Espectroscopia de Hadrones:

Descifrando la fuerza más fuerte

Daniel Winney Corona
Instituto de Ciencias Nucleares (ICN)
Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM)

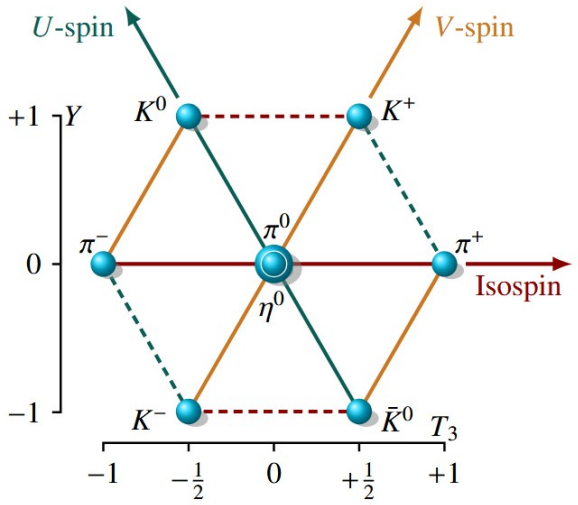
Amplitudes

30 Octubre 2026

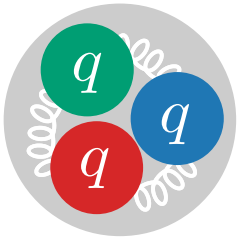
Instituto de Ciencias Nucleares UNAM

Estados emergentes

El confinamiento del color hace que la QCD aparece como un espectro diverso de **estados ligados** sin color.



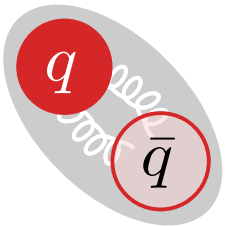
D. Sahoo et al. [Phys.Rev.D 91 (2015) 7, 076013]



Bariones

Protón (1914)

Neutrón (1932)



Mesones

Pion (1947)

Kaon (1947)

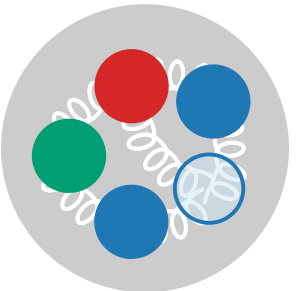
PDG [Phys. Rev. D 110, 030001 (2024)]

Mesons	
Light unflavored (π, ρ, a, b) (η, ω, f, ϕ, h)	1411
Strange (K, K^*)	1538
Charmed (D, D^*)	1592
Charmed, strange (D_s, D_s^*, D_{sJ})	1657
Bottom (B, V_{cb}/V_{ub}, B^*, B_J^*)	1681
Bottom, strange (B_s, B_s^*, B_{sJ}^*)	1865
Bottom, charmed (B_c)	1893
$c\bar{c}$ (η_c, $J/\psi(1S)$, χ_c, h_c, ψ)	1898
$b\bar{b}$ (η_b, Υ, χ_b, h_b)	2023
Other mesons (T_c, T_b tetraquarks)	2062
Baryons	
N	2081
Δ	2137
Λ	2161
Σ	2187
Ξ	2218
Ω	2231
Charmed (Λ_c, Σ_c, Ξ_c, Ω_c)	2234
Doubly charmed (Ξ_{cc})	2262
Bottom (Λ_b, Σ_b, Ξ_b, Ω_b, b-baryon admixture)	2263
Exotic baryons (P_c pentaquarks)	2285

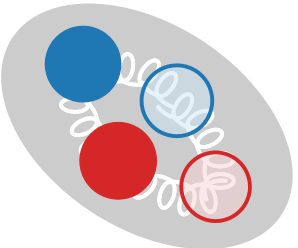
Casi 1,000 paginas de hadrones en el PDG!

Hadrones exóticos

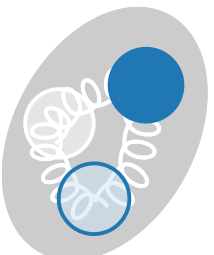
Los últimos 20 años hemos descubierto señales de hadrones con **estructura interna no estándar** y mas aya que el modelo de quarks!



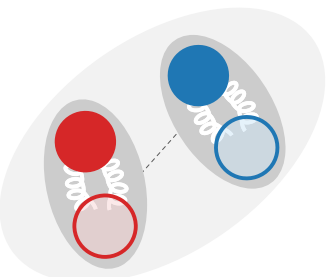
Pentaquark



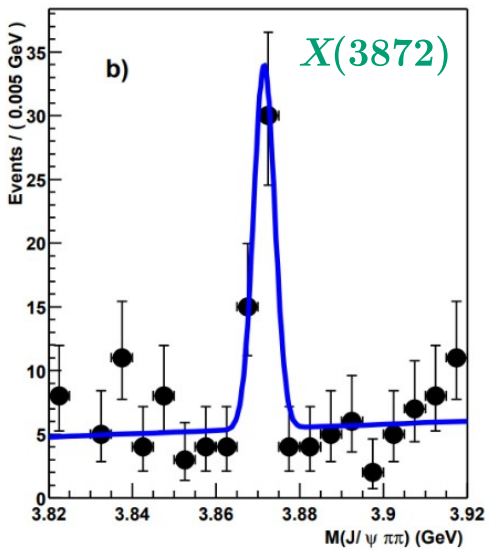
Tetraquark



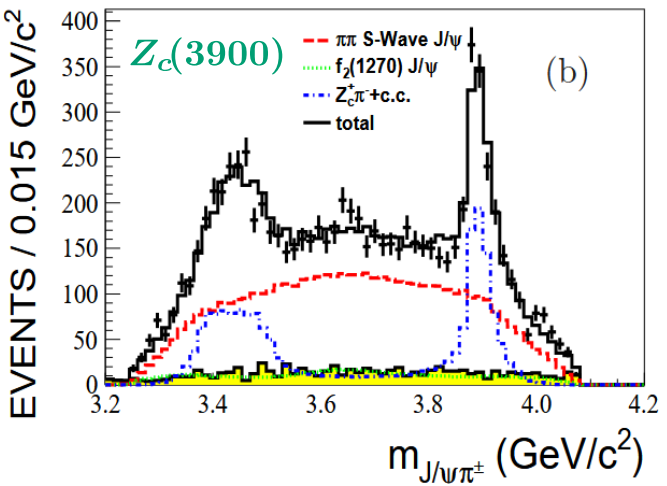
Híbrido



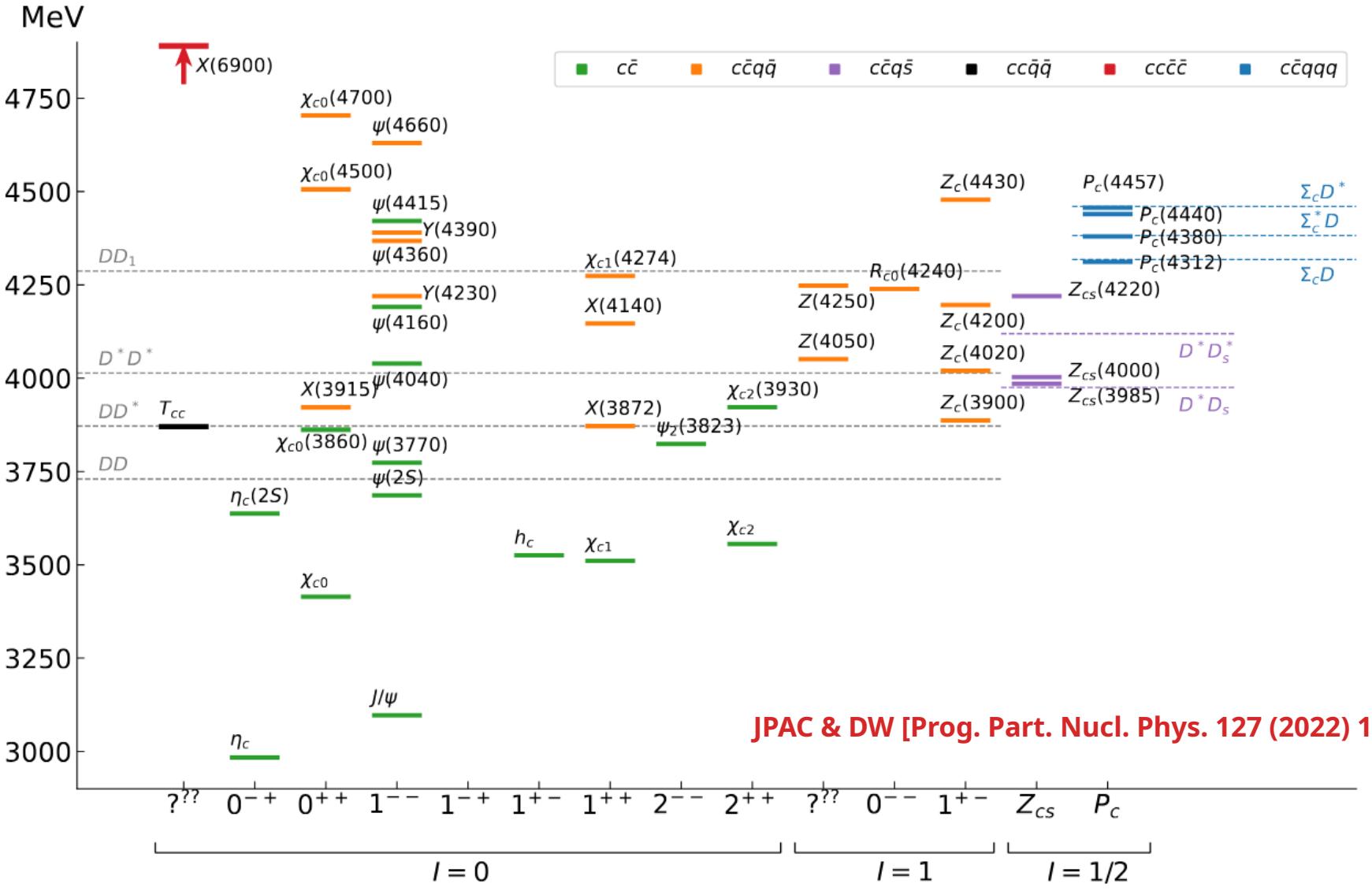
Molécula hadronica



Belle [Phys.Rev.Lett.91:262001,2003]



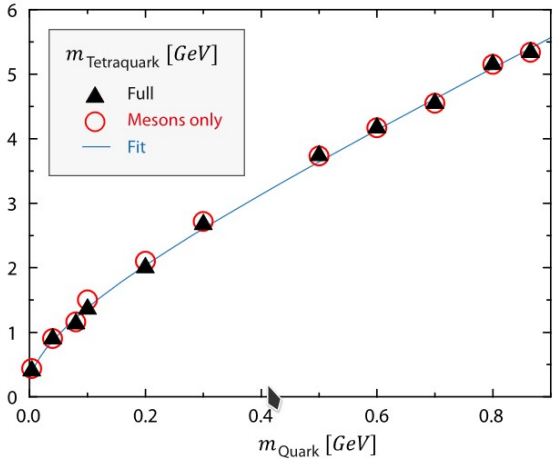
BESIII [Phys.Rev.Lett. 119 (2017) 7, 072001]

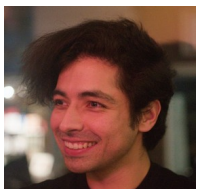


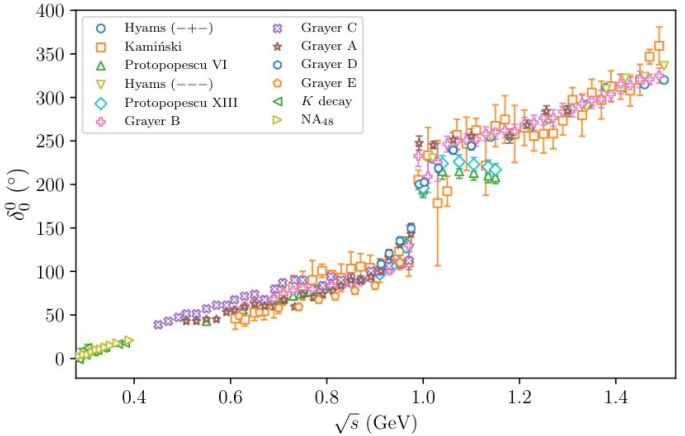
JPAC & DW [Prog. Part. Nucl. Phys. 127 (2022) 103981]

Hadrones nos dicen de la QCD

Teoría



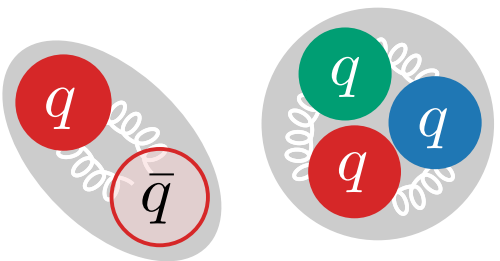




Experimento

$\mathcal{L}_{\text{QCD}}$

?



Herramientas de fenomenología

Buscamos utilizar formalismo rigoroso pero agnóstico a la dinámica microscópico.

Invarianza rotacional → Ondas parciales

$$\mathcal{F}(s,t) = \sum_{\ell=0}^{\infty} (2\ell+1)\, P_\ell(z)\, f_\ell(s)$$

Causalidad → Analiticidad (en energía)

$$f_\ell(s) = \frac{1}{\pi} \int ds' \, \frac{\text{Disc}\ f_\ell(s')}{s' - s - i\epsilon}$$

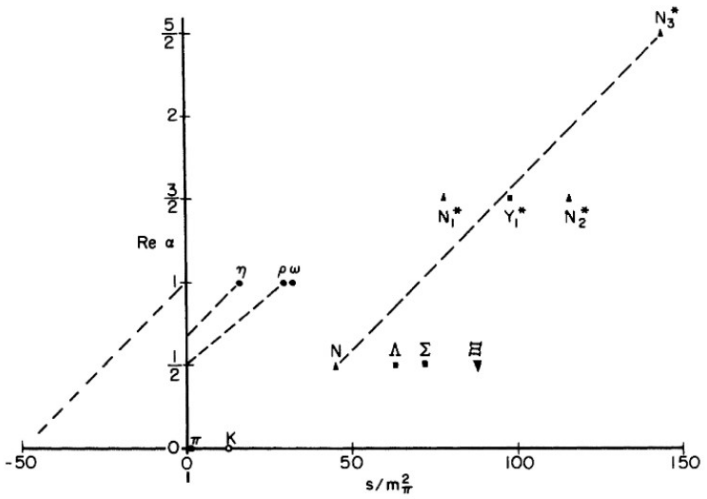
Conservación de probabilidad → Unitaridad

$$\text{Disc}\ f_\ell(s) = \rho\, |f_\ell(s)|^2$$

Simetría de Cruz → Analiticidad (en espín)

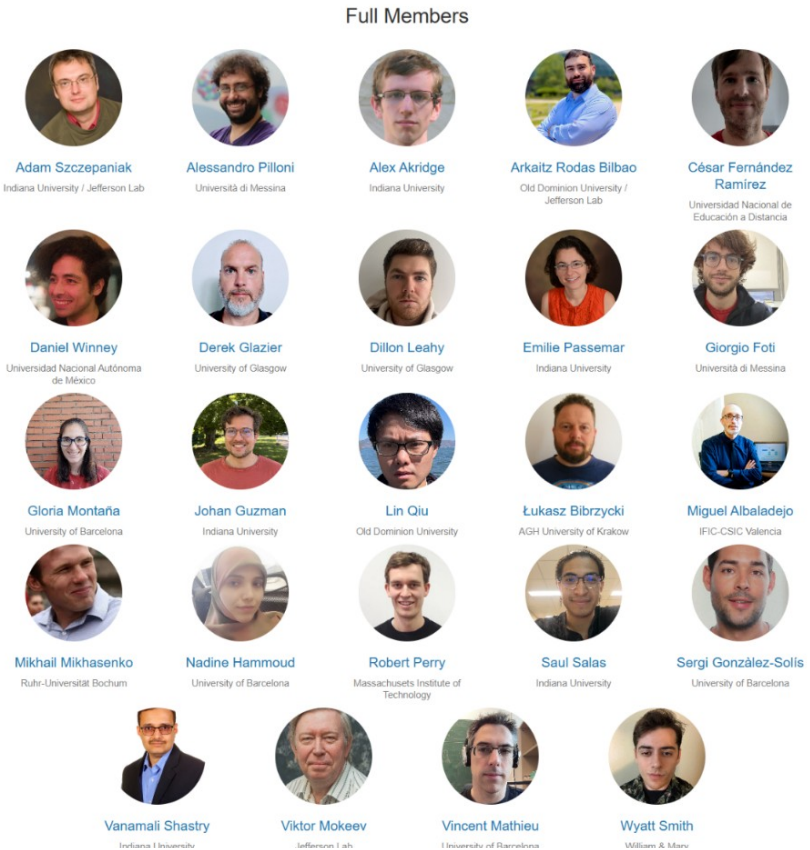
$$\mathcal{F}(s,t) = \frac{1}{2i} \int_C d\ell \, \frac{(2\ell+1)\, P_\ell(-z_t)\, f_\ell(t)}{\sin \pi\ell}$$

$$\mathcal{F}(s \to \infty, t) \propto s^{\alpha(t)}$$



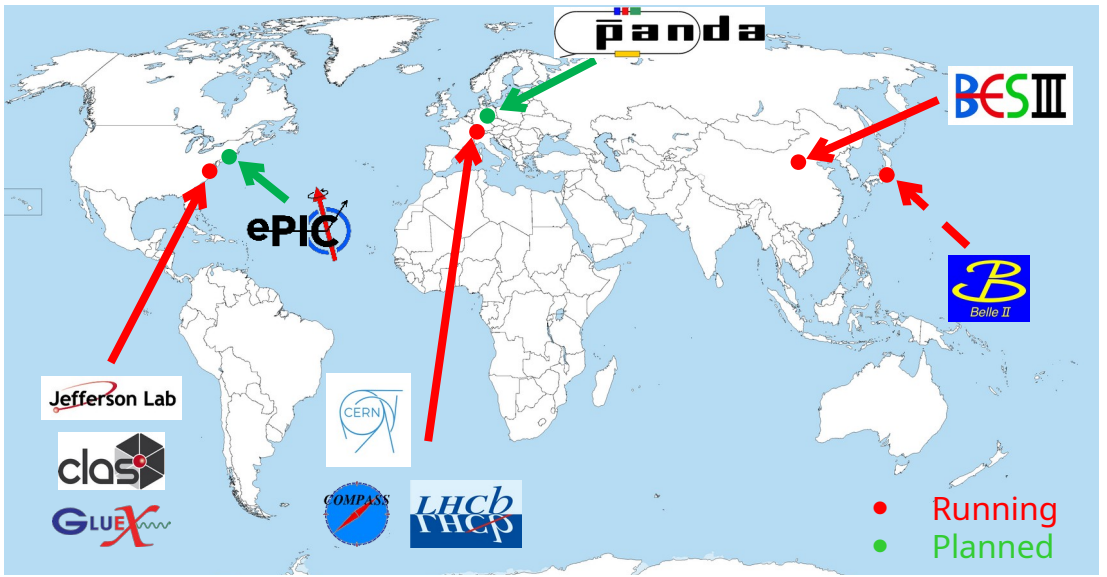
G. Chew & S. Frautschi [Phys.Rev.Lett. 8 (1962) 41-44]

Herramientas de fenomenología

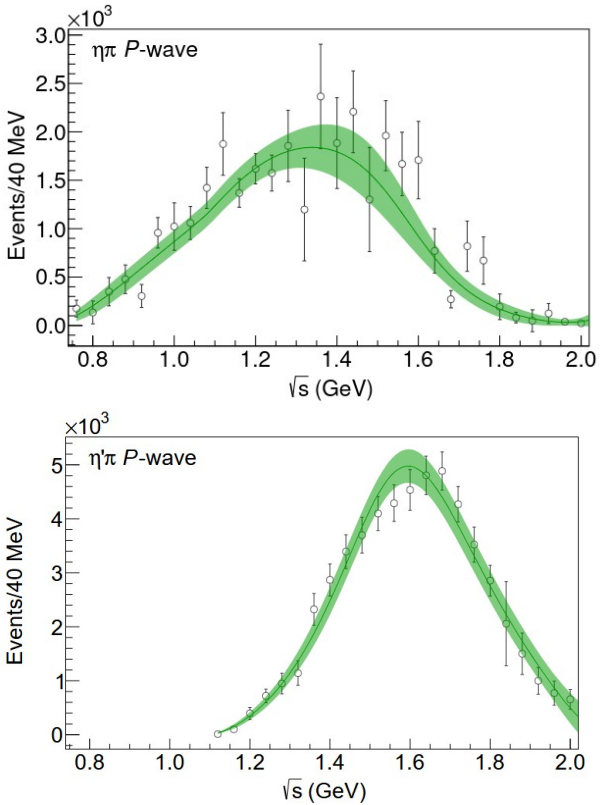


[www.jpac-physics.org/people/]

Colaboración estrecha con teoréticos y experimentalistas alrededor del mundo!

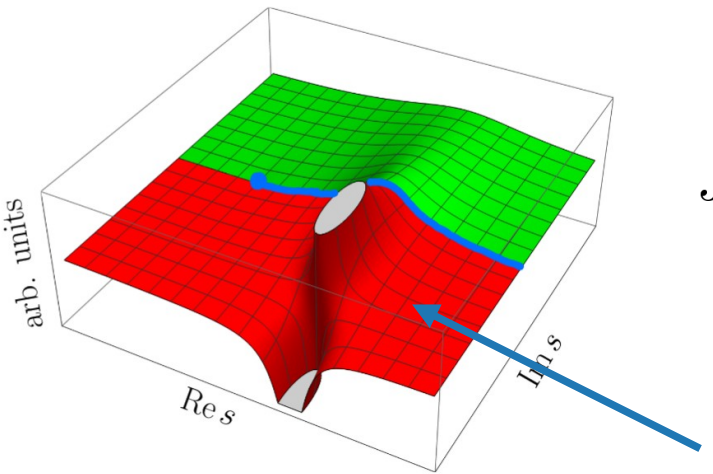


Análisis de amplitud



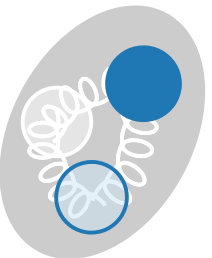
No es tan sencillo como simplemente buscar picos...

Se necesita utilizar **primeros principios de dispersión** para analizar datos experimentales y extraer la física subyacente para comprobar diferentes modelos.



$$\pi_1(1600)$$

$$J^{PC} = 1^{-+}$$



$$f_\ell(s \sim m_R^2) = \frac{1}{s - m_R^2}$$

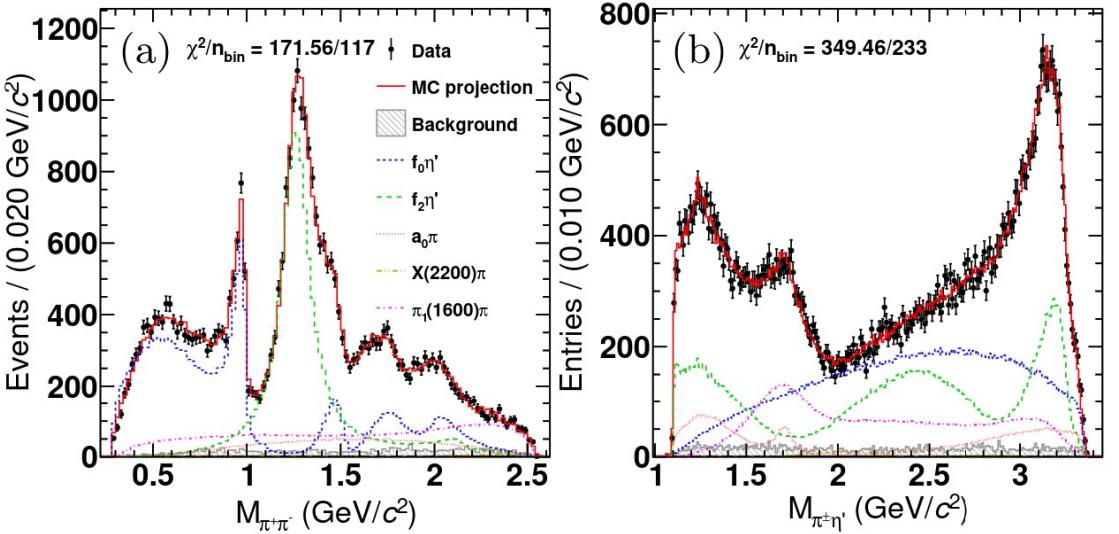
$$m_R \simeq (1580 + i\,225)\ \text{MeV}$$

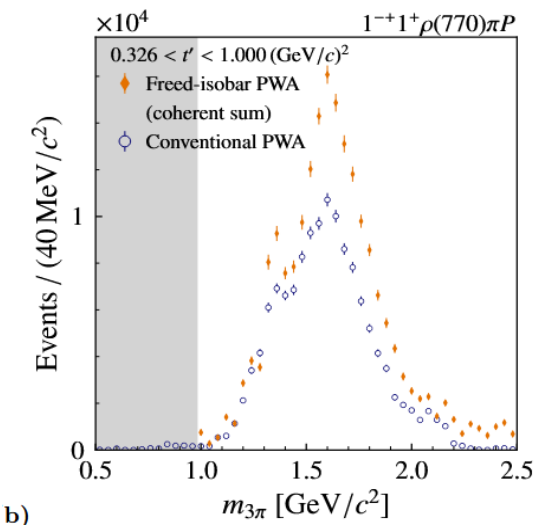
JPAC [Phys.Rev.Lett. 122 (2019) 4, 042002]

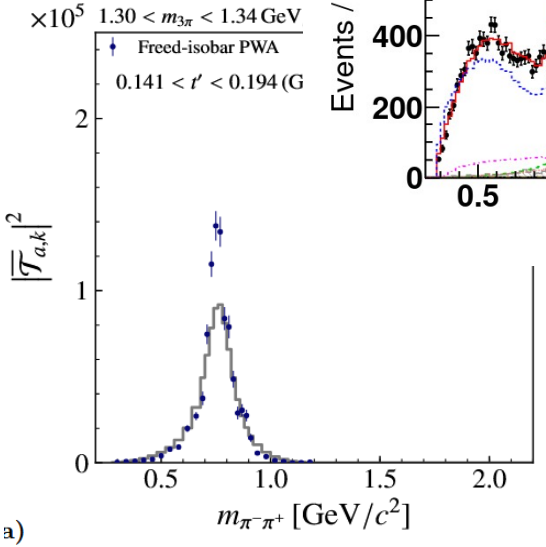
Decaimientos de tres cuerpos

Experimentos actuales han producido conjuntos de datos de **súper alta estadísticas**, laboratorios ideales para el acceder estados de interés

BESIII [arXiv:2604.12524]



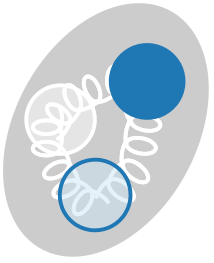




COMPASS [Phys.Rev.D 105 (2022) 1, 012005]

$$\chi_{c1} \to \pi\pi\eta'$$

$$\pi p \to (\pi_1 \to 3\pi)p$$

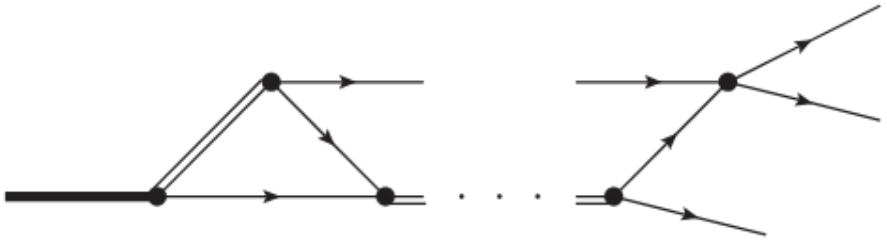


Decaimientos de tres cuerpos

Con un poco de atención, muchas técnicas estándares se pueden generalizar a nuevos sistemas.

$$F(\sigma) = B(\sigma) + \frac{s^n}{\pi} \int \frac{d\sigma'}{(\sigma')^n} \frac{\text{Disc } F(\sigma')}{\sigma' - \sigma}$$

$$\text{Disc } F(\sigma) = \sin\delta(\sigma)\, e^{-i\delta(\sigma)} \left[F(\sigma) + \int d\sigma'\, K(\sigma,\sigma')\, F(\sigma') \right]$$



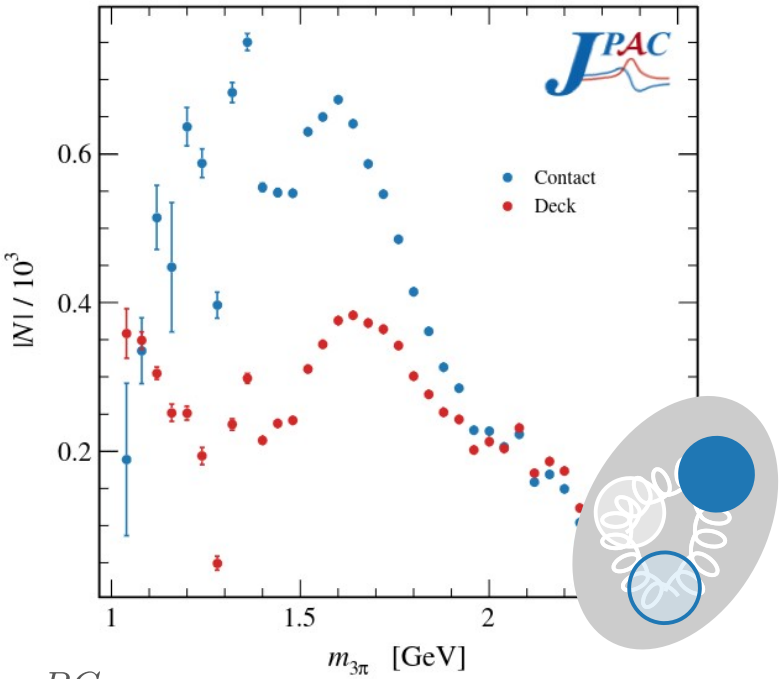
[github.com/dwinney/iterateKT/]

README License

iterateKT

Solver for iterative solutions to general Khuri-Treiman problems. That is, solutions to systems of coupled integral equations which arise from three-body decays involving any number of single-variable isobars of the form:

JPAC [arXiv:2607.14300 [hep-ph]]



$J^{PC} \to 3\pi$

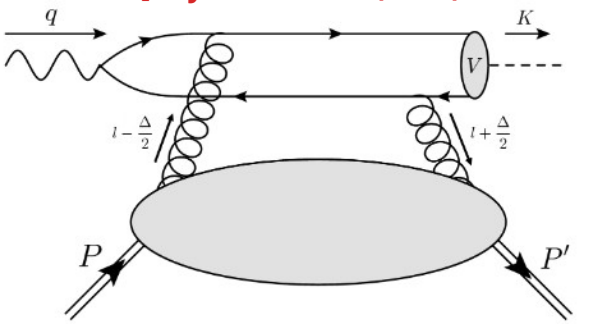
JPAC [Phys.Rev.D 101 (2020) 5, 054018]

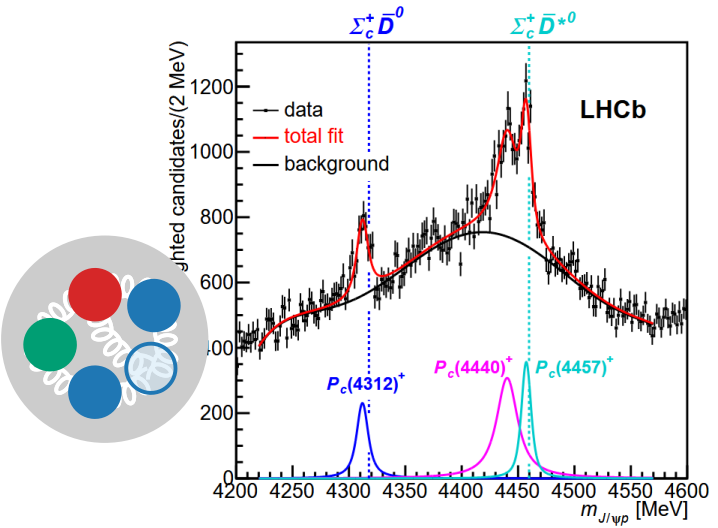
La foto-producción de charmonio

Originalmente este proceso fue interesante como canal señal para pentaquarks observados en 2016 por LHCb.

Mucho interés se ha enfocado en la habilidad de medir la **distribución de masa adentro del protón.**

Guo et al. [Phys.Rev.D 108 (2023) 3, 034003]





nature

Article | Published: 29 March 2023

Determining the gluonic gravitational form factors of the proton

B. Duran, Z.-E. Meziani, S. Joosten, M. K. Jones, S. Prasad, C. Peng, W. Armstrong, H. Atac, E. Chudakov, H. Bhatt, D. Bhetuwal, M. Boer, A. Camsonne, J.-P. Chen, M. M. Dalton, N. Deokar, M. Diefenthaler, J. Dunne, L. El Fassi, E. Fuchey, H. Gao, D. Gaskell, O. Hansen, F. Hauenstein, ... Z. Zhao + Show authors

Nature **615**, 813–816 (2023) | Cite this article

LHCb [Phys. Rev. Lett. 122 (2019) 22, 222001]

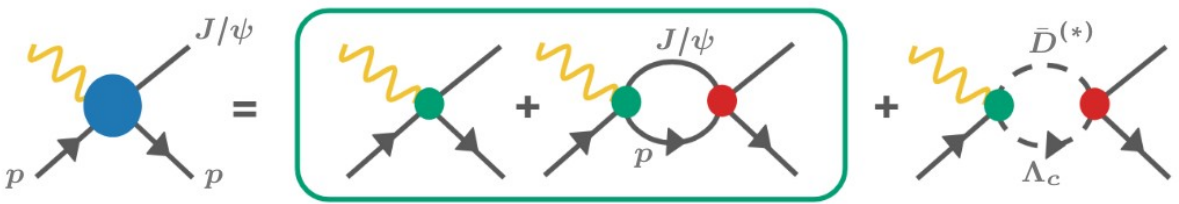
La foto-producción de charmonio

Todo la teoría para la extracción de propiedades gravitacionales en este proceso es especulativo...

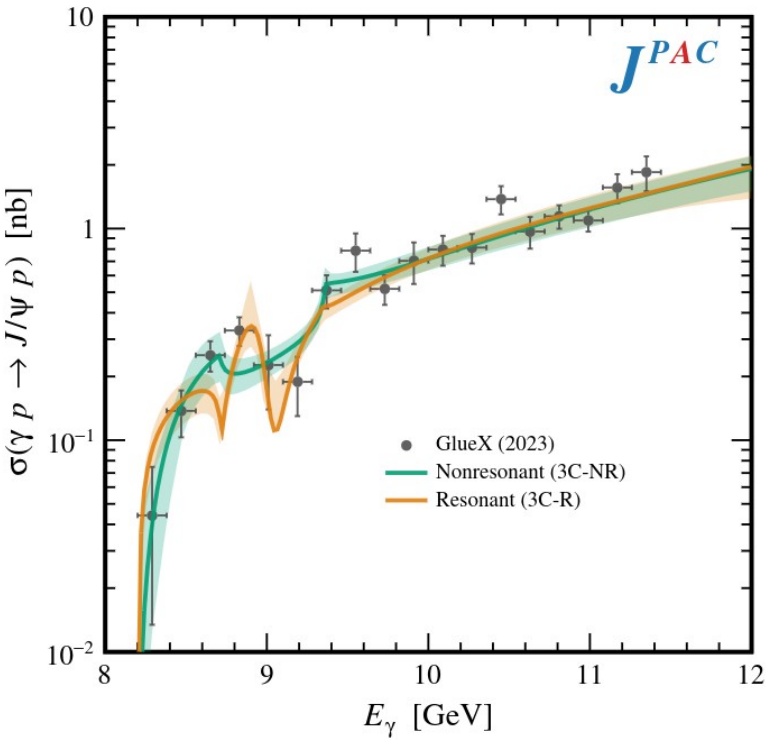
Se necesita comprobar que si (o no) se puede acceder estas cantidades!

$$\mathcal{F}_{\{\lambda\}}(s,\cos\theta_s) = \sum_{J=M_s}^{J_{\max}} (2J+1)\, d^J_{\lambda\lambda'}(\theta_s)\, F^J_{\{\lambda\}}(s)$$

$$\mathcal{G}_{\{\mu\}}(t,\cos\theta_t) = \sum_{\{\lambda\}} \mathbb{C}_{\{\mu,\lambda\}}(s,t)\, \mathcal{F}_{\{\lambda\}}(s,\cos\theta_s)$$



JPAC [Phys.Rev.D 108 (2023) 5, 054018]



Gracias!