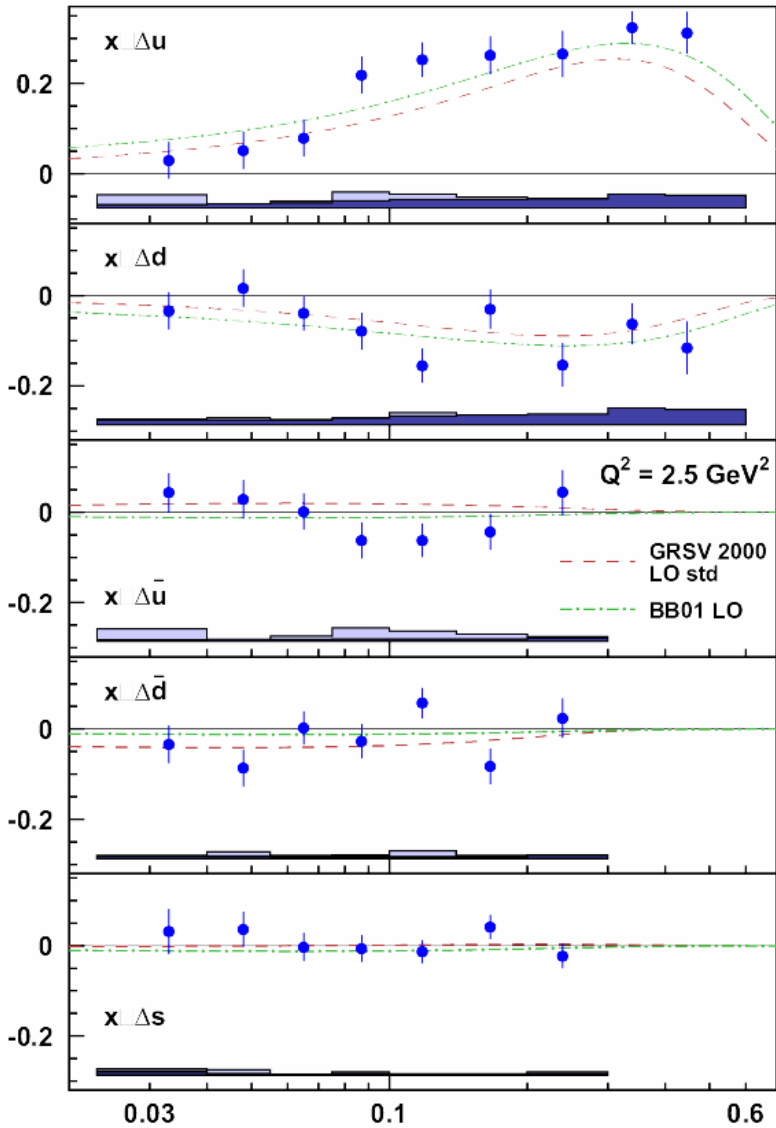
$$A_1^h(x, Q^2) = \frac{\sigma_{1/2}^h - \sigma_{3/2}^h}{\sigma_{1/2}^h + \sigma_{3/2}^h} \approx \frac{\sum_f e_f^2 \Delta q_f(x, Q^2) \int dz D_f^h(z, Q^2)}{\sum_f e_f^2 q_f(x, Q^2) \int dz D_f^h(z, Q^2)}$$

Simmetrie adroniche
Da misurare

quantita' note

distribuzioni di elicità' quark/anti-quark

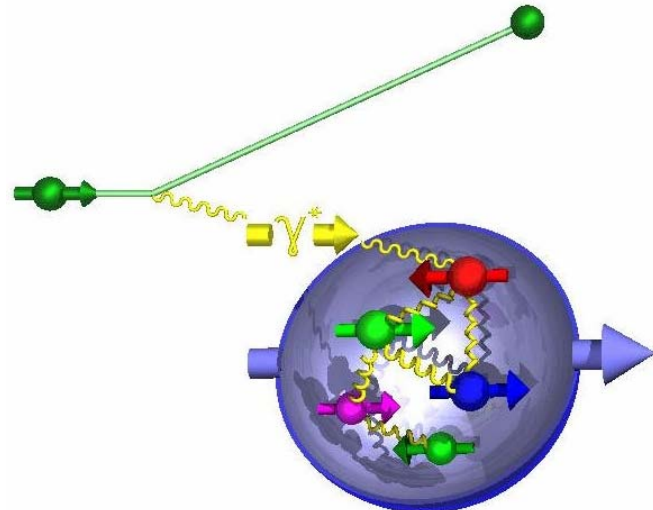
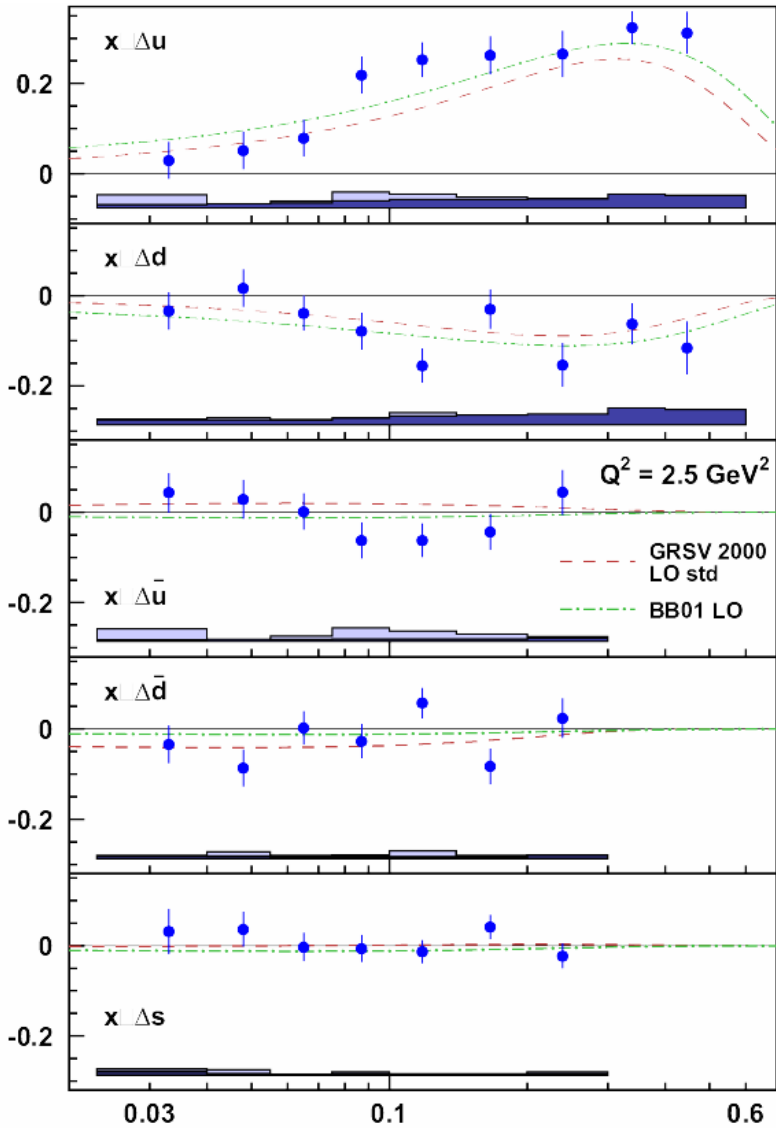
polarizzazione u quark largamente positiva



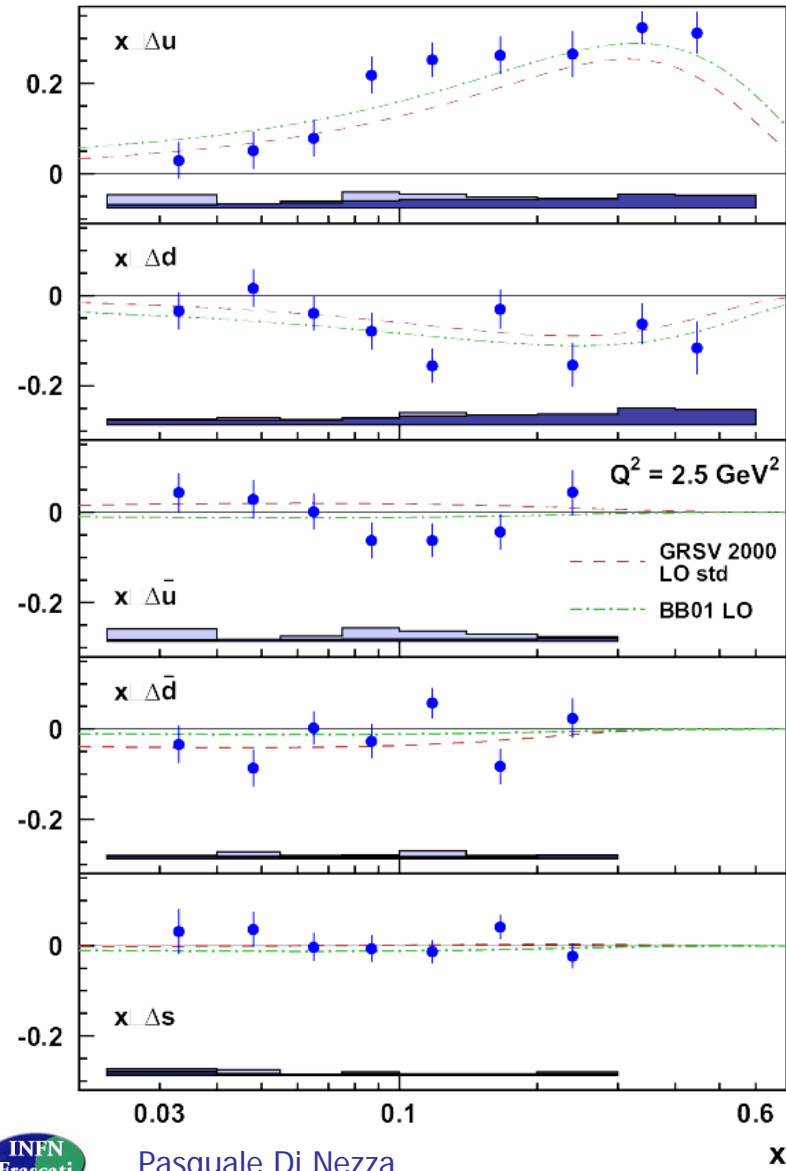
distribuzioni di elicità' quark/anti-quark

polarizzazione u quark largamente positiva

polarizzazione d quark negativa



distribuzioni di elicita' quark/anti-quark



polarizzazione u quark largamente positiva

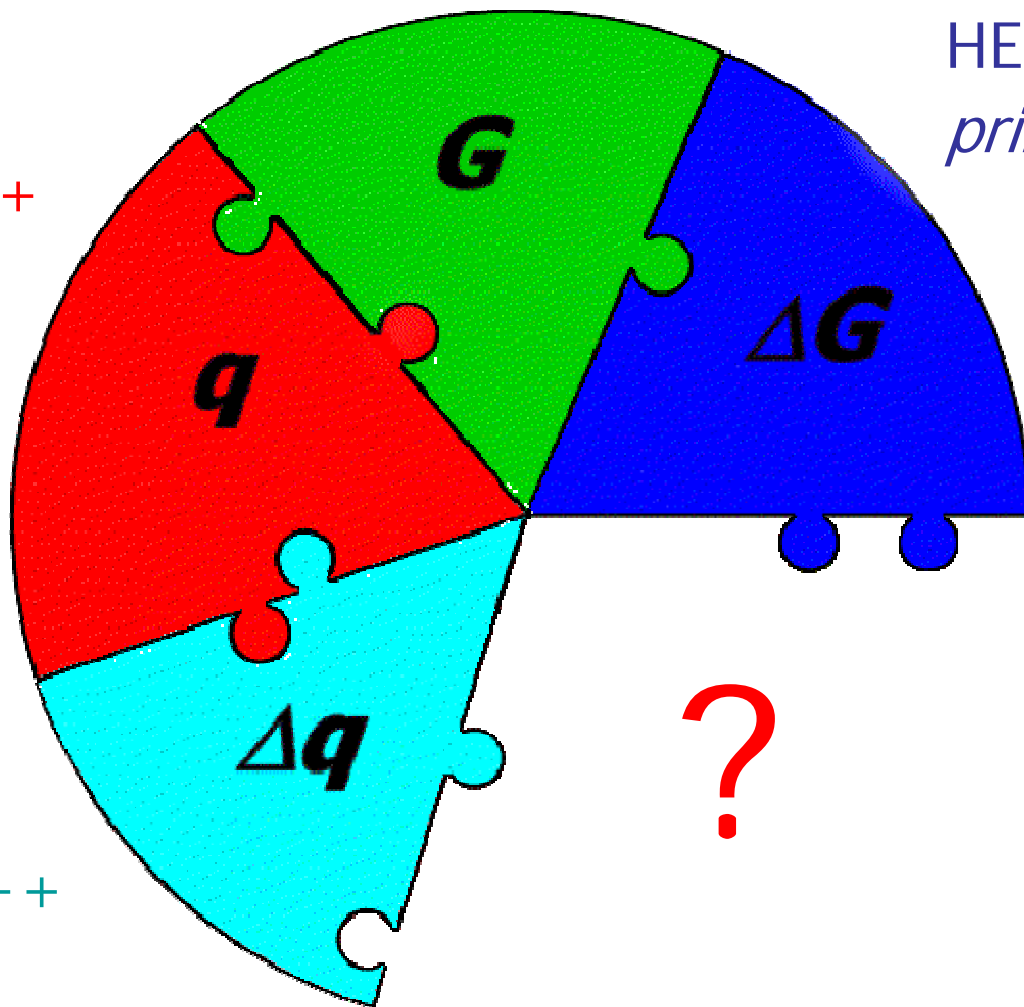
polarizzazione d quark negativa

polarizzazione quark del mare (\bar{u} , \bar{d} , s , \bar{s}) compatibile con 0

A che punto siamo?

la struttura (di spin) del nucleone ...

H1, ZEUS, ++

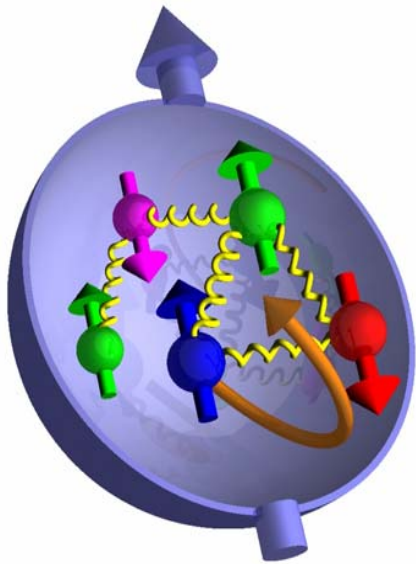


HERMES, COMPASS:
prime indicazioni

- HERMES
- CERN
- RHIC

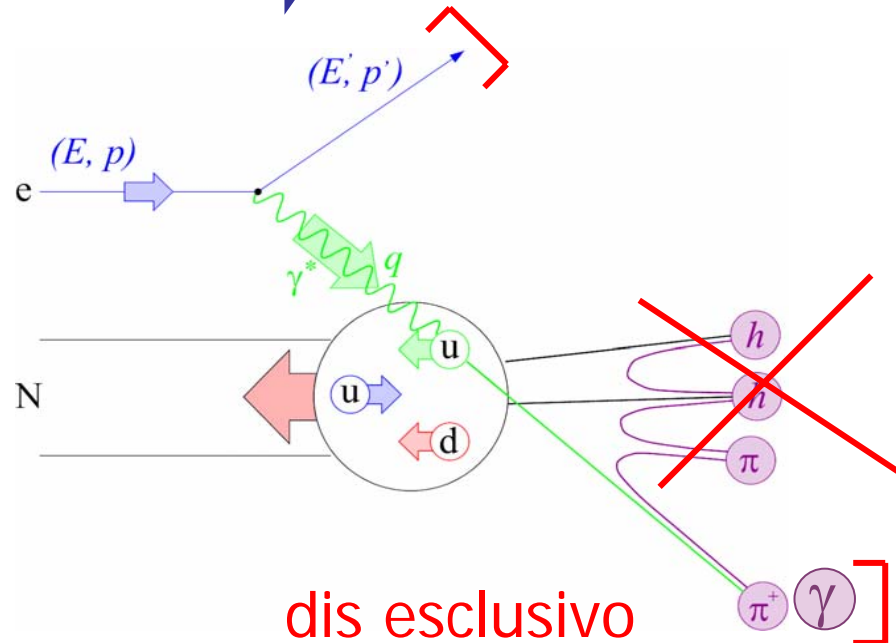
HERMES, ++

...non dimentichiamo il momento angolare orbitale



$$\frac{1}{2} = \frac{1}{2} \Delta\Sigma + L_q + \Delta G + L_g$$

⇒ processi esclusivi ...



Generalized Parton Distributions

(distribuzioni partoniche generalizzate)

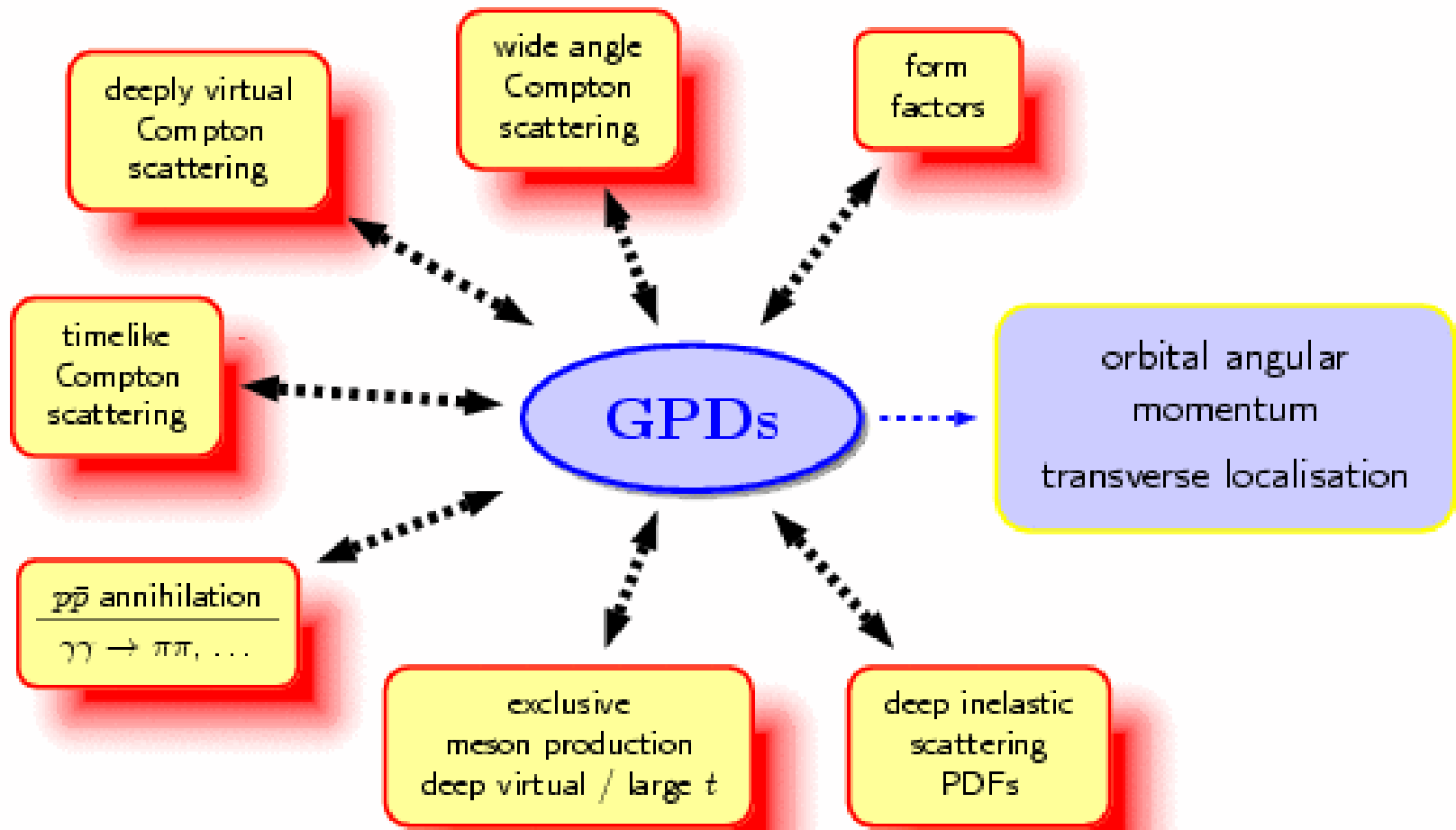


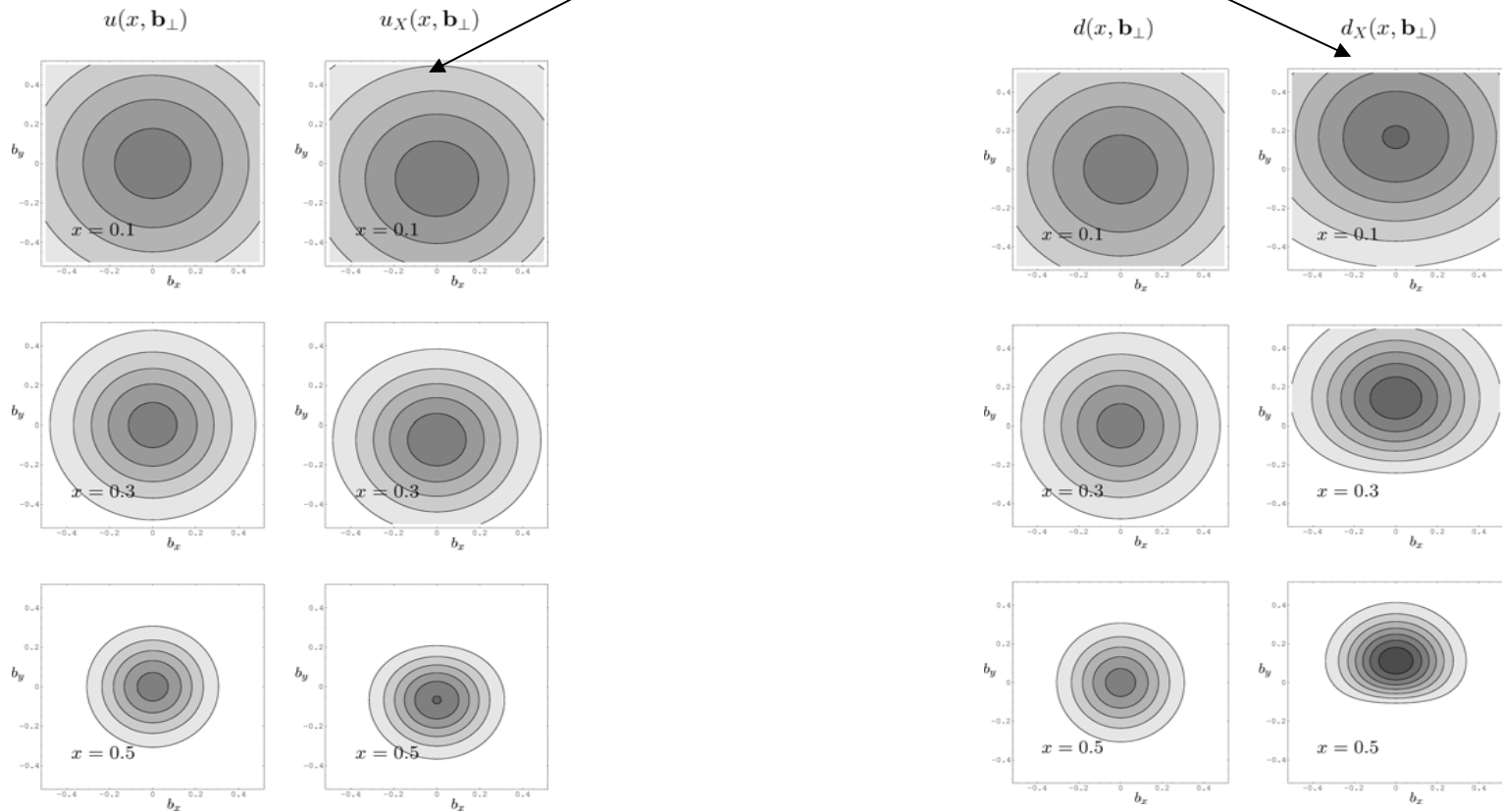
Immagine "Tomografica" del contenuto di quark del protone

(In the Infinite Momentum Frame)

Impact parameter:

$$b_{\perp} = \frac{1}{\sqrt{-t}}$$

transversely polarized target



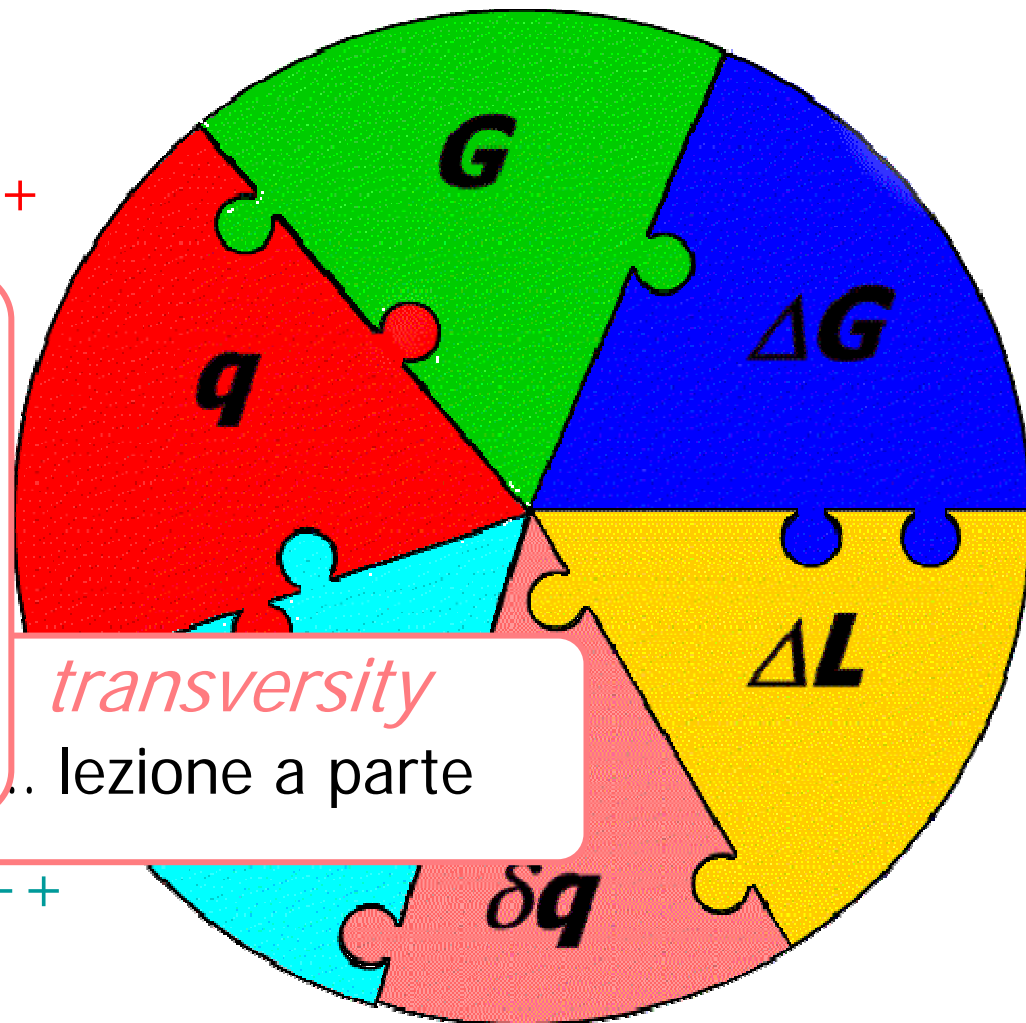
Il puzzle del nucleone si sta completando

H1, ZEUS, ++

- HERMES
- CERN
- RHIC
- JLab
- KEK

...ecc.

HERMES, ++



HERMES:
prime indicazioni

- HERMES
- CERN
- RHIC
- SLAC

Futuro:

- HERMES
- JLab

Ancora affascinati dallo Spin ?

Grazie !