

# **EFFECTIVE FIELD THEORIES APPLIED TO STUDIES OF HADRON PHYSICS**

**KANCHAN P. KHEMCHANDANI**  
**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO PAULO**

Dec 9, 2021

VII OFICINA NACIONAL DE TEORIA QUÂNTICA DE CAMPOS  
Encontro Virtual, Universidade Federal da Bahia, Brazil

# EFFECTIVE FIELD THEORIES AND HADRON PHYSICS

- ⦿ **Embora a teoria de QCD é muito bem sucedida nas altas energias, ela é não perturbativa nas energias relevantes à física de hádrons.**
- ⦿ **Uma alternativa para estudar as interações entre hádrons é considerar a teoria de campos efetivo com graus de liberdade sendo os hádrons ( ao em vez de quarks).**
- ⦿ **Tipicamente: Considerar Lagrangianas baseadas nas simetrias de QCD relevantes a um dado sistema.**

# FÍSICA DE HÁDRONS:

## ● Informações importantes trazidas pelos estudos de hádrons:

● Formulação do modelo de quarks

● Foi o estudo de  $\Delta^{++}$  que trouxe a primeira indicação de existência do número quântico de cor.

● O estudo do  $J/\psi$  nos levou à descoberta de quark charm

## ● Panorama atual:

PHYSICAL REVIEW LETTERS **122**, 222001 (2019)


Editors' Suggestion

Featured in Physics

PHYSICAL REVIEW LETTERS **125**, 242001 (2020)

**Model-Independent Study of Structure in  $B^+ \rightarrow D^+ D^- K^+$  Decays**

R. Aaij *et al.*\*  
(LHCb Collaboration)

 (Received 2 September 2020; accepted 7 October 2020; published 7 December 2020)

**Observation of a Narrow Pentaquark  
and of the Two-Peak Structure of**

R. Aaij *et al.*\*  
(LHCb Collaboration)

 (Received 6 April 2019; published .

EUROPEAN ORGANIZATION FOR NUCLEAR RESEARCH (CERN)



CERN-EP-2021-165  
LHCb-PAPER-2021-031  
September 2, 2021

**Observation of an exotic narrow  
doubly charmed tetraquark**

# FÍSICA DE HÁDRONS:

PHYSICAL REVIEW D **102**, 112003 (2020)

Editors' Suggestion

Amplitude analysis of the  $B^+ \rightarrow D^+ D^- K^+$  decay

R. Aaij *et al.*\*  
(LHCb Collaboration)

PHYSICAL REVIEW LETTERS **125**, 242001 (2020)

Model-Independent Study of Structure in  $B^+ \rightarrow D^+ D^- K^+$  Decays

R. Aaij *et al.*\*  
(LHCb Collaboration)

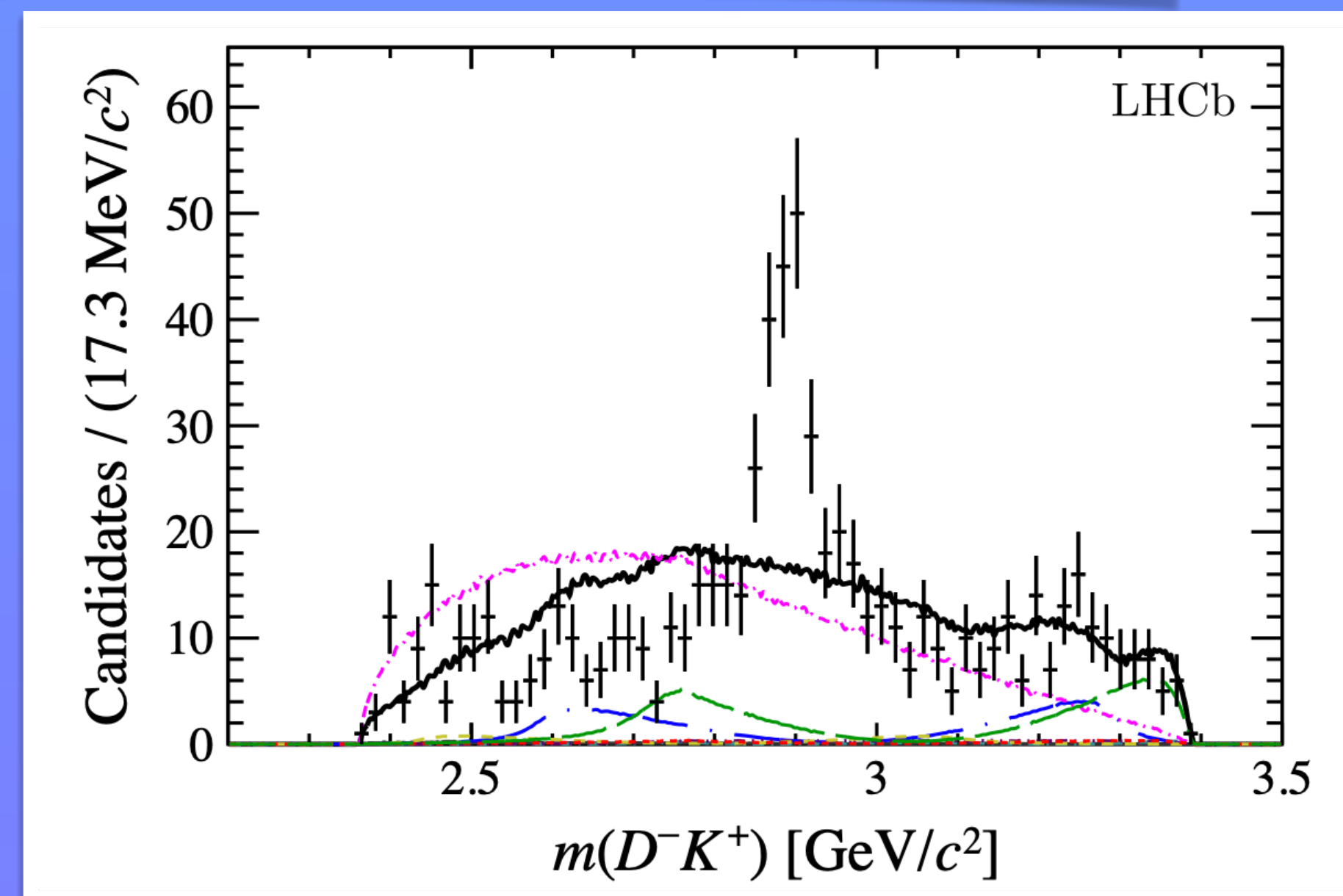
(Received 2 September 2020; accepted 7 October 2020; published 7 December 2020)

© Nestes trabalhos observou-se um sinal de dois estados na massa invariante de  $D^- K^+$  ( $c\bar{d} u\bar{s}$ ):

$X_0(2866)$  :  $M = 2866 \pm 7$  MeV e  $\Gamma = 57,2 \pm 12,9$  MeV,

$X_1(2900)$  :  $M = 2904 \pm 5$  MeV e  $\Gamma = 110,3 \pm 11,5$  MeV.

© Os estados claramente não são  $q\bar{q}$ !



# FÍSICA DE HÁDRONS:

EUROPEAN ORGANIZATION FOR NUCLEAR RESEARCH (CERN)



CERN-EP-2021-165  
LHCb-PAPER-2021-031  
September 2, 2021

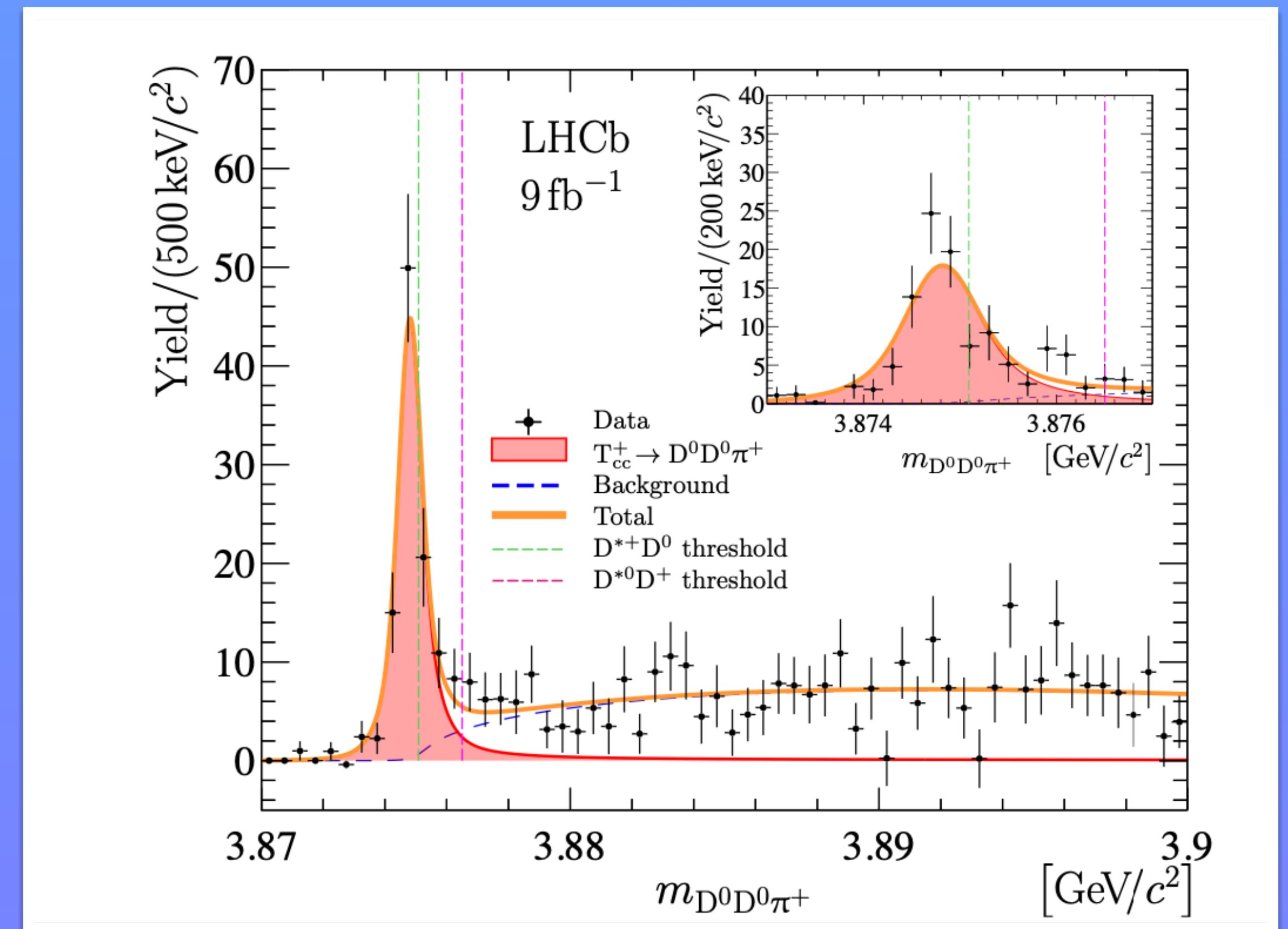
## Observation of an exotic narrow doubly charmed tetraquark

© Nestes trabalhos observou-se um sinal de um estado na massa invariante de  $D^{*0}D^+$  ( $c\bar{d}c\bar{u}$ ):

$M = 3875.09$  MeV com incerteza  $\delta m_{exp} = -360 \pm 40_{-0}^{+4}$  keV,

$\Gamma = 48 \pm 2_{-14}^{+0}$  keV.

© Apenas possui decaimento fraco!



# FÍSICA DE HÁDRONS:

PHYSICAL REVIEW LETTERS **122**, 222001 (2019)

Editors' Suggestion

Featured in Physics

Observation of a Narrow Pentaquark State,  $P_c(4312)^+$ ,  
and of the Two-Peak Structure of the  $P_c(4450)^+$

R. Aaij *et al.*\*  
(LHCb Collaboration)

 (Received 6 April 2019; published 5 June 2019)

© Os estados  $P_c$ 's foram encontrados na massa invariante de  $J/\psi p$ , produzidos no processo  $\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi p K^-$ .

## EXOTIC BARYONS

### Pentaquarks

$P_c(4312)^+$

$P_c(4380)^+$

$P_c(4440)^+$

$P_c(4457)^+$

was  $P_c(4450)$

# FÍSICA DE HÁDRONS:

## ● Desafios atuais:

- Determinar as propriedades de hádrons exóticos.
- Porque certas configurações mostram hádrons exóticos de um dado tipo?
- Hádrons exóticos existem somente quando há presença de quarks pesados?
- Qual impacto de existência de hádrons exóticos em colisões de íons pesados, em colisões nucleares, etc.?

# FÍSICA DE HÁDRONS:

- Large Hadron Collider (beauty experiment), Suíça (eventos de decaimento de B). Colisões de pp, ou ions pesados.
- Experimento BES no laboratório BEPC (Beijing electron proton collider), china
- Belle, Laboratório KEK (Tsukuba) Japão (electron proton collider), J-PARC (acelerador de proton), Japão (também no KEK), LEPS (Laser electron photon experiment at Spring8)
- Forschungszentrum Jülich (Cooler synchrotron, feixe de Proton/deuteron), Mainz Microtron (photon beams)
- Jefferson lab (USA), feixe de elétrons, alvo núcleos
- (Novos experimentos) (1)  $\bar{P}$ anda (antiproton Annihilation at Darmstadt) (2) super-tau-charm factory (Novosibirsk).



# ALGUNS DE NOSSOS TRABALHOS RECENTES:

Open Access

## Decay processes of a pseudoscalar $D(2900)$

Brenda B. Malabarba, K. P. Khemchandani, and A. Martínez Torres  
Phys. Rev. D **104**, 116002 – Published 3 December 2021

- Além das descoberta dos  $X(2900)$ , colaborações LHCb e BaBar tem trazido informações sobre mésons  $D^{(*)}$  na faixa de 2.4-3.0 GeV.
- Estruturas com a maior massa conhecida até agora, em torno de 3000 MeV, foram observadas pela Colaboração LHCb [*JHEP* 09, 145 (2013), *PRD* 94, no.7, 072001 (2016)].
- LHCb reporta a descoberta de um sinal em torno de 3000 MeV nos espectros de massa de  $D^{*+}\pi^-$ ,  $D^+\pi^-$ ,  $D^0\pi^+$ . A estrutura encontrada no espectro  $D^{*+}\pi^-$  é compatível com uma paridade não natural, enquanto o sinal nos espectros  $D^+\pi^-$ ,  $D^0\pi^+$  parece ser compatível com uma atribuição de paridade natural.

# ALGUNS DE NOSSOS TRABALHOS RECENTES:

Open Access

## Decay processes of a pseudoscalar $D(2900)$

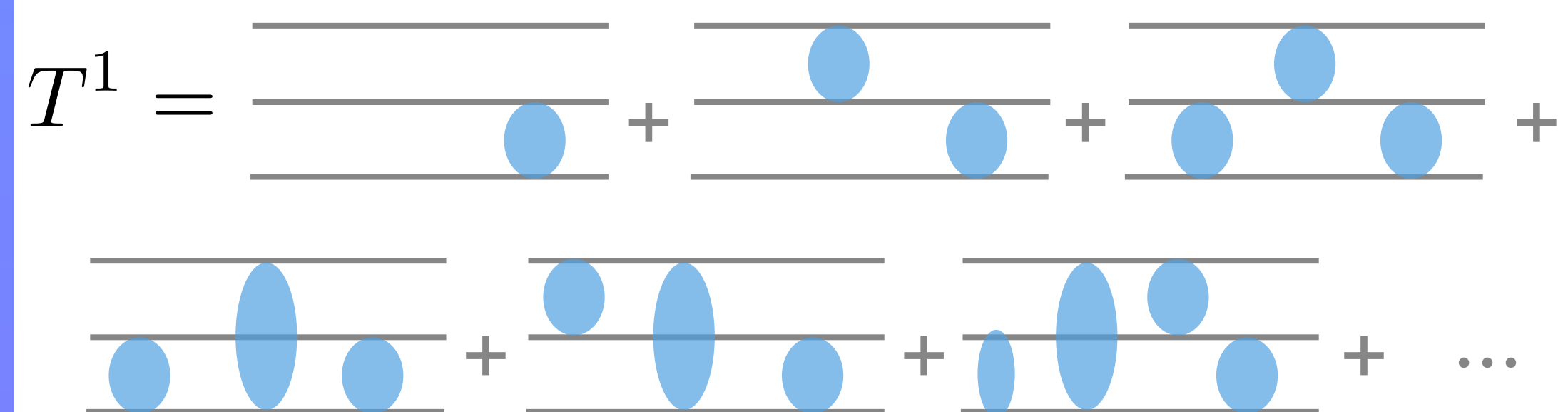
Brenda B. Malabarba, K. P. Khemchandani, and A. Martínez Torres  
 Phys. Rev. D **104**, 116002 – Published 3 December 2021

● Em um trabalho anterior (*PRD 87, 034025*) estudamos o sistema  $DK\bar{K}$ , resolvendo equações de espalhamento de Faddeev para:  $D^0K^+K^-$ ,  $D^0K^0\bar{K}^0$ ,  $D^0\pi^+\pi^-$ ,  $D^0\pi^-\pi^+$ ,  $D^0\pi^0\pi^0$ ,  $D^0\pi^0\eta$ ,  $D^+K^0K^-$ ,  $D^+\pi^-\pi^0$ ,  $D^+\pi^-\eta$ ,  $D^+\pi^0\pi^-$

● Para resolver calculamos as amplitudes de input usando Lagrangianas chiral e de “heavy quark flavor, spin symmetry” para sistemas envolvendo D e mésons leves respectivamente.

$$T = T^1 + T^2 + T^3$$

$$T^i = t^i \delta^3(\vec{k}'_i - \vec{k}_i) + t^i g(T^j + T^k)$$



# ALGUNS DE NOSSOS TRABALHOS RECENTES:

● Lagrangiana chiral:

● Para sistemas de dois mésons:

$$\mathcal{L}_2 = \frac{1}{12f^2} \langle (\partial_\mu \Phi \Phi - \Phi \partial_\mu \Phi)^2 + M \Phi^4 \rangle$$

$$\Phi \equiv \frac{\lambda}{\sqrt{2}} \phi = \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}}\pi^0 + \frac{1}{\sqrt{6}}\eta_8 & \pi^+ & K^+ \\ \pi^- & -\frac{1}{\sqrt{2}}\pi^0 + \frac{1}{\sqrt{6}}\eta_8 & K^0 \\ K^- & \bar{K}^0 & -\frac{2}{\sqrt{6}}\eta_8 \end{pmatrix}$$

● Simetria de quarks pesados:  $\mathcal{L} = D_\mu H D^\mu H^\dagger - M_H^2 H H^\dagger$

● onde  $D_\mu H^\dagger = (\partial_\mu + \Gamma_\mu) H^\dagger$ ,  $D_\mu H = H(\overleftarrow{\partial}_\mu + \Gamma_\mu^\dagger)$ ,  $\Gamma_\mu = \frac{1}{2}(u^\dagger \partial_\mu u + u \partial_\mu u^\dagger)$ ,  $u^2 = e^{i\sqrt{2}\phi/f}$

$$\mathbf{e}H = (D^0, D^+, D_s^+)$$

# ALGUNS DE NOSSOS TRABALHOS RECENTES:

Open Access

## Decay processes of a pseudoscalar $D(2900)$

Brenda B. Malabarba, K. P. Khemchandani, and A. Martínez Torres  
Phys. Rev. D **104**, 116002 – Published 3 December 2021

- Com as Lagrangianas resolvemos as equações de espalhamento de dois mésons que entram na equações de Faddeev como input.
- No trabalho anterior vimos a interação de três mésons gera um estado com massa em torno de 2900 MeV e largura ~ 60 MeV
- Motivados pelo interesse de grupos experimentais em explorar mésons com charm com massa próximo a 3000 MeV, estudamos agora as propriedades de decaimento do mesmo.

$$T = T^1 + T^2 + T^3$$
$$T^i = t^i \delta^3(\vec{k}'_i - \vec{k}_i) + t^i g(T^j + T^k)$$

$T^1 =$  [diagrams]  $+$  ...

# ALGUNS DE NOSSOS TRABALHOS RECENTES:

Open Access

## Decay processes of a pseudoscalar $D(2900)$

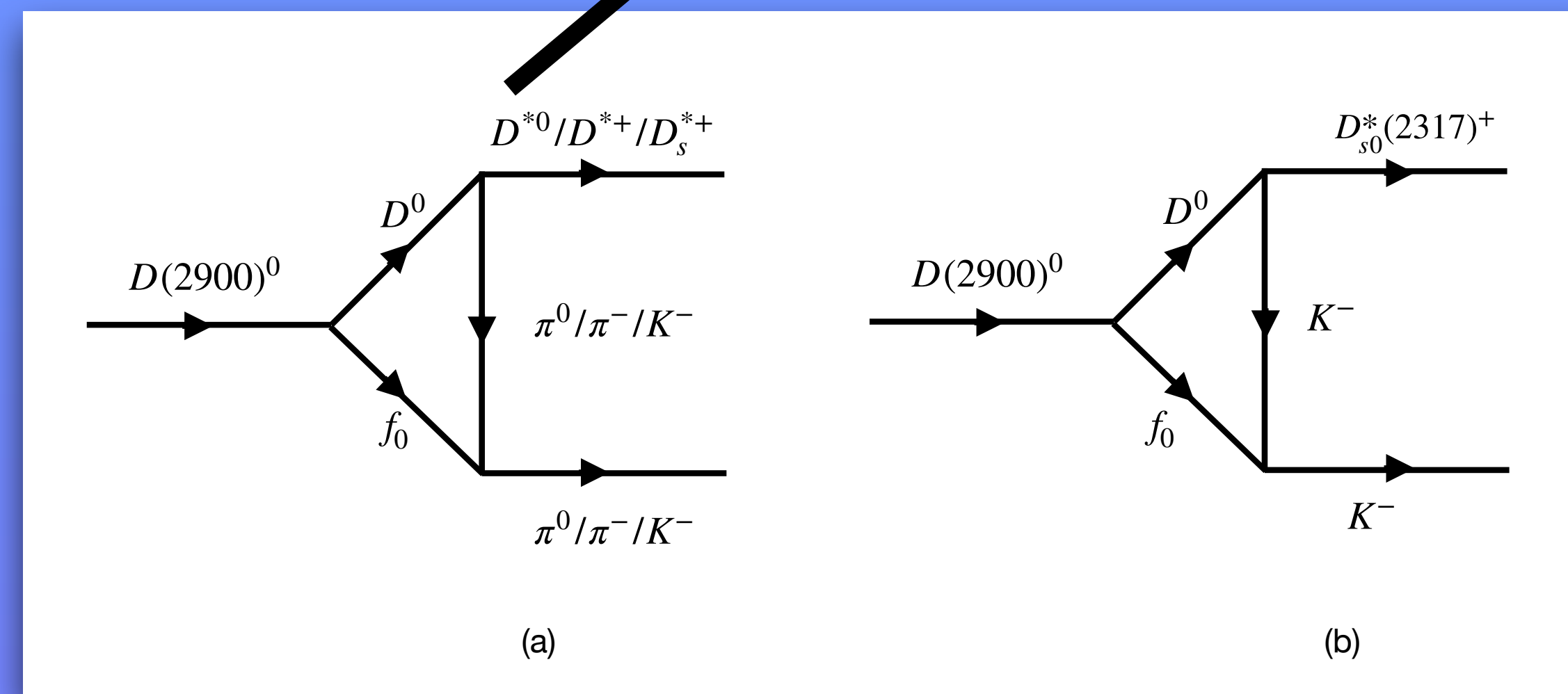
Brenda B. Malabarba, K. P. Khemchandani, and A. Martínez Torres  
 Phys. Rev. D **104**, 116002 – Published 3 December 2021

Amplitude

$$\begin{aligned}
 it_a &= \int \frac{d^4q}{(2\pi)^4} it_{D(2900)^0 \rightarrow D^0 f_0} it_{f_0 \rightarrow P_1 P_2} it_{VPP} \frac{i}{(k+q)^2 - m_D^2} \frac{i}{(P-k-q)^2 - m_{f_0}^2} \frac{i}{q^2 - m_{P_1}^2} \\
 &= - \int \frac{d^4q}{(2\pi)^4} \frac{g_{D(2900)^0 \rightarrow D^0 f_0} g_{f_0 \rightarrow P_1 P_2} [\mathcal{I}_{VPP} g_{VPP} \epsilon_\mu(k) (k^\mu + 2q^\mu)]}{[(k+q)^2 - m_D^2] [(P-k-q)^2 - m_{f_0}^2] [q^2 - m_{P_1}^2]},
 \end{aligned}$$

Passarino Veltman reduction

$$\mathcal{L}_{VPP} = -ig_{VPP} \langle V_\mu [P, \partial_\mu P] \rangle$$



# ALGUNS DE NOSSOS TRABALHOS RECENTES:

Open Access

## Decay processes of a pseudoscalar $D(2900)$

Brenda B. Malabarba, K. P. Khemchandani, and A. Martínez Torres  
 Phys. Rev. D **104**, 116002 – Published 3 December 2021

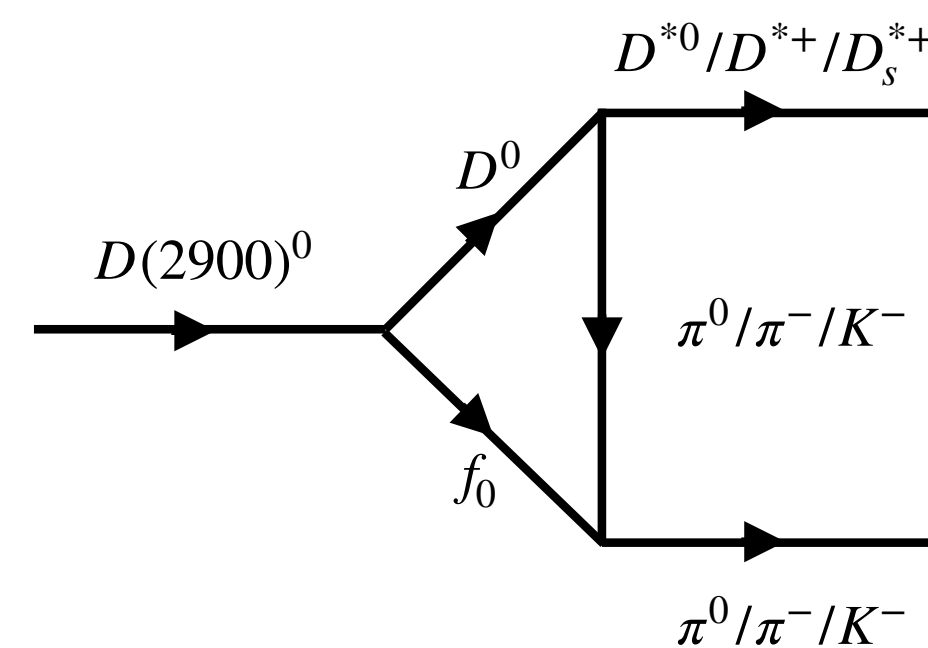
Decay channel	Decay width (MeV)
---------------	-------------------

$D^{*0}\pi^0$	$0.18 \pm 0.04$
---------------	-----------------

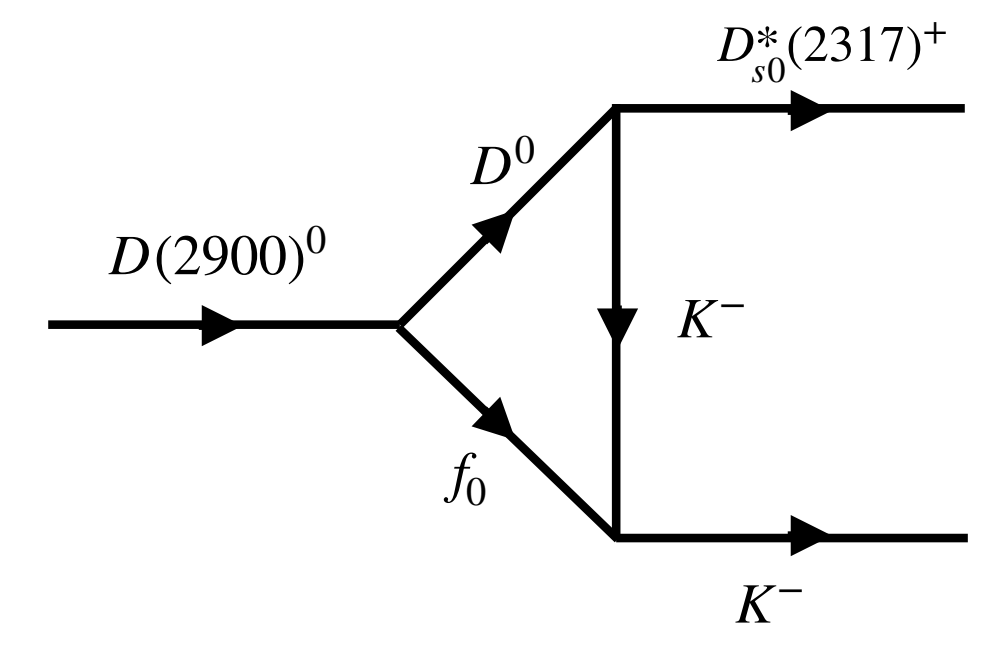
$D^{*+}\pi^-$	$0.35 \pm 0.07$
---------------	-----------------

$D_s^{*+}K^-$	$0.44 \pm 0.10$
---------------	-----------------

$D_{s0}^{*}(2317)^+K^-$	$18.33 \pm 7.25$
-------------------------	------------------



(a)



(b)

# ALGUNS DE NOSSOS TRABALHOS RECENTES:

PHYSICAL REVIEW D **103**, 016015 (2021)

## Decay properties of $N^*(1895)$

K. P. Khemchandani,<sup>1,2,\*</sup> A. Martínez Torres,<sup>3,2,†</sup> H. Nagahiro,<sup>4,2,‡</sup> and A. Hosaka<sup>2,§</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal de São Paulo, C.P. 01302-907, São Paulo, Brazil

<sup>2</sup>Research Center for Nuclear Physics (RCNP), Mihogaoka 10-1, Ibaraki 567-0047, Japan

<sup>3</sup>Universidade de São Paulo, Instituto de Física, C.P. 05389-970, São Paulo, Brazil

<sup>4</sup>Department of Physics, Nara Women's University, Nara 630-8506, Japan



(Received 26 October 2020; accepted 6 January 2021; published 25 January 2021)

- Embora estudos de hádrons com charm e bottom são de interesse central atualmente, existe escassez de dados sobre as propriedades dos núcleons.
- Estudar o espectro de núcleon é difícil porque conforme a energia cresce os estados ficam mais largos e a identificação do mesmo nos dados experimentais é um desafio.
- Existem varias questões intrigantes, como a inversão de massa de primer estado excitado de  $N$  e  $\Lambda$ :  
 $N^*(1535) - \Lambda(1405)$ .
- Outro exemplo é  $N^*(1895)$ , que é o estado com maior massa conhecida, com spin-paridade  $1/2^-$ . No modelo quark os estados com  $1/2^-$  são  $N^*(1535)$  e depois outro com massa  $\sim 2100$  MeV.

# ALGUNS DE NOSSOS TRABALHOS RECENTES:

PHYSICAL REVIEW D **103**, 016015 (2021)

## Decay properties of $N^*(1895)$

K. P. Khemchandani,<sup>1,2,\*</sup> A. Martínez Torres,<sup>3,2,†</sup> H. Nagahiro,<sup>4,2,‡</sup> and A. Hosaka<sup>2,§</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal de São Paulo, C.P. 01302-907, São Paulo, Brazil

<sup>2</sup>Research Center for Nuclear Physics (RCNP), Mihogaoka 10-1, Ibaraki 567-0047, Japan

<sup>3</sup>Universidade de São Paulo, Instituto de Física, C.P. 05389-970, São Paulo, Brazil

<sup>4</sup>Department of Physics, Nara Women's University, Nara 630-8506, Japan

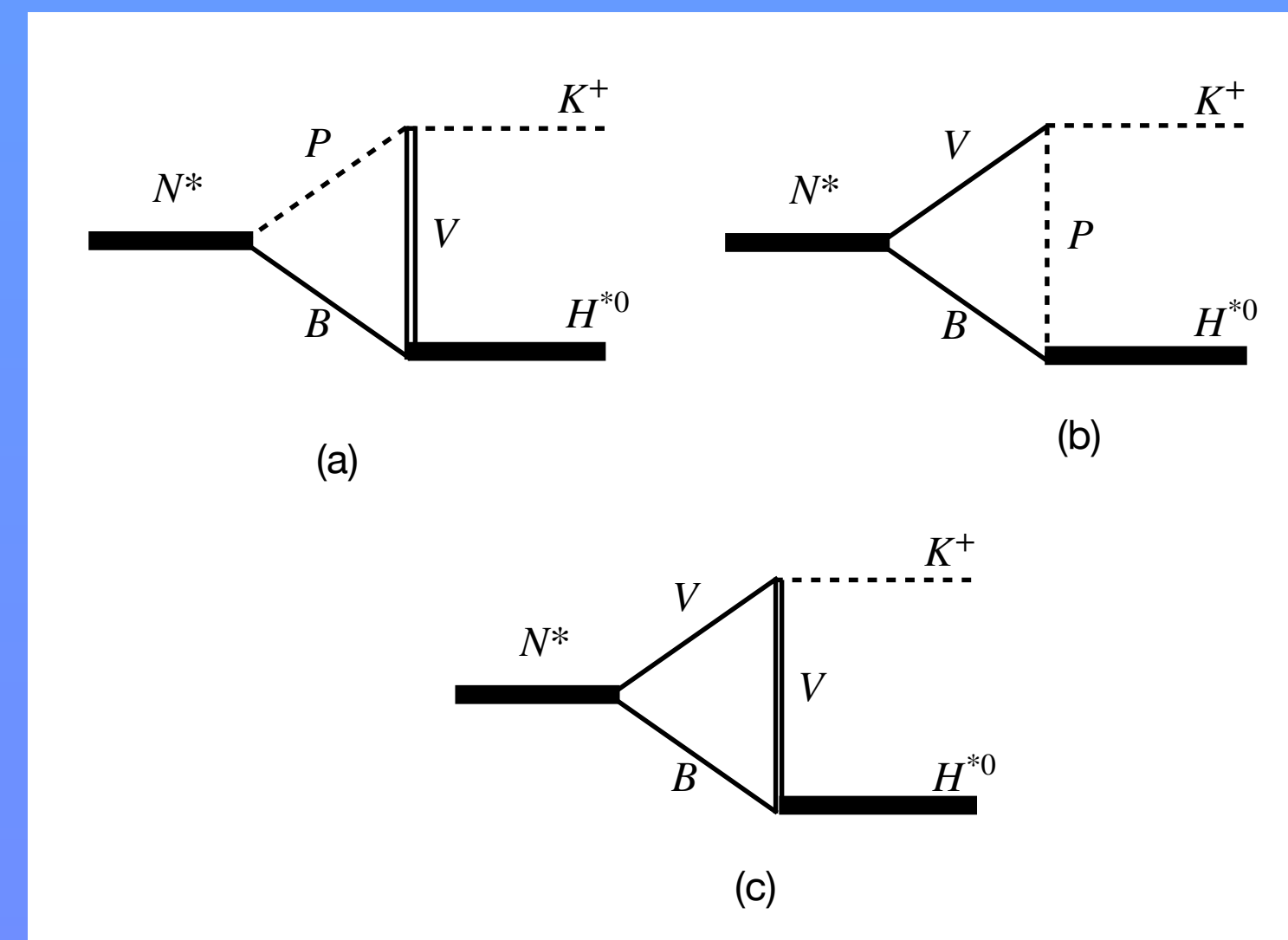


(Received 26 October 2020; accepted 6 January 2021; published 25 January 2021)

- Nosso análise mostra que  $N^*(1895)$  é um estado gerado a partir das interações de méson bário.
- Curiosamente a massa de  $N^*(1895)$  é muito próxima ao limiar de  $K\Lambda(1405)$ , o decaimento  $N^*(1895) \rightarrow K\Lambda(1405)$  pode ser importante.
- E pode afetar as seções de choque de  $\gamma p \rightarrow K\Lambda(1405)$ .



# ALGUNS DE NOSSOS TRABALHOS RECENTES:



● Nos estudamos a taxa de transição para  $N^*(1895) \rightarrow K\Lambda(1405)$ .

● Tipos de Lagrangianas usadas:

● Chiral:  $\mathcal{L}_{PB} = \langle \bar{B}i\gamma^\mu \partial_\mu B + \bar{B}i\gamma^\mu [\Gamma_\mu, B] \rangle - M_B \langle \bar{B}B \rangle + \frac{1}{2}D' \langle \bar{B}\gamma^\mu \gamma_5 \{u_\mu, B\} \rangle + \frac{1}{2}F' \langle \bar{B}\gamma^\mu \gamma_5 [u_\mu, B] \rangle$  com  $u_\mu = iu^\dagger \partial_\mu U u^\dagger$ ,

$$\Gamma_\mu = \frac{1}{2} \left( u^\dagger \partial_\mu u + u \partial_\mu u^\dagger \right), \quad U = u^2 = \exp \left( i \frac{P}{f_P} \right); \quad D' = 0.8, \quad F' = 0.46$$

$$P = \begin{pmatrix} \pi^0 + \frac{1}{\sqrt{3}}\eta & \sqrt{2}\pi^+ & \sqrt{2}K^+ \\ \sqrt{2}\pi^- & -\pi^0 + \frac{1}{\sqrt{3}}\eta & \sqrt{2}K^0 \\ \sqrt{2}K^- & \sqrt{2}\bar{K}^0 & \frac{-2}{\sqrt{3}}\eta \end{pmatrix}, \quad B = \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{6}}\Lambda + \frac{1}{\sqrt{2}}\Sigma^0 & \Sigma^+ & p \\ \Sigma^- & \frac{1}{\sqrt{6}}\Lambda - \frac{1}{\sqrt{2}}\Sigma^0 & n \\ \Xi^- & \Xi^0 & -\sqrt{\frac{2}{3}}\Lambda \end{pmatrix}$$

# ALGUNS DE NOSSOS TRABALHOS RECENTES:

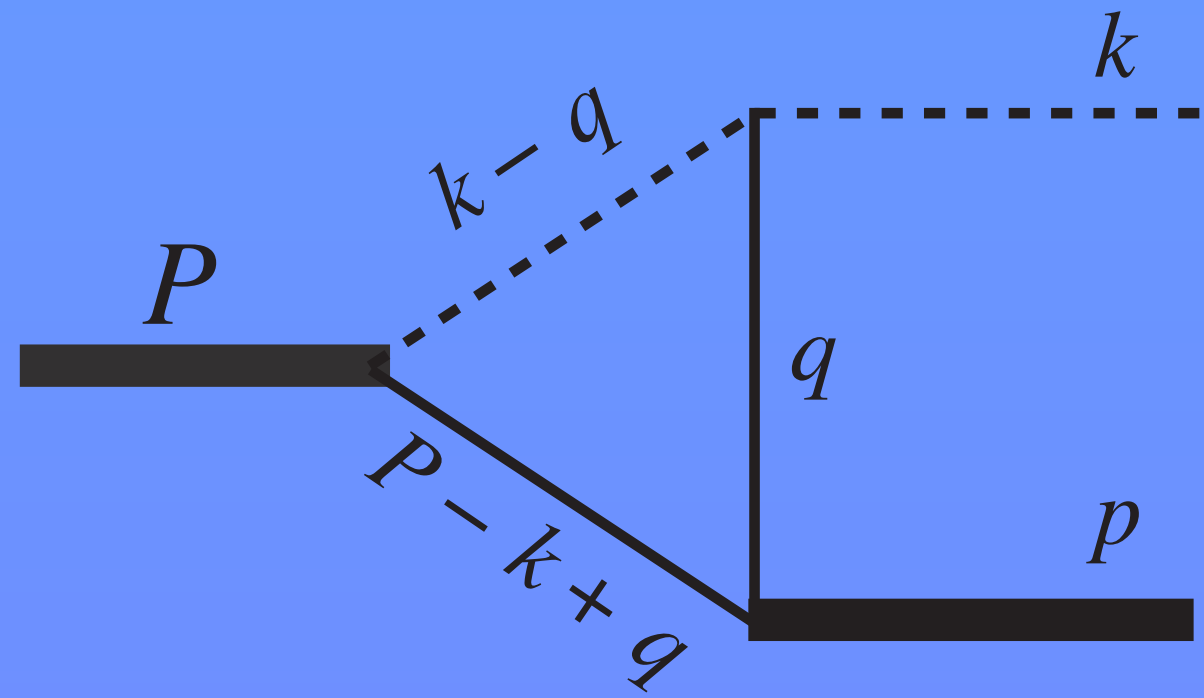
## © Hidden local symmetry

$$\mathcal{L}_{\mathbf{VB}} = -g \left\{ \langle \bar{B} \gamma_\mu [V_8^\mu, B] \rangle + \langle \bar{B} \gamma_\mu B \rangle \langle V_8^\mu \rangle + \frac{1}{4M} \left( F \langle \bar{B} \sigma_{\mu\nu} [V_8^{\mu\nu}, B] \rangle + D \langle \bar{B} \sigma_{\mu\nu} \{ V_8^{\mu\nu}, B \} \rangle \right) + \langle \bar{B} \gamma_\mu B \rangle \langle V_0^\mu \rangle + \frac{C_0}{4M} \langle \bar{B} \sigma_{\mu\nu} V_0^{\mu\nu} B \rangle \right\};$$

com  $V^{\mu\nu} = \partial^\mu V^\nu - \partial^\nu V^\mu + ig [V^\mu, V^\nu]$ ;  $D = 2.4$ ,  $F = 0.82$ ,  $C_0 = 3F - D$

$$V^\mu = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} \rho^0 + \omega & \sqrt{2}\rho^+ & \sqrt{2}K^{*+} \\ \sqrt{2}\rho^- & -\rho^0 + \omega & \sqrt{2}K^{*0} \\ \sqrt{2}K^{*-} & \sqrt{2}\bar{K}^{*0} & \sqrt{2}\phi \end{pmatrix}^\mu$$

# ALGUNS DE NOSSOS TRABALHOS RECENTES:

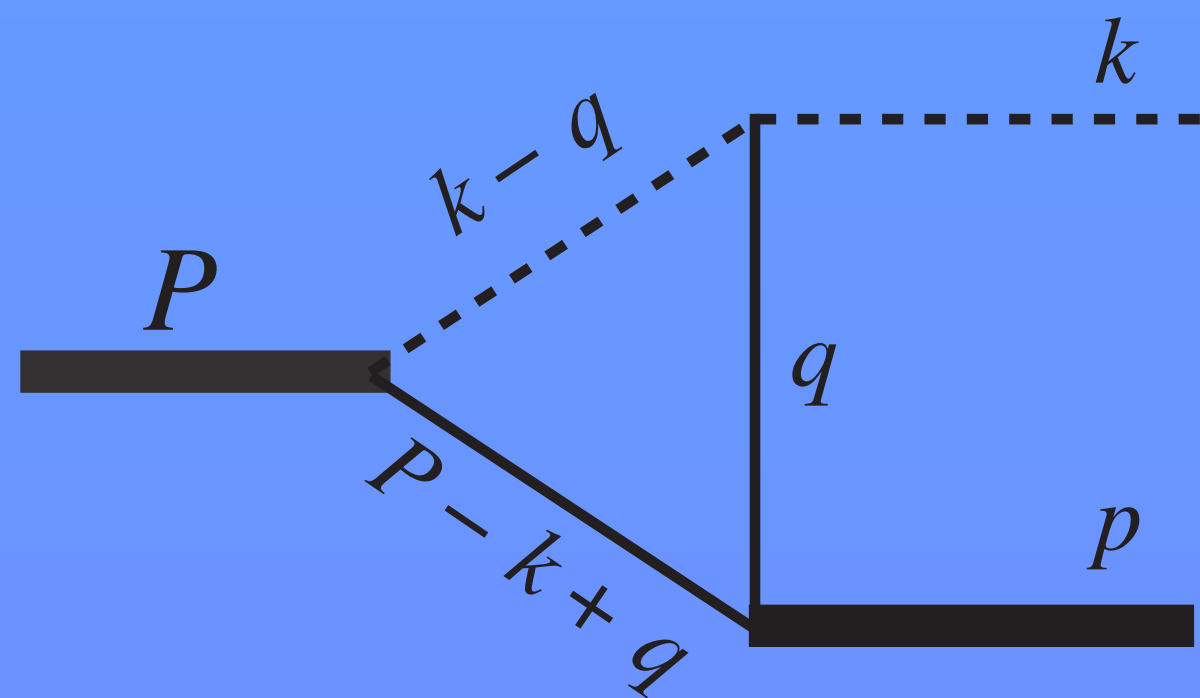


$$\begin{aligned}
 t_a &= i \sum_j g_{VBH^*,j} g_{PBN^*,j} g_{PPV} C_j \bar{u}_{H^*}(p) \gamma_\nu \gamma_5 \\
 &\times \int \frac{d^4 q}{(2\pi)^4} \left\{ \frac{(\not{P} - \not{k} + \not{q} + m_{Bj})}{(P - k + q)^2 - m_{Bj}^2 + i\epsilon} \right. \\
 &\times \left. \frac{(-g^{\nu\mu} + \frac{q^\nu q^\mu}{m_{Vj}^2}) (2k - q)_\mu}{q^2 - m_{Vj}^2 + i\epsilon (k - q)^2 - m_{Pj}^2 + i\epsilon} \right\} u_{N^*}(P)
 \end{aligned}$$

**Numerator:**

$$\begin{aligned}
 N_a(q) &= (4k \cdot p - 2p \cdot q - q^2) \bar{u}_{H^*}(p) \gamma_5 u_{N^*}(P) - 2(M_{H^*} + m_{Bj}) \bar{u}_{H^*}(p) \not{k} \gamma_5 u_{N^*}(P) \\
 &\times (M_{H^*} + m_{Bj}) \bar{u}_{H^*}(p) \not{q} \gamma_5 u_{N^*}(P) + 2\bar{u}_{H^*}(p) \not{k} \not{q} \gamma_5 u_{N^*}(P) + \left( \frac{2k \cdot q - q^2}{m_{Vj}^2} \right) \\
 &\times [(M_{H^*} + m_{Bj}) \bar{u}_{H^*}(p) \not{q} \gamma_5 u_{N^*}(P) - (2p \cdot q + q^2) \bar{u}_{H^*}(p) \gamma_5 u_{N^*}(P)],
 \end{aligned}$$

# ALGUNS DE NOSSOS TRABALHOS RECENTES:



$$t_a = i \sum_j g_{VBH^*,j} g_{PBN^*,j} g_{PPV} \mathcal{N}_{H^*} \mathcal{N}_{N^*} C_j \int \frac{d^4 q}{(2\pi)^4} \left\{ \chi^\dagger \left( \sum_{i=0}^4 \mathcal{A}_{i,j} [q^0]^i \right) \chi \right\} \\ \times \frac{1}{[(P-k+q)^2 - m_{Bj}^2 + i\epsilon][q^2 - m_{vj}^2 + i\epsilon][(k-q)^2 - m_{pj}^2 + i\epsilon]},$$

$$\mathcal{A}_{0,j} = \vec{\sigma} \cdot \vec{k} \left\{ 2(M_{H^*} + m_{Bj}) + \frac{1}{E_{H^*} + M_{H^*}} \left[ 2k^0 (M_{H^*} + m_{Bj} + 2E_{H^*}) - 2\vec{k} \cdot \vec{q} + |\vec{q}|^2 + 4|\vec{k}|^2 \right. \right. \\ \left. \left. + \frac{|\vec{q}|^4 + 4(\vec{k} \cdot \vec{q})^2 - 4(\vec{k} \cdot \vec{q})|\vec{q}|^2}{m_{vj}^2} \right] \right\} - \vec{\sigma} \cdot \vec{q} \left\{ (M_{H^*} + m_{Bj}) \left( 1 - \frac{2\vec{k} \cdot \vec{q} - |\vec{q}|^2}{m_{vj}^2} \right) \right. \\ \left. + 2k^0 + 2 \frac{|\vec{k}|^2}{E_{H^*} + M_{H^*}} \right\}, \quad \dots \text{etc., \textbf{t\^erminos at\^e} } [q^0]^4$$

**Integração analítica em  $q^0$ , e depois integração numérica**

# ALGUNS DE NOSSOS TRABALHOS RECENTES:

PHYSICAL REVIEW D **103**, 016015 (2021)

## Decay properties of $N^*(1895)$

K. P. Khemchandani,<sup>1,2,\*</sup> A. Martínez Torres,<sup>3,2,†</sup> H. Nagahiro,<sup>4,2,‡</sup> and A. Hosaka<sup>2,§</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal de São Paulo, C.P. 01302-907, São Paulo, Brazil

<sup>2</sup>Research Center for Nuclear Physics (RCNP), Mihogaoka 10-1, Ibaraki 567-0047, Japan

<sup>3</sup>Universidade de São Paulo, Instituto de Física, C.P. 05389-970, São Paulo, Brazil

<sup>4</sup>Department of Physics, Nara Women's University, Nara 630-8506, Japan

(Received 26 October 2020; accepted 6 January 2021; published 25 January 2021)

$$\Gamma_{N^{*+}(1895) \rightarrow K^+ \Lambda(1405)} = 5.7 \pm 0.8 \text{ MeV}$$

$$\Gamma_{N^{*+}(1895) \rightarrow K^+ \Sigma^0(1400)} = 6.3 \pm 0.2 \text{ MeV}$$

PHYSICAL REVIEW D **103**, 114017 (2021)

## Photoproduction of $\Lambda^*$ and $\Sigma^*$ resonances with $J^P = 1/2^-$ off the proton

Sang-Ho Kim<sup>1,\*</sup>, K. P. Khemchandani,<sup>2,†</sup> A. Martínez Torres<sup>3,‡</sup>, Seung-il Nam,<sup>1,4,§</sup> and Atsushi Hosaka<sup>5,6,||</sup>

<sup>1</sup>Department of Physics, Pukyong National University (PKNU), Busan 48513, Korea

<sup>2</sup>Universidade Federal de São Paulo, C.P. 01302-907 São Paulo, Brazil

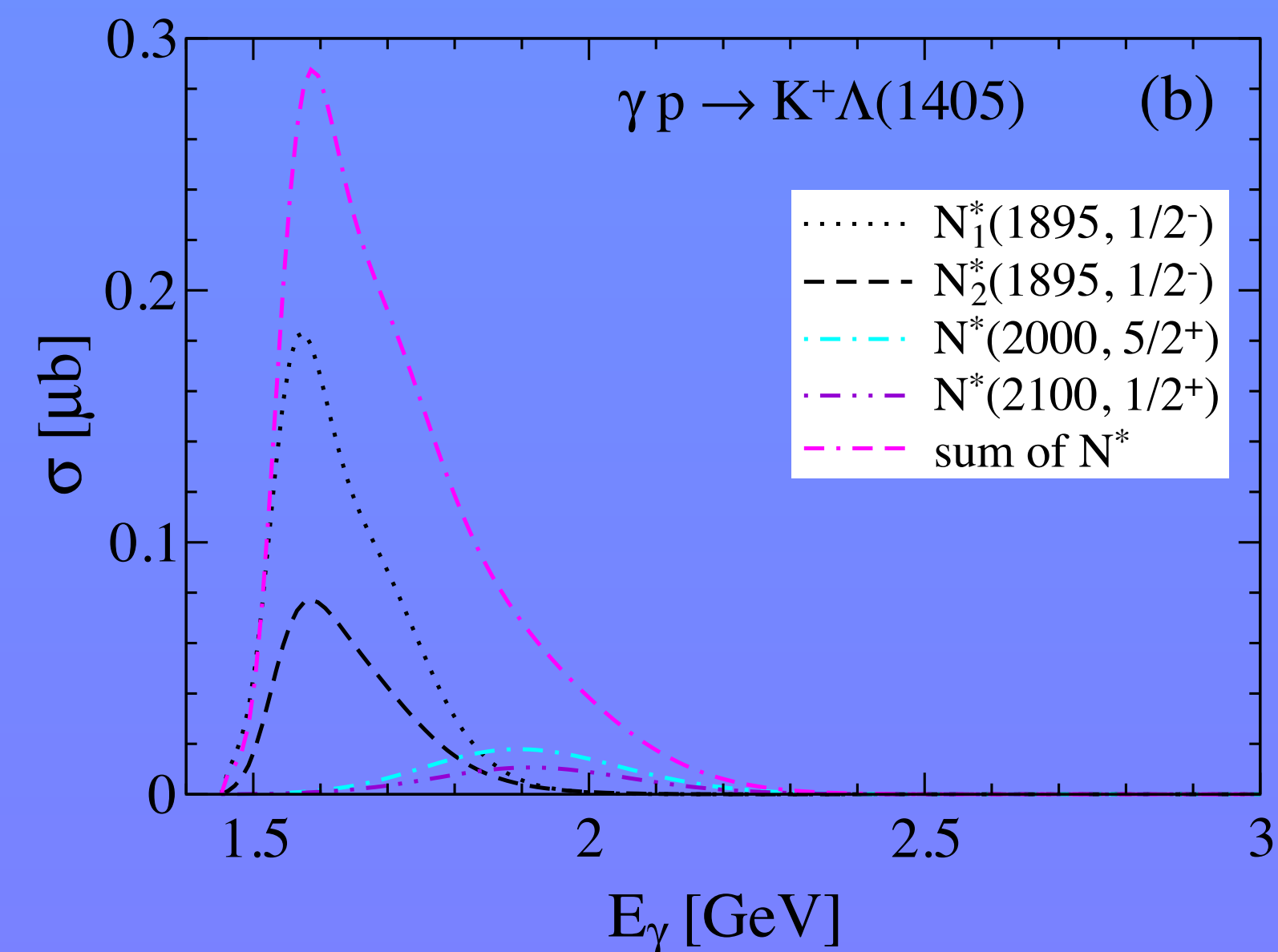
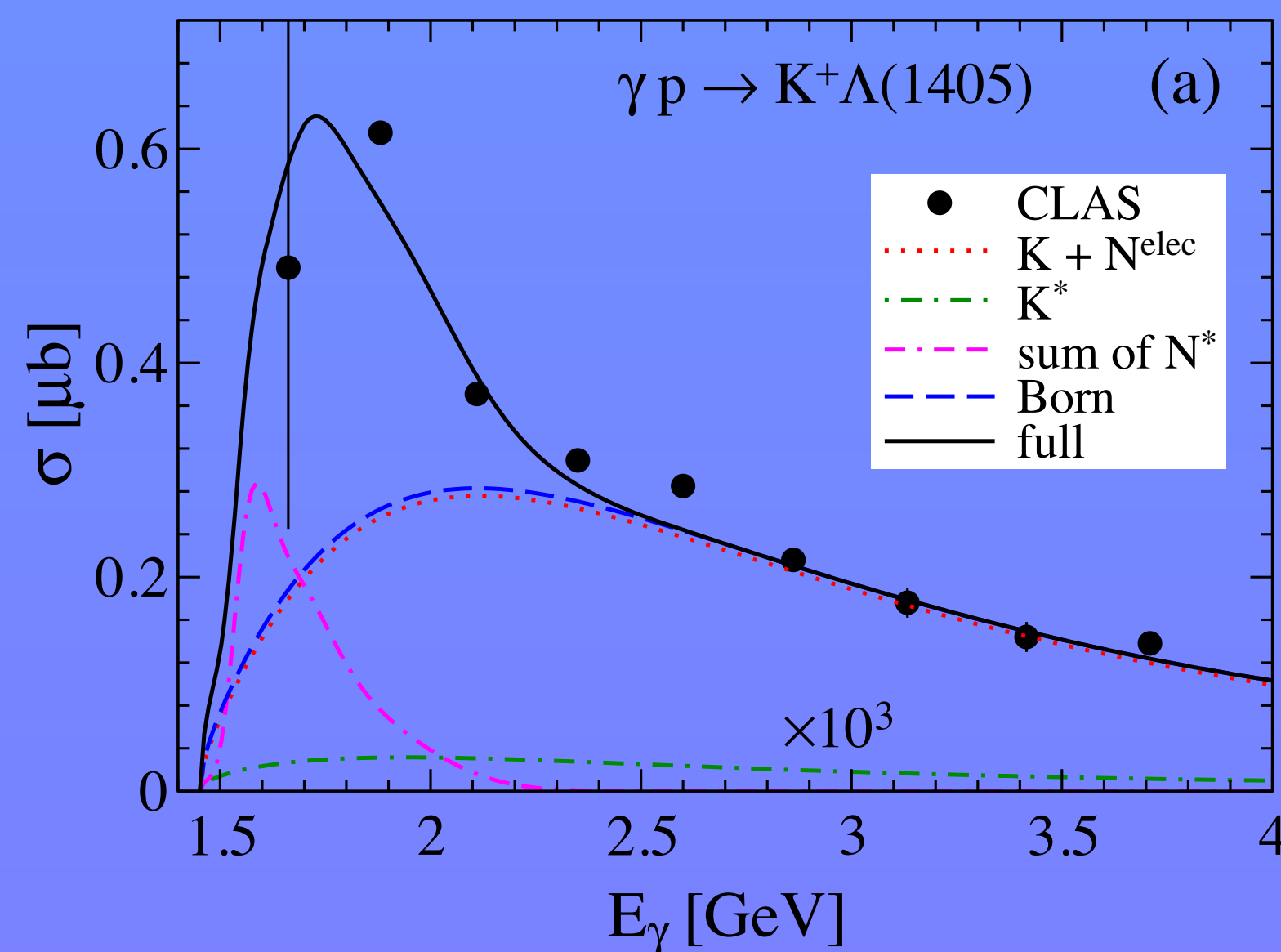
<sup>3</sup>Universidade de São Paulo, Instituto de Física, C.P. 05389-970 São Paulo, Brazil

<sup>4</sup>Asia Pacific Center for Theoretical Physics (APCTP), Pohang 37673, Korea

<sup>5</sup>Research Center for Nuclear Physics (RCNP), Osaka University, Ibaraki, Osaka 567-0047, Japan

<sup>6</sup>Advanced Science Research Center, Japan Atomic Energy Agency (JAEA), Tokai 319-1195, Japan

(Received 4 February 2021; accepted 26 May 2021; published 21 June 2021)



# ALGUNS DE NOSSOS TRABALHOS RECENTES:

arXiv:2103.09978v1 [hep-ph]

- © Os pentaquarks descobertos pelo LHCb geraram um debate contínuo na comunidade.
- © Vários grupos estudaram as interações de dois hádrons para tentar descrever os estados moleculares de dois hádrons, assim atribuindo sempre a paridade negativa aos estados.
- © Se estados com paridade negativa existem, também devem existir estados com paridade positiva.

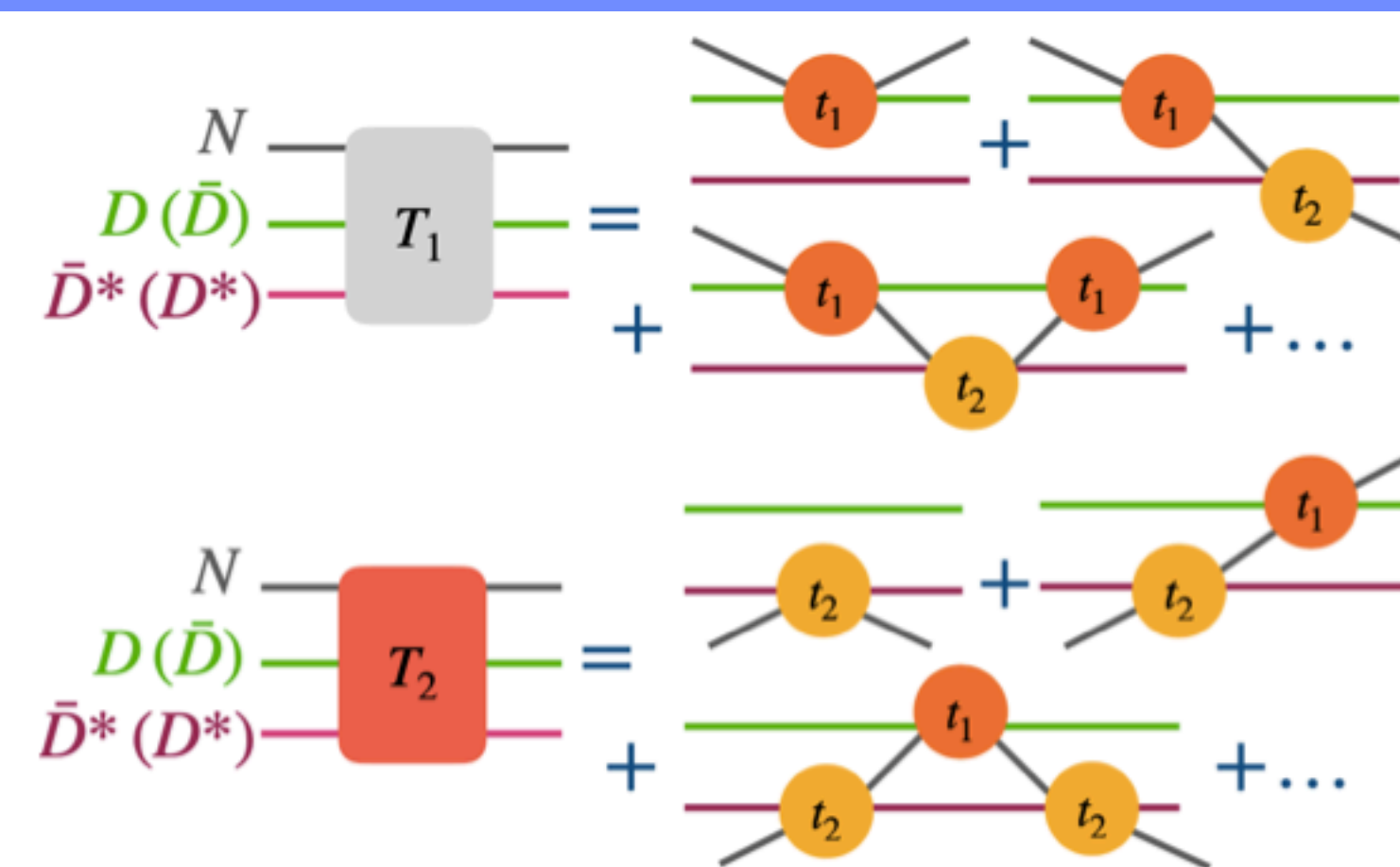


EXOTIC BARYONS
Pentaquarks
$P_c(4312)^+$
$P_c(4380)^+$
$P_c(4440)^+$
$P_c(4457)^+$
was $P_c(4450)$

# ALGUNS DE NOSSOS TRABALHOS RECENTES:

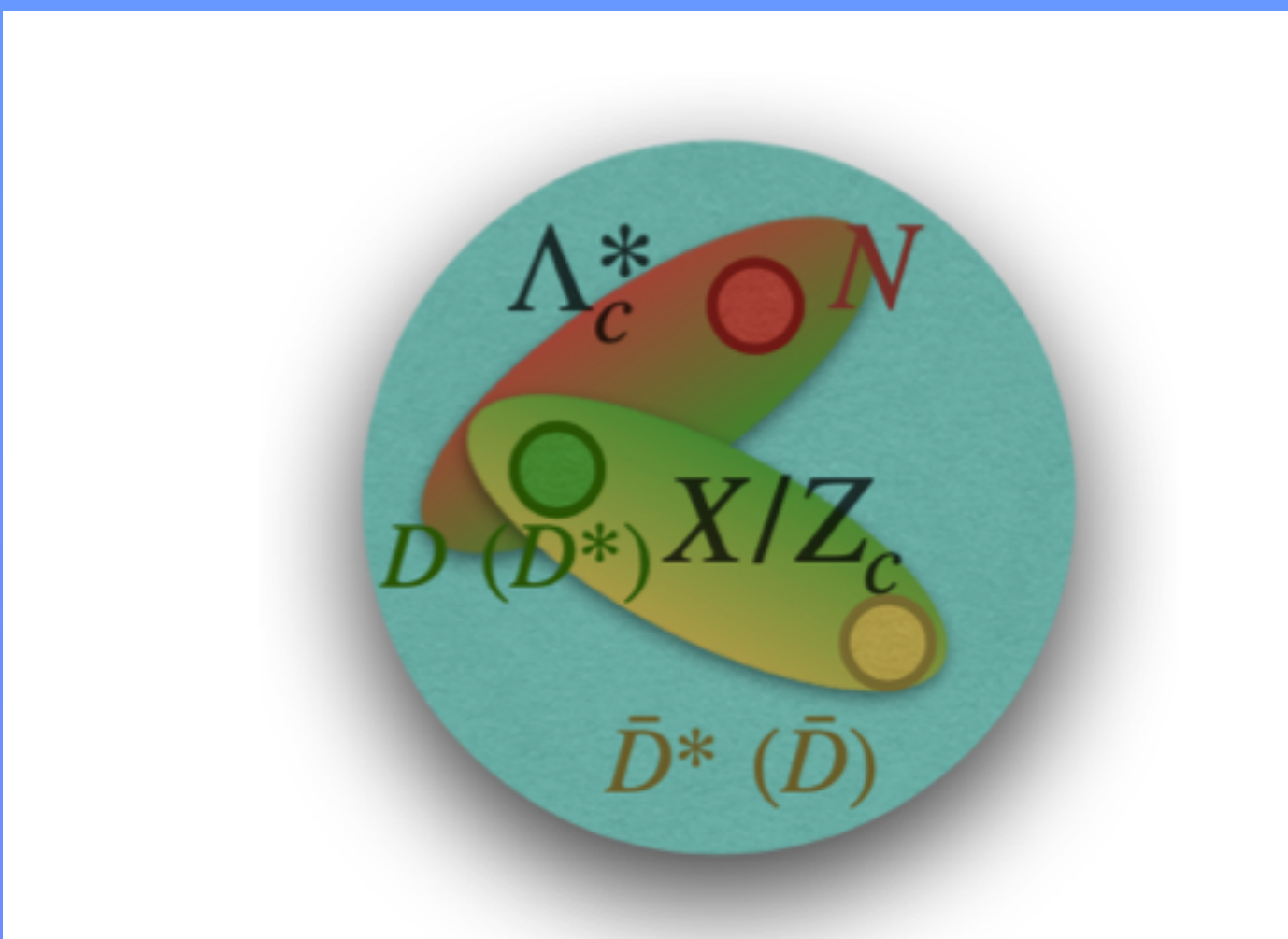
arXiv:2103.09978v1 [hep-ph]

- Por exemplo, poderíamos perguntar se  $X(3872) - N$  ou  $Z_c(3900) - N$  podem formar estados “ligados”.
- O limiar desses sistemas é  $\sim 4800$  MeV.
- Nos estudamos a interação  $X(3872) - N, Z_c(3900) - N$ , tratando eles como canais acoplados e considerando que  $X(3872), Z_c(3900)$  possuem uma estrutura interna (o nucleon espalha sobre as partículas que formam  $X(3872), Z_c(3900)$ )

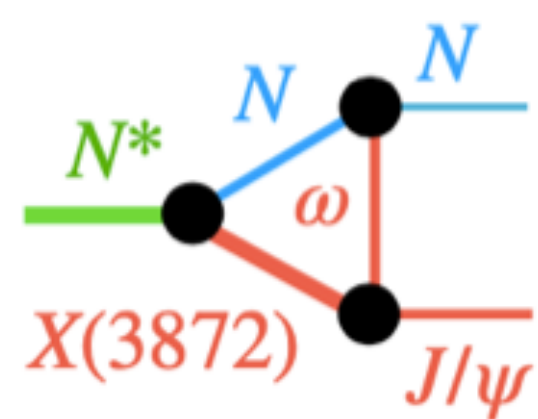


# ALGUNS DE NOSSOS TRABALHOS RECENTES:

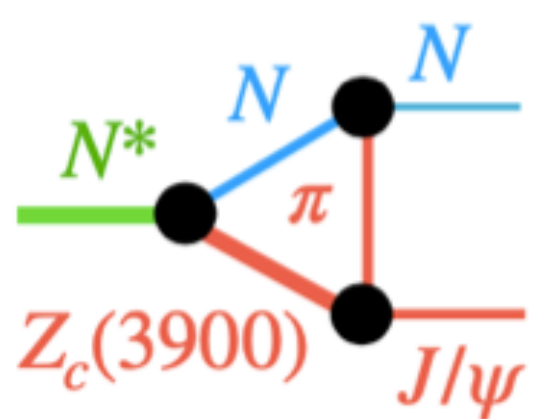
arXiv:2103.09978v1 [hep-ph]



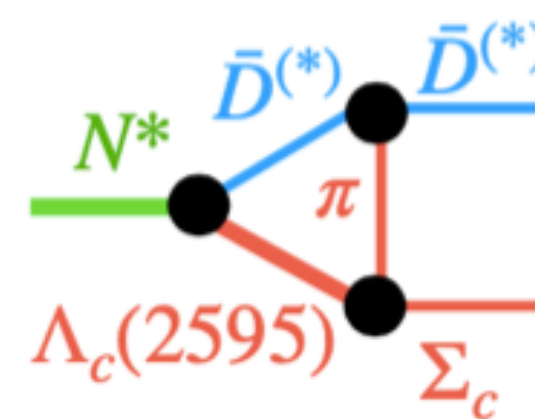
Spin-parity	Mass (MeV)	Width (MeV)
$1/2^+$	4404 – 4410	2
$1/2^+$	4556 – 4560	4 – 20
$3/2^+$	4467 – 4513	$\sim 3 - 6$
$3/2^+$	4558 – 4565	$\sim 5 - 14$



(a)



(b)



(c)



# RESUMO

- ⊙ Existem muitas questões abertas na área de física de hadrons, particularmente em relação aos hádrons exóticos (números quânticos, qual estrutura certa desses hádrons).
- ⊙ Teorias efectivas de campos são muito utilizadas para resolver uma grande variedade de problemas de física de hádrons.
- ⊙ Deve existir  $D(2900)$  que pode ser encontrado na massa invariante de  $D_s(2317)\bar{K}$ .
- ⊙ A interação de nucleon com os estados exóticos  $X(3872)$ ,  $Z_c(3900)$  é atrativa e forma estados na faixa de energia estudada pela LHCb para encontrar  $P_c$ 's.
- ⊙ A taxa de decaimento de  $N^*(1895)$  para os hyperons leves é significativa, e pode ser uma forma de distinguir ele dos outras estados próximos.