

Il Protone, questo sconosciuto - Parte II

Studiare protoni usando fotoni

Paolo Pedroni, Nicolò Valle

INFN-Sezione di Pavia

Dipartimento di Fisica, Università di Pavia



SOMMARIO

➤ Introduzione Perché si usano fotoni per studiare i protoni ?

- **Scattering Compton:** $\gamma p \rightarrow \gamma p$
Quali sono le caratteristiche delle distribuzioni di carica e magnetismo presenti all'interno del protone ?

➤ Alcuni esperimenti

(effettuati presso gli acceleratori di Mainz e Bonn – Germania)

- **Fotoproduzione di mesoni** $\gamma p \rightarrow N\pi(\pi), N\eta, \dots$
Quanti sono gli stati eccitati (risonanze) del protone ?
- **Verifica della regola di somma di Gerasimov-Drell-Hearn**
Perché il protone ha spin ?
I quark sono puntiformi ?

➤ Conclusioni

Perchè usare fotoni ?

Un metodo potente per investigare sperimentalmente la struttura delle particelle fortemente interagenti (adroni) è di studiarle, di sondarle con una particella conosciuta, in particolare il fotone (nessun'altra è nota altrettanto bene)

(R.P.Feynman)

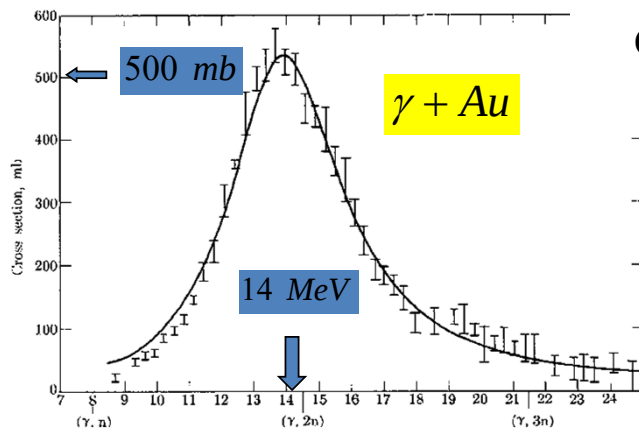
La struttura adronica viene studiata con una risoluzione che dipende dall'energia del fotone (lunghezza d'onda)

Studio dei moti
collettivi nucleari

$$\lambda_\gamma \cong \frac{200(\text{MeV} \cdot \text{fm})}{E_\gamma (\text{MeV})}$$

Studio della struttura
interna del protone

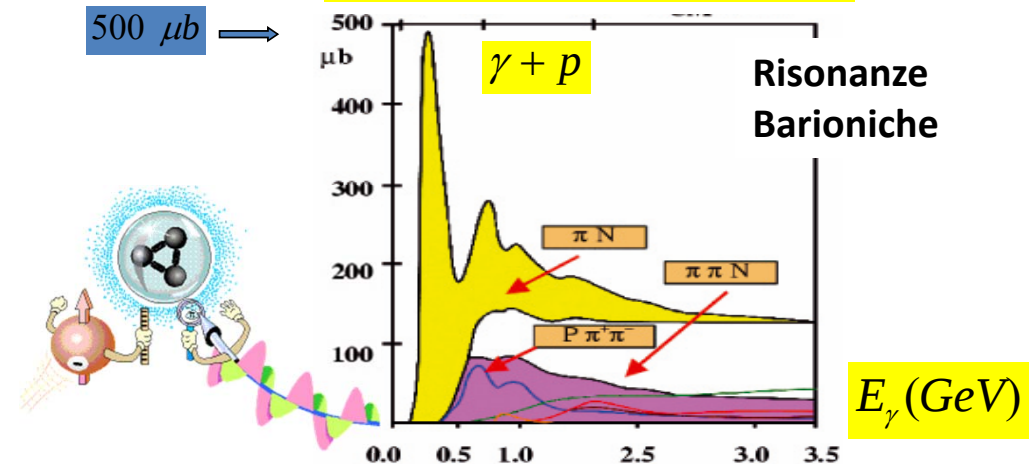
$$E_\gamma \approx 20 \text{ MeV} \Rightarrow \lambda_\gamma \approx 10 \text{ fm}$$



Risonanza
Gigante di
Dipolo
Protoni/Neutroni
visti come due gas di
particelle puntiformi
in movimento
relativo

$$E_\gamma (\text{MeV})$$

$$E_\gamma > 200 \text{ MeV} \Rightarrow \lambda_\gamma < 1 \text{ fm}$$



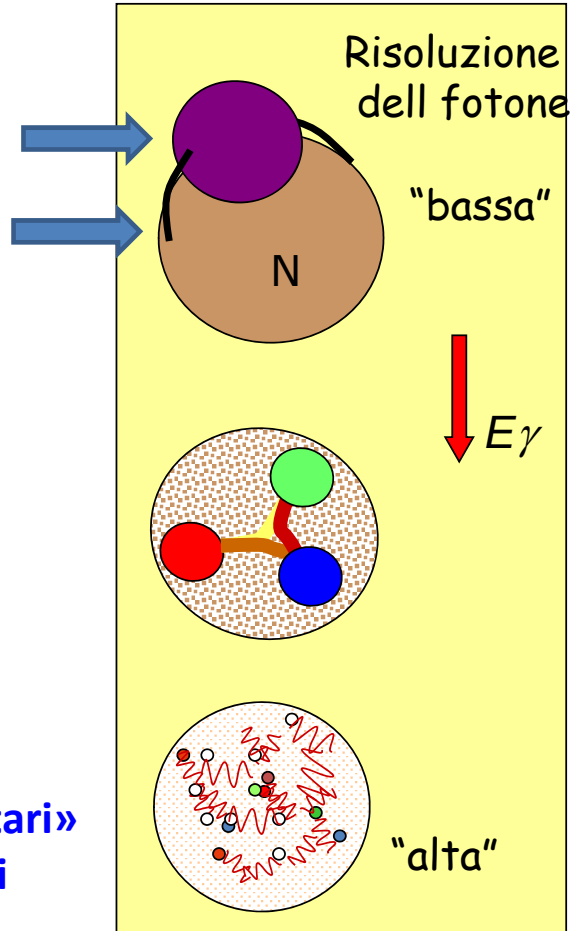
Perchè usare fotoni ?

Mesone (pione)
virtuale

«nuvola» diffusa di
elettricità e
magnetismo

Si distinguono i
singoli quark

Oltre ai singoli quark
si distinguono altri
componenti «elementari»
(gluoni, coppie virtuali
quark-antiquark)

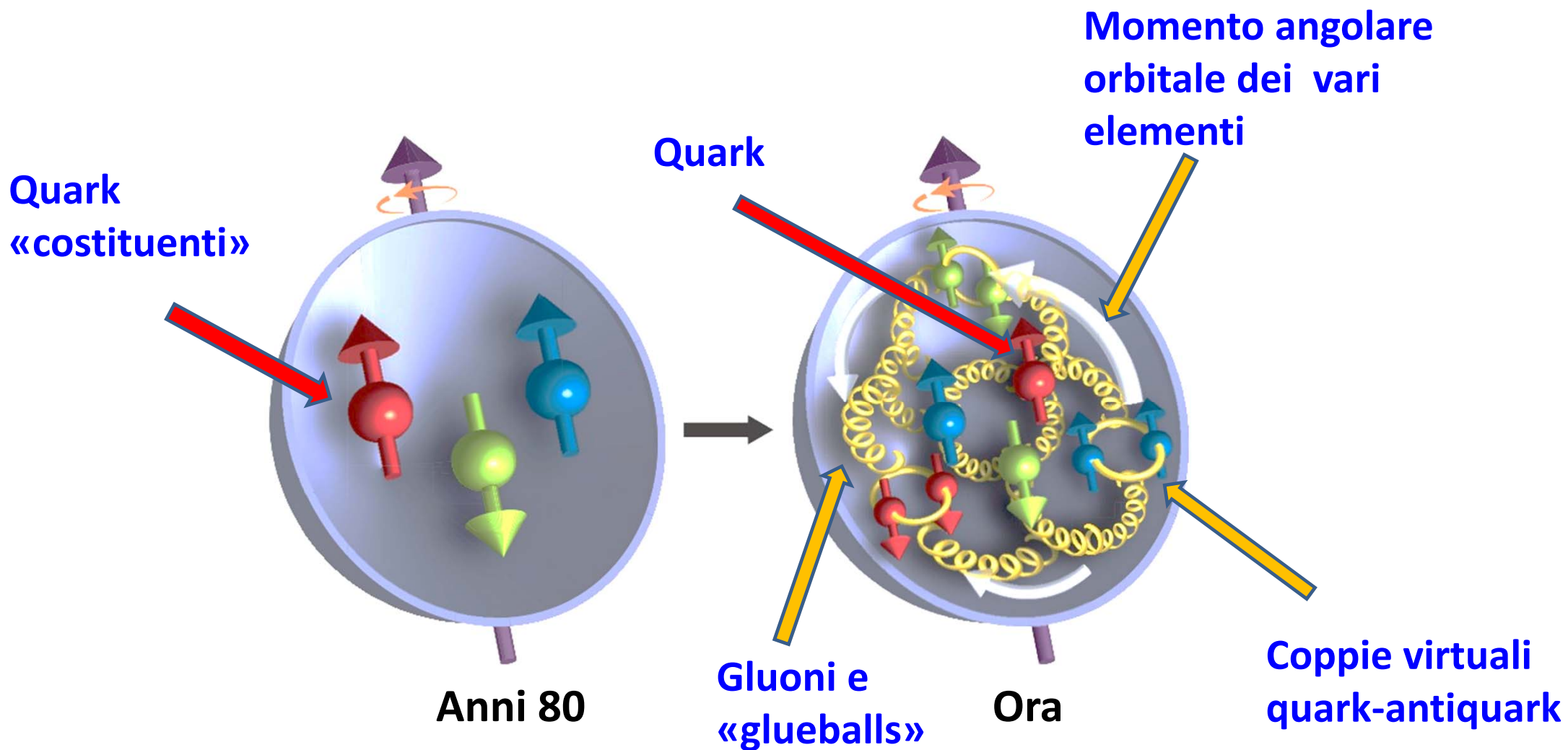


$$E_\gamma \approx 200 \text{ MeV} \Rightarrow \lambda_\gamma \approx 1 \text{ fm}$$

$$E_\gamma \approx 2 \text{ GeV} \Rightarrow \lambda_\gamma \approx 0.1 \text{ fm}$$

$$E_\gamma \approx 20 \text{ GeV} \Rightarrow \lambda_\gamma \approx 0.01 \text{ fm}$$

Il protone è un oggetto molto complicato...



Scattering Compton

Sviluppo dell' Hamiltoniana in una serie di potenze di energia del fotone (ω)

ordine 0 $\rightarrow$ carica, massa

ordine 1 $\rightarrow$ momento magnetico anomalo κ

ordine 2 $\rightarrow$ 2 polarizzabilità scalari (elettrica e magnetica)

$$H_{eff}^{(2)} = -4\pi \left[\frac{1}{2} \alpha_{E1} \vec{E}^2 + \frac{1}{2} \beta_{M1} \vec{H}^2 \right]$$

ordine 3 $\rightarrow$ 4 polarizzabilità di spin (vettoriali)

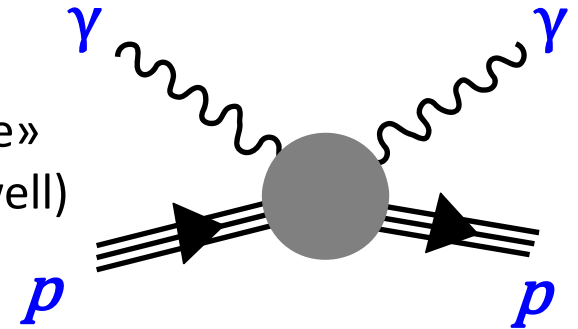
$$H_{eff}^{(3)} = -4\pi \left[\frac{1}{2} \gamma_{E1E1} \vec{\sigma} \cdot (\vec{E} \times \dot{\vec{E}}) + \frac{1}{2} \gamma_{M1M1} \vec{\sigma} \cdot (\vec{H} \times \dot{\vec{H}}) - \gamma_{M1E2} E_{ij} \sigma_i H_j + \gamma_{E1M2} H_{ij} \sigma_i E_j \right]$$

misurate (con errori rilevanti) in altri esperimenti

$$\begin{cases} \gamma_0 = -\gamma_{E1E1} - \gamma_{E1M2} - \gamma_{M1M1} - \gamma_{M1E2} \\ \gamma_\pi = -\gamma_{E1E1} - \gamma_{E1M2} + \gamma_{M1M1} + \gamma_{M1E2} \end{cases}$$

Nucleone «puntiforme»
(sezione d'urto di Powell)

$$\mu_p = (1 + \kappa) \frac{e\hbar}{2m_p}$$

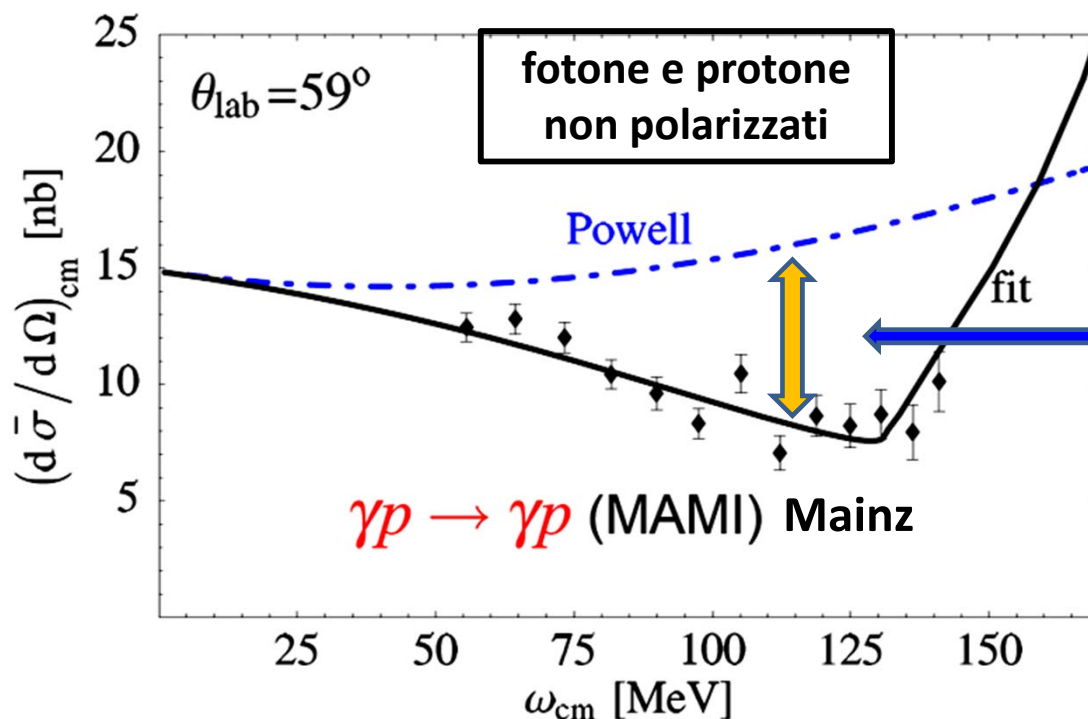


Regola di somma di Baldin :
somma ($\alpha_{E1} + \beta_{M1}$) nota da altre misure

Spin del protone

$$\begin{aligned} E_{ij} &= \frac{1}{2} (\nabla_i E_j + \nabla_j E_i) \\ H_{ij} &= \frac{1}{2} (\nabla_i H_j + \nabla_j H_i) \end{aligned}$$

Misure Sperimentali



Protone con momento magnetico anomalo ma «puntiforme»

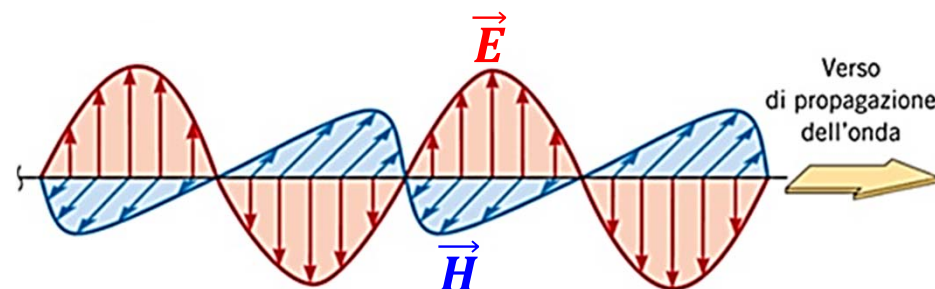
Effetto dovuto alla modifica della struttura interna del protone

(Le polarizzabilità non sono direttamente misurabili)

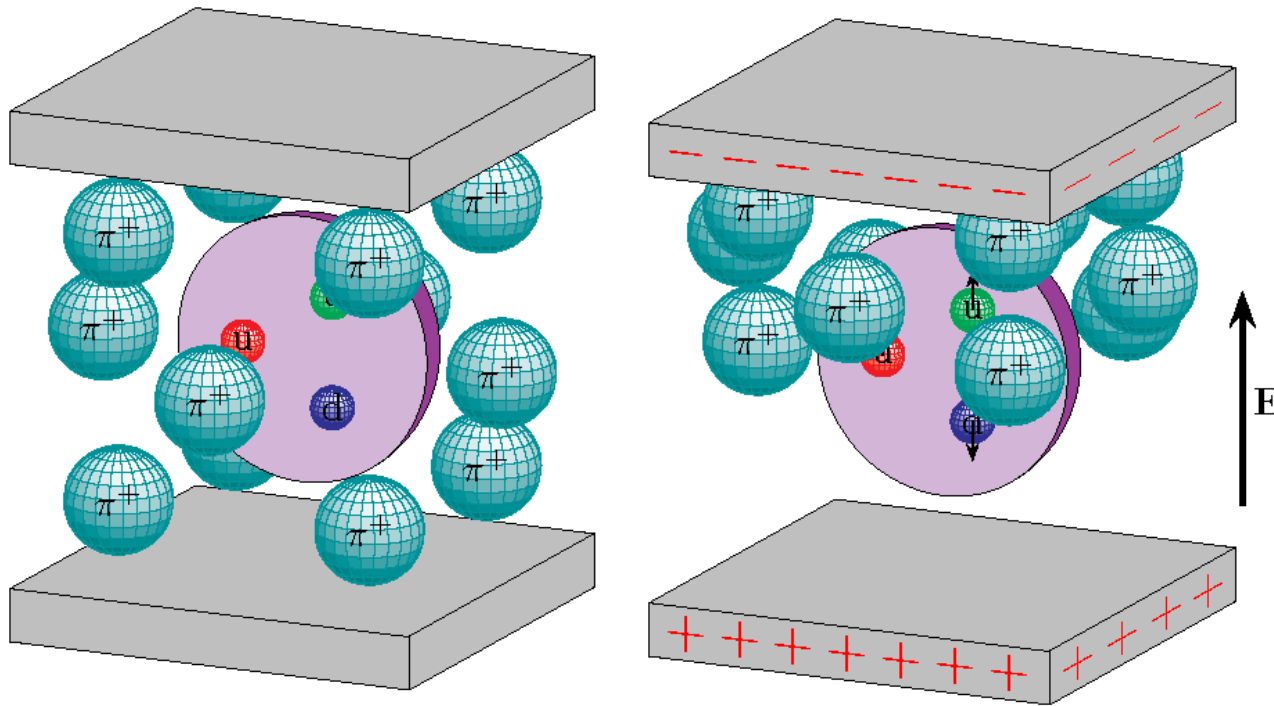
Funzione di eccitazione (sezione d'urto differenziale ad angolo fissato in funzione dell'energia del fotone)

$\alpha_{E1} \beta_{M1} \Rightarrow$ fotoni non polarizzati
protoni non polarizzati

$\gamma_{E1E1} \gamma_{M1M1}$
 $\gamma_{E1M2} \gamma_{M1E2} \Rightarrow$ fotoni circolarmente o linearmente polarizzati ; protoni polarizzati longitudinalmente o trasversalmente



Polarizzabilità scalare elettrica - α_{E1}



Il campo elettrico E induce una corrente nella nuvola pionica che modifica la distribuzione di carica del protone

Momento di dipolo elettrico indotto:

$$\vec{p} = \alpha_{E1} \cdot \vec{E}$$

Polarizzabilità elettrica



«Deformabilità» del protone
(suscettività elettrica)

Deformazione indotta $\approx 10^{-3}$ volume del protone

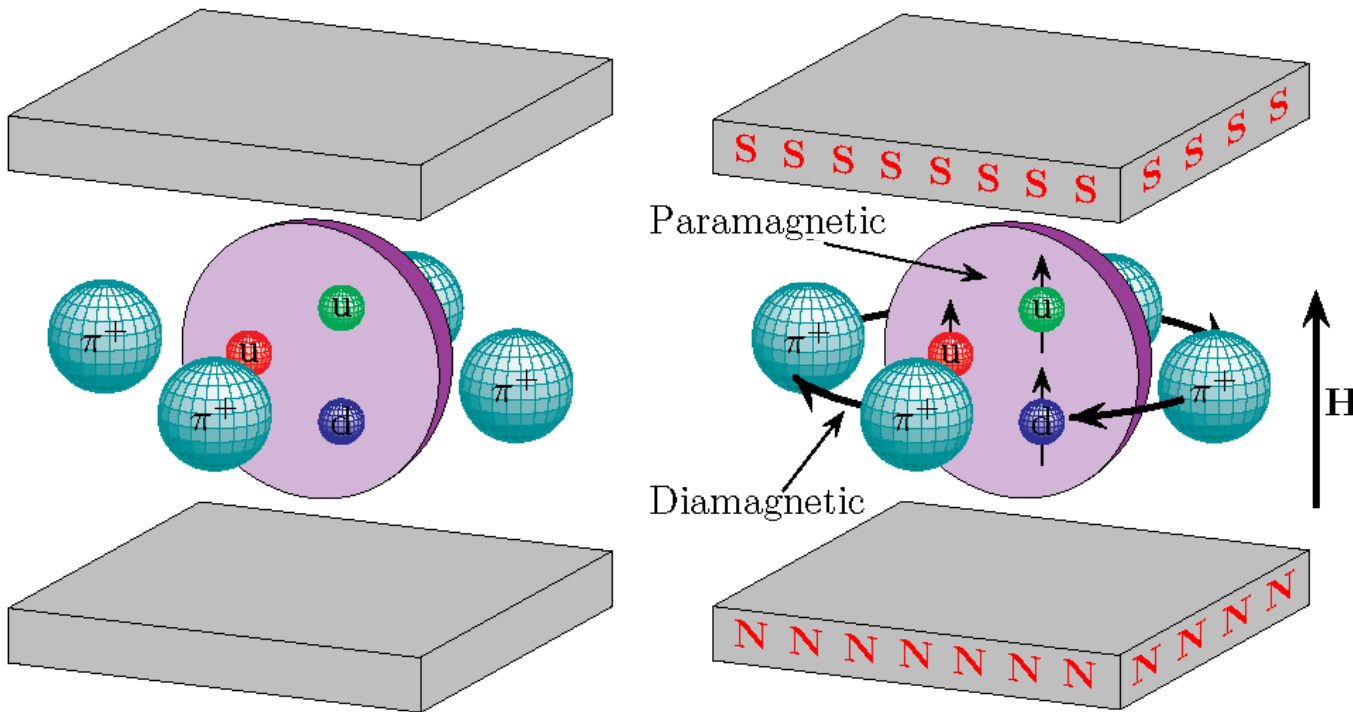


Massa del protone è principalmente dovuta alla forza di legame $\Rightarrow$ protone è “compatto” e fortemente legato !

Per misurare questo parametro potremmo inserire protoni all'interno di un condensatore.
Quanto intenso dovrebbe essere il campo elettrico per indurre un effetto apprezzabile ?

Stima approssimata: $E_{\text{crit}} \approx 10^{23}$ Volt/metro

Polarizzabilità scalare magnetica - β_{M1}



Momento di dipolo magnetico indotto:

$$\vec{m} = \beta_{M1} \cdot \vec{H}$$

Polarizzabilità magnetica



«Orientabilità» del protone
(susceptività magnetica)

Il campo magnetico induce un momento orbitale **diamagnetico** nella nuvola pionica (π^+ hanno spin=0) (legge di Lenz) che si oppone al momento **paramagnetico** di spin dovuto ai quarks



$$\beta_{M1} < \alpha_{E1}$$



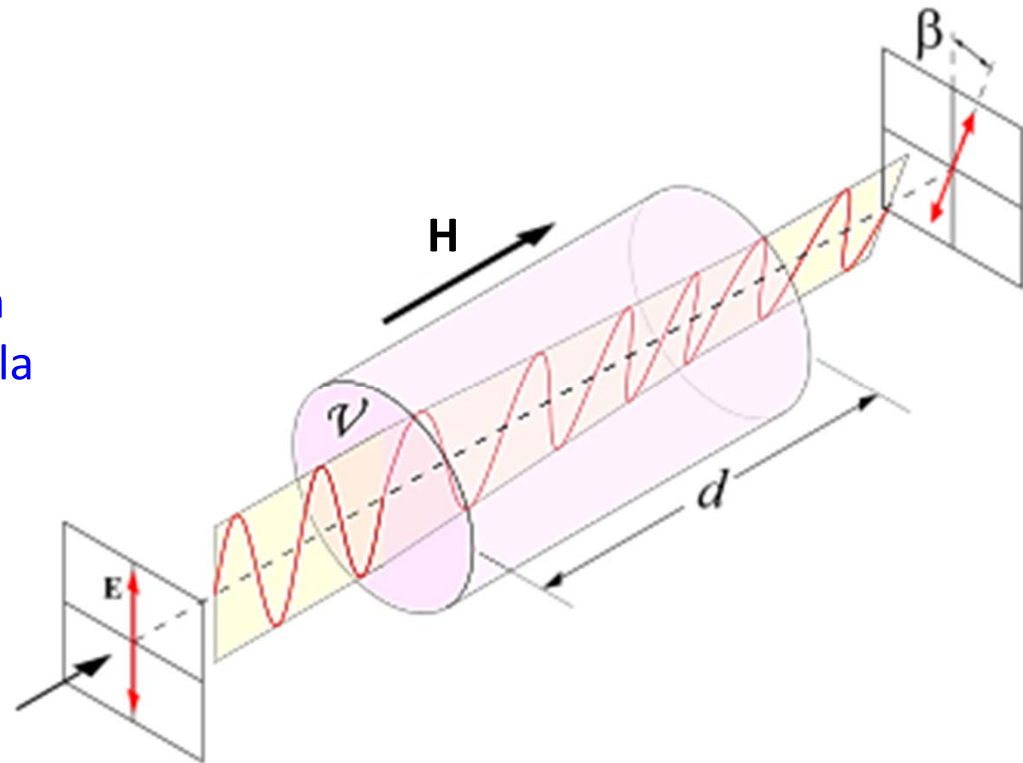
potrebbe anche essere negativo

Polarizzabilità di spin

Questi parametri descrivono l'effetto indotto sullo spin del protone da un campo elettrico o magnetico variabile. Qualche (vaga) analogia con l'effetto Faraday "classico".

L'effetto Faraday si verifica quando la direzione della polarizzazione lineare di un'onda elettromagnetica viene modificata quando l'onda passa attraverso un pezzo di materiale trasparente posto all'interno di un campo magnetico. Tale modifica è dovuta alla interazione dell'onda incidente con il campo magnetico indotto all'interno del materiale.

(Questa è storicamente stata la prima prova che elettricità e magnetismo sono collegati)

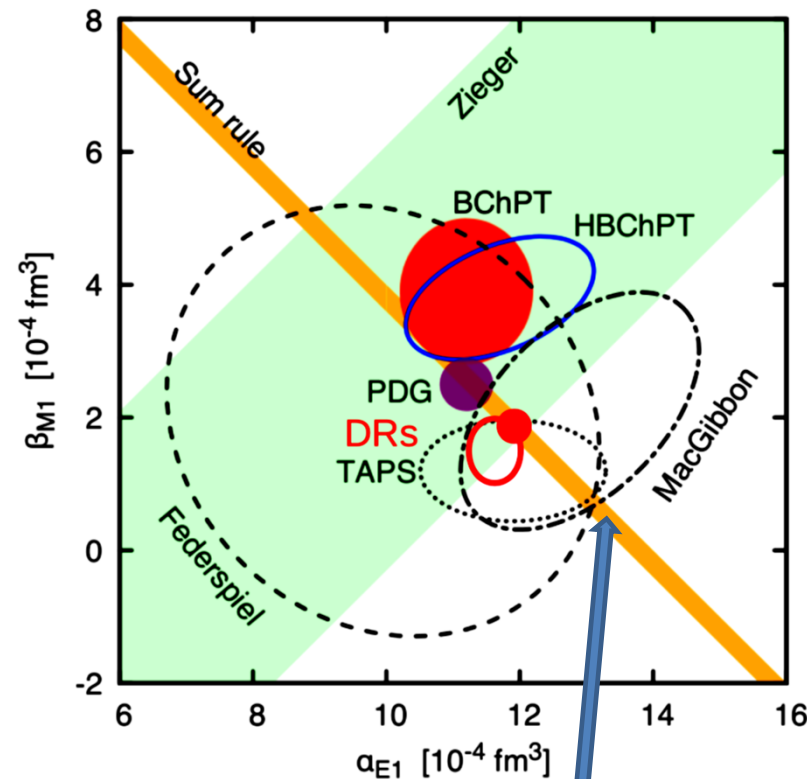
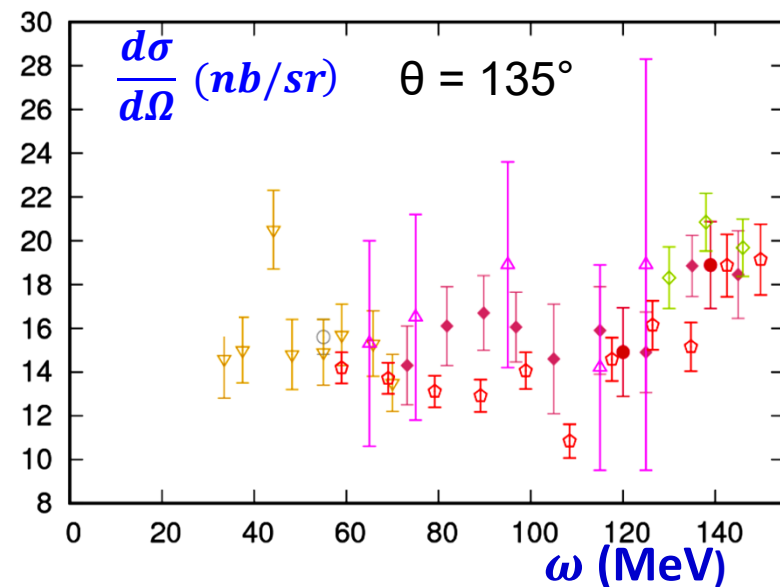


Polarizzabilità scalari: situazione sperimentale

(solo) 150 punti
finora pubblicati

*(Metà degli spartani che il re
Leonida guidò alla battaglia
delle Termopoli - 480 AC)*

Alcuni dei dati «migliori»



Regola di somma di Baldin : **somma**
($\alpha_{E1} + \beta_{M1}$) nota (con errore abbastanza
piccolo) da altre misure

($\omega < 150 \text{ MeV}$)

Livelli di confidenza
ricavati dal set
disponibile di dati
sperimentali usando
diversi modelli teorici

«qualità» del set di dati
da migliorare
(esperimento in corso a
Mainz)



Bassa sezione d'urto,
elevato background da
altri possibili canali di
reazione

Polarizzabilità di spin: stime di modelli e valori misurati

	K-mat.	HDPV	DPV	L_χ	HB χ PT	B χ PT	Mainz
γ_{E1E1}	-4.8	-4.3	-3.8	-3.7	-1.1 ± 1.8 (th)	-3.3	-3.5 ± 1.2
γ_{M1M1}	3.5	2.9	2.9	2.5	2.2 ± 0.5 (st) ± 0.7 (th)	3.0	3.16 ± 0.85
γ_{E1M2}	-1.8	-0.02	0.5	1.2	-0.4 ± 0.4 (th)	0.2	-0.7 ± 1.2
γ_{M1E2}	1.1	2.2	1.6	1.2	1.9 ± 0.4 (th)	1.1	1.99 ± 0.29
γ_0	2.0	-0.8	-1.1	-1.2	-2.6	-1.0	$-1.01 \pm 0.08 \pm 0.1$
γ_π	11.2	9.4	7.8	6.1	5.6	7.2	8.0 ± 1.8

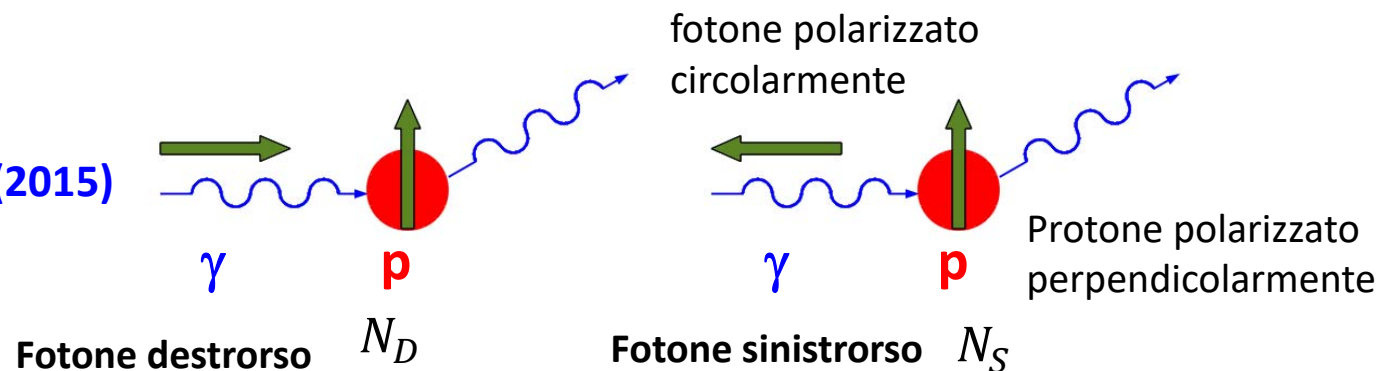
• Unità 10^{-4} fm^4

Modelli teorici basati su principi assai diversi: Matrice-K, Relazioni di Dispersione, Teorie di Perturbazione Chirale, Lagrangiana Effettiva, ...

altri dati

Un solo esperimento effettuato (Mainz):
P. Martel et al, Phys Rev Lett 114, 112501 (2015)

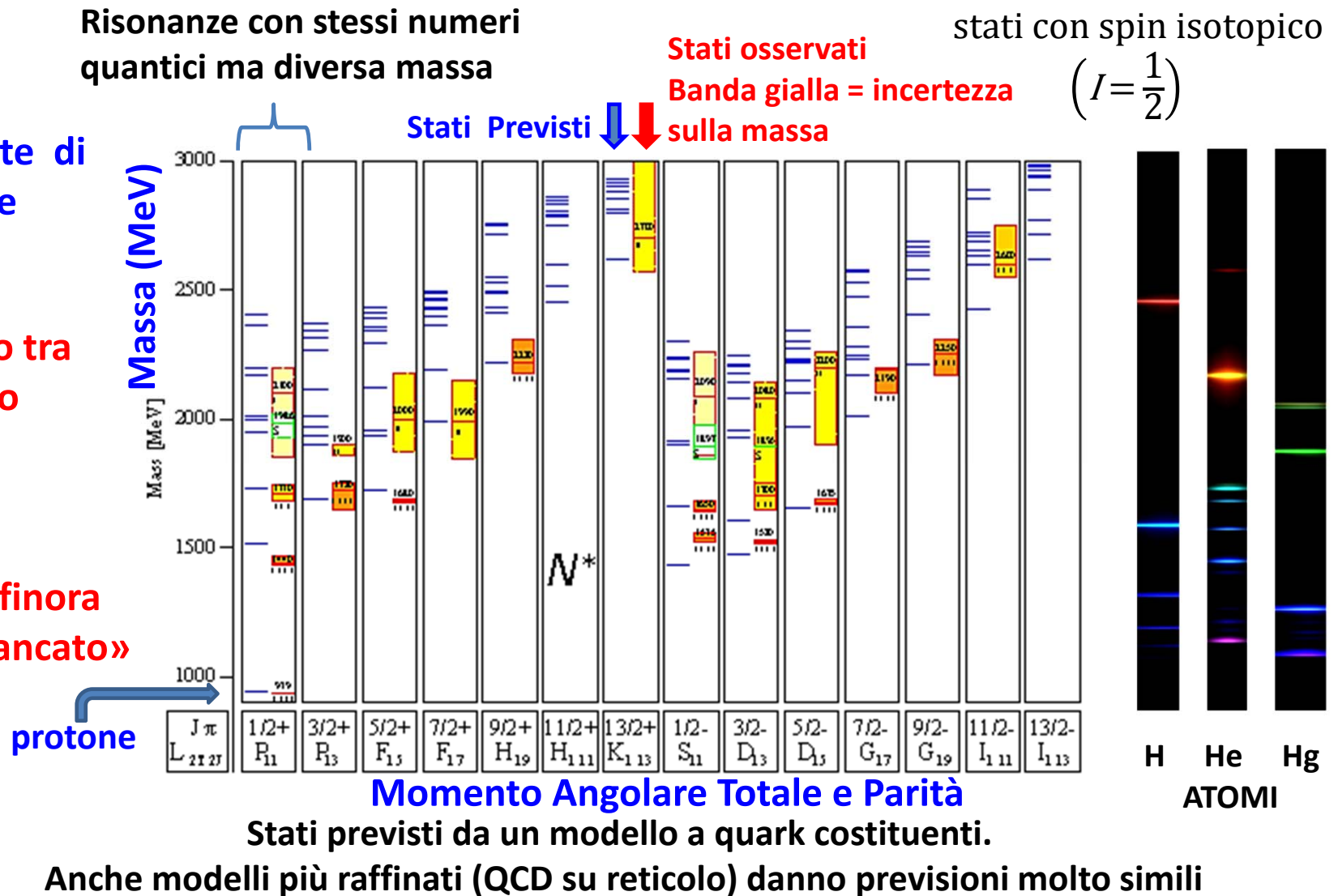
$$\text{Misurata: } Asimmetria = \frac{N_D - N_S}{N_D + N_S}$$



Come è strutturato lo spettro di eccitazione del protone ?

- Molte più risonanze predette teoricamente di quelle effettivamente finora trovate
- I quark interagiscono tra loro in maniera molto diversa da quanto pensiamo?
- Tutti gli esperimenti finora effettuati hanno «mancato» molte risonanze?

Ipotesi più probabile



Reazioni di singola fotoproduzione pionica

Il caso più semplice



N = protone oppure neutrone

Stati di spin

$\pm 1 \quad \pm 1/2$

risonanza

$0 \quad \pm 1/2$

Gradi di libertà

2×2

$\times 2$

8 funzioni complesse necessarie
per descrivere il processo

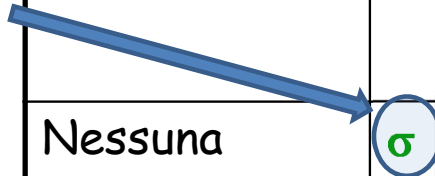
➤ Conservazione della parità $\Rightarrow$ solo 4 funzioni sono indipendenti

➤ 16 osservabili indipendenti (occorre misurarne almeno 8 per caratterizzare completamente il processo)

1 osservabile non polar. 3 osservabili di singola polarizzazione 12 di doppia polarizzazione

Polarizzazione Del fotone		Polarizzazione bersaglio			Polarizzazione del protone di rinculo			Polarizzazione combinata di bersaglio e protone di rinculo			
		X	Y	Z(fascio)	X'	Y'	Z'	X'	X'	Z'	Z'
								X	Z	X	Z
Nessuna	σ	-	T	-	-	P	-	T_x	L_x	T_z	L_z
Lineare	Σ	H	(-P)	G	O_x	(-T)	O_x	(-L _z)	(T _z)	(L _x)	(-T _x)
Circolare	-	F	-	E	C_x	-	C_z	-	-	-	-

La maggior
parte dei
dati ...



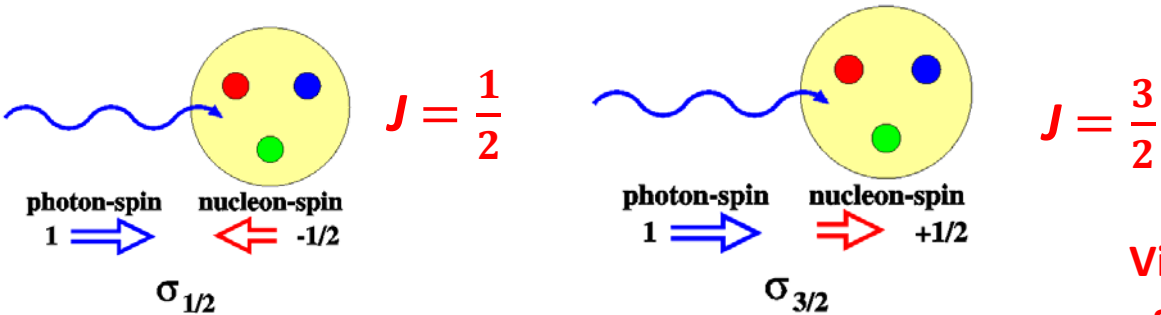
fotoni circolarmente polarizzati
protoni longitudinalmente polarizzati

$$\vec{\gamma} \vec{p} \rightarrow X$$

$$(X = N\pi + N\pi\pi + N\eta + \dots)$$

Asimmetria E

$$E = \frac{\sigma_{1/2} - \sigma_{3/2}}{\sigma_{1/2} + \sigma_{3/2}} = \frac{\sigma_{1/2} - \sigma_{3/2}}{2 \cdot \sigma_{\text{non polarizzata}}}$$



Vita media degli
stati risonanti
 $\approx 10^{-24}$ secondi

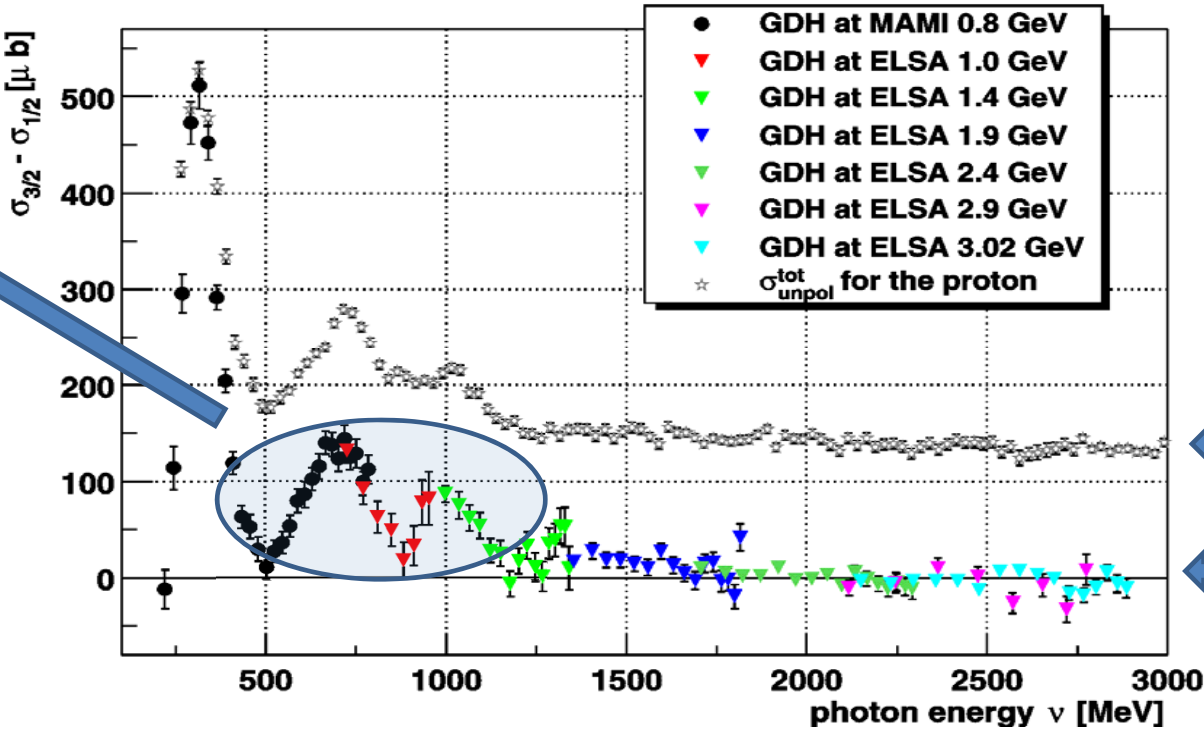
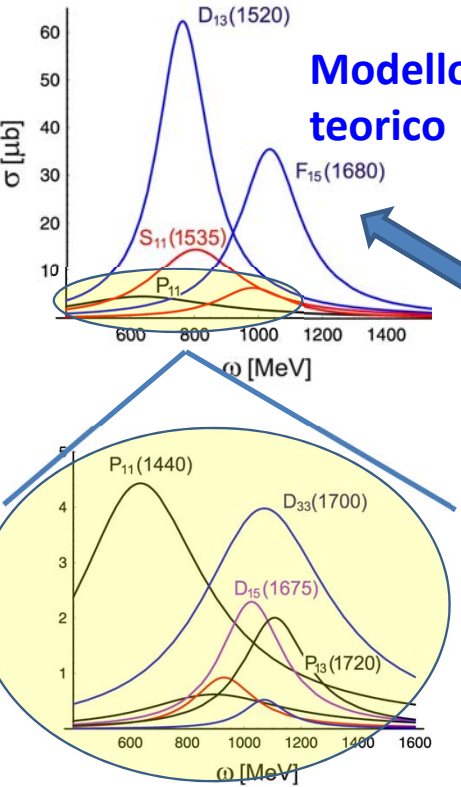
«Larghezza»
intrinseca dello
stato
 $\approx 100 - 150$ MeV

$\sigma_{\text{non polarizzata}}$

$(\sigma_{3/2} - \sigma_{1/2})$

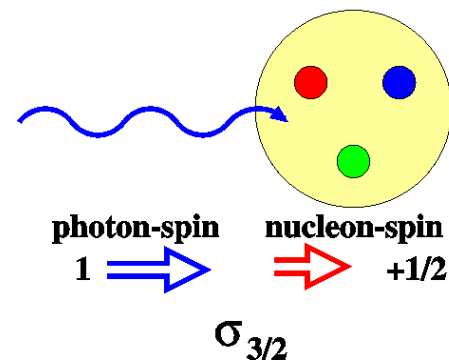
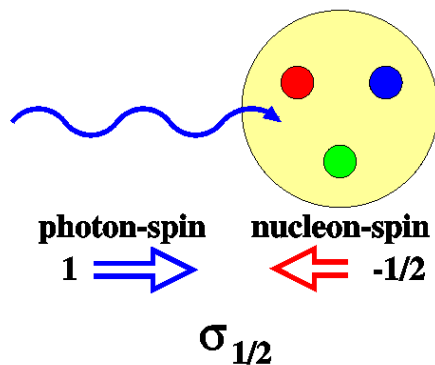
Misurata a Mainz e
Bonn

Modello
teorico



Regola di somma di Gerasimov–Drell–Hearn

- Formulata nel 1966 (prima verifica effettuata a Mainz-Bonn per il protone solo recentemente)
- Teorema che fornisce una predizione sulla sezione d'urto di assorbimento di fotoni circolarmente polarizzati da parte di protoni longitudinalmente polarizzati



- Basata su principi quantistici molto generali (causalità, teorema ottico, invarianza di gauge e di Lorentz)

momento magnetico
«anomalo» del protone

$$I_{GDH} = \int_0^\infty \frac{\sigma_{3/2}(E_\gamma) - \sigma_{1/2}(E_\gamma)}{E_\gamma} dE_\gamma = \frac{2\pi^2 \alpha}{m_p^2} \kappa^2$$

Momento magnetico $\mu_p = (1 + \kappa) \frac{e\hbar}{2m_p}$
del protone

- Uno degli ingredienti necessari per conoscere la «funzione di struttura di spin» del protone (frazione dello spin del protone portata dai quark di valenza)

$$\text{Spin} = \frac{1}{2} = \frac{1}{2} \sum \Delta q + L_q + \Delta g + L_g$$

Spin dei quark Momento orbitale dei quark Spin dei gluoni (gluoni hanno spin=1)

Momento orbitale dei gluoni

- Modelli a quark «naif» $\Rightarrow \Delta q = 1$ (solo quark di valenza)
- Modelli più «raffinati» $\Rightarrow \Delta q\text{-valenza} \sim 80\%$
- Risultati sperimentali
 - $\Rightarrow \Delta q\text{-valenza} \approx 20\%-30\%$
 - $\Rightarrow \Delta q\text{-virtuali} \approx 0\%$
 - $\Rightarrow \Delta g \approx 0\%$ (o di poco negativo ??)
 - $\Rightarrow L ??$

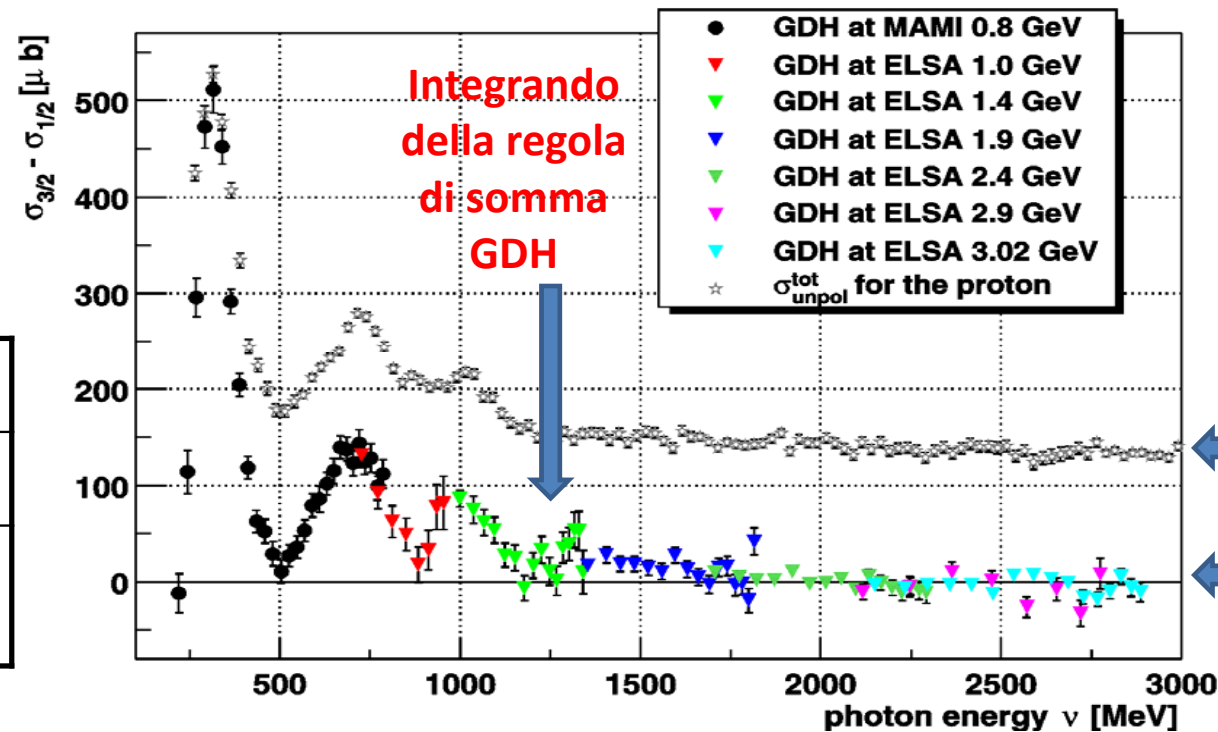
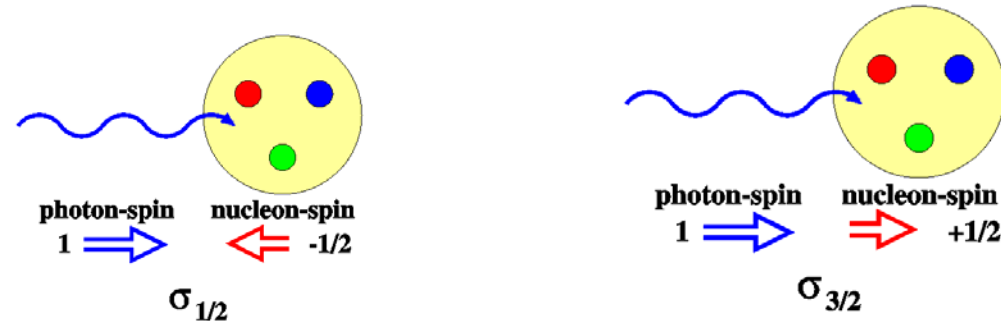
- Se non fosse verificata ?? Ipotesi più probabile $\Rightarrow$ quark non puntiformi !!

$$\vec{\gamma} \vec{p} \rightarrow X$$

$$(X = N\pi + N\pi\pi + N\eta + \dots)$$

Asimmetria E

$$E = \frac{\sigma_{1/2} - \sigma_{3/2}}{\sigma_{1/2} + \sigma_{3/2}} = \frac{\sigma_{1/2} - \sigma_{3/2}}{2 \cdot \sigma_{\text{non polarizzata}}}$$



	$I_{\text{GDH}} (\mu\text{b})$
Misura	$211 \pm 5 \pm 12$
Valore previsto	205

Chi sta attualmente lavorando a Pavia sulle fotoreazioni ?

➤ Ricerca Sperimentale

Sigla «MAMBO»

Gruppo inserito in una collaborazione di ricerca internazionale composta da circa 70 ricercatori provenienti da USA, Canada, Italia, Germania, Svizzera, Gran Bretagna, Russia

A. Braghieri

S. Costanza

P. Montagna

P. Pedroni

G. Scaffino (tesi magistrale)

➤ Ricerca Teorica

Sigla «NINPHA»

A. Bacchetta

M. Radici

B. Pasquini

V. Bertone, G. Bozzi, F. Celiberto, M. Garcia Echevarria (PostDocs)

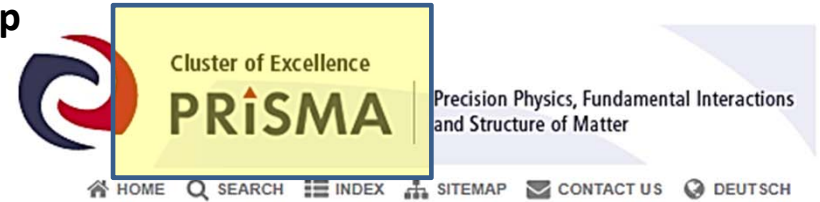
L. Bissolotti, F. Piacenza, S. Rodini, S. Sconfietti (PhD)

Il Dipartimento di Fisica Nucleare di Mainz è uno dei «Dipartimenti di Eccellenza» tedeschi

⇒ Possibilità di stages/tesi/PhD/PostDoc per studenti di Fisica dal 3° anno in su

Alcuni vostri colleghi li hanno già effettuati/li stanno effettuando

http://www.prisma.uni-mainz.de/internship_program.php



ABOUT RESEARCH MITP FACILITIES PEOPLE **CAREER** OUTREACH

About

Research

MITP

Facilities

People

► Career

Irène Joliot-Curie Programme

► PRISMA Internship Program

PRISMA Interns

Postdocs

Graduates

Jobs

Outreach

PRISMA Internship Program

PRISMA offers internships for outstanding graduates of bachelor's or master's degree programs in physics. The PRISMA Internship Program provides internships for a period of at least 8 weeks up to 12 weeks under the supervision of a faculty member.

Our Internships at a Glance

You are...

- an **excellent graduate** of a bachelor's or master's degree program in physics
- **looking for research experience abroad**

We provide:

- research internships throughout the year
- **networking opportunities** in physics at one of Germany's top universities
- **hands-on training**
- reimbursement of **travel costs up to 700,00 EUR** and **free accommodation** in Mainz

SEARCH

GO

[Link PRISMA Internship Website](#)

On the move | Establishing contacts with outstanding students worldwide:

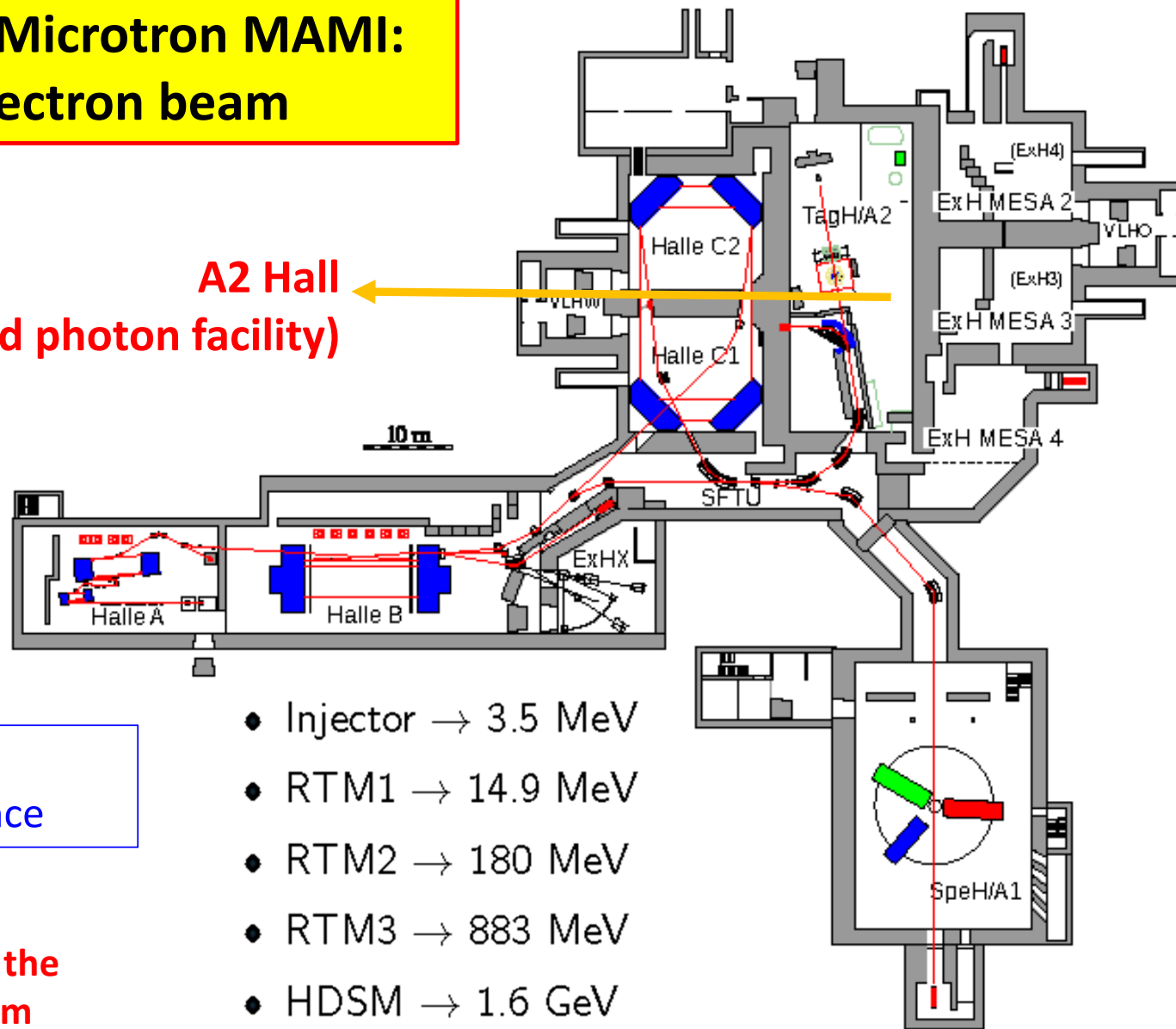
1. November 9, 2016
PRISMA Campus Tour 2016 - Science Fair, University of Glasgow, Glasgow [↗](#)
2. November 10, 2016
PRISMA Campus Tour 2016 - University of Edinburgh, Edinburgh [↗](#)
3. November 11, 2016
PRISMA Campus Tour 2016 - University of West Scotland, Glasgow [↗](#)
4. March 13 - March 17, 2017
Career Perspectives in Research @ American Physical Society [↗](#) - March Meeting, New Orleans
5. March 13 - March 17, 2017



You Want more...

Mainz Microtron MAMI: electron beam

A2 Hall
(Tagged photon facility)



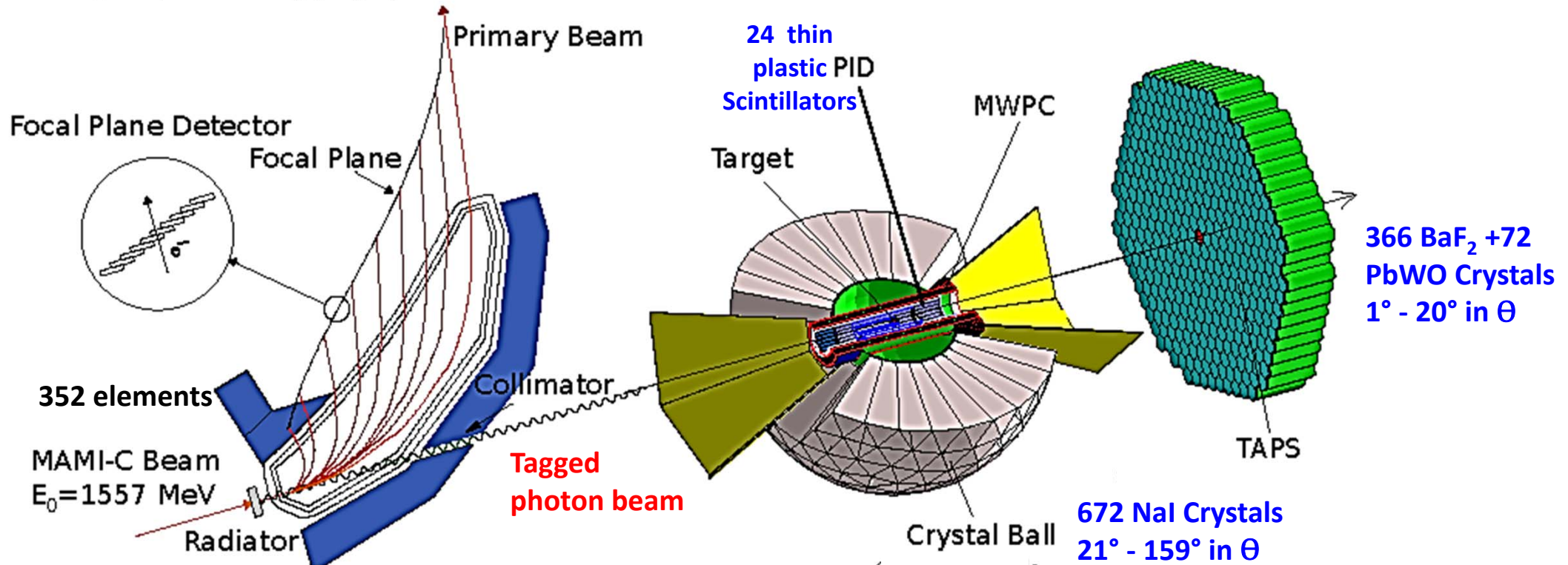
High stability
Low beam divergence



**Very good properties of the
secondary photon beam**

A2@MAMI: Detector overview

Glasgow photon tagging spectrometer



Photon beam produced by bremsstrahlung and tagged
by a magnetic spectrometer

$$E_\gamma = E_0 - E_{e^-} \quad ; \quad \Delta E_\gamma = 2 - 4 \text{ MeV}$$

Nucleon polarimeter
(graphite cylinder)
also available