



# STRUTTURA DI NUCLEONI LIBERI E LEGATI

S. Pacetti (PA) S. Scopetta (PA) M. Rinaldi (Ric. INFN) F. Fornetti (ph.D)  
(NINPHA-PG)

A.D. 1308

**unipg**

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI  
DI PERUGIA



# INDICE



L'INIZIATIVA SPECIFICA NINPHA



NINPHA: CHI SIAMO



STRUTTURA 3D DI NUCLEI E NUCLEONI



Sonde elettromagnetiche (JLab & EIC)



Interazioni partoniche multiple (LHC & EIC)



QC@TN-INFN-CINECA



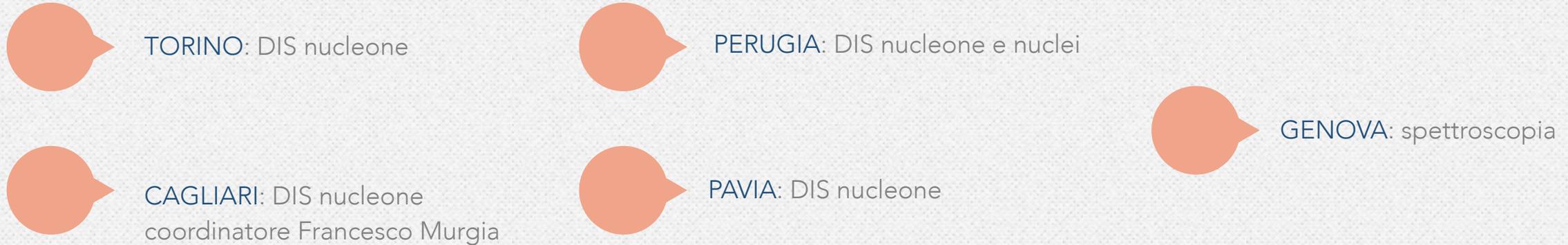
LOW ENERGY ANALYTICITY



CONCLUSIONI

## L' Iniziativa specifica NINPHA (National INitiative for the Physics of HAdrons)

Studio della struttura di nucleoni liberi e legati a livello partonico (S+DIS) e spettroscopia.  
Non siamo soli.



**VALUTAZIONE: ricollocata in Fascia I da Gennaio 2023**

## CHI SIAMO?



### COMPONENTI 2023 (5 FTE):

- S. Scopetta (PA, coordinatore, 100%)
- S. Pacetti (PA, 70%)
- M. Rinaldi (RTDA, 80%)
- G. Salmé (RM1, Senior 100%)
- R. Sangem (post-doc, INFN 100%)
- M. Alvioli (CNR, 50%)



### COMPONENTI 2024 (6,2 FTE):

- M. Rinaldi (coordinatore, Ricercatore INFN, 100%)
- S. Scopetta (PA, 100%)
- S. Pacetti (PA, 70%)
- G. Salmé (RM1, Senior 100%)
- M. Alvioli (CNR, 50%)
- F. Fornetti (Ph.D 100%)
- O. Shekhovtsova (post-doc, 100%)

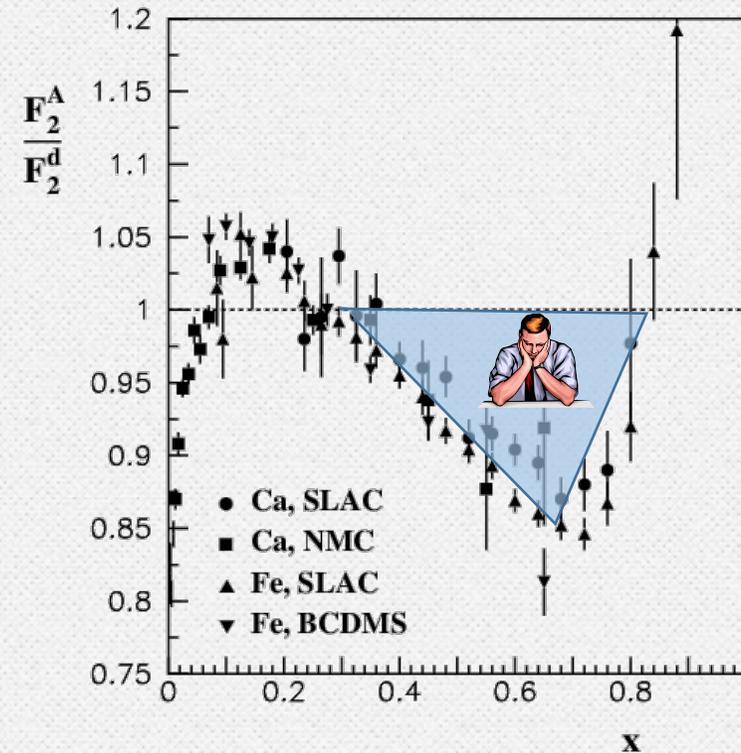
## UN PROBLEMA APERTO: L'EFFETTO EMC

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, il nucleone libero sarebbe uguale a quello legato.

 Il rapporto non è 1.



## UN PROBLEMA APERTO: L'EFFETTO EMC

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.

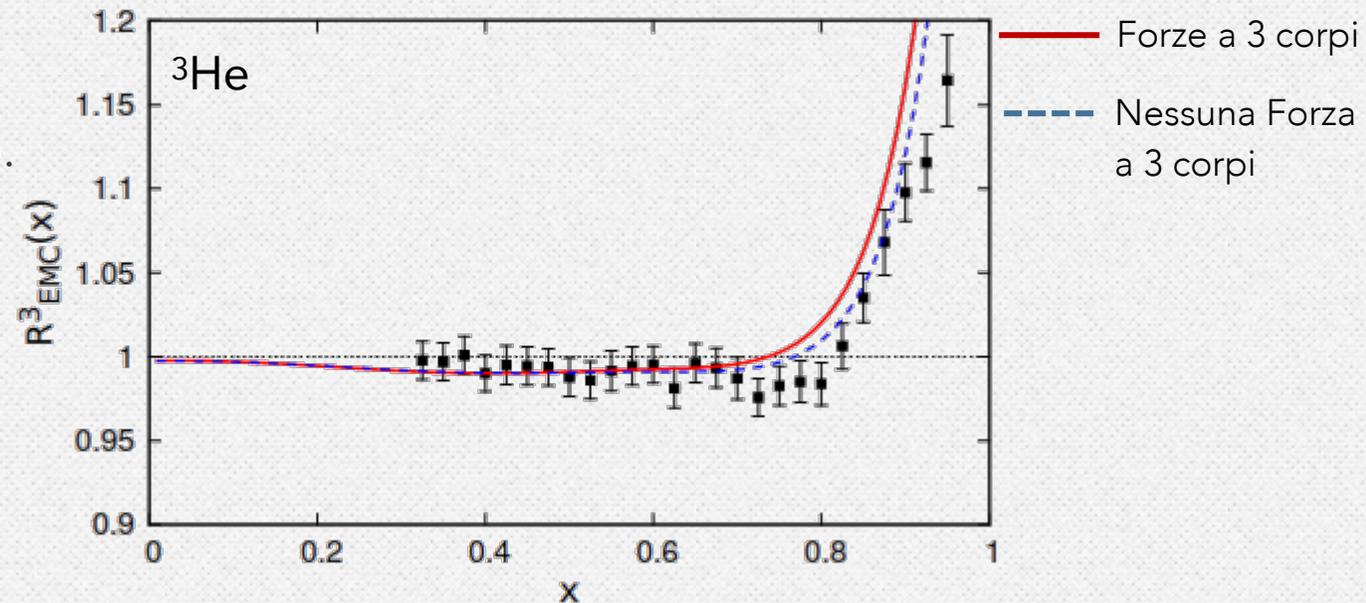
Si vide.



Se il rapporto fosse 1, il nucleone libero sarebbe uguale a quello legato.



Il rapporto non è 1.



Una possibile soluzione è includere la relatività in modo opportuno (*Light-Front*).

Primo calcolo con funzione d'onda realistica che rispetta tutte le regole di somma e che descrive l'andamento dei dati senza parametri liberi.

**E. Pace, M.R., G. Salmè and S. Scopetta, Phys. Lett. B 839 (2023) 137810.**

## UN PROBLEMA APERTO: L'EFFETTO EMC

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.

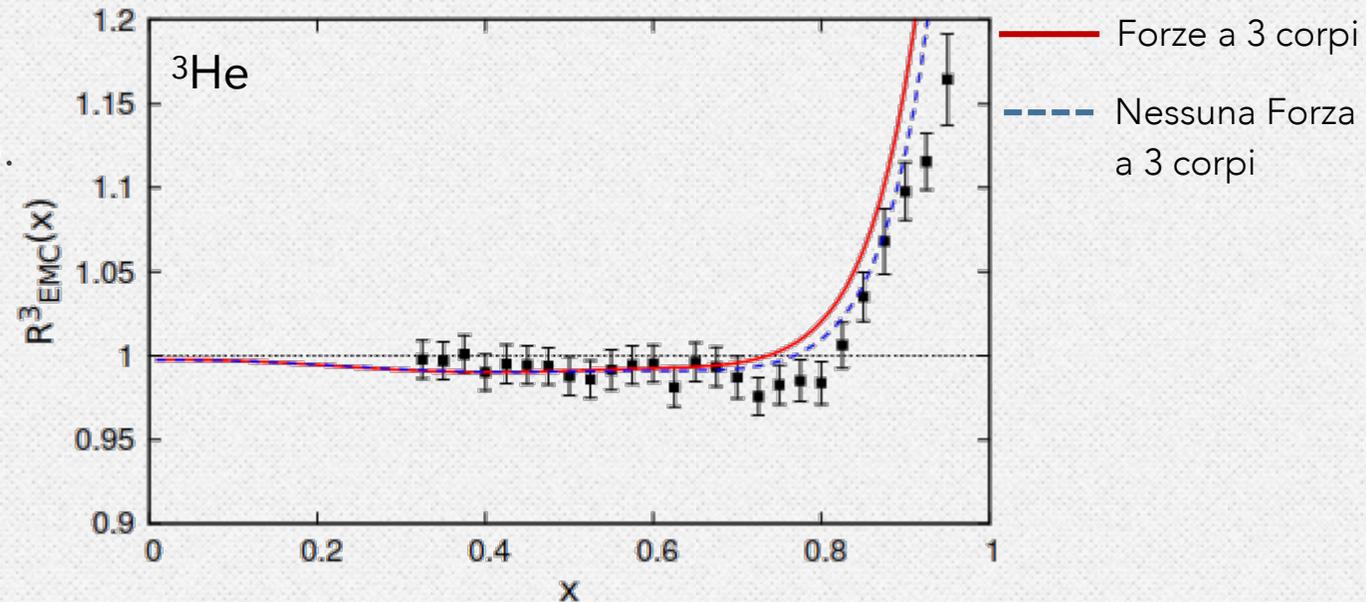
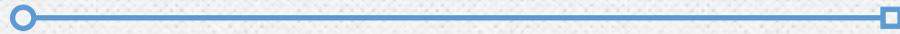
Si vide.



Se il rapporto fosse 1, il nucleone libero sarebbe uguale a quello legato.



Il rapporto non è 1.



Una possibile soluzione è includere la relatività in modo opportuno (*Light-Front*).

Primo calcolo con funzione d'onda realistica che rispetta tutte le regole di somma e che descrive l'andamento dei dati senza parametri liberi.

Baseline per l'inclusione di effetti esotici o modifiche della struttura dei nucleoni

## UN PROBLEMA APERTO: L'EFFETTO EMC

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.

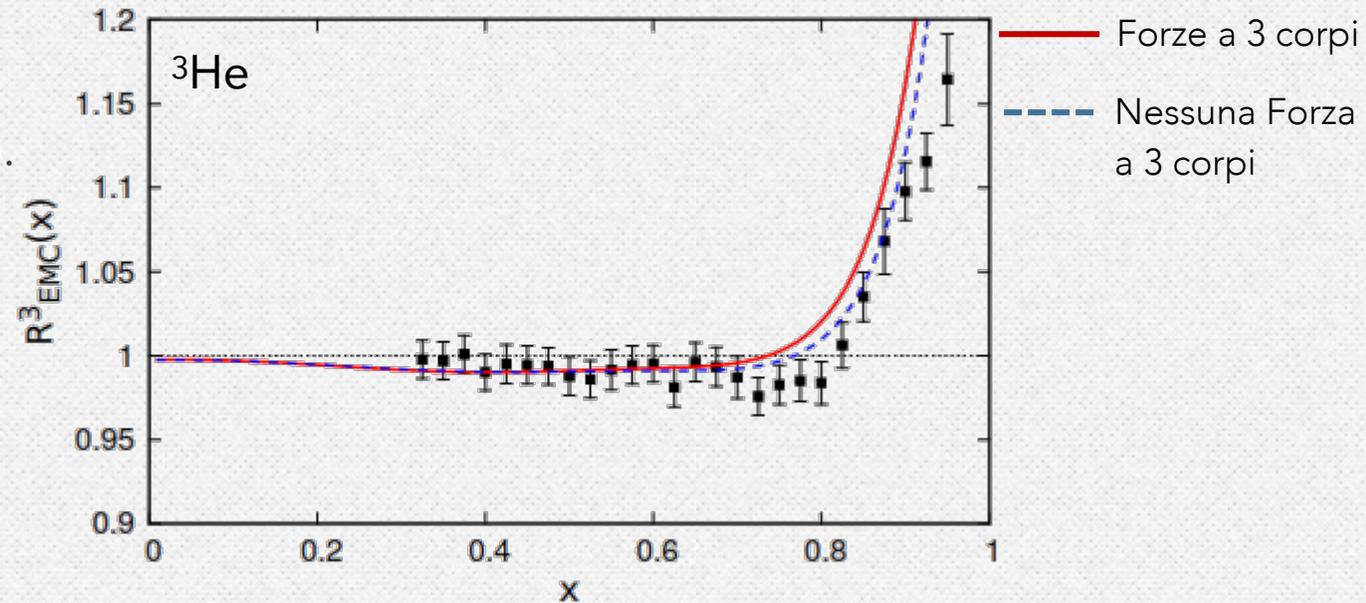
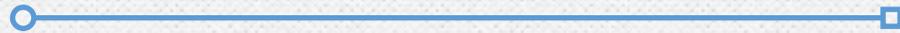
Si vide.



Se il rapporto fosse 1, il nucleone libero sarebbe uguale a quello legato.



Il rapporto non è 1.

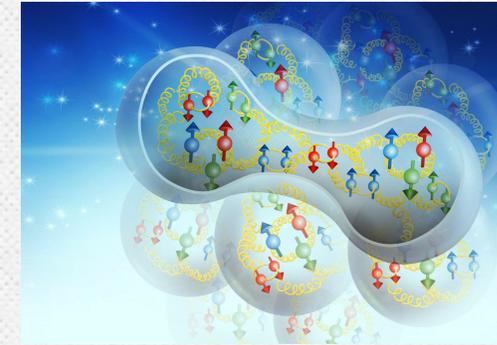
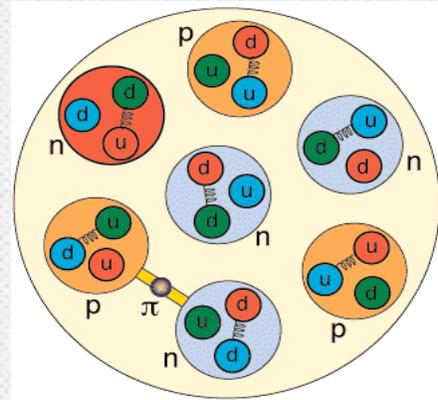


Il primo calcolo per l' $^4\text{He}$  è quasi finito.

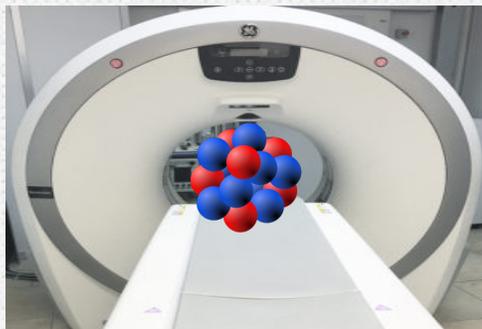
F. Fornetti, E. Pace, M.R., G. Salmè, S. Scopetta and M. Viviani in preparazione.

## EFFETTO EMC: NUCLEI E NUCLEONI IN 3D

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

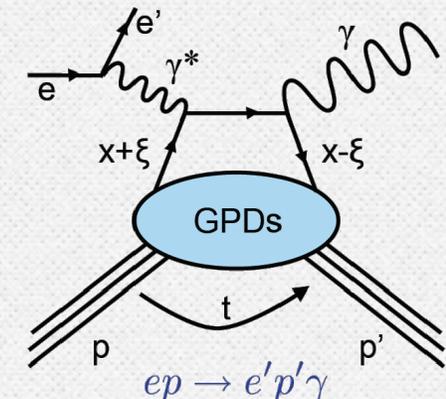


Per rispondere serve fargli una **TOMOGRAFIA**.

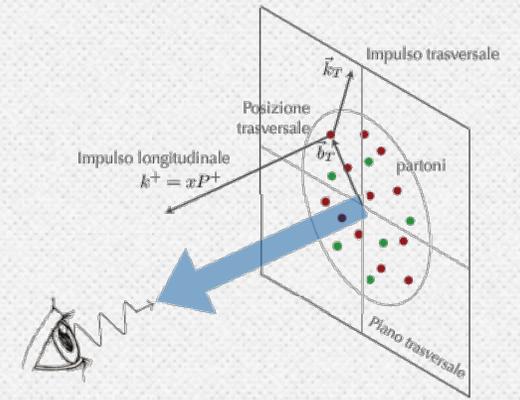


Si può fare!

Possiamo studiare processi come: Deeply Virtual Compton Scattering (DVCS) e ottenere informazioni riguardo le distribuzioni partoniche generalizzate (GPDs). Le misure e le analisi sono difficili ma oggi sono fattibili in vari laboratori (**JLab & EIC**)!



## NUCLEI E NUCLEONI IN 3D

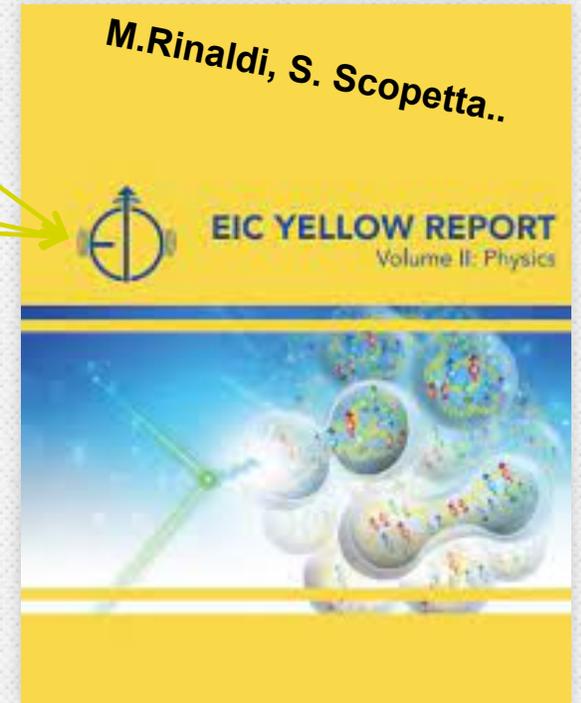


🌀 Nuova generazione di esperimenti esclusivi con sonde elettromagnetiche:  
JLAB@12 GeV (USA)      COMPASS (CERN)      EIC (Brookhaven, USA)

🌀 Linea di ricerca consolidata di PG di importanza internazionale

🌀 Finanziamento in "STRONG-2020" (40 kEuro netti)

🌀 Posizione Ricercatore III livello INFN: Matteo Rinaldi



Con il  
contributo  
di giovani

S. Fucini: post-doc a Orsay

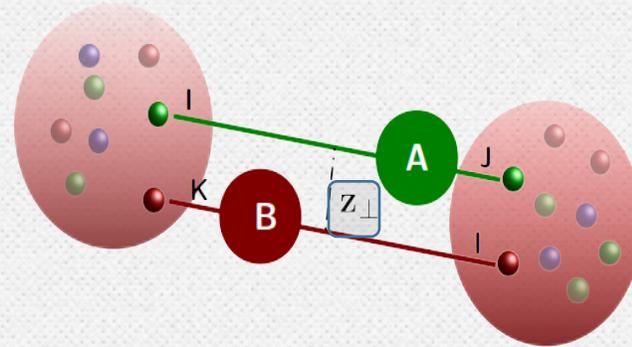
G. Perna: Laureato

F. Fornetti: Ph.D a Perugia

**E. Proietti: studentessa che ha vinto un Ph.D a Pisa**

## PROTONE IN 3D: nuova possibile sinergia tra EIC e LHC

- Ad LHC si possono avere collisioni partoniche multiple (MPI), e.g. double parton scattering (DPS):



- MPI: un background per studi fondamentali; da un punto di vista nucleare, “nostro”:  
la “distribuzione partonica doppia”, **dPDF**,  $F_{ik}(x_1, x_2, \vec{b})$ , in uno dei protoni è molto interessante! (Livio e collaboratori... Esperti di analisi)  
**dPDF: proprietà a due corpi! Informazione sempre elusiva...**

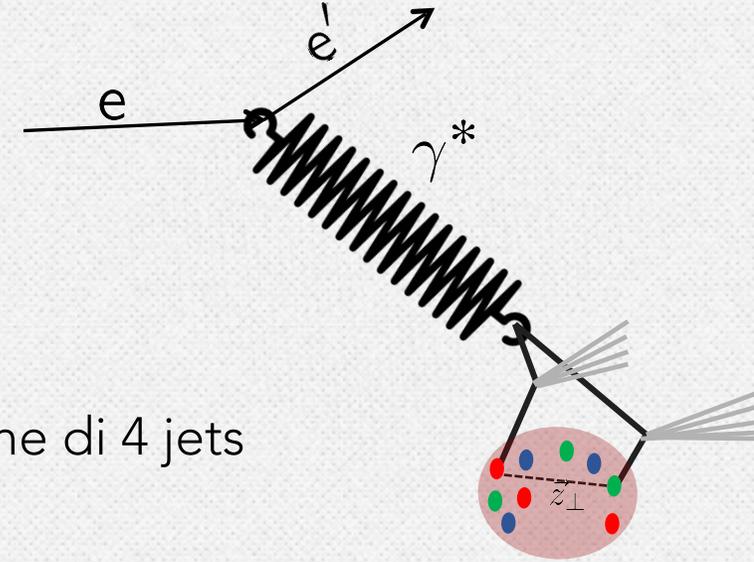
Sinergia tra  
teorici e sperimentali  
nella sezione

- Ad LHC **NON** si possono ottenere informazioni importanti come la distanza media tra quark e gluoni nel protone (**M. R. & Ceccopieri PRD**)

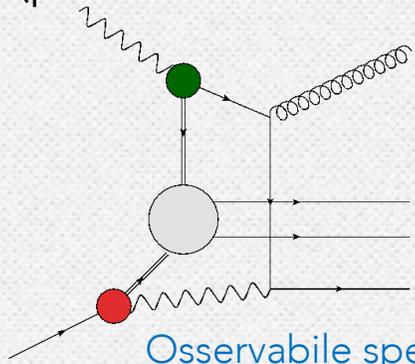
→ SOLUZIONE: DPS iniziato da interazioni tra fotoni e protoni (@EIC?)<sub>11</sub>

## UNA NUOVA IDEA: DPS DA INTERAZIONI FOTONE-PROTONE

M.R. & F.A. Ceccopieri, PRD Letters 105 (2022) 1, L011501



Abbiamo calcolato per la prima volta la sezione d'urto per la produzione di 4 jets (processo osservato ad HERA e analizzato dalla collaborazione ZEUS)



La nostra predizione è che  $\frac{\sigma_{\text{DPS}}}{\sigma_{\text{tot}}} \geq 20\%$

Quotato da ZEUS

**IL PROCESSO DPS PUÒ ESSERE OSSERVATO IN FUTURO (@EIC?)**

Osservabile sperimentale:  $\sigma_{\text{eff}}^{\gamma p} \propto \frac{\sigma^{\gamma p} \sigma^{\gamma p}}{\sigma_{\text{DPS}}^{\gamma p}}$

Distanza media tra due quark nel protone

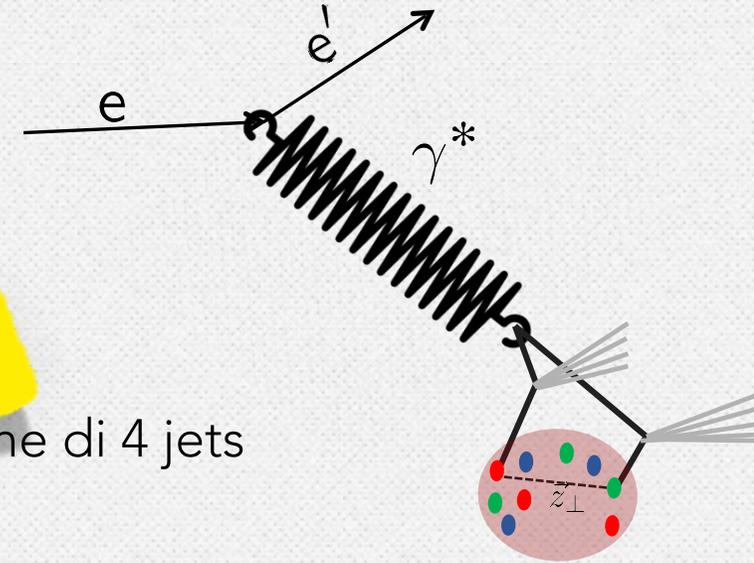
Abbiamo dimostrato che: 
$$\left[ \sigma_{\text{eff}}^{\gamma p}(Q^2) \right]^{-1} = \int d^2 z_{\perp} \tilde{F}_2^p(z_{\perp}) \tilde{F}_2^{\gamma}(z_{\perp}; Q^2) = \sum_n C_n(Q^2) \langle (z_{\perp})^n \rangle_p$$

Coefficienti che dipendono dal meccanismo di splitting del fotone in una coppia quark-anti quark

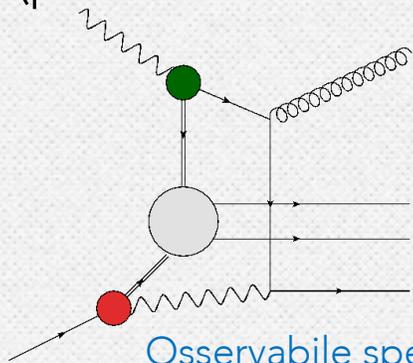
# PROTONE IN 3D: nuova possibile sinergia tra EIC e LHC

## UNA NUOVA IDEA: DPS DA INTERAZIONI FOTONE-PROTONE

M.R. & F.A. Ceccopieri, PRD Letters 105 (2022) 1, L011501



Abbiamo calcolato per la prima volta la sezione d'urto per la produzione di 4 jets (processo osservato ad HERA e analizzato dall'esperimento ZEUS)



Osservabile sperimentale:  $\sigma_{\text{eff}}^{\gamma p} \propto \frac{\sigma^{\gamma p} \sigma^{\gamma p}}{\sigma_{\text{DPS}}^{\gamma p}}$

La nostra previsione

$$\frac{\sigma_{\text{DPS}}}{\sigma_{\text{tot}}} \geq 20\%$$



**IL PROCESSO DPS PUÒ ESSERE OSSERVATO IN FUTURO (@EIC?)**

Quotato da ZEUS

Distanza media tra due quark nel protone

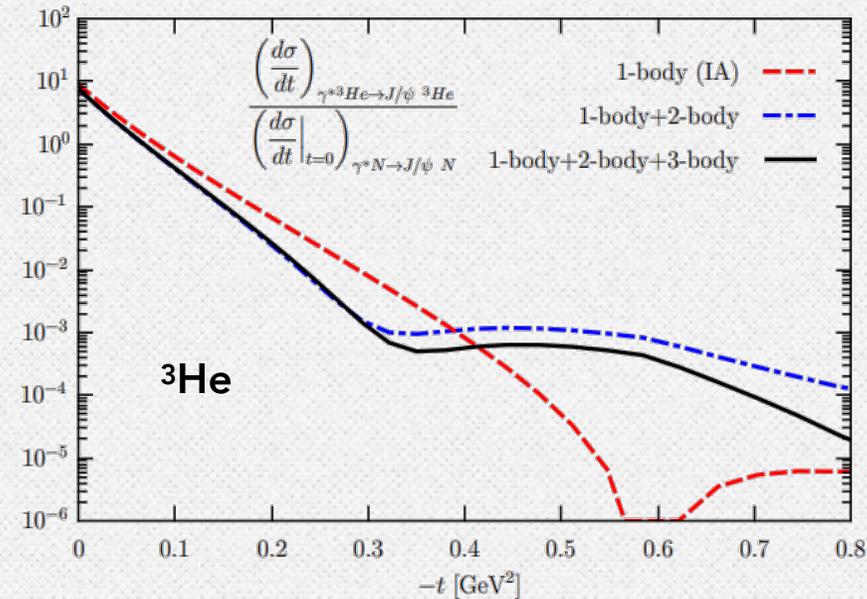
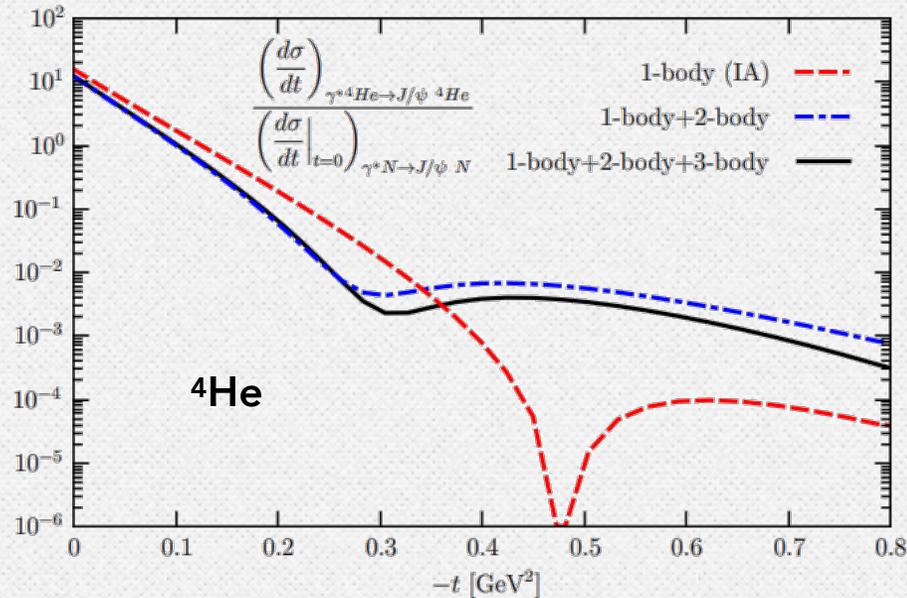
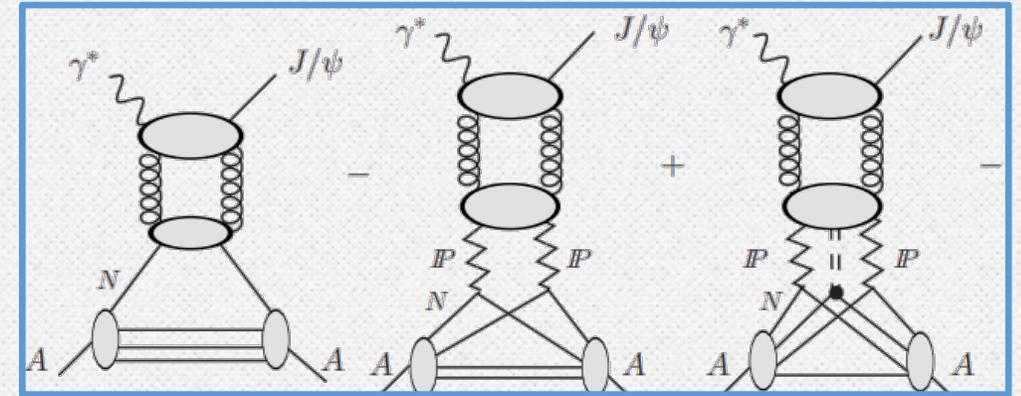


Abbiamo dimostrato che: 
$$\left[ \sigma_{\text{eff}}^{\gamma p}(Q^2) \right]^{-1} = \int d^2 z_{\perp} \tilde{F}_2^p(z_{\perp}) \tilde{F}_2^{\gamma}(z_{\perp}; Q^2) = \sum_n C_n(Q^2) \langle (z_{\perp})^n \rangle_p$$

Coefficienti che dipendono dal meccanismo di splitting del fotone in una coppia quark-anti quark

# Foto-produzione di $J/\psi$ coerente su $^3\text{He}$ e $^4\text{He}$ ad EIC

UNA NUOVA IDEA: l'uso di nuclei leggeri offre l'opportunità unica di stimare **REALISTICAMENTE** il contributo di interazione con uno o più nucleoni alla volta accedendo allo *shadowing* nucleare e alle distribuzioni di gluoni nei nuclei!



Effetti  
misurabili  
ad EIC

PROGETTO PER LA RICHIESTA DI TEMPO MACCHINA AL **D-WAVE** QC PER LA SOLUZIONE DEL  
 “GENERALIZED EIGENVALUE PROBLEMS”

applicato alla fisica adronica (soluzione dell’equazione di Bethe-Salpeter):  
**A GENERALIZED EIGENVALUE PROBLEM VIA A QUANTUM ANNEALER**

Presentazione al w. p. 4 meeting (UniPG)

**IN COLLABORAZIONE CON:**

F. PEDERIVA (TRENTO)

G. SALMÈ (ROMA)

T. FREDERICO (BRASILE)

M. VIVIANI (PISA)

A. GNECH (USA)

**VALUTAZIONE:**

“This proposal is very good.  
 I highly recommend it for  
 support”

**IL NOSTRO PROGETTO** (stato dell'arte)

- ALGORITMO ⚠️  $\hat{A}v = \lambda \hat{B}v$
- ALGORITMO ⚠️  $\hat{A}v = \lambda v$
- ALGORITMO 👍  $\hat{A}v = \lambda v$

GEVPI  
 Equazione agli autovalori con matrice NON-SIMMETRICA  
 Equazione agli autovalori con matrice SIMMETRICA

**D:wave**  
 The Quantum Computing Company

**Ocean**

Algoritmo di minimizzazione scritto in Python  
 Usiamo Jupyter Notebook  
 Per iniziare, abbiamo considerato:

- B. Krakoff, et al, "A QUBO ALGORITHM TO COMPUTE EIGENVECTORS OF SYMMETRIC MATRICES", arXiv:2104.11311
- S. Alliney, et al, "A variational technique for the computation of the vibration frequencies of mechanical systems governed by nonsymmetric matrices", App. Math. modelling, 1992, 16

13

PROGETTO PER LA RICHIESTA DI TEMPO MACCHINA AL **D-WAVE** QC PER LA SOLUZIONE DEL  
 "GENERALIZED EIGENVALUE PROBLEMS"

applicato alla fisica adronica (soluzione dell'equazione di Bethe-Salpeter):  
**A GENERALIZED EIGENVALUE PROBLEM VIA A QUANTUM ANNEALER**

Presentazione al w. p. 4 meeting (UniPG)

**IN COLLABORAZIONE CON:**

F. PEDERIVA (TRENTO)

G. SALMÈ (ROMA)

T. FREDERICO (BRASILE)

M. VIVIANI (PISA)

A. GNECH (USA)

**VALUTAZIONE:**

"This proposal is very good.  
 I highly recommend it for  
 support"

**POSIZIONE DOTTORATO DAI FONDI PNRR, D.M. 351.**

Progetto: *OPT*imization *QU*antum *AL*gorithm



PROGETTO PER LA RICHIESTA DI TEMPO MACCHINA AL **D-WAVE** QC PER LA SOLUZIONE DEL  
 "GENERALIZED EIGENVALUE PROBLEMS"

applicato alla fisica adronica (soluzione dell'equazione di Bethe-Salpeter):  
**A GENERALIZED EIGENVALUE PROBLEM VIA A QUANTUM ANNEALER**

Presentazione al w. p. 4 meeting (UniPG)

**IN COLLABORAZIONE CON:**

F. PEDERIVA (TRENTO)

G. SALMÈ (ROMA)

T. FREDERICO (BRASILE)

M. VIVIANI (PISA)

A. GNECH (USA)

**VALUTAZIONE:**

"This proposal is very good.  
 I highly recommend it for  
 support"

**NUOVO PROGETTO DI ATENEO  
 (INTERDIPARTIMENTALE) PER  
 ACQUISIRE UN COMPUTER  
 QUANTISTICO 2 qbit  
 (il nostro contributo è essenziale)**

**POSIZIONE DOTTORATO DAI FONDI PNRR, D.M. 351.**

Progetto: *OPT*imization *QU*antum *AL*gorithm



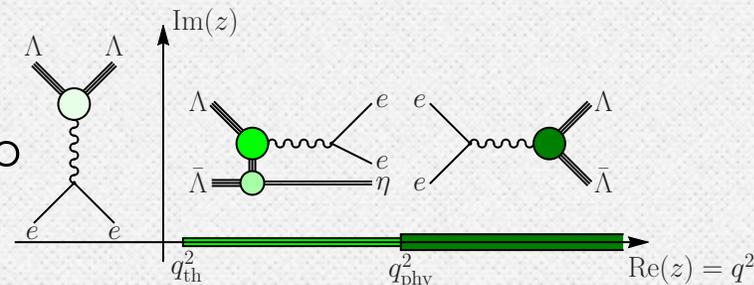
# Low Energy Analyticity

Egle Tomasi  
(Saclay)  
Olga Shekhovtsova  
(INFN-PG)



Struttura complessa dei fattori di forma dell'iperone  $\Lambda$

- Fase e modulo di  $G_E^\Lambda / G_M^\Lambda$
- Fase  $\rightarrow$  zeri nella regione di tipo spazio
- Raggio elettrico dell'iperone  $\Lambda$



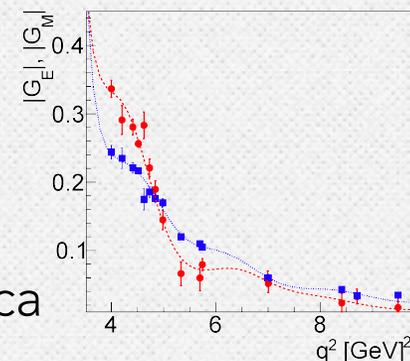
Francesco Rosini  
(LM-20/6/23)

Egle Tomasi  
(Saclay)



Oscillazioni dei fattori di forma dei nucleoni

- Modello *Arbuz*  $\rightarrow$  natura microscopica
- Interazione di stato finale  $\rightarrow$  natura macroscopica
- Interferenza iso-scalare-vettoriale  $\rightarrow$  natura intrinseca

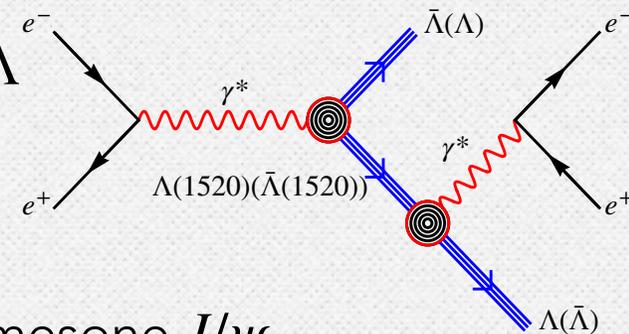


Nicolò Baldicchi  
(LM-15/9/22)



Fattori di forma di transizione  $\Lambda(1520)\Lambda$

- Transizione spin  $3/2 \rightarrow$  spin  $1/2$
- Auto-interferenza delle ampiezze
- Canali risonanti con produzione del mesone  $J/\psi$



# PUBBLICAZIONI ISI (2022-2023)

S. Pacetti, M. Rinaldi and S. Scopetta

- 1) **The Phase Transition in the holographic Hard-Wall model**  
 Matteo Rinaldi (INFN, Perugia), Vicente Vento (Valencia U., IFIC) (Apr 4, 2023) → Sottomesso a PRD
- 2) **The European Muon Collaboration effect in light-front Hamiltonian dynamics**  
 Emanuele Pace (Rome U., Tor Vergata), Matteo Rinaldi (INFN, Perugia and Perugia U.), Giovanni Salmè (INFN, Rome), → Phys. Lett. B
- 3) **The pion in the graviton soft-wall model: phenomenological applications**  
 Matteo Rinaldi (Perugia U. and INFN, Perugia), Federico Alberto Ceccopieri (IJCLab, Orsay), Vicente Vento (Valencia U., IFIC) (Apr 21, 2022) → EPJC
- 4) **Coherent  $J/\psi$  Electroproduction on  $^4\text{He}$  and  $^3\text{He}$  at the Electron-Ion Collider: Probing Nuclear Shadowing One Nucleon at a Time** #6  
 Vadim Guzey (Kurchatov Inst., Moscow and St. Petersburg, INP), Matteo Rinaldi (INFN, Perugia and Perugia U.), Sergio Scopetta (INFN, Perugia and Perugia U.), Mark Strikman (Penn State U.), Michele Viviani (INFN, Pisa) (Feb 24, 2022) → PRL
- 5) **Glueballs at high temperature within the hard-wall holographic model**  
 Matteo Rinaldi (Perugia U. and INFN, Perugia), Vicente Vento (Valencia U., IFIC) (Dec 21, 2021) → EPJC
- 6) **Strong Interaction Physics at the Luminosity Frontier with 22 GeV Electrons at Jefferson Lab**  
 A. Accardi (Hampton U.), P. Achenbach (Jefferson Lab), D. Adhikari (Virginia Tech.), A. Afanasev (George Washington U.) → arXiv
- 7) **Interpretation of recent form factor data in terms of an advanced representation of baryons in space and time**  
 Egle Tomasi-Gustafsson, Simone Pacetti → PRC
- 8) **General relativity versus dark matter for rotating galaxies**  
 Yogendra Srivastava, Giorgio Immirzi, John Swain, Orlando Panella, Simone Pacetti → EPJC
- 10) **Theoretical and Experimental Essentials on Baryon Form Factors**  
 Monica Bertani, Alessio Mangoni, Simone Pacetti → Symmetry
- 11) **General Relativity and the Tully-Fisher Relation for Rotating Galaxies**  
 Yogendra Srivastava, Giorgio Immirzi, John Swain, Orlando Panella, Simone Pacetti → JMP

Rinaldi 20% in Pandora e possibili collaborazioni con il gruppo di Astrofisica nucleare di Perugia

### **A Novel Approach to $\beta$ -Decay: PANDORA, a New Experimental Setup for Future In-Plasma Measurements**

#5

David Mascali (INFN, LNS), Domenico Santonocito (INFN, LNS), Simone Amaducci (INFN, LNS), Lucio Andò (INFN, LNS), Vincenzo Antonuccio (INAF, Catania) et al. (Jan 27, 2022)

**M. Rinaldi**

Published in: *Universe* 8 (2022) 2, 80

Progetto di Dottorato su equazione di stato per stelle di neutroni (con iperoni), in collaborazione con F. Pederiva (UniTN, INFN-TIFPA), astronomia multimessenger (?)

Progetto di Dottorato OPTQUAL in collaborazione con Trento, ROMA, Seattle.

Nuovo progetto di inter-dipartimentale per ottenere fondi di Ateneo per l'acquisizione di un computer quantistico.

In questo progetto la nostra esperienza è fondamentale.

### **ABBIAMO LE COMPETENZE E L'INTERESSE A COLLABORARE E CONTRIBUIRE**

Eleonora Proietti ha fatto la tesi Magistrale con Sergio Scopetta e Matteo Rinaldi ha vinto un posto di dottorato con borsa a PISA.

-  ROMA: G. Salmè; E. Pace
-  VALENCIA (SPAGNA): S. Noguera; V. Vento
-  DUBNA (RUSSIA): L. Kaptari
-  ORSAY (FRANCIA): F. A. Ceccopieri; R. Dupré; S. Wallon  
Jean-Philippe Lansberg, Huang-Sheng Shao
-  MEXICO CITY (MESSICO): A. Courtoy
-  TRENTO: M. C. Traini; F. Pederiva
-  MAINZ (GERMANIA): T. Kasemets
-  PISA: M. Viviani
-  CHICAGO (USA): K. Hafidi; W. Amstrong
-  BUENOS AIRES (ARGENTINA): D. G. Dumm; N. Scoccola
-  VARSAVIA (POLONIA): L. Szymanowsky
-  PENN STATE UNIVERSITY (USA): M. Strikman
-  SAN PIETROBURGO (RUSSIA): V. Guzey
-  JLAB (USA): A. Gnech
-  SAN PAOLO (BRASILE): T. Frederico
-  SACLAY (FRANCIA): E. Tomasi

- 🌐 SEMPRE PIÙ COINVOLTI IN PROGETTI DI RILEVANZA INTERNAZIONALE ED INTERDISCIPLINARI
- 🌐 RICONOSCIMENTI IMPORTANTI  
(STRONG 2020, nel 2021 post-doc Rajesh, S. Scopetta tra i coordinatori della scuola di dottorato INFN di Fisica Adronica e Nucleare al GGI 2021, borsa dottorato PNRR calcolo quantistico e ricercatore III livello M. Rinaldi)
- 🌐 COLLABORAZIONI CON GRUPPI SPERIMENTALI (JLab, BESIII)
- 🌐 DIRETTAMENTE COINVOLTI NEL PROGETTO EIC (AUTORI DELLO YR) e firmatari per il progetto JLab22
- 🌐 ESSENDO UN PICCOLO GRUPPO ABBIAMO BISOGNO DI SUPPORTO PER PORTARE AVANTI QUESTE ATTIVITÀ SEMPRE PIÙ RILEVANTI

**GRAZIE ALL'INFN PER LA SENSIBILITÀ MOSTRATA FINORA**