

## ESTRUTURA HADRÔNICA

HENRIQUE CERON DA SILVEIRA<sup>1</sup>; WERNER KRAMBECK SAUTER<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal de Pelotas – henrique.ceron@gmail.com

<sup>3</sup>Universidade Federal de Pelotas – werner.sauter@gmail.com

### 1. INTRODUÇÃO

A procura pelos constituintes fundamentais da matéria é um dos “Santo Graal” da ciência. Até agora o progresso foi a revelação de sucessivas camadas na subestrutura da matéria.

Os átomos foram estabelecidos, no século XIX, como os constituintes básicos da matéria, com os quais as moléculas eram feitas. Então veio a descoberta do elétron (1897) e do núcleo atômico (1911), o que abriu caminho para a teoria quântica de estrutura dos átomos.

O núcleo atômico é composto por um número variável de prótons e nêutrons, que são mantidos juntos por meio da interação forte (força forte), sendo esta mediada pela troca de mésons. Um entendimento mais claro da interação forte só foi possível com o nascimento da QCD (quantum chromodynamics) em 1973.

Nem todas partículas interagem por meio da interação forte, apenas o **hádrons** sofrem ação desta força. Hádrons são compostos por quarks, e divididos em bárions (hádrons com spin fracionário), como o próton e o nêutron, e mésons (hádrons com spin inteiro), como o pión e o J/Psi.

As grandes ferramentas no estudo da estrutura da matéria são os aceleradores de partículas de altas energias ( $\geq 100 \text{ MeV}^2$ ), onde feixes de partículas são acelerados a velocidades próximas a da luz, e chocados contra alvos fixos, como núcleos massivos, ou contra outro feixe de partículas acelerado em sentido contrário. Na colisão, além de permitir o estudo da estrutura da matéria, novas partículas são detectadas. Destaca-se o LHC (large hádron collider), maior experimento científico do mundo

Neste trabalho estudamos processos de análise da estrutura de hádrons, mais especificamente do próton, de modo que verificamos métodos para visualizar a estrutura interna do núcleo atômico, bem como aprofundar esta visão passando para camadas mais internas, chegando ao próton e aos quarks da sua estrutura.

### 2. METODOLOGIA

Para realização dos estudos dirigidos, foram analisados os artigos do MARTIN A.D. (1995); OSTERMANN (1999); CERN COURIER (2012); e o livro de FRITZSCH (1990).

O espalhamento de um feixe de elétrons de energia  $E$ , acelerado contra um núcleo de massa  $M_n$ , ocorre pela troca de um fóton virtual. No caso de uma colisão elástica, o sistema final pode ser um estado nuclear excitado, ou, se o impacto for muito forte, o sistema podem ser todos os fragmentos do núcleo quebrado. As últimas colisões são chamadas de *profundamente inelásticas*.

Primeiro, para o espalhamento elástico a condição *mass-shell* para um núcleo intacto ao final da colisão é

$$p'n^2 = M_n^2 = (M_n + \nu)^2 - q^2. \quad (1)$$

e então a energia perdida pelo elétron,  $\nu = E - E'$ , é

$$\nu = \frac{Q^2}{2M_n} \quad (2)$$

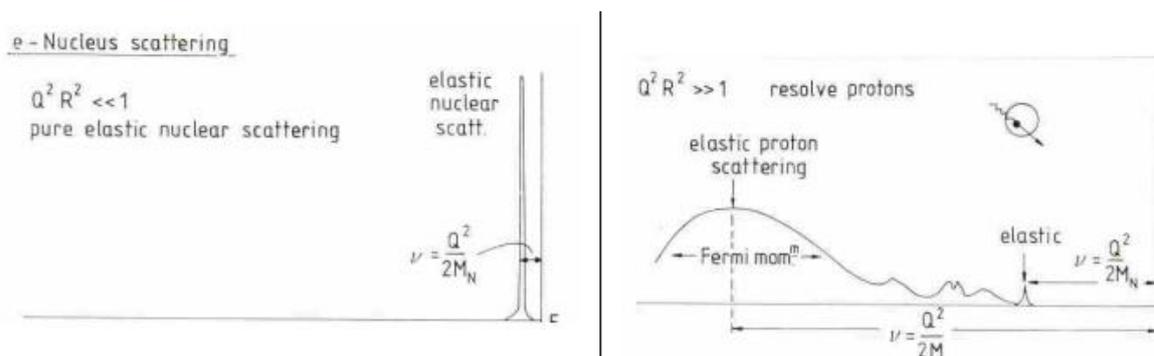
onde  $-Q^2 \equiv q^2 = \nu^2 - q^2$  é o momento quadrático transferido entre o elétron e o núcleo através do fóton virtual. O espalhamento elástico representa uma mínima perda de energia; o espalhamento inelástico sempre usará mais energia do elétron.

Para maiores valores de  $Q^2$ , mais profundamente se pode ver da estrutura do núcleo, como mostrado na sucessão de "sketches" na figura. Quanto maior for a "pancada" no núcleo, menos provável que ele se mantenha intacto. Para altos valores de  $Q^2$ , vemos que o espalhamento ocorre em prótons individuais contidos no núcleo, e o pico deste espalhamento elétron-próton ocorre em  $\nu = Q^2 / 2M$ , (onde  $M$  é a massa do próton), mas com um pico expandido, devido ao momento de Fermi dos prótons ligados no núcleo. O pico ocorre em  $xn \approx M / M_n \approx 1/A$ , onde  $A$  é o número total de prótons e nêutrons no núcleo.

Considerando os prótons sendo formados por 3 quarks, então um espalhamento elétron-próton em alta energia seria simplesmente uma repetição do espalhamento elétron-núcleo, uma camada de subestrutura abaixo. O resultado pode ser expresso em termos da variável de Bjorken

$$x = \frac{Q^2}{2M\nu} \quad (3)$$

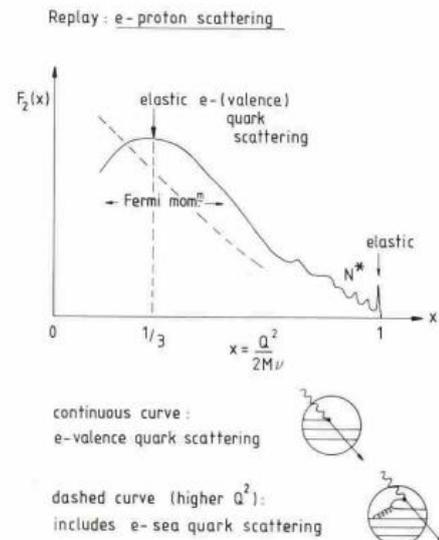
### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO



A figura acima mostra a seção de choque para o espalhamento elétron-núcleo em função da energia  $E'$  do elétron espalhado, para dois valores diferentes de  $Q^2$ . Quanto maior o valor de  $Q^2$ , mais informações sobre o núcleo.

A figura a direita mostra o espalhamento elétron-próton, em função da variável de Bjorken. Os hádrons  $N^*$  podem ser considerados estados excitados do próton.

Nota-se que com o aumento de  $Q^2$ , o próton parece ter mais e mais constituintes, e assim a distribuição inclina cada vez mais para pequenos  $x$ . A curva contínua mostra o espalhamento elástico elétron-quark com pico em  $x \approx 1/3$ , espalhada pelo momento de Fermi para quarks confinados dentro de prótons.



#### 4. CONCLUSÕES

Estudamos os parâmetros necessários e relevantes para um estudo da estrutura de hádrons. Mostramos que quanto maior o momento transferido ( $Q^2$ ) do elétron para o núcleo em um espalhamento, mais camadas sucessivas da subestrutura da matéria são reveladas.

Em trabalhos futuros serão estudadas as funções de estrutura hadrônica, onde pretende-se chegar a detalhes mais ricos a respeito da estrutura do próton, por exemplo.

#### 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

FRITZSCH, H. **Quarks – A matéria-prima deste mundo**. Lisboa: Editora Presença, 1990.

MARTIN, A.D. The structure of the proton. **Contemporary Physics**, v.36, n.5, p. 335-353, 1995

OSTERMANN, F. Um Texto para Professores do Ensino Médio sobre Partículas Elementares. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v.21, n.3, 1999.