Mecânica Quântica Aplicada

Professor: Philippe W. Courteille

Átomos Exóticos: Muonio

Celso Donizetti de Souza Filho
NºUSP: 5034272

Átomos Exóticos – Átomos Múonions

1. Introdução

Um átomo exótico é definido como um átomo normal em que uma ou mais partículas sub-atômicas, elétrons ou prótons – por exemplo, foram substituídas por outras partículas de mesma carga. Como estas partículas são instáveis ou interagem com o núcleo, os átomos exóticos não são estáveis, apresentando tempo de meia-vida pequeno. Apesar disso, alguns deles conseguem formar moléculas – as quais também são instáveis.

2. Teoria

2.1. Múons e Léptons

Na teoria atômica da matéria de Dalton (1808), o átomo era considerado a menor parte da matéria, ou seja, uma partícula elementar. Mais tarde, com a descoberta do elétron por Thomson (1897), a teoria de Rutherford e Bohr do átomo nuclear (1913) e a descoberta do nêutron por Chadwick (1932), tornou-se óbvio que os átomos e até mesmo os núcleos eram constituídos por partículas menores.

Durante certo período, acreditou-se que existissem apenas quatro partículas “elementares”: o próton, o nêutron, o elétron e o fóton. Entretanto, no final de 1932, Anderson descobriu o pósitron, ou antielétron, e pouco depois o múon, o píon e muitas outras partículas foram previstas e decobertas.

Todas as diferentes forças observadas na natureza, do simples atrito às forças descomunais associadas as explosões das supernovas, podem ser descritas em termos das quatro interações básicas a que estão sujeitas as partículas elementares. Em ordem decrescente de intensidade temos:

Ordem	Tipo de Força
1	Interação Forte
2	Interação Eletrostática
3	Interação Fraca
4	Interação Gravitacional

Todos os hádrons participam da interação fraca. Além disso, existe outro grupo de partículas que participam das interações fracas, mas não das interação forte – os Léptons.

Os léptons se comportam como partículas pontuais, sem estrutura interna, e podem ser considerados partículas elementares, dado o fato destes não serem compostos por partículas menores. Todos os léptons possuem spin $\frac{\hbar}{2}$, e, portanto, são férmions. Existem três pares de léptons: o elétron, o múon, o táuon e três tipos diferentes de neutrinos associados a essas três partículas. Cada um dos seis léptons possui uma antipartícula e suas massas apresentam uma grande variação – como pode ser visto na tabela a seguir.

Como o múon é sensível apenas à força fraca, eletromagnética e gravitacional, os átomos muonicos são regidos pela interação eletromagnética, onde não existem complicações geradas pela força forte que poderia se dar entre o lépton e o núcleo.

Nome	Carga	Massa (GeV/c²)
Elétron	-1	0,000511
Múon	-1	0,1056
Neutrino do Elétron	0	≈ 0
Neutrino do Múon	0	≈ 0

2.2. O Muonio

O muonio é um átomo exótico, onde um elétron é substituído por um múon. Ele foi descoberto em 1960 e possui com símbolo químico [Mu ou $\mu^{+}e^{-}$]. Seu tempo de vida é da ordem de 2µs, onde neste curto período de tempo, ele pode reagir formando compostos como o Cloreto de Múonio (MuCl) ou o Múonide de Sódio (NaMu).

Pelo fato de um múon ser um lépton, os níveis de energia atômica do muonio podem ser calculados com grande precisão através da eletrodinâmica quântica (quantum eletrodynamics – QED), o que não ocorre com o Hidrogênio, que possui sua precisão limitada pelas incertezas relacionadas com a estrutura interna do próton. Por esta razão, o muonio é considerado um sistema ideal para o estudo de estado ligado QED e também para a busca da física que está além do modelo padrão.

Devido a maior massa do múon em relação ao elétron, as órbitas de Bohr destes átomos são menores e as correções devido a eletrodinâmica quântica são maiores e mais importantes que nos átomos normais.

Embora um muonio tenha uma curta duração, seu estudo é bastante aprofundado pela física-química através de sua utilização em uma forma modificada nos campos de espectroscopia de ressonância de spins de elétrons para análise de transformações químicas e estruturas de compostos com propriedades eletrônicas potencialmente valiosas – esta forma de ressonância de spin eletrônico (eSR) é chamada de spin muon ressonance (µSR).

Existem variações do µSR, como por exemplo, múon spin rotation, que é afetada pela presença de um campo magnético na direção transversal do feixe de múons – desde que os múons sejam produzidos em um estado spin-polarizado de um decaimento de píons, e também a Avoided Level Crossing (ALC), também conhecida como Level Crossing Resonance (LCR), a qual utiliza um campo magnético aplicado longitudinalmente a direção do feixe e monitora o relaxamento dos spins dos múons causados por oscilações magnéticas com outro núcleo magnético.

2.3. Átomos Muonicos Pesados

O múon μ^{-}, algumas vezes chamado de “meson µ” é uma partícula que possui as mesmas propriedades de um elétron, exceto que sua massa é cerca de 207 vezes maior. Em particular, ele não é sensível à interações fortes e seu acoplamento com o núcleo é essencialmente eletromagnético. Um múon μ^{-} que tenha sido desacelerado na matéria pode ser atraído pelo campo coulombiano de um núcleo atômico e pode formar um estado ligado com o núcleo. Este sistema então constitui o chamado Átomo Muonico.

2.3.1. Comparação com o átomo de Hidrogênio

Para estados ligados constituídos por duas partículas de cargas opostas, como por exemplo, o átomo de hidrogênio, os resultados de mecânica quântica relacionados as energias dos estados ligados são as mesmas do modelo de Bohr. De maneira semelhante, a amplitude das funções de onda que descrevem estes estados ligados é da mesma ordem do raio orbital de Bohr. Utilizando um modelo simples, é possível calcular as energias e a amplitude do primeiro estado ligado de um múon em um campo Coulombiano de um átomo pesado tal qual o Chumbo (Z=82, A=207).

Considerando o núcleo como tendo uma massa infinitamente pesada, o enésimo orbital de Bohr tem uma energia igual a: $E_n = -\frac{Z^2me^4}{2\hbar^2}\frac{1}{n^2}$; onde Z é o número atômico do núcleo, $e^2 = \frac{q^2}{4\pi\mathcal{E}_0}$ (sendo q a carga do elétron), e m representa a massa do elétron ou do múon, dependendo do caso. Quando se muda do átomo de hidrogênio para o átomo muonico, E_n é multiplicada por um fator $Z^2\frac{m_\mu}{m_e} = (82)^2x\,(207) = 1{,}4x10^6$.

A partir disso, para o átomo muonico nós temos que: $\begin{cases} E_1 = -19MeV \\ E_2 = -4{,}7MeV \end{cases}$

O raio do enésimo orbital de Bohr é dado por: $r_n = \frac{n^2\hbar^2}{Zme^2}$.

Para o hidrogênio, $r_1 \cong 0{,}5\,A$. Aqui, este número deve ser dividido por $Z\frac{m_\mu}{m_e}$, o que nos dá como resultado: $\begin{cases} r_1 = 3x10^{-13}cm \\ r_2 = 12x10^{-13}cm \end{cases}$.

Nos cálculos anteriores, implicitamente foi assumido que o núcleo era pontual. Os pequenos valores encontrados para r_1 e r_2 mostram que este ponto de vista não é totalmente válido para todos os átomos muonicos pesados. O núcleo do Chumbo, por exemplo, possui um raio ρ_0 não negligenciável, na ordem de $8{,}5x10^{-13}$ cm. O cálculo qualitativo utilizado nos dá a impressão que a intensidade das funções de onda do múon deve ser menor que as do núcleo.

Para o hidrogênio, a intensidade das funções de onda, na ordem de um Angström, é cerca de 10^5 vezes maior que a dimensão do próton, o qual deve ser considerado e tratado como um ponto. Esta nova situação resulta de vários fatores que se reforçam mutuamente: aumentando m e aumentando Z, temos como resultado uma força nuclear mais forte e um raio nuclear maior.

Conseqüentemente, deve-se reconsiderar o problema completamente e primeiro calcular o potencial visto pelo múon no interior, bem como o visto do lado de fora da distribuição de carga nuclear.

2.3.2. O Átomo muonico pesado tratado como um oscilador harmônico

Neste caso, deve ser utilizado um modelo grosseiro do núcleo de chumbo: deve-se assumir sua carga sendo eventualmente distribuida em toda uma esfera de raio $\rho_0 = 8{,}5x10^{-13}cm$.

Quando a distância r do múon ao centro dessa esfera é maior que ρ_0, sua energia potencial é dada por: $V(r) = -\frac{Ze^2}{r}$, para r ≥ ρ_0 .

Para r ≤ ρ_0, pode-se calcular a Força Eletrostática atuando no múon através do Teorema de Gauss, sendo então esta direcionada ao centro da esfera com o valor absoluto igual a: $Ze^2\left(\frac{r}{\rho_0}\right)^3\frac{1}{r^2} = \frac{Ze^2}{{\rho_0}^3}r$.

Essa força é derivada da energia potencial: $V(r) = \frac{1}{2}\frac{Ze^2}{{\rho_0}^3}r^2 + C$, para r ≤ ρ_0.

A constante C é determinada pela condição onde as duas energias potenciais são identicas, ou seja, para o caso onde r = ρ_0.

Neste caso: $C = -\frac{3}{2}\frac{Ze^2}{\rho_0}$.

A figura a seguir representa a energia potencial do múon em função da distância r.

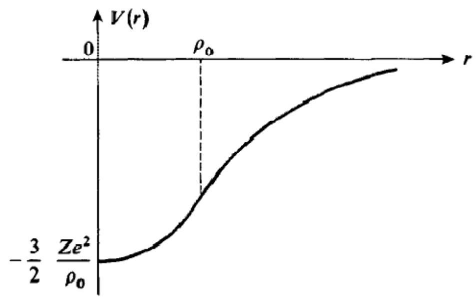

FIGURE 12

Form of the potential $V(r)$ seen by a muon μ^- attracted by a nucleus of radius ρ_0 situated at $r = 0$. When $r < \rho_0$, the variation of the potential is parabolic (if the charge density of the nucleus is uniform); when $r > \rho_0$, $V(r)$ varies like $1/r$ (Coulomb's law).

Dentro do núcleo, o potencial é parabólico. Na realidade não seria realistico encontrar um potencial puramente Coulombiano para o estado fundamental do átomo de chumbo muonico desde que a função de onda esteja efetivamente concentrada na região onde o potencial é parabólico. Além do mais, é preferível considerar o múon como sendo “elasticamente ligado” do que o núcleo neste caso. Considerando então um oscilador em 3-D, pode-se obter como frequencia angular: $w = \sqrt{\frac{Ze^2}{m_\mu \rho_0^3}}$.

Para finalizar, levando na equação da freqüência angular os valores numéricos:

Z = 82	c = $3x10^8$ m/s	$\frac{e^2}{\hbar c} \cong \frac{1}{137}$
$m_\mu = 207\, m_e = 1.86x10^{-28}Kg$	$\hbar \cong 1.05x10^{-34}\, J.s$	$\rho_0 = 8.5x10^{-15}\, m$

obtemos como resultado: $w \cong\ 1.3x10^{22}\, rad.sec^{-1}$, o que corresponde a uma energia igual a: $\boldsymbol{E = \hbar w\ \cong 8.4\ MeV}$.

Comparando com a profundidade total do poço: $\frac{3}{2}\frac{Ze^2}{\rho_0} \cong 21\, MeV$.

Como pode-se notar, a energia calculada é menor que a profundidade do poço, mas não é pequena o suficiente para podermos negligenciar totalmente a parte não-parabólica de V(r).

3. Referências

1) C. Cohen-Tannoudji, B. Diu, F. Laloe, Quantum mechanics, vol. 1, (Wiley Interscience);

2) P. A. Tipler, Física, Vol 1,3ª Edição, LTC,2001;

3) http://www.iupac.org/publications/pac/2001/pdf/7302x0377.pdf - acessado em 19/06/2011;

4) http://en.wikipedia.org/wiki/Muon - acessado em 18/06/2011;