

ESTUDO DO POTENCIAL NUCLEON-NUCLEON COM MÉTODOS PERTURBATIVOS

BRUNO LOPES DA COSTA¹, CARLOS ANTÔNIO DA ROCHA²

¹ Graduando em Licenciatura em Física, Bolsista PIBIFSP, IFSP, Câmpus São Paulo, brunolopes56@hotmail.com.

² Professor no IFSP, Câmpus São Paulo, rocha.ifsp@gmail.com.

Área de conhecimento (Tabela CNPq): 1.05.03.02-1 Teorias Específicas e Modelos de Interação

Apresentado no
8º Congresso de Inovação, Ciência e Tecnologia do IFSP
06 a 09 de novembro de 2017 - Cubatão-SP, Brasil

RESUMO: Este trabalho foi feito com o objetivo de mostrar a contribuição da troca de um pión (OPEP) para o potencial NN, comparando com alguns modelos da literatura. Consideramos, em primeiro momento, uma aproximação não relativística que desconsidera os termos proporcionais ao quadrado do momento angular e spin-spin, analisando apenas o potencial central e o tensor. Além disso, utilizamos os modelos de funções cut-off de Robilotta e dTS para aproximar o potencial para distâncias muito pequenas fenomenologicamente. Disso, concluímos que, apesar de não explicar o termo atrativo da força nuclear, o OPEP, e principalmente seu termo tensor, é fundamental para a construção de estados ligados, como o dêuteron.

PALAVRAS-CHAVE: Troca de um pión, potencial NN, força nuclear, interação NN.

A STUDY OF NUCLEON-NUCLEON POTENTIAL WITH PERTURBATIVE METHOD

ABSTRACT: This work aims to show the one pion exchange (OPEP) contribution to the NN potential, comparing it to some known models. Firstly, we considered a non-relativistic approximation which does not use the L-square and the spin-spin terms, using only the central and the tensor potential. Furthermore, we used Robilotta's and dTS's cut-off functions to approximate the potential to low distances phenomenologically. Using this, we can conclude that, despite it does not explain the attractive term of the nuclear force, the OPEP, mainly the tensor term, is fundamental to build bound states, such as the deuteron.

KEYWORDS: One pion exchange, NN potential, nuclear force, NN interaction.

INTRODUÇÃO

A Física Nuclear teve seu início com o marco da descoberta do núcleo atômico por Rutherford, em 1911, em seu experimento de bombardear finos filmes de ouro com partículas alfa e medir o ângulo de espalhamento, chegando à conclusão de que o átomo possui um núcleo centenas de vezes menor que sua estrutura e de carga positiva. No início, acreditava-se que esse núcleo era sustentado por forças eletromagnéticas, teoria que logo caiu por terra, pois não era possível que esse tipo de interação fornecesse tamanha energia. Tornava-se necessária, então, a existência de um novo tipo de força que, rapidamente, como diz Higa (2003), tornou-se uma das áreas de estudo mais importantes da física. Heisenberg, então, sugeriu que essa força seria baseada em trocas, e que ela seria de mesma natureza para o próton e o nêutron.

Segundo Rocha (1994), ainda não há uma teoria bem estabelecida que descreva a força nuclear, sendo necessário recorrer a características experimentais e fazer ajustes fenomenológicos. Isso ocorre devido à origem da interação entre os quarks, que dificulta a obtenção de expressões para estados ligados, sendo necessário recorrer às simetrias da teoria.

Este trabalho tem como objetivo analisar o termo de maior alcance e mais bem conhecido teoricamente da força nuclear, que é o correspondente à troca de um pión virtual (OPEP), comparando com modelos conhecidos da literatura. Vale lembrar que há contribuições da troca de mésons mais pesados para distâncias mais curtas, que aparecem nos modelos da troca de dois píons (TPEP) de Rocha (1994) e Higa (2003), e na troca de um bóson no modelo de de Turreil e Sprung (1975), por exemplo.

MATERIAL E MÉTODOS

Este trabalho tem natureza puramente teórica, sendo necessário apenas um computador para trabalhar os dados. Para facilitar os cálculos, quando o sistema de unidades não está indicado, utilizamos tal que $\hbar = c = 1$, sendo \hbar a constante reduzida de Planck e c a velocidade da luz no vácuo, e distâncias em fm. Isso faz com que massa, energia e momento sejam dados em fm^{-1} . Quando necessário converter unidades, utilizamos o valor de $\hbar c = 197,3289 \text{ MeV}\cdot\text{fm}$.

Construímos o potencial a partir do seguinte diagrama de Feynman:

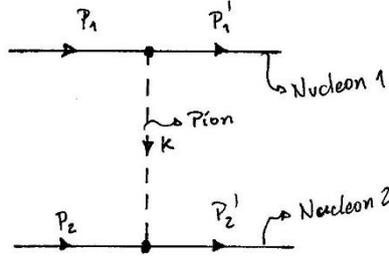


Figura 1 – Diagrama de Feynman do OPEP

Devido à complexidade das Regras de Feynman, sua dedução será realizada posteriormente. Por enquanto, foram utilizadas as expressões dadas por Robilotta (1987). As utilizadas no OPEP são:

- Nucleon chegando: $\eta u(\mathbf{p}) \equiv N$
- Nucleon saindo: $\bar{\eta} \bar{u}(\mathbf{p}) \equiv \bar{N}$
- Propagador do pión: $i(k^2 - \mu^2)^{-1}$
- Vértice pión-nucleon-nucleon: $g \tau_a \not{k} \gamma_5 / 2m$

Em que η e u são os espinores de isospin e spin, k é o quadrimomento do pión, \mathbf{p} é o momento do nucleon, μ é a massa do pión, g é a constante de acoplamento do pión, m é a massa do nucleon, τ_a é a componente do isospin, γ_5 é o produto das matrizes de Dirac (γ), a barra indica o *bra*, que é multiplicado pela componente temporal de γ e a letra cortada indica produto escalar com γ .

Proseguimos com a leitura do diagrama fazendo o produto de cada linha e igualando à amplitude relativística T multiplicada pela identidade imaginária i , resultando na expressão:

$$iT = \left[\bar{N} \left(-\frac{g}{2m} \not{k} \gamma_5 \tau_a \right) N \right]^{(1)} \frac{i}{k^2 - \mu^2} \left[\bar{N} \left(\frac{g}{2m} \not{k} \gamma_5 \tau_a \right) N \right]^{(2)} \quad (1)$$

Em que o índice entre parênteses indica nucleon 1 ou 2. Após isso, trabalhamos esta expressão e obtivemos uma relação utilizando os espinores de Pauli, que são mais simples no referencial do centro de massa do sistema. O próximo passo foi construir uma matriz não-relativística t , aproximando a energia relativística como sendo igual à massa do nucleon e ignorando os termos proporcionais a \mathbf{p}/m . Após isso, construímos o operador potencial a ser aplicado na equação de Schroedinger tal que ele tenha um autovalor igual a essa amplitude. O último passo consiste em fazer uma transformada de Fourier para obter o potencial no espaço de configuração.

Além disso, estudamos as funções *cut-off* utilizadas por Robilotta (1987) e de Tourreil e Sprung (dTS) (1975) que corrigem fenomenologicamente o potencial para distâncias muito curtas, além de utilizar o termo correspondente ao OPEP do potencial de dTS para analisar graficamente.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Inicialmente, obtivemos uma expressão para o potencial NN, ao desconsiderar os termos proporcionais a \mathbf{p}/m com a seguinte forma:

$$\langle \mathbf{r} | \hat{V}_\pi | \mathbf{r} \rangle_{CM} \equiv V_\pi(\mathbf{r}) = \frac{g^2}{4m^2} (\boldsymbol{\tau}^{(1)} \cdot \boldsymbol{\tau}^{(2)}) (\boldsymbol{\sigma}^{(1)} \cdot \nabla) (\boldsymbol{\sigma}^{(2)} \cdot \nabla) \iiint \frac{d^3 \mathbf{k}}{(2\pi)^3} \frac{\exp(-i\mathbf{k}\cdot\mathbf{r})}{k^2 - \mu^2} \quad (2)$$

Que, resolvendo a integral pelo teorema dos resíduos, resulta em:

$$V_\pi(\mathbf{r}) = \frac{1}{3} \left(\frac{g\mu}{2m} \right)^2 \frac{\mu}{4\pi} (\boldsymbol{\tau}^{(1)} \cdot \boldsymbol{\tau}^{(2)}) \{ \boldsymbol{\sigma}^{(1)} \cdot \boldsymbol{\sigma}^{(2)} U(r) + [3\boldsymbol{\sigma}^{(1)} \cdot \hat{\mathbf{r}} \boldsymbol{\sigma}^{(2)} \cdot \hat{\mathbf{r}} - \boldsymbol{\sigma}^{(1)} \cdot \boldsymbol{\sigma}^{(2)}] U_2(r) \} \quad (3)$$

Em que $\sigma^{(i)}$ é a matriz de spin referente ao nucleon i e \mathbf{r} é a coordenada da distância relativa dos dois nucleons interagentes. As funções de Yukawa foram definidas da seguinte forma:

$$U(r) = \frac{\exp(-\mu r)}{\mu r}, \quad U_2(r) = \left(1 + \frac{3}{\mu r} + \frac{3}{(\mu r)^2}\right) U(r) \quad (4)$$

Na equação 3, notamos que o coeficiente de $U_2(r)$ corresponde ao operador tensor, que afeta a função de onda, levando de uma onda S para uma combinação de ondas S e D, enquanto o outro termo corresponde ao potencial central.

Este resultado diverge para distâncias pequenas, sendo necessário implementar funções *cut-off*. Para tal, podemos utilizar uma expressão no espaço dos momentos, como no potencial de Robilotta, ou diretamente no espaço de configuração, como dTS. Para ilustrar isso, utilizamos a Figura 2, que corresponde ao gráfico do termo central do OPEP do potencial de dTS com o *cut-off* aplicado.

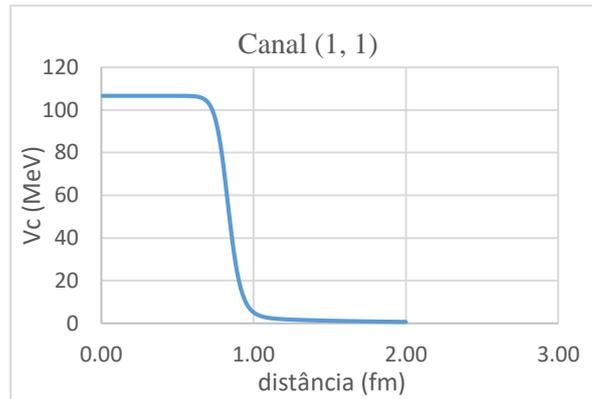


Figura 2 - Contribuição da troca de um pión para o potencial central de dTS no canal (1, 1)

Neste modelo de potencial, o nucleon é tratado como uma barreira finita, e não é formada uma componente de atração para o OPEP, visto que o valor de V_c é sempre positivo.

CONCLUSÕES

Deste trabalho, concluímos que, apesar de, conforme as expressões e gráficos obtidos, o OPEP não formar o poço de potencial que é a componente de atração da força nuclear, pelo menos na aproximação não relativística, é gerado um termo central e um termo tensor, este último sendo responsável pela criação da onda D, que, segundo Robilotta, é fundamental para a criação de alguns estados ligados.

Na segunda parte deste trabalho, faremos uma abordagem mais profunda da teoria quântica de campos para demonstrar e criar expressões mais completas. Além disso, faremos uma aproximação melhor considerando os termos de segunda ordem em p/m , o que, conforme o trabalho de Higa, gerará os termos spin-spin e proporcional ao quadrado do momento angular. Além disso, podemos utilizar softwares como o MATLAB para resolver as equações diferenciais e detalhar melhor o potencial e suas consequências na função de onda.

REFERÊNCIAS

BOAS, M. L. Mathematical Methods in the Physical Sciences. 3ª ed. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2006. 859p. ISBN 0-471-19826-9.

DA ROCHA, C. A. O potencial nucleon-nucleon devido à troca de dois pions: o papel da simetria quiral. 1994. 290p. Tese (Doutorado em ciências) – Universidade de São Paulo, 1994.

DE TOURREIL, R., ROUBEN, B., SPRUNG, D. W. L. Super-soft-core nucleon-nucleon interaction with π -, ρ - and ω -exchange contributions. Nuclear Physics. A242 (1975), p.445-460.

HIGA, R. O potencial nucleon-nucleon e a troca de dois pions relativística. 2003. 191 p. Tese (Doutorado em ciências) – Universidade de São Paulo, 2003.

ROBILOTTA, M. R. Notas de aula – Física Nuclear. Universidade de São Paulo, 1991.

ROBILOTTA, M. R. Processos mesônicos em física nuclear. p. 237-313. Notas de aula da III escola de verão José André Swieca. Petrópolis, 1987.

ROBILOTTA, M. R., COELHO, H. T. Forças Nucleares. Ciência Hoje. v.11, n. 63, 1990, p.22-30.