



INSTITUTO
SUPERIOR
TÉCNICO

Os PENTAQUARKS, sinais de novas estruturas

Pedro Bicudo

CFIF/ Dep Física IST , Lisboa

Palestra apresentada pelos 50 anos do CERN,
A Universidade na Fronteira do Conhecimento,

http://fisica.fc.ul.pt/~cern50/jornadas_FCUL.html

FC-UL, 20 Dezembro 2004 Lisboa



INSTITUTO
SUPERIOR
TÉCNICO

Os PENTAQUARKS, sinais de novas estruturas

Pedro Bicudo

CFIF/ Dep Física IST , Lisboa

1. Pequena história dos quarks.
2. A Cromodinâmica Quântica (QCD), Prémio Nobel 2004.
3. Descoberta, japonesa, do Pentaquark Θ^+ .
4. A excitação dos pentaquarks Θ^+ , X^{--} e D^{*-} .

FC-UL, 20 Dezembro 2004 Lisboa

Delivered-To: bicudo@ist.utl.pt
Date: Tue, 2 Dec 2003 11:17:18 -0500
From: physnews@aip.org
Subject: Physics News Update 664

PHYSICS NEWS UPDATE

The American Institute of Physics Bulletin of Physics News

Number 664 December 2, 2003 by Phillip F. Schewe, Ben Stein, and

James Riordon

THE TOP PHYSICS STORIES OF 2003.

The first three on our list concern the sharpening of our understanding of the big bang era, **evidence for new quark groupings**, and progress in manipulating quantum gases.

At the largest size scale, new observations from the Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP), the Sloan Digital Survey and other telescopes have reduced the uncertainties in the values of such cosmic parameters as the Hubble constant, the age of the universe, and the fractions of total energy vested in the form of dark and luminous matter (www.aip.org/enews/physnews/2003/split/624-1.html; www.aip.org/enews/physnews/2003/split/659-1.html).

Going to the opposite extreme, at the level of elementary matter, new data indicate that quarks needn't appear only in clumps of three (baryons) or two (mesons). Work at SLAC (US) and KEK (Japan) hint that quarks might also exist in "tetraquark" states (<http://www.aip.org/enews/physnews/2003/split/643-1.html>), while experiments in Japan, the US, Russia, and elsewhere provide evidence for a "pentaquark" state (<http://www.aip.org/enews/physnews/2003/split/644-1.html>).

The third top story concerns the creation of the first ever Bose Einstein condensate (BEC) consisting of paired-fermion-atom molecules ...

1. Pequena história dos quarks.

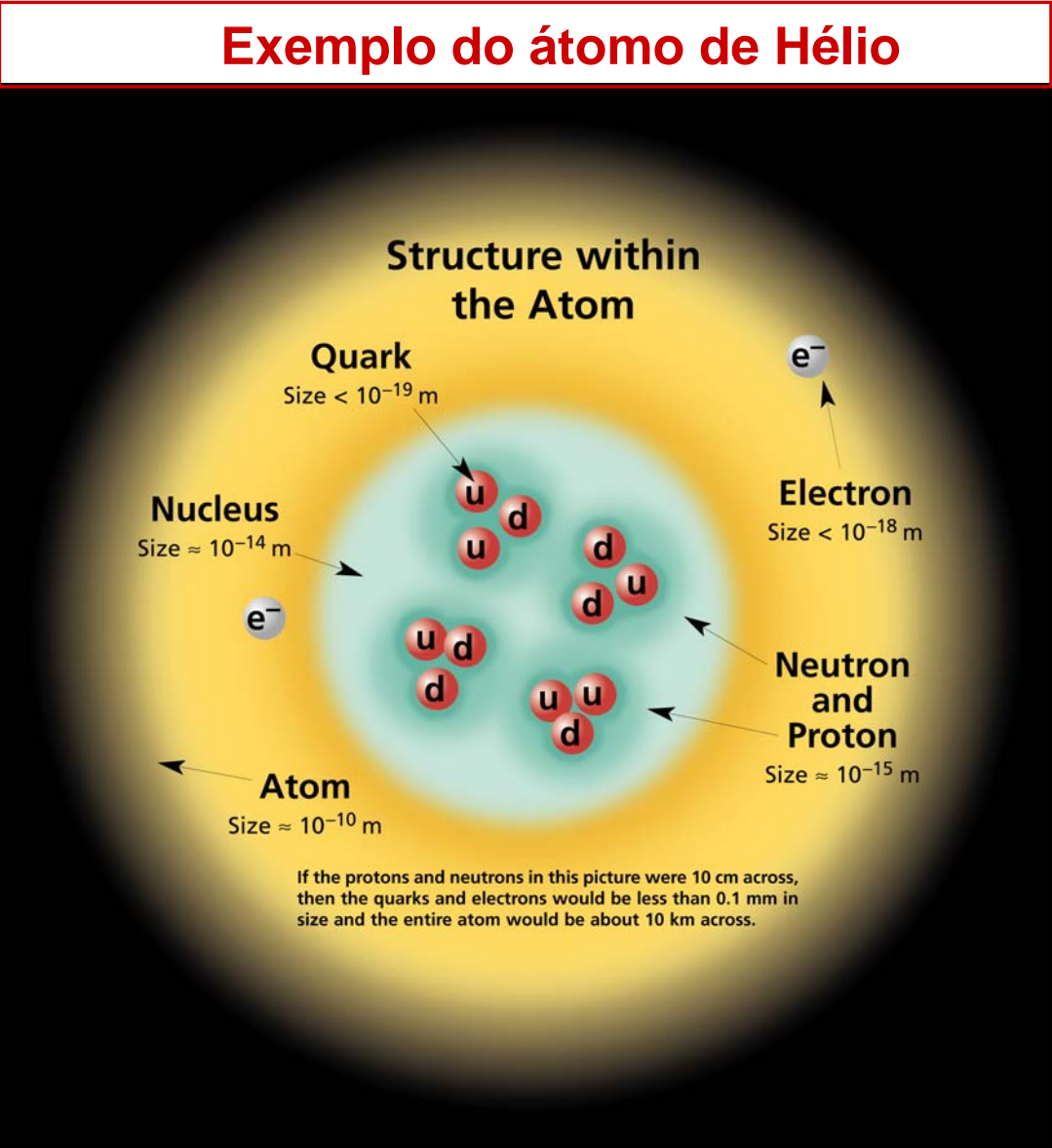
Os quarks, constituintes da matéria

Mais de 99,9% da massa da matéria reside nos nucleões, que são constituídos por quarks.

A escala da função de onda dos quarks é o Fermi,

$$1 \text{ Fm} = 10^{-15} \text{ m}.$$

A energia envolvida por quark é da ordem de 300 MeV , que é da ordem de grandeza de $E \sim pc \sim hc/\hbar \sim 200 \text{ MeV}$.



Modelo dos Quarks para a classificação dos hádrões

Os quarks foram independentemente introduzidos nos anos 60, por Gell-Mann (que se inspirou numa passagem da obra *Finnegans Wake* de James Joyce para encontrar o nome de quarks), Ne'eman e Zweig, como partículas sub-nucleares para

- explicar o elevado número de hádrões (ressonâncias) observados, primeiro em raios cósmicos e depois em aceleradores de partículas, muitos dos quais em multipletos de massa degenerada, por exemplo,

η : 1: η^0

N: 2: p^+, n

π : 3: π^+, π^0, π^-

Δ : 4: $\Delta^{++}, \Delta^+, \Delta^0, \Delta^-$ K: 4: $K^+, K^-, K^0, \bar{K}^0 \dots$

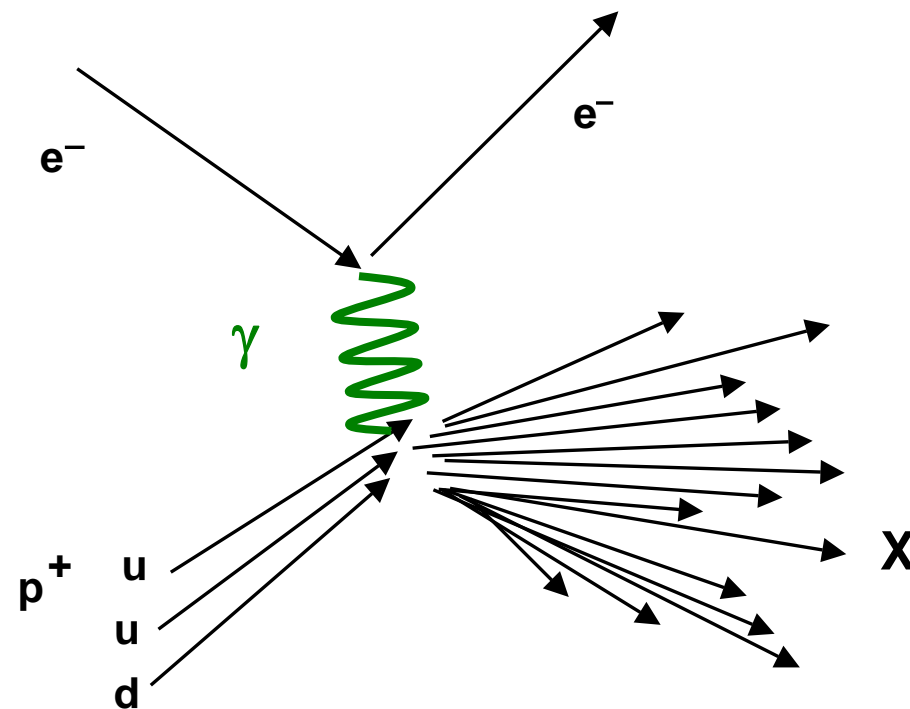
- explicar o raio finito do próton e do neutrão, da ordem de $0,7 \text{ Fm}$, medido por Hofstadter nos anos 50,

- explicar o momento magnético anómalo do próton e do neutrão, que diferem muito do momento esperado em fermiões de Dirac como o electrão.

Modelo dos Partões para a dispersão inelástica

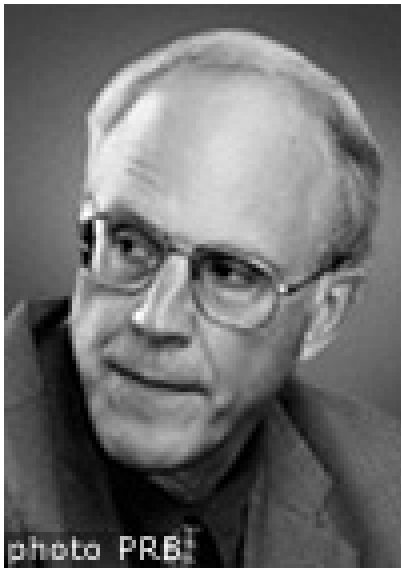
Simultaneamente era conhecida a distribuição de carga e o momento magnético anómalo dos nucleões, e estenderam-se as experiências de Hofstadter para electrões de energia cada vez mais alta.

Realmente a secção eficaz para $e^- p^+$ pode ser descrita por **constituintes pontuais, fundamentais, sem estrutura**, de spin $1/2$ que Feynman chamou de **partões**.



(O carácter corpuscular dos quarks traduz-se na invariância de escala das funções de estrutura F_1 e F_2 que generalizam o conceito de distribuição de carga e de momento magnético anómalo dos nucleões.)

2. A Cromodinâmica Quântica (QCD), prémio Nobel 2004



David Gross



David Politzer



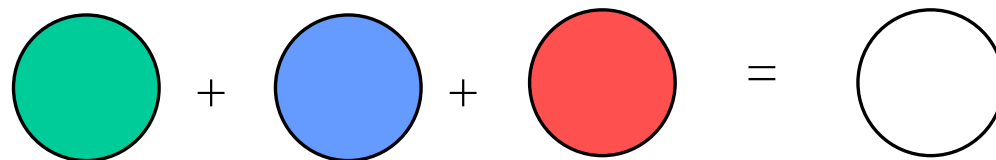
Frank Wilczek

A cor e a teoria da QCD

A maioria dos problemas que surgiram com a invenção dos quarks foram resolvidos com a introdução do conceito da cor. A cor foi inicialmente introduzida para não se violar o princípio de Pauli, que diz que

“as funções de onda dos fermiões devem ser anti-simétricas para a troca de partículas”.

Ora a função de onda dos 3 quarks que constituem por exemplo o próton, é simétrica em termos de momento angular, spin, e sabor. Assim foi inventado um novo número quântico que daria uma função antisimétrica ao próton. Ora os objectos coloridos, como os quarks e glúons ficam confinados. A experiência ganha no estudo do sabor sugeriu que o grupo de simetria associado deveria ser o grupo $SU(3)$, pois tal como em $SU(2)$ se pode combinar um spin \uparrow com um spin \downarrow para ter um spin total 0, o $SU(3)$ permite com **3 quarks** construir funções de onda de cor nula,



Tendo o nome de **COR** sido possivelmente inspirado na contemporânea TV a cores .

Apesar de a cor ter a mesma algebra $SU(3)$ que o sabor, tudo indicava que tinha uma natureza bem distinta devido ao confinamento dos objectos coloridos. Assim atribui-se a cor uma simetria local, inspirada na existência apenas local dos quarks.

Uma teoria local já existia, da teoria quântica do electromagnetismo que tem uma simetria de gauge/padrão $U(1)$, onde por exemplo existem cargas positivas e negativas que se podem cancelar.

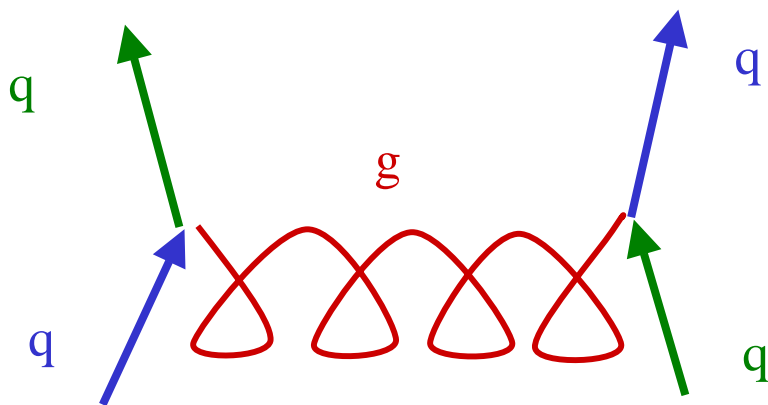
A **QCD (teoria da cromodinâmica quântica)** surgiu naturalmente como extensão da teoria quântica do electromagnetismo, substituindo o grupo de gauge/padrão $U(1)$ pelo grupo da cor, o grupo $SU(3)$.

Logo se juntou evidência da compatibilidade da **QCD** com o confinamento,

- mostrando que no limite de altos momentos é perturbativa, tem liberdade asintótica,
- mostrando que em simulações discretas numa rede existe confinamento

No entanto a **QCD** permanece uma teoria não resolvida! O seu Lagrangeano é muito simples e bem definido, mas não se sabe ainda calcular algo tão simples como a massa do próton ou o seu momento magnético, ou qualquer outro observável a partir da **QCD**. Este problema é um dos mais difíceis da física actual, existindo por exemplo um prémio de **\$1.000.000** para quem resolver matematicamente o confinamento a partir da QCD.

Mas acredita-se que a está **QCD** correcta! Uma das suas previsões mais notáveis é a existência de **gluões**, que são análogos aos fótons da electrodinâmica. Os **gluões** são por exemplo responsáveis pela interacção entre quarks.

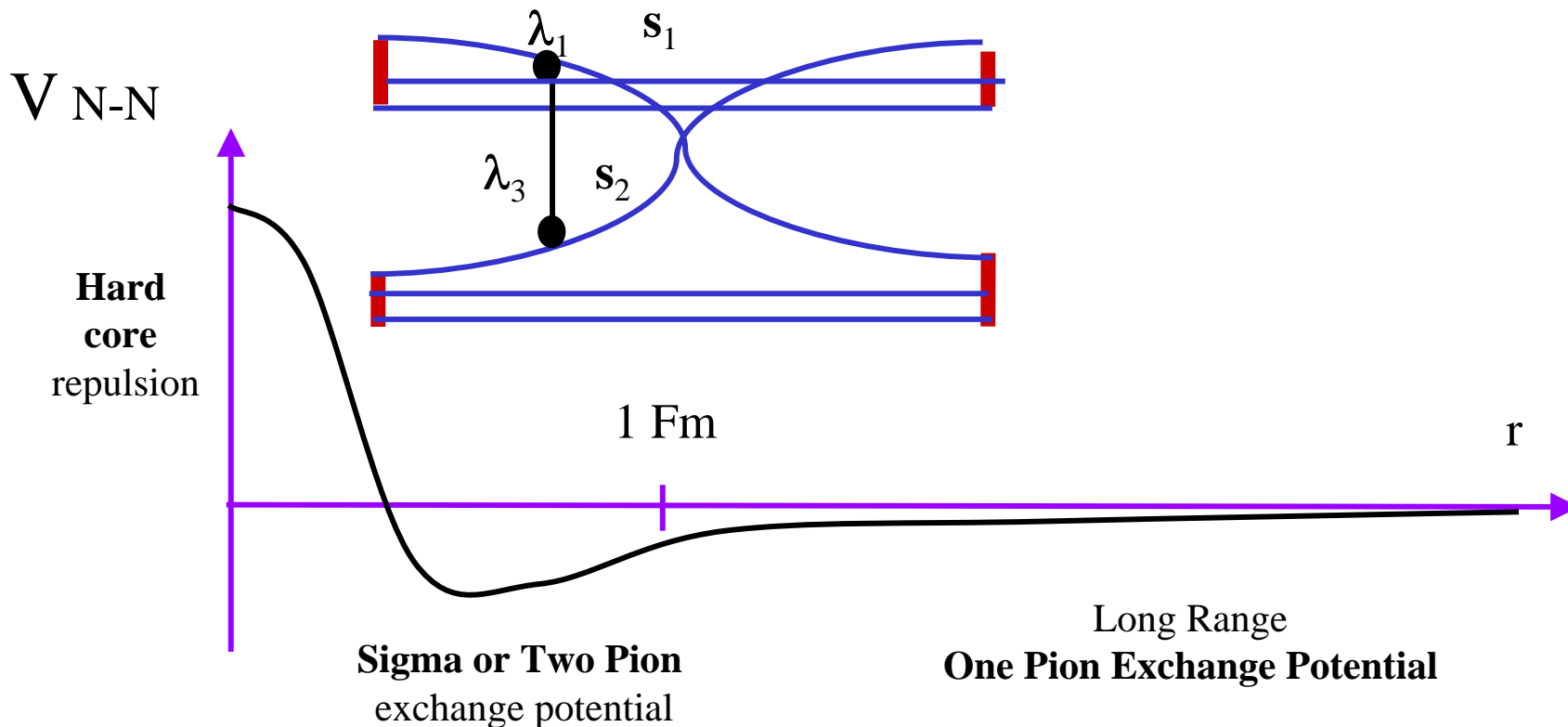


Tal como os **quarks**, os **gluões** já foram “observados” em dispersões a alta energia, mas por serem **coloridos** estão confinados e jamais foram observados isoladamente em repouso!

Estudos de multiquarks em Portugal

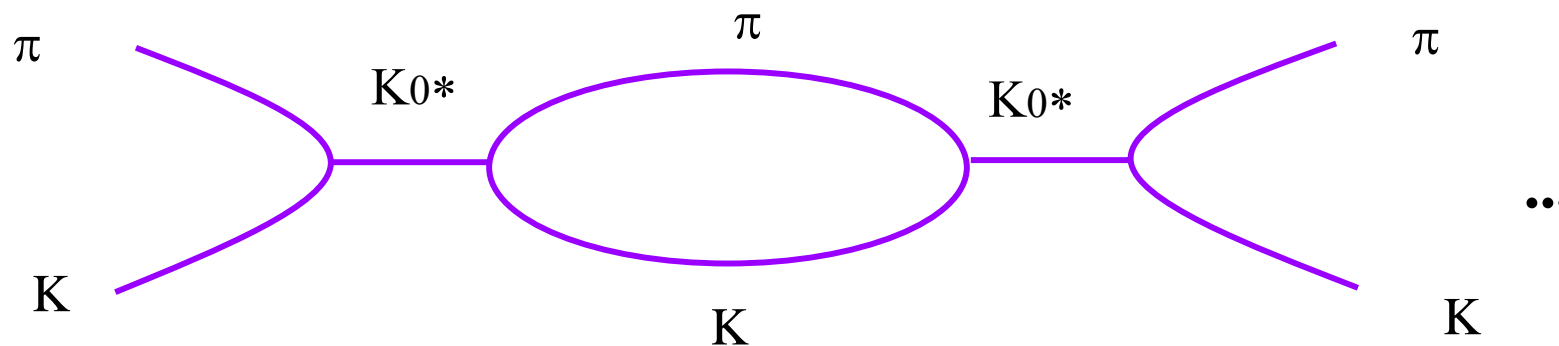
Repulsão Hard Core na interacção N-N

J. Emílio Ribeiro (CFIF/IST), mostrou, estudando sistema N-N com seis quarks (por exemplo um sistema uud+udd) que os sistemas exóticos têm um forte potencial repulsivo. Isto explica o hard core potential que é responsável pela estabilidade nuclear.



Novos mesões escalares são estados Cripto-Exóticos

No início dos anos 80, **Eef Van Beveren** (CFT/FC), J. Emílio Ribeiro, **George Rupp** (CFIF/IST) e com colegas de Nijmegen ,



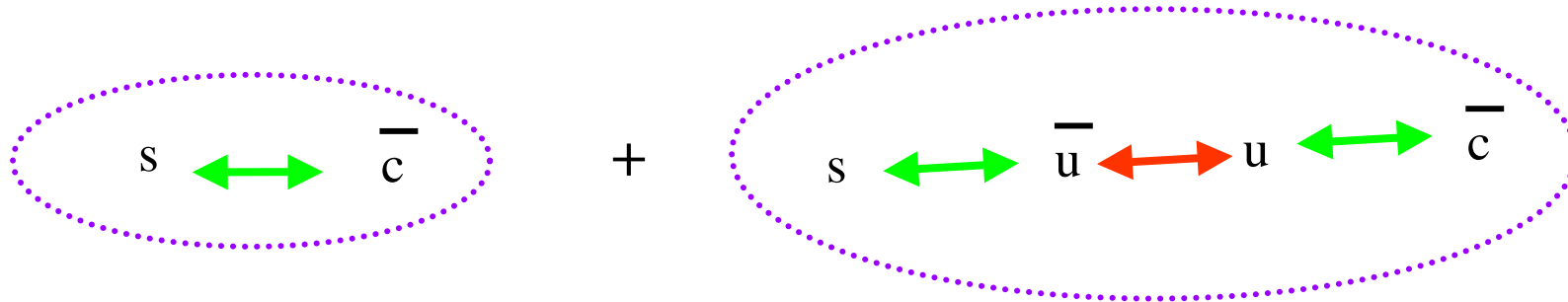
acoplaram o sistema de mesão-mesão ao de quark-antiquark, usando a analiticidade e unitariedade da matriz S , descobriram simultaneamente com **Mike Scadron** mesões escalares como o sigma (também descoberto com **Nils Tornqvist**) e o Kappa, que explicam a atracção nuclear. Por outro lado este estudo mostra que multiquarks podem ser atraídos em sistemas não exóticos, mas sim cripto-exóticos.

Em 2002 o Kappa foi finalmente confirmado experimentalmente.

Cripto-Exóticos muito estáveis

Recentemente George Rupp e Eef van Beveren conseguiram em tempo recorde explicar os novos estados escalares e axiais D_s , observados em BABAR e BELLE.

Estes estados tinham também sido previstos por Maciej Nowak como parceiros quirais dos pseudo-escalares e vectores D_s .



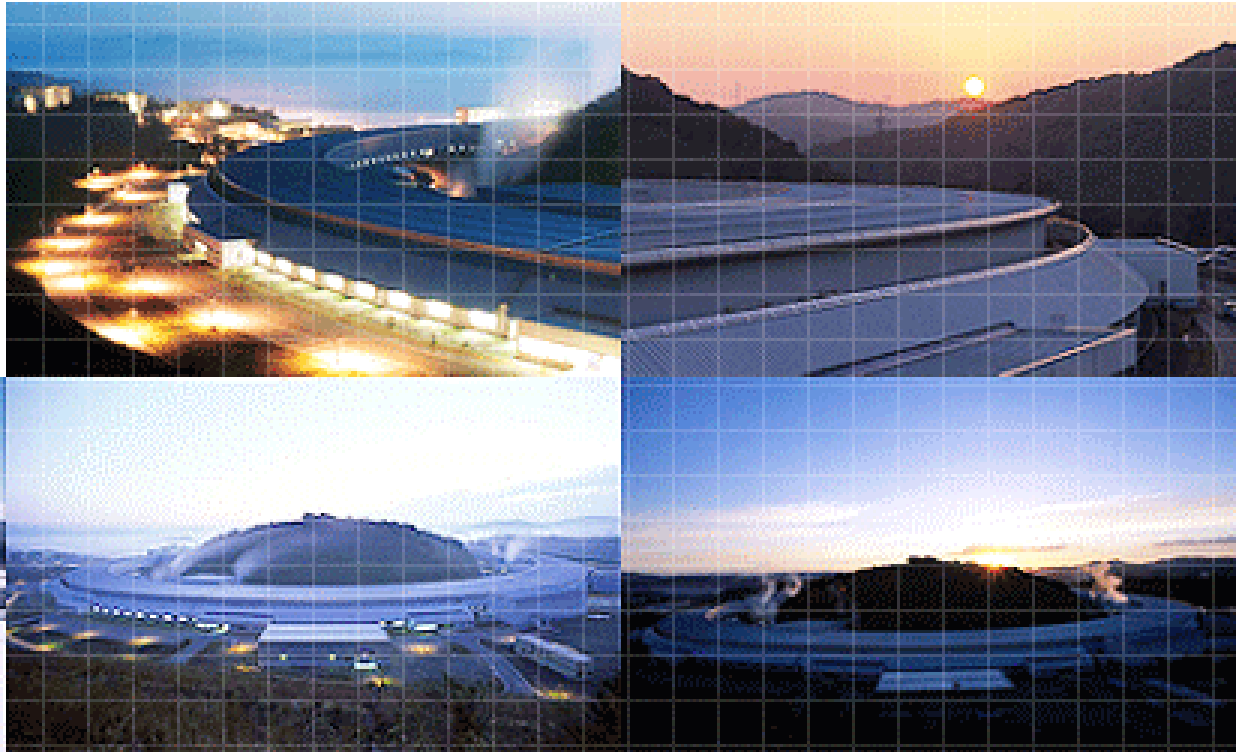
Os D_s são estados muito estáveis, e os sigma e Kappa são muito instáveis. A sua largura muda por 3 ordens de grandeza! No entanto as mesmas técnicas permitem entendê-los.

3. Descoberta, japonesa, do Pentaquark.



Takashi Nakano

SPring 8

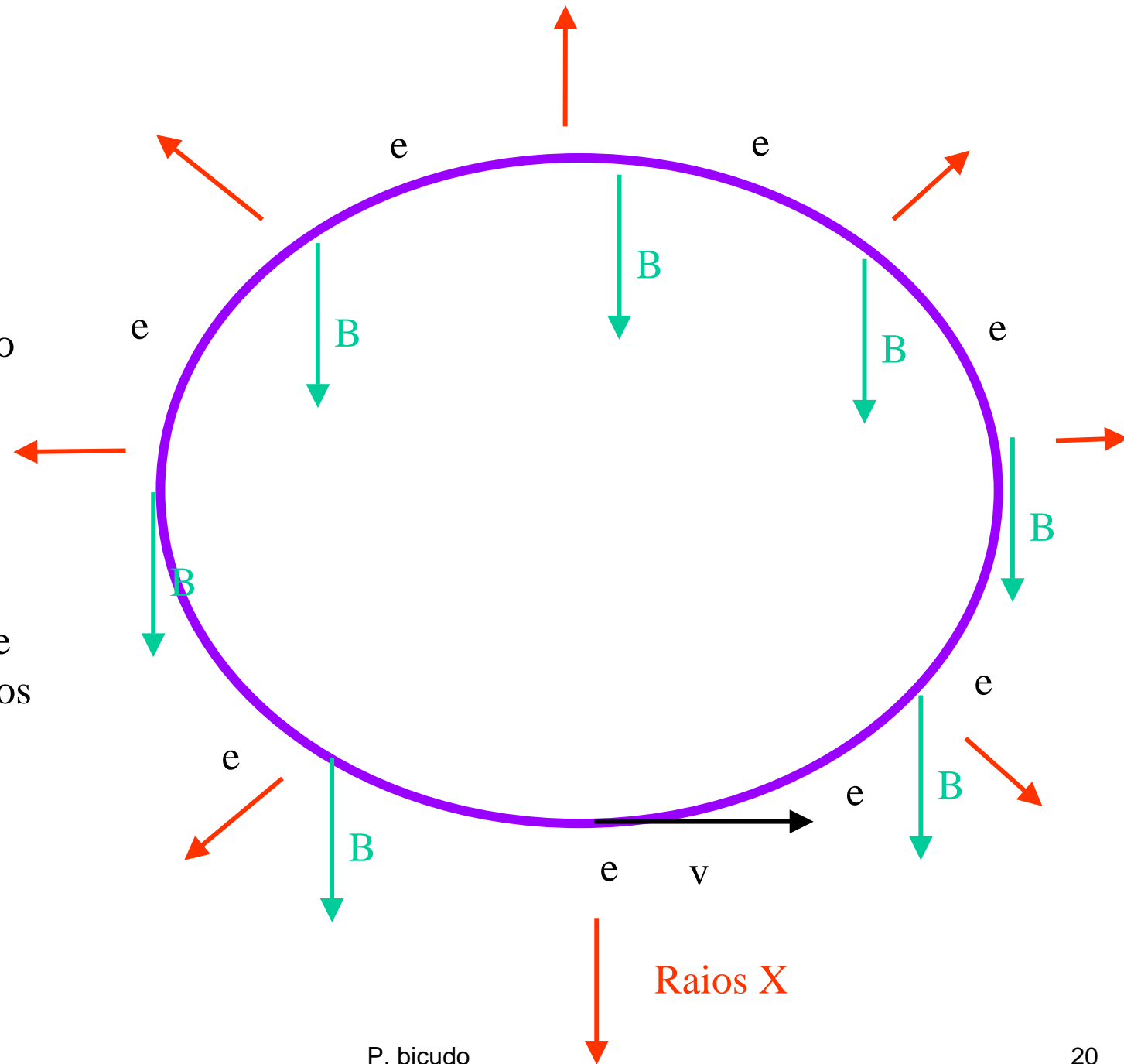
The logo for SPring 8 features the text "SPring 8" in a red, sans-serif font. Below the text is a stylized blue graphic consisting of a central dot with two concentric, slightly offset elliptical orbits around it, resembling a simplified atomic model.

Sincro-Ciclotrão:

Tubo com vácuo onde os electrões se movem a velocidades relativistas.

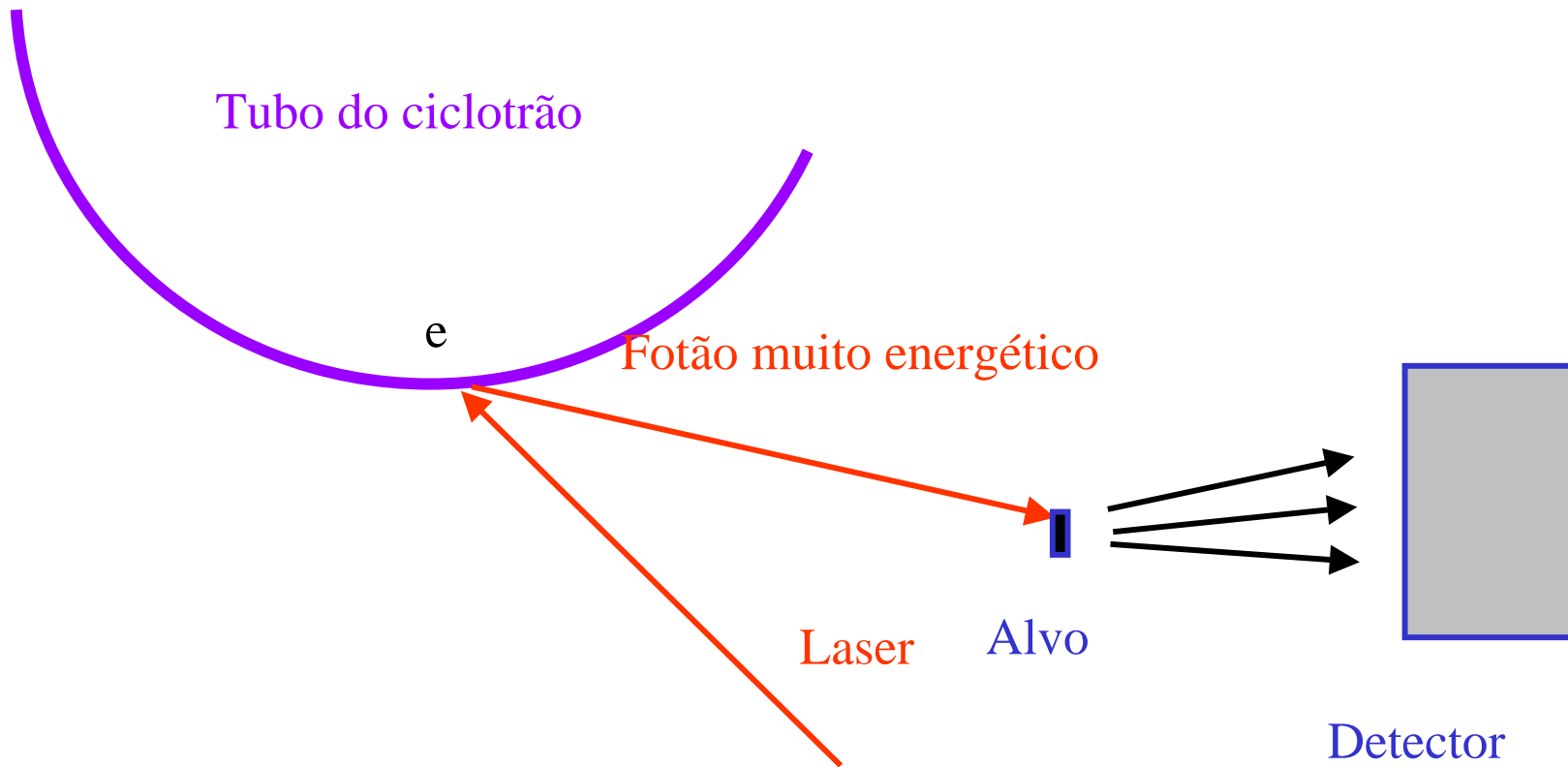
Um forte campo magnético cria a força centrípeta necessária ao movimento circular uniforme dos electrões.

Os electrões comportam-se como antenas e radiam raios X, que são usados por exemplo para investigar materiais e células.



Em Spring-8

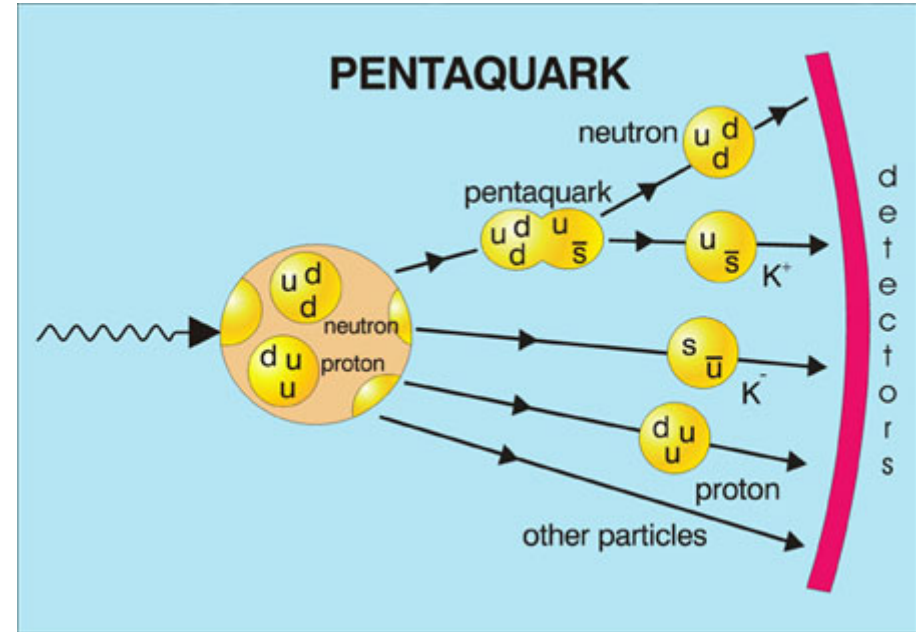
existem mais de 80 experiências, e apenas uma das quais estuda a física dos quarks.



O Pentaquark $uudd\bar{s}$ foi inicialmente decoberto em

LEPS: T. Nakano & al,
hep-ex/0301020,
Phys.Rev.Lett.91:012002,2003
DIANA: V.V. Barmin & al,
hep-ex/0304040,
Phys.Atom.Nucl.66:1715-1718,2003,
Yad.Fiz.66:1763-1766,2003

Entretanto já foi confirmado em cerca de 10 experiências diferentes! Tem uma energia de 1540 MeV e uma largura possivelmente da ordem de 10 MeV.

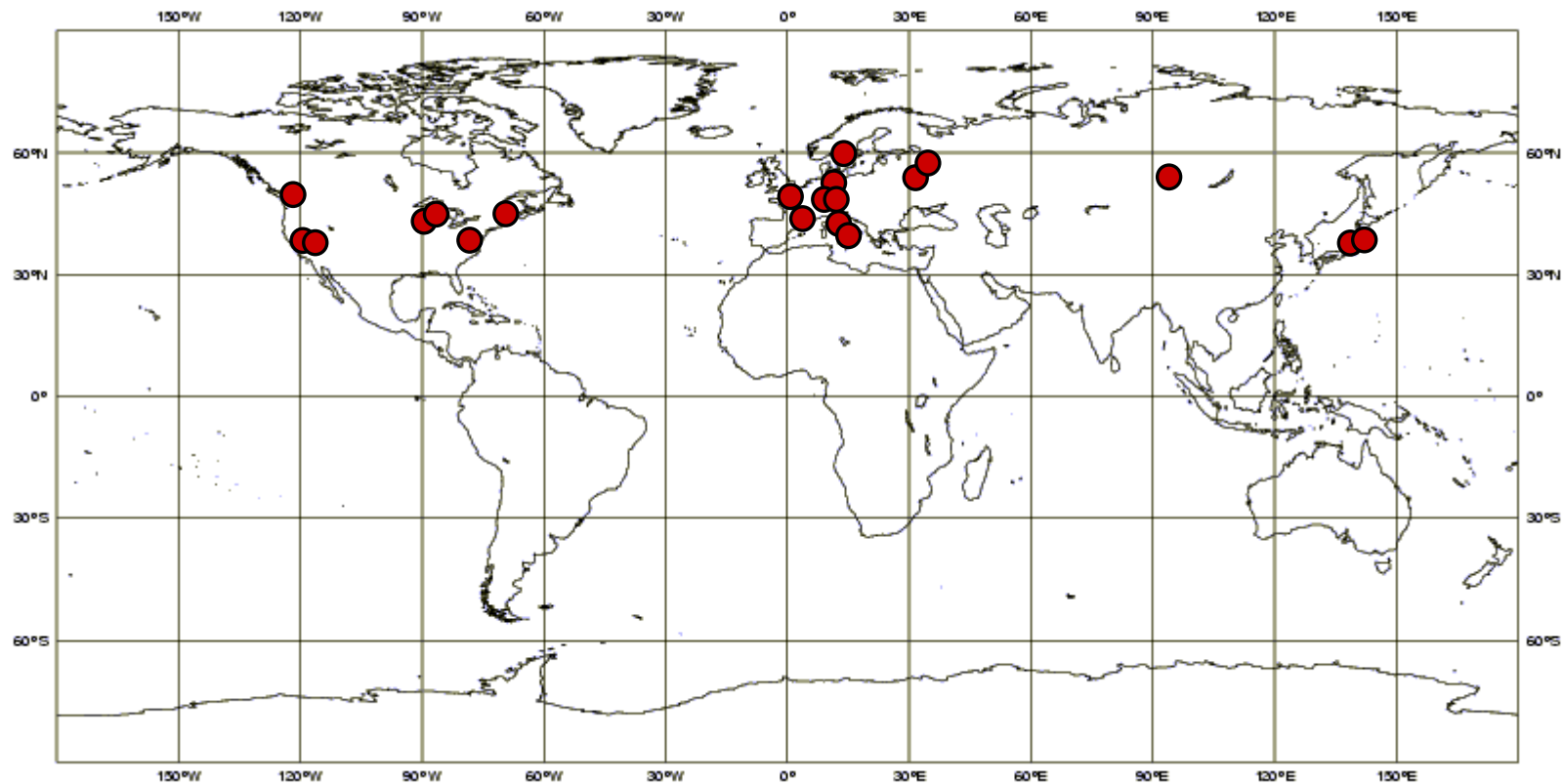


Recentemente foram descobertos os pentaquarks $ddss\bar{u}$ em

NA49 : C. Alt & al., hep-ex/0310014, Phys.Rev.Lett.92:042003,2004

e $uudd\bar{c}$ em

H1 : hep-ex/0403017



● **Laboratório com experiências dedicadas à física hadrônica**

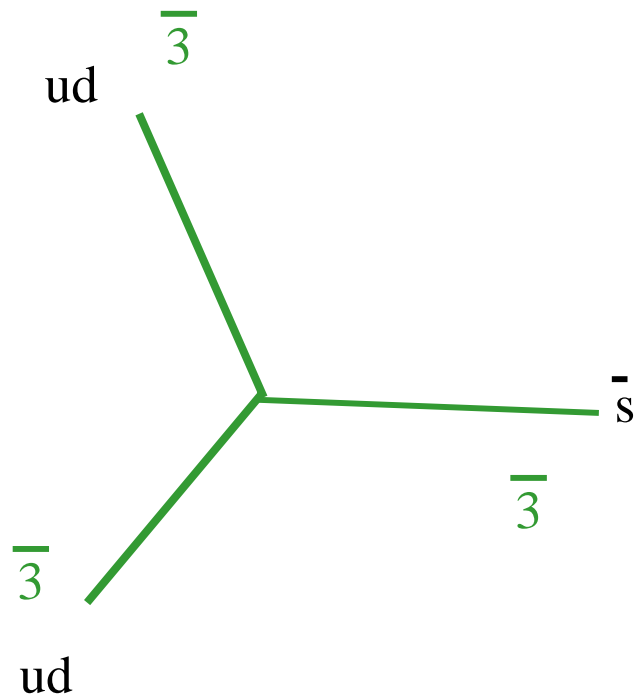
Já existem tantas experiências que procuraram pentaquarks, que podemos nos entreter a contar as que observam /as que não observam o pentaquark

| | | |
|----------------|-----------|-----------|
| $uudds\bar{s}$ | ~ 13 | ~ 12 |
| $ddss\bar{u}$ | 1 (NA49) | ~ 3 |
| $uudd\bar{b}$ | 1 (H1) | ~ 2 |

4. A excitação dos pentaquarks

Θ^+ , X^{--} e D^{*-} .

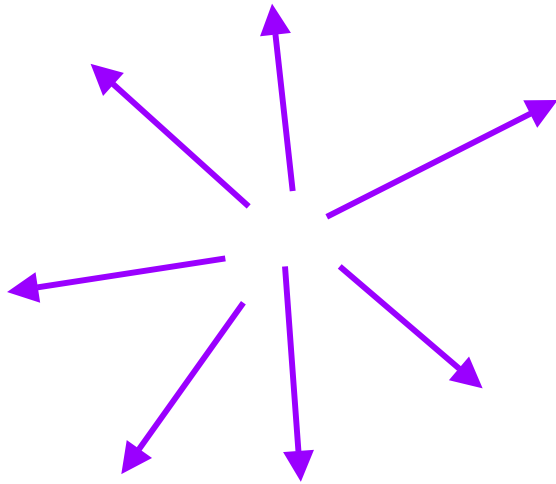
Vários modelos teóricos pretendem explicar os pentaquarks



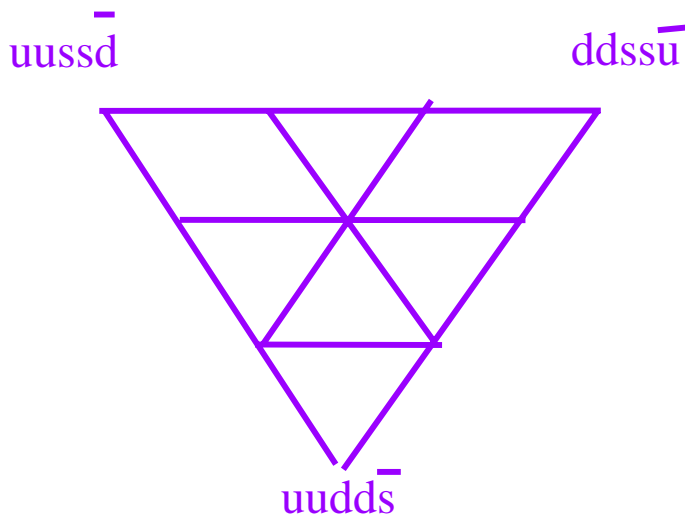
No modelo de Jaffe e Wilczek, de diquarks e de strings, compara-se o pentaquark com um anti-barião, onde um di-quark tem a mesma cor de um anti-quark.

Para explicar a pequena constante de decaimento do pentaquark, uma onda P, de $l=1$, é assumida.

O problema deste modelo é que a energia do sistema tende a ser demasiado elevada, $M \sim 1700 \text{ MeV}$.



Um barião é construído com um campo divergente de mesões

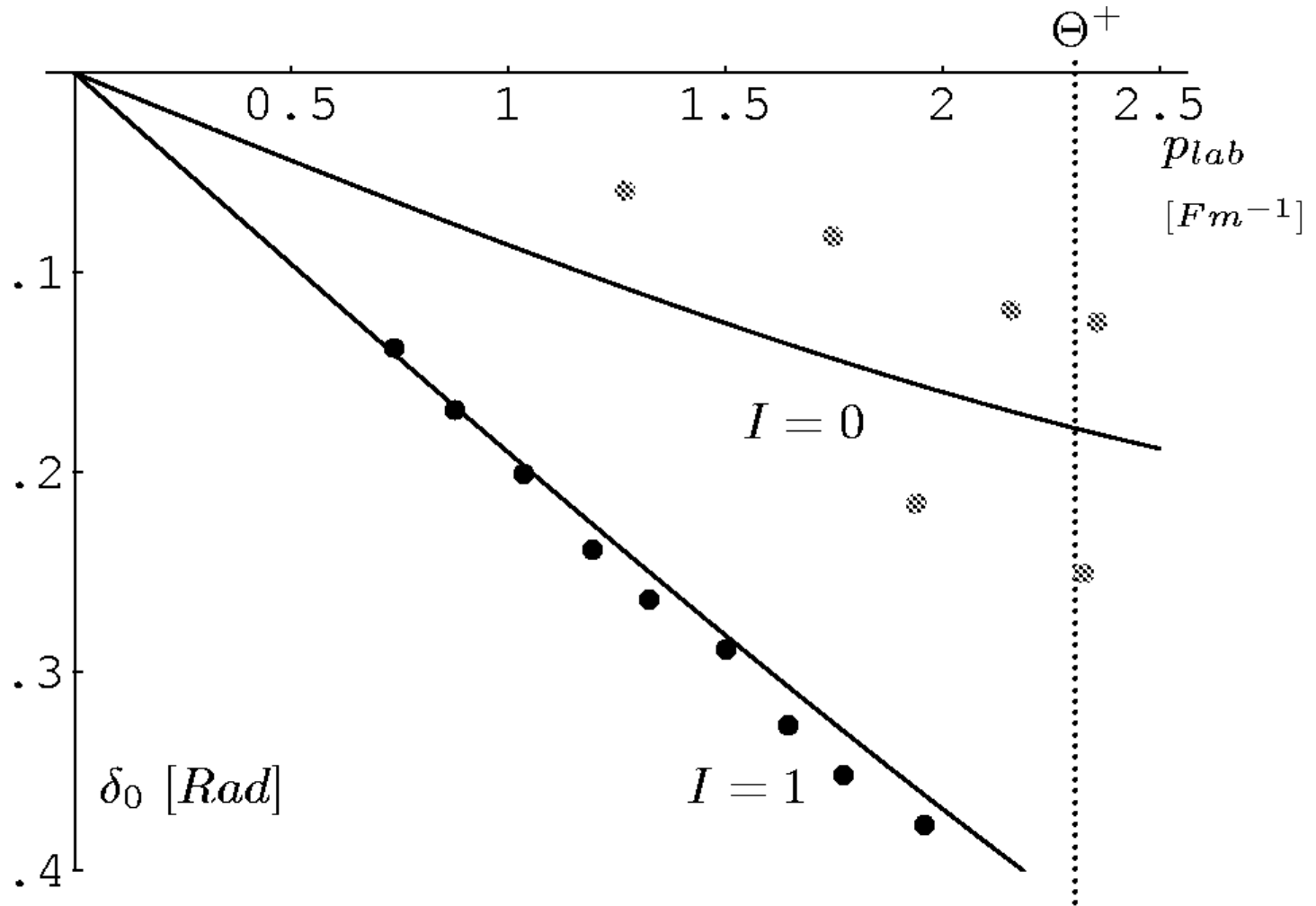


O Skyrme Model onde os bariões (que são fermiões) são descritos como solitões topológicos constituídos por campos de piões (que são bosões!). Este modelo foi usado por Diakonov, Petrov e Poliakov há 10 anos para prever o Θ^+ , com a massa correcta e uma largura pequena.

Também previu a existência de um anti-decuplete que inclui mais estados exóticos, Ξ agora observados.

Neste modelo os pentaquarks têm paridade +.

Porque o não Q^+ pode ser um simples estado $uudds$ ou $K-N$:

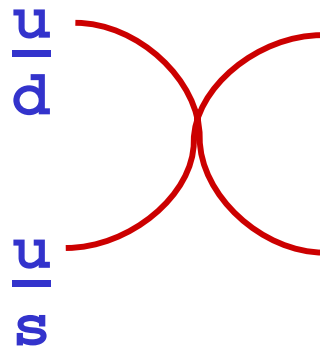


— desvio de fase teórico, baseado na repulsão entre quarks

A partir de quarks e da simetria quiral chegamos ao critério,

- quando dois hádrões quarks repetidos, aumenta a repulsão,
- quando um hádrão tem um antiquark, antipartícula do quarks de um outro hádrão, a atracção aumenta

Exs:



Troca:
repulsão
 $V_{\text{eff.}} \propto$
 $(2/3)(m\Delta - mN)$



Aniquilação:
atracção
 $V_{\text{eff.}} \propto$
 $-(2/3)(2mN - m\Delta)$

Assim o K e o N são repelidos!

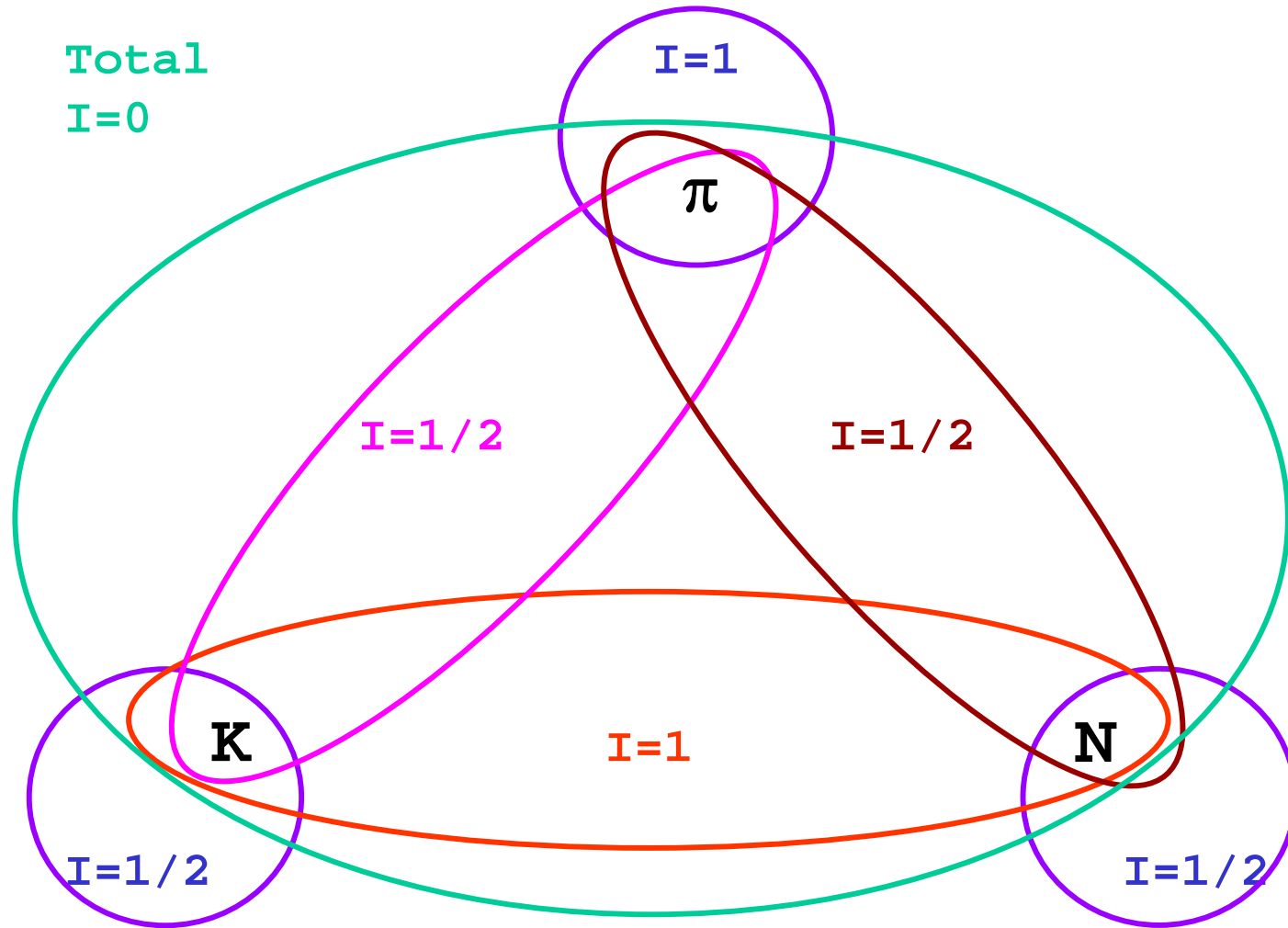
Ou seja o Θ^+ não deve ser um $\bar{u}udd+s$ pentaquark!

Aqui propomos que o Θ^+ é um heptaquark com a sobreposição de um $\pi+K+N$, porque os canais $I=1/2$ $\pi+K$ e $\pi+N$ são atractivos.

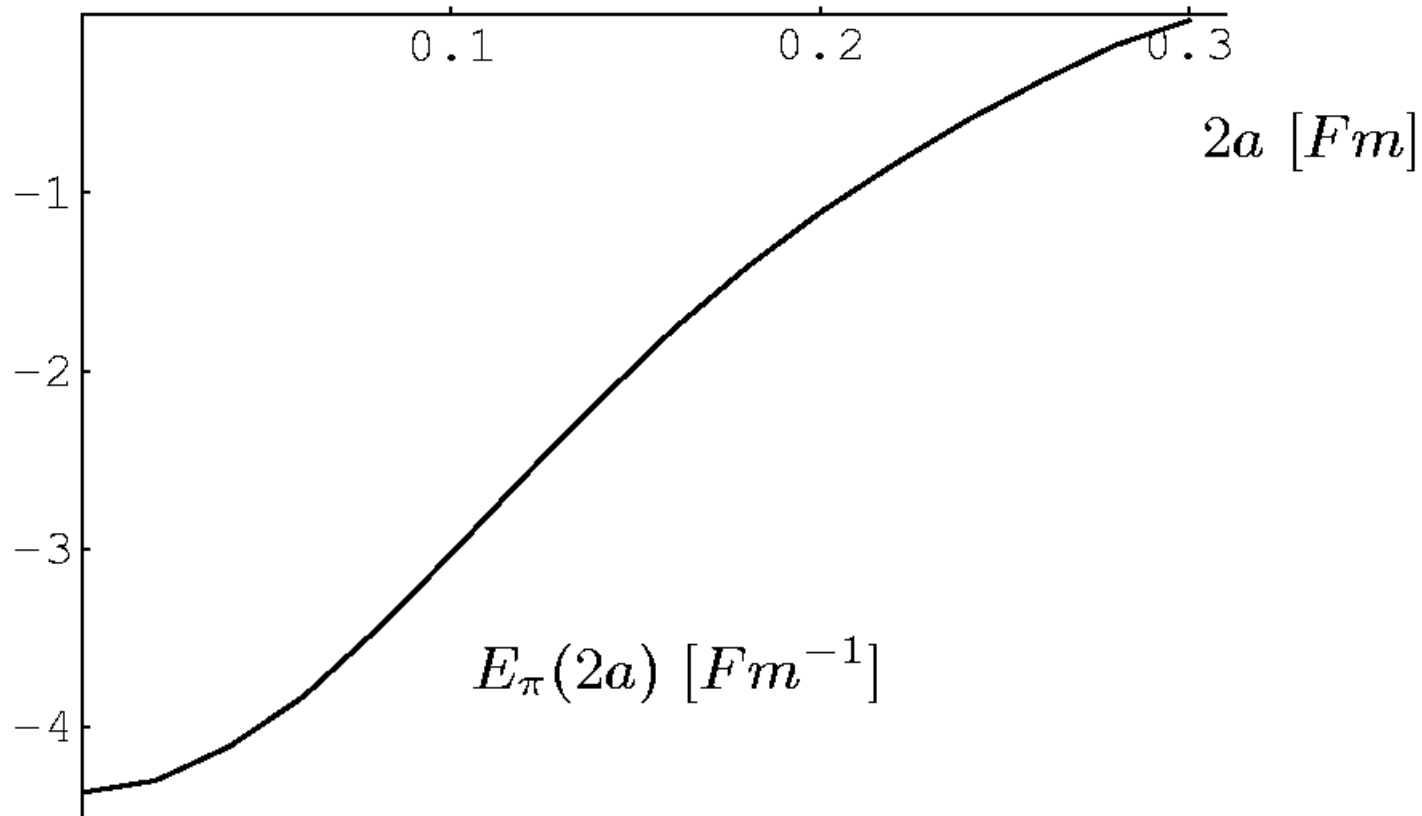


The Theta+ (1540) as a heptaquark with the overlap of a pion, a kaon and a nucleon
P.Bicudo, G. M. Marques Phys. Rev. D69 rapid communication (2004) 011503 , hep-ph/0308073

A configuração favorável no sabor é,



Obtemos para a energia do pião em função da distância K - N.



Verificamos que o pião pode ser ligado por um K e um N, mas mais efeitos têm ainda de ser incluídos para termos a certeza.

O novo pentaquark $dd\bar{s}s\bar{u}$ X_{cc} também pode ser entendido como uma molécula linear



o que naturalmente conduz a uma massa próxima da massa observada experimentalmente de 1860 MeV, correspondente a uma energia de ligação de 60MeV.

A descoberta de mais pentaquarks como o D^*p 3100, ou o estudo da paridade destes pentaquarks irá permitir entender qual é o melhor modelo da actualidade.

Conclusão

Presentemente estão a ser projectadas grandes experiências de uma nova geração, onde os detectores são muito flexíveis e permitem medir um leque muito variado de reacções.

Destacam-se as colaborações **PANDA**, no **GSI em Darmstadt** e **GLUE-EX**, no **Jefferson Lab em Richmond**, que estarão à espreita de exóticos. Recentemente a **HERA-G**, no **DESY em Hamburg** foi proposta para estudar glueballs. O **LHC no CERN em GENÈVE** também terá a oportunidade de medir hadrões exóticos, sejam eles

-
multiquarks $qqqq$, $qqqqq$, $qqqqqq$...

híbridos qqg , $qqqg$

ou glueballs gg , ggg ...

Em paralelo com o projecto e a montagem das experiências, os físicos teóricos são motivados para aprofundar a teoria, de forma a prever o que possa vir a ser observado. O problema mais difícil pode residir na previsão das massas e larguras (constantes de decaimento) das glueballs.

