



# Remarques sur le Pentaquark

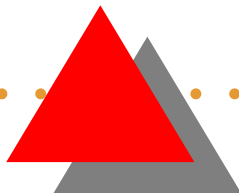
Jean-Marc Richard

Jean-Marc.Richard@isn.in2p3.fr

Laboratoire de Physique Subatomique et Cosmologie

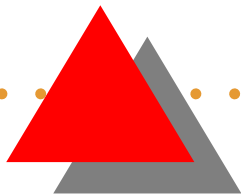
Université Joseph Fourier – IN2P3

53, avenue des Martyrs, F-38026 Grenoble Cedex, France



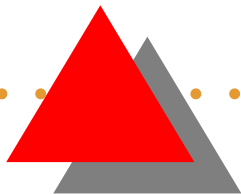
# Plan

- Baryons à double charme



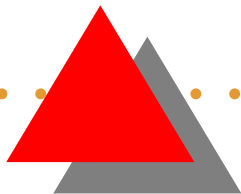
# Plan

- Baryons à double charme
- Candidats multiquarks



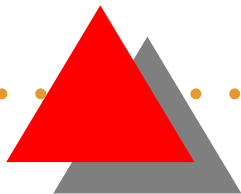
# Plan

- Baryons à double charme
- Candidats multiquarks
- Pentaquarks avec charme



# Plan

- Baryons à double charme
- Candidats multiquarks
- Pentaquarks avec charme
- Pentaquarks légers



# Baryons à double charme

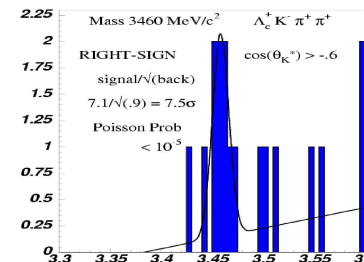
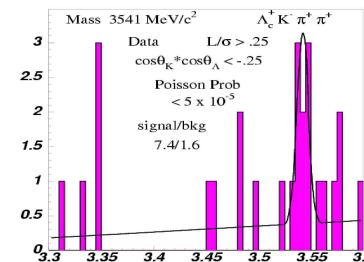
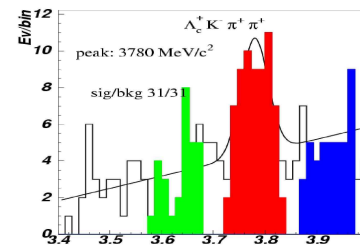
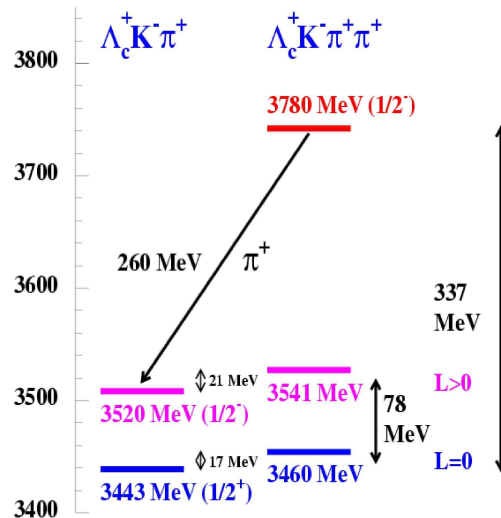
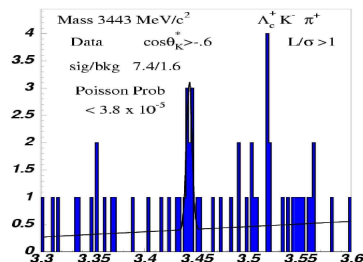
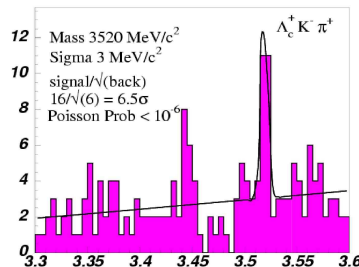
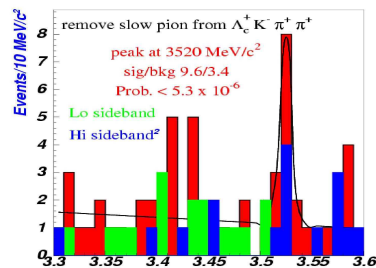
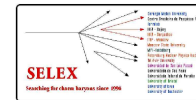


2 P 3

Grenoble  
DE PHYSIQUE NUCLÉAIRE  
ET DE PHYSIQUE DES PARTICULES

# Baryons à double charme

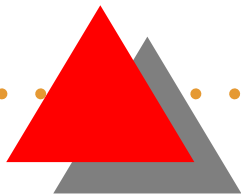
## A possible picture



# Introduction aux multiquarks

Spectroscopie des Multiquarks de plus en plus d'actualité  
Après des années de scepticisme

- mésons scalaires y compris  $\pi^+\pi^+$  ? (Obelix)





# Introduction aux multiquarks

Spectroscopie des Multiquarks de plus en plus d'actualité  
Après des années de scepticisme

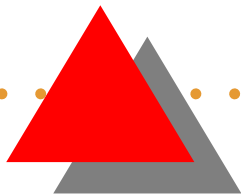
- mésons scalaires y compris  $\pi^+\pi^+$  ? (Obelix)
- Baryonium dans la désintégration du  $B$  ?



# Introduction aux multiquarks

Spectroscopie des Multiquarks de plus en plus d'actualité  
Après des années de scepticisme

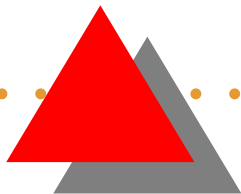
- mésons scalaires y compris  $\pi^+\pi^+$  ? (Obelix)
- Baryonium dans la désintégration du  $B$  ?
- $c\bar{c}q\bar{q}$  à Belle ?



# Introduction aux multiquarks

Spectroscopie des Multiquarks de plus en plus d'actualité  
Après des années de scepticisme

- mésons scalaires y compris  $\pi^+\pi^+$  ? (Obelix)
- Baryonium dans la désintégration du  $B$  ?
- $c\bar{c}q\bar{q}$  à Belle ?
- $D_{s,J}^*$  à Babar  $\rightarrow c\bar{s}q\bar{q}$  ?



# Introduction aux multiquarks

Spectroscopie des Multiquarks de plus en plus d'actualité  
Après des années de scepticisme

- mésons scalaires y compris  $\pi^+\pi^+$  ? (Obelix)
- Baryonium dans la désintégration du  $B$  ?
- $c\bar{c}q\bar{q}$  à Belle ?
- $D_{s,J}^*$  à Babar  $\rightarrow c\bar{s}q\bar{q}$  ?

17) HINTS FOR A  $I = 2$   $\pi\pi$  RESONANT STATE IN THE ANTI- $N P \rightarrow \pi^+ \pi^+ \pi^-$  ANNIHILATION REACTION.

By OBELIX Collaboration (A. Filippi *for the collaboration*). 2001.

Prepared for Biennial Conference on Low-Energy Antiproton Physics (LEAP 2000), Venice, Italy, 26 Aug 2000.

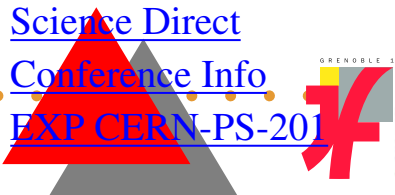
Published in **Nucl.Phys.A692:287-294,2001**

[LaTeX\(US\)](#) | [LaTeX\(EU\)](#) | [Harvmac](#) | [BibTeX](#) | [Keywords](#)

[Science Direct](#)

[Conference Info](#)

[EXP CERN-PS-201](#)



# Baryonium strikes again?

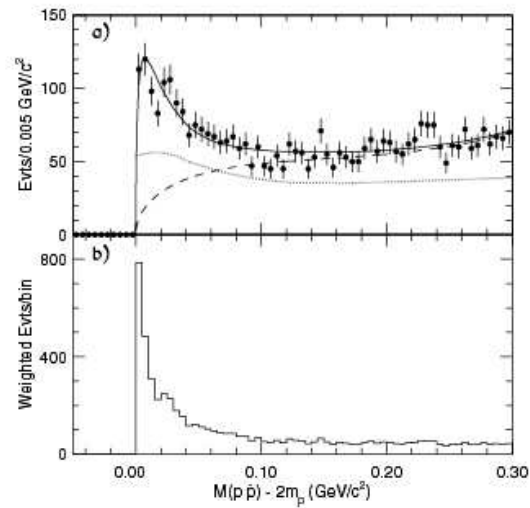
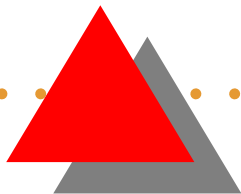


FIG. 3. (a) The near threshold  $M_{p\bar{p}} - 2m_p$  distribution for the  $\gamma p\bar{p}$  event sample. The solid curve is the result of the fit described in the text; the dashed curve shows the fitted background function. The dotted curve indicates how the acceptance varies with  $p\bar{p}$  invariant mass. (b) The  $M_{p\bar{p}} - 2m_p$  distribution with events weighted by  $q_0/q$ .



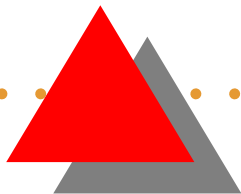
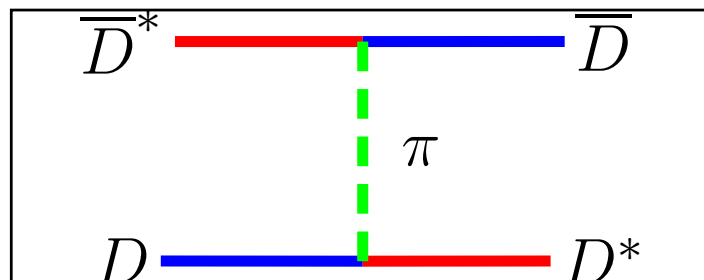
LPSC  
Grenoble

IN2P3

INSTITUT NATIONAL DE PHYSIQUE NUCLÉAIRE  
ET DE PHYSIQUE DES PARTICULES

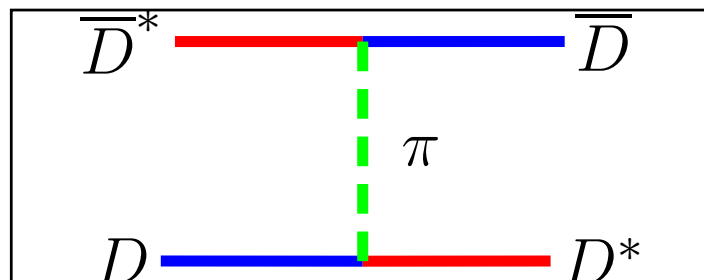
# $Q\bar{Q}q\bar{q}$ Cf. état de Belle à 3.8 GeV

Une longue histoire : Okun, Voloshin, De Rujula et al.,  
Törnqvist, Manohar and Wise, Ericson and Karl, etc

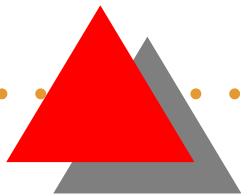


# $Q\bar{Q}q\bar{q}$ Cf. état de Belle à 3.8 GeV

Une longue histoire : Okun, Voloshin, De Rujula et al.,  
Törnqvist, Manohar and Wise, Ericson and Karl, etc

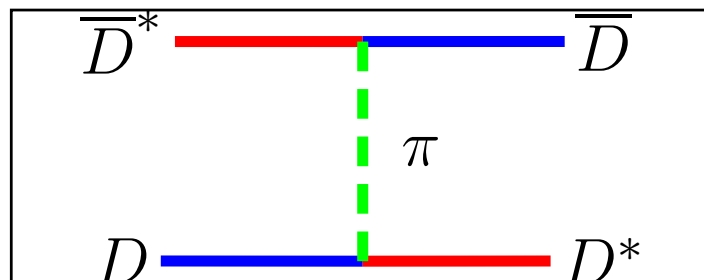


potentiel de Yukawa  $V = -g \exp(-\mu r)/r$ ,  $g$  plus faible  
que  $NN$ , mais  $mg$  OK.  $D\bar{D}^* \sim$  lié.  $B\bar{B}^*$  meilleur.



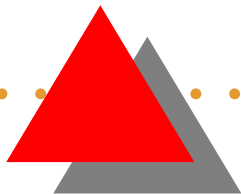
# $Q\bar{Q}q\bar{q}$ Cf. état de Belle à 3.8 GeV

Une longue histoire : Okun, Voloshin, De Rujula et al.,  
Törnqvist, Manohar and Wise, Ericson and Karl, etc



potentiel de Yukawa  $V = -g \exp(-\mu r)/r$ ,  $g$  plus faible  
que  $NN$ , mais  $mg$  OK.  $D\bar{D}^* \sim$  lié.  $B\bar{B}^*$  meilleur.

Courte portée ? (repulsive ?)





# Tetraquark $QQ\bar{q}\bar{q}$

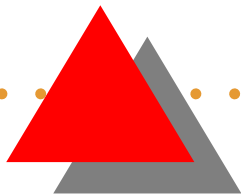
Candidat le plus unanimement prédit par les théoriciens.  
Bénéficie des forces de longue portée, et de forces de courte portée plus favorables

Ader et al. (CERN), Heller et al. (Los Alamos), Zouzou et al. (Grenoble), Lipkin (Argonne), Silvestre-Brac et al. (Grenoble), Brink et Stancu (ECT\*, Trento), Rosina et al. (Slovenia), Michael et al. (UKQCD), etc., Voir aussi : T. Barnes.(Oak Ridge), Nussinov



# Liaison chromomagnétique : $H$

Jaffe:  $H (uuddss)$  150 MeV below  $\Lambda\Lambda$  threshold

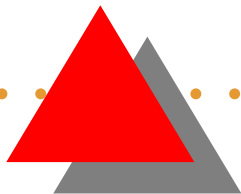


# Liaison chromomagnétique : $H$

Jaffe:  $H$  ( $uuddss$ ) 150 MeV below  $\Lambda\Lambda$  threshold

Due aux **forces chromomagnetiques** (ou analogue modèle des sacs)

$$-g \sum_{i < j} \frac{\tilde{\lambda}_i \cdot \tilde{\lambda}_j \sigma_i \cdot \sigma_j}{m_i m_j} \delta^{(3)}(\mathbf{r}_{ij})$$



# Liaison chromomagnétique : $H$

Jaffe:  $H$  ( $uuddss$ ) 150 MeV below  $\Lambda\Lambda$  threshold

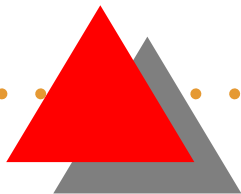
Due aux **forces chromomagnetiques** (ou analogue modèle des sacs)

$$-g \sum_{i < j} \frac{\tilde{\lambda}_i \cdot \tilde{\lambda}_j \sigma_i \cdot \sigma_j}{m_i m_j} \delta^{(3)}(\mathbf{r}_{ij})$$

**brisure  $SU(3)_F$**

détériorée par **Autres termes  $\in$  Hamiltonien**

**Réaliste  $\langle \delta^{(3)}(\mathbf{r}_{ij}) \rangle$**



# Liaison chromomagnétique : $H$

Jaffe:  $H$  ( $uuddss$ ) 150 MeV below  $\Lambda\Lambda$  threshold

Due aux **forces chromomagnetiques** (ou analogue modèle des sacs)

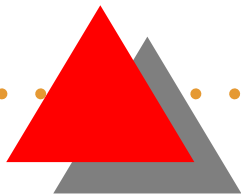
$$-g \sum_{i < j} \frac{\tilde{\lambda}_i \cdot \tilde{\lambda}_j \sigma_i \cdot \sigma_j}{m_i m_j} \delta^{(3)}(\mathbf{r}_{ij})$$

**brisure  $SU(3)_F$**

détériorée par **Autres termes  $\in$  Hamiltonien**

**Réaliste  $\langle \delta^{(3)}(\mathbf{r}_{ij}) \rangle$**

$H$  souvent cherché.



# Liaison chromomagnétique : $H$

Jaffe:  $H$  ( $uuddss$ ) 150 MeV below  $\Lambda\Lambda$  threshold

Due aux **forces chromomagnetiques** (ou analogue modèle des sacs)

$$-g \sum_{i < j} \frac{\tilde{\lambda}_i \cdot \tilde{\lambda}_j \sigma_i \cdot \sigma_j}{m_i m_j} \delta^{(3)}(\mathbf{r}_{ij})$$

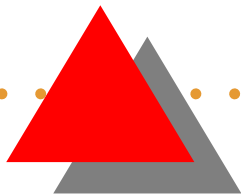
**brisure  $SU(3)_F$**

détériorée par **Autres termes  $\in$  Hamiltonien**

**Réaliste  $\langle \delta^{(3)}(\mathbf{r}_{ij}) \rangle$**

$H$  souvent cherché.

Par ex.  ${}^6_{\Lambda\Lambda}\text{He} \rightarrow H + \alpha$  **pas** vu.



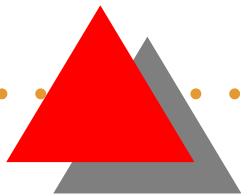


# Chromomagnétisme : Pentaquark lourd

Proposé par Gignoux et al. et Lipkin (1987)

$\overline{Q}qqqq$  avec  $qqqq = uud\bar{s}, udd\bar{s}$  or  $ud\bar{s}s$ .

150 MeV sous le seuil  $D + \Lambda$  ?





# Chromomagnétisme : Pentaquark lourd

Proposé par Gignoux et al. et Lipkin (1987)

$\overline{Q}qqqq$  avec  $qqqq = uud s, udd s$  or  $ud s s$ .

150 MeV sous le seuil  $D + \Lambda$  ?

À cause des forces chromomagnétiques





# Chromomagnétisme : Pentaquark lourd

Proposé par Gignoux et al. et Lipkin (1987)

$\overline{Q}qqqq$  avec  $qqqq = uud s, udd s$  or  $ud s s$ .

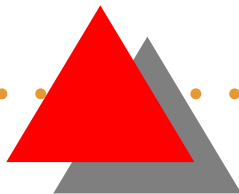
150 MeV sous le seuil  $D + \Lambda$  ?

À cause des forces chromomagnétiques

$$M(Q) < \infty$$

Liaison minée par :

- brisure  $SU(3)_F$
- Autres termes  $\in$  Hamiltonien
- Réaliste  $\langle \delta^{(3)}(r_{ij}) \rangle$



# Chromomagnétisme : Pentaquark lourd

Proposé par Gignoux et al. et Lipkin (1987)

$\overline{Q}qqqq$  avec  $qqqq = uud s, udd s$  or  $ud s s$ .

150 MeV sous le seuil  $D + \Lambda$  ?

À cause des forces chromomagnétiques

$$M(Q) < \infty$$

Liaison minée par :  
brisure  $SU(3)_F$   
Autres termes  $\in$  Hamiltonien  
Réaliste  $\langle \delta^{(3)}(r_{ij}) \rangle$

$P$  recherché à Fermilab (Ashery et al.). Bientôt Compass.





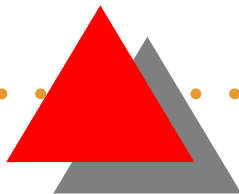
# Précédemment : Chimie de la couleur

Inventée par Chan H.M. et al. pour le baryonium, appliquée par d'autres à d'autres configurations. Quarks (ou antiquark) regroupés avec couleur exotique (6, 8, ...), et reliés par une corde à un autre paquet avec la couleur conjuguée, et séparé par une barrière orbitale.

→ état multiquark metastable

En particulier

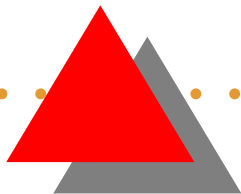
$$(q\bar{q})_8 \leftrightarrow (qqq)_8$$





+ récent: Praszalowicz, Diakonov et al.

État baryonique  $S = +1$  **prédit** près de 1.5 GeV dans un modèle de Skyrmons.

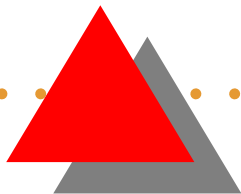




+ récent: Praszalowicz, Diakonov et al.

État baryonique  $S = +1$  **prédit** près de 1.5 GeV dans un modèle de Skyrmons.

Ce modèle décrit la dynamique du champ mésonique, avec les baryons vus comme les sources de ce champ.



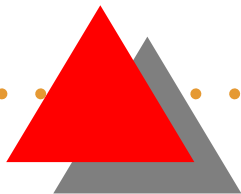


+ récent: Praszalowicz, Diakonov et al.

État baryonique  $S = +1$  **prédit** près de 1.5 GeV dans un modèle de Skyrmons.

Ce modèle décrit la dynamique du champ mésonique, avec les baryons vus comme les sources de ce champ.

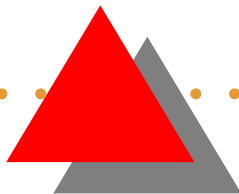
Reformulation de la QCD avec une théorie effective bosonique. Mais l'équivalence avec la QCD n'est pas démontrée pour le nombre réel de couleurs et de dimensions.





+ récent: Praszalowicz, Diakonov et al.

États de Parité positive prédits, qui forment un antdécuplet, associé à l'octet ( $N, \Lambda, \dots$ ) et décuplet ( $\Delta, \Omega^-, \dots$ ) .

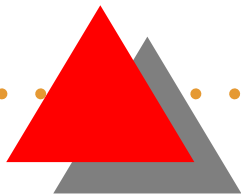




+ récent: Praszalowicz, Diakonov et al.

États de Parité positive prédits, qui forment un antdécuplet, associé à l'octet ( $N, \Lambda, \dots$ ) et décuplet ( $\Delta, \Omega^-, \dots$ ) .

Des résonances, non exotiques, dans cet antidécuplet.





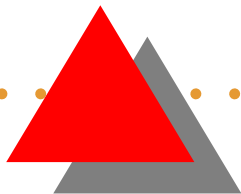


+ récent: Praszalowicz, Diakonov et al.

États de Parité positive prédits, qui forment un antdécuplet, associé à l'octet ( $N, \Lambda, \dots$ ) et décuplet ( $\Delta, \Omega^-, \dots$ ) .

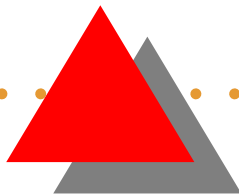
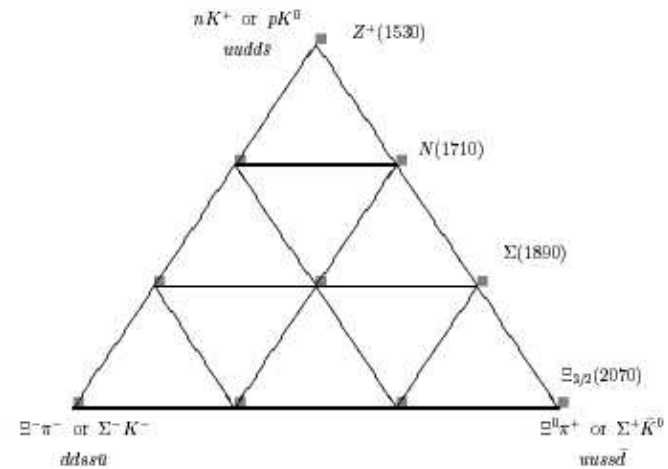
Des résonances, non exotiques, dans cet antidécuplet.

D'autres états exotiques sont prédits. En particulier, partenaire **non étrange** à  $\sim 1700$  MeV (Diakonov) ou **1200-1300 MeV** (Nussinov)

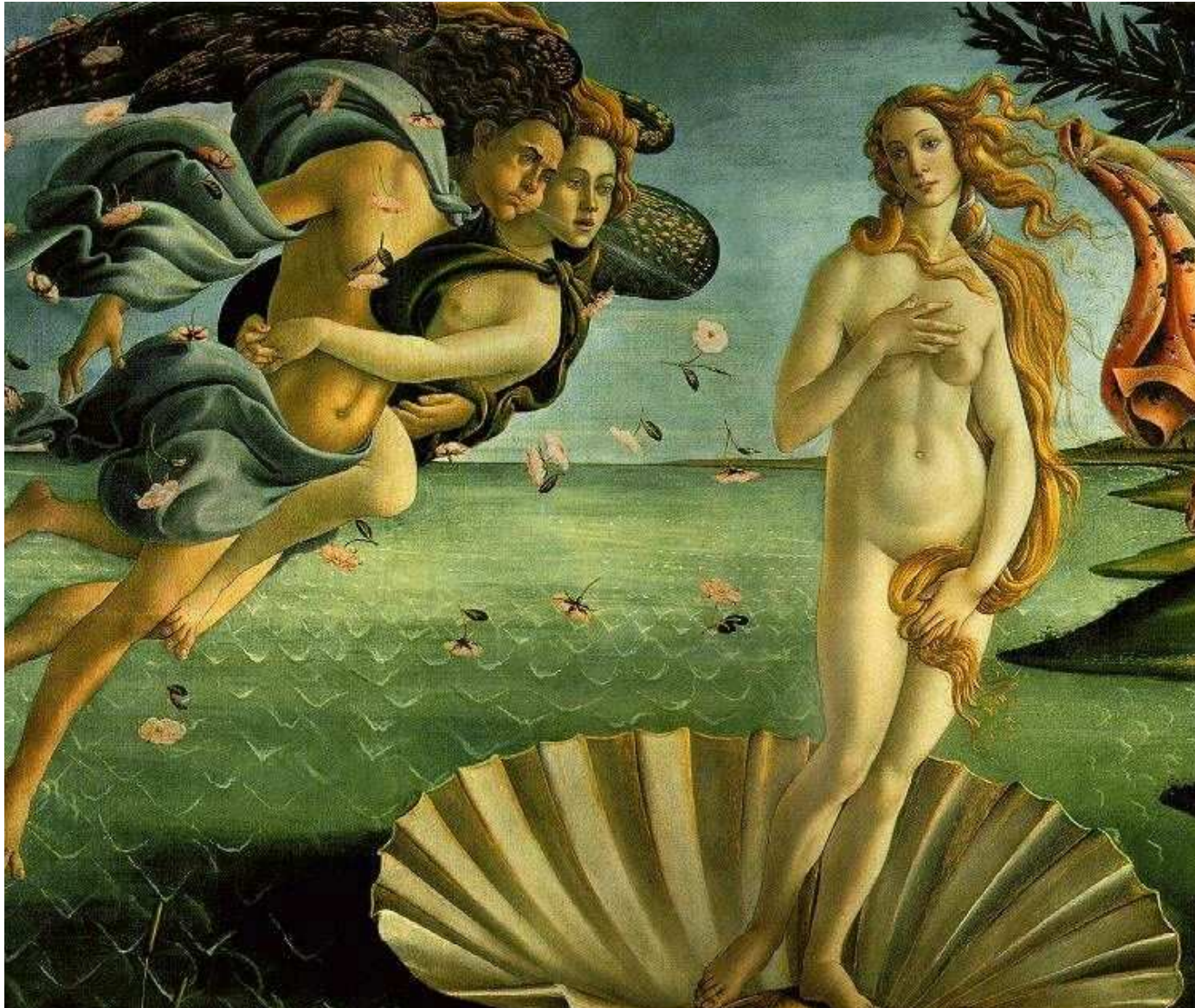


+ récent: Praszalowicz, Diakonov et al.

octet	$T$	$Y$	$\Delta m_B$
$N$	$1/2$	$1$	$(3/10)\alpha + \beta - (1/20)\gamma$
$\Lambda$	$0$	$0$	$(1/10)\alpha + (3/20)\gamma$
$\Sigma$	$1$	$0$	$-(1/10)\alpha - (3/20)\gamma$
$\Xi$	$1/2$	$-1$	$-(1/5)\alpha - \beta + (1/5)\gamma$
decuplet			
$\Delta$	$3/2$	$1$	$(1/8)\alpha + \beta - (5/16)\gamma$
$\Sigma^*$	$1$	$0$	$0$
$\Xi^*$	$1/2$	$-1$	$-(1/8)\alpha - \beta + (5/16)\gamma$
$\Omega$	$0$	$-2$	$-(1/4)\alpha - 2\beta + (5/8)\gamma$
antidecuplet			
$Z^+$	$0$	$2$	$(1/4)\alpha + 2\beta - (1/8)\gamma$
$N_{\overline{10}}$	$1/2$	$1$	$(1/8)\alpha + \beta - (1/16)\gamma$
$\Sigma_{\overline{10}}$	$1$	$0$	$0$
$\Xi_{3/2}$	$3/2$	$-1$	$-(1/8)\alpha - \beta + (1/16)\gamma$



# Ordinary baryons (as quark–diquark ?)



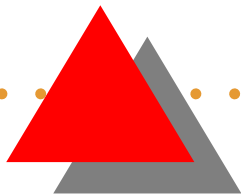


# Pentaquark baryons



# La question de la parité

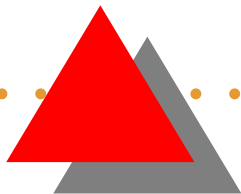
Dans un modèle constituant simple, on a  $P = -1$  pour quatre quarks et un antiquarks dans l'état  $\ell = 0$ .



# La question de la parité

Dans un modèle constituant simple, on a  $P = -1$  pour quatre quarks et un antiquarks dans l'état  $\ell = 0$ .

Diakonov et al. prédisent  $P = +1$  pour ce multiplet, partenaire de l'octet de spin  $s = 1/2$  et du décuplet  $s = 3/2$ .

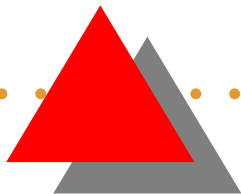


# La question de la parité

Dans un modèle constituant simple, on a  $P = -1$  pour quatre quarks et un antiquarks dans l'état  $\ell = 0$ .

Diakonov et al. prédisent  $P = +1$  pour ce multiplet, partenaire de l'octet de spin  $s = 1/2$  et du décuplet  $s = 3/2$ .

Stancu et Riska proposent  $P = +1$  pour un modèle à la Glotzmann, avec des échanges de mésons entre quarks.



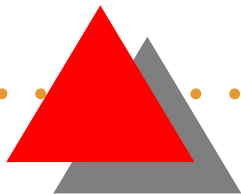
# La question de la parité

Dans un modèle constituant simple, on a  $P = -1$  pour quatre quarks et un antiquarks dans l'état  $\ell = 0$ .

Diakonov et al. prédisent  $P = +1$  pour ce multiplet, partenaire de l'octet de spin  $s = 1/2$  et du décuplet  $s = 3/2$ .

Stancu et Riska proposent  $P = +1$  pour un modèle à la Glotzmann, avec des échanges de mésons entre quarks.

Jaffe et Wilczek proposent des diquarks  $[ud]_{\bar{3}}$ . Qui se couplent en  $\bar{3} \times 3 \rightarrow 3$ . C'est **antisymétrique**, donc il faut  $\ell = 1$  entre ces diquarks, ce qui donnerait  $P = +1$ .





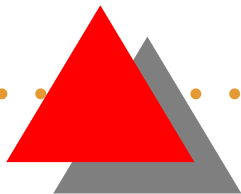
# La question de la parité

Dans un modèle constituant simple, on a  $P = -1$  pour quatre quarks et un antiquarks dans l'état  $\ell = 0$ .

Diakonov et al. prédisent  $P = +1$  pour ce multiplet, partenaire de l'octet de spin  $s = 1/2$  et du décuplet  $s = 3/2$ .

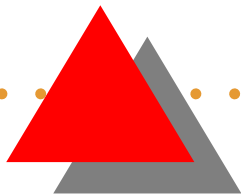
Stancu et Riska proposent  $P = +1$  pour un modèle à la Glotzmann, avec des échanges de mésons entre quarks.

Jaffe et Wilczek proposent des diquarks  $[ud]_{\bar{3}}$ . Qui se couplent en  $\bar{3} \times 3 \rightarrow 3$ . C'est **antisymétrique**, donc il faut  $\ell = 1$  entre ces diquarks, ce qui donnerait  $P = +1$ .



# La question de la parité (suite)

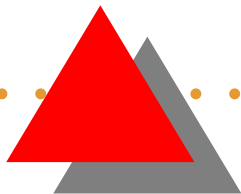
Lemaire et al. suggèrent une attraction de courte portée due à des instantons, et ils ont un état lié dans l'onde  $S$  de  $KN$ , et donc  $P = -1$ .



# La question de la parité (suite)

Lemaire et al. suggèrent une attraction de courte portée due à des instantons, et ils ont un état lié dans l'onde  $S$  de  $KN$ , et donc  $P = -1$ .

Sur réseau ? Csikor et al. (Eötvös, DESY, Wuppertal) confirment un pentaquark à 1500 MeV avec isospin  $I = 0$  et parité +

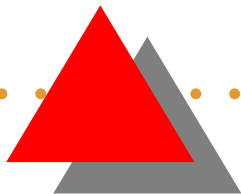


# La question de la parité (suite)

Lemaire et al. suggèrent une attraction de courte portée due à des instantons, et ils ont un état lié dans l'onde  $S$  de  $KN$ , et donc  $P = -1$ .

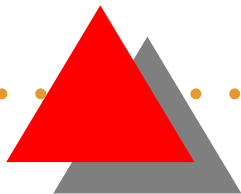
Sur réseau ? Csikor et al. (Eötvös, DESY, Wuppertal) confirment un **pentaquark à 1500 MeV** avec isospin  $I = 0$  et parité +

Règles de somme QCD (ce matin) Parité **négative !**



# Largeur

La faible largeur suggère un scénario à la désintégration  $\alpha$ .  
Attraction à courte distance et barrière externe.

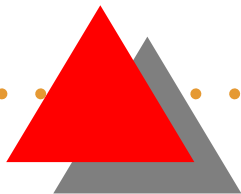


# Largeur

La faible largeur suggère un scénario à la désintégration  $\alpha$ .  
Attraction à courte distance et barrière externe.

centrifuge si  $P = 1$

Barrière externe : répulsion de longue portée cf.  
déphasages KN.



# Largeur

La faible largeur suggère un scénario à la désintégration  $\alpha$ .  
Attraction à courte distance et barrière externe.

centrifuge si  $P = 1$

Barrière externe : répulsion de longue portée cf.  
déphasages KN.

Faible largeur ( $\Gamma < 5 \text{ MeV}$ ) nécessaire pour préserver la  
dynamique KN. (Haidenbauer, etc.)



# Isotenseur ?

Captstick, Page et Roberts

Explique la largeur faible (due à des impuretés d'isospin)

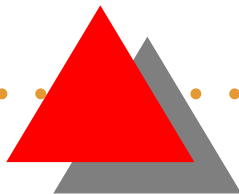
Prédictions d'états **stables** (à désintégration faible) dans cet isomultiplet.

Table 1

Quark content,  $I_z$ , and strong decay modes of  $\Theta$  states

State	Quarks	$I_z$	Decay modes
$\Theta^-$	$dddd\bar{s}$	-2	
$\Theta^0$	$uddd\bar{s}$	-1	$nK^0$
$\Theta^+$	$uudd\bar{s}$	0	$nK^+, pK^0$
$\Theta^{++}$	$uuud\bar{s}$	1	$pK^+$
$\Theta^{+++}$	$uuuu\bar{s}$	2	

State	Decay mode	Pairs	State	Decay mode	Pairs
$\Theta^{+++}$	$p\pi^+l^+\nu_l$	A 1	$\Theta^-$	$n\pi^-$	E 0
	$p\pi^+\pi^+$	A 1		$n\pi^-\pi^0$	E 1
	$p\pi^+\pi^0l^+\nu_l$	P 1		$n\pi^-\pi^-l^+\nu_l$	P 1
	$\Delta^{++}l^+\nu_l$	A 0		$\Delta^-\pi^0$	E 0
	$\Delta^{++}\pi^+$	A 0		$\Delta^-\pi^-l^+\nu_l$	P 0
	$\Delta^{++}\pi^0l^+\nu_l$	P 0		$\Delta^-f_0(600)$	E 0



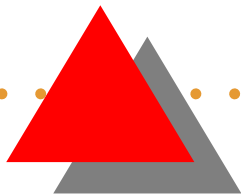
**IN2P3**

INSTITUT NATIONAL DE PHYSIQUE NUCLÉAIRE  
ET DE PHYSIQUE DES PARTICULES



# Le plus beau modèle

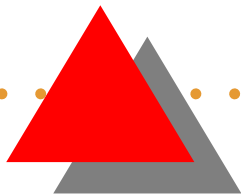
Bicudo et al.



# Le plus beau modèle

Bicudo et al.

Un état **Borroméen**  $NK\pi$  lié grâce à l'**attraction**  $N\pi$  et  $K\pi$ , malgré la **répulsion**  $NK$ .

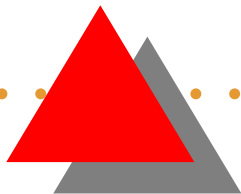


# Le plus beau modèle

Bicudo et al.

Un état **Borroméen**  $NK\pi$  lié grâce à l'**attraction**  $N\pi$  et  $K\pi$ ,  
malgré la **répulsion**  $NK$ .

Un peu juste quantitativement



# KN $\pi$ dynamics

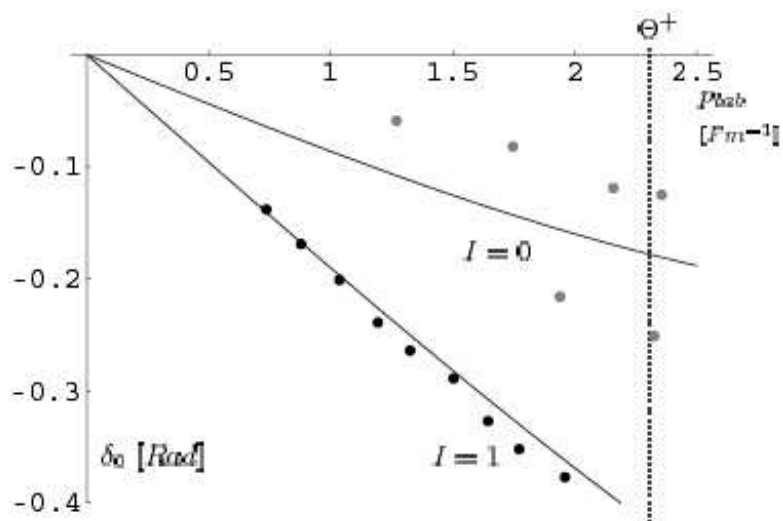


FIG. 1: The  $I = 0$  and  $I = 1$  experimental [13] and theoretical (this paper and ref. [11]) s-wave phase shifts as a function of the kaon momentum in the laboratory frame.

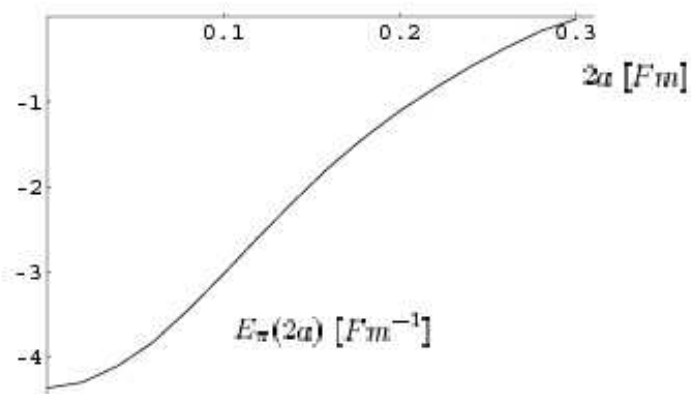
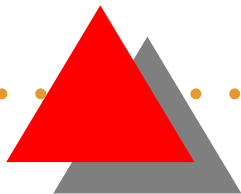


FIG. 5:  $\pi$  energy as a function of the coordinate  $|\vec{r}_N - \vec{r}_K| = 2a$ .



# Quelques conclusions

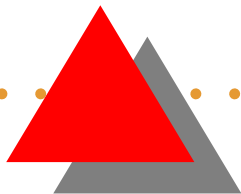
Dynamique des quarks légers Définitivement plus délicate  
que l'interpolation naïve du secteur lourd



# Quelques conclusions

Dynamique des quarks légers Définitivement plus délicate  
que l'interpolation naïve du secteur lourd

Parité Cruciale pour éliminer certains modèles



# Quelques conclusions

**Dynamique des quarks légers** Définitivement plus délicate que l'interpolation naïve du secteur lourd

**Parité** Cruciale pour éliminer certains modèles

**Saveur** D'autres états prédits, avec des nombres quantiques normaux ou exotiques. Début d'une série ou accident de KN ?

