
Propriedades Elétricas e Magnéticas de Núcleos **3**

META:

Discutir propriedades elétricas de núcleos.

Discutir spin de núcleo e momento magnético de núcleo.

Introduzir a quantidade de paridade de núcleos.

OBJETIVOS:

Ao fim da aula os alunos deverão ser capazes de:

Determinar a quantidade de quadrupôlo elétrico de núcleo sabendo forma de núcleo.

Determinar paridade de núcleos leves.

PRÉ-REQUISITOS

Os conhecimentos de momentos elétricos e magnéticos de sistemas de partículas da disciplina "Física B", conceito de spin da disciplina "Introdução a Mecânica Quântica".

3.1 Propriedades Elétricas de Núcleos

Discutiremos as propriedades elétricas de núcleos. Supomos que um núcleo esteja localizado em um campo elétrico estacionário externo caracterizado por potencial φ . Energia potencial eletrostática do núcleo neste campo elétrico será definida por prótons do núcleo, que são distribuídos no volume do núcleo. Marcaremos os prótons do núcleo por índice α , que varia de 1 a Z . A posição do próton α é descrita por raio-vetor \vec{r}_α em um referencial. As coordenadas Cartesianas do referencial designaremos como (x_1, x_2, x_3) . Então, energia potencial eletrostática do núcleo neste campo elétrico escreve-se como

$$V = \sum_{\alpha=1}^Z e\varphi(\vec{r}_\alpha) \quad (3.59)$$

Escolhemos a origem do referencial no centro de massa do núcleo. A decomposição da função $\varphi(\vec{r}_\alpha)$ em série de Taylor na vizinhança da origem do referencial escreve-se como

$$\begin{aligned} \varphi(\vec{r}_\alpha) &= \varphi(0) + \sum_{i=1}^3 x_{\alpha_i} \left(\frac{\partial \varphi}{\partial x_i} \right)_0 \\ &+ \frac{1}{2} \sum_{i,k=1}^3 x_{\alpha_i} x_{\alpha_k} \left(\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x_i \partial x_k} \right)_0 + \dots \end{aligned} \quad (3.60)$$

Na fórmula (3.60) índice "0" significa que as derivadas são calculadas na origem $\vec{r} = 0$. Então, a energia potencial eletrostática é apresentada como

$$\begin{aligned} V &= \sum_{\alpha=1}^Z e\varphi(0) + \sum_{\alpha=1}^Z \sum_{i=1}^3 e x_{\alpha_i} \left(\frac{\partial \varphi}{\partial x_i} \right)_0 \\ &+ \frac{1}{2} \sum_{\alpha=1}^Z \sum_{i,j=1}^3 e x_{\alpha_i} x_{\alpha_j} \left(\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x_i \partial x_j} \right)_0 + \dots \end{aligned} \quad (3.61)$$

Consideraremos os primeiros três termos da decomposição (3.61) detalhadamente. O primeiro termo

$$V_1 = \sum_{\alpha=1}^Z e\varphi(0) = Ze \cdot \varphi(0) \quad (3.62)$$

O fator Ze é a carga total do núcleo. Tal que o termo V_1 é energia potencial eletrostática em suposição que a carga total do núcleo esteja localizada no centro de massa do núcleo. O segundo termo

$$V_2 = \sum_{\alpha=1}^Z \sum_{i=1}^3 ex_{\alpha_i} \left(\frac{\partial \varphi}{\partial x_i} \right)_0 = \sum_{\alpha=1}^Z e\vec{r}_{\alpha} \cdot \vec{\nabla} \varphi_0 = \vec{d} \cdot \vec{\nabla} \varphi_0 \quad (3.63)$$

onde $\vec{d} = \sum_{\alpha} e\vec{r}_{\alpha}$ é o dipolo elétrico do núcleo. Para núcleos no estado fundamental (isto é, não excitado) é válida aproximação da simetria de distribuição de carga relativa ao centro de massa. Isto significa que para cada próton em \vec{r} existe um próton em $-\vec{r}$. A somatória por todos os prótons dá

$$\vec{d} = \sum_{\alpha=1}^Z e\vec{r}_{\alpha} = 0 \quad (3.64)$$

Portanto $V_2 = 0$, momento de dipolo elétrico de núcleo é nulo.

Agora consideraremos o terceiro termo

$$\begin{aligned} V_3 &= \frac{e}{2} \sum_{\alpha=1}^Z \sum_{i,k=1}^3 x_{\alpha_i} x_{\alpha_k} \left(\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x_i \partial x_k} \right)_0 \quad (3.65) \\ &= \frac{e}{2} \sum_{i,k=1}^3 \sum_{\alpha=1}^Z x_{\alpha_i} x_{\alpha_k} \left(\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x_i \partial x_k} \right)_0 \end{aligned}$$

Adicionamos a V_3 um termo

$$\frac{e}{2} \sum_{i,k=1}^3 \lambda \delta_{ik} \left(\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x_i \partial x_k} \right)_0 \quad (3.66)$$

onde λ é uma constante arbitrária, δ_{ik} é o símbolo de Kronecker

$$\delta_{ik} = \begin{cases} 1, & i = k \\ 0, & i \neq k \end{cases}$$

A justificativa da validade de adição do termo (3.66) é seguinte.

O termo (3.66) é

$$\sum_{i,k=1}^3 \delta_{ik} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x_i \partial x_k} = \sum_{i=1}^3 \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x_i^2} = \Delta \varphi \quad (3.67)$$

onde Δ é o operador de Laplace. Potencial do campo eléctrico estacionário satisfaz a equação de Laplace

$$\Delta \varphi = 0$$

Portanto o termo (3.66) de fato é nulo. Tal que a constante λ na Eq. (3.66) pode ser escolhida arbitrariamente. Então escrevemos V_3 como

$$\begin{aligned} V_3 = \frac{e}{2} \sum_{\alpha=1}^Z \sum_{i,k=1}^3 x_{\alpha_i} x_{\alpha_k} \left(\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x_i \partial x_k} \right)_0 \\ + \frac{e}{2} \sum_{i,k=1}^3 \lambda \delta_{ik} \left(\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x_i \partial x_k} \right)_0 \end{aligned} \quad (3.68)$$

ou

$$V_3 = \frac{e}{2} \sum_{i,k=1}^3 \left(\sum_{\alpha=1}^Z x_{\alpha_i} x_{\alpha_k} + \lambda \delta_{ik} \right) \left(\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x_i \partial x_k} \right)_0 \quad (3.69)$$

Realizamos a escolha de λ do modo seguinte. Designamos o fator nas parênteses da Eq. (3.69) como

$$\sum_{\alpha=1}^Z x_{\alpha_i} x_{\alpha_k} + \lambda \delta_{ik} = T_{ik} \quad (3.70)$$

onde T_{ik} é um tensor. Exigimos que o traço do T_{ik} seja nulo, isto é

$$\sum_{i=1}^3 T_{ii} = \sum_{i=1}^3 \left(\sum_{\alpha=1}^Z x_{\alpha_i} x_{\alpha_i} + \lambda \delta_{ii} \right) = 0 \quad (3.71)$$

Somatória na Eq. (3.71) implica

$$\sum_{i=1}^3 \left(\sum_{\alpha=1}^Z x_{\alpha_i} x_{\alpha_i} + \lambda \delta_{i,i} \right) = \sum_{\alpha=1}^Z \sum_{i=1}^3 x_{\alpha_i} x_{\alpha_i} + \lambda \sum_{i=1}^3 \delta_{i,i} \quad (3.72)$$

onde

$$\sum_{i=1}^3 x_{\alpha_i} x_{\alpha_i} = \sum_{i=1}^3 x_{\alpha_i}^2 = x_{\alpha_1}^2 + x_{\alpha_2}^2 + x_{\alpha_3}^2 = r_{\alpha}^2 \quad (3.73)$$

r_{α} é distância entre origem e o próton α e

$$\sum_{i=1}^3 \delta_{i,i} = 1 + 1 + 1 = 3$$

Portanto chegamos a condição para definição λ

$$\sum_{\alpha=1}^Z r_{\alpha}^2 + \lambda \cdot 3 = 0 \quad (3.74)$$

de que recebemos

$$\lambda = -\frac{1}{3} \sum_{\alpha=1}^Z r_{\alpha}^2 \quad (3.75)$$

Escolhendo λ dessa forma, escrevemos o termo V_3 como

$$V_3 = \frac{e}{2} \sum_{i,k=1}^3 \left(\sum_{\alpha=1}^Z x_{\alpha_i} x_{\alpha_k} - \frac{1}{3} \sum_{\alpha=1}^Z r_{\alpha}^2 \cdot \delta_{ik} \right) \left(\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x_i \partial x_k} \right)_0 \quad (3.76)$$

$$V_3 = \frac{e}{6} \sum_{i,k=1}^3 \sum_{\alpha=1}^Z (3x_{\alpha_i} x_{\alpha_k} - r_{\alpha}^2 \delta_{ik}) \left(\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x_i \partial x_k} \right)_0 \quad (3.77)$$

Designamos o fator na fórmula (3.77) como

$$\sum_{\alpha=1}^Z (3x_{\alpha_i} x_{\alpha_k} - r_{\alpha}^2 \delta_{ik}) = Q_{ik} \quad (3.78)$$

e recebemos para V_3

$$V_3 = \frac{e}{6} \sum_{i,k=1}^3 Q_{ik} \left(\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x_i \partial x_k} \right)_0 \quad (3.79)$$

A quantidade Q_{ik} é o tensor *do momento de quadrupolo elétrico*. Então o termo V_3 é energia de interação do momento de quadrupolo elétrico de núcleo com campo elétrico externo.

Usando notação de coordenadas usuais $x_1 = x$, $x_2 = y$, $x_3 = z$ escreveremos componentes de Q_{ik}

$$Q_{xx} = \sum_{\alpha=1}^Z (3x_{\alpha}^2 - r_{\alpha}^2) = \sum_{\alpha=1}^Z (2x_{\alpha}^2 - y_{\alpha}^2 - z_{\alpha}^2) \quad (3.80)$$

$$Q_{yy} = \sum_{\alpha=1}^Z (3y_{\alpha}^2 - r_{\alpha}^2) = \sum_{\alpha=1}^Z (2y_{\alpha}^2 - z_{\alpha}^2 - x_{\alpha}^2) \quad (3.81)$$

$$Q_{zz} = \sum_{\alpha=1}^Z (3z_{\alpha}^2 - r_{\alpha}^2) = \sum_{\alpha=1}^Z (2z_{\alpha}^2 - x_{\alpha}^2 - y_{\alpha}^2) \quad (3.82)$$

$$Q_{xy} = Q_{yx} = \sum_{\alpha=1}^Z 3x_{\alpha}y_{\alpha}, \quad Q_{yz} = Q_{zy} = \sum_{\alpha=1}^Z 3y_{\alpha}z_{\alpha} \quad (3.83)$$

$$Q_{xz} = Q_{zx} = \sum_{\alpha=1}^Z 3x_{\alpha}z_{\alpha}$$

O tensor Q_{ik} é simétrico, pois $Q_{ik} = Q_{ki}$. Escolhendo as direções dos eixos do referencial devidamente apropriadas, o tensor Q_{ik} pode ser apresentado na forma diagonal

$$Q_{ik} = \begin{pmatrix} Q_1 & 0 & 0 \\ 0 & Q_2 & 0 \\ 0 & 0 & Q_3 \end{pmatrix} \quad (3.84)$$

Eixo que corresponde ao valor máximo de Q_i refere-se como eixo principal z e designa-se

$$Q = \max \{Q_1, Q_2, Q_3\} = \max \{Q_i\} \quad (3.85)$$

Tal que Q é o momento de quadrupolo eléctrico de núcleo em respeito ao eixo principal z . Essa quantidade é usada para caracterizar o momento de quadrupolo eléctrico de núcleo. Explicitamente da Eq. (3.82) Q é

$$Q = \sum_{\alpha} (3z_{\alpha}^2 - r_{\alpha}^2) \quad (3.86)$$

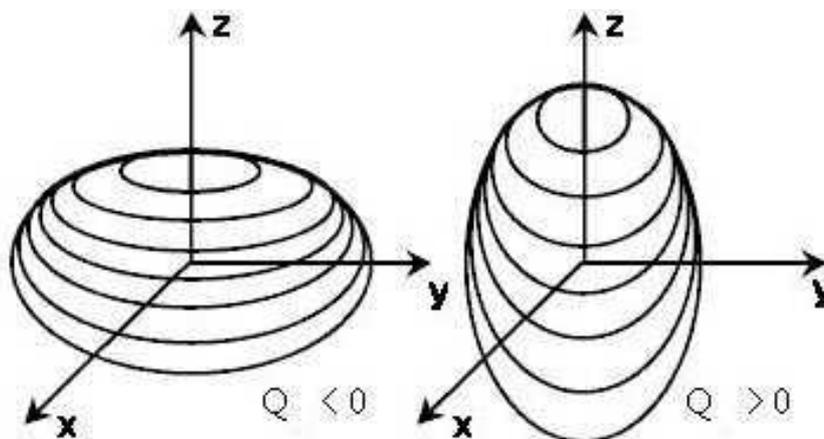


Figura 3.1: Distribuição de carga elétrica de núcleo com $Q > 0$ e $Q < 0$

Vemos que por definição dimensão de Q é $(\text{comprimento})^2$, unidade usada para medir Q é barn.

No caso da simetria esférica $Q = 0$. No caso $Q > 0$ distribuição de carga elétrica de núcleo é alongada por eixo z , no caso $Q < 0$ distribuição de carga elétrica de núcleo é achatada por eixo z , Fig. 3.1. Valores do momento de quadrupolo elétrico para alguns núcleos são apresentados na Tabela 3.1.

Interação do momento de quadrupolo elétrico com gradiente do campo elétrico criado por camada eletrônica do átomo também dá contribuição na estrutura superfina de espectros atômicos.

3.2 Spin e Momento Magnético de Núcleos

Estudos de espectros atômicos mostraram que existe estrutura fina de linhas espectrais. Estrutura fina foi explicada por interação spin-órbita de elétrons no átomo. Estudos de espectros atômicos com precisão mais alta permitiram descobrir desdobramento adi-

| núcleo | Q, 10^{-24} cm ² |
|-------------------------|-------------------------------|
| ${}^2_1\text{He}$ | 0,0027 |
| ${}^{10}_5\text{B}$ | 0,074 |
| ${}^{14}_7\text{N}$ | 0,0071 |
| ${}^{17}_8\text{O}$ | -0,027 |
| ${}^{35}_{17}\text{Cl}$ | -0,084 |
| ${}^{37}_{17}\text{Cl}$ | -0,066 |
| ${}^{235}_{92}\text{U}$ | 4,0 |

Tabela 3.1: Momentos de quadrupolo elétrico de núcleos

cional, mais fina, de linhas espectrais. Esse desdobramento foi chamado estrutura hiperfina de espectro. Diferença entre níveis de energia da estrutura fina ΔE_f e estrutura hiperfina ΔE_{hf} para mesmo átomo é estimada como

$$\Delta E_f \sim \alpha^4 M_e c^2, \quad \Delta E_{sf} \sim \frac{M_e}{M_N} \alpha^4 M_e c^2, \quad \alpha = \frac{e^2}{\hbar c} \approx \frac{1}{137} \quad (3.87)$$

onde m_e - massa de elétron, m_N massa de núcleo, α - constante de estrutura fina. Tal que é válida estimacão

$$\frac{\Delta E_{sf}}{\Delta E_f} \sim \frac{M_e}{M_N} \sim 10^{-3} \quad (3.88)$$

Estrutura hiperfina foi observada por A. A. Michelson ainda em 1881. Mas o efeito foi explicado somente em 1924 quando W. Pauli propôs hipótese de existência de momento magnético próprio de núcleos. Então, estrutura hiperfina foi explicada em termos de interao de momento magmático criado por camada eletrônica de átomo com momento magnético de núcleo deste átomo. Mo-mento magnético próprio de núcleo em seu torno aparece devido a existência de momento angular próprio (spin) de nucleo. Spin de

núcleos é formado como uma composição determinada de spins de núcleons e é quantizado de acordo com regras gerais de Mecânica Quântica. Spin nuclear é designado por I , é medido em termos de \hbar , mesmo como de qualquer sistema quântico, e pode tomar valores inteiros $I = 0, 1, 2, \dots$ ou semi-inteiros $I = 1/2, 3/2, 5/2, \dots$. Momento magnético próprio de núcleo μ é relacionado com spin do núcleo como

$$\mu = g_N I \mu_N \quad (3.89)$$

onde g_N é a razão giromagnética nuclear (tem valor determinado para cada núcleo), μ_N é magneton nuclear

$$\mu_N = \frac{e\hbar}{2M_p c} = 5,05 \cdot 10^{-27} \text{ J/T} = 3,15249 \cdot 10^{-18} \text{ MeV/Gs} \quad (3.90)$$

Magneton nuclear é introduzido na forma analógica de magneton de Bohr μ_B

$$\mu_B = \frac{e\hbar}{2M_e c}$$

onde no lugar de massa de elétron M_e está massa de próton M_p . É óbvia relação entre magneton nuclear e magneton de Bohr

$$\mu_N = \frac{e\hbar}{2M_p c} = \frac{e\hbar}{2M_e c} \frac{M_e}{M_p} = \frac{M_e}{M_p} \mu_B = \frac{1}{1836} \mu_B \quad (3.91)$$

Momento magnético de núcleos pode ser expressa também em termos de magnetons nucleares como

$$\mu = \gamma_N \mu_N \quad (3.92)$$

onde γ_N é um fator que tem valor determinado para cada núcleo. Na tabela (3.2) são apresentados momento magnético e spin de núcleons e alguns núcleos. Os sinais na coluna de valores de momentos magnéticos da tabela têm significado seguinte. Sinal "+" significa que spin e momento magnético de núcleo tem mesmo

sentido, sinal "–" significa que spin e momento magnético tem sentidos opostos.

| núcleo | μ | spin, I | núcleo | μ | spin, I |
|-----------------|--------------|-----------|------------------------|--------------|-----------|
| n | $-1,91\mu_N$ | $1/2$ | $^{10}_5\text{B}$ | $1,8\mu_N$ | 3 |
| p | $2,79\mu_N$ | $1/2$ | $^{12}_6\text{C}$ | 0 | 0 |
| ^2_1H | $0,86\mu_N$ | 1 | $^{13}_6\text{C}$ | $0,7\mu_N$ | $1/2$ |
| ^3_1H | $3\mu_N$ | $1/2$ | $^{14}_7\text{N}$ | $0,04\mu_N$ | 1 |
| ^3_2He | $-2,1\mu_N$ | $1/2$ | $^{15}_7\text{N}$ | $-0,28\mu_N$ | $1/2$ |
| ^4_2He | 0 | 0 | $^{16}_6\text{O}$ | 0 | 0 |
| ^6_3Li | $0,82\mu_N$ | 1 | $^{17}_6\text{O}$ | $-1,9\mu_N$ | $5/2$ |
| ^7_3Li | $3,3\mu_N$ | $3/2$ | $^{115}_{49}\text{In}$ | $5,5\mu_N$ | $9/2$ |
| ^9_4Be | $-1,2\mu_N$ | $3/2$ | $^{208}_{82}\text{Pb}$ | 0 | 0 |

Tabela 3.2: Momento magnético e spin de núcleos

Mencionamos também que anomalias na estrutura hiperfina de espectros atômicos é explicada por interação do momento de quadrupolo elétrico com gradiente do campo elétrico criado por camada eletrônica do átomo.

3.3 Paridade

Discutiremos agora mais uma quantidade que descreve propriedades de núcleos – paridade.

Em geral paridade é propriedade de sistema física em relação a inversão espacial:

$$\vec{r} \rightarrow -\vec{r}$$

Sistema físico quântico descreve-se por função de onda $\psi(\vec{r})$. Es-

tudaremos comportamento da função de onda $\psi(\vec{r})$ sob ação de operação de inversão espacial. Operação de inversão espacial em termos de Mecânica Quântica é expressa como aplicação de operador da inversão \hat{P} na função de onda, $\hat{P}\psi(\vec{r})$. Resultado dessa ação é inversão espacial das coordenadas da função de onda:

$$\hat{P}\psi(\vec{r}) = \psi(-\vec{r}) \quad (3.93)$$

Observamos, que aplicando \hat{P} duas vezes na função de onda recebemos

$$\hat{P}(\hat{P}\psi(\vec{r})) = \hat{P}\psi(-\vec{r}) = \psi(\vec{r}) \quad (3.94)$$

Usando propriedade (3.94), formularemos o problema de autovalores do operador \hat{P} . Buscaremos tais valores p que dão solução da equação

$$\hat{P}\psi(\vec{r}) = p\psi(\vec{r}) \quad (3.95)$$

Aplicando \hat{P} duas vezes recebemos

$$\hat{P}(\hat{P}\psi(\vec{r})) = \hat{P}^2\psi(\vec{r}) = p^2\psi(\vec{r}) \quad (3.96)$$

Comparando Eq. (3.96) com Eq. (3.94) vemos que

$$\psi(\vec{r}) = p^2\psi(\vec{r})$$

que dá $p^2 = 1$. Portanto

$$p = \pm 1 \quad (3.97)$$

Então são realizados dois casos

$$1) \hat{P}\psi(\vec{r}) = +\psi(\vec{r}), \quad 2) \hat{P}\psi(\vec{r}) = -\psi(\vec{r}) \quad (3.98)$$

Isto significa que sob ação de inversão espacial função de onda permanece mesma ou muda sinal. No caso primeiro falamos que

o sistema tem paridade $+1$, no caso segundo falam-se que o sistema tem paridade -1 . Lembrando ainda que $\hat{P}\psi(\vec{r}) = \psi(-\vec{r})$ (Eq. (3.93)), concluímos que no caso da paridade $+1$, a função de onda do sistema é par, e no caso da paridade -1 , a função de onda do sistema é ímpar, pois

$$1) \psi(-\vec{r}) = +\psi(\vec{r}), \quad 2) \psi(-\vec{r}) = -\psi(\vec{r}) \quad (3.99)$$

Paridade de sistema S designa-se por $P(S)$. Núcleo atômico pode se considerar como um sistema quântico. Paridade de núcleo A_ZX designaremos como $P({}^A_ZX)$. Uma aplicação importante de paridade nas reações nucleares é o fato que nas interações eletromagnéticas e fortes paridade de sistema é conservada.

3.3.1 Cálculo de Paridade de Núcleos

Segundo a modelo de camadas, núcleons em núcleo são distribuídos por níveis de acordo a seu estado. Grupos de níveis mais próximos são agrupados em camadas. Prótons e nêutrons são considerados independentemente. Estado de núcleon é determinado por números quânticos n, l, s (ou n, j, s), pois núcleons são considerados em potencial esfericamente simétrico. Neste sentido modelo de camadas de núcleo atômico tem semelhança com estrutura eletrônica de átomos.⁴ Modelo de camadas de núcleo será discutido no próximo Capítulo. Aqui focalizamos somente nos aspectos do modelo que são necessários para determinação de paridade de núcleos. Dizendo resumido, paridade de núcleon em núcleo é determinado por número quântico angular l como $(-1)^l$.

⁴Estrutura eletrônica de átomos é estudada na disciplina "Introdução a Matéria Condensada"

Núcleons (prótons e nêutrons independentemente) são distribuídos por estados de l consequentemente. Para nucleos leves distribuição por estados de l determina-se segundo a tabela (3.3).⁵

| | | | |
|-----------------------------|---|---|----|
| estado | s | p | d |
| valor de l | 0 | 1 | 2 |
| número máximo de partículas | 2 | 6 | 10 |

Tabela 3.3: Estados de l e números máximo de partículas em cada estado

Poe exemplo, núcleo A_ZX contem Z prótons e N nêutrons. Determinamos primeiramente todos l de prótons

$$l_1, l_2, l_3, \dots, l_Z$$

Contribuição de prótons na paridade de núcleo é calculada como

$$P(Zp) = (-1)^{l_1} (-1)^{l_2} (-1)^{l_3} \dots (-1)^{l_Z}$$

Depois na mesma maneira determinamos todos l de nêutrons

$$l_1, l_2, l_3, \dots, l_N$$

Contribuição de nêutrons na paridade de núcleo é calculada como

$$P(Nn) = (-1)^{l_1} (-1)^{l_2} (-1)^{l_3} \dots (-1)^{l_N}$$

Então paridade de núcleo considerado é dado por

$$P({}^A_ZX) = P(Zp) \cdot P(Nn)$$

Para paridade própria de núcleons é aceita regra convencional

$$P(p) = +1, P(n) = +1.$$

⁵No caso de núcleos mais pesados, distribuição por estados de l é determinada por modelo de camadas.

3.3.2 Exemplo

Determinaremos paridade da partícula α , $P(\alpha)$. Partícula α , que é núcleo de hélio ${}^4_2\text{He}$, consiste de 2 prótons e 2 nêutrons. Escrevemos isso simbolicamente como

$$\alpha = {}^4_2\text{He} = 2p + 2n$$

2 prótons estão no estado s , isto é eles número quântico angular deles é $l = 0$. 2 nêutrons também estão no estado s . Portanto

$$\begin{aligned} P(\alpha) &= P(2p + 2n) = P(2p) \cdot P(2n) \\ &= (-1)^0 (-1)^0 \cdot (-1)^0 (-1)^0 = +1 \end{aligned}$$

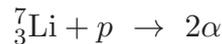
Agora determinaremos paridade de núcleo de lítio ${}^7_3\text{Li}$, que consiste de 3 prótons e 4 nêutrons

$${}^7_3\text{Li} = 3p + 4n$$

2 prótons estão no estado s (com $l = 0$), 1 próton está no estado p (com $l = 1$). 2 nêutrons estão no estado s (com $l = 0$), 2 nêutrons está no estado p (com $l = 1$). Portanto

$$\begin{aligned} P({}^7_3\text{Li}) &= P(3p + 4n) = P(3p) \cdot P(4n) \\ &= (-1)^0 (-1)^0 (-1)^1 \cdot (-1)^0 (-1)^0 (-1)^1 (-1)^1 = -1 \end{aligned}$$

Consideraremos reação



Paridade de sistema inicial (antes da reação) é

$$P({}^7_3\text{Li} + p) = P({}^7_3\text{Li}) \cdot P(p) = -1 \cdot 1 = -1$$

Paridade de sistema final (depois da reação) é

$$P(2\alpha) = P(a) \cdot P(a) = 1 \cdot 1 = 1$$

Então nessa reação paridade não é conservada

$$P(p + {}^7_3\text{Li}) \neq P(2\alpha)$$

portanto essa reação é proibida.

3.4 Conclusão

Nesta aula discutimos propriedades elétricas, spin, momento magnético e paridade de núcleos.



RESUMO

No resumo dessa Aula constam os seguintes tópicos:

Foram discutidas propriedade elétricas de núcleos. Foi demonstrado que momento de dipolo elétrico de núcleos é nulo. Momento de quadrupolo elétrico de núcleos é dado pelo tensor de momento de quadrupolo elétrico Q_{ik} com componentes seguintes

$$Q_{xx} = \sum_{\alpha=1}^Z (3x_{\alpha}^2 - r_{\alpha}^2) = \sum_{\alpha=1}^Z (2x_{\alpha}^2 - y_{\alpha}^2 - z_{\alpha}^2)$$

$$Q_{yy} = \sum_{\alpha=1}^Z (3y_{\alpha}^2 - r_{\alpha}^2) = \sum_{\alpha=1}^Z (2y_{\alpha}^2 - z_{\alpha}^2 - x_{\alpha}^2)$$

$$Q_{zz} = \sum_{\alpha=1}^Z (3z_{\alpha}^2 - r_{\alpha}^2) = \sum_{\alpha=1}^Z (2z_{\alpha}^2 - x_{\alpha}^2 - y_{\alpha}^2)$$

$$Q_{xy} = Q_{yx} = \sum_{\alpha=1}^Z 3x_{\alpha}y_{\alpha}, \quad Q_{yz} = Q_{zy} = \sum_{\alpha=1}^Z 3y_{\alpha}z_{\alpha}$$

$$Q_{xz} = Q_{zx} = \sum_{\alpha=1}^Z 3x_{\alpha}z_{\alpha}$$

onde x_{α} , y_{α} , z_{α} são coordenadas do próton α do núcleo em referencial cujo origem é localizada no centro de massa do núcleo, $r_{\alpha}^2 = x_{\alpha}^2 + y_{\alpha}^2 + z_{\alpha}^2$. Escolhendo as direções dos eixos do referencial devidamente apropriadas, o tensor Q_{ik} pode ser apresentado na forma diagonal

$$Q_{ik} = \begin{pmatrix} Q_1 & 0 & 0 \\ 0 & Q_2 & 0 \\ 0 & 0 & Q_3 \end{pmatrix}$$

Quantidade usada como característica de momento de quadrupolo elétrico de núcleos é Q , que é valor máximo de componentes Q_1 , Q_2 , Q_3

$$Q = \max \{Q_1, Q_2, Q_3\} = \max \{Q_i\}$$

Associando eixo de valor máximo de Q_i com eixo principal z , Q é expresso como

$$Q = \sum_{\alpha} (3z_{\alpha}^2 - r_{\alpha}^2)$$

Unidade usada para Q é barn.

Foi discutida a questão de spin de núcleos. Spin nuclear é designado por I , é medido em termos de \hbar , mesmo como de qualquer sistema quântico, e pode tomar valores inteiros $I = 0, 1, 2, \dots$ ou semi-inteiros $I = 1/2, 3/2, 5/2, \dots$. Momento magnético próprio de núcleo μ é relacionado com spin do núcleo como

$$\mu = g_N I \mu_N$$

onde g_N é a razão giromagnética nuclear (tem valor determinado para cada núcleo), μ_N é magneton nuclear

$$\mu_N = \frac{e\hbar}{2M_p c} = 5,05 \cdot 10^{-27} \text{ J/T} = 3,15249 \cdot 10^{-18} \text{ MeV/Gs}$$

Momento magnético de núcleos pode ser expressa também em termos de magnetons nucleares como

$$\mu = \gamma_N \mu_N \quad (3.100)$$

Momentos magnético de varios núcleos foram apresentados na Tabela.

Foi considerada também outra característica de núcleos – paridade que descreve propriedade do núcleo em respeito a inversão de coordenadas

$$\vec{r} \rightarrow -\vec{r}$$

Sob ação de operador de inversão espacial função de onda que descreve um núcleo não muda ou adquire sinal "–"

$$1) \hat{P}\psi(\vec{r}) = +\psi(\vec{r}), \quad 2) \hat{P}\psi(\vec{r}) = -\psi(\vec{r})$$

No 1ro caso falam-se que núcleo tem paridade $P = +1$, no 2do caso falam-se que núcleo tem paridade $P = -1$. Paridade de núcleo é calculado na maneira seguinte

$$P\left(\frac{A}{Z}\text{X}\right) = P(Zp) \cdot P(Nn)$$

onde

$$P(Zp) = (-1)^{l_1} (-1)^{l_2} (-1)^{l_3} \dots (-1)^{l_Z}$$

com momentos angulares de prótons $l_1, l_2, l_3, \dots, l_Z$, e

$$P(Nn) = (-1)^{l_1} (-1)^{l_2} (-1)^{l_3} \dots (-1)^{l_N}$$

com momentos angulares de nêutrons $l_1, l_2, l_3, \dots, l_N$. Momentos angulares de prótons e nêutrons são determinados por modelo de camadas. No caso de núcleos leves estados de momento angular são dados na Tabela apresentada no Capítulo.

PRÓXIMA AULA

Em próxima aula serão discutidos modelos nucleares.

ATIVIDADES

ATIV. 3.1. Determinar momento de quadrupolo elétrico de núcleo em que prótons são localizados em vértices de paralelepípedo com lados a, a, b . Supor, que centro de massa coincide com centro geométrico do paralelepípedo.

ATIV. 3.2. Provar que momento de quadrupolo elétrico de núcleos esféricos é nulo.

ATIV. 3.3. Determinar paridade do núcleos de ${}^2_1\text{H}, {}^3_1\text{H}, {}^3_2\text{He}, {}^4_2\text{He}, {}^5_2\text{He}, {}^4_3\text{Li}, {}^5_3\text{Li}, {}^6_3\text{Li}, {}^7_3\text{Li}$.

LEITURA COMPLEMENTAR

ALONSO, M., FINN, E. J. - Física. Vol. III. Fundo Educativo Interamericano, 1971.

EISBERG, R., RESNICK, R. - Física Quântica. São Paulo, editora Campus, 1983.

PESSOA, E. F., COUTINHO, F. A., SALA, O. - Introdução à

Física Nuclear. São Paulo, EDUSP, 1978.

CHUNG, K. C. - Introdução à Física Nuclear. Rio de Janeiro, EdUERJ, 2001.

