

QCD, physique hadronique et physique des saveurs au LPT

Samuel Wallon

Université Pierre et Marie Curie
et
Laboratoire de Physique Théorique
CNRS / Université Paris Sud
Orsay

Journée des entrants
Laboratoire de Physique Théorique

18 octobre 2013

Introduction

Qui ?

- **Permanents :**
 - Asmâa Abada**
 - Benoît Blossier**
 - Damir Becirevic**
 - Philippe Boucaud**
 - Sébastien Descotes-Genon**
 - Samuel Wallon**
- **Retraités :**
 - Michel Fontannaz
 - Jean-Pierre Leroy
 - Alain Le Yaouanc
 - Luis Oliver
 - Olivier Pène
 - Jean-Claude Raynal
 - Dominique Schiff
- **Thésards :**
 - Renaud Boussarie*
 - Bertrand Ducloué*
 - Antoine Gérardin*
 - Michele Lucente*
 - Luiz Vale*

Introduction

Le modèle standard : une belle zoologie !

Particules de matière

boson
vecteur

boson
Brout-Englert-Higgs

Quarks

(int. forte, faible,
électromagnétique)

mass →	$\approx 2.3 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.275 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.07 \text{ GeV}/c^2$	0	$\approx 126 \text{ GeV}/c^2$
charge →	2/3	2/3	2/3	0	0
spin →	1/2	1/2	1/2	1	0
	u up	c charm	t top	g gluon	H Higgs boson
QUARKS	$\approx 4.8 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 95 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$	0	
	-1/3	-1/3	-1/3	0	
	1/2	1/2	1/2	1	
	d down	s strange	b bottom	γ photon	
	$0.511 \text{ MeV}/c^2$	$105.7 \text{ MeV}/c^2$	$1.777 \text{ GeV}/c^2$	$91.2 \text{ GeV}/c^2$	
	-1	-1	-1	0	
	1/2	1/2	1/2	1	
	e electron	μ muon	τ tau	Z Z boson	
LEPTONS	$< 2.2 \text{ eV}/c^2$	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$	$< 15.5 \text{ MeV}/c^2$	$80.4 \text{ GeV}/c^2$	
	0	0	0	± 1	
	1/2	1/2	1/2	1	
	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	W W boson	
				GAUGE BOSONS	

Leptons chargés

(int. faible,
électromagnétique)

Leptons neutres

(int. faible)

Violation CP

Sources de violation CP

- C (conjugaison de charge), P (parité) ne sont pas conservés
- Le produit CP n'est pas conservé
- Heureusement, car nous ne serions pas là :
rapport matière / antimatière très disymétrique, alors qu'il ne l'était pas a priori lors de la formation de l'univers
- Sources de violation CP :
 - matrice **CKM** (Cabibbo-Kobayashi-Maskawa) :
états propres des quarks libres $|\Psi\rangle \neq$ états propres de masse
états propres des quarks en interaction faible $|\Psi'\rangle$ (états propres de saveur)
 $\Rightarrow V_{CKM} =$ matrice unitaire qui décrit la probabilité de changement de saveur d'un quark lors d'une interaction faible $|\Psi'\rangle = V_{CKM} |\Psi\rangle$
3 générations \Rightarrow une phase = source de violation CP
 - interaction forte : oui... mais aucun signe expérimental !
 - matrice **PMNS** (Pontecorvo, Maki, Nakagawa, Sakata) :
analogue de CKM pour les neutrinos
preuve expérimentale par les oscillations neutrinos (1998)
 \Rightarrow un pas au-delà du modèle standard

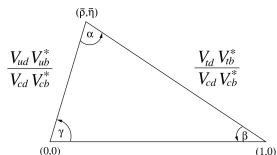
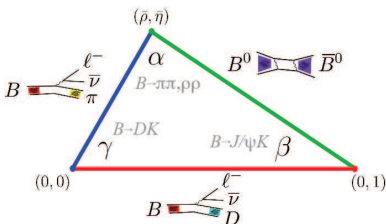
Physique de la saveur

Matrice CKM

- Structure de la matrice CKM :

$$V = \begin{pmatrix} \begin{array}{c|c|c} d & s & b \\ \hline u & n \begin{array}{l} e^- \\ \bar{\nu} \\ p \end{array} & K \begin{array}{l} \ell^- \\ \bar{\nu} \\ \pi \end{array} & B \begin{array}{l} \ell^- \\ \bar{\nu} \\ \pi \end{array} \\ \hline c & D \begin{array}{l} \ell^- \\ \bar{\nu} \\ \pi \end{array} & D \begin{array}{l} \ell^- \\ \bar{\nu} \\ K \end{array} & B \begin{array}{l} \ell^- \\ \bar{\nu} \\ D \end{array} \\ \hline t & B^0 \begin{array}{l} \bar{\nu} \\ \bar{B}^0 \end{array} & B_s \begin{array}{l} \bar{\nu} \\ \bar{B}_s \end{array} & t \begin{array}{l} W^- \\ b \end{array} \end{array} \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \begin{array}{c} d & s & b \\ \hline u & \blacksquare & \blacksquare & \cdot \\ \hline c & \blacksquare & \blacksquare & \blacksquare \\ \hline t & \cdot & \blacksquare & \blacksquare \end{array} \end{pmatrix}$$

- Un triangle d'unitarité typique pour V_{CKM} :
 $V_{ud} V_{ub}^* + V_{cd} V_{cb}^* + V_{td} V_{tb}^* = 0$ (1ère et 3ème colonnes)

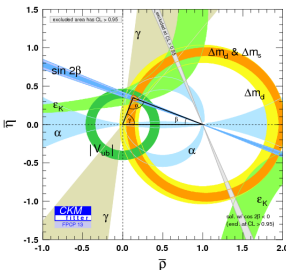


Physique de la saveur

CKM-fitter

Sébastien Descotes-Genon

- données = (contribution int. faible) \otimes QCD
- on a donc besoin de connaître *très* précisément les contributions de QCD (QCD sur réseau, HQET, SCET, ...)
- un traitement statistique sophistiqué doit être mené pour espérer extraire les contributions du secteur électrofaible avec la précision requise pour potentiellement mettre en évidence des signaux de nouvelle physique
- exemple de contrainte fortes : mélanges dans les mésons neutres B_d , B_s et K



CKM-fitter : A. Lenz, U. Nierste, J. Charles, S. Descotes-Genon, H. Lacker, S. Monteil, V. Niess, S. T'Jampens

Physique de la saveur

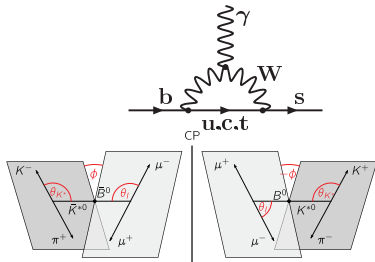
A la recherche de processus favorables Sébastien Descotes-Genon, Damir Becirević

- désintégrations radiatives du B en particulier $B \rightarrow K^* \ell^+ \ell^-$
- processus rare avec changement de saveur sans changement de charge électrique (FCNC : flavor-changing neutral currents) (LHCb)

à la limite $m_u = m_c = m_t$, ce processus serait complètement supprimé car V est unitaire :

$$V_{ub} V_{us}^* + V_{cb} V_{cs}^* + V_{tb} V_{ts}^* = 0$$

- Processus à 4 corps dans l'état final : les multiples distributions angulaires donnent accès à de nombreuses observables sensibles à la nouvelle physique



- l'étude précise des contributions de QCD est cependant très délicate
 - S. Descotes-Genon, T. Hurth, J. Matias, J. Virto, JHEP 1305 (2013) 137
 - D. Becirević, A. Tayduganov, Nucl.Phys. B868 (2013) 368-382

Physique des neutrinos

Les neutrinos : ou comment attaquer le puzzle à partir d'une pièce Asmaa Abada, Michele Lucente

- Expérimentalement, la matrice **PMNS** est non-triviale
- Pourquoi les neutrinos ont-ils une masse, et pourquoi si petite ?
 - mécanisme see-saw : les neutrinos sont des particules de Majorana (i.e. leur propre anti-particule)
on introduit des neutrinos droits ν_R très massifs
(inverse see-saw : on introduit en plus des fermions singulets de saveur)
on diagonalise la matrice de masse. Après mécanisme **BEH** :
$$m_{\nu_{actif}} \simeq \frac{1}{m_{\nu_R}}$$
 - l'existence de neutrinos stériles (qui n'interagissent que par gravitation)
conduit à une matrice **PMNS** non unitaire pour les ν actifs \Rightarrow violation **CP**
- Conséquence : rapport matière/ antimatière $\neq 1$ pour les leptons
- Liens physique des particules - cosmologie :
Passage leptogénèse \rightarrow hadrogénèse : par un mécanisme non-perturbatif
(sphaléron = solution de type point-selle des équations du mouvement \Rightarrow
non-conservation des nombres leptoniques et baryoniques)

Physique des neutrinos

- Effet des mécanismes de génération de masse (contributions éventuelles de nouvelle physique) sur les observables hadroniques : test de l'universalité de la saveur leptonique, e.g. rapports d'embranchement éliminant avec une bonne précision les effets des éléments de matrice hadronique

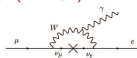
$$R_K \equiv \frac{\Gamma(K^+ \rightarrow e^+ \nu)}{\Gamma(K^+ \rightarrow \mu^+ \nu)}, \quad R_\pi \equiv \frac{\Gamma(\pi^+ \rightarrow e^+ \nu)}{\Gamma(\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu)},$$

A. Abada, D. Das, A.M. Teixeira, A. Vicente, C. Weiland JHEP 1302 (2013) 048

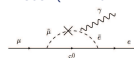
- Lien physique des particules - astrophysique -> rôle des neutrinos dans l'évolution (supernovae, évolution stellaire)
- Lien physique des particules à haute (collisionneurs LHC, futur LC) et basse énergies (e.g. MEG) : recherche de violation de la saveur leptonique.

MEG : recherche de $\mu \rightarrow e \gamma$

SM (BR < 10⁻⁴⁰)



SUSY (BR ~ 10⁻¹¹ - 10⁻¹⁵)



Confinement en QCD

QCD sur réseau

Damir Becirevic, Benoît Blossier, Philippe Boucaud, Alain Le Yaouanc
Jean-Pierre Leroy, Olivier Pène, Antoine Gérardin

- Depuis leur invention les réseaux ont progressivement améliorés leur erreurs systématiques (par ordre historique et de complexité) :
 - approximation quenched : les boucles de fermions ne sont pas prise en compte (évite le calcul de déterminants très coûteux en temps de calcul)
 - amélioration $o(a)$ (taille de la maille du réseau)
 - premières simulation $N_f = 2$
 - simulation $N_f = 2 + 1$
 - simulation $N_f = 2 + 1 + 1$ (u, d, s, c) (cf figures)
 - simulation $N_f = 2$ (u, d à la masse physique) (en cours)
- Plusieurs objectifs :
 - étude de la dynamique propre à QCD dans le régime non-perturbatif : spectre des particules, évolution du couplage de QCD
 - calcul d'éléments de matrice pour la recherche de nouvelle physique

QCD et confinement

Couplage de QCD sur le réseau

- Vertex gluon-fantôme-fantôme nu :

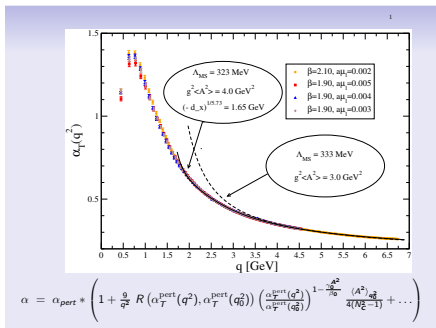
$$-g_s f^{abc} p^\mu$$

- Corrections de QCD au vertex nu : $Z_g = \frac{\tilde{Z}_1}{\tilde{Z}_3^{1/2} \tilde{Z}_3^{1/2} Z_3^{1/2}}$
- Mais miracle : dans la limite où l'impulsion du fantôme entrant s'annule, $\tilde{Z}_1 = 1$
 Dans le schéma MOM, seuls les corrélateurs à deux points sont nécessaires : meilleur contrôle du signal

QCD et confinement

Couplage de QCD sur le réseau

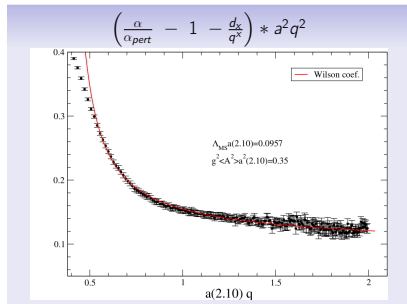
- la constante de couplage pour plusieurs masse légères (μ_l) et plusieurs mailles
- le fit avec l'expression théorique OPE dominant i.e. terme perturbatif + terme en $1/p^2$ (\sim OK pour $q \gtrsim 3, 5$ GeV)
- le fit obtenu en ajoutant un terme en puissance d'ordre supérieur en $1/p^x$ (\sim OK pour $q \gtrsim 2$ GeV)
- $\alpha_S^{\text{pert.}}(q^2) = \frac{g_S^2(q^2)}{4\pi}$ connue à 4 boucles



- L'échelle en GeV est obtenue par la mesure et l'extrapolation chirale de f_π et m_π
- on obtient la forme de $\alpha_S(q)$, la valeur de $\Lambda_{\overline{MS}}$, la valeur du condensat $\langle A^2 \rangle$

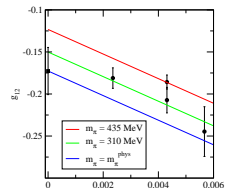
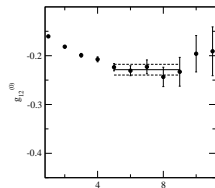
QCD et confinement

- Mesures de $(\alpha_S/\alpha^{\text{pert}} - 1)q^2$
= correction non perturbative en fonction de q
- Courbe théorique attendue
B. Blossier, Ph. Boucaud, M. Brinet, F. De Soto, V. Morenas, O. Pène, K. Petrov, J. Rodríguez-Quintero, arXiv :1310.3763 [hep-ph]
- Rem : on peut tester le développement en produits d'opérateurs sur différentes observables
Ph. Boucaud, M. Brinet, F. De Soto, V. Morenas, O. Pène, K. Petrov, J. Rodríguez-Quintero, arXiv :1310.4087 [hep-ph]



QCD et confinement : saveurs lourdes

- Première étude sur le réseau de la transition entre une excitation radiale ($B^{*'}$) et un état fondamental (B) en mesurant l'élément de matrice axial $\langle B^{*'} | A_0 | B \rangle \equiv g_{12}$ dans la limite statique de la Théorie Effective des Quarks Lourds (HQET).
- obtention d'un plateau sur le réseau
- le résultat est obtenu après extrapolation vers le continu et dans la limite chirale
- $g_{12} \sim -0.15$: cela confirme une hypothèse émise au début des années 2000 par le groupe d'Orsay pour expliquer le désaccord entre le couplage $g_{D^* D \pi}$ mesuré expérimentalement et son estimation "naïve" par les règles de somme sur le cône de lumière : les états excités ne peuvent pas être négligés du côté hadronique de la règle de somme.



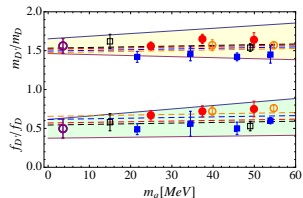
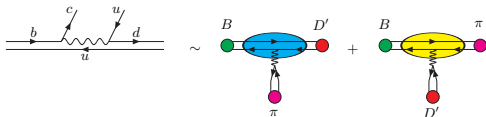
B. Blossier, J. Bulava, M. Donnellan, A. Gérardin, *Phys.Rev. D87 (2013) 094518*

QCD et confinement : saveurs lourdes

Etude de la désintégration semileptonique $B \rightarrow D'lv$

D' = excitation radiale du méson D

Hypothèse phénoménologique d'un facteur de forme $f_+^{B \rightarrow D'}$ élevé testée sur la transition non leptonique $B \rightarrow D'\pi$. Le processus $B^- \rightarrow D'^0 \pi^-$ dit de "Classe III" a une contribution paramétrée par la constante d'annihilation $f_{D'}$, extraite des simulations numériques.



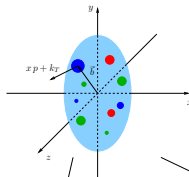
$f_{D'}/f_D \sim 0.6$; il est possible de mesurer $\mathcal{B}(B^- \rightarrow D'^0 \pi^-)$, par exemple à LHCb, et de valider l'hypothèse d'un facteur de forme $f_+^{B \rightarrow D'}$ élevé.

D. Becirevic, B. Blossier, A. Gérardin, A. Le Yaouanc, F. Sanfilippo,
Nucl.Phys. B872 (2013) 313-332

Extrapolations chirale et vers le continu de $m_{D'}/m_D$ et $f_{D'}/f_D$

L'image ultime de la structure interne des hadrons

6D

distributions de Wigner pour les hadrons $W(x, \vec{b}, k_T)$ Expérimentalement
inaccessible directementlimite de Regge
perturbative

uPDFs (gluons)

distributions de partons
non intégrées

$$\int d^3 \vec{b}$$

$$\int d^2 k_T \int d r_z$$

$$\int d^2 k_T \int \text{Fourier}(\vec{b})$$

3D

processus
semi-inclusifs

TMDs

$$f(x, k_T)$$

distributions en moment
transverse

$$b_T \leftrightarrow \Delta$$

$$f(x, b_T)$$

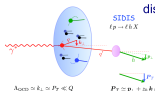
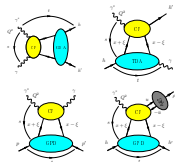
distributions en
paramètre d'impact

$$H(x, 0, t)$$

$$t = -\Delta^2$$

GPDs

$$H(x, \xi, t)$$

distributions de partons
généraliséesprocessus
exclusifsSIDIS
 $(p \rightarrow e, X)$

$$A_{\text{gen}} > A_L \Rightarrow P_T \ll Q$$

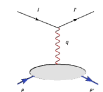
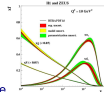
$$P_T = p_T + z_{\text{in}} A_L$$

1D

processus inclusifs et
semi-inclusifs

PDFs

$$f(x)$$

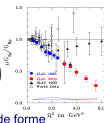
distribution de
partons

diffusion élastique

FFs

$$G_{E, M}(t)$$

facteurs de forme



GFFs

Facteurs de forme
généralisés

réseaux

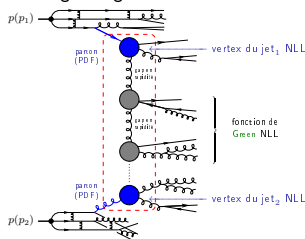
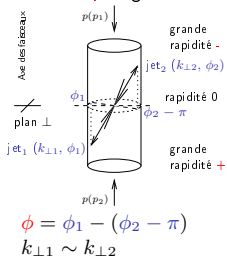
QCD aux collisionneurs à très haute énergie

Samuel Wallon, Bertrand Ducloué

Jets Mueller-Navelet (1987) au LHC

processus dominés par l'échange et la production de gluons :

émettre **beaucoup** de gluons mous coûte très peu d'énergie \Rightarrow grandes sections efficaces + décorrélation ?

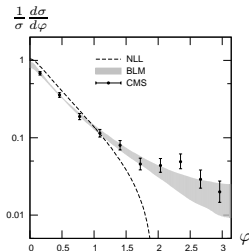


premier calcul complet à l'ordre des logarithmes sous-dominants de l'énergie (NLL)

prédiction pour LHC : **décorrélation angulaire faible**

D. Colferai, F. Schwennsen, S. Szymanowski, S.W., JHEP 1012:026 (2010) 1-72

D. Ducloué, S. Szymanowski, S.W., JHEP 1305 (2013) 096 ; arXiv :1309.3229



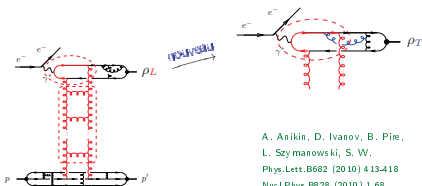
Corrections en puissances dans les processus exclusifs

Samuel Wallon, Renaud Boussarie

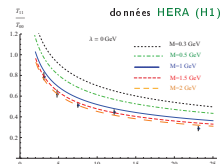
Processus exclusifs et corrections en puissances

$$e^- p \rightarrow e^- p \rho_{L,T}$$

- première description combinant au delà des puissances dominantes
 - factorisation colinéaire
 - factorisation "haute énergie"

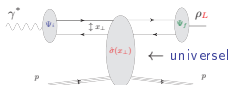


A. Anikin, D. Ivanov, B. Pire,
L. Szymanowski, S. W.
Phys.Lett.B682 (2010) 413-418
Nucl.Phys.B828 (2010) 1-68



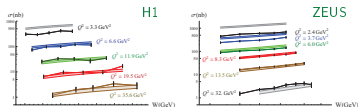
A. Anikin, A. Besse, D. Ivanov, B. Pire, L. Szymanowski,
Phys. Rev. D 84 (2011) 054004

- vers une description de la saturation au delà des puissances dominantes



représentation dipolaire

A. Besse, L. Szymanowski, S. W.
Nucl. Phys. B 867 (2013) 19-60 ;
arXiv :1302.1766 [hep-ph]



QCD aux collisionneurs

Michel Fontannaz

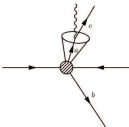
- La mesure de photon “prompt” (i.e. mis en jeu directement dans le sous processus dur, par opposition aux photons secondaires, e.g. produits en voie $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$) aux collisionneurs : excellent test de QCD et du modèle standard, dans le processus $pp \rightarrow \gamma X$
- Production de photons secondaire : bruit de fond de la Nouvelle Physique, e.g. production de Higgs dans $pp \rightarrow H(\rightarrow \gamma\gamma) X$ versus $pp \rightarrow \gamma\gamma X$
- Coupures en variables transverses pour isoler le photon prompt (plan y, ϕ)
 - Une collection d'hadrons k est dans le cône $\mathcal{C}_\gamma(R)$ si

$$\sqrt{(y_k - y_\gamma)^2 + (\phi_k - \phi_\gamma)^2} \leq R .$$

- Coupure sur l'énergie transverse totale dans le cône :

$$\sum_{k \in \mathcal{C}_\gamma(R)} E_T^{(k)} < E_T^{iso} \quad \text{avec} \quad E_T^{(k)} = E^{(k)} \sin \theta, \quad (E^{(k)}, \theta^{(k)}) = (\text{énergie}, \text{angle polaire}) \text{ du hadron } k$$

- La limite $R \rightarrow 0$ est pathologique : divergence en $\ln R$ de la section efficace
- Origine : divergence collinéaire



- resommation des radiations colinéaires