

# Physique hadronique : Nouveaux développements



Physique  
hadronique

Introduction

Thématiques

Spectre des  
hadrons

Structure du  
nucléon

Matière dense et  
chaude

Processus et  
structure

Facteurs de  
forme

Distributions de  
partons

Distributions de  
partons  
généralisées

Imagerie 3D  
du nucléon

Principe de  
mesure

Statut théorique  
Plateforme de  
phénoménologie

Conclusion

H. Moutarde

Irfu/SPhN, CEA-Saclay

Congrès Général de la SFP

5 juillet 2013



# La Chromo Dynamique Quantique : un paradigme.

QCD est la **théorie** (et non pas une *théorie effective*) de l'interaction forte.

Physique  
hadronique

Introduction

Thématiques

- Spectre des hadrons
- Structure du nucléon
- Matière dense et chaude

Processus et structure

- Facteurs de forme
- Distributions de partons
- Distributions de partons généralisées

Imagerie 3D du nucléon

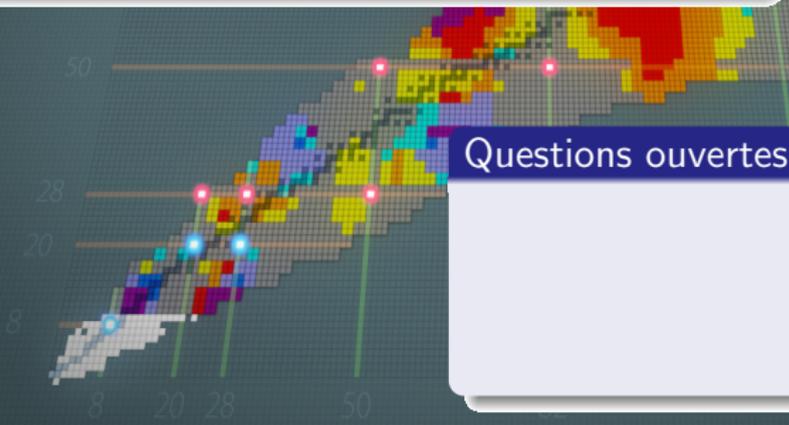
- Principe de mesure
- Statut théorique
- Plateforme de phénoménologie

Conclusion

Faits



Questions ouvertes



# La Chromo Dynamique Quantique : un paradigme.

QCD est la **théorie** (et non pas une *théorie effective*) de l'interaction forte.

Physique  
hadronique

Introduction

Thématiques

Spectre des  
hadrons  
Structure du  
nucléon  
Matière dense et  
chaude

Processus et  
structure

Facteurs de  
forme  
Distributions de  
partons  
Distributions de  
partons  
généralisées

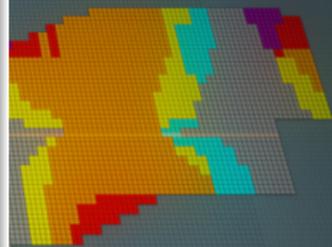
Imagerie 3D  
du nucléon

Principe de  
mesure  
Statut théorique  
Plateforme de  
phénoménologie

Conclusion

## Faits

- **Nombre restreint** de paramètres.



## Questions ouvertes

# La Chromo Dynamique Quantique : un paradigme.

QCD est la **théorie** (et non pas une *théorie effective*) de l'interaction forte.

Physique  
hadronique

Introduction

Thématiques

Spectre des  
hadrons  
Structure du  
nucléon  
Matière dense et  
chaude

Processus et  
structure

Facteurs de  
forme  
Distributions de  
partons  
Distributions de  
partons  
généralisées

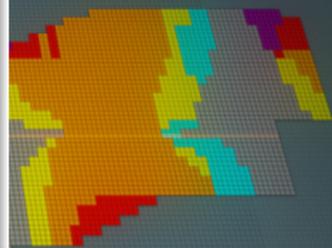
Imagerie 3D  
du nucléon

Principe de  
mesure  
Statut théorique  
Plateforme de  
phénoménologie

Conclusion

## Faits

- **Nombre restreint** de paramètres.
- Mathématiquement **cohérente**.



## Questions ouvertes

# La Chromo Dynamique Quantique : un paradigme.

QCD est la **théorie** (et non pas une *théorie effective*) de l'interaction forte.

Physique  
hadronique

Introduction

Thématiques

Spectre des  
hadrons

Structure du  
nucléon

Matière dense et  
chaude

Processus et  
structure

Facteurs de  
forme

Distributions de  
partons

Distributions de  
partons  
généralisées

Imagerie 3D  
du nucléon

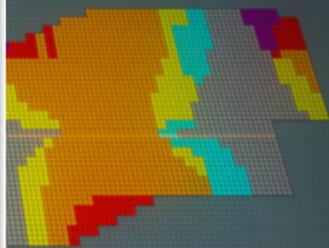
Principe de  
mesure

Statut théorique  
Plateforme de  
phénoménologie

Conclusion

## Faits

- **Nombre restreint** de paramètres.
- Mathématiquement **cohérente**.
- **Vaste** domaine d'application.



## Questions ouvertes

# La Chromo Dynamique Quantique : un paradigme.

QCD est la **théorie** (et non pas une *théorie effective*) de l'interaction forte.

Physique  
hadronique

Introduction

Thématiques

Spectre des  
hadrons

Structure du  
nucléon

Matière dense et  
chaude

Processus et  
structure

Facteurs de  
forme

Distributions de  
partons

Distributions de  
partons  
généralisées

Imagerie 3D  
du nucléon

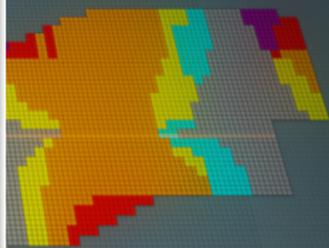
Principe de  
mesure

Statut théorique  
Plateforme de  
phénoménologie

Conclusion

## Faits

- **Nombre restreint** de paramètres.
- Mathématiquement **cohérente**.
- **Vaste** domaine d'application.
- Validée : **énergie considérable**  $\lesssim 8$  TeV.



## Questions ouvertes

# La Chromo Dynamique Quantique : un paradigme.

QCD est la **théorie** (et non pas une *théorie effective*) de l'interaction forte.

Physique  
hadronique

Introduction

Thématiques

Spectre des  
hadrons  
Structure du  
nucléon  
Matière dense et  
chaude

Processus et  
structure

Facteurs de  
forme  
Distributions de  
partons  
Distributions de  
partons  
généralisées

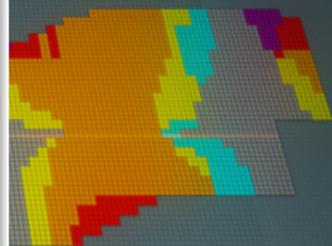
Imagerie 3D  
du nucléon

Principe de  
mesure  
Statut théorique  
Plateforme de  
phénoménologie

Conclusion

## Faits

- **Nombre restreint** de paramètres.
- Mathématiquement **cohérente**.
- **Vaste** domaine d'application.
- Validée : **énergie considérable**  $\lesssim 8$  TeV.
- Réponse **algorithmique** précise.



## Questions ouvertes

# La Chromo Dynamique Quantique : un paradigme.

QCD est la **théorie** (et non pas une *théorie effective*) de l'interaction forte.

Physique  
hadronique

Introduction

Thématiques

Spectre des  
hadrons  
Structure du  
nucléon  
Matière dense et  
chaude

Processus et  
structure

Facteurs de  
forme  
Distributions de  
partons  
Distributions de  
partons  
généralisées

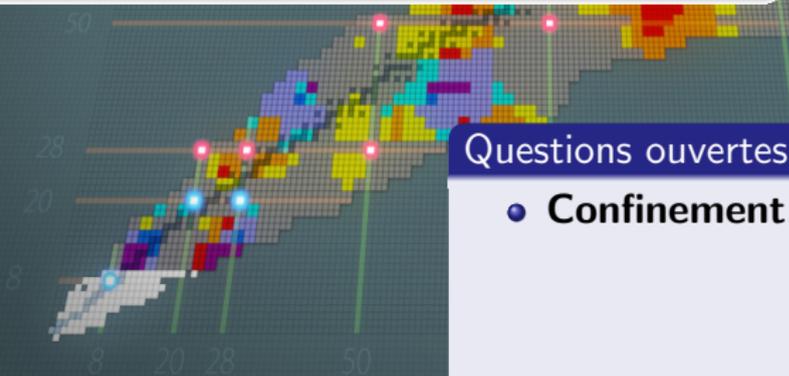
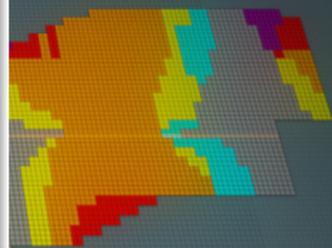
Imagerie 3D  
du nucléon

Principe de  
mesure  
Statut théorique  
Plateforme de  
phénoménologie

Conclusion

## Faits

- **Nombre restreint** de paramètres.
- Mathématiquement **cohérente**.
- **Vaste** domaine d'application.
- Validée : **énergie considérable**  $\simeq 8$  TeV.
- Réponse **algorithmique** précise.



## Questions ouvertes

- **Confinement.**

# La Chromo Dynamique Quantique : un paradigme.

QCD est la **théorie** (et non pas une *théorie effective*) de l'interaction forte.

Physique  
hadronique

Introduction

Thématiques

Spectre des  
hadrons

Structure du  
nucléon

Matière dense et  
chaude

Processus et  
structure

Facteurs de  
forme

Distributions de  
partons

Distributions de  
partons  
généralisées

Imagerie 3D  
du nucléon

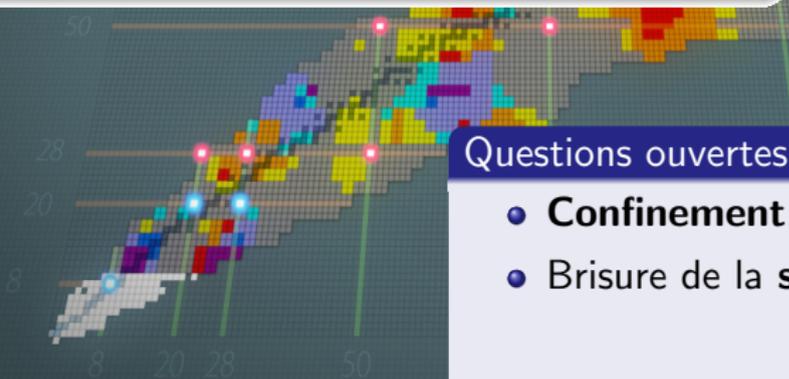
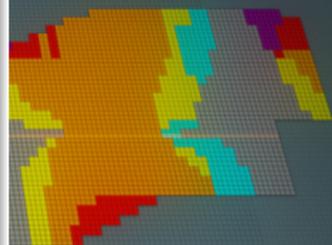
Principe de  
mesure

Statut théorique  
Plateforme de  
phénoménologie

Conclusion

## Faits

- **Nombre restreint** de paramètres.
- Mathématiquement **cohérente**.
- **Vaste** domaine d'application.
- Validée : **énergie considérable**  $\lesssim 8$  TeV.
- Réponse **algorithmique** précise.



## Questions ouvertes

- **Confinement**.
- Brisure de la **symétrie chirale**.

# La Chromo Dynamique Quantique : un paradigme.

QCD est la **théorie** (et non pas une *théorie effective*) de l'interaction forte.

Physique  
hadronique

Introduction

Thématiques

Spectre des  
hadrons

Structure du  
nucléon

Matière dense et  
chaude

Processus et  
structure

Facteurs de  
forme

Distributions de  
partons

Distributions de  
partons  
généralisées

Imagerie 3D  
du nucléon

Principe de  
mesure

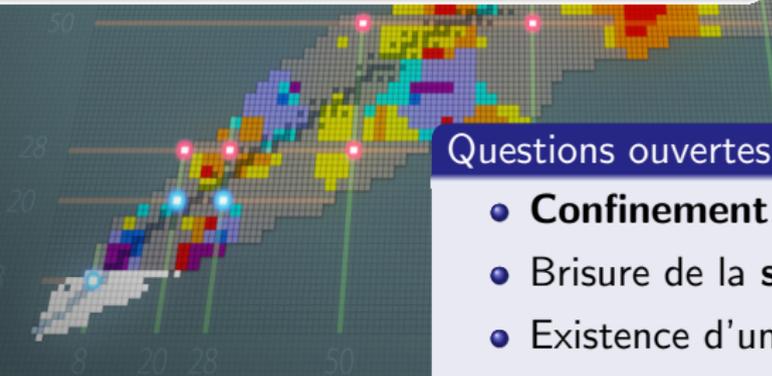
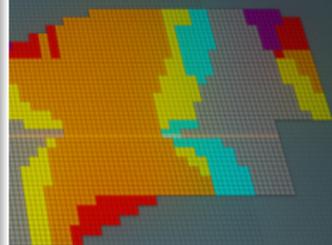
Statut théorique

Plateforme de  
phénoménologie

Conclusion

## Faits

- **Nombre restreint** de paramètres.
- Mathématiquement **cohérente**.
- **Vaste** domaine d'application.
- Validée : **énergie considérable**  $\lesssim 8$  TeV.
- Réponse **algorithmique** précise.



## Questions ouvertes

- **Confinement**.
- Brisure de la **symétrie chirale**.
- Existence d'un "mass gap".

# La Chromo Dynamique Quantique : un paradigme.

QCD est la **théorie** (et non pas une *théorie effective*) de l'interaction forte.

Physique  
hadronique

Introduction

Thématiques

Spectre des  
hadrons

Structure du  
nucléon

Matière dense et  
chaude

Processus et  
structure

Facteurs de  
forme

Distributions de  
partons

Distributions de  
partons  
généralisées

Imagerie 3D  
du nucléon

Principe de  
mesure

Statut théorique  
Plateforme de  
phénoménologie

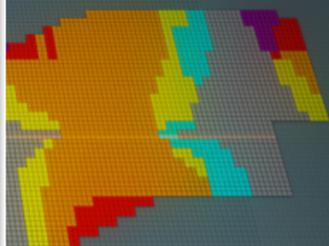
Conclusion

## Pas d'observation directe (PDG 2009)

### FREE QUARK SEARCHES

The basis for much of the theory of particle scattering and hadron spectroscopy is the construction of the hadrons from a set of fractionally charged constituents (quarks). **A central but unproven hypothesis of this theory, Quantum Chromodynamics, is that quarks cannot be observed as free particles but are confined to mesons and baryons.**

Experiments show that it is at best difficult to “unglue” quarks. Accelerator searches at increasing energies have produced **no evidence for free quarks, while only a few cosmic-ray and matter searches have produced uncorroborated events.**



## Questions ouvertes

- **Confinement.**
- Brisure de la **symétrie chirale.**
- Existence d'un " **mass gap**".

# La Chromo Dynamique Quantique : un paradigme.

QCD est la **théorie** (et non pas une *théorie effective*) de l'interaction forte.

Physique  
hadronique

Introduction

Thématiques

Spectre des  
hadrons  
Structure du  
nucléon  
Matière dense et  
chaude

Processus et  
structure

Facteurs de  
forme  
Distributions de  
partons  
Distributions de  
partons  
généralisées

Imagerie 3D  
du nucléon

Principe de  
mesure  
Statut théorique  
Plateforme de  
phénoménologie

Conclusion

## Des quarks aux hadrons

- Quels sont les **degrés de liberté** appropriés ?
- Quelles sont les **forces effectives** entre eux ?



## Questions ouvertes

- **Confinement.**
- Brisure de la **symétrie chirale.**
- Existence d'un "mass gap".

# La Chromo Dynamique Quantique : un paradigme.

QCD est la **théorie** (et non pas une *théorie effective*) de l'interaction forte.

Physique  
hadronique

Introduction

Thématiques

Spectre des  
hadrons  
Structure du  
nucléon  
Matière dense et  
chaude

Processus et  
structure

Facteurs de  
forme  
Distributions de  
partons  
Distributions de  
partons  
généralisées

Imagerie 3D  
du nucléon

Principe de  
mesure  
Statut théorique  
Plateforme de  
phénoménologie

Conclusion

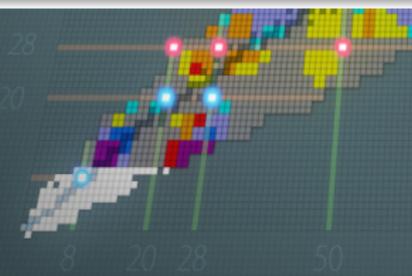
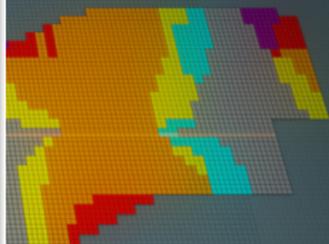
## Clay Millennium Prize (A. Jaffe et E. Witten)

QUANTUM YANG-MILLS THEORY

5

Finally, QFT is the jumping-off point for a quest that may prove central in 21st century physics—the effort to unify gravity and quantum mechanics, perhaps in string theory. For mathematicians to participate in this quest, or even to understand the possible results, QFT must be developed further as a branch of mathematics. It is important not only to understand the solution of specific problems arising from physics, but also to set such results within a new mathematical framework. One hopes that this framework will provide a unified development of several fields of mathematics and physics, and that it will also provide an arena for the development of new mathematics and physics.

For these reasons the Scientific Advisory Board of CMI has chosen a Millennium problem about quantum gauge theories. Solution of the problem requires both understanding one of the deep unsolved physics mysteries, the existence of a mass gap, and also producing a mathematically complete example of quantum gauge field theory in four-dimensional space-time.



## Questions ouvertes

- **Confinement.**
- Brisure de la **symétrie chirale.**
- Existence d'un " **mass gap** " .

# La Chromo Dynamique Quantique : un paradigme.

QCD est la **théorie** (et non pas une *théorie effective*) de l'interaction forte.

Physique  
hadronique

Introduction

Thématiques

Spectre des  
hadrons  
Structure du  
nucléon  
Matière dense et  
chaude

Processus et  
structure

Facteurs de  
forme  
Distributions de  
partons  
Distributions de  
partons  
généralisées

Imagerie 3D  
du nucléon

Principe de  
mesure  
Statut théorique  
Plateforme de  
phénoménologie

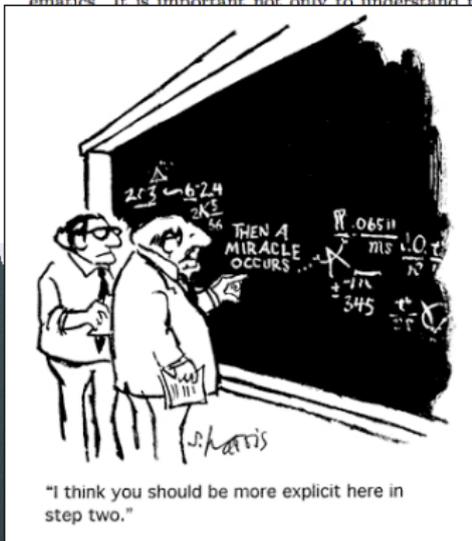
Conclusion

## Clay Millennium Prize (A. Jaffe et E. Witten)

QUANTUM YANG-MILLS THEORY

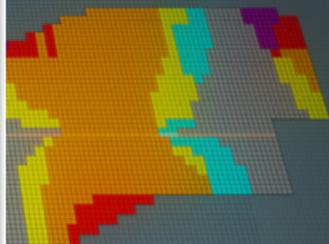
5

Finally, QFT is the jumping-off point for a quest that may prove central in 21st century physics—the effort to unify gravity and quantum mechanics, perhaps in string theory. For mathematicians to participate in this quest, or even to understand the possible results, QFT must be developed further as a branch of mathematics. It is important not only to understand the solution of specific problems



within a new mathematical framework. A unified development of several such problems will also provide an arena for the

of CMI has chosen a Millennium Prize problem. The solution of the problem requires both mathematical techniques, the existence of a mass gap is an example of quantum gauge



## Questions ouvertes

- **Confinement.**
- Brisure de la **symétrie chirale.**
- Existence d'un "mass gap".

# De la théorie à la mesure.

Le rôle clé de la **liberté asymptotique**.

Physique hadronique

Introduction

Thématiques

Spectre des hadrons

Structure du nucléon

Matière dense et chaude

Processus et structure

Facteurs de forme

Distributions de partons

Distributions de partons généralisées

Imagerie 3D du nucléon

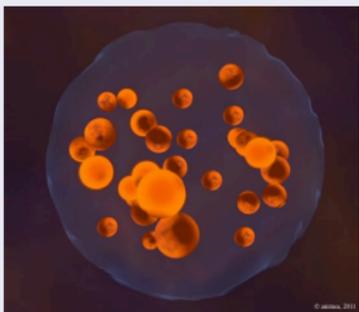
Principe de mesure

Statut théorique

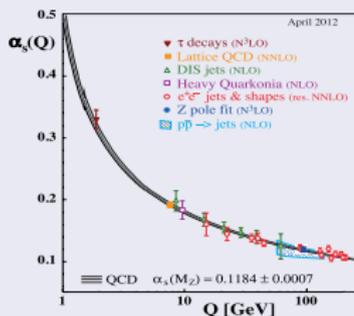
Plateforme de phénoménologie

Conclusion

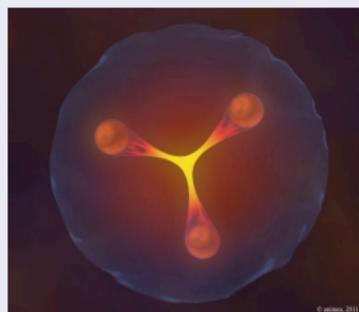
QCD  
Perturbative



Liberté  
asymptotique



QCD  
non-perturbative



QCD Perturbative ET non-perturbative à l'oeuvre

- Objets **universels** décrivant la structure à **grande distance**.
- Liens aux observables par des théorèmes de **factorisation**.
- **Connaissance expérimentale** de QCD non-perturbative.

# Quel sont les baryons de moins de 10 GeV ?

Origine de la masse, ou la *masse sans la masse*.

- Résonances décrites par QCD, (masses des quarks + constante de couplage).

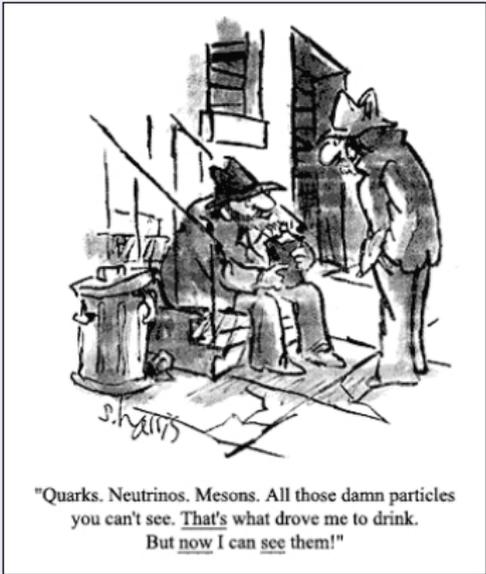
Particule	Overall $L_{21,2,1}$ status	Status as seen in —						
		$N\pi$	$N\eta$	$AK$	$SK$	$\Delta\pi$	$N\rho$	$N\gamma$
$N(939)$	$P_{11}$	****						
$N(1440)$	$P_{11}$	****	**** *			*** *	***	
$N(1520)$	$D_{13}$	****	**** ***			**** ****	****	
$N(1535)$	$S_{11}$	****	**** ****			*	***	
$N(1650)$	$S_{11}$	****	**** *	*** **		**** **	***	
$N(1675)$	$D_{15}$	****	**** *			**** *	****	
$N(1680)$	$F_{15}$	****	**** *			**** ****	****	
$N(1700)$	$D_{13}$	***	*** *	** *		** *	**	
$N(1710)$	$P_{11}$	***	*** **	** *		** *	**	
$N(1720)$	$F_{13}$	****	**** *	** *		*	**	
$N(1900)$	$P_{13}$	**	**				*	
$N(1990)$	$F_{17}$	**	** *	*		*	*	
$N(2000)$	$F_{15}$	**	** *	*		*	**	
$N(2080)$	$D_{13}$	**	** *	*		*	*	
$N(2090)$	$S_{11}$	*	*					
$N(2100)$	$P_{11}$	*	*					
$N(2190)$	$G_{17}$	****	**** *	*	*		*	
$N(2200)$	$D_{15}$	**	** *	*				
$N(2220)$	$H_{19}$	****	**** *					
$N(2250)$	$G_{19}$	****	**** *					
$N(2600)$	$J_{111}$	***	***					
$N(2700)$	$K_{113}$	**	**					
$\Delta(1232)$	$P_{33}$	****	**** F					
$\Delta(1600)$	$P_{33}$	***	*** o			*** *	**	
$\Delta(1620)$	$S_{31}$	****	**** r			**** ****	***	
$\Delta(1700)$	$D_{33}$	****	**** b	*		**** **	***	
$\Delta(1750)$	$P_{31}$	*	*	i				
$\Delta(1900)$	$S_{31}$	**	**	d	*	*	** *	*
$\Delta(1905)$	$F_{35}$	****	****	d	*	** **	***	
$\Delta(1910)$	$P_{31}$	****	****	c	*	*	*	
$\Delta(1920)$	$F_{33}$	***	***	n	*	**	*	
$\Delta(1930)$	$D_{35}$	****	****	*		*	**	
$\Delta(1940)$	$D_{33}$	*	*	F				
$\Delta(1950)$	$F_{37}$	****	****	o	*	**** *	****	
$\Delta(2000)$	$F_{35}$	**	**	r		**		
$\Delta(2150)$	$S_{31}$	*	*	b				
$\Delta(2200)$	$G_{37}$	*	*	i				
$\Delta(2300)$	$H_{39}$	**	**	d				
$\Delta(2350)$	$D_{35}$	*	*	d				
$\Delta(2390)$	$F_{37}$	*	*	e				
$\Delta(2400)$	$G_{39}$	**	**	n				
$\Delta(2420)$	$H_{311}$	****	****				*	
$\Delta(2750)$	$J_{313}$	**	**					
$\Delta(2950)$	$K_{315}$	**	**					

# Quel sont les baryons de moins de 10 GeV ?

Origine de la masse, ou la *masse sans la masse*.

Particule	Overall $L_{21,2,1}$ status	Status as seen in						
		$N\pi$	$N\eta$	$AK$	$SK$	$\Delta\pi$	$N\rho$	$N\gamma$
$N(9)$								
$N(8)$								
$N(7)$								
$N(6)$								
$N(5)$								
$N(4)$								
$N(3)$								
$N(2)$								
$N(1)$								
$N(0)$								
$\Delta(20)$								
$\Delta(19)$								
$\Delta(18)$								
$\Delta(17)$								
$\Delta(16)$								
$\Delta(15)$								
$\Delta(14)$								
$\Delta(13)$								
$\Delta(12)$								
$\Delta(11)$								
$\Delta(10)$								
$\Delta(9)$								
$\Delta(8)$								
$\Delta(7)$								
$\Delta(6)$								
$\Delta(5)$								
$\Delta(4)$								
$\Delta(3)$								
$\Delta(2)$								
$\Delta(1)$								
$\Delta(0)$								
$\Delta(240)$	$H_{3,11}$	****	****					
$\Delta(2420)$	$H_{3,11}$	****	****					
$\Delta(2750)$	$I_{3,13}$	**	**					
$\Delta(2950)$	$K_{3,15}$	**	**					

## Une multitude d'états liés



- Résonances décrites par QCD, (**masses des quarks + constante de couplage**).
- Succès du modèle des quarks mais **résonances manquantes**.

# Quel sont les baryons de moins de 10 GeV ?

Origine de la masse, ou la *masse sans la masse*.

Physique hadronique

Introduction

Thématiques

Spectre des hadrons

Structure du nucléon

Matière dense et chaude

Processus et structure

Facteurs de forme

Distributions de partons

Distributions de partons généralisées

Imagerie 3D du nucléon

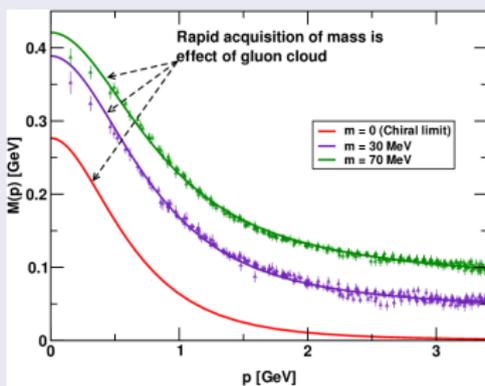
Principe de mesure

Statut théorique  
Plateforme de phénoménologie

Conclusion

Particule	Overall $L_{21,23}$ status	Status as seen in —						
		$N\pi$	$N\eta$	$AK$	$SK$	$\Delta\pi$	$N\rho$	$N\gamma$
$N(939)$	$P_{11}$	****						
$N(1440)$	$P_{11}$	****	*			***	*	***
$N(1535)$	$S_{11}$	****						
$N(1650)$	$S_{11}$	****						
$N(1680)$	$D_{13}$	****						
$N(1700)$	$D_{13}$	****						
$N(1720)$	$D_{13}$	****						
$N(1770)$	$D_{13}$	****						
$N(1880)$	$D_{13}$	****						
$N(1900)$	$D_{13}$	****						
$N(1950)$	$D_{13}$	****						
$N(2000)$	$D_{13}$	****						
$N(2010)$	$D_{13}$	****						
$N(2030)$	$D_{13}$	****						
$N(2070)$	$D_{13}$	****						
$N(2100)$	$D_{13}$	****						
$N(2120)$	$D_{13}$	****						
$N(2190)$	$D_{13}$	****						
$N(2200)$	$D_{13}$	****						
$N(2250)$	$D_{13}$	****						
$N(2270)$	$D_{13}$	****						
$N(2300)$	$D_{13}$	****						
$N(2380)$	$D_{13}$	****						
$N(2430)$	$D_{13}$	****						
$N(2440)$	$H_{3,11}$	****	****					*
$N(2470)$	$H_{3,11}$	****	****					
$N(2750)$	$F_{3,13}$	**	**					
$N(2950)$	$K_{3,15}$	**	**					

Masse de courant ou masse constituante ?



Roberts, arXiv:1203.5341

- Résonances décrites par QCD, (**masses des quarks + constante de couplage**).
- Succès du modèle des quarks mais **résonances manquantes**.
- Programmes **expérimentaux** et **théoriques** internationaux pour répondre à cette question.

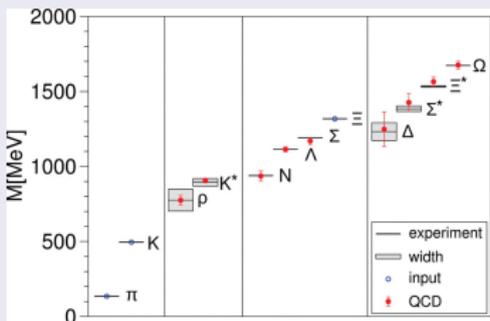


# Quel sont les baryons de moins de 10 GeV ?

Origine de la masse, ou la *masse sans la masse*.

Particule	Overall $L_{21,22}$ status	Status as seen in —						
		$N\pi$	$N\eta$	$AK$	$\Sigma K$	$\Delta\pi$	$N\rho$	$N\gamma$
$N(939)$	$P_{11}$	****						
$N(1470)$	$P_{11}$	****						
$N(1535)$	$S_{11}$	****						
$N(1650)$	$S_{11}$	****						
$N(1680)$	$D_{13}$	****						
$N(1700)$	$D_{13}$	****						
$N(1720)$	$D_{13}$	****						
$N(1775)$	$D_{13}$	****						
$N(1880)$	$D_{13}$	****						
$N(1900)$	$D_{13}$	****						
$N(1940)$	$D_{13}$	****						
$N(2000)$	$D_{13}$	****						
$N(2080)$	$D_{13}$	****						
$N(2100)$	$D_{13}$	****						
$N(2190)$	$D_{13}$	****						
$N(2200)$	$D_{13}$	****						
$N(2250)$	$D_{13}$	****						
$N(2280)$	$D_{13}$	****						
$N(2300)$	$D_{13}$	****						
$N(2380)$	$D_{13}$	****						
$N(2400)$	$G_{33}$	**	**	**				
$N(2420)$	$H_{3,11}$	****	****					*
$N(2750)$	$J_{3,13}$	**	**					
$N(2950)$	$K_{3,15}$	**	**					

## Hadrons légers (unquenched)



Durr *et al.*  
 Science **322**, 1224 (2008)  
 ↪ Exposé L. Lellouch.

- Résonances décrites par QCD, (**masses des quarks + constante de couplage**).
- Succès du modèle des quarks mais **résonances manquantes**.
- Programmes **expérimentaux** et **théoriques** internationaux pour répondre à cette question.
- Rôle essentiel de **QCD sur réseau**.
- **Faible impact** de la masse des quarks  $u$  et  $d$ .

# Quel sont les baryons de moins de 10 GeV ?

Origine de la masse, ou la *masse sans la masse*.

Physique hadronique

Introduction

Thématiques

Spectre des hadrons

Structure du nucléon

Matière dense et chaude

Processus et structure

Facteurs de forme

Distributions de partons

Distributions de partons généralisées

Imagerie 3D du nucléon

Principe de mesure

Statut théorique

Plateforme de phénoménologie

Conclusion

Particule	Overall $L_{21,23}$ status	Status as seen in —						
		$N\pi$	$N\eta$	$AK$	$\Sigma K$	$\Delta\pi$	$N\rho$	$N\gamma$
$N(939)$	$P_{11}$	****						
$N(1440)$	$P_{11}$	**** *						
$N(1520)$	$D_{13}$	****	****	***		***	*	***
$N(1535)$	$S_{11}$	****	****	****		*	**	***
$N(1650)$	$S_{11}$	****	**** *		*** **	***	**	***
$N(1675)$	$D_{15}$	****	**** *			****	**	****
$N(1680)$	$F_{15}$	****	**** *			****	****	****
$N(1700)$	$D_{13}$	***	*** *	**	*	**	*	***
$N(1710)$	$P_{11}$	***	*** **	**	*	**	*	***
$N(1720)$	$P_{13}$	****	**** *	**	*	**	*	***
$N(1730)$	$P_{13}$	****	**** *	**	*	**	*	***
$N(1770)$	$P_{11}$	****	**** *	**	*	**	*	***
$N(1830)$	$P_{11}$	****	**** *	**	*	**	*	***
$N(1875)$	$P_{11}$	****	**** *	**	*	**	*	***
$N(1900)$	$P_{11}$	****	**** *	**	*	**	*	***
$N(1950)$	$P_{11}$	****	**** *	**	*	**	*	***
$\Delta(1232)$	$P_{33}$	****	**** *	**	*	**	*	***
$\Delta(1600)$	$F_{35}$	****	**** *	**	*	**	*	***
$\Delta(1900)$	$F_{35}$	****	**** *	**	*	**	*	***
$\Delta(1940)$	$D_{33}$	****	**** *	**	*	**	*	***
$\Delta(1950)$	$F_{37}$	****	**** *	**	*	**	*	***
$\Delta(2000)$	$F_{35}$	****	**** *	**	*	**	*	***
$\Delta(2150)$	$S_{31}$	****	**** *	**	*	**	*	***
$\Delta(2200)$	$G_{37}$	****	**** *	**	*	**	*	***
$\Delta(2300)$	$H_{39}$	****	**** *	**	*	**	*	***
$\Delta(2350)$	$D_{35}$	****	**** *	**	*	**	*	***
$\Delta(2390)$	$F_{37}$	****	**** *	**	*	**	*	***
$\Delta(2400)$	$G_{39}$	****	**** *	**	*	**	*	***
$\Delta(2420)$	$H_{311}$	****	**** *	**	*	**	*	***
$\Delta(2750)$	$J_{313}$	****	**** *	**	*	**	*	***
$\Delta(2950)$	$K_{315}$	****	**** *	**	*	**	*	***

Une assemblée de nucléons et d'électrons



- Résonances décrites par QCD, (**masses des quarks + constante de couplage**).
- Succès du modèle des quarks mais **résonances manquantes**.
- Programmes **expérimentaux** et **théoriques** internationaux pour répondre à cette question.
- Rôle essentiel de **QCD sur réseau**.
- **Faible impact** de la masse des quarks  $u$  et  $d$ .
- QCD est responsable de  $\gtrsim 95\%$  de la **masse de l'univers observé** !

# Construire le nucléon avec quarks et gluons.

Le nucléon contient un nombre **arbitraire** et **variable** de quarks et gluons.

## Une question structurante pour la communauté

PHYSICS

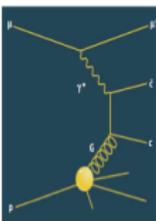
### How Does the Proton Spin?

Steven D. Bass

Many particles, such as electrons, protons, and neutrons, behave like spinning tops. Unlike classical tops, however, the spin of these particles is an intrinsic quantum mechanical phenomenon. This spin is responsible for many fundamental properties of matter, including the proton's magnetic moment, the different phases of matter in low-temperature physics, the properties of neutron stars, and the stability of the known universe. In recent experiments, a number of research groups have been seeking to shed some light on the puzzling origin of spin and how this might resolve some large discrepancies between theory and experiment.

Particles such as the proton are actually combinations of more basic entities called quarks and gluons (which bind the quarks together). One of the challenges to physicists over the past 20 years has been to understand how the proton's spin is built up from its quark and gluon constituents. **Models of the proton generally predict that about 80% of the proton's spin should be carried by the intrinsic spin of its three quarks, with the rest carried by orbital angular momentum** (that is, the quarks flying around inside the proton). However, experiments at CERN (European Organization for Nuclear Research), DESY (Deutscher Elektronensynchrotron), and SLAC (Stanford

The author is at the Institute for Theoretical Physics, Universität Innsbruck, A6020 Innsbruck, Austria. E-mail: sbass@ipf.tuw.at



Linear Accelerator Center) have taught us that the contribution from the spin of the quarks inside is small, only about 30% (1-4). This shortfall offers a substantial challenge to our understanding about the structure of the proton. To sort this out, a vigorous global program has produced about 1000 theoretical papers, and dedicated spin experiments are under way at CERN, DESY, Jefferson Laboratory, and RHIC (Relativistic Heavy Ion Collider) to map individual quark and gluon angular momentum contributions to the proton's spin. These experiments are now yielding exciting results (5).

The proton is described by quantum chromodynamics (QCD), the theory of quarks and gluons as a bound state of three confined "valence" quarks (6). The quarks have spin 1/2 and interact through the exchange of glu-

ons, which have a spin of 1 (where spin is quoted in units of Planck's constant divided by  $\hbar$ ). When we probe deep inside the proton, the strength of quark-gluon and gluon-gluon interactions is small because of "asymptotic freedom." This unusual idea means that, unlike some interactions, such as electrostatic forces, the force between quarks and gluons weakens as they get closer together. If a quark tries to escape, though, the force becomes stronger—so strong, in fact, that the quarks and gluons are always bound inside nuclear particles such as the proton; they are never observed by themselves as free particles.

**Spin stars.** Physicists use Feynman diagrams such as this to express the sequence of events in a high-energy particle collision. In one type of experiment, a polarized muon ( $\mu$ ) and a polarized proton ( $p$ ) approach each other on the left hand side. As they interact, the charm-anticharm quark particles ( $c$ ,  $\bar{c}$ ) are produced; the precise number of these particles created depends on the spin of the gluons ( $g$ ) in the polarized proton, which allows the spin of the gluons to be reconstructed.

In low-energy experiments, the proton behaves like a system of three massive "constituents" quarks carrying about 1/3 each of the mass of the proton. When we look deeper inside in high-energy experiments, these constituent quarks dissolve into near massless "current" quarks and a sea of quark-antiquark pairs and gluons.

The spin experiments at CERN, DESY,

- Programmes expérimentaux présents (JLab, CERN) et futurs (EIC).

- Développements théoriques en cours.

- Règles de sommes de spin.
- Contributions d'ordre supérieur dans canaux expérimentaux privilégiés.
- ...

- Domaine pas restreint à la physique du spin !

⇨ Exposé d'H. Fonvieille.

⇨ Exposé de

C. Muñoz-Camacho.

⇨ Exposé d'A. Ferrero.



1672

23 MARCH 2007 VOL 315 SCIENCE www.sciencemag.org

# Déconfinement.

La matière nucléaire en conditions extrêmes dans le laboratoire.

Physique hadronique

Introduction

Thématiques

Spectre des hadrons

Structure du nucléon

Matière dense et chaude

Processus et structure

Facteurs de forme

Distributions de partons

Distributions de partons généralisées

Imagerie 3D du nucléon

Principe de mesure

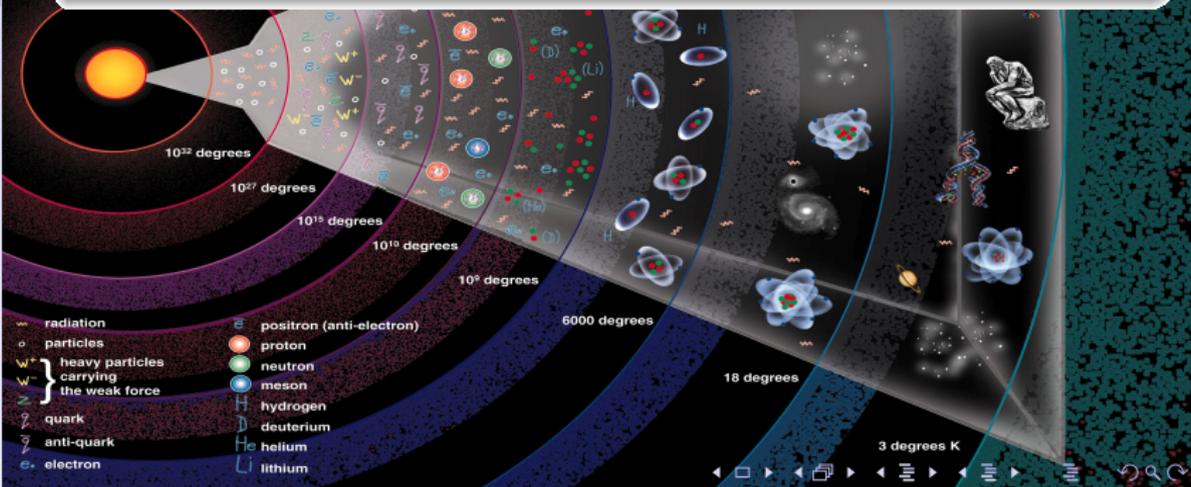
Statut théorique

Plateforme de phénoménologie

Conclusion

## Le plasma de quarks et de gluons

- Partons déconfinés dans la matière **dense** et **chaude**.
  - Rôles du **confinement** et de la **symétrie chirale** ?
  - Une fenêtre sur les premiers instants de l'univers.
- ↪ Exposé de G. Martinez.



# Diffusion élastique.

## Facteurs de forme (FF).

Physique  
hadronique

Introduction

Thématiques

Spectre des  
hadrons  
Structure du  
nucléon  
Matière dense et  
chaude

Processus et  
structure

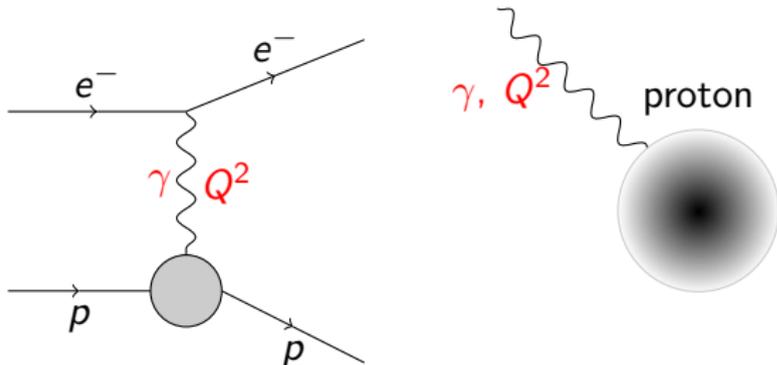
Facteurs de  
forme

Distributions de  
partons  
Distributions de  
partons  
généralisées

Imagerie 3D  
du nucléon

Principe de  
mesure  
Statut théorique  
Plateforme de  
phénoménologie

Conclusion



# Diffusion élastique.

## Facteurs de forme (FF).

Physique  
hadronique

Introduction

Thématiques

Spectre des  
hadrons  
Structure du  
nucléon  
Matière dense et  
chaude

Processus et  
structure

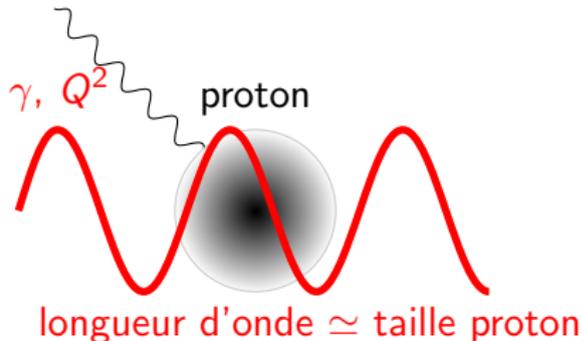
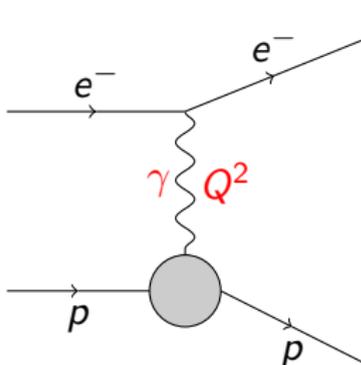
Facteurs de  
forme

Distributions de  
partons  
Distributions de  
partons  
généralisées

Imagerie 3D  
du nucléon

Principe de  
mesure  
Statut théorique  
Plateforme de  
phénoménologie

Conclusion



# Diffusion élastique.

## Facteurs de forme (FF).

Physique  
hadronique

Introduction

Thématiques

Spectre des  
hadrons  
Structure du  
nucléon  
Matière dense et  
chaude

Processus et  
structure

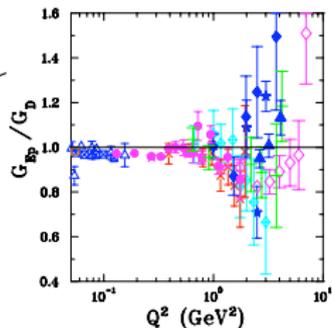
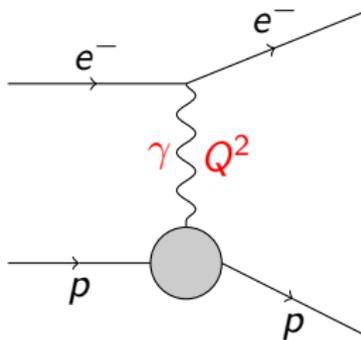
Facteurs de  
forme

Distributions de  
partons  
Distributions de  
partons  
généralisées

Imagerie 3D  
du nucléon

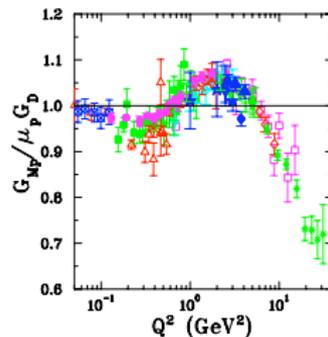
Principe de  
mesure  
Statut théorique  
Plateforme de  
phénoménologie

Conclusion



△ Han03  
◆ Li70  
⊗ Pr71  
⊕ Ber73  
★ Han73

⊠ Bor75  
□ Stan96  
◇ An94  
★ Wal94  
▲ Qat05



△ Han03  
■ Jan06  
□ Cov08  
◆ Li70  
⊗ Pr71  
⊗ Ber71  
★ Han73

⊕ Ber73  
⊠ Bor75  
⊙ SH05  
◇ An94  
★ Wal94  
⊕ Chr04  
▲ Qat05

- Diffusion élastique électron / proton décrite au moyen des **facteurs de forme** dépendant de  $Q^2$ .

# Diffusion élastique.

## Facteurs de forme (FF).

Physique  
hadronique

Introduction

Thématiques

Spectre des  
hadrons  
Structure du  
nucléon  
Matière dense et  
chaude

Processus et  
structure

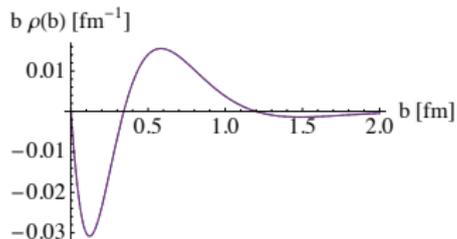
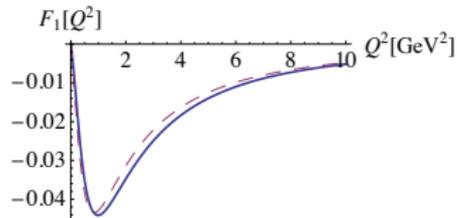
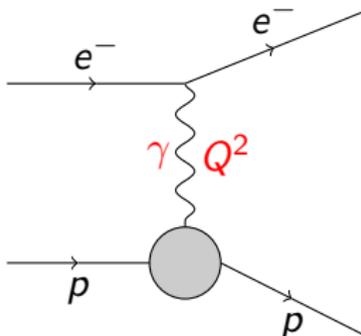
Facteurs de  
forme

Distributions de  
partons  
Distributions de  
partons  
généralisées

Imagerie 3D  
du nucléon

Principe de  
mesure  
Statut théorique  
Plateforme de  
phénoménologie

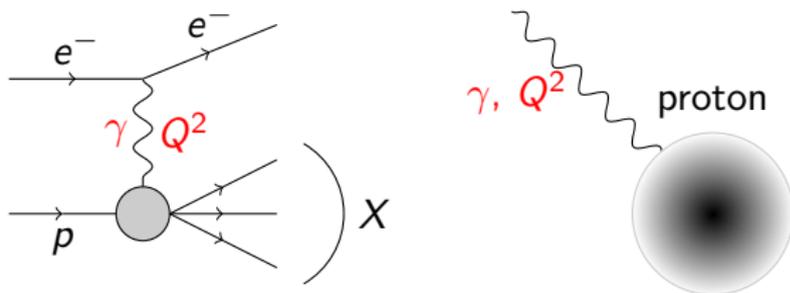
Conclusion



- **Diffusion élastique** électron / proton décrite au moyen des **facteurs de forme** dépendant de  $Q^2$ .
- **Densité de charge** dans le plan transverse.

# Diffusion profondément inélastique (DIS).

## Distributions de partons (PDF).



Physique  
hadronique

Introduction

Thématiques

Spectre des  
hadrons

Structure du  
nucléon

Matière dense et  
chaude

Processus et  
structure

Facteurs de  
forme

Distributions de  
partons

Distributions de  
partons  
généralisées

Imagerie 3D  
du nucléon

Principe de  
mesure

Statut théorique

Plateforme de  
phénoménologie

Conclusion

# Diffusion profondément inélastique (DIS).

## Distributions de partons (PDF).

Physique  
hadronique

Introduction

Thématiques

Spectre des  
hadrons

Structure du  
nucléon

Matière dense et  
chaude

Processus et  
structure

Facteurs de  
forme

Distributions de  
partons

Distributions de  
partons  
généralisées

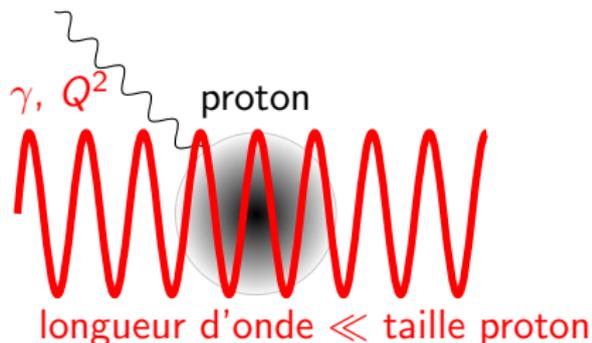
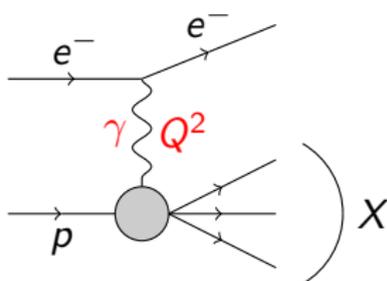
Imagerie 3D  
du nucléon

Principe de  
mesure

Statut théorique

Plateforme de  
phénoménologie

Conclusion



# Diffusion profondément inélastique (DIS).

## Distributions de partons (PDF).

Physique hadronique

Introduction

Thématiques

Spectre des hadrons

Structure du nucléon

Matière dense et chaude

Processus et structure

Facteurs de forme

Distributions de partons

Distributions de partons généralisées

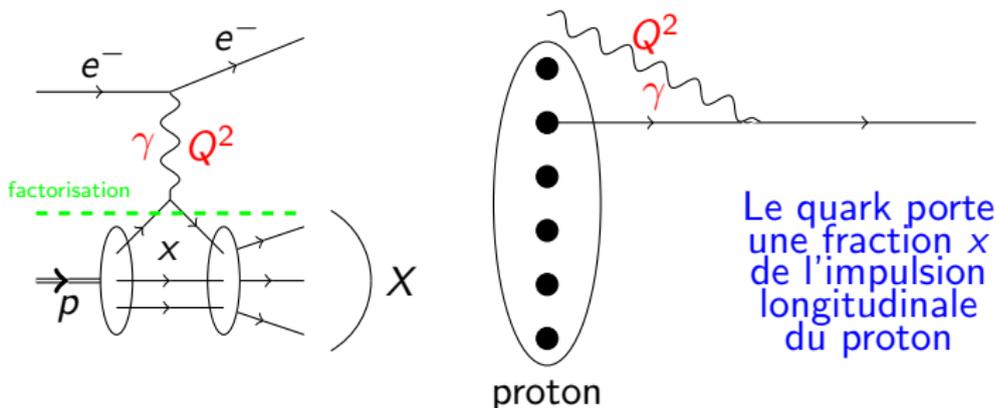
Imagerie 3D du nucléon

Principe de mesure

Statut théorique

Plateforme de phénoménologie

Conclusion



- **Distribution de parton  $q(x)$**  : probabilité qu'un quark  $q$  porte la fraction  $x$  de l'impulsion longitudinale du proton.

# Diffusion profondément inélastique (DIS).

## Distributions de partons (PDF).

Physique  
hadronique

Introduction

Thématiques

Spectre des  
hadrons

Structure du  
nucléon

Matière dense et  
chaude

Processus et  
structure

Facteurs de  
forme

Distributions de  
partons

Distributions de  
partons  
généralisées

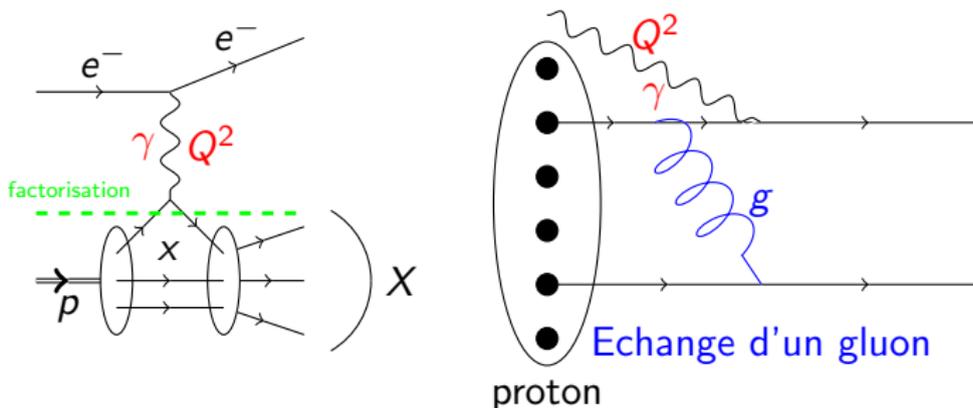
Imagerie 3D  
du nucléon

Principe de  
mesure

Statut théorique

Plateforme de  
phénoménologie

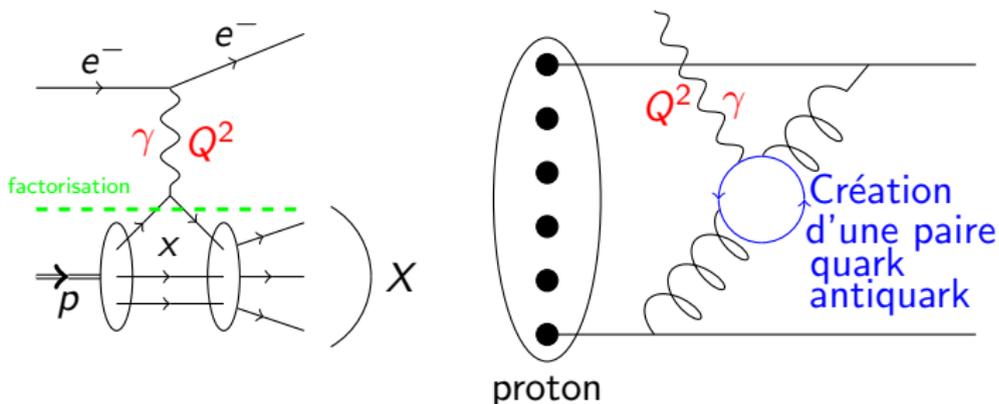
Conclusion



- **Distribution de parton  $q(x)$**  : probabilité qu'un quark  $q$  porte la fraction  $x$  de l'impulsion longitudinale du proton.
- Mesure de la contribution  $g(x)$  des gluons.

# Diffusion profondément inélastique (DIS).

## Distributions de partons (PDF).



- **Distribution de parton  $q(x)$**  : probabilité qu'un quark  $q$  porte la fraction  $x$  de l'impulsion longitudinale du proton.
- Mesure de la contribution  $g(x)$  des gluons.
- Le nucléon a un contenu étrange !

# Diffusion profondément inélastique (DIS).

## Distributions de partons (PDF).

Physique hadronique

Introduction

Thématiques

Spectre des hadrons

Structure du nucléon

Matière dense et chaude

Processus et structure

Facteurs de forme

Distributions de partons

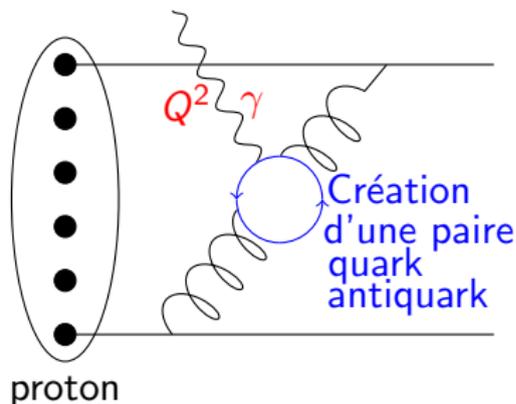
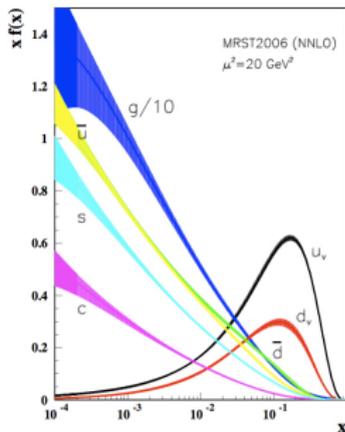
Distributions de partons généralisées

Imagerie 3D du nucléon

Principe de mesure

Statut théorique  
Plateforme de phénoménologie

Conclusion



- **Distribution de parton  $q(x)$**  : probabilité qu'un quark  $q$  porte la fraction  $x$  de l'impulsion longitudinale du proton.
- Mesure de la contribution  $g(x)$  des gluons.
- Le nucléon a un contenu étrange !
- Le nucléon est un objet **dynamique**.

# Diffusion Compton profondément virtuelle (DVCS).

## Distributions de partons généralisées (GPD).

Physique hadronique

Introduction

Thématiques

Spectre des hadrons

Structure du nucléon

Matière dense et chaude

Processus et structure

Facteurs de forme

Distributions de partons

Distributions de partons généralisées

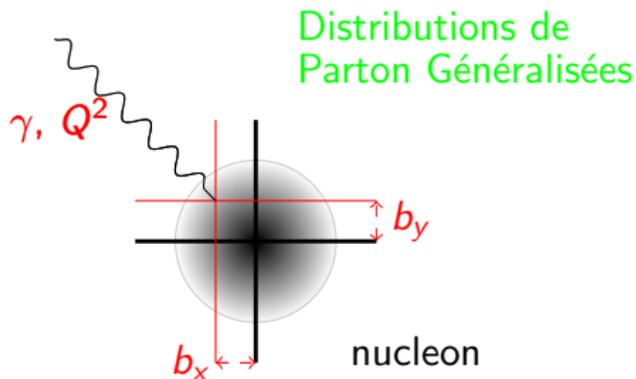
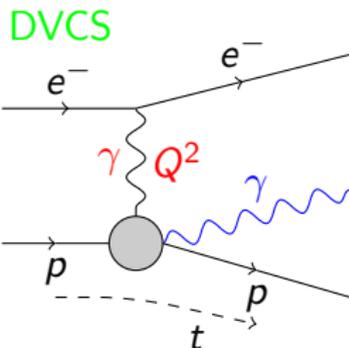
Imagerie 3D du nucléon

Principe de mesure

Statut théorique

Plateforme de phénoménologie

Conclusion



# Diffusion Compton profondément virtuelle (DVCS).

## Distributions de partons généralisées (GPD).

Physique hadronique

Introduction

Thématiques

Spectre des hadrons

Structure du nucléon

Matière dense et chaude

Processus et structure

Facteurs de forme

Distributions de partons

Distributions de partons généralisées

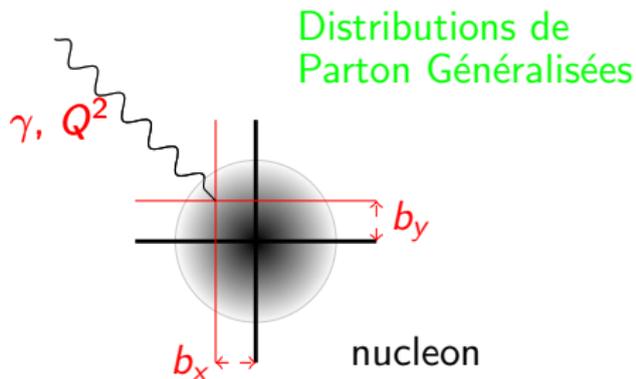
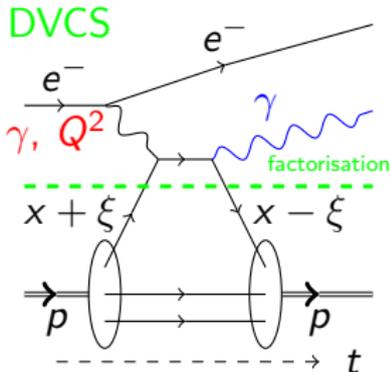
Imagerie 3D du nucléon

Principe de mesure

Statut théorique

Plateforme de phénoménologie

Conclusion



# Diffusion Compton profondément virtuelle (DVCS).

## Distributions de partons généralisées (GPD).

Physique hadronique

Introduction

Thématiques

Spectre des hadrons

Structure du nucléon

Matière dense et chaude

Processus et structure

Facteurs de forme

Distributions de partons

Distributions de partons généralisées

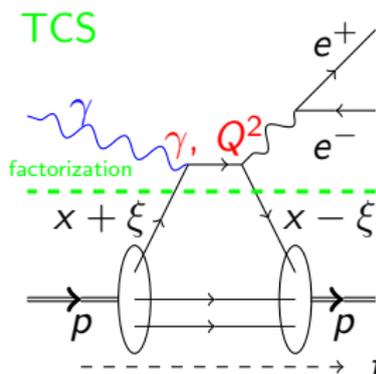
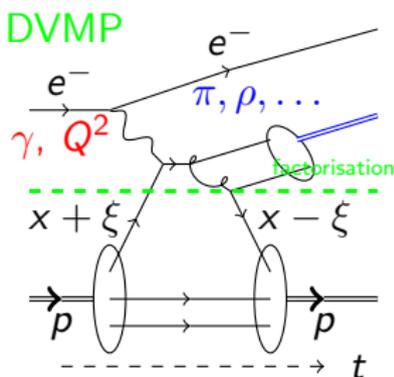
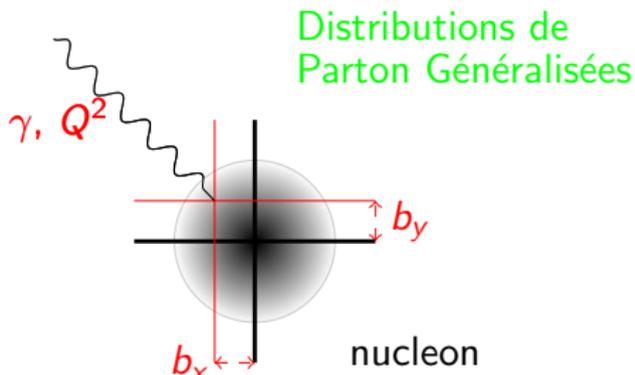
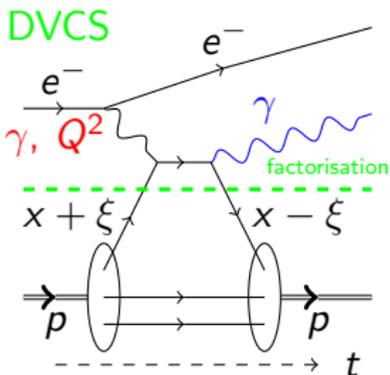
Imagerie 3D du nucléon

Principe de mesure

Statut théorique

Plateforme de phénoménologie

Conclusion



# Diffusion Compton profondément virtuelle (DVCS). Distributions de partons généralisées (GPD).

Physique  
hadronique

Introduction

Thématiques

Spectre des  
hadrons

Structure du  
nucléon

Matière dense et  
chaude

Processus et  
structure

Facteurs de  
forme

Distributions de  
partons

Distributions de  
partons  
généralisées

Imagerie 3D  
du nucléon

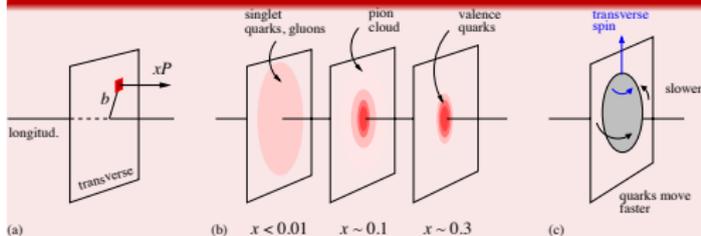
Principe de  
mesure

Statut théorique

Plateforme de  
phénoménologie

Conclusion

## Vers une visualisation en 3d du nucléon !



C. Weiss,  
AIP Conf.  
Proc. 1149,  
150 (2009)

- Corrélation de l'**impulsion longitudinale** portée par un quark à sa **position dans le plan transverse**.
- Description du nucléon **en 3 dimensions**.
- Accès au **moment cinétique orbital** des quarks.
- **Répartition** de la charge et de la masse.
- Les distributions de partons et facteurs de forme peuvent être déduites des distributions de partons généralisées.

# Un principe de mesure intrinsèquement quantique.

## Interférence quantique et amplification.

- Les processus DVCS et Bethe-Heitler (BH) ont les **mêmes états entrant et sortant** :

$$\sigma(ep \rightarrow ep\gamma) = \left[ \underbrace{\text{Diagram 1}}_{DVCS} + \underbrace{\text{Diagram 2} + \text{Diagram 3}}_{\text{Bethe-Heitler}} \right]^2$$

# Un principe de mesure intrinsèquement quantique.

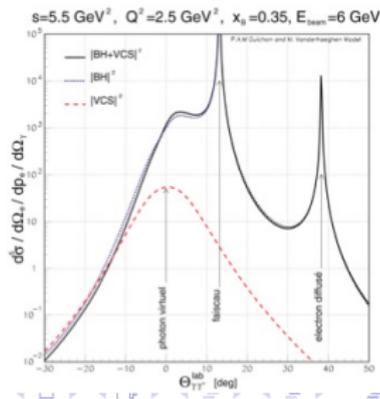
## Interférence quantique et amplification.

- Les processus DVCS et Bethe-Heitler (BH) ont les **mêmes états entrant et sortant** :

$$\sigma(ep \rightarrow ep\gamma) = \underbrace{\text{[Diagram 1]}}_{DVCS} + \underbrace{\text{[Diagram 2]} + \text{[Diagram 3]}}_{\text{Bethe-Heitler}}$$

The diagram shows the cross-section for the process  $ep \rightarrow ep\gamma$ . It is the sum of three terms: a DVCS term (represented by a single diagram with a photon radiating from the electron line) and two Bethe-Heitler terms (represented by two diagrams with a photon radiating from the proton line). The DVCS term is on the left, and the Bethe-Heitler terms are on the right, grouped together. A large vertical brace on the right side of the diagrams is labeled with a '2' at the top.

- Mesure de l'**interférence**.
- Contrôle du BH grâce aux **facteurs de forme**.



# Un principe de mesure intrinsèquement quantique.

## Interférence quantique et amplification.

- Les processus DVCS et Bethe-Heitler (BH) ont les **mêmes états entrant et sortant** :

$$\sigma(ep \rightarrow ep\gamma) = \underbrace{\left[ \text{Diagram 1} \right]}_{DVCS} + \underbrace{\left[ \text{Diagram 2} + \text{Diagram 3} \right]}_{Bethe-Heitler}^2$$

The diagram shows the cross-section for the process  $ep \rightarrow ep\gamma$ . It is the sum of a DVCS term and a squared Bethe-Heitler term. The DVCS term is represented by a single diagram where an electron and a proton interact via a photon (wavy line) and a meson (curly line) at a vertex (grey circle). The Bethe-Heitler term is represented by two diagrams where the electron and proton interact via a photon (wavy line) and a meson (curly line) at a vertex (grey circle), with an additional photon (blue wavy line) emitted from either the electron or the proton line.

- Mesure de l'**interférence**.
- Contrôle du BH grâce aux **facteurs de forme**.
- Cible ou faisceau **polarisé**.



# Connexion théorie - expérience pour le canal DVCS.

En principe très satisfaisant, mais difficultés de mise en oeuvre considérables.

- Preuve à tous les ordres de perturbation de la **factorisation** du processus DVCS.
- **Noyau de diffusion dure** calculé à l'ordre perturbatif sous-dominant.
- **Evolution des GPD** en fonction de l'échelle de factorisation calculée à l'ordre sous-sous-dominant.
- Corrections de **transfert en impulsion** et de **masse de cible** calculées à l'ordre dominant en QCD perturbative.

## "Mesure" des GPDs ?

- L'étape consistant à contraindre des modèles avec des mesures **est déjà franchie**.
- L'étape suivante consiste à **réaliser une cartographie expérimentale** du nucléon.

- 1 **Base de données** exhaustive de **résultats expérimentaux**.
- 2 **Base de données** exhaustive de **prédictions théoriques**.
- 3 **Moteur de fit**.
- 4 **Propagation** des **incertitudes** statistiques et systématiques.
- 5 **Logiciel de visualisation** pour comparer mesures et prédictions théoriques.
- 6 Utilisation pour le dimensionnement de **nouvelles expériences**.
- 7 **Site web interactif** avec un accès libre aux mesures et modèles.

# Premiers résultats.

Un exemple réaliste de modèle de GPD (Goloskokov-Kroll) appliqué au DVCS.

Physique  
hadronique

Introduction

Thématiques

Spectre des  
hadrons  
Structure du  
nucléon  
Matière dense et  
chaude

Processus et  
structure

Facteurs de  
forme  
Distributions de  
partons  
Distributions de  
partons  
généralisées

Imagerie 3D  
du nucléon

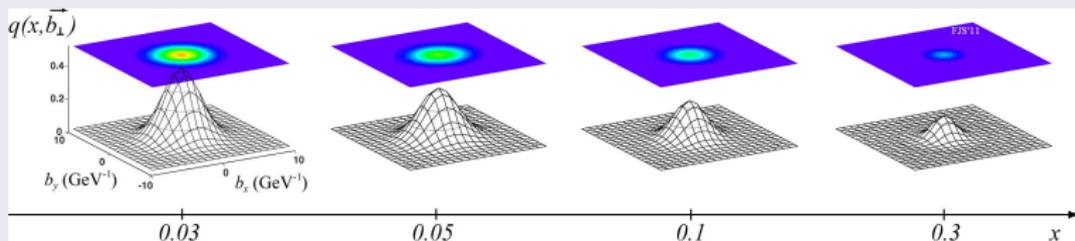
Principe de  
mesure  
Statut théorique  
Plateforme de  
phénoménologie

Conclusion

## Structure en spin (à 4 GeV<sup>2</sup>)

- $J^u \simeq 0.250$ ,  $J^d \simeq 0.020$ ,  $J^s \simeq 0.015$ ,  $J^g \simeq 0.214$
- $\sum_{q,g} J^{q,g} \simeq 1/2$

## Structure 3D du nucléon





# Conclusions.

Des progrès dans la compréhension du régime non-perturbatif de QCD.

- Grand nombre de problèmes **bien posés** avec **effort collaboratif international** de résolution.
- Importants **résultats expérimentaux et théoriques** lors des 10 dernières années.
- De **nouvelles installations** vont explorer des **régions cinématiques nouvelles** et fournir des **mesures très contraignantes** pour la phénoménologie.
- Vers une résolution de la crise du spin ? Une cartographie 3D du nucléon ?

Physique  
hadronique

Introduction

Thématiques

Spectre des  
hadrons

Structure du  
nucléon

Matière dense et  
chaude

Processus et  
structure

Facteurs de  
forme

Distributions de  
partons

Distributions de  
partons  
généralisées

Imagerie 3D  
du nucléon

Principe de  
mesure

Statut théorique  
Plateforme de  
phénoménologie

Conclusion