

Qual É A BOLA DA VEZ?

Alberto Santoro
LISHEP2023 - Sessão A

INTRODUÇÃO

Esta parte da LISHEP é dedicada a Professores do Ensino Médio, Jornalistas e estudantes de licenciatura e curiosos. A história é longa e aqui vou apenas falar sobre minha palestra sobre Glueballs. Primeiro gostaria que ficasse claro que não é uma palestra que coloca o tema de forma aprofundada. Contrastando com os outros temas desenvolvidos nessa sessão, é um tema aberto na Física de partículas e quis apenas chamar a atenção para o fato de que existem temas que ainda não são conhecidos e experimentalmente sem ainda uma resposta clara para elucidar a sua existência.

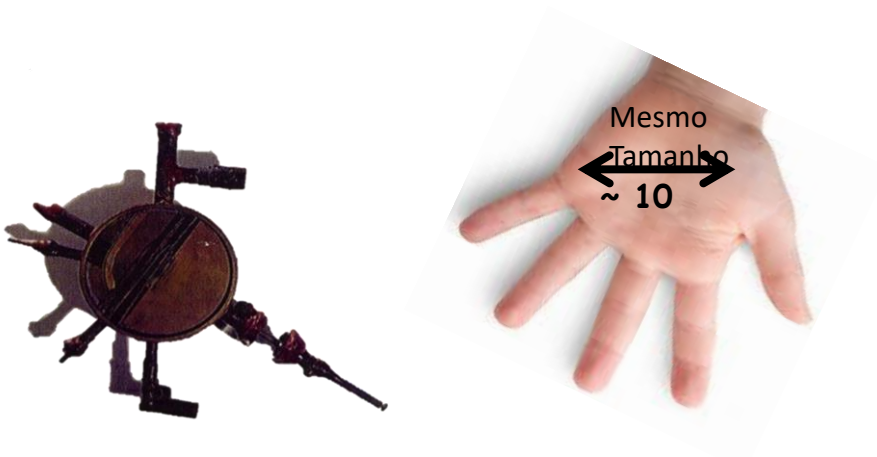
Há no entanto uma enorme curiosidade de saber mais sobre coisas como Glueballs, ou Bolas de Gluons. (Eu suponho que todos que estão lendo estas notas, estiveram presentes e assistiram as palestras dos professores Wagner Carvalho "A Física de Altas Energias", Alberto C. dos Reis "Modelo Padrão", Gilvan Alves "As Interações Fortes". Foram palestras básicas para compreendermos um pouco mais sobre os termos de uso nestas notas.

O Homem evolui devido a sua curiosidade. Assim seguiu inventando instrumentos para satisfazer sua curiosidade e dá início a pesquisas para encontrar aquilo que sua imaginação lhe propõe. E a figura abaixo mostra como talvez tudo tenha começado. O homem curioso quebra pedras para ver o que tem dentro, quebra cocos e descobre alimentos e busca instrumentos para investigar o interior de outras coisas.



Sem continuar revendo a história ano a ano e falando sobre tudo que se passou daremos um pulo para "nosso" tempo e mostramos alguma instrumentação que usamos para satisfazer as curiosidades impostas pelo desenvolvimento científico contemporâneo

E. O. Lawrence 1930 construiu o primeiro acelerador de prótons e conseguiu acelerar prótons até 80 KeV. A figura mostra o tamanho do acelerador comparando com as dimensões da mão de um homem.



Muitos anos depois, com o desenvolvimento das tecnologias, inclusive dos magnetos supercondutores, nos Estados Unidos construiu-se o maior acelerador da época de Energia de 2 TeV no centro de massa da colisão de um próton com um antipróton. E logo apareceu o primeiro resultado, a descoberta do Quark Top em 1995.

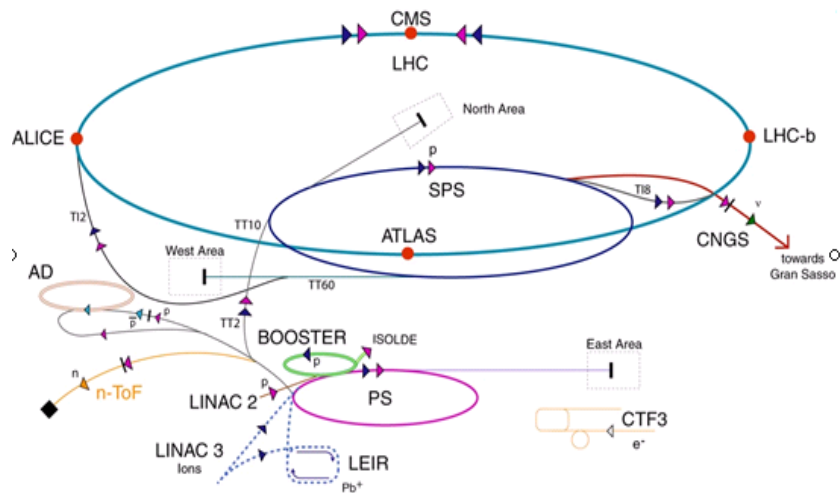


Mas o CERN-Centro Europeu de Pesquisas em Física de Partículas, contruiu o maior acelerador do mundo em todos os sentidos. Com 26 Km de circunferência e observa a interação próton x próton a energia de 14 TeV no centro de massa da interação.



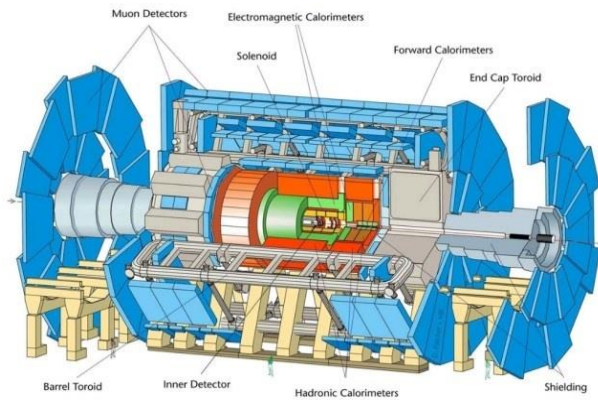
O COMPLEXO LHC

Tem 1800 Magnetos Supercondutores com 7000 Km de Fios Supercondutores, 120 T de Helio (700 mil Litros) a 1,9 K

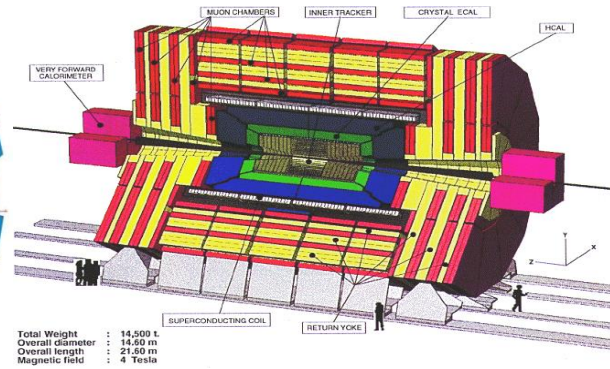


Como mostra a figura, o LHC - Large Hadron Collider, é um complexo de aceleradores que funcionam em conjunto para produzir colisões nos quatro pontos on se encontram os detectores de partículas. O CERN é uma instituição que faz Ciências, Educação, Colaboração e tecnologia.

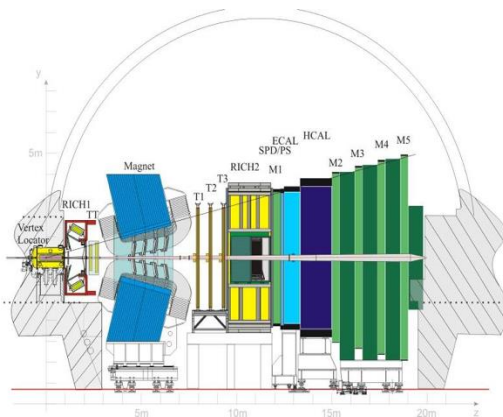
Os principais detectores e colaborações científicas são, o CMS (compact muon Solenoid), o ATLAS (A Toroidal LHC Apparatus), o LHCb (Large Hadron Collider beauty experiment) e o ALICE (A Large Ion Collider Experiment). As figuras abaixo mostram cada um dos detectores respectivos as colaborações.



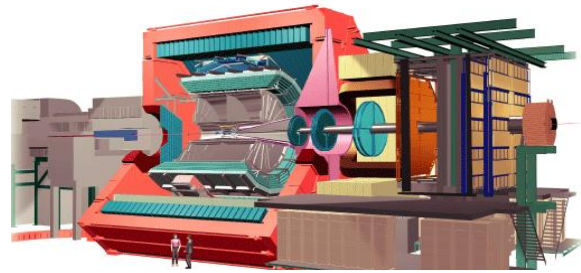
ATLAS - A Toroidal LHC Apparatus



CMS- Compact Muon Solenoid



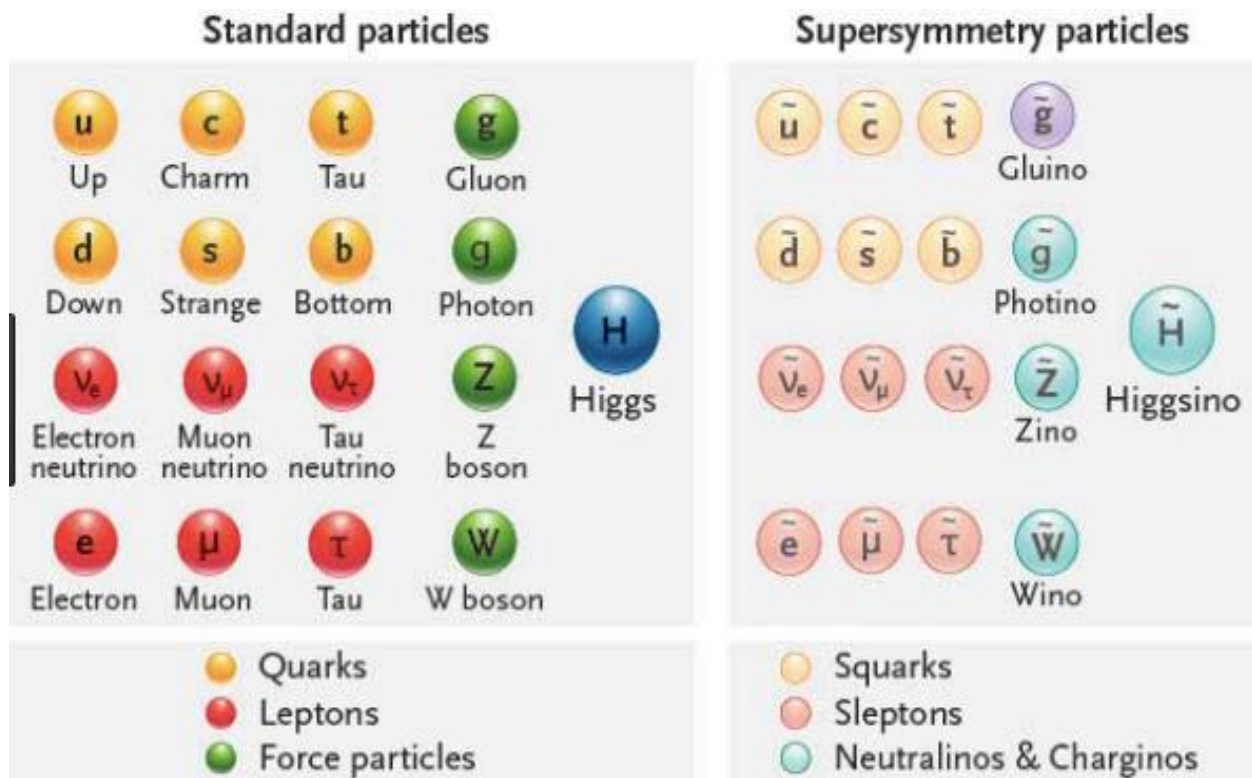
LHCb -Large hadron collider Beauty



ALICE - A Large Ion Collider Experiment

Cada um dos detectores tem um objetivo principal dentro do quadro da Física de Partículas mas não impede que encontrem resultados da mesma partícula. Os dois detectores ATLAS e CMS são detectores de propósito geral. Isto quer dizer que podem fazer quase toda a Física de Partículas. O LHCb tem como prioridade a Física do quark Beauty (b) e o ALICE se dedica a Física dos ions pesados.

As interações observadas trazem informação de como as partículas elementares interagem entre si. O quadro dessas partículas é mostrado abaixo.



O quadro mostra, do lado esquerdo as partículas, que apesar de serem não diretamente observadas, que constituem os mesons e barions que são observados pelos experimentos atuais enquanto o lado direito mostra um quadro semelhante sobre as partículas supersimétricas. Elas são objeto de estudo. Observe que nenhum quadro mostra a possibilidade da existência de Glueballs que também não foram ainda observados.

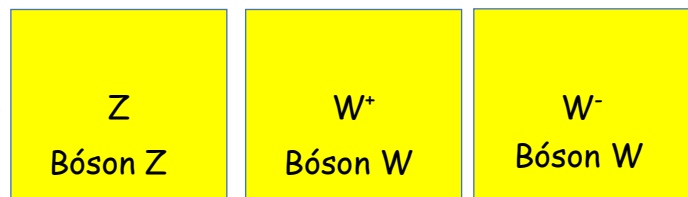
Tão importante quanto as descobertas de partículas é a compreensão das interações entre elas. Fizemos um quadro para mostrar essas interações e seus responsáveis.

As interações Fundamentais

Eletromagnéticas



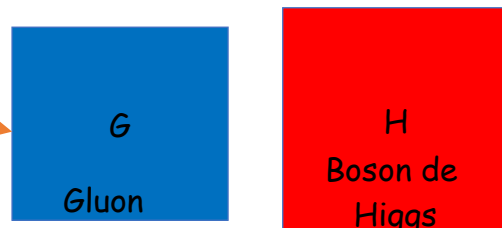
Fracas



Fortes



Gravitacionais → Graviton



As figuras mostram que o fóton é responsável pelas interações eletromagnéticas, os Bósons Z , W^+ e W^- pelas interações Fracas e o Gluon G pelas interações Fortes. Mostramos também o recém-descoberto Boson de Higgs como consequência da quebra de simetria nas interações eletrofracas e responsável pelas massas das partículas envolvidas na interação.

A razão pela qual, uma vez descobertas as partículas, se fazem centenas de estudos sobre a produção, os decaimentos, as razões de ramificação, as secções de choque, e muitos outros parâmetros que constituem verdadeiras propriedades que caracterizam a interação. Conhecer as interações fundamentais é fundamental para a Física de partículas como um todo.

Nossa Motivação

Os pontos principais que fazem parte de nossa motivação são:

- Do ponto de vista teórico é a própria QCD e seus constituintes. Principalmente o fato de o gluon faz a grande diferença quando olhamos os lagrangeanos da QED e da QCD. O fato de ser possível haver interação gluon x gluon é óbvio que a formação de estados com predominância dos constituintes de gluons.
- Fenomenologicamente, há o problema de conexão com o Pomeron, a bem estabelecida regra de Zweig (O.Z.I.) e sua integração com a QCD via estados intermediários de interações que não guardam a memória do estado inicial, e usando o fato de gluons fazerem a conexão entre quarks.
- Experimentalmente a riqueza do espectro dos J/Ψ e decaimentos radioativos.

POR QUE FALAMOS DE BOLA DA VEZ?

Tomamos emprestada a expressão popular que indica a situação preferencial para a próxima ação, para chamar a atenção que apesar das interações entre gluons indicarem a possibilidade de formação de estados ligados e até mesmo de ressonâncias gluônicas, não vemos muitas pesquisas experimentais na direção da procura do Glueball. As que existem na realidade tem encontrado objetos híbridos, aqueles que tem números quânticos compatíveis com uma boa ressonância mesônica. A QCD é fundamentada na existência dos gluons e da possibilidade de interação entre eles, o que, teoricamente, faz a grande diferença da QED. E isto pode ser visto fazendo uma comparação entre as Lagrangeanas da QED e QCD como mostramos abaixo.

QED - Electrodinâmica

$$\mathcal{L}_{QED} = -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} + \bar{\Psi}(i\gamma^\mu D_\mu - m)\Psi$$

$$F_{\mu\nu} = \partial_\nu A_\mu - \partial_\mu A_\nu$$

$$D_\mu = \partial_\mu - ieA_\mu$$

QCD - Cromodinâmica

$$\mathcal{L}_{QCD} = -\frac{1}{4} G_{\mu\nu}^a G_a^{\mu\nu} + \bar{q}_\alpha (i\gamma^\mu D_\mu - m\delta^{\alpha\beta}) q_\beta$$

$$G_{\mu\nu}^a = \partial_\mu A_\nu^a - \partial_\nu A_\mu^a + g f^{abc} A_\mu^b A_\nu^c$$

$$D_\mu = \partial_\mu - i\frac{g}{2}\lambda^a B_\mu^a$$

$A_\mu^a(x)$ - São os campos de Gauge Vetoriais (GLUONS)

$q_\alpha^A(x)$ - são os Campos de Fermi (spin 1/2) (QUARKS)

λ^a - são 8 matrizes de SU(3)_c tal que $[I^a, I^b] = 2i f^{abc} I^c$

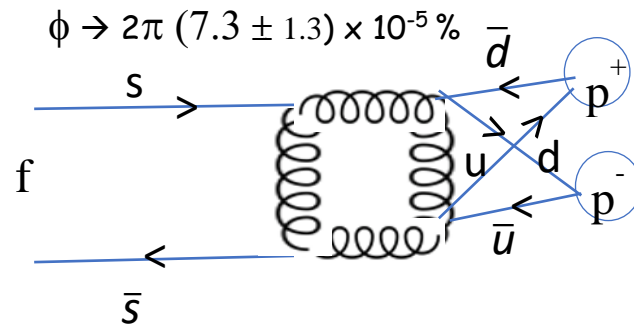
e $f^{abc} = 1/4i \text{Tr}\{[I^a, I^b]\}$ são as constantes de estrutura do grupo

A ideia no contexto da LISHEP sessão A é tentar informar que além das partículas já descobertas e dos quarks conhecidos ainda que indiretamente, existem outros objetos que ainda estão escondidos e não os conhecemos além das teorias existentes que indicam suas existências. Os glueballs e as partículas supersimétricas são exemplos que chamamos a atenção. Portanto isto nos permite afirmar que o nosso conhecimento é incompleto quando falamos de interações fundamentais e dos primeiros tijolos da natureza.

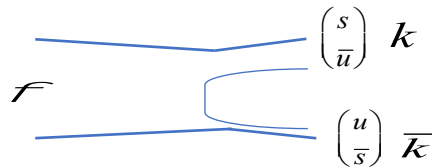
Antes do aparecimento da QCD como a teoria das interações fortes, havia o modelo de Regge, ou teoria de Regge, que era a única forma de estudar os resultados experimentais. O Modelo de Regge trouxe consigo alguns conceitos interessantes e alguns permanecem extremamente úteis para compreendermos os resultados experimentais produzidos pelos aceleradores de partículas. A regra de troca de número quânticos, explicitando conhecermos os números quânticos das partículas envolvidas na interação, o Pomeron como a trajetória de Regge que vem mais tarde se comparar com o Glueball, e a Regra de Zweig como explicitaremos em seguida e que é uma da regra que foi incorporada pela QCD.

"Diagrama de quarks desconectados corresponde a processos altamente suprimidos". Isto quer dizer com baixa razão de ramificação ou com uma probabilidade baixa de produzir o estado em estudo consequente de um decaimento.

Vejamos alguns exemplos: O méson ϕ decai em 2π com aproximadamente 7% enquanto em $K\bar{K}$ é de aproximadamente 50%.

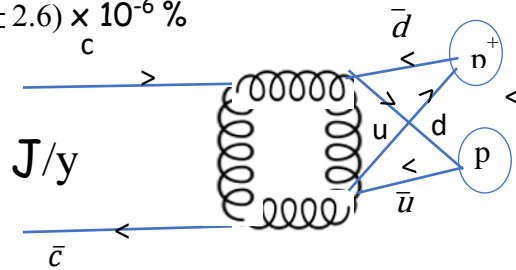


Enquanto $\phi \rightarrow K\bar{K} \sim 85\%$

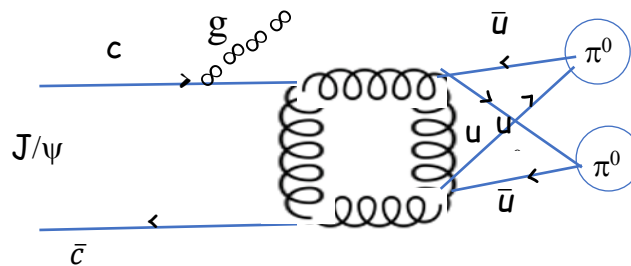


De maneira análoga, o J/ψ decai em $\pi^+ \pi^-$ e $\pi^+ \pi^- \pi^0$ e com decaimento radiativo em $\gamma \pi^0 \pi^0$

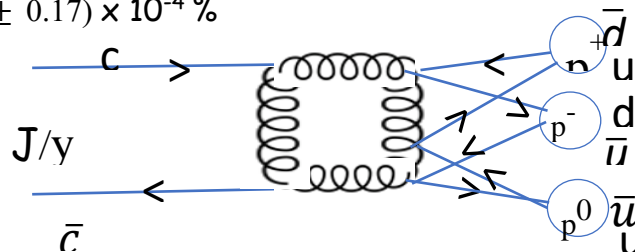
$J/\psi \rightarrow \pi^+ \pi^- \quad (7.8 \pm 2.6) \times 10^{-6} \%$



$J/\psi \rightarrow \gamma \pi^0 \pi^0 \quad (2.8 \pm 0.5) \times 10^{-3} \%$



$J/\psi \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0 \quad (2.01 \pm 0.17) \times 10^{-4} \%$



Enquanto que em hadrons a taxa de decaimento é de $(87.7 \pm 0.5)\%$ é bastante significativa mostrando a supressão dos estados desconectados. Ou pela QCD podemos imaginar que via um estado intermediário formado por gluons, um glueball que decairia em partículas sem a memória do estado inicial.

Uma tarefa na ordem do dia seria mostrar a existência de Glueball, experimentalmente, ou criar uma regra de seleção como tantas outras como consequência da conservação de simetrias.

CANDIDATOS A GLUEBALL ENCONTRADOS PELOS EXPERIMENTOS

Os mais variados experimentos anunciam a existência de candidatos a serem identificados como Glueball. No entanto se considerarmos a existência de objetos híbridos, aqueles que tem números quânticos de possível identificação com estados gluônicos, esses objetos em 100% dos casos têm números quânticos de possível definição de uma boa ressonância mesônica. Para nos assegurar dos números quânticos vejamos a tabela seguinte.

Glueballs and Oddballs							
J^{PC}	(qq)	2g	3g	ODD	Masses (GeV)		
					[19]	[20]	[21]
0 ⁺⁺	YES	YES	YES	NO	1.58	1.73±0.13	1.74 ±0.05
0 ^{*-}	NO	NO	YES	YES			
0 ⁻⁺	YES	YES	YES	NO			
0 ^{**}	NO	NO	YES	YES	1.58	2.59±0.17	2.37 ±0.27
1 ⁺⁺	YES	YES	YES	NO			
1 ^{*-}	YES	NO	YES	NO			
1 ⁻⁺	NO	YES	YES	YES			
1 ^{**}	YES	NO	YES	NO	3.49	3.85±0.24	
2 ⁺⁺	YES	YES	YES	NO	2.59	2.40±0.15	2.47 ±0.08
2 ^{*-}	NO	NO	YES	YES			
2 ⁻⁺	YES	YES	YES	NO	3.03	3.10 ±0.18	3.37 ±0.31
2 ^{**}	YES	NO	YES	NO	3.71	3.93±0.23	
3 ⁺⁺	YES	YES	YES	NO	3.58	3.69±0.22	4.30 ±0.34
3 ^{*-}	YES	NO	YES	NO			
3 ⁻⁺	NO	YES	YES	YES			
3 ^{**}	YES	NO	YES	NO	4.03	1.73±0.29	

Todos os estados com possíveis números quânticos qq e também possíveis para gg e ggg são estados híbridos.

Uma pergunta sobre a dificuldade de encontrar glueballs "puros", estaria ligado ao fato de que os estados híbridos dominam o espectro até agora investigado? Tudo se passa como se estes estados fossem um fundo importante para a observação de glueballs.

2. Nos processos de decaimento radiativo do tipo onde :

Se $x = \text{Gluonium}$ o processo deverá ser menos suprimidos que se $x = \text{Quarkonium}$.

Onde procurar glueballs?

É uma pergunta que nos fazemos sempre que desejamos saber um pouco mais sobre estes hadrons criados pela QCD. Se esses objetos existem estão escondidos em algum lugar do espaço de fase das interações hadrônicas. Por enquanto nós sugerimos:

1. Selecionar processos suprimidos pela regra de Zweig (O.Z.I.), mas não totalmente suprimidos.
2. Nos processos de decaimento radiativo do tipo: $\Upsilon \rightarrow g X$
se $X = \text{Gluonium}$ que decai em objetos não charmosos, o processo não deve ser muito suprimido.
3. Processos que tenham números quânticos Exóticos: Oddballs (separar dos possíveis estados singletos de $SU(3)$ como foi o caso para o $E(1420)$).
4. Larguras da ordem das primeiras dezenas de MeV. E massas da ordem do Limiar da interação.
5. No espectro dos Hybridos, separar as amplitudes em Mesons e Glueballs

$$A(s,t) = M(s,t) + G(s,t)$$

Estudar as diferenças de *Branching ratios*. (razão de ramificação) O Branching Ratio nos dá uma boa idéia sobre a porcentagem de desintegração de um objeto em outros determinados objetos. $A \rightarrow b c \dots$

Do ponto de vista experimental, Talvez devêssemos estudar o tipo de detector e as condições físicas para a observação do Glueball. Um caso semelhante podemos apontar, embora sem ter obtido sucesso a construção do CASTOR (Centaurus And Strange Object Research = arXiv:2011.01185v2 [physics.ins-det] 10 Feb 2021) por grupos da colaboração CMS para procurar um evento muito especial descoberto por Cesar Lattes e seu grupo em observação de Raios Cósmicos. Isto é, o evento chamado centauro. Tinha características particulares com partes específicas para detectar o evento centauro. Uma parte sensível a interações electromagnéticas e outra parte sensível a interações hadrônicas. Mas infelizmente o subdetector teve que ser retirado devido ao nível de ruído que causava nas outras partes do detector.

Nós paramos aqui tendo em vista que nosso objetivo nesta nota foi apenas transcrever a nossa palestra na LISHEP2023-Sessão A, e informar nossos colegas que a matéria tem essa riqueza, quarks e gluons que formam estados observáveis pela instrumentação que hoje dispomos no LHC. E que gluons interagem entre si para formar hadrons chamados Glueballs.