

Dr. Matteo Rinaldi

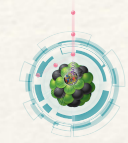
# La Fisica Adronica e Nucleare a Perugia



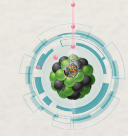


# Indice

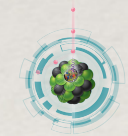
---



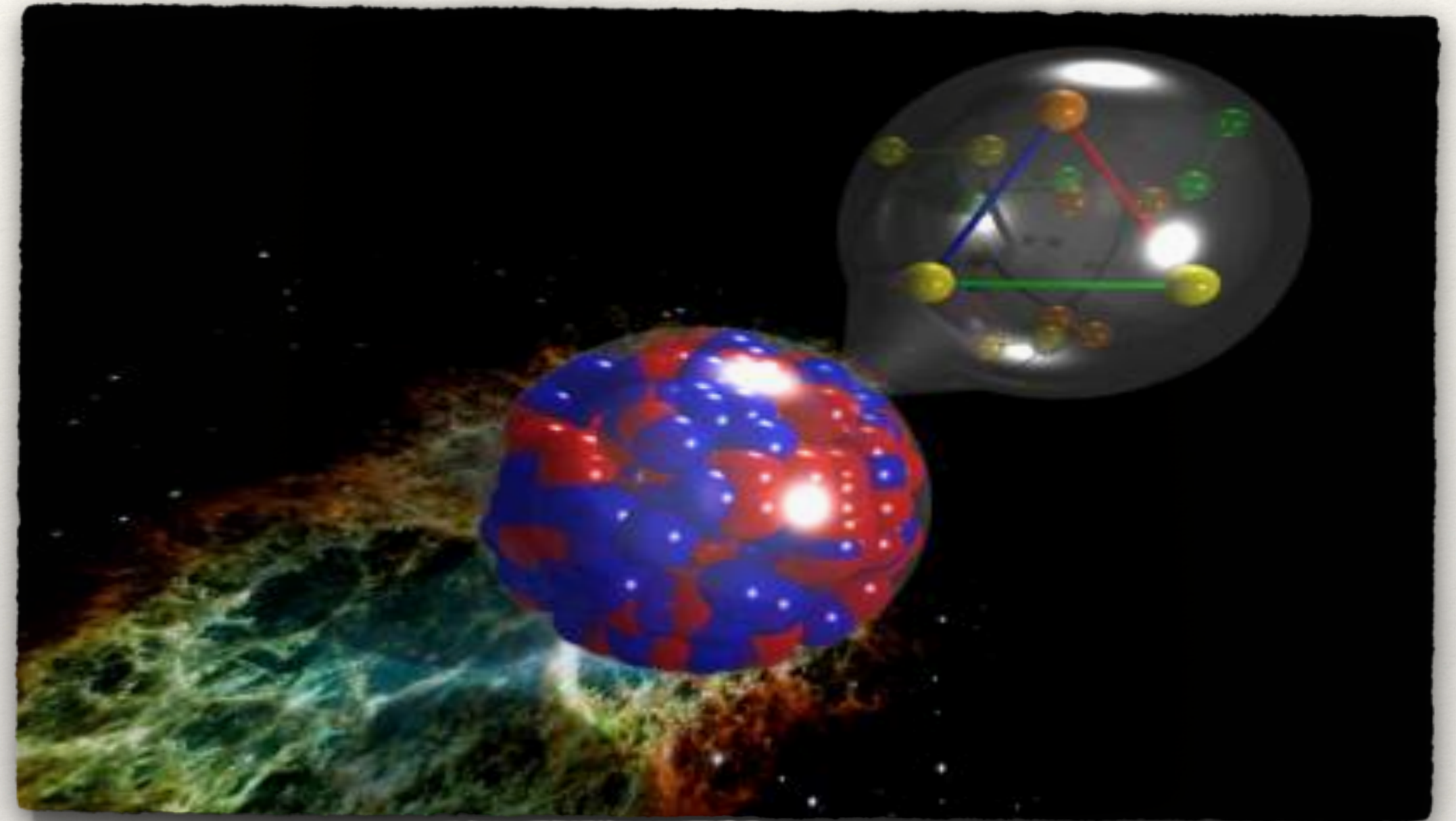
Cosa studiamo a Perugia



Cosa vuol dire una tesi in  
Fisica Adronica e Nucleare (a Perugia)



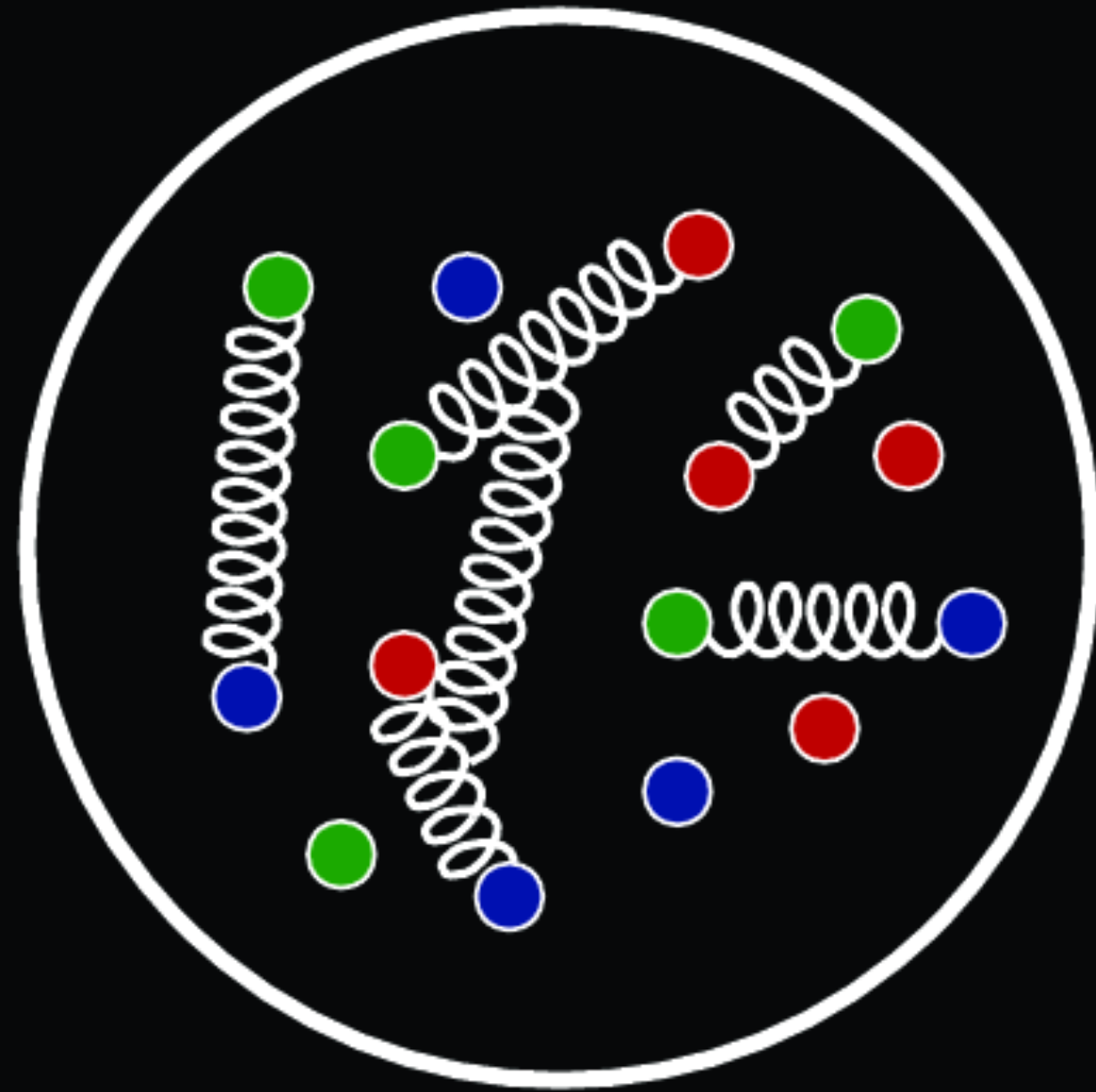
Alcuni possibili argomenti di tesi





# Protoni e Neutroni in 3D

Obiettivo a lungo termine:  
Capire la QCD e il confinamento



A. Bacchetta/INFN12

- ✧ Massa di protoni & neutroni  
QCD -> 98% della massa dei nucleoni  
Higgs mechanism -> piccolo contributo
- ✧ SPIN (da dove viene lo spin del protone?)
- ✧ Come cambia la struttura quando protoni e neutroni sono legati per formare i nuclei?



# Protoni e Neutroni in 3D

---

Cromo-dinamica quantistica (QCD) è (ad oggi) la teoria che meglio descrive l'interazione forte (70') **Ma** i problemi sopra elencati non possono essere descritti dalla teoria stessa a causa dell'elevata "non-linearità" della stessa!



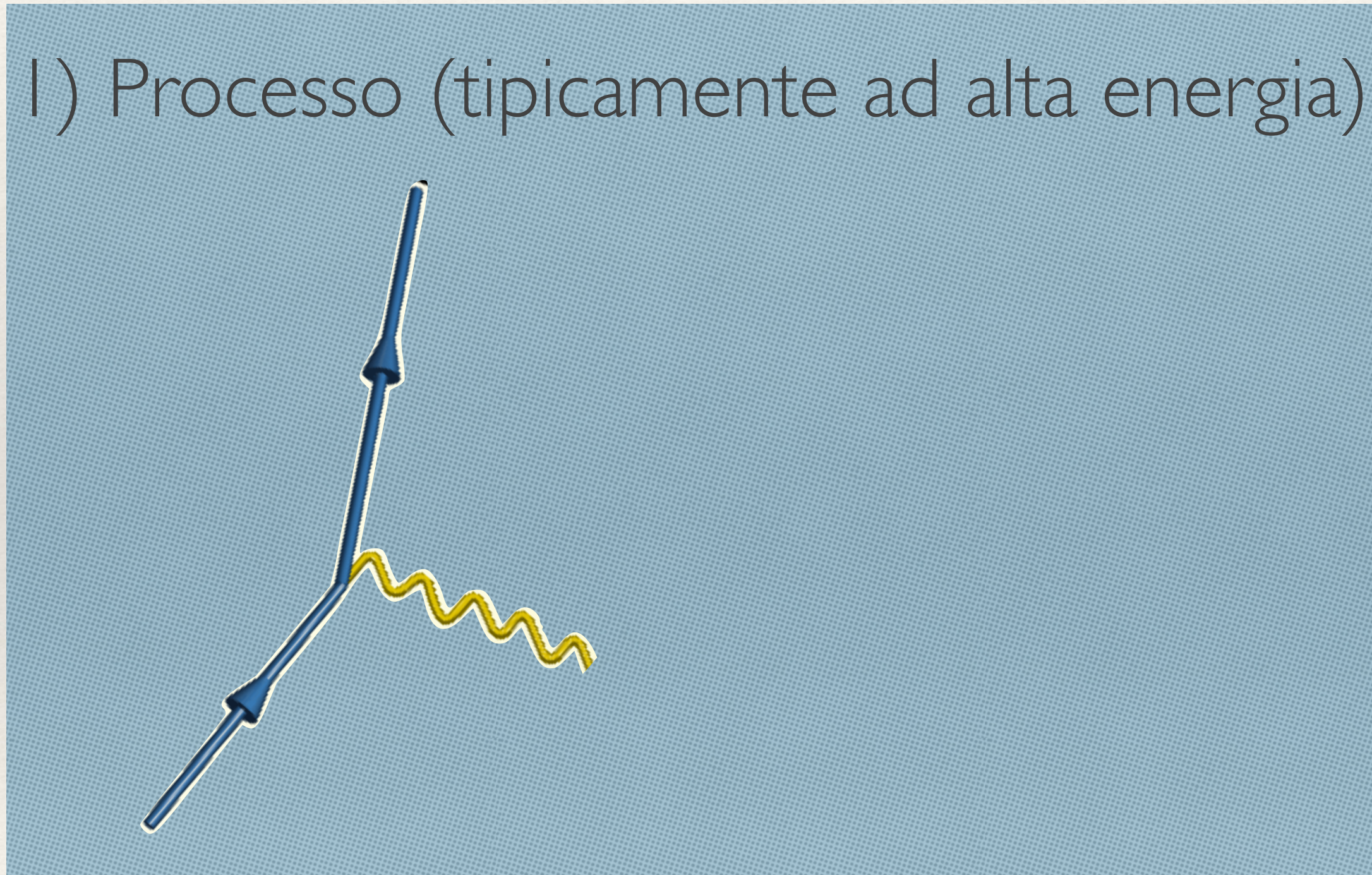


# Protoni e Neutroni in 3D

---

L'approccio attuale a questi problemi:

I) Processo (tipicamente ad alta energia)





# Protoni e Neutroni in 3D

---

L'approccio attuale a questi problemi:





# Protoni e Neutroni in 3D

L'approccio attuale a questi problemi:

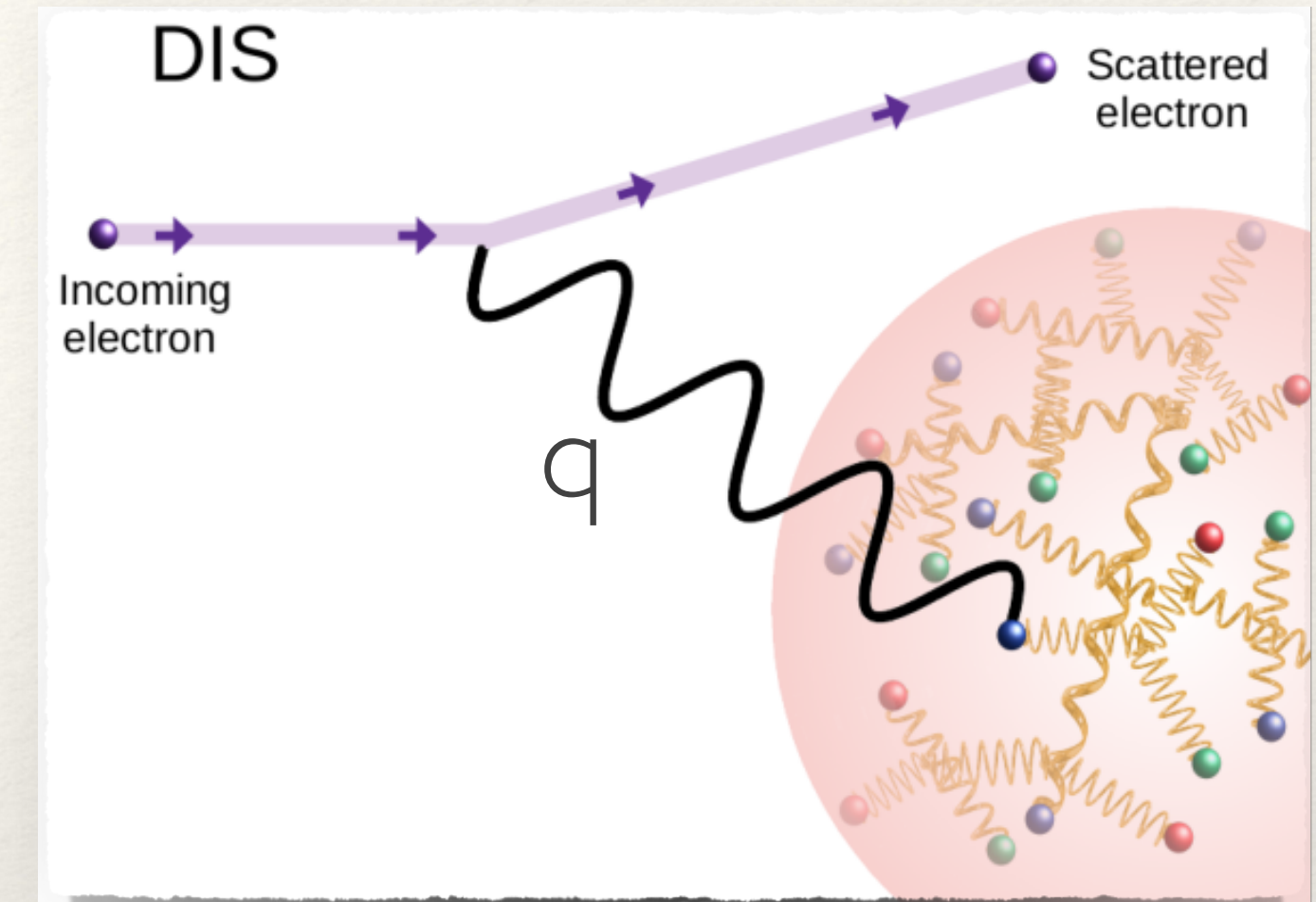


Vediamo alcuni esempi



# Protoni e Neutroni in 3D: quark e gluoni

Consideriamo la **diffusione profondamente anelastica** (DIS) se il bersaglio (nucleone o nucleo) ha spin  $1/2$ , nel sistema del laboratorio (LAB) allora il momento trasferito:  
 $q=(v,0,0,-q)$  per grandi  $q$ :





# Protoni e Neutroni in 3D: quark e gluoni

Consideriamo la **diffusione profondamente anelastica** (DIS) se il bersaglio (nucleone o nucleo) ha spin 1/2, nel sistema del laboratorio (LAB) allora il momento trasferito:  $q=(\nu,0,0,-q)$  per grandi  $q$ :

$$\frac{d^2\sigma}{d\Omega dE'} \propto F_2(x) \simeq \sum_q e_q^2 x f_q(x)$$

$F_2(x)$  = funzione di struttura

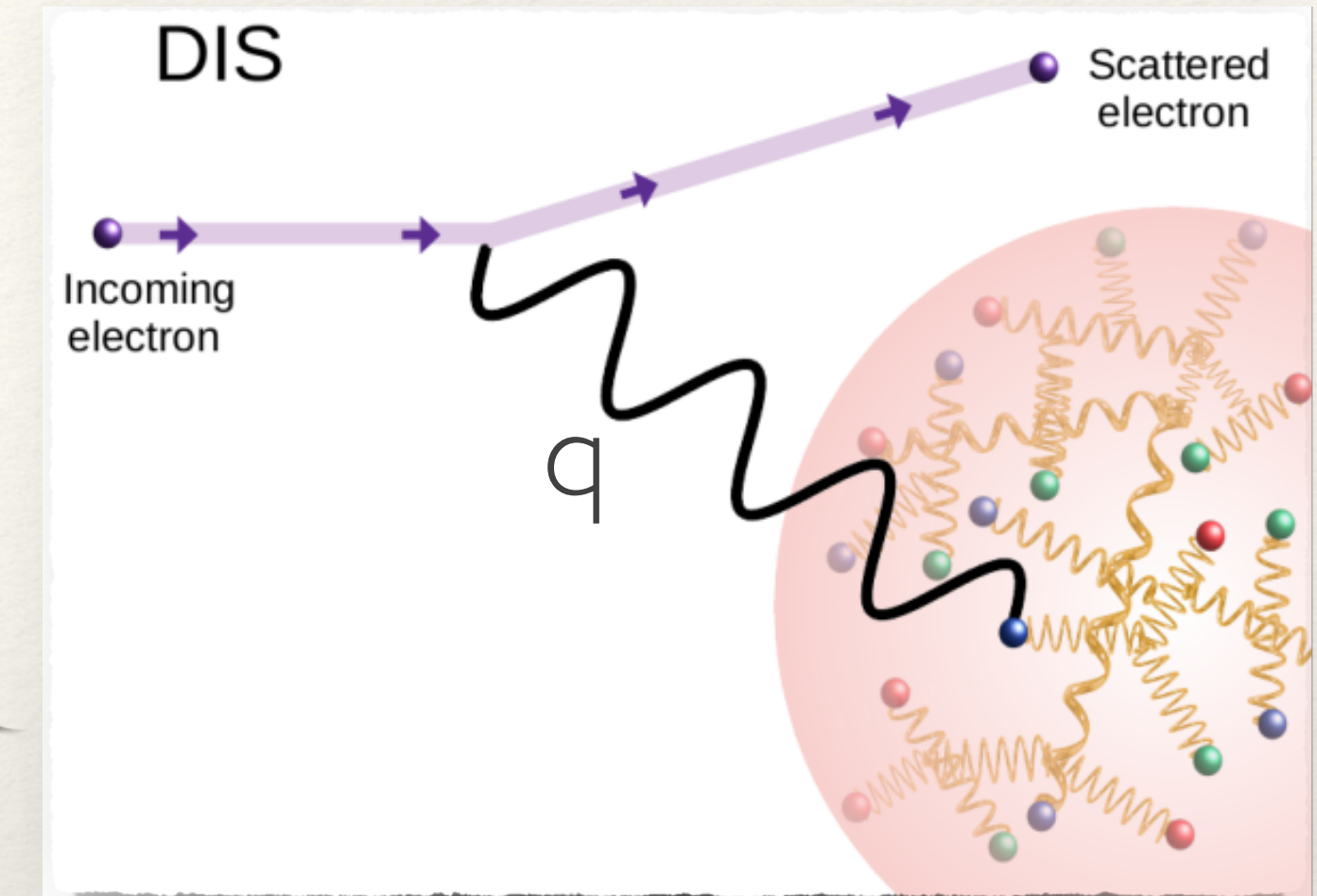
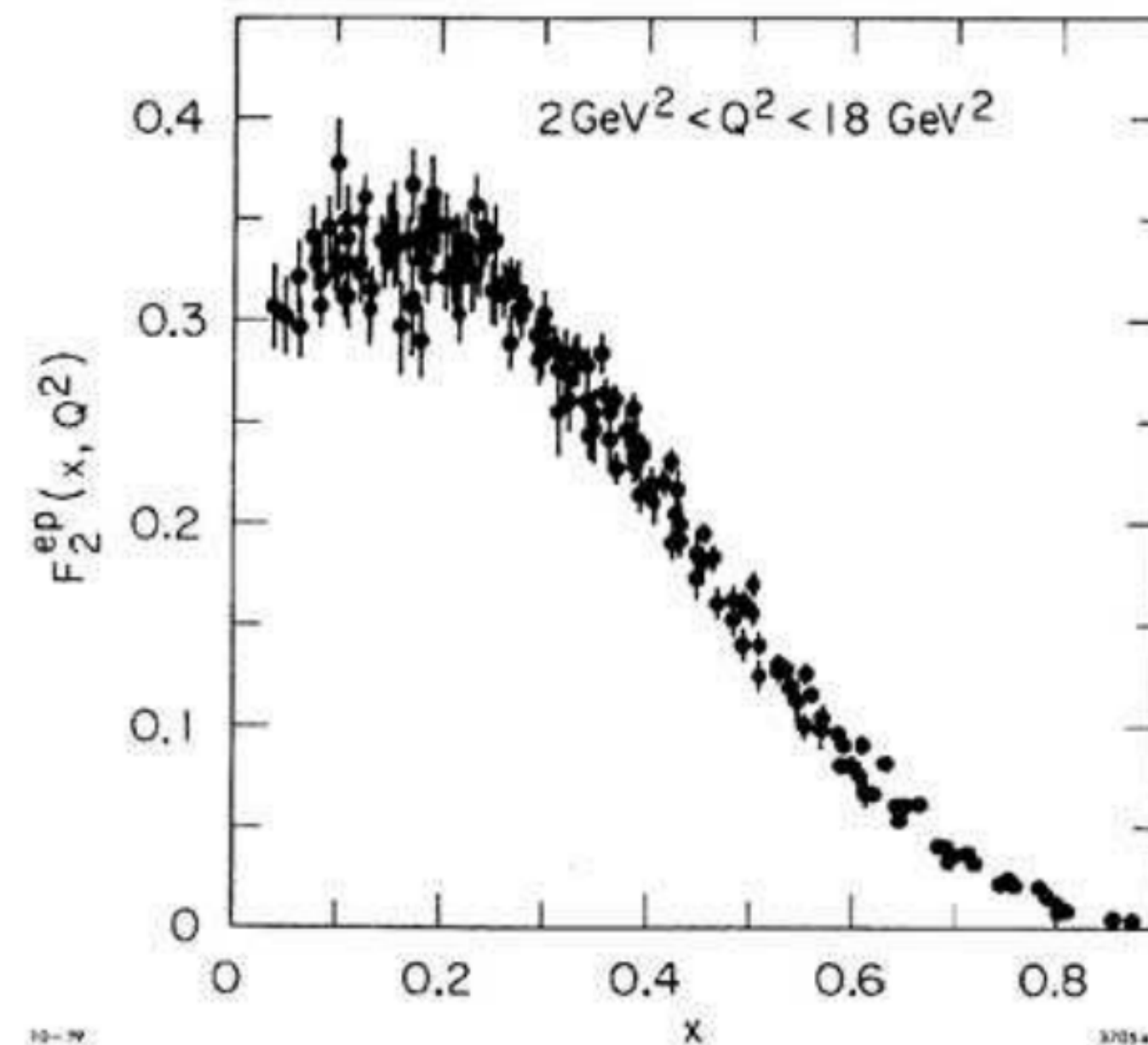
$f_q(x)$  = distribuzione partonica (PDF)

$x = \frac{Q^2}{2P_A \cdot q}$  è uno scalare:

●  $x = \frac{Q^2}{2M_A \nu}$  (LAB);

●  $x$  = frazione di momento del bersaglio portata dal quark. nell' *Infinite Momentum Frame* (IMF) ( $p_z \rightarrow \infty$ )

In generale,  $F_2$  dipende da  $Q^2$ . Nel limite di Bjorken,  $F_2$  scala in  $x$ : **diffusione incoerente su costituenti puntiformi, i partoni** (Al LO in QCD, solo i quark contribuiscono ad  $F_2$ ).





# Protoni e Neutroni in 3D: quark e gluoni

Consideriamo la **diffusione profondamente anelastica** (DIS) se il bersaglio (nucleone o nucleo) ha spin 1/2, nel sistema del laboratorio (LAB) allora il momento trasferito:  $q=(\nu,0,0,-q)$  per grandi  $q$ .

$$\frac{d^2\sigma}{d\Omega dE'} \propto F_2(x) \simeq \sum_q e_q^2 x f_q(x)$$

$F_2(x)$  = funzione di struttura

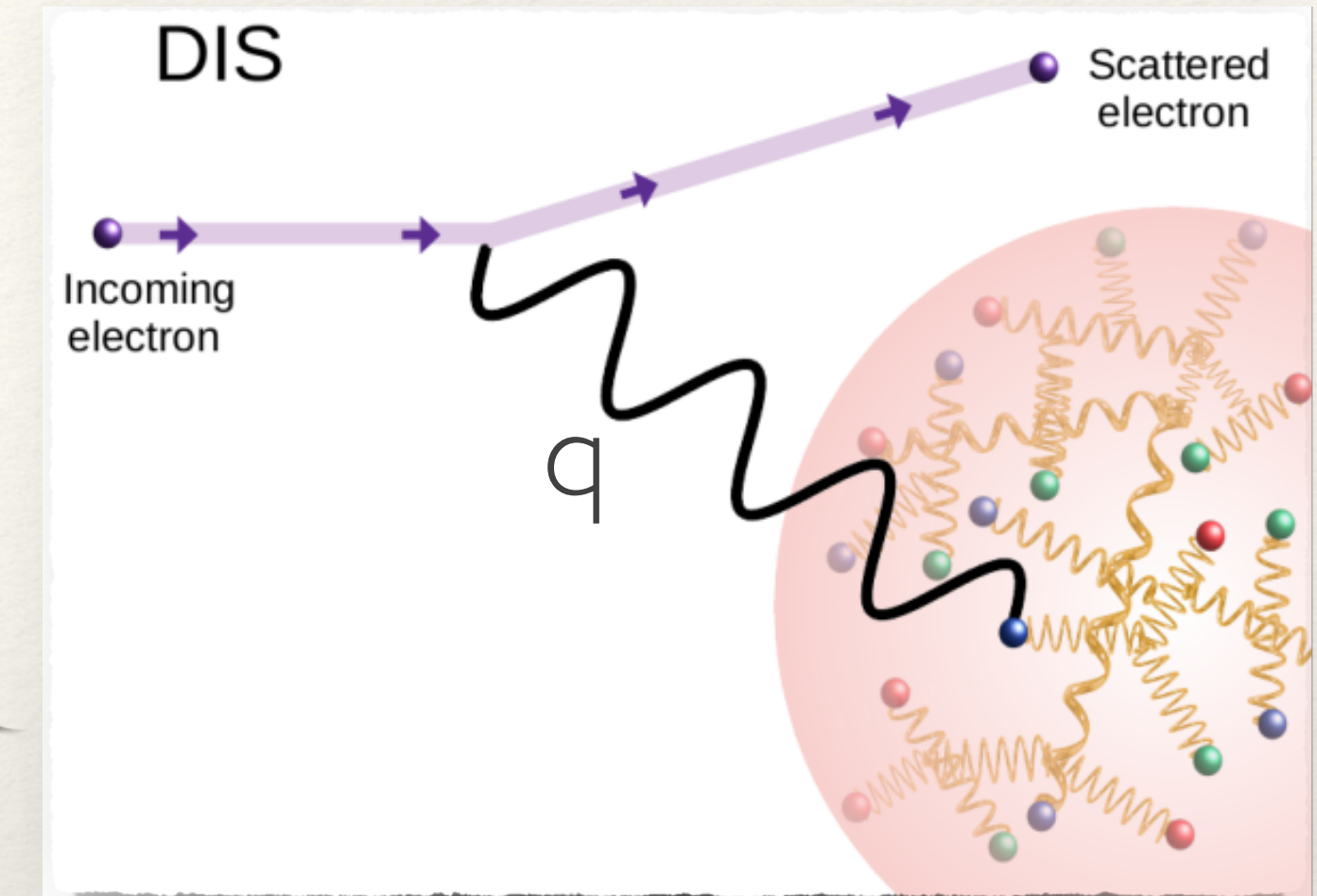
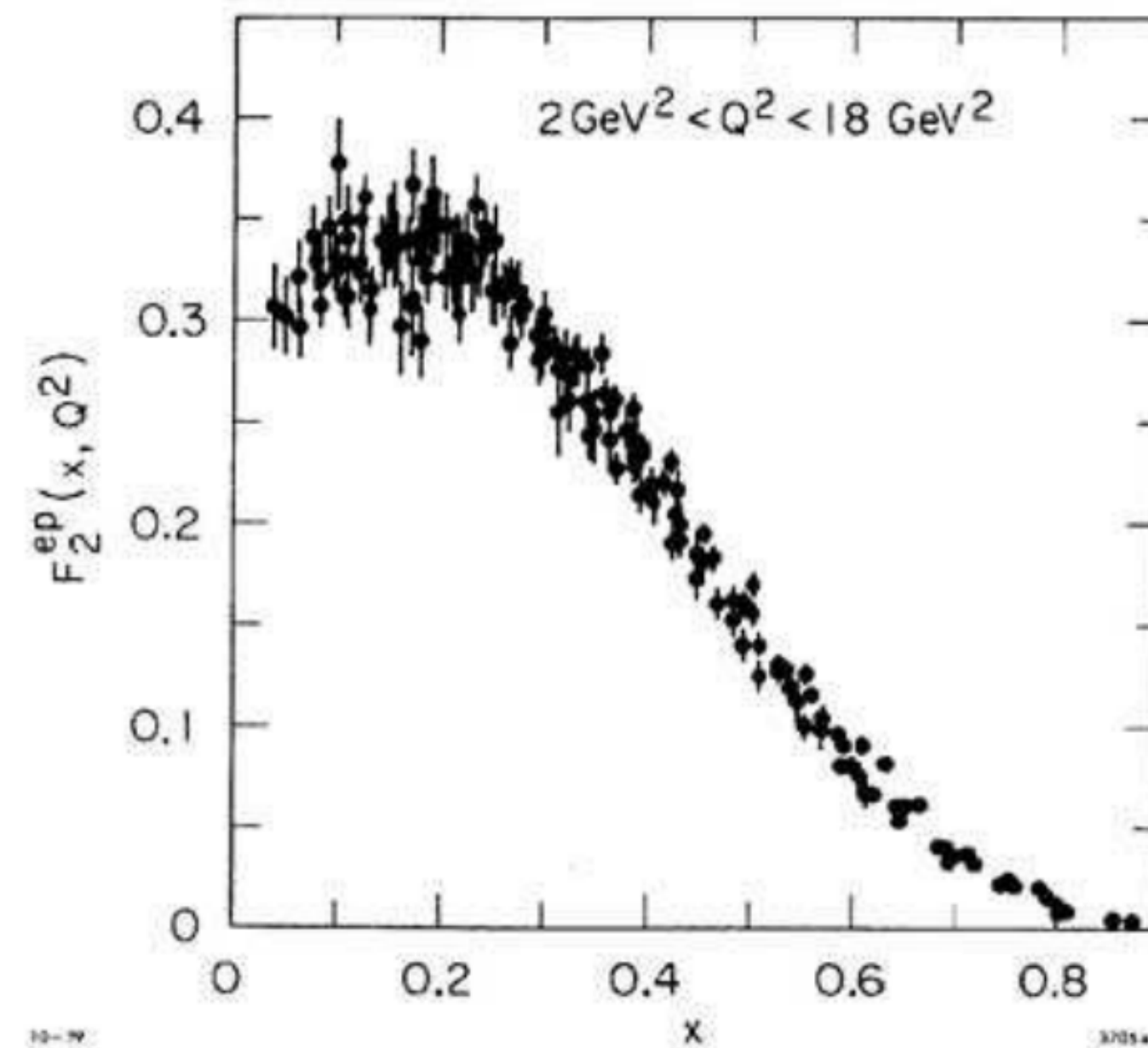
$f_q(x)$  = distribuzione partonica (PDF)

$x = \frac{Q^2}{2P_A \cdot q}$  è uno scalare:

●  $x = \frac{Q^2}{2M_A \nu}$  (LAB);

●  $x$  = frazione di momento del bersaglio portata dal quark. nell' *Infinite Momentum Frame* (IMF) ( $p_z \rightarrow \infty$ )

In generale,  $F_2$  dipende da  $Q^2$ . Nel limite di Bjorken,  $F_2$  scala in  $x$ : **diffusione incoerente su costituenti puntiformi, i partoni** (Al LO in QCD, solo i quark contribuiscono ad  $F_2$ ).





# Protoni e Neutroni in 3D: quark e gluoni

Consideriamo la **diffusione profondamente anelastica** (DIS) se il bersaglio (nucleone o nucleo) ha spin  $1/2$ , nel sistema del laboratorio (LAB) allora il momento trasferito:  $q=(\nu,0,0,-q)$  per grandi  $q$ .

$$\frac{d^2\sigma}{d\Omega dE'} \propto F_2(x) \simeq \sum_q e_q^2 x f_q(x)$$

$F_2(x)$  = funzione di struttura

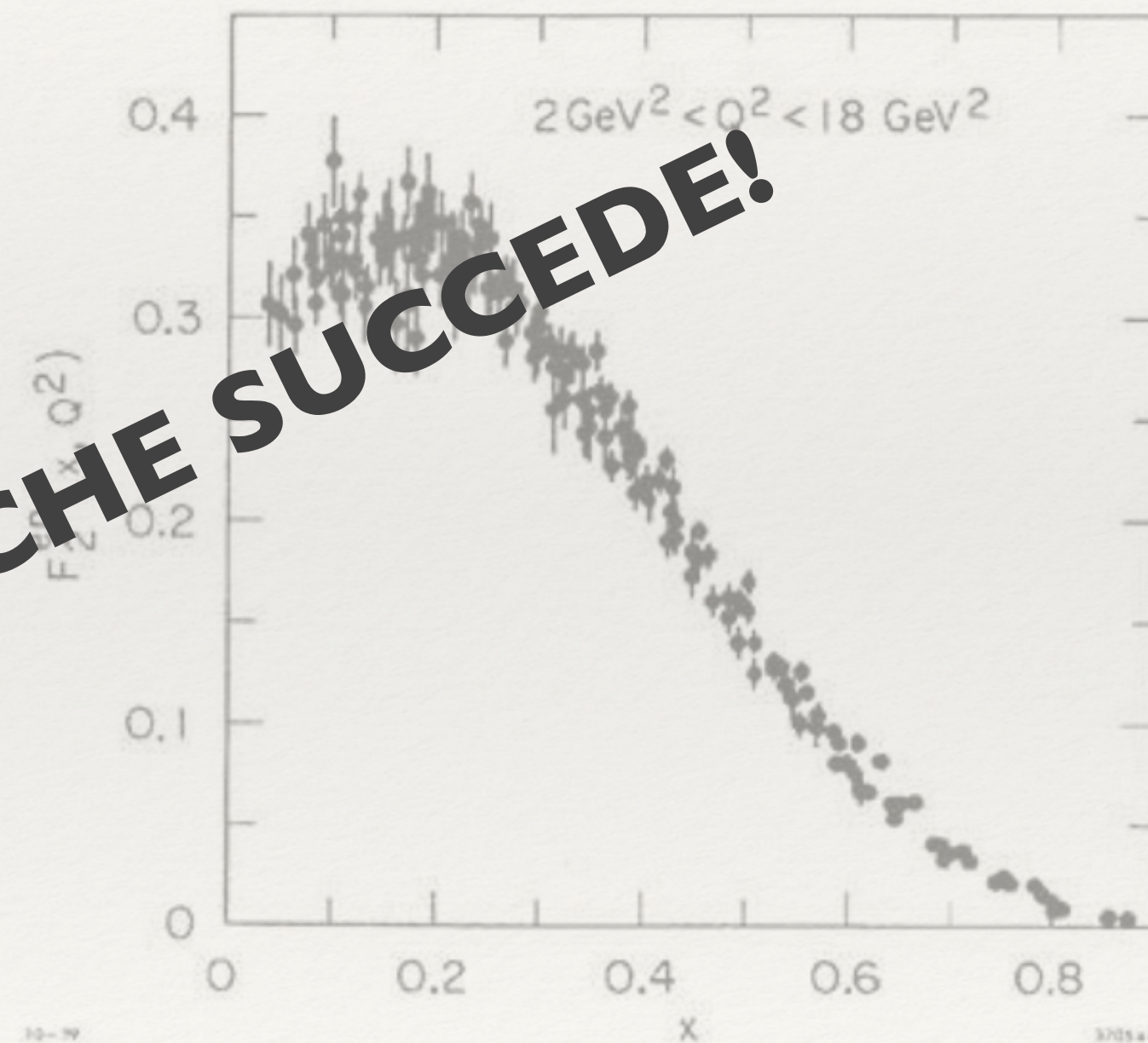
$f_q(x)$  = distribuzione partonica (PDF)

$x = \frac{Q^2}{2P_A \cdot q}$  è uno scalare:

●  $x = \frac{Q^2}{2M_A \nu}$  (LAB);

●  $x$  = frazione di momento del bersaglio portata dal quark. nell' *Infinite Momentum Frame* (IMF) ( $p_z \rightarrow \infty$ )

In generale,  $F_2$  dipende da  $Q^2$ . Nel limite di Bjorken,  $F_2$  scala in  $x$ : **diffusione incoerente su costituenti puntiformi, i partoni** (Al LO in QCD, solo i quark contribuiscono ad  $F_2$ ).



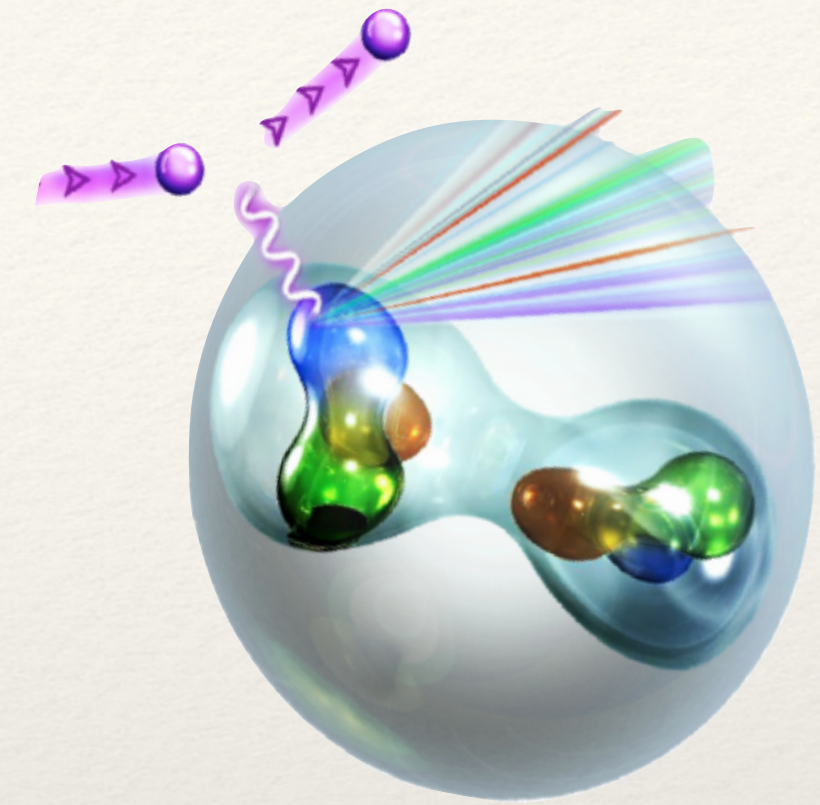
**E NEI NUCLEI CHE SUCCEDE!**





# Protoni e Neutroni in 3D: quark e gluoni

Consideriamo la **diffusione profondamente anelastica** (DIS) se il bersaglio (NUCLEO), nel sistema del laboratorio (LAB) allora il momento trasferito:  $q=(v,0,0,-q)$  per grandi  $q$ :

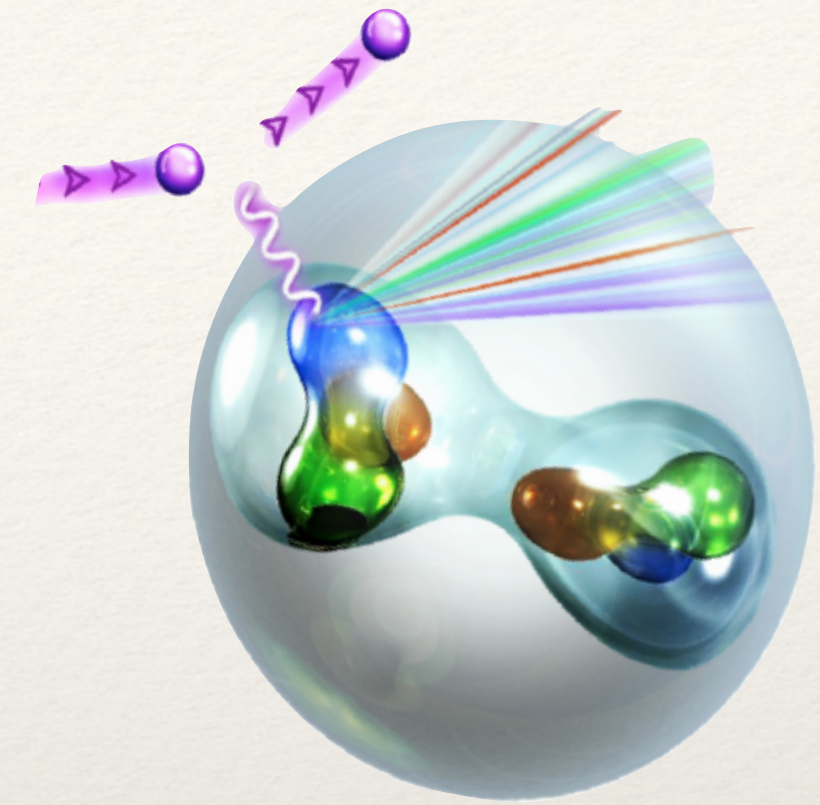




# Protoni e Neutroni in 3D: quark e gluoni

Consideriamo la **diffusione profondamente anelastica** (DIS) se il bersaglio (NUCLEO), nel sistema del laboratorio (LAB) allora il momento trasferito:  $q=(v,0,0,-q)$  per grandi  $q$ :

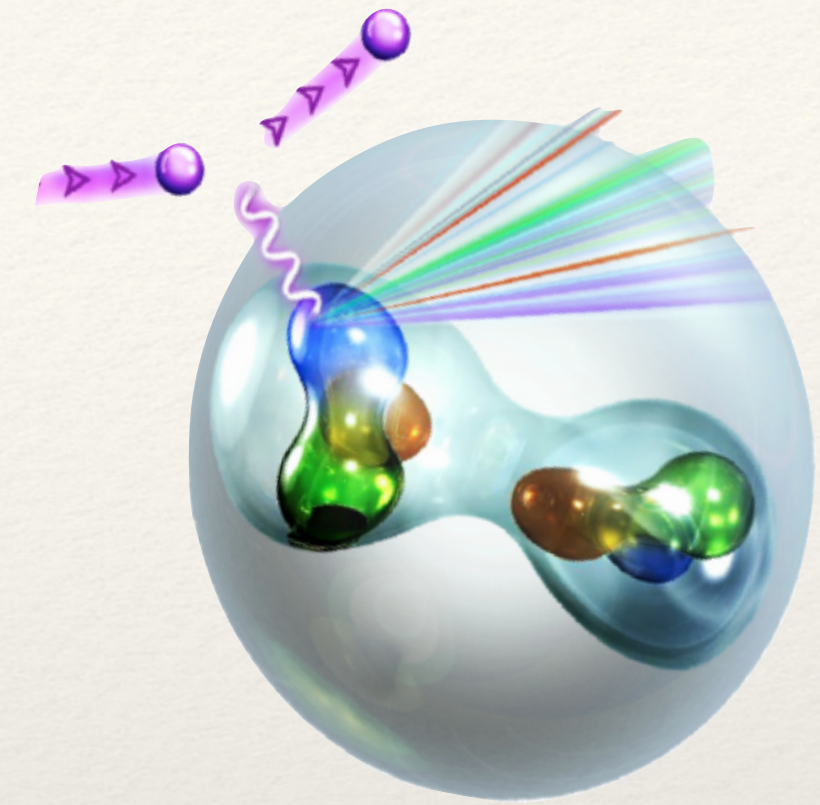
(EMC coll., CERN 1983) e studiamo il rapporto tra le sezioni d'urto per un nucleone legato in un nucleo e per il deuterio libero. **A grandi energie (più grandi di energia media di legame) ci si aspetta che il rapporto sia 1**





# Protoni e Neutroni in 3D: quark e gluoni

Consideriamo la **diffusione profondamente anelastica** (DIS) se il bersaglio (NUCLEO), nel sistema del laboratorio (LAB) allora il momento trasferito:  $q=(v,0,0,-q)$  per grandi  $q$ :



(EMC coll., CERN 1983) e studiamo il rapporto tra le sezioni d'urto per un nucleone legato in un nucleo e per il deuterio libero. **A grandi energie (più grandi di energia media di legame) ci si aspetta che il rapporto sia 1**

Se così fosse la struttura del nucleone legato, nei vari nuclei, non cambia!



# Protoni e Neutroni in 3D: quark e gluoni

Consideriamo la **diffusione profondamente anelastica** (DIS) se il bersaglio (NUCLEO), nel sistema del laboratorio (LAB) allora il momento trasferito:  $q=(\nu,0,0,-q)$  per grandi  $q$ :

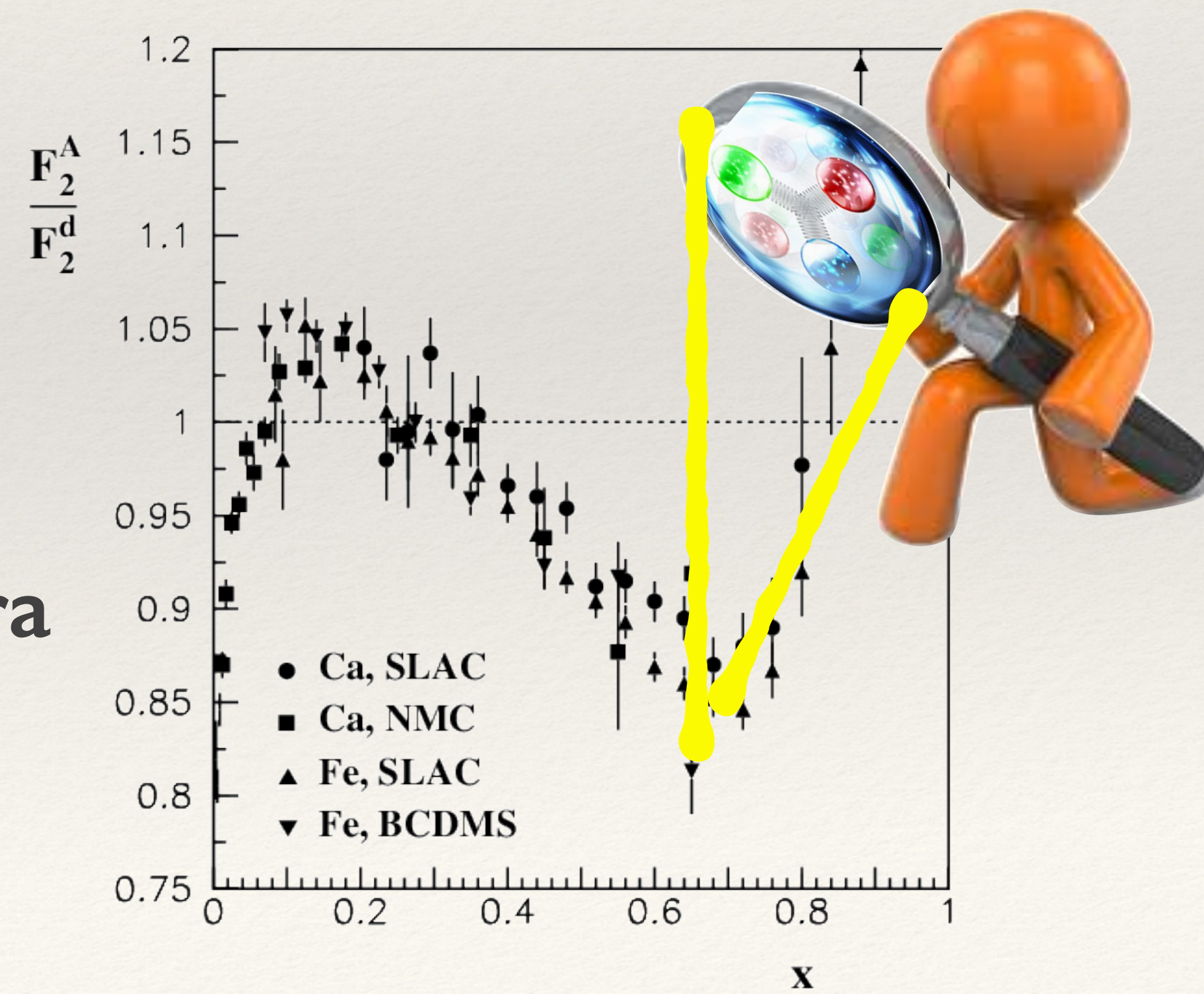
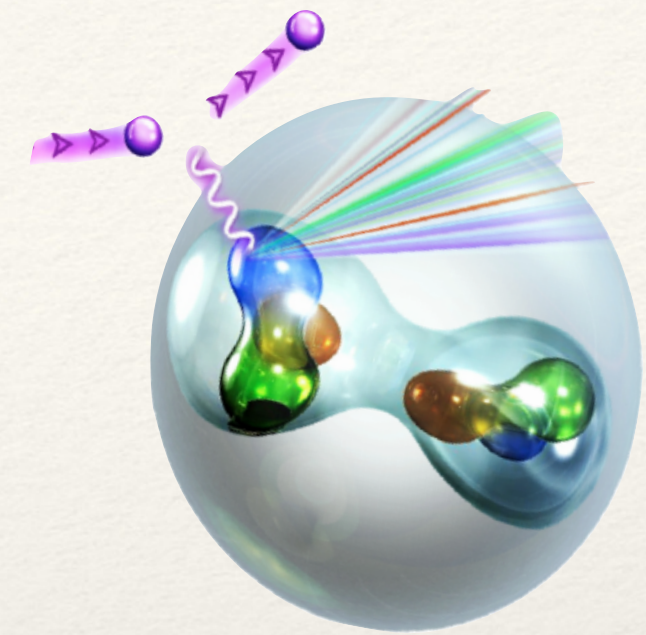
(EMC coll., CERN 1983) e studiamo il rapporto tra le sezioni d'urto per un nucleone legato in un nucleo e per il deuterio libero. **A grandi energie (più grandi di energia media di legame)** ci si aspetta che il rapporto sia 1

Se così fosse la struttura del nucleone legato, nei vari nuclei, non cambia!

**Il rapporto non fa 1!**



**Modifica della struttura dei nucleoni legati**





# Protoni e Neutroni in 3D: quark e gluoni

Consideriamo la **diffusione profondamente anelastica** (DIS)  
se il bersaglio (NUCLEO) nel sistema del laboratorio (LAB)  
allora

Dopo tanti anni ancora non abbiamo una  
spiegazione chiara!

(EMC) sezio  
durto per un nucleone legato in un nucleo e  
per il nucleone libero. A grandi energie (più grandi di

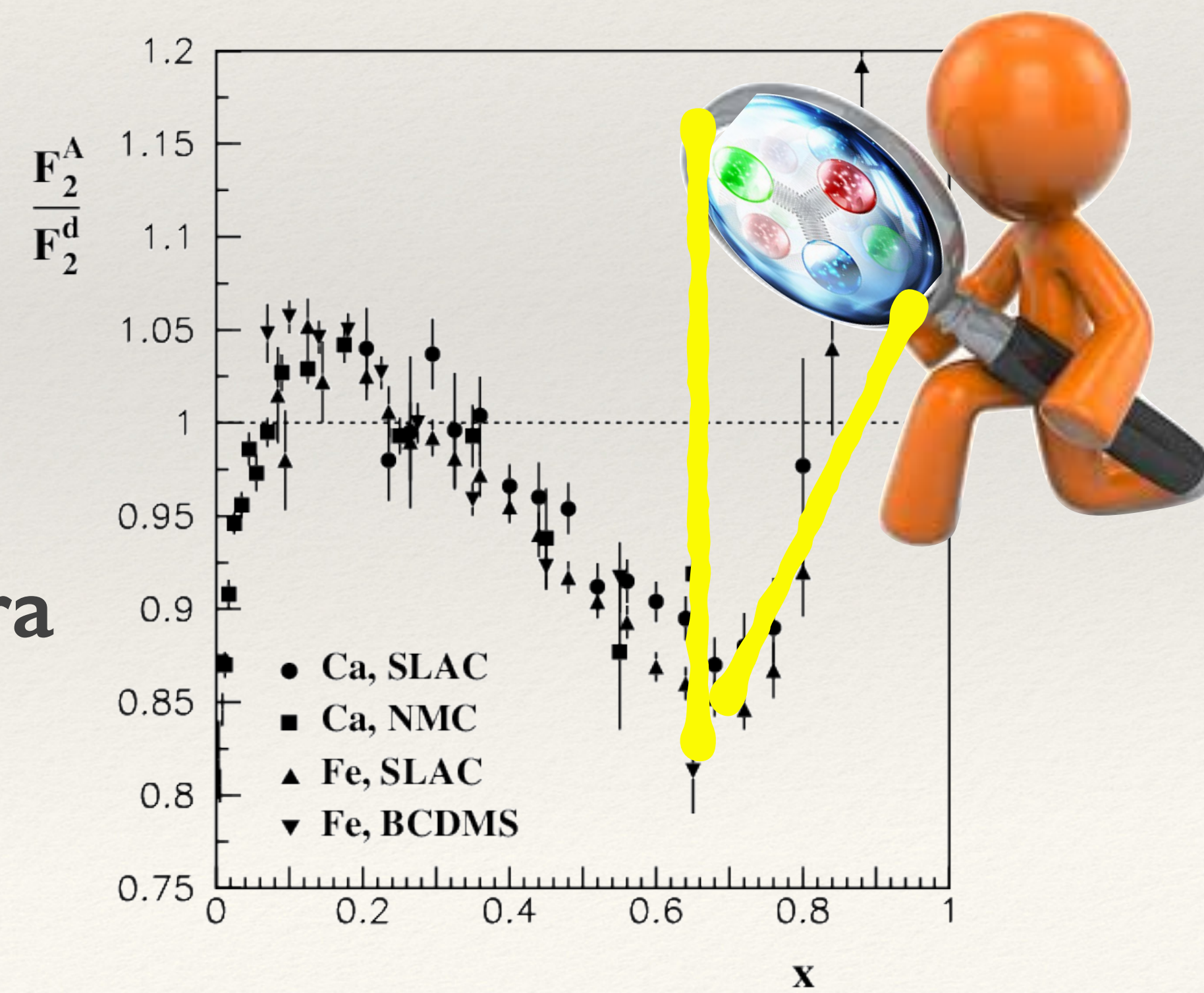
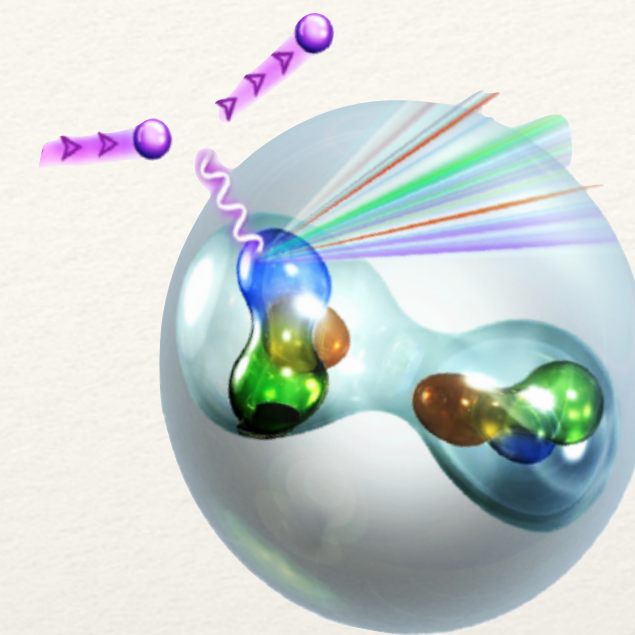
energia  
sia I  
Se c

modelli, ma sono molto complicati!

nei v

**Il rapporto non fa 1!**

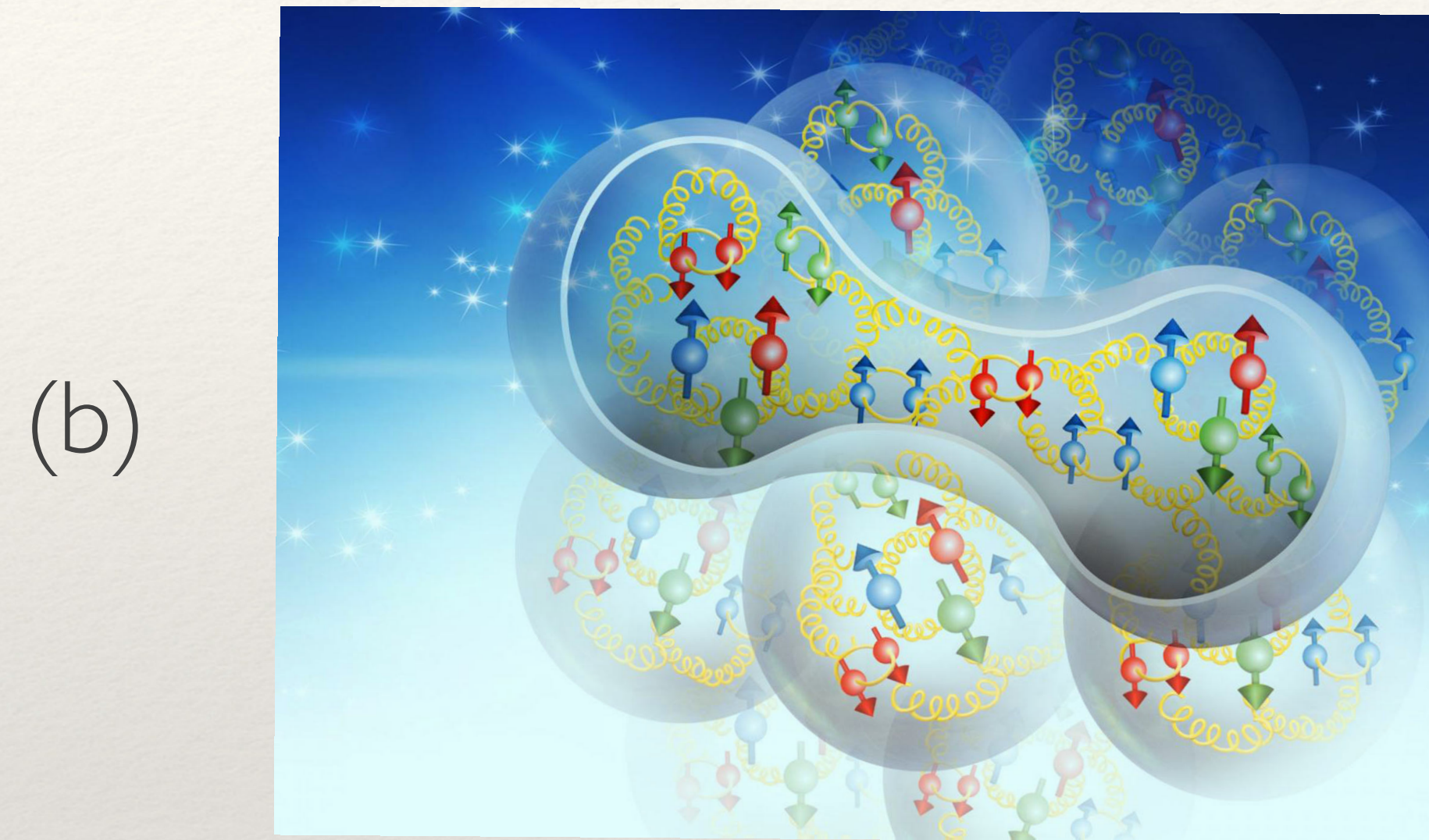
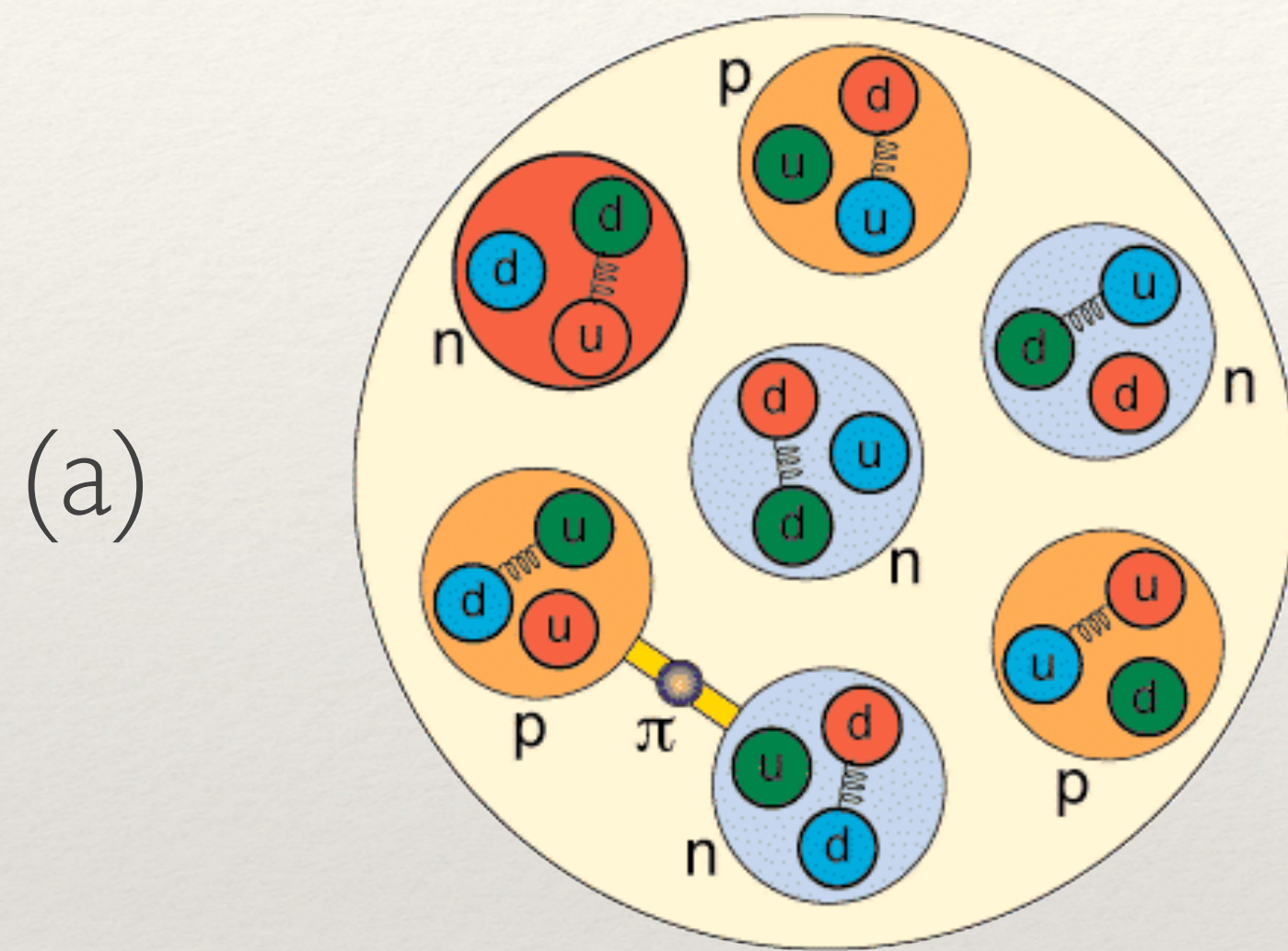
**Modifica della struttura  
dei nucleoni legati**





# Soluzione all'effetto EMC?

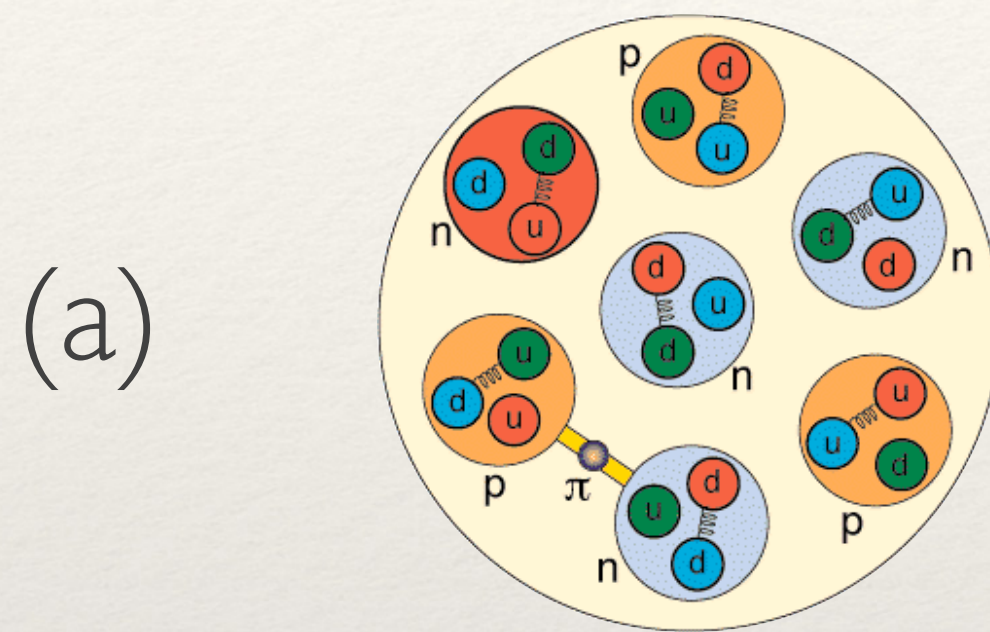
Sicuramente per rispondere serve capire se la struttura nucleare è più tipo (a) o tipo (b)



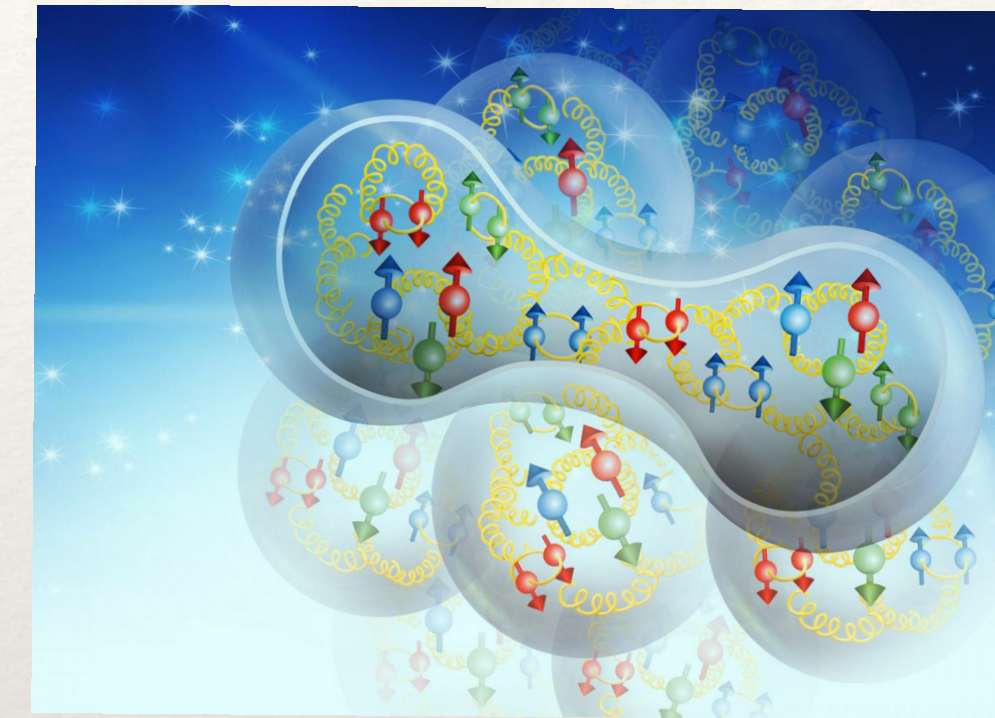


# Soluzione all'effetto EMC?

Sicuramente per rispondere serve capire se la struttura nucleare è più tipo (a) o tipo (b)

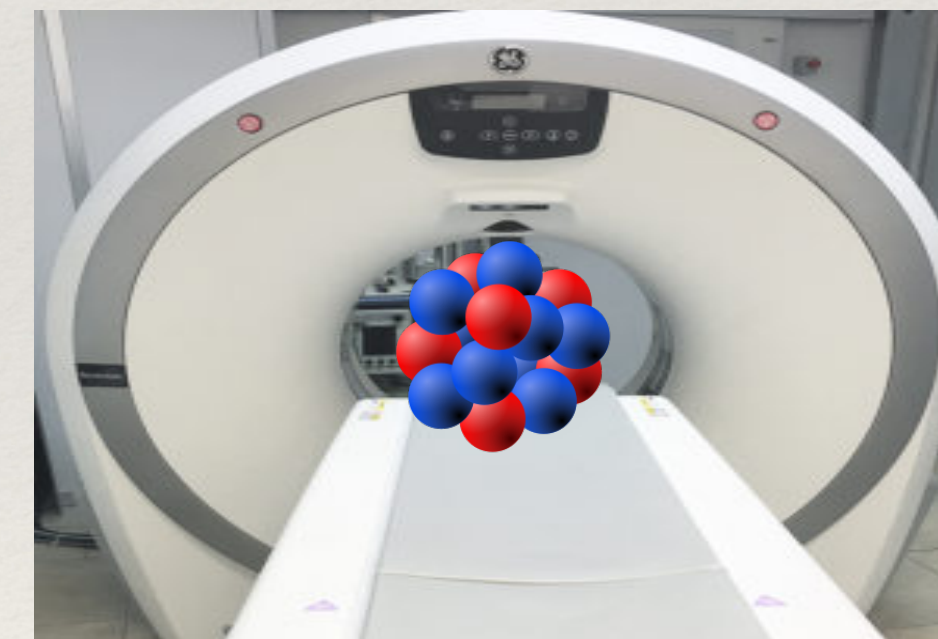


(b)



Per rispondere serve fargli una TOMOGRAFIA.

Si può fare! Possiamo studiare processi come: **Deeply Virtual Compton Scattering (DVCS)** e ottenere info riguardo le **distribuzioni partoniche generalizzate (GPDs)**. Difficili misure ed analisi ma oggi possibile in vari laboratori!

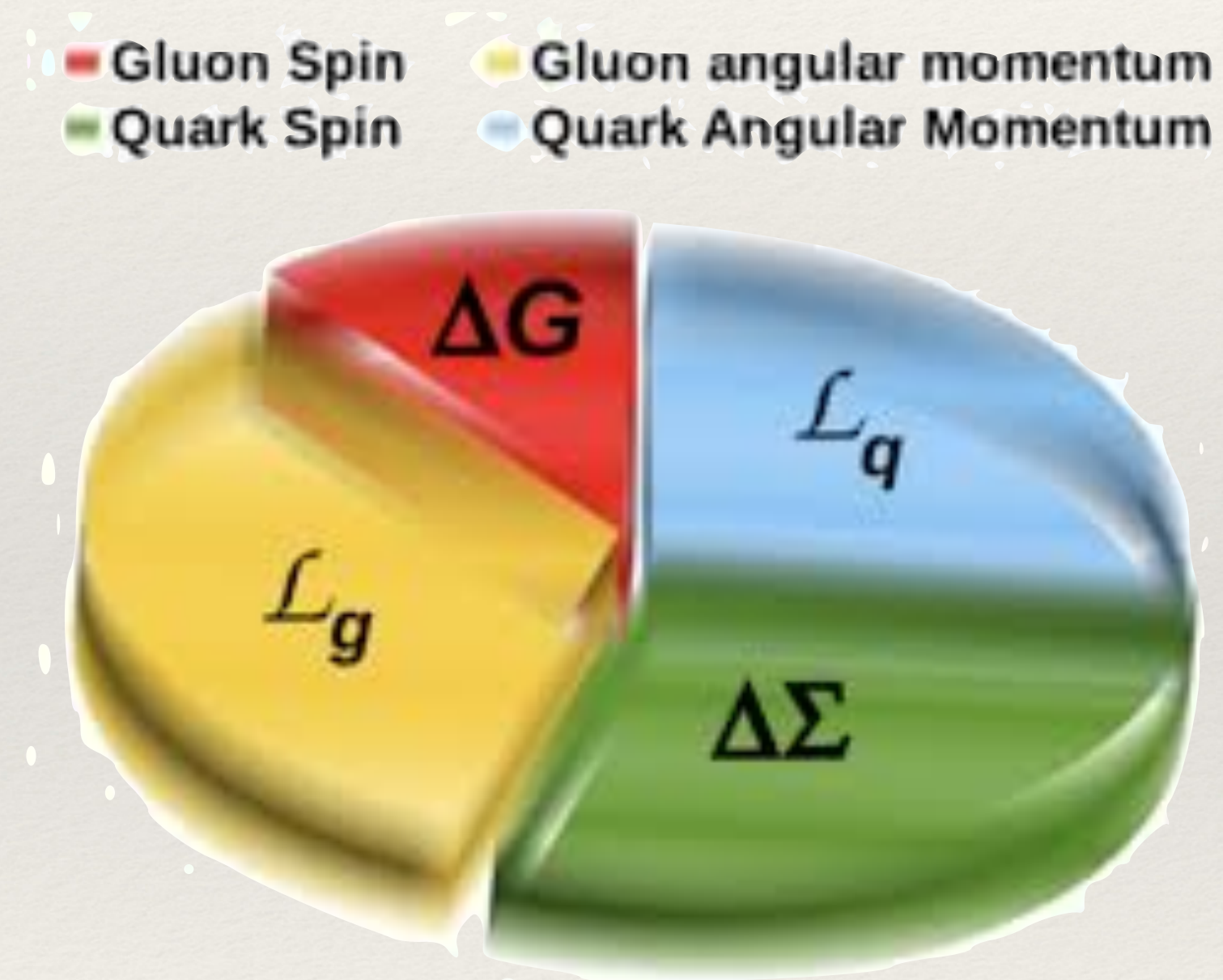




# La crisi dello SPIN del protone

Questo è un problema aperto da più di 20 anni. Se il protone è fatto di particelle interagenti che lo costituiscono (quark & gluoni):

**Lo spin del protone deve risultare dalla somma di tutti i momenti angolari!**



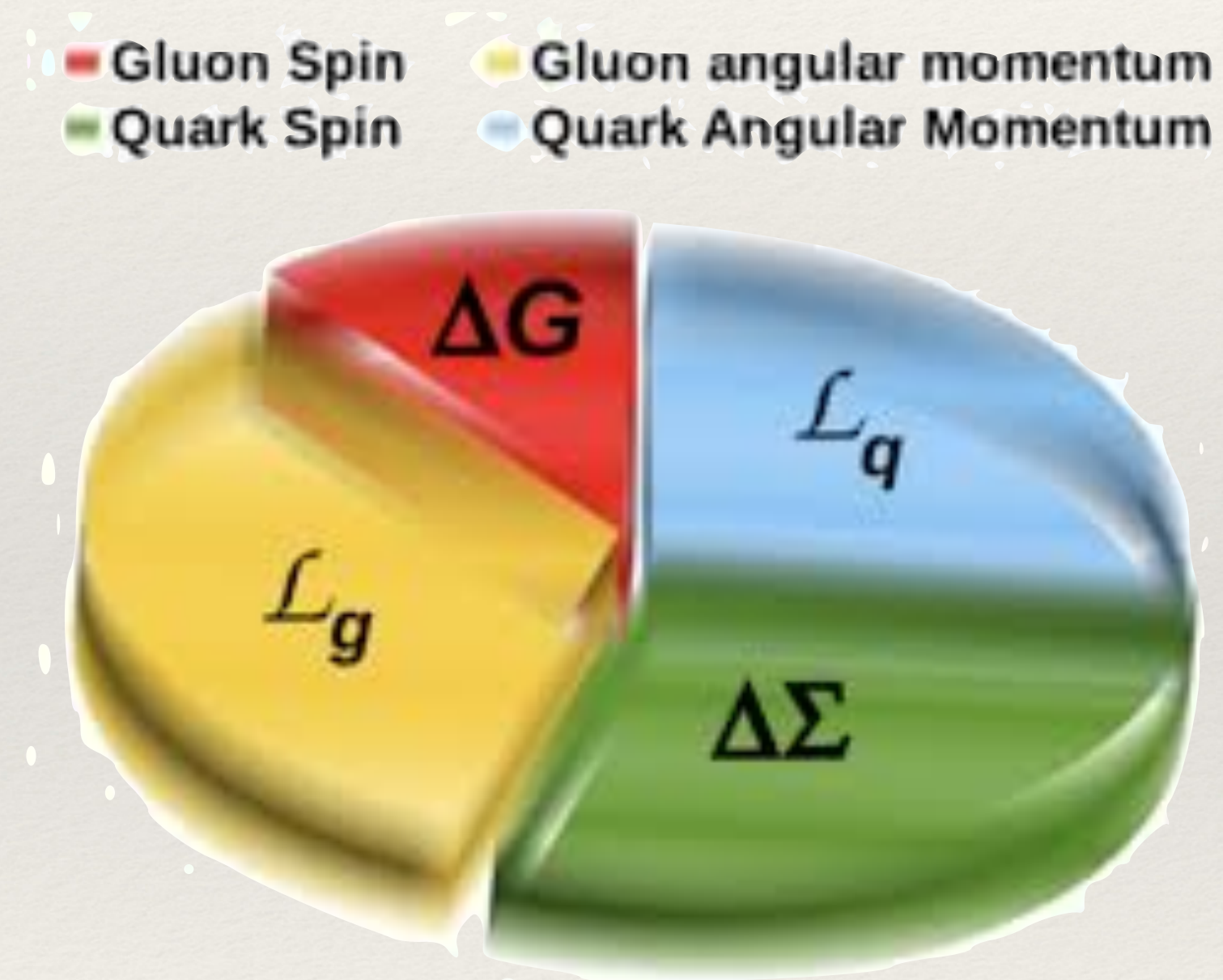
$$S_p = \frac{1}{2} = \frac{1}{2} \Delta \Sigma + \Delta G + \mathcal{L}_q + \mathcal{L}_G$$



# La crisi dello SPIN del protone

Questo è un problema aperto da più di 20 anni. Se il protone è fatto di particelle interagenti che lo costituiscono (quark & gluoni):

**Lo spin del protone deve risultare dalla somma di tutti i momenti angolari!**



$$S_p = \frac{1}{2} = \frac{1}{2} \boxed{\Delta\Sigma} + \Delta G + \mathcal{L}_q + \mathcal{L}_G$$

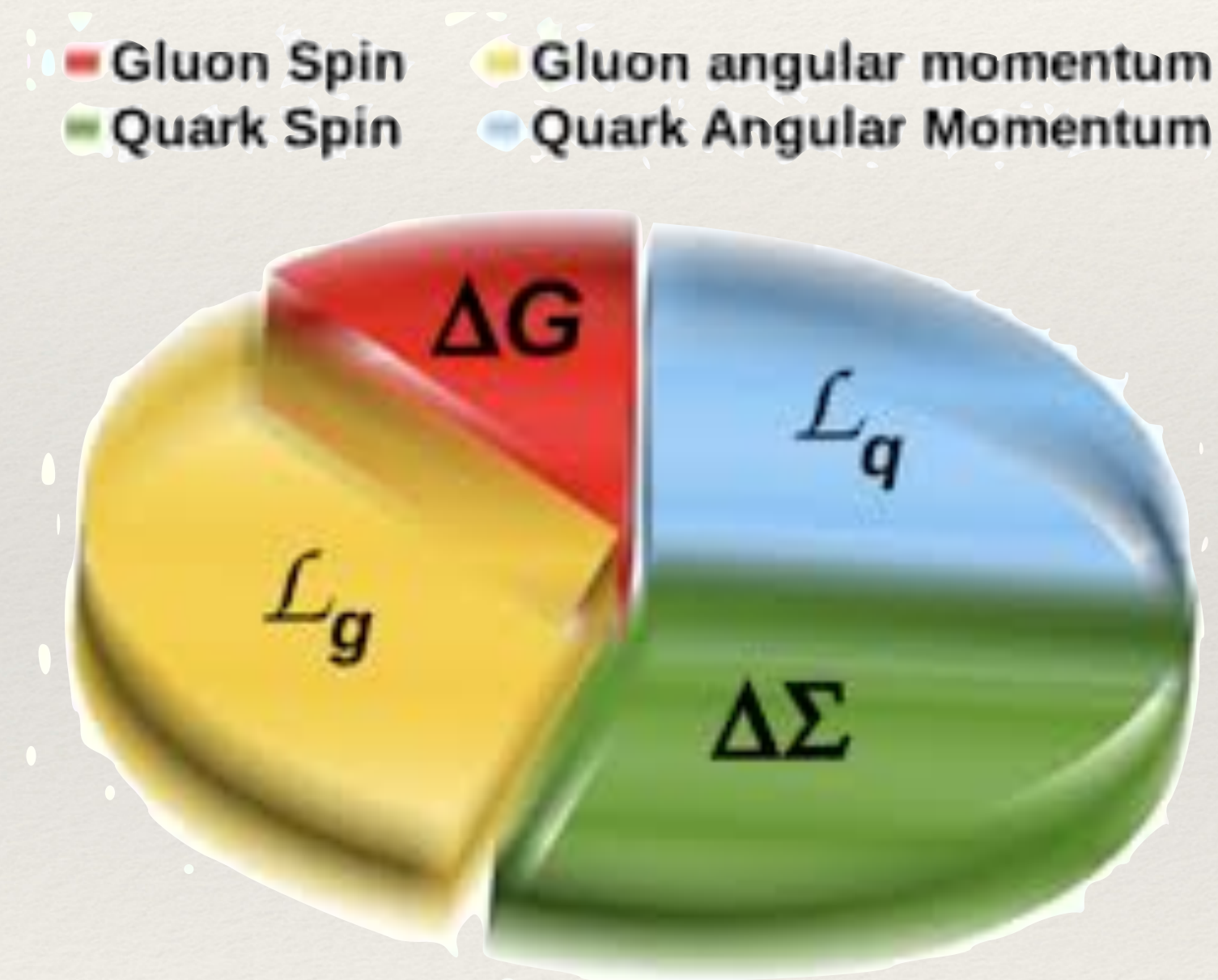
Dagli esperimenti si estrae il contributo di elicità dei quark!



# La crisi dello SPIN del protone

Questo è un problema aperto da più di 20 anni. Se il protone è fatto di particelle interagenti che lo costituiscono (quark & gluoni):

**Lo spin del protone deve risultare dalla somma di tutti i momenti angolari!**



$$S_p = \frac{1}{2} = \frac{1}{2} \boxed{\Delta\Sigma} + \Delta G + \mathcal{L}_q + \mathcal{L}_G$$

Dagli esperimenti si estrae il contributo di elicità dei quark!

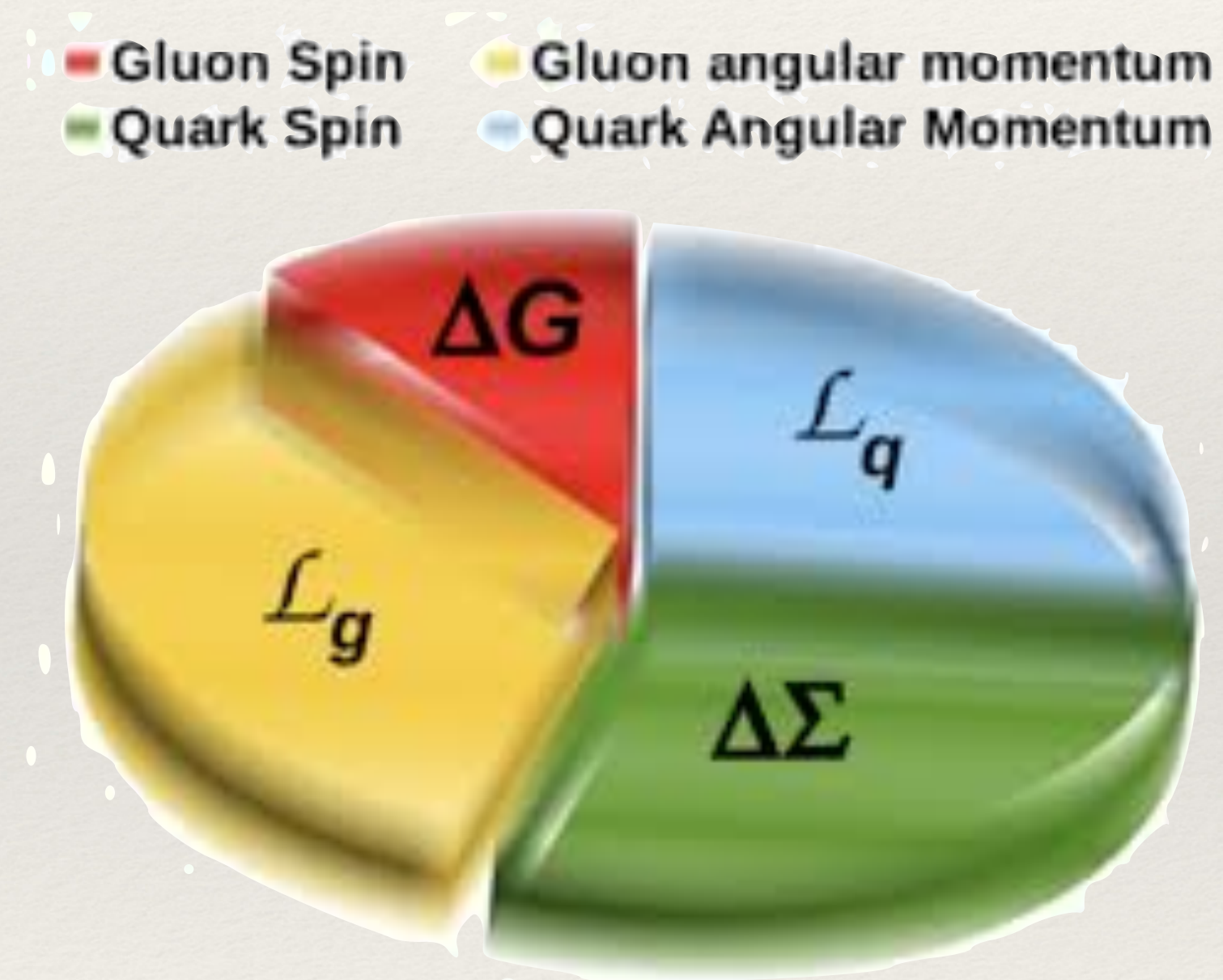
E' circa il 30% !! Il resto????



# La crisi dello SPIN del protone

Questo è un problema aperto da più di 20 anni. Se il protone è fatto di particelle interagenti che lo costituiscono (quark & gluoni):

**Lo spin del protone deve risultare dalla somma di tutti i momenti angolari!**



$$S_p = \frac{1}{2} = \frac{1}{2}\Delta\Sigma + \Delta G + \boxed{\mathcal{L}_q} + \mathcal{L}_G$$

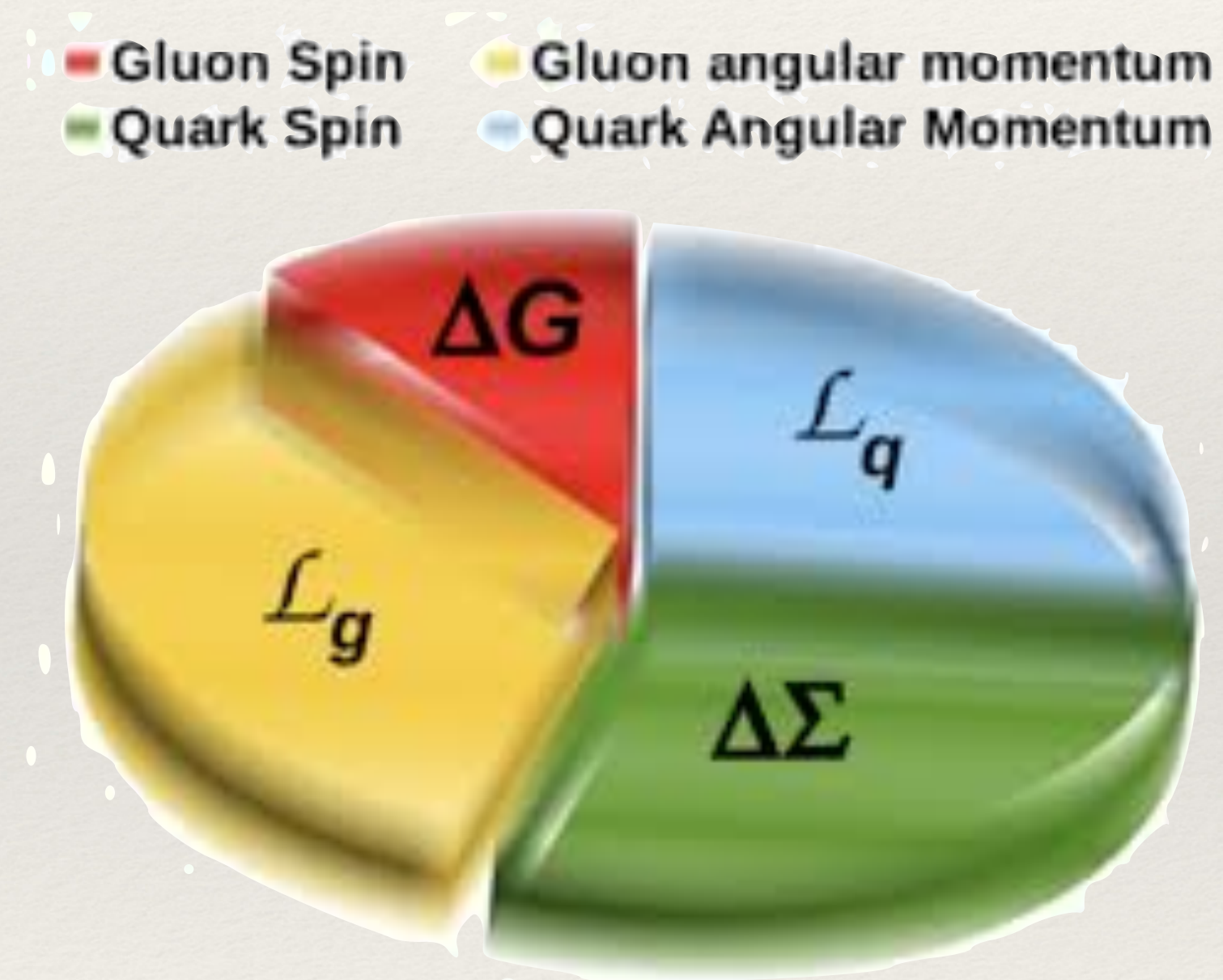
Come otteniamo il momento angolare orbitale?



# La crisi dello SPIN del protone

Questo è un problema è un problema aperto da più di 20 anni. Se il protone è fatto di particelle interagenti che lo costituiscono (quark & gluoni):

**Lo spin del protone deve risultare dalla somma di tutti i momenti angolari!**



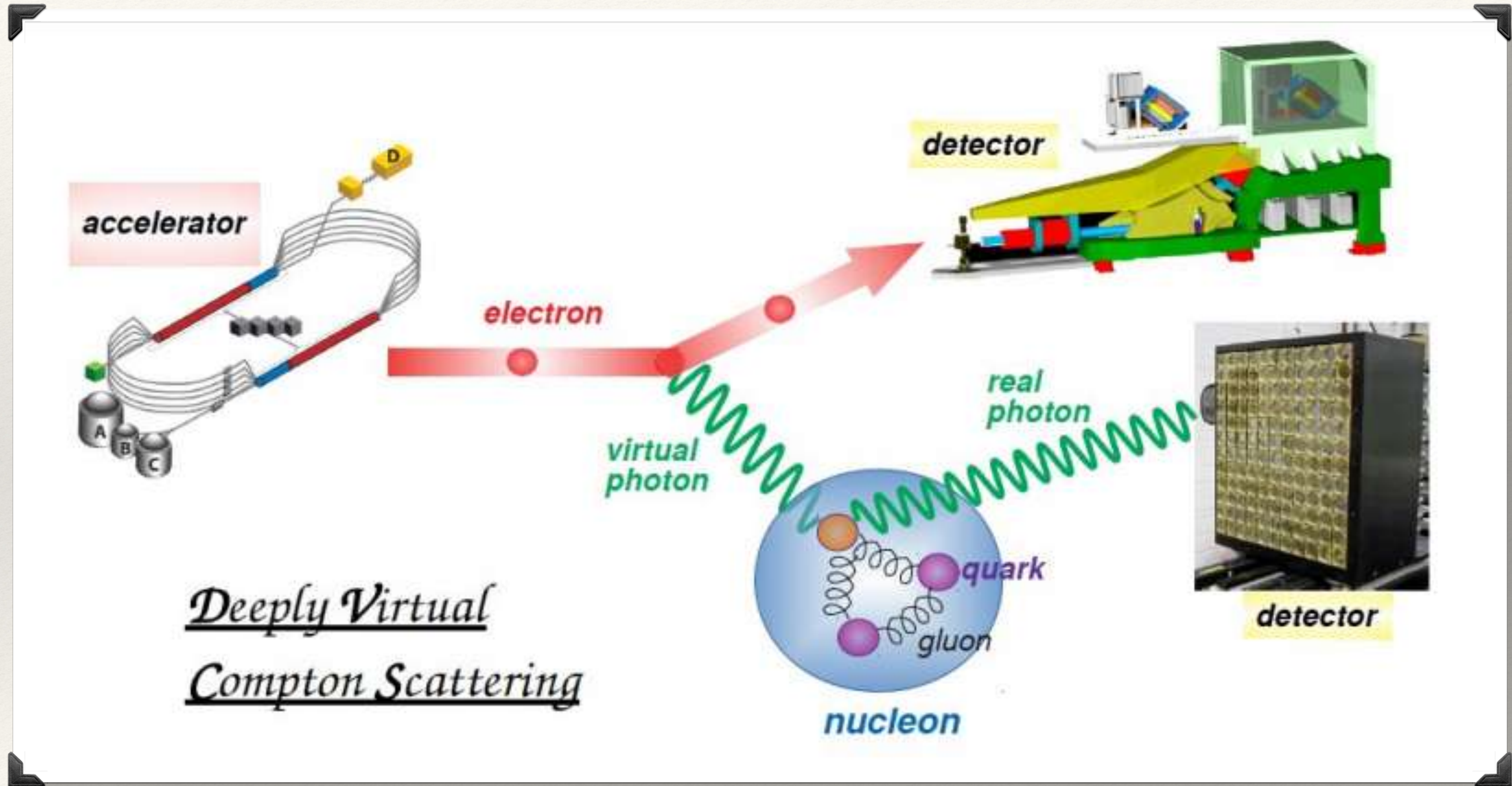
$$S_p = \frac{1}{2} = \frac{1}{2}\Delta\Sigma + \Delta G + \boxed{\mathcal{L}_q} + \mathcal{L}_G$$

Come otteniamo il momento angolare orbitale?

**Anche qui con il DVCS**



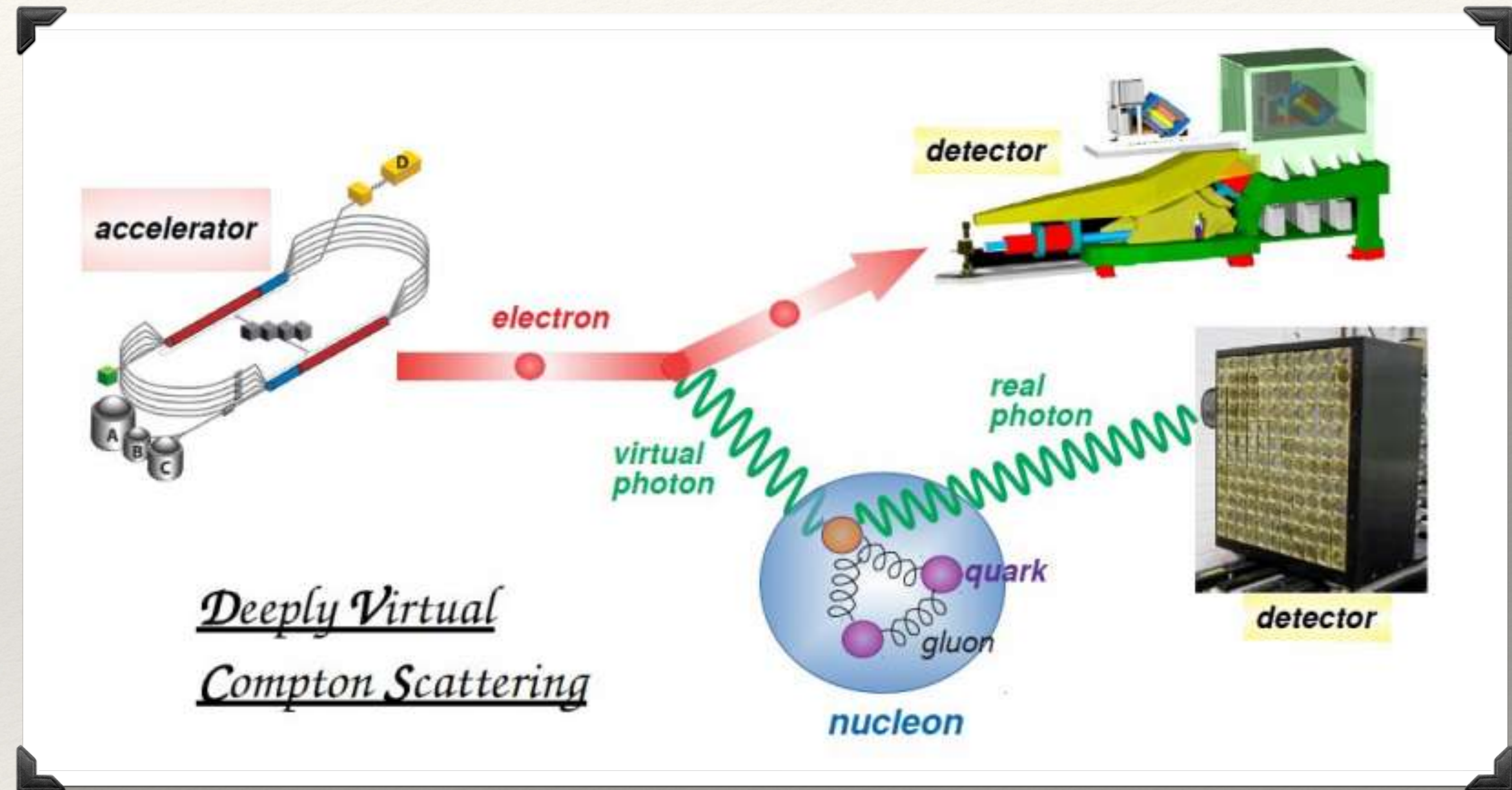
# DVCS in laboratorio





# DVCS in laboratorio

La sezione d'urto dipende in modo complicato dalle  
Distribuzioni Partoniche Generalizzate  
(GPDs)



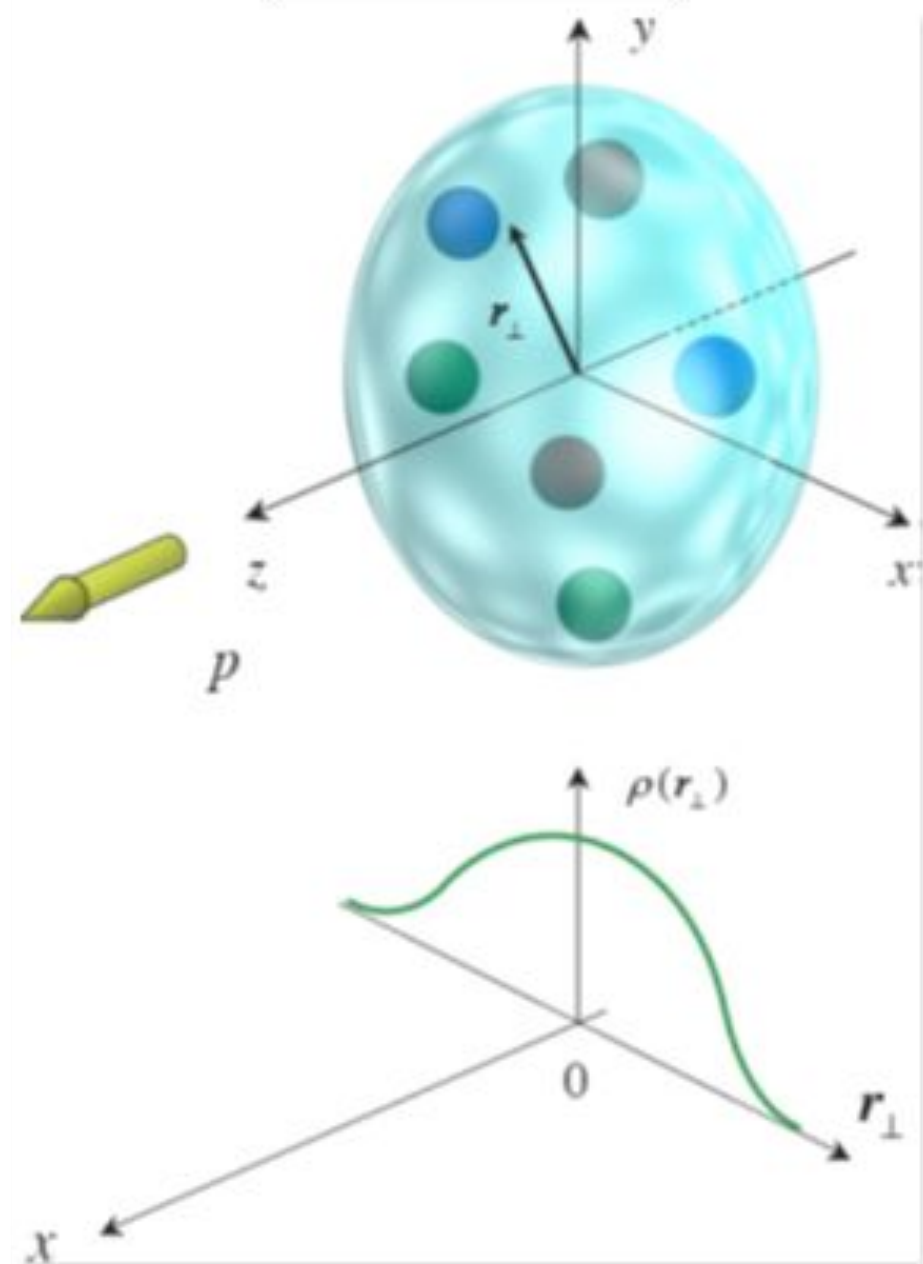


# DVCS e struttura 3D degli adroni

## 3D imaging of the nucleon

Tool: Generalised Parton Distributions

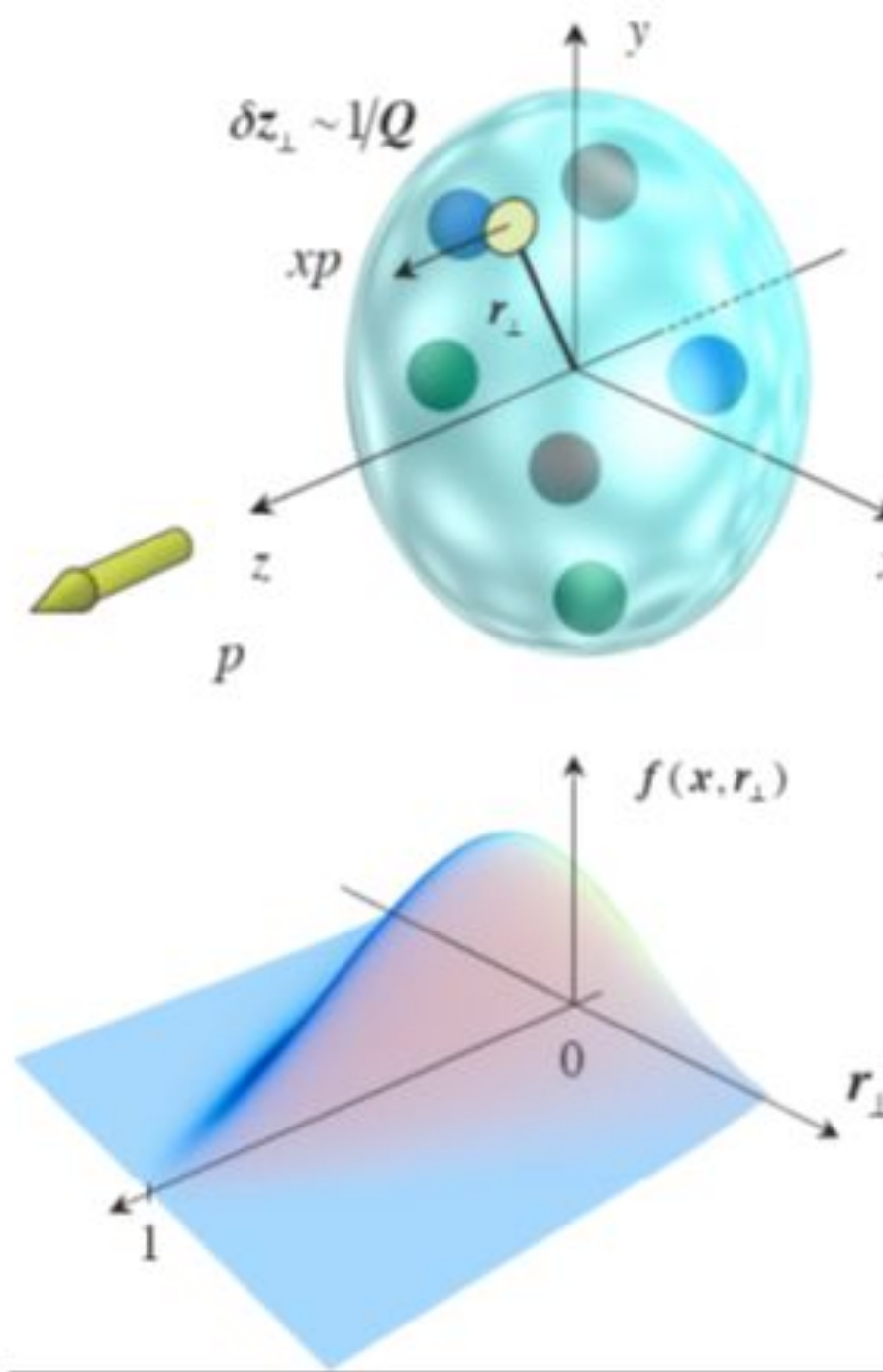
### Form factors:



Fourier transform of e.g. a radial charge distribution

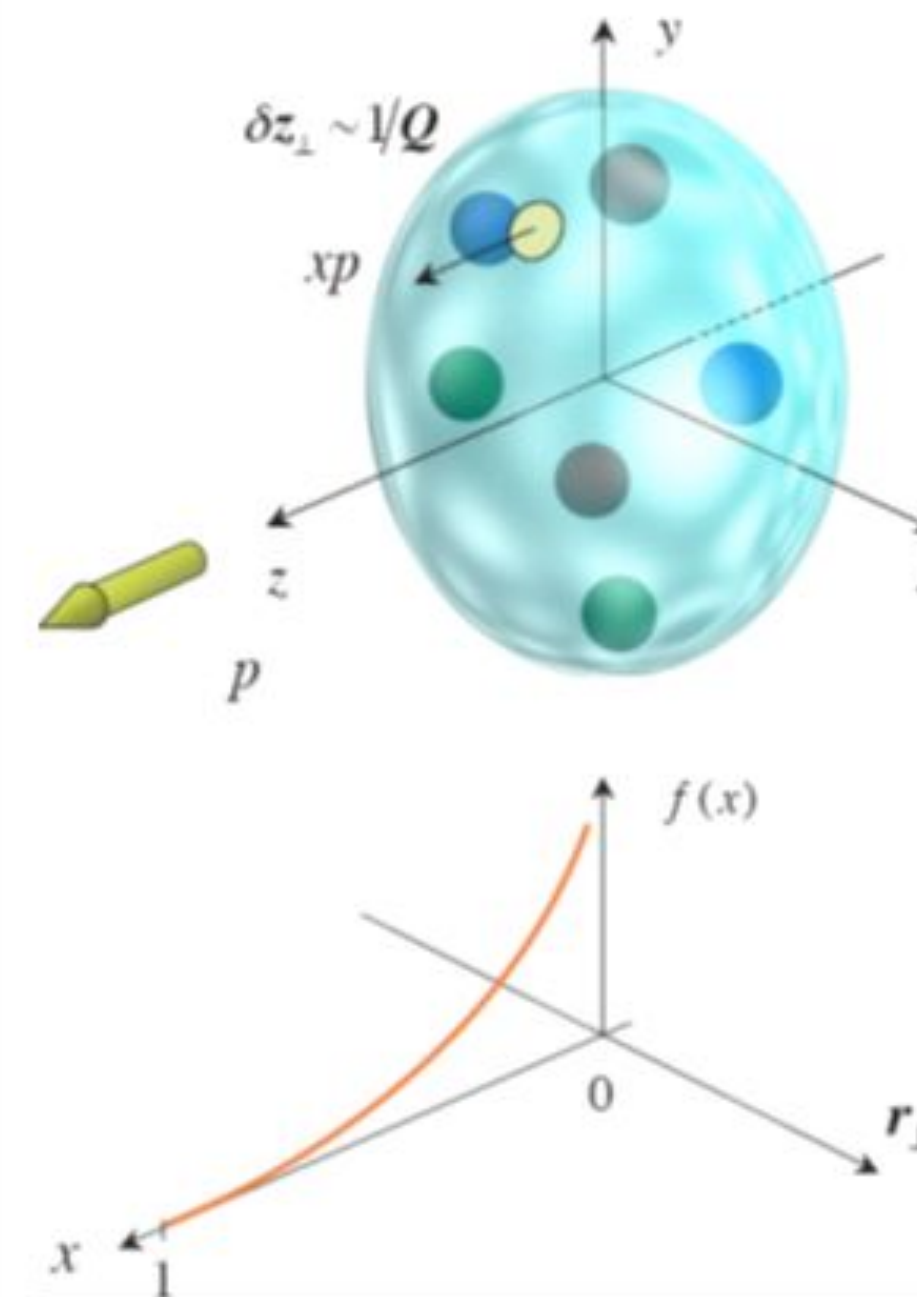
June 20-24, 2011

### GPDs:



Generalized description in 2+1 dimensions  
P. SPIN 2011, Cairns, QLD, Australia

### Parton Distribution Functions:



Number density of quarks with longitudinal momentum fraction  $x$

16

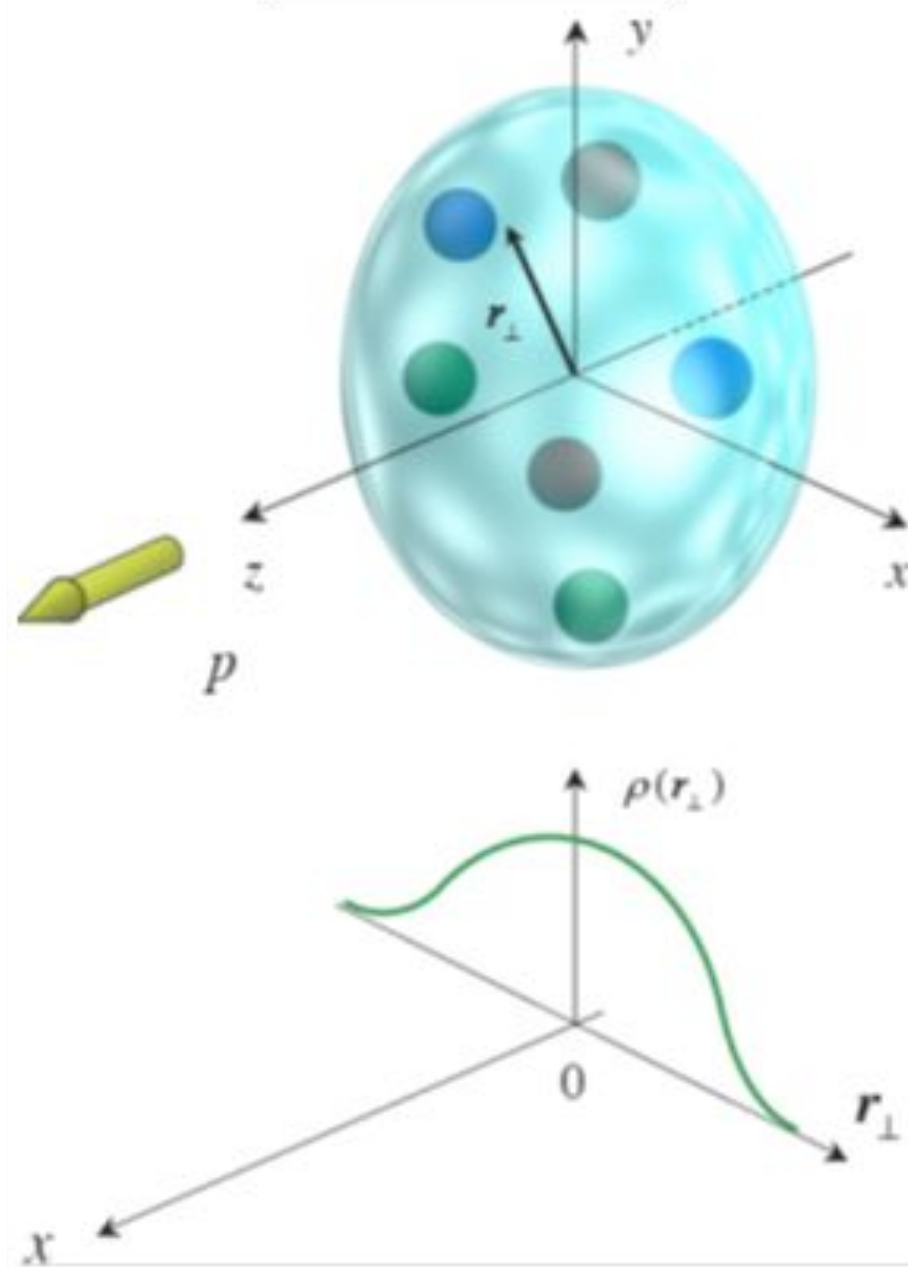


# DVCS e struttura 3D degli adroni

## 3D imaging of the nucleon

Tool: Generalised Parton Distributions

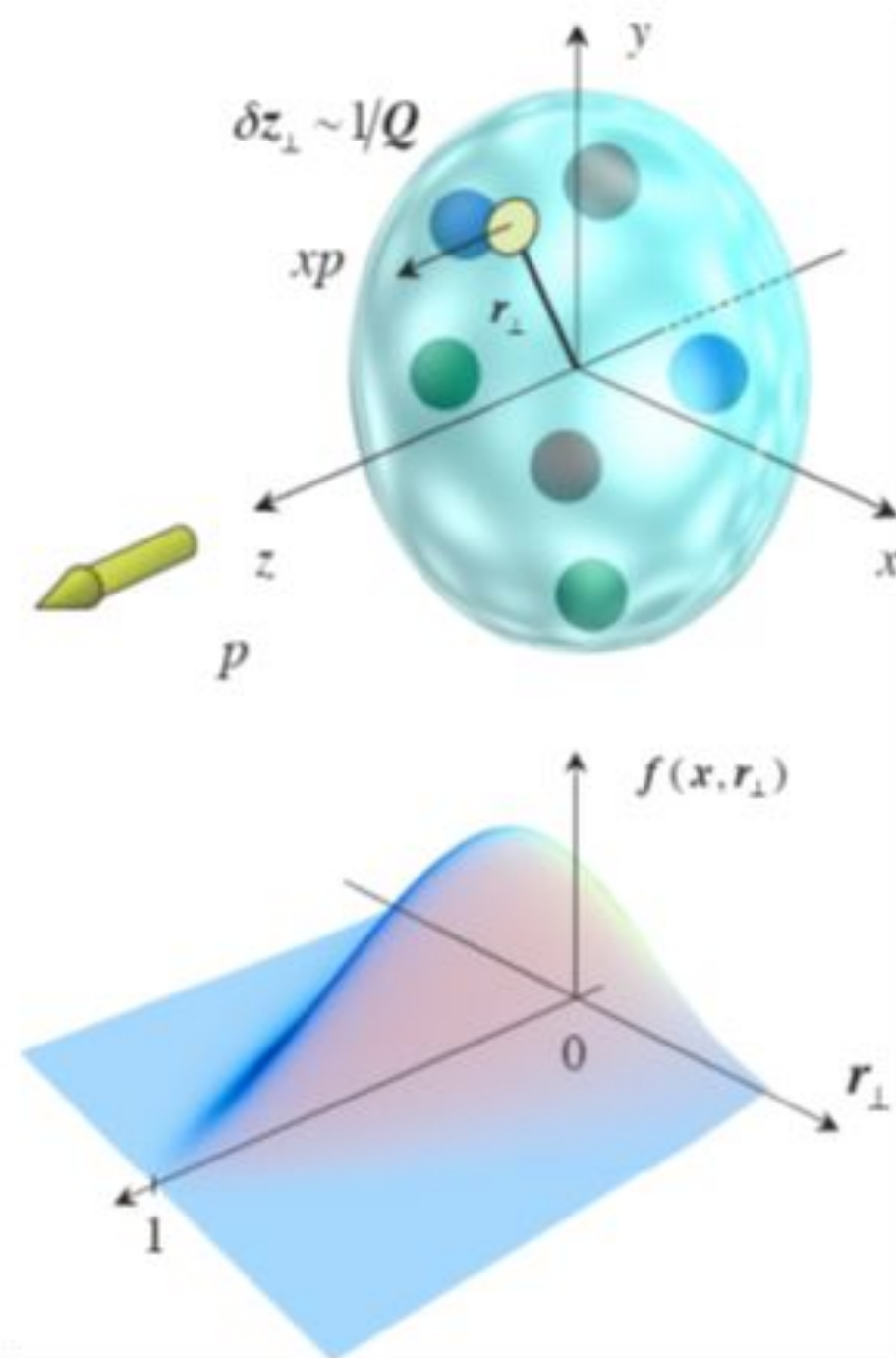
### Form factors:



Fourier transform of e.g. a radial charge distribution

June 20-24, 2011

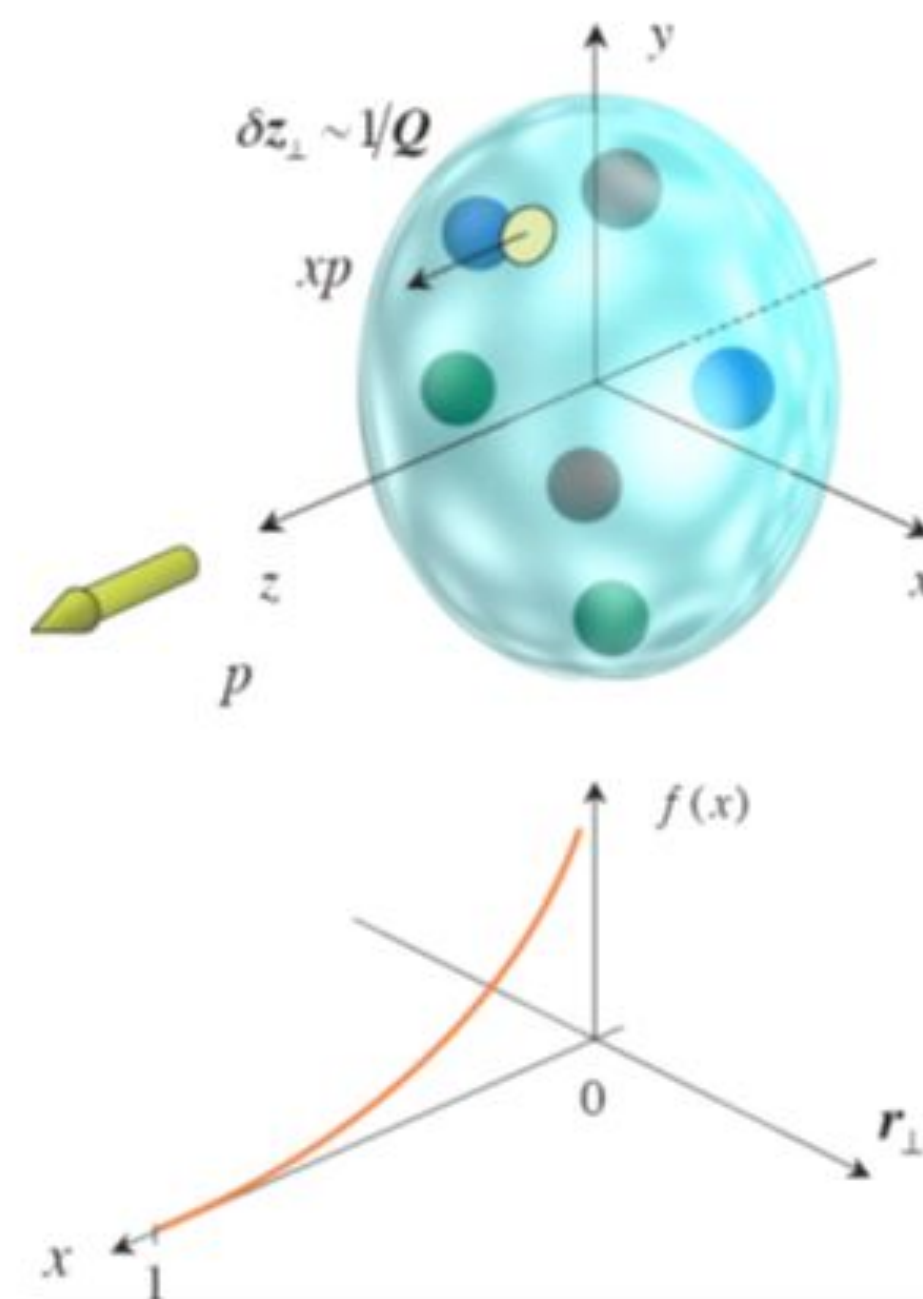
### GPDs:



Generalized description in 2+1 dimensions

SciSpin2011, Cairns, QLD, Australia

### Parton Distribution Functions:



Number density of quarks with longitudinal momentum fraction  $x$

16

Esiste una relazione (regola di somma di Ji) che lega le GPDs al momento angolare totale dei quark e gluoni!

I dati sulle GPDs potranno essere usati per stimare il contributo del momento ANGOLARE orbitale dei quark

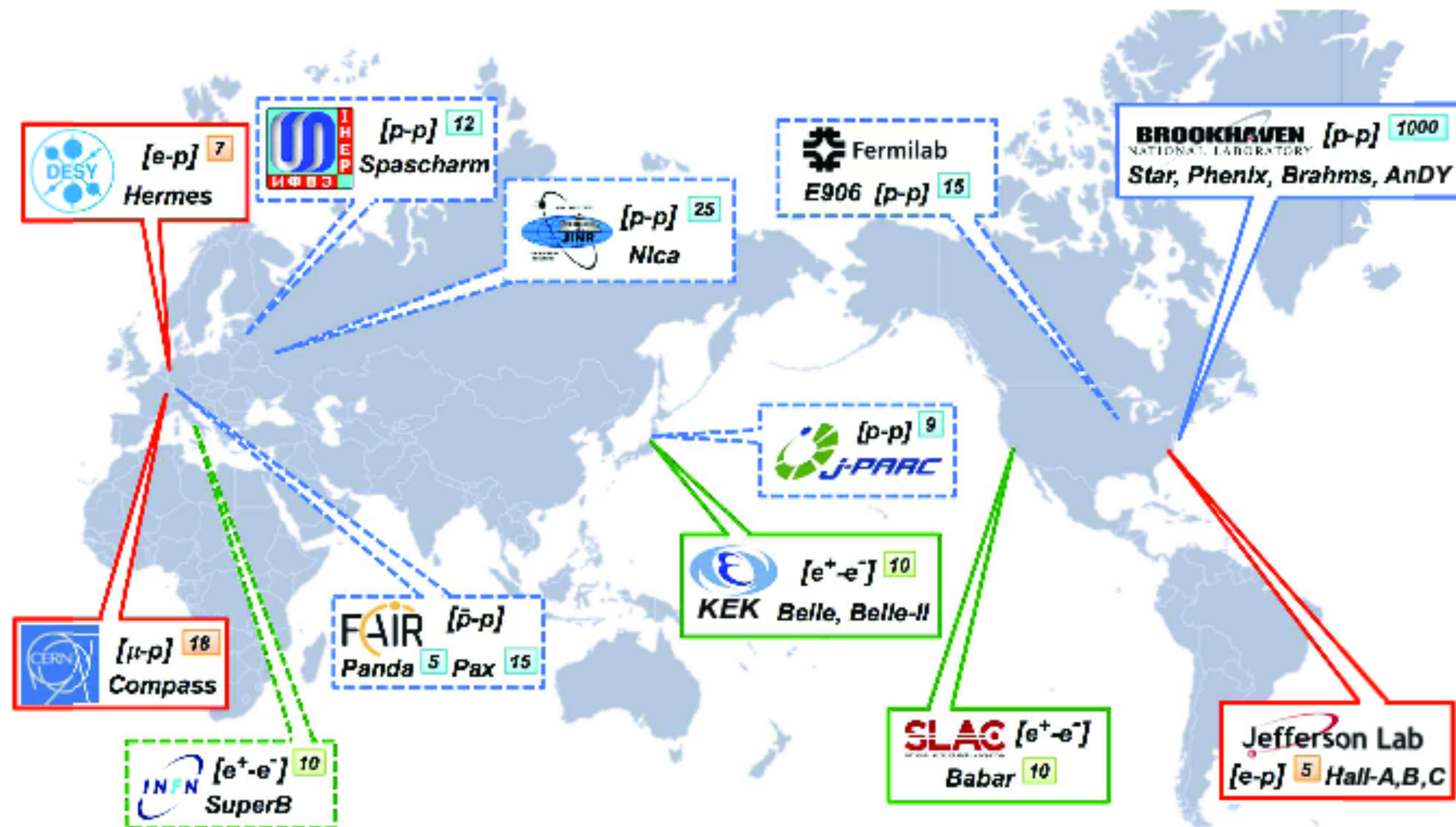


Possibile soluzione alla crisi dello SPIN del protone



# Nucleoni e Nuclei in 3D e dove trovarli

## Tanti esperimenti coinvolti





# Nucleoni e Nuclei in 3D e dove trovarli

Oggi NINPHA

## Chi lavora nel campo in Italia

### Teoria (AD31 e TO31)

Alessandria  
Cagliari  
Genova  
Milano Bic  
Pavia  
Perugia  
Roma I e II  
Torino  
Trento



### Esperimenti (Compass e JLab12)

Bari  
Catania  
Ferrara  
Frascati  
ISS  
Roma I e II  
Torino  
Trieste

**Compass:** esperimento  
al CERN

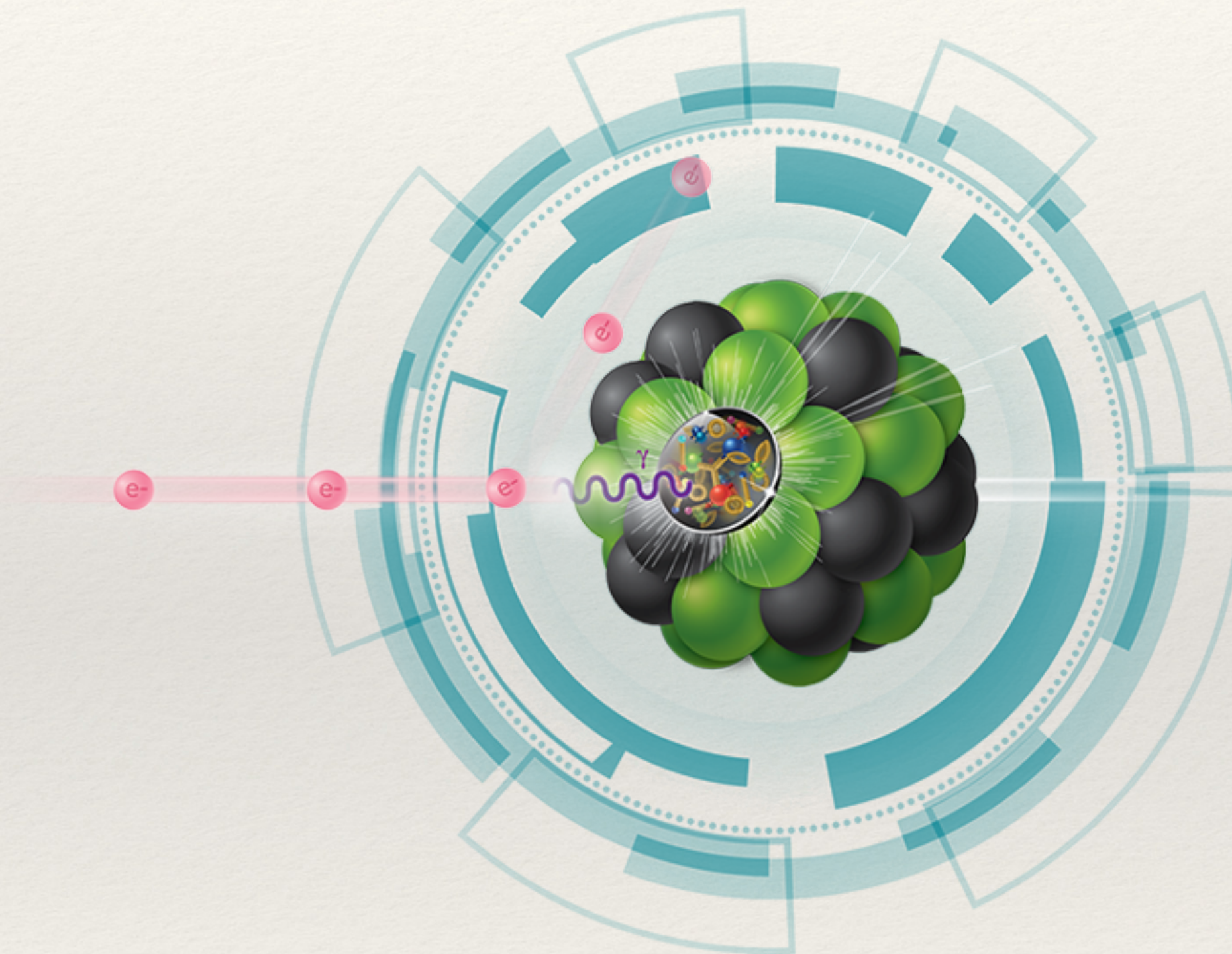
**JLab:** Jefferson Laboratory  
in Virginia (USA)



# Electron Ion Collider (EIC)

---

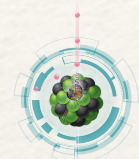
“A machine that will unlock the secrets of the strongest force in Nature”



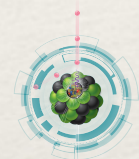


# Electron Ion Collider (EIC)

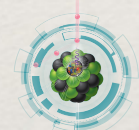
“A machine that will unlock the secrets of the strongest force in Nature”



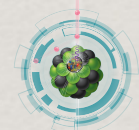
Nel prossimo decennio, l'unico acceleratore attivo negli USA sarà l' EIC. Servirà per capire la QCD nella sua anima non perturbativa: adronizzazione, confinamento... passi fondamentali per la ricerca di nuova Fisica!



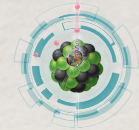
Oltre 2 miliardi di dollari di investimento



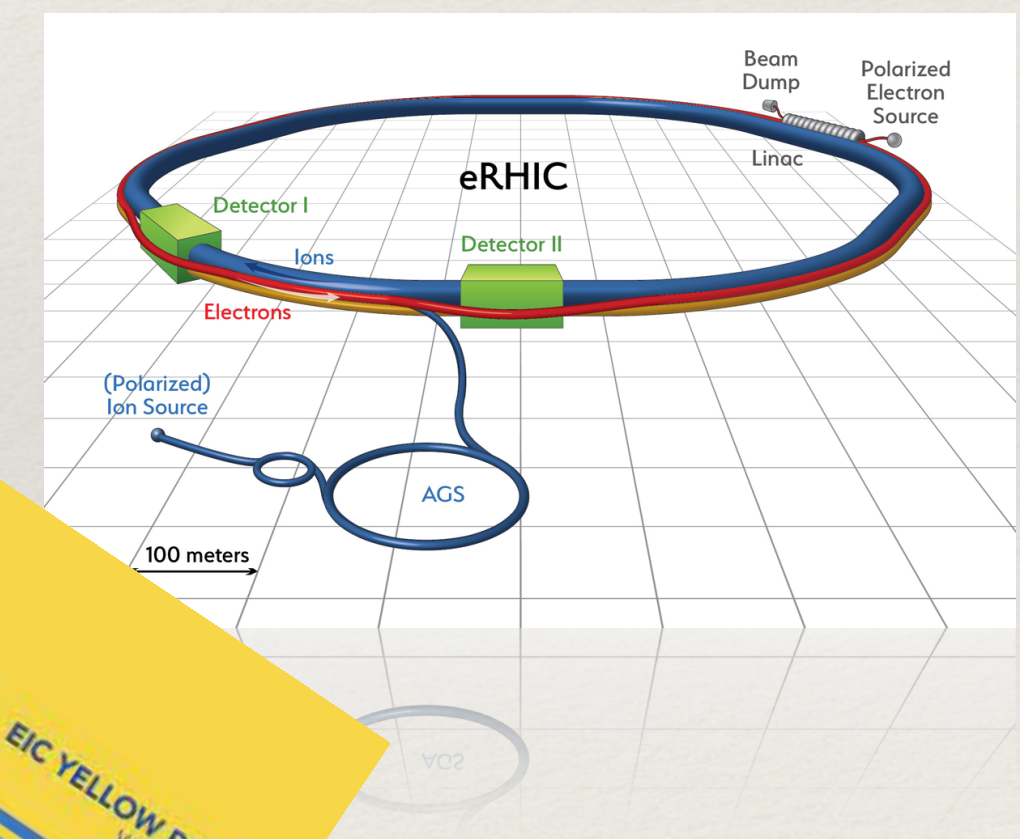
più di 1000 users, più di 200 istituzioni (anche PG, rappresentata da me, Sergio Scopetta)



La partecipazione italiana è la più consistente in Europa



L'EIC è il luogo naturale dove si faranno esperimenti che riguardano la linea di ricerca del gruppo teorico nucleare di Perugia. In quest'ultimo periodo sono aumentati notevolmente inviti e richieste di calcoli. È il momento per proporre misure. Il nostro gruppo è **AUTORE** dello “Yellow report” dove si raccolgono queste idee! DOBBIAMO CONTINUARE A LAVORARE IN QUESTA DIREZIONE e ci sono molti temi caldi da studiare!





# NINPHA

---

Il nostro gruppo appartiene all' Iniziativa specifica chiamata “NINPHA”, CS IV INFN:

Torino;  
Genova  
Perugia  
Pavia  
Cagliari



Progetto Europeo  
che ha ricevuto fondi da:  
“European Union’s Horizon 2020”

Valutazione INFN eccellente

Riguardo questi temi, a Perugia, lavoriamo **io** (Ricercatore INFN), **Sergio Scopetta** (professore associato), **Filippo Ferretti** (Ph.D), **Simone Pacetti** (professore associato), **Olga Shekhovtsova**, (assegnista)...



# Cosa facciamo a Perugia?

---

Il contributo di Perugia è divenuto negli anni un riferimento per la Fisica del DVCS su bersagli nucleari leggeri come:

- Elio-3 ( $^3\text{He}$ ) = 2 protoni + 1 Neutrone
- Elio-4 ( $^4\text{He}$ ) = 2 protoni + 2 Neutroni

Le funzioni d'onda da  
potenziali nucleari realistici  
sono



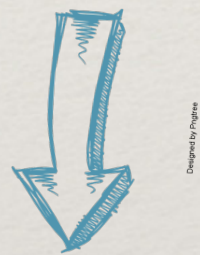
# Cosa facciamo a Perugia?

---

Il contributo di Perugia è divenuto negli anni un riferimento per la Fisica del DVCS su bersagli nucleari leggeri come:

- Elio-3 ( $^3\text{He}$ ) = 2 protoni + 1 Neutrone
- Elio-4 ( $^4\text{He}$ ) = 2 protoni + 2 Neutroni

Le funzioni d'onda da  
potenziali nucleari realistici  
sono



$^3\text{He}$  è fondamentale per accedere alle GPDs del  
**Neutrone** (particella instabile se libera)



I calcoli della collaborazione sono stati usati per interpretare i dati del DVCS su  
 $^4\text{He}$  sono usati per  
produrre previsioni utili per i nuovi ESPERIMENTI:

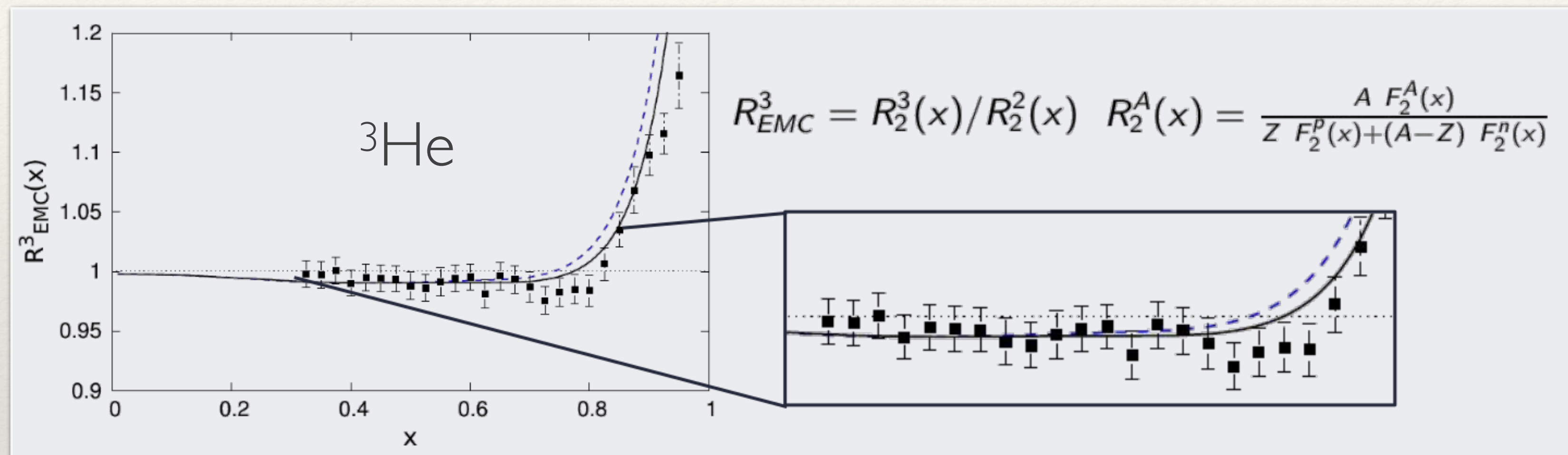
**TO-PEG**

The **O**rsay-**P**erugia  
Event **G**enerator



# Cosa facciamo a Perugia?

Primo calcolo completamente relativistico e Poincaré covariante dell' Effetto EMC  
con ingredienti nucleari convenzionali!

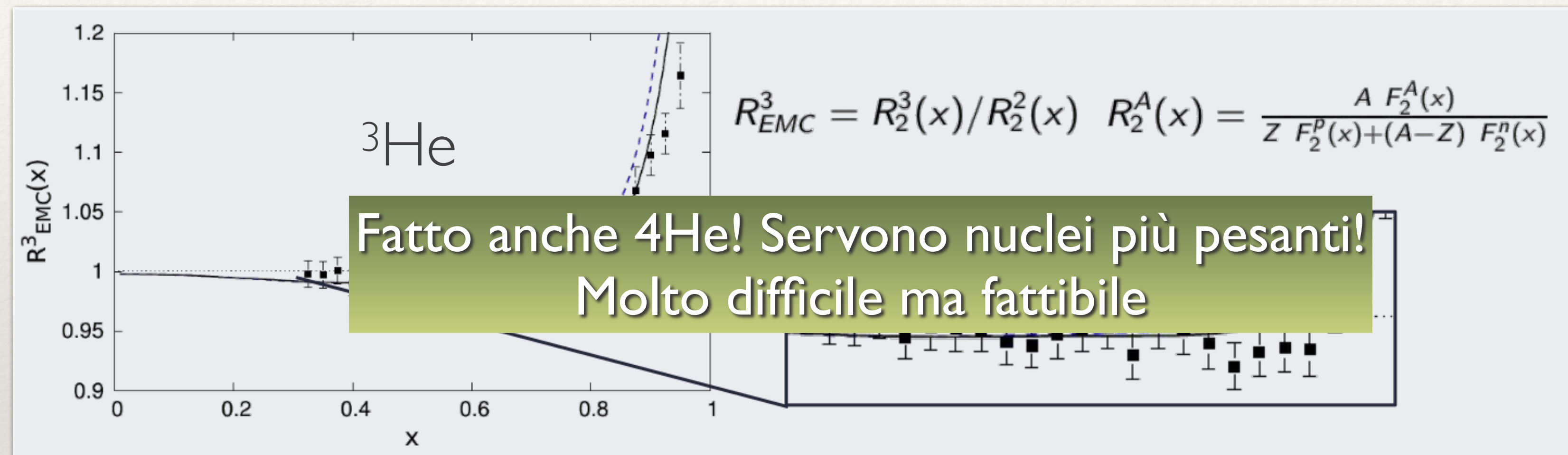


- 1) Risultato promettente
- 2) Risultato basilare per future inclusioni di effetti oltre la Fisica Nucleare convenzionale
- 3) Risultato importante per la Fisica del futuro EIC



# Cosa facciamo a Perugia?

Primo calcolo completamente relativistico e Poincaré covariante dell' Effetto EMC  
con ingredienti nucleari convenzionali!



- 1) Risultato promettente
- 2) Risultato basilare per future inclusioni di effetti oltre la Fisica Nucleare convenzionale
- 3) Risultato importante per la Fisica del futuro EIC



# Cosa facciamo a Perugia?

Le distribuzioni finora elencate (PDF e GPDs) sono quantità ad un corpo: “la probabilità di trovare un quark o un gluone nel protone con.....”

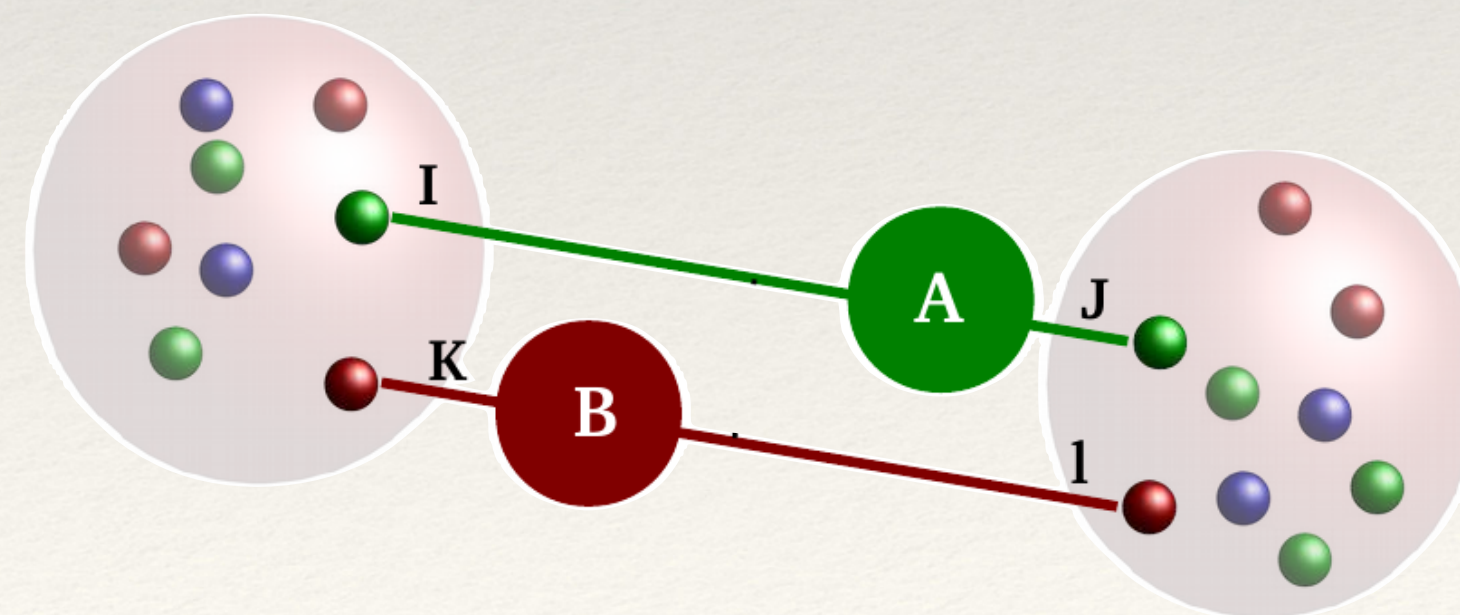
COME POSSIAMO CAPIRE SE DUE QUARK SONO CORRELATI TRA DI LORO?

Servono delle distribuzioni a due corpi, le “**double parton distributions**” (DPDs) che dipendono:

- 1) le frazioni di momenti longitudinali di due quark o gluoni
- 2) la distanza relativa sul piano trasverso alla collisione tra i due quark o gluoni (diversa dalla distanza di un quark o un gluoni rispetto al centro del protone)

Si potranno (SPERIAMO) misurare in processi di tipo “Double Parton Scattering”: due partoni (quark o gluoni) di un adrone che interagiscono con due partoni di un altro adrone. Il DPS è molto importante ad LHC anche per lo studio di Nuova Fisica!

Collaborazione con il gruppo di CMS di Perugia!





# Cosa facciamo a Perugia?

Le distribuzioni finora elencate (PDF e GPDs) sono quantità ad un corpo: “la probabilità di trovare un quark o un gluone nel protone con.....”

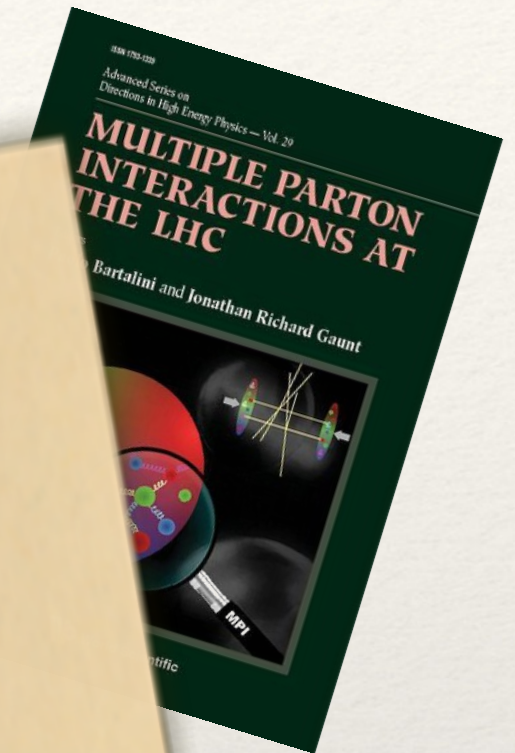
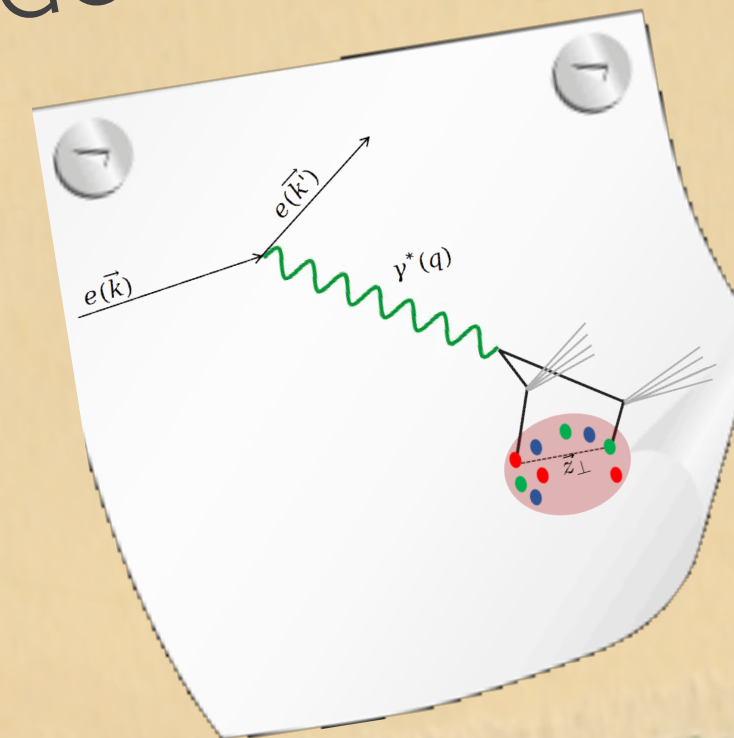
COME POSSIAMO CAPIRE SE DUE QUARK SONO CORRELATI TRA DI LORO?

Servono delle distribuzioni a due corpi, le “**double parton distributi**”

- 1) le frazioni di momenti longitudinali
- 2) la distanza relativa sul piano trasverso rispetto al centro del protone)

Si potranno (SPERIAMO) misurare in processi con due partoni di un altro adrone. Il DPS è in Collaborazione con il gruppo di CMS di Perugia

Stiamo:  
1) proponendo il DPS ad EIC  
2) studiando il DPS su nuclei leggeri (effetto EMC double!)



un gluoni

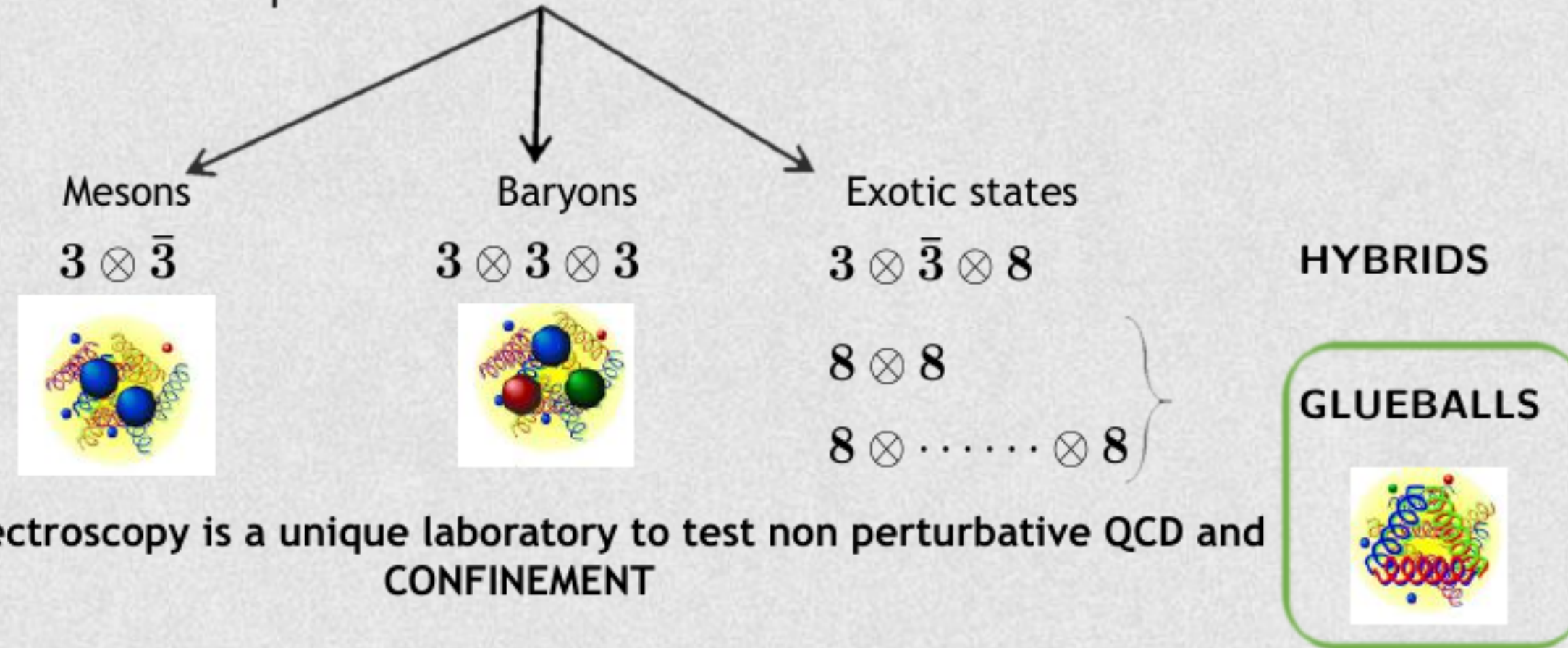
one che interagiscono



# Cosa facciamo a Perugia?

Cromo dinamica Quantistica in una riga!

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4}\text{Tr}G_{\mu\nu}G^{\mu\nu} + \sum \bar{\Psi}(i\gamma \cdot D - m)\Psi \quad G_{\mu\nu}^a = \partial_\mu A_\nu^a - \partial_\nu A_\mu^a + gf_{abc}A_\mu^b A_\nu^c$$



Glueball spectroscopy is a unique laboratory to test non perturbative QCD and CONFINEMENT

However :

- 1) several mesons have similar mass and quantum number → MIXING
- 2) Their measurements represent a very hard task
- 3) Theoretical calculations of decay are very difficult! Models could help!

Why Glueballs?

Mesoni:  
particelle composte  
da quark+ anti-quark

Barioni:  
protoni, neutroni...



# Cosa facciamo a Perugia?

## 3 Glueballs in AdS/QCD: The Soft-Wall II

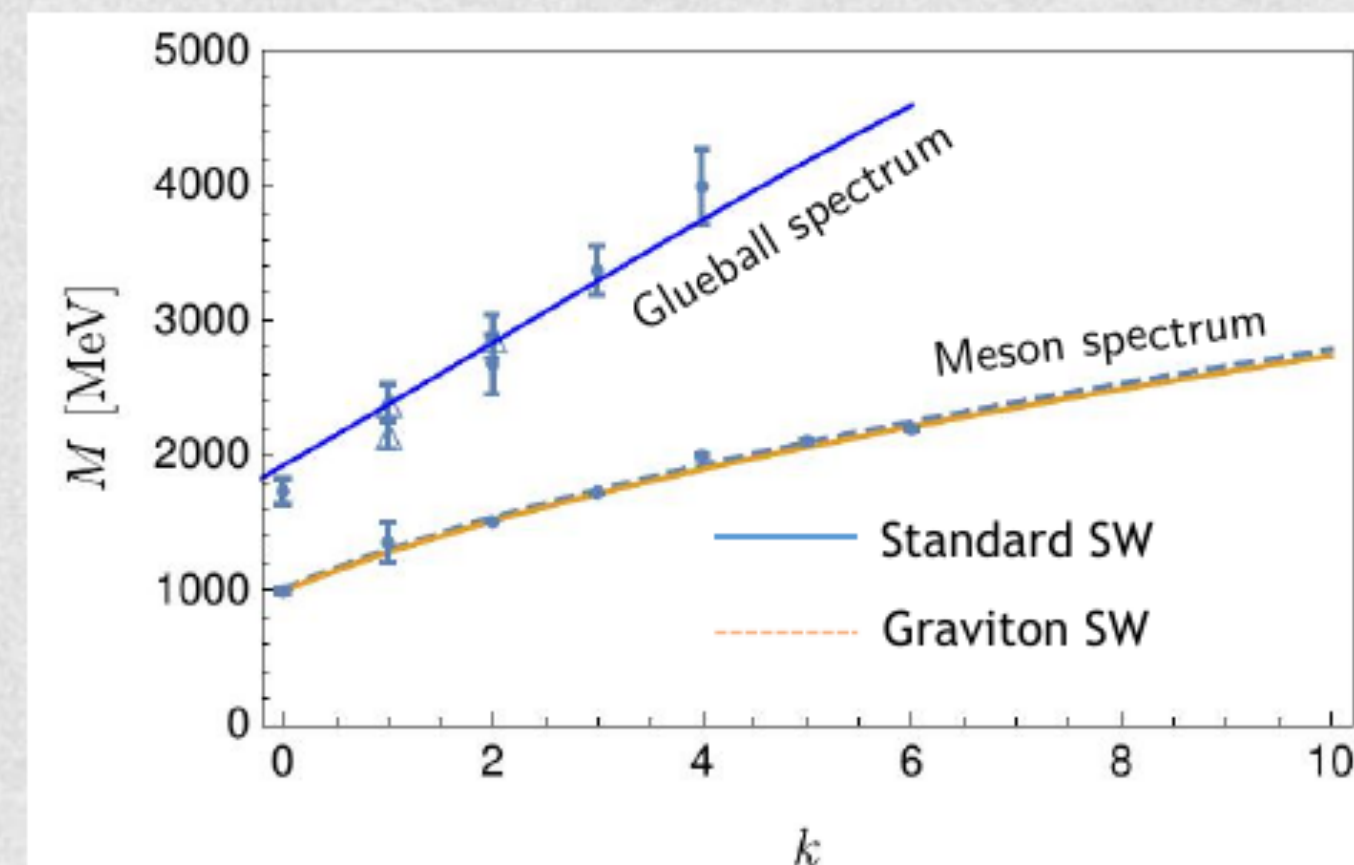
In this case we have the following  $AdS_5$  metric :  $\tilde{g}_{MN}dx^Mdx^N = e^{-\alpha\varphi(z)} \frac{R^2}{z^2} (dz^2 + \eta_{\mu\nu}dx^\mu dx^\nu)$

In M.Rinaldi and V. Vento EPJA 54 (2018) we consider  $\alpha\kappa^2$  as the only one parameter!

GRAVITON EoM and SPECTRUM

$$-\frac{1}{2}\tilde{h}_{ab;c}^c - \frac{1}{2}\tilde{h}_{c;ab}^c + \frac{1}{2}\tilde{h}_{ac;b}^c + \frac{1}{2}\tilde{h}_{bc;a}^c + 4\tilde{h}_{ab} = 0$$

Also in this case we have a good description of data, but now (w.r.t. the HW model):  
**we have a complete description of the meson and glueball spectra**



Mesoni:  
particelle composte  
da quark+ anti-quark

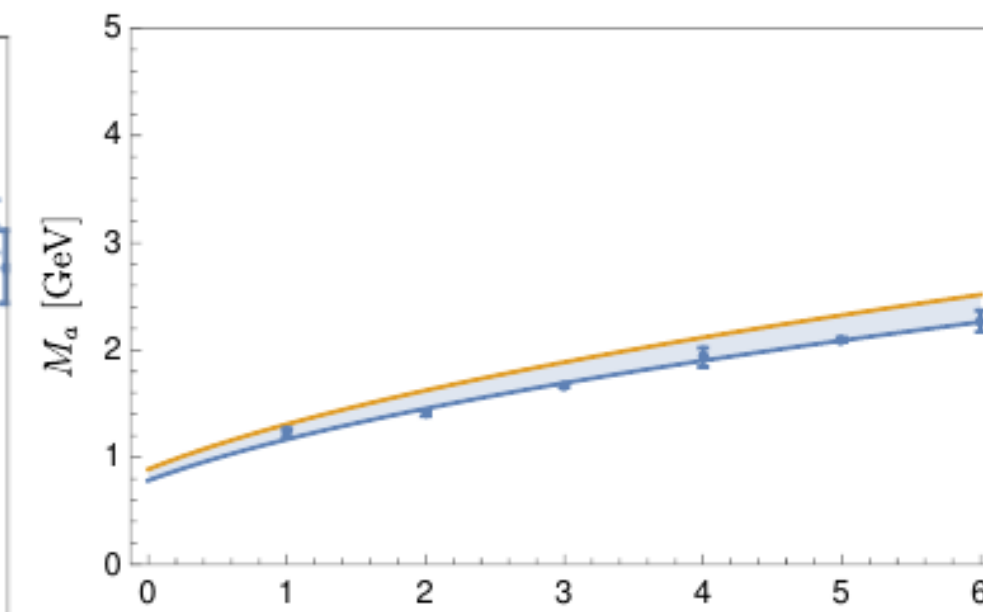
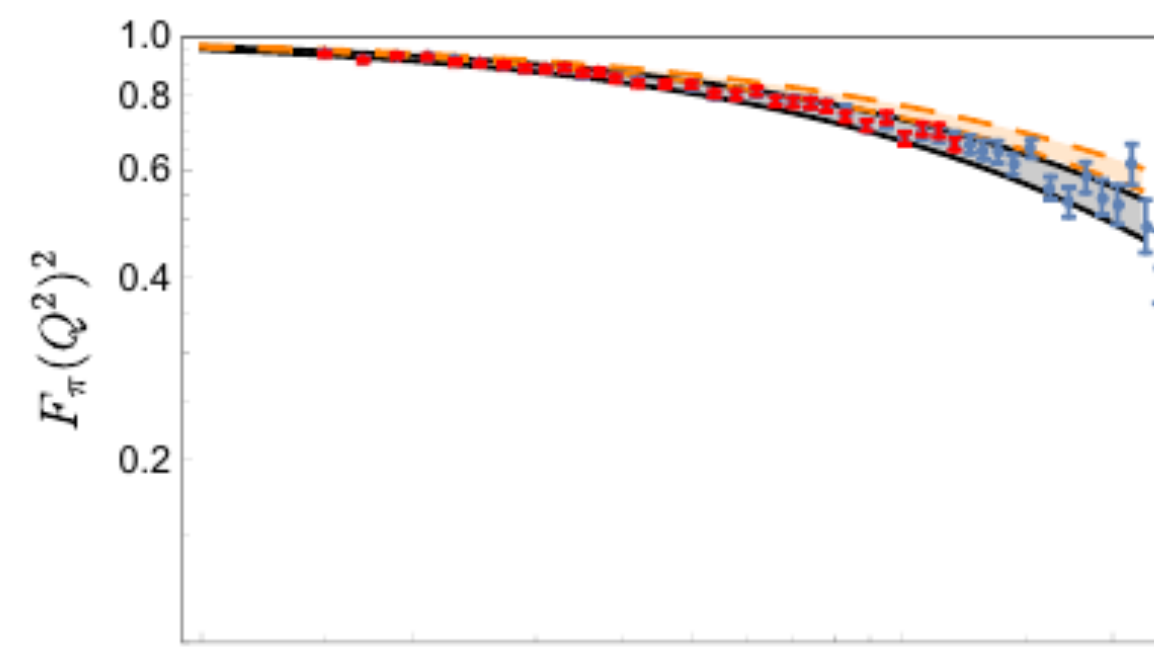
Barioni:  
protoni, neutroni...



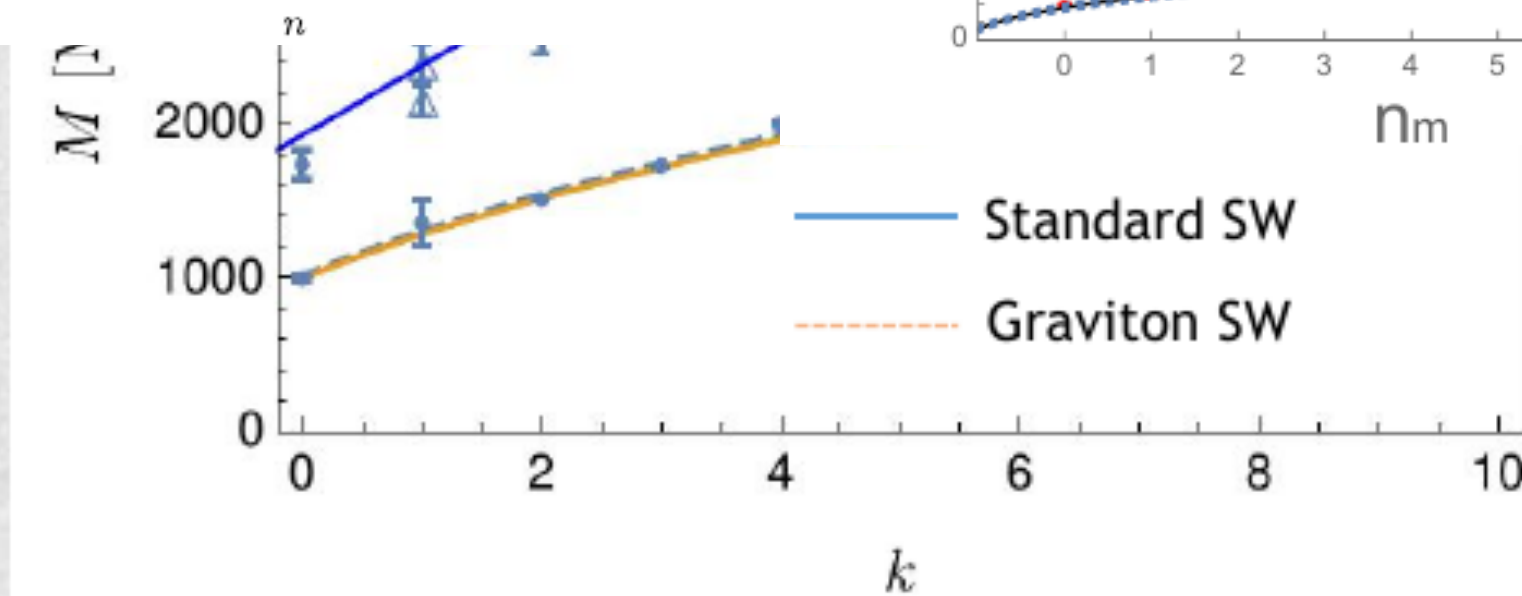
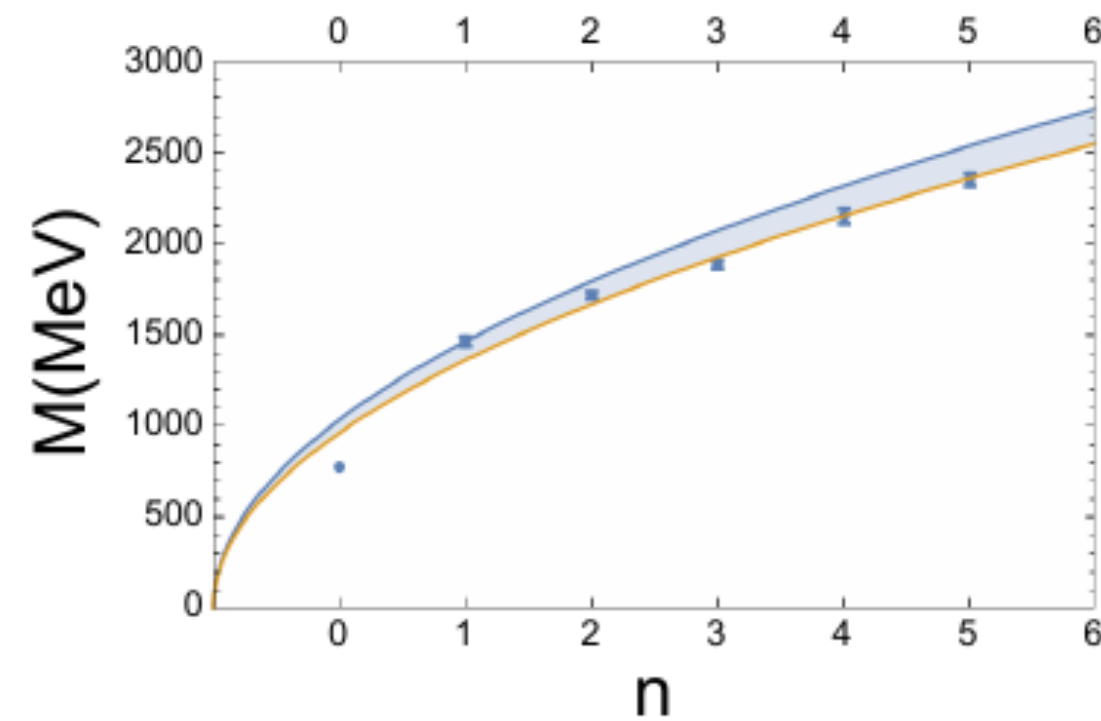
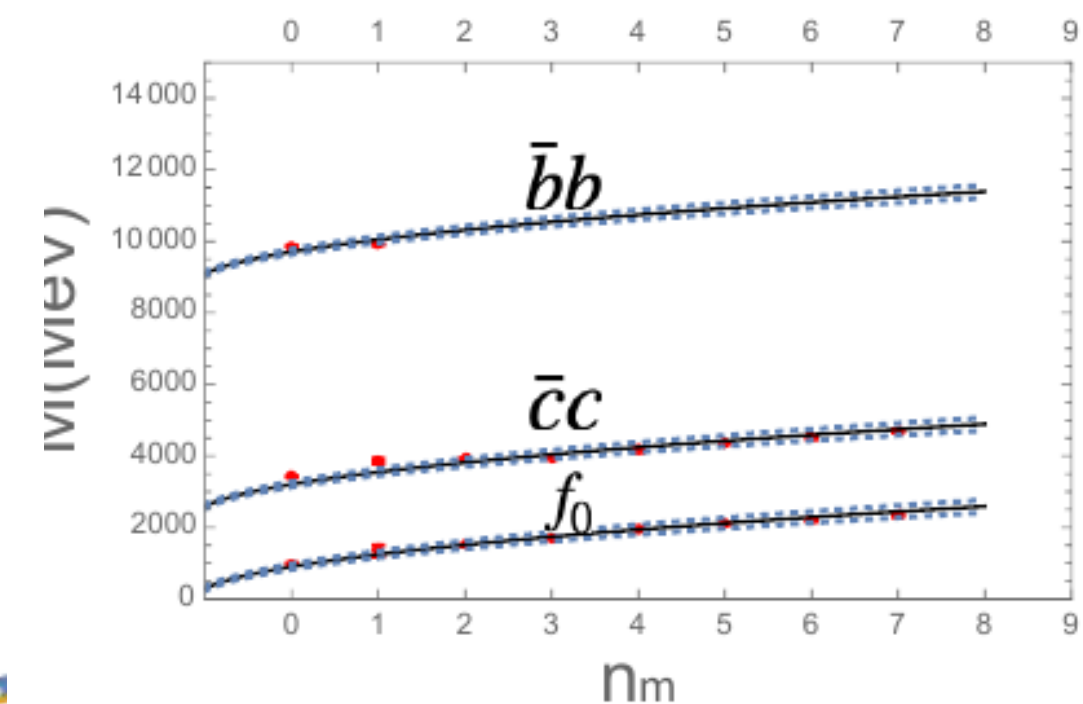
# Cosa facciamo a Perugia?

## 3 Glueballs in AdS/QCD: The Soft-Wall II

In this case we have the following  $AdS_5$  metric :  $\tilde{g}_{MN}dx^Mdx^N = e^{-\alpha\varphi(z)} \frac{R^2}{z^2} (dz^2 + \eta_{\mu\nu}dx^\mu dx^\nu)$



one parameter!



Matteo Rinaldi

53 / 62

Mesoni:  
particelle composte  
da quark+ anti-quark

Barioni:  
protoni, neutroni...



# Non siamo soli

---

Collegi con i quali abbiamo collaborato e ancora collaboriamo:

**Roma:** Giovanni Salmè, Emanuele Pace e A. Del Dotto

**Valencia** (Spagna): Santiago Noguera & Vicente Vento

**Dubna** (Russia): Leonid Kaptari

**Mexico:** Aurore Courtoy

**Orsay** Parigi (Francia): Raphael Duprè; Samuel Wallon; J. P. Lansberg; F.A. Ceccopieri

**Trento:** Marco Claudio Traini, F. Pederiva, Alessandro Roggero, Alex Gnech

**Trieste:** Daniele Treleani

**Mainz** (Germania): Tomas Kasemets

**Pisa:** Michele Viviani

**Argonne NL, Chicago** (USA): Kawtar Hafidi e Whitney Armstrong

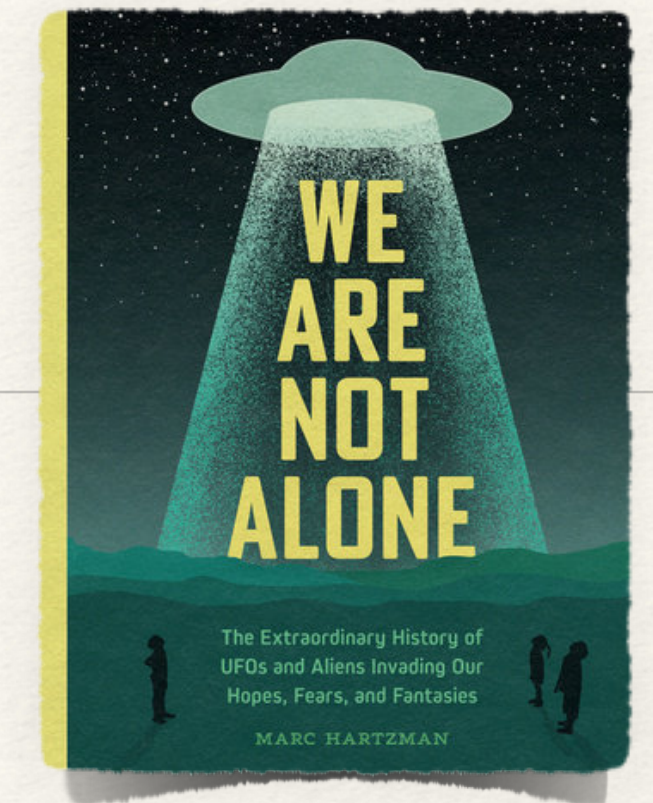
**Buenos Aires** (Argentina): Daniel Gomez Dumm e Norberto Scoccola

**Varsavia** (Polonia): Lech Szimanowsky

**Penn State Univeristy** (USA): Mark Strikman

**San Pietroburgo** (Russia): Vadim Guzey

**SAO PAULO** (Brasile): Tobias Frederico





# Tesi

---



## **Quali argomenti?**

Struttura partonica di adroni e nuclei leggeri

**Obiettivo: Interpretazione dati/proposte nuove misure.**

## **Quanto dura?**

6 mesi (a tempo pieno), da regolamento

## **Cosa devo sapere?**

QM, RQM, QFT elementare. In aggiunta si studierà un pò di fenomenologia e tecniche di calcolo (1-2 mesi)

## **Cosa farò?**

Calcoli analitici e numerici di osservabili (3-4 mesi). Poi c'è da scrivere (1-2 mesi)

## **Con chi lavorerò?**

Con me (Matteo Rinaldi), Filippo Fornetti e coll.



# Tesi: alcuni argomenti

---

Proponiamo alcuni argomenti il cui obiettivo è lo studio della struttura partonica di mesoni, nucleoni e nuclei. Faremo riferimento alla nuova generazione di esperimenti di scattering ad alta energia presso il CERN, JLab (USA), FAIR (Germania) e EIC (USA):

STRUTTURA 3D DEL NUCLEONE LEGATO DA ESPERIMENTI SU NUCLEI DI  $^2\text{H}$ ,  $^3\text{He}$  e  $^4\text{He}$  (DVCS, DIS...)

(collaborazione con Pisa, Roma 1 e 2, JLab (USA), Parigi (Francia), Dubna (Russia), Varsavia (Polonia), Penn state university (USA).....)

CALCOLO DELLE DISTIBUZIONI PARTONICHE MULTIPLE MISURATE AD LHC E PROPOSTA DI MISURA PER L'EIC (bersagli nucleari e nucleonici)

(collaborazione con Orsay (Francia))

CALCOLI DI OSSERVABILI SPERIMENTALI CON MODELLI OLOGRAFICI (Soft-wall AdS/QCD), PER STUDIARE MESONI, NUCLEONI E GLUEBALLS

(collaborazione con Valencia (Spagna))



# Tesi: pubblicazioni

M.Rinaldi

F. Fratini

S. Fucini

G. Perna

F. Fornetti

E. Proietti

PHYSICAL REVIEW C **85**, 062201(R) (2012)

Neutron orbital structure from generalized parton distributions of  $^3\text{He}$

M. Rinaldi<sup>\*</sup> and S. Scopetta<sup>†</sup>

Dipartimento di Fisica, Università degli Studi di Perugia, and Istituto Nazionale di Fisica Nucleare Sezione di Perugia, via A. Pascoli 06100 Perugia, Italy

(Received 16 April 2012; published 27 June 2012)

PHYSICAL REVIEW D **78**, 034002 (2008)

Quark model analysis of the Sivers function

A. Courtoy,<sup>1</sup> F. Fratini,<sup>2</sup> S. Scopetta,<sup>2,3,\*</sup> and V. Vento<sup>1,4</sup>

<sup>1</sup>Departament de Física Teòrica, Universitat de València and Institut de Física Corpuscular, Consejo Superior de Investigaciones Científicas 46100 Burjassot (València), Spain

<sup>2</sup>Dipartimento di Fisica, Università degli Studi di Perugia, via A. Pascoli 06100 Perugia, Italy

<sup>3</sup>INFN, sezione di Perugia, via A. Pascoli 06100 Perugia, Italy

<sup>4</sup>TH-Division, PH Department, CERN, CH-1211 GENEVA 23, Switzerland

(Received 28 January 2008; revised 12 February 2008; published 12 March 2008)

The generalization of the Sivers function to the case of the neutron is studied within the framework of the constituent quark model. The Sivers effect is found to be consistent with a sizable Sivers effect for the proton, but with a sign opposite. This pattern is in agreement with the experimental data. The parameter dependent generalized parton distributions are obtained to a large extent. We estimate the QCD evolution of the Sivers function and compare it with the experimental one and obtain reasonable agreement.

PHYSICAL REVIEW C **98**, 015203 (2018)

Coherent deeply virtual Compton scattering off  $^4\text{He}$

Sara Fucini,<sup>1</sup> Sergio Scopetta,<sup>1</sup> and Michele Viviani<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Dipartimento di Fisica e Geologia, Università degli Studi di Perugia, and INFN, Sezione di Perugia, via A. Pascoli, I-06123 Perugia, Italy

<sup>2</sup>INFN-Pisa, 56127 Pisa, Italy

(Received 18 May 2018; published 12 July 2018)

Coherent deeply virtual Compton scattering off the  $^4\text{He}$  nucleus is studied in impulse approximation. A generalized parton distribution (GPD) is derived in terms of the  $^4\text{He}$  one-body GPD of the struck nucleon. A model of the nuclear nondiagonal spectral function corresponding to the Argonne 18 nucleon-nucleon interaction, in impulse approximation results are reproduced, in proper limits, for the nucleon distributions. The nuclear generalized parton distribution and the Compton tensor ingredient, a well-known generalized parton distribution model. An analysis of the data recently published by the E06 experiment at the Jefferson Laboratory is addressed and will be necessary for the expected improved measurements at JLab with the 12-GeV electron beam and high luminosity.

PHYSICAL REVIEW C **110**, L031303 (2024)

Letter

$^3\text{He}$  spin-dependent structure functions within the relativistic light-front Hamiltonian dynamics

Eleonora Proietti<sup>ⓧ,1</sup>, Filippo Fornetti<sup>ⓧ,1</sup>, Emanuele Pace<sup>ⓧ,2</sup>, Matteo Rinaldi<sup>ⓧ,3,\*</sup>, Giovanni Salmè<sup>ⓧ,4</sup>, and Sergio Scopetta<sup>ⓧ,1,†</sup>

<sup>1</sup>Dipartimento di Fisica e Geologia, Università degli Studi di Perugia, INFN Sezione di Perugia, Via A. Pascoli, 06123 Perugia, Italy

<sup>2</sup>Università di Roma Tor Vergata, Via della Ricerca Scientifica 1, 00133 Rome, Italy

<sup>3</sup>Istituto Nazionale di Fisica Nucleare Sezione di Perugia, Via A. Pascoli, 06123 Perugia, Italy

<sup>4</sup>Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Roma, Piazzale A. Moro 2, 00185 Rome, Italy

(Received 19 March 2024; accepted 20 June 2024; published 24 September 2024)

Contents lists available at ScienceDirect

ELSEVIER

Physics Letters B

journal homepage: [www.elsevier.com/locate/physletb](http://www.elsevier.com/locate/physletb)

Letter

The EMC effect for few-nucleon bound systems in light-front Hamiltonian dynamics

Filippo Fornetti<sup>a</sup>, Emanuele Pace<sup>b</sup>, Matteo Rinaldi<sup>a,ⓧ,\*</sup>, Giovanni Salmè<sup>c</sup>, Sergio Scopetta<sup>a,1</sup>, Michele Viviani<sup>d</sup>

<sup>a</sup>Dipartimento di Fisica e Geologia, Università degli Studi di Perugia and Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Perugia, via A. Pascoli, I - 06123 Perugia, Italy

<sup>b</sup>Università di Roma "Tor Vergata", Via della Ricerca Scientifica 1, 00133 Rome, Italy

<sup>c</sup>Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Roma, Piazzale A. Moro 2, 00185 Rome, Italy

<sup>d</sup>Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Pisa, Lungarno Pacinotti 43, 56127 Pisa, Italy



**GRAZIE PER L'ATENZIONE!!**

