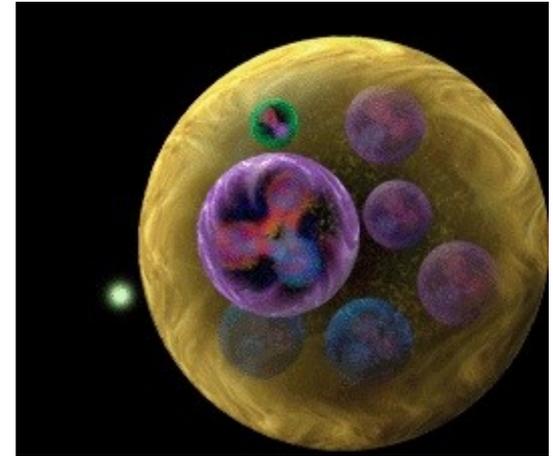


# FISICA NUCLEARE ED ADRONICA A PERUGIA

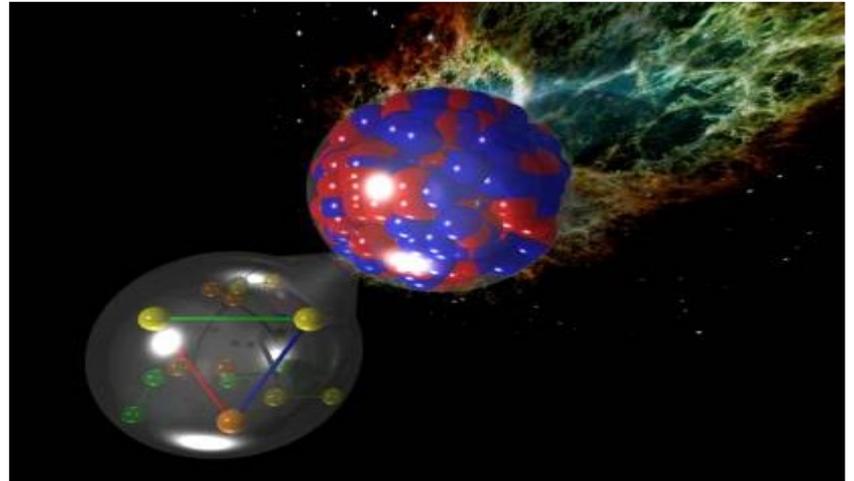
Matteo Rinaldi - Sergio Scopetta

Perugia, Dipartimento di Fisica e Geologia  
24/03/2023



# INDICE

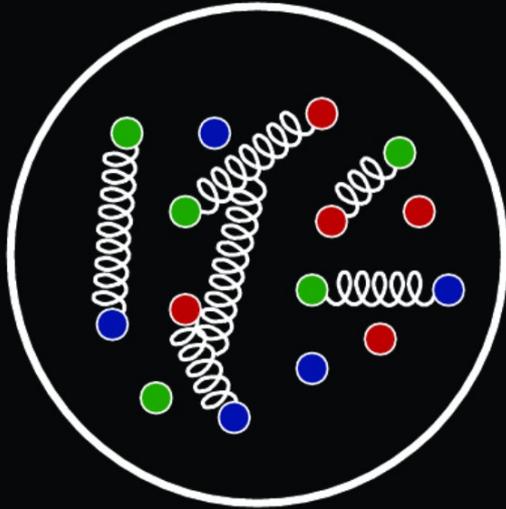
- La struttura 3D partonica (quark e gluoni legati dall'**interazione forte**) di adroni e nuclei: come la studiamo nel mondo, in Italia, a Perugia
- Una tesi magistrale in Fisica nucleare teorica: Cosa vuol dire?
- Argomenti di tesi



# PROTONI E NEUTRONI IN 3D

2

Obiettivo a lungo termine:  
Capire la QCD e il confinamento



A. Bacchetta/INFN12

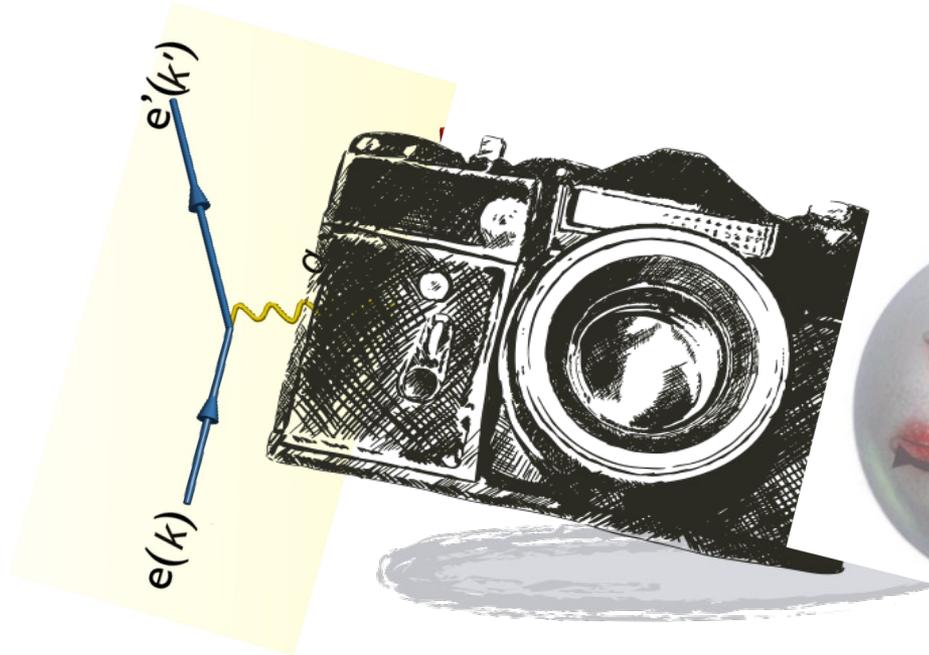
1ay, 13 November 12

- ※ Massa di protoni & neutroni (nucleoni)  
QCD -> **98% della massa dei nucleoni**  
Higgs mechanism -> piccolo contributo
- ※ SPIN
- ※ Come cambia la struttura quando protoni e neutroni sono legati per formare i nuclei?

# PROTONI E NEUTRONI IN 3D

3

IL NOSTRO APPROCCIO:



Ottenere delle  
immagini della  
struttura di protoni  
e neutroni!



# PROTONI E NEUTRONI IN 3D

Consideriamo la diffusione profondamente anelastica (DIS):  
 $A(e, e')X$ , se il bersaglio  $A$  ha spin  $J_A = 1/2$ , nel sistema  
 del laboratorio (LAB) allora  $q = (\nu, 0, 0, -q)$ , Nel limite di Bjorken,  
 $Q^2 \rightarrow \infty = -q^2$ ,  $\nu$ , allora il rapporto  $Q^2 / \nu$  finito

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

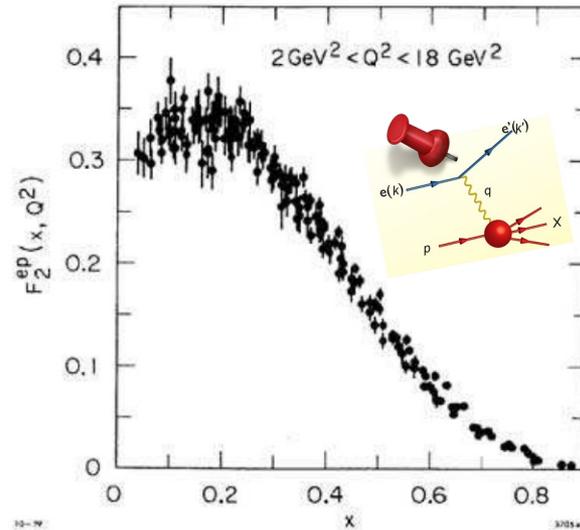
$F_2(x)$  = funzione di struttura

$f_q(x)$  = 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

Consideriamo la diffusione profondamente anelastica (DIS):  
 $A(e, e')X$ , se il bersaglio  $A$  ha spin  $J_A = 1/2$ , nel sistema  
 del laboratorio (LAB) allora  $q = (\nu, 0, 0, -q)$ , Nel limite di Bjorken,  
 $Q^2 \rightarrow \infty = -q^2$ ,  $\nu$ , allora il rapporto  $Q^2 / \nu$  finito

$$\frac{1}{d\Omega}$$

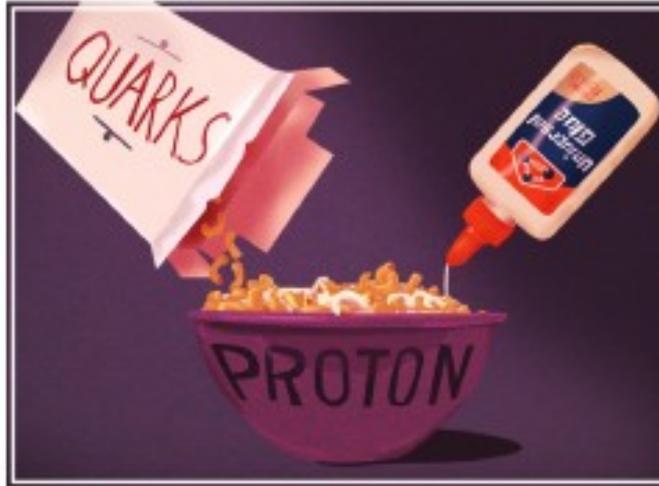
$F_2(x) = \text{fun}$

$f_q(x) = \text{dist}$

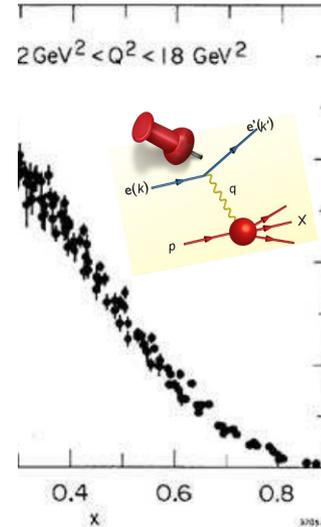
$$x = \frac{Q^2}{2P_A \cdot q}$$

  $x = \frac{1}{2}$

  $x = \text{fr.}$   
portati

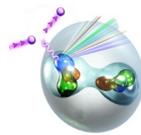


Momentum Frame (IMF) ( $p_z \rightarrow \infty$ )



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  $F_2$ ).

# EFFETTO EMC



5

Consideriamo un processo DIS su un nucleo A (EMC coll., CERN 1983) e studiamo il rapporto tra le sezioni d'urto per un nucleone legato in un nucleo e per un nucleone libero. Si vide:



Se il rapporto fosse 1, allora il nucleone libero e legato sarebbero UGUALI.

 Il rapporto...non è 1

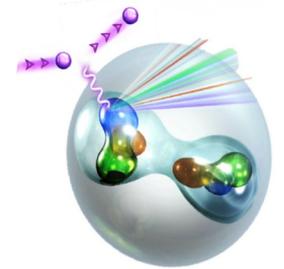
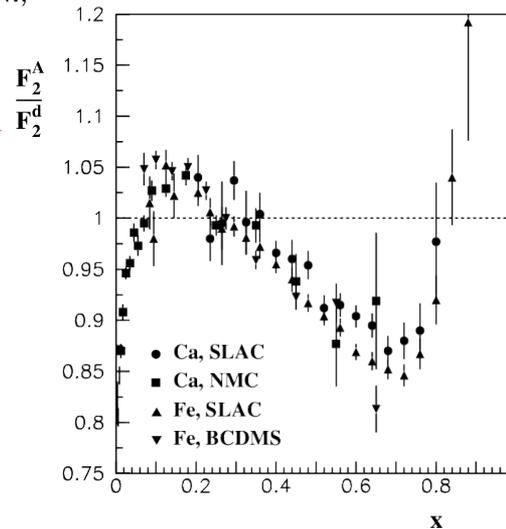
Dopo tanti anni ancora non sappiamo perché.



Abbiamo tante ipotesi e per avere una risposta chiara servono nuovi esperimenti, NON inclusivi!



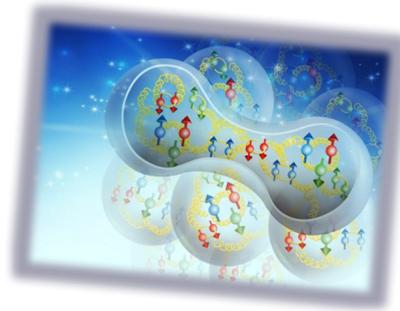
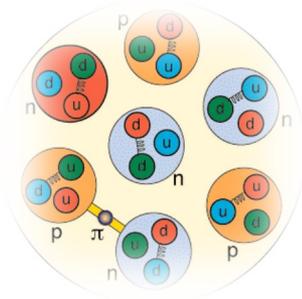
Misure più difficili e descrizioni teoriche più complesse



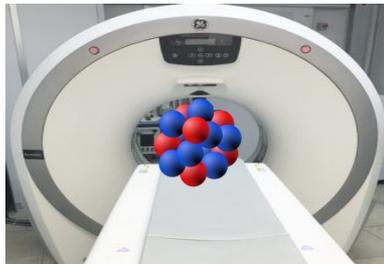
# EFFETTO EMC: come ne usciamo?

6

Per rispondere al problema dell'effetto EMC, dobbiamo arrivare, essenzialmente, a capire a quale dei due spaccati i nuclei assomigliano:



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

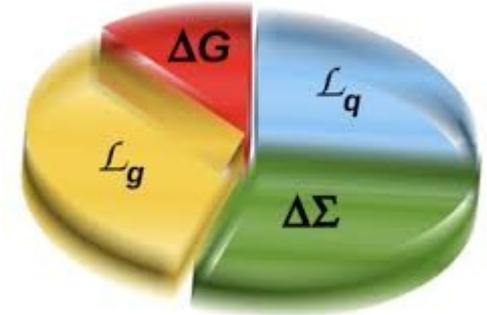


7

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 MOMENTI ANGOLARI DELLE PARTICELLE CHE LO COMPONGONO!

■ Gluon Spin    ■ Gluon angular momentum  
■ Quark Spin    ■ Quark Angular Momentum



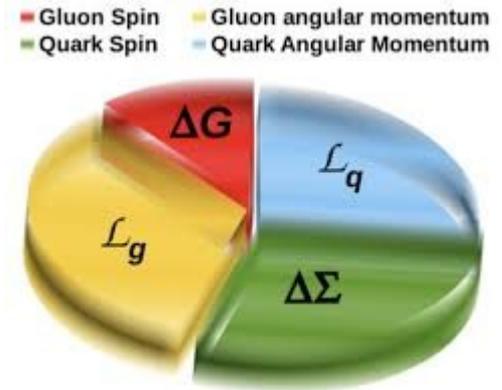
# LA CRISI DELLO SPIN



7

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 MOMENTI ANGOLARI DELLE PARTICELLE CHE LO COMPONGONO!



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

# LA CRISI DELLO SPIN

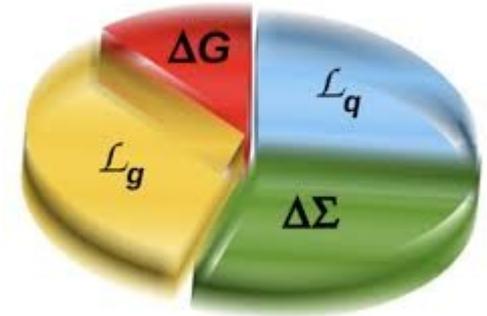


7

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 MOMENTI ANGOLARI DELLE PARTICELLE CHE LO COMPONGONO!

■ Gluon Spin    ■ Gluon angular momentum  
■ Quark Spin    ■ Quark Angular Momentum



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

Risulta essere circa il 30% dello SPIN del protone!!

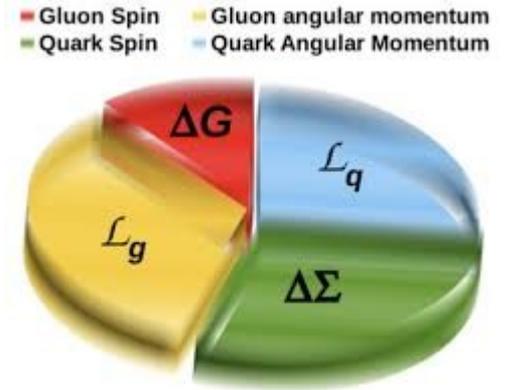


# LA CRISI DELLO SPIN



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 MOMENTI ANGOLARI DELLE PARTICELLE CHE LO COMPONGONO!



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

MOMENTO ANGOLARE ORBITALE DI UN QUARK

# LA CRISI DELLO SPIN



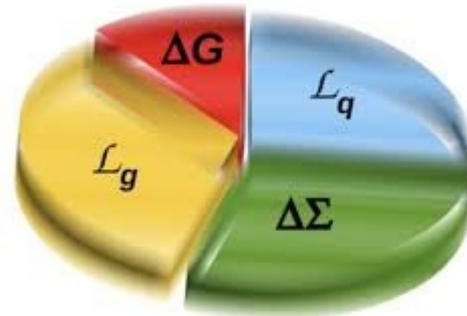
7

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 MOMENTI ANGOLARI DELLE PARTICELLE CHE LO COMPONGONO!

■ Gluon Spin    ■ Gluon angular momentum  
■ Quark Spin    ■ Quark Angular Momentum

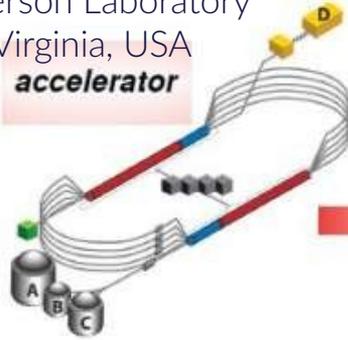


Accessibile anche questo da processi esclusivi come il DEEPLY VIRTUAL COMPTON SCATTERING

# Deeply Virtual Compton Scattering

8

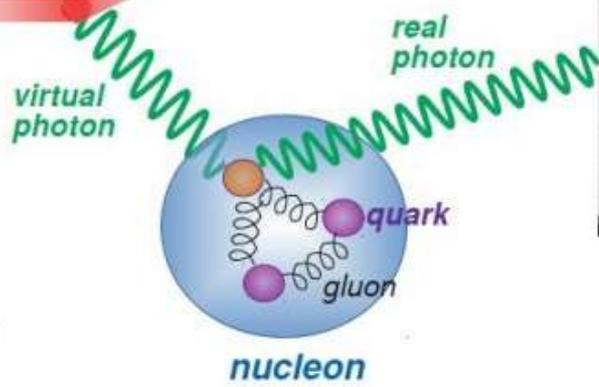
Jefferson Laboratory  
Virginia, USA  
**accelerator**



**detector**

Deeply Virtual  
Compton Scattering

(DVCS)



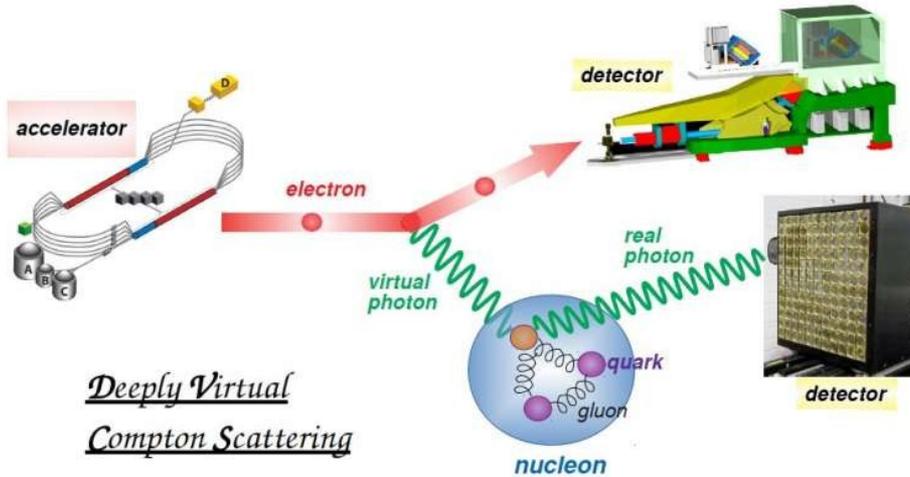
**nucleon**



**detector**

# Deeply Virtual Compton Scattering

8



La sezione d'urto dipende (in modo complicato) da nuove distribuzioni chiamate:

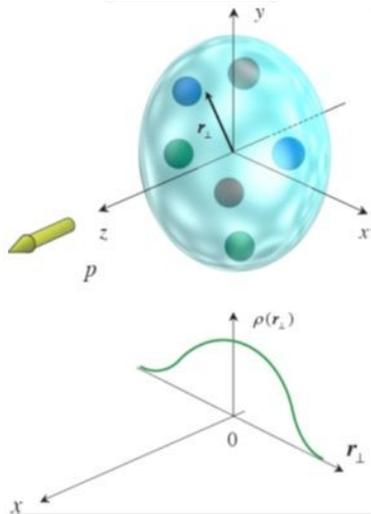
**DISTRIBUZIONI PARTONICHE GENERALIZZATE (GPDs)**

# Deeply Virtual Compton Scattering

9

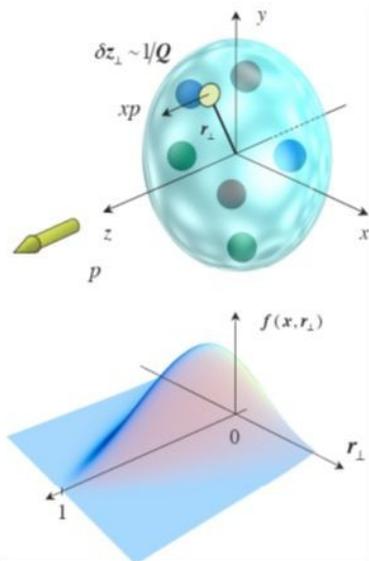
Tool: Generalised Parton Distributions

## Form factors:

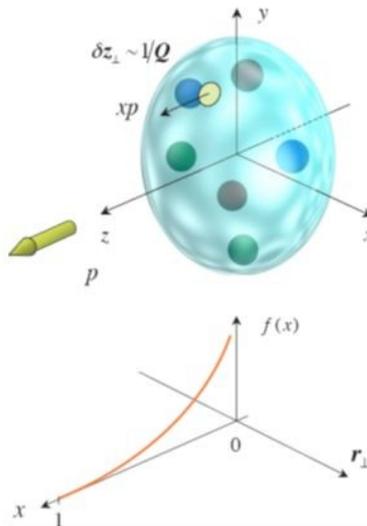


Fourier transform of e.g. a radial charge distribution

## GPDs:



## Parton Distribution Functions:



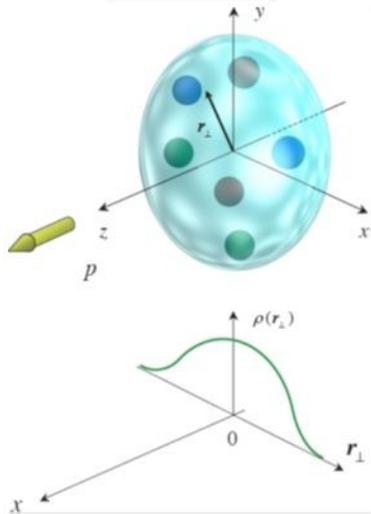
Number density of quarks with longitudinal momentum fraction  $x$

# Deeply Virtual Compton Scattering

9

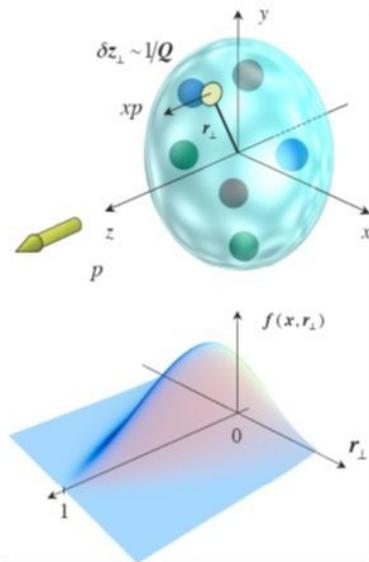
Tool: Generalised Parton Distributions

Form factors:

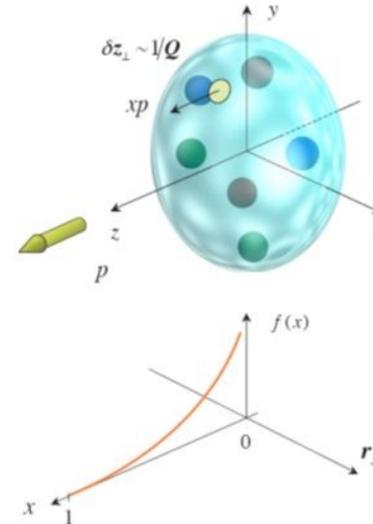


Fourier transform of e.g. a radial charge distribution

GPDs:



Parton Distribution Functions:



Number density of quarks with longitudinal momentum fraction  $x$

Dalle GPDs è possibile ottenere una **TOMOGRAFIA** del bersaglio considerato (nuclei o nucleoni liberi)



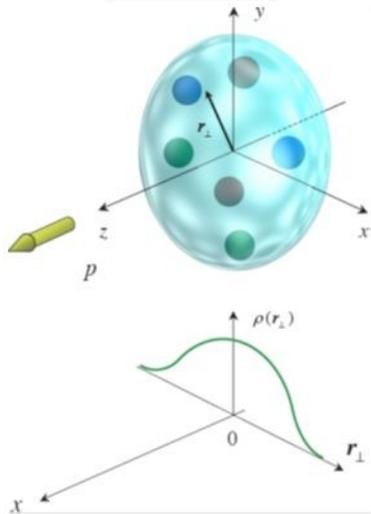
Informazione fondamentale per comprendere l'effetto EMC nucleare

# Deeply Virtual Compton Scattering

9

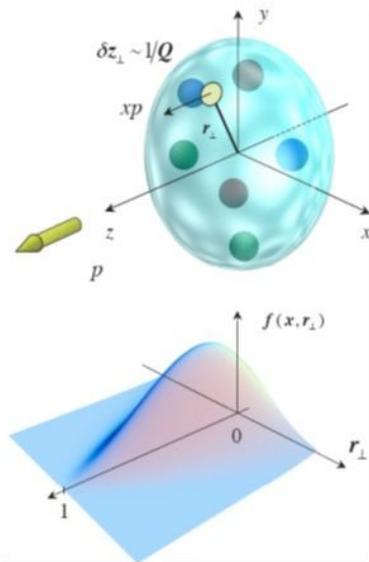
Tool: Generalised Parton Distributions

Form factors:

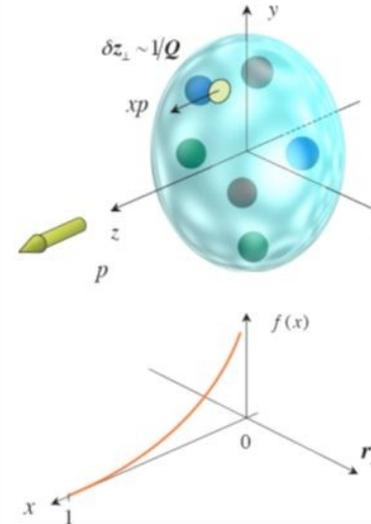


Fourier transform of e.g. a radial charge distribution

GPDs:



Parton Distribution Functions:



Number density of quarks with longitudinal momentum fraction  $x$

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

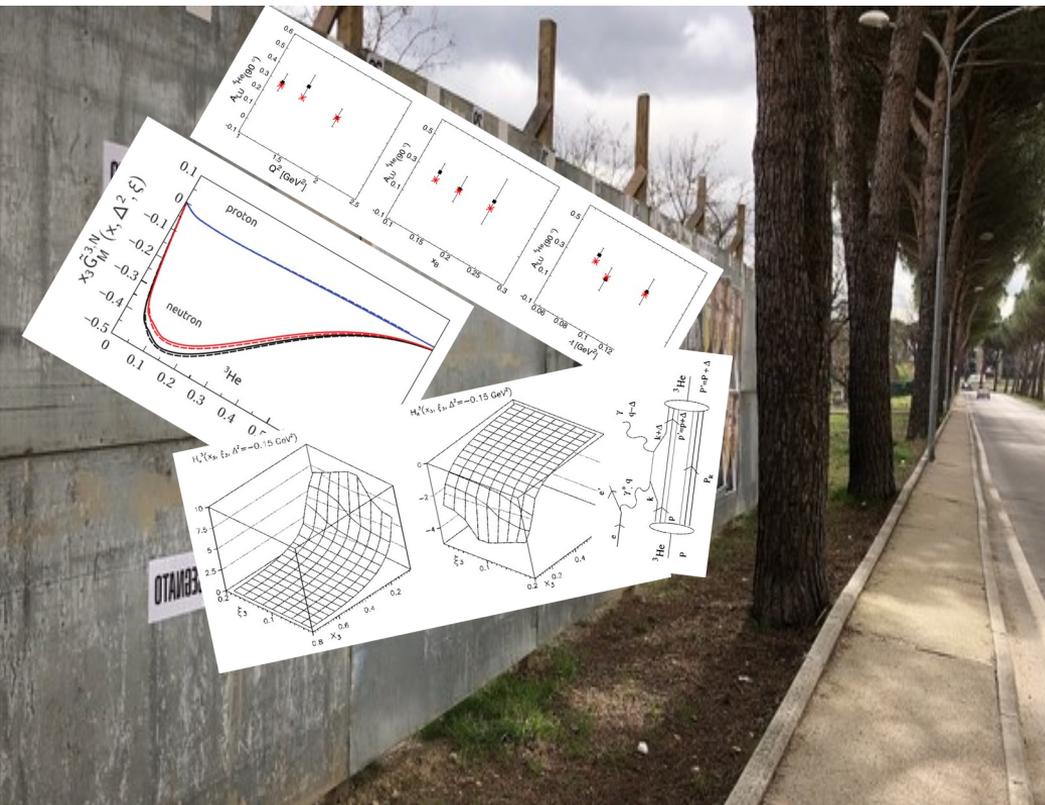


Possibile soluzione alla crisi dello SPIN del protone



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



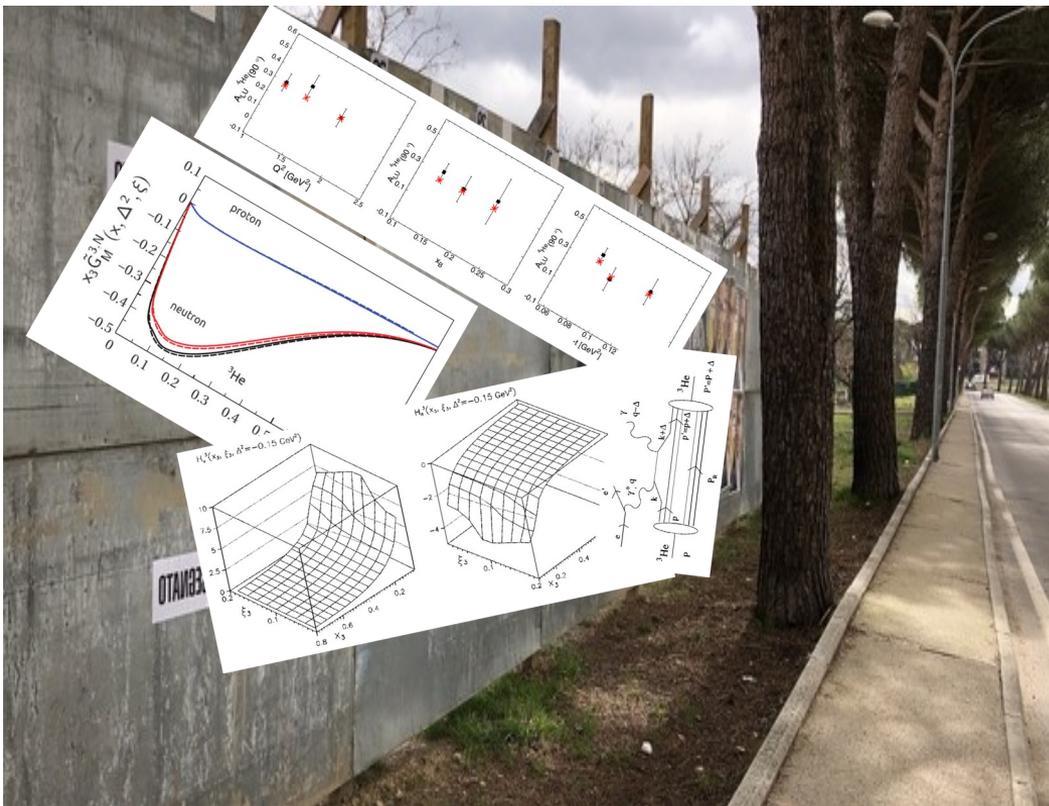
Il contributo di Perugia è divenuto negli anni un riferimento per la Fisica del DVCS su bersagli **nucleari leggeri** come:

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



Le funzioni d'onda da potenziali nucleari realistici sono calcolabili! Sappiamo quindi derivare in modo realistico le relative GPDs tenendo conto degli effetti nucleari convenzionali! Per nuclei più pesanti questa accuratezza non è possibile





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

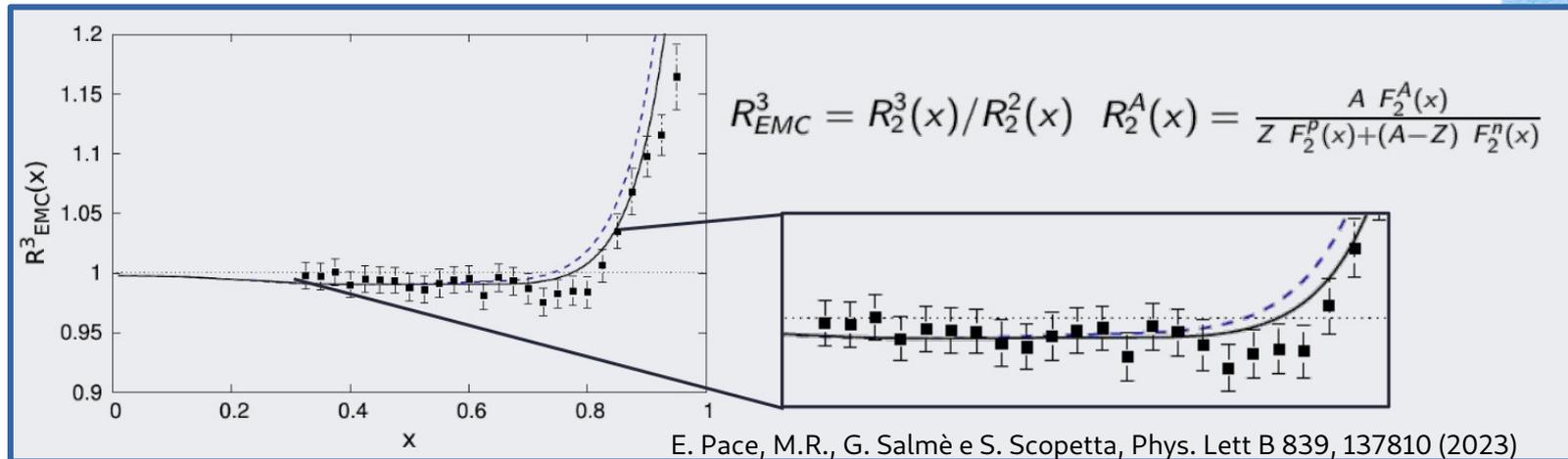


I calcoli della collaborazione sono stati usati per interpretare i dati del DVCS su  $^4\text{He}$  sono usati per produrre previsioni utili per i nuovi ESPERIMENTI:

**TO-PEG**

The Orsay-Perugia  
Event Generator

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

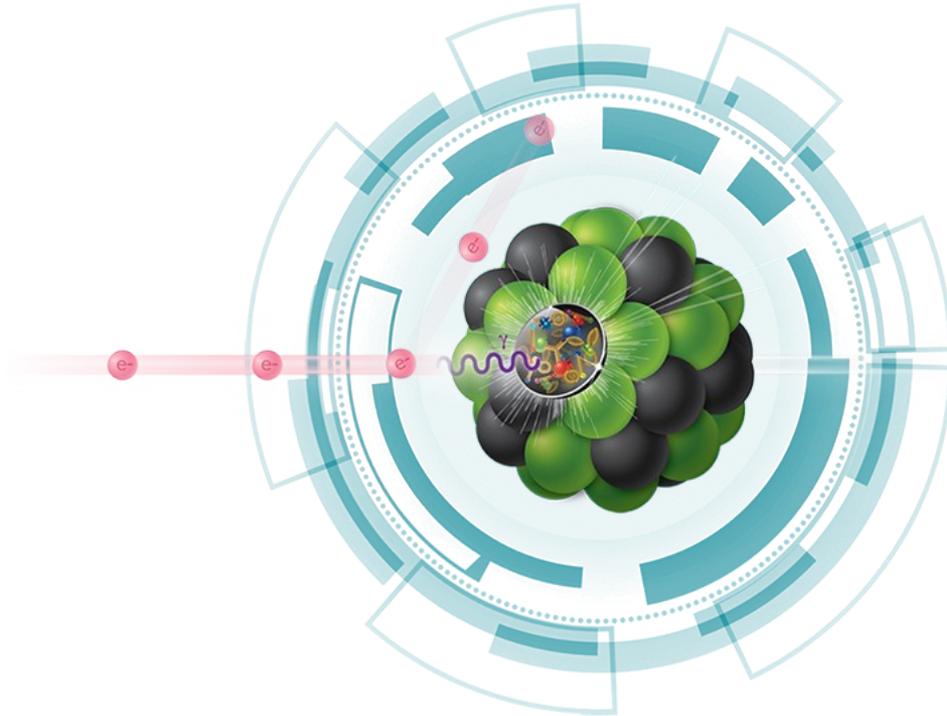


- 1) Risultato promettente → applicazione a  $^4\text{He}$  coming soon... Nuclei più pesanti?
- 2) Risultato basilare per future inclusioni di effetti oltre la Fisica Nucleare convenzionale
- 3) Risultato importante per la Fisica del futuro EIC

# Electron Ion Collider (EIC)

11

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



# Electron Ion Collider (EIC)

12

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



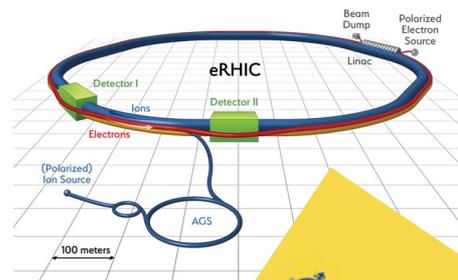
Nel prossimo decennio, l'unico acceleratore attivo negli USA sarà l' EIC. Servirà per capire la QCD nella sua anima non perturbativa: adronizzazione, confinamento... passi fondamentali per la ricerca di nuova Fisica!

Oltre 2 miliardi di dollari di investimento

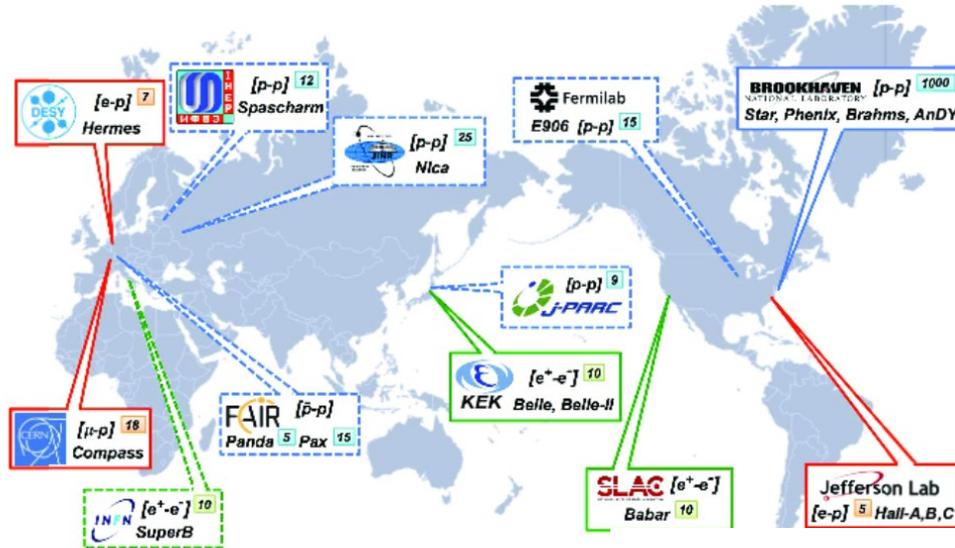
più di 1000 users, più di 200 istituzioni (anche PG, rappresentata da me, Sergio Scopetta)

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!



## Tanti esperimenti coinvolti



*si veda il talk di Marco Mirazita*

## Chi lavora nel campo in Italia

### Teoria

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

# NINPHA

15

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

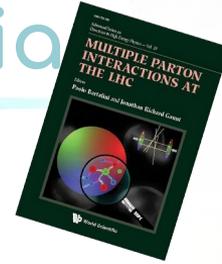
-  Torino;
-  Genova
-  Perugia
-  Pavia
-  Cagliari



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) e **Olga Shekhovtsova**, (assegnista).



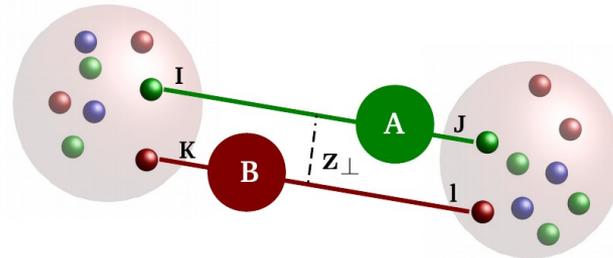
Le distribuzioni finora elencate (PDF e GPDs) sono quantità ad un corpo:  
“la probabilità di trovare **un** quark o **un** gluone nel protone con.....”

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

Servono delle distribuzioni a due corpi, le “double parton distribution functions” (dPDFs) 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 gluon 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!





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 LEGATI TRA DI LORO?

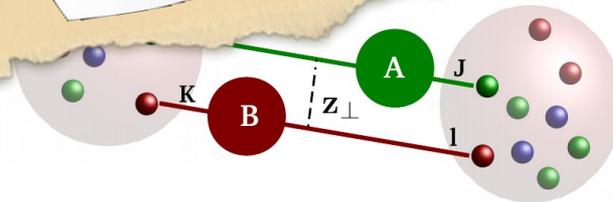
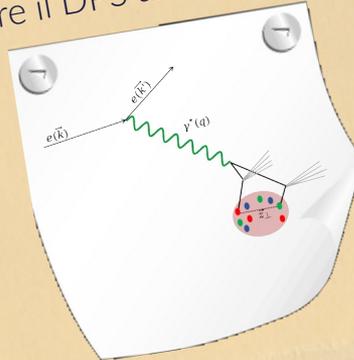
Servono delle distribuzioni a due corpi (PDFs e GPDs) che dipendono:

1) le frazioni

2) la distanza  
di un quark

Si potranno (SPERIAMO) m  
che interagiscono con due

L'Università di Perugia ha finanziato un  
progetto per studiare se sarà possibile  
osservare il DPS all' EIC!



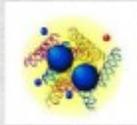
Cromo dinamica Quantistica in una riga!

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4} \text{Tr} G_{\mu\nu} G^{\mu\nu} + \sum \bar{\Psi} (i\gamma \cdot D - m) \Psi$$

$$G_{\mu\nu}^a = \partial_\mu A_\nu^a - \partial_\nu A_\mu^a + g f_{abc} A_\mu^b A_\nu^c$$

Mesons

$$3 \otimes \bar{3}$$



Baryons

$$3 \otimes 3 \otimes 3$$



Exotic states

$$3 \otimes \bar{3} \otimes 8$$

$$8 \otimes 8$$

$$8 \otimes \dots \otimes 8$$

HYBRIDS

GLUEBALLS



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...



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



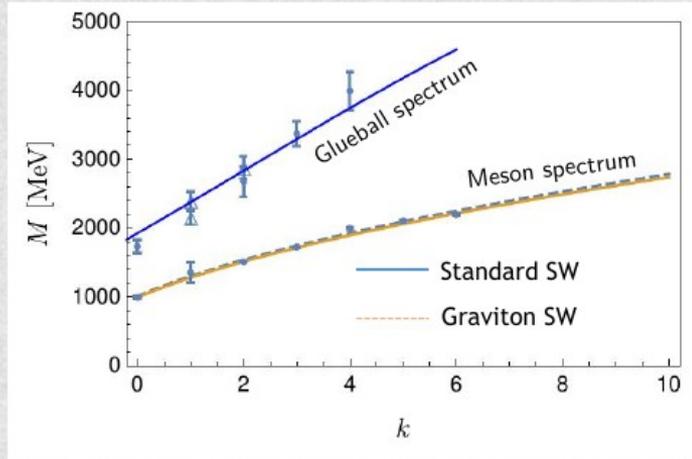
In this case we have the following AdS<sub>5</sub> metric :  $\tilde{g}_{MN}dx^M dx^N = e^{-\alpha\varphi(z)} \frac{R^2}{z^2} (dz^2 + \eta_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu)$

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

### GRAVITON EoM and SPECTRUM

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

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

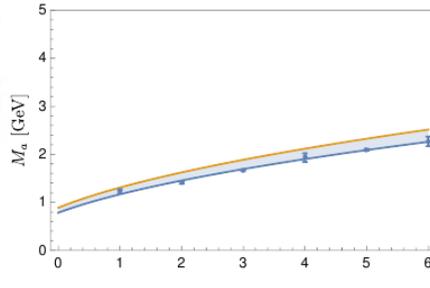
Barioni:  
protoni, neutroni...



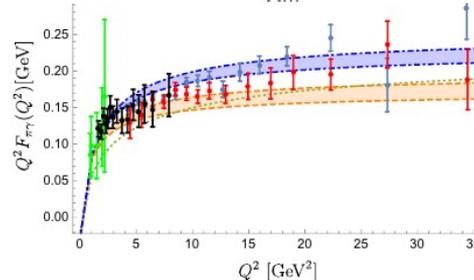
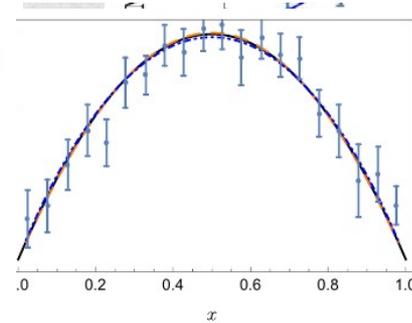
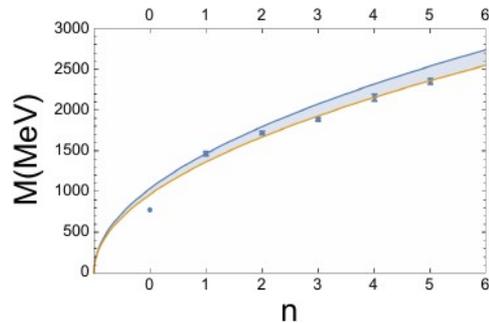
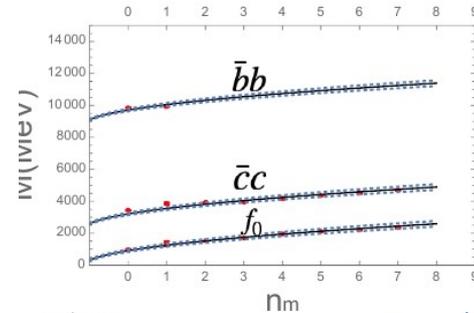
## 3 Glueballs in AdS/QCD: The Soft-Wall II



In this case we have the following AdS<sub>5</sub> metric :  $\tilde{g}_{MN}dx^M dx^N = e^{-\alpha\varphi(z)} \frac{R^2}{z^2} (dz^2 + \eta_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu)$



**one parameter!**



Molte osservabili sperimentali ben riprodotte!

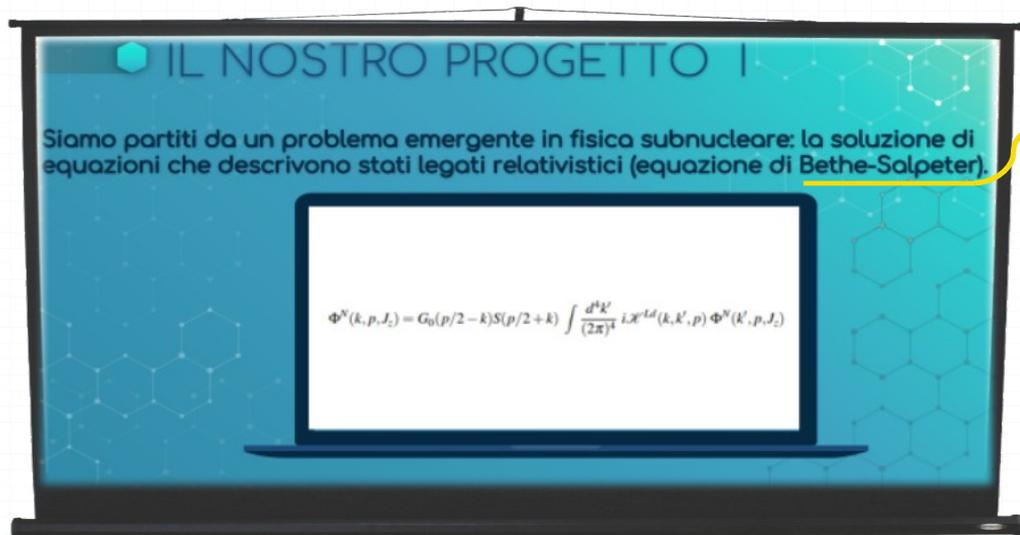
SI PUÒ INDAGARE ANCORA PIÙ A FONDO!

- BARIONI?...

- CALCOLO DI ALTRE DISTRIBUZIONI

# Fisica Adronica Teorica & Quantum computing a Perugia

18



Equazione per lo stato legato di particelle relativistiche!

**BANDO VINTO** per utilizzare un **D-wave Quantum annealer** della collaborazione del CINECA, stabilita dal consorzio Q@TN che coinvolge INFN, FBK, UNITN e CNR a Trento.

## FINALITÀ:

- importanti riscontri per la Fisica Nucleare e Subnucleare,
- Applicazioni per l'ottimizzazione discreta per problemi di interesse generale

Ottenuto Ph.D con fondi PNRR per proseguire il progetto

# Non Siamo Soli

19

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 PAOLO** (Brasile): Tobias Frederico



# Una tesi magistrale in Fisica Nucleare Teorica

- ✓ 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), Sergio Scopetta (e collaboratori esterni)

# Alcuni argomenti di Tesi Magistrali

21

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

# Alcuni argomenti di Tesi Magistrali

21

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):

**Per i dettagli cercateci**

● **STRUTTURA 3D DEL NUCLEONE LE DA ESPERIMENTI SU NUCLEI DI  $^2\text{H}$ ,  $^3\text{He}$  e  $^4\text{He}$  (DVCS)**  
(collaborazione con Pisa, Roma, Parigi (Francia), Dubna, Mosca, Varsavia, University (USA), ...)

● **CALCOLO DELLE DISPERE MULTIPLE MISURATE AD LHC E PROPOSTA DI MISURE**  
(collaborazione con Orsay, nuclei e nucleonici)

● **CALCOLI DI OSSERVABILI Sperimentali con Modelli Olografici (Soft-wall AdS/QCD) PER STUDIARE MESONI, NUCLEONI E GLUEBALLS**  
(collaborazione con Valencia (Spagna))



# Esempi di pubblicazioni da Tesi

22

M. Rinaldi

Tesi: Settembre 2011

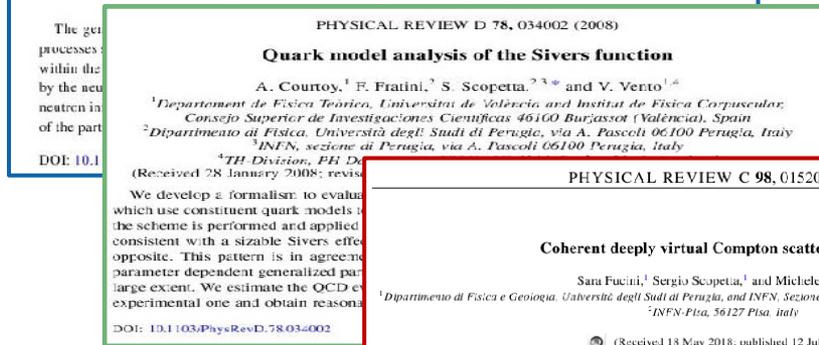
Pubblicazione: 2012



F. Fratini

Tesi: Settembre 2008

Pubblicazione: 2008



S. Fucini

Tesi: Settembre 2017

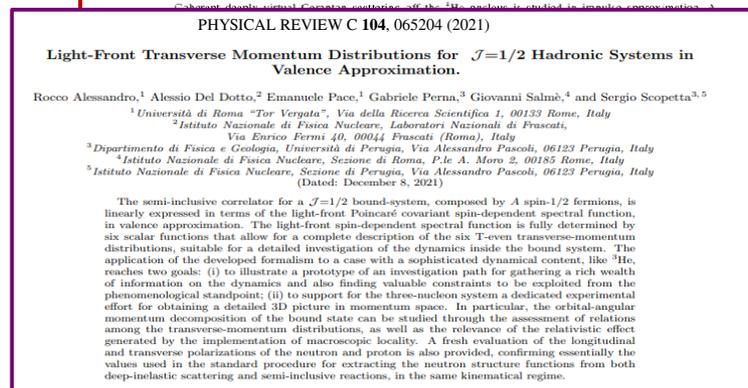
Pubblicazione: 2018



G. Perna

Tesi: Luglio 2021

Pubblicazione: 2021



**GRAZIE PER L'ATTENZIONE!!**

