

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Instituto de Física

**Estudo do Espalhamento Elástico  
Entre Núcleos Pesados Leves  
Estáveis e Radioativos**

*Elisangela Aparecida Benjamim*

Tese apresentada ao Instituto de Física  
da Universidade de São Paulo para  
a obtenção do título de Doutor em  
Ciências.

**Comissão Examinadora:**

Prof. Dra. Alinka Lépine-Szily (Orientadora) - IFUSP

Prof. Dr. Antonio Fernando R. de Toledo Piza - IFUSP

Prof. Dr. Dirceu Pereira - IFUSP

Prof. Dr. Bret Vern Carlson - ITA/CTA

Prof. Dr. Roberto Meigikos dos Anjos - UFF

São Paulo

\*2006\*

## SEGUE O TEU DESTINO

Segue o teu destino  
Rega as tuas plantas  
Ama as tuas rosas  
O resto é a sombra  
De árvores alheia

A realidade  
Sempre é mais ou menos  
Do que nós queremos  
Só nós somos sempre  
Iguais a nós próprios

Suave é viver só  
Grande e nobre é sempre  
Viver simplesmente  
Deixa a dor nas aras  
Como ex-voto aos deuses

Vê de longe a vida  
Nunca a interrogues  
Ela nada pode dizer-te  
A resposta  
Está além dos deuses

Mas serenamente  
Imita o Olimpo  
No teu coração  
Os deuses são deuses  
Porque não se pensam

(Ricardo Reis)

Dedico à minha família e aos  
meus amigos que sempre me apoiaram.

## AGRADECIMENTOS

Meus sinceros agradecimentos:

À Prof. Dra. Alinka Lépine-Szily pela orientação competente e sempre presente em todas as fases; e por ter possibilitado o desenvolvimento do meu trabalho no Laboratório Pelletron.

Aos colegas de grupo: Prof. Dr. Rubens Lichtenthäler Filho, Prof. Dr. Valdir Guimarães, Dr. Gilberto F. de Lima, Dr. Juan Alcántara-Núñez, Dra. Marlete M. Assunção, Msc. Pedro N. Faria, Msc. Adriana Barioni, Robson Z. Denke, Kelly C. C. Pires, Djalma R. M. Junior e Orli Camargo, pela grande colaboração na realização dos experimentos.

Aos professores Dr. Luiz C. Chamon, Dr. Rubens Lichtenthäler Filho, Dr. Mahir S. Hussein e ao Dr. Wagner Sciani pela ajuda na análise e discussão dos resultados.

Aos demais professores do Departamento de Física Nuclear, pelo incentivo.

À minha mãe Elza, aos meus irmãos Enanci e Eduardo, ao meu sobrinho José Rafael e minha cunhada Sílvia, que mesmo morando longe sempre acreditaram em mim e estiveram ao meu lado em todos os momentos, me dando a força que muitas vezes me faltou.

À toda minha família, em especial à Tia Ercília, ao Tio Delcideo, à Tia Lourdes, aos meus padrinhos Maricilda e Casturino, aos meus primos Marilza, Sedenilson, Amarildo, Sumara, Rozinaldo, Janete, Tatiana, Wanderson, Ederson, Roziane, Rosana e Clodoaldo, que sempre me apoiaram.

À minha grande amiga Márcia, que agora considero como minha irmã, pois me estendeu a mão em um dos piores momentos da minha vida, e muitas vezes foi meu “anjo” e minha luz quando tudo parecia perdido . . .

Ao meu irmãozinho e grande amigo Luciano(Lu), que desde o início da minha vida acadêmica caminhou comigo, e mesmo longe sempre esteve muito perto.

Às amigas Suene(Su), Diana(Di) e Adriana(Dri), que moraram comigo, e no nosso apartamento sempre encontrei o conforto, carinho e companheirismo de uma verdadeira família.

À todos os meus amigos e colegas, em especial aos amigos Luiz(Lui), Jessica(Je), Julian(Ba), Anne(Annes), Flaviane(Flavis), Karina(KK), Dimas(Deusa), Pedro, Flávia(Fla), Florence(Flo), Karin, Sérgio(Bebeto), Irian(Iri), Patrícia(Paty), Juliana Diniz(Jú), Juliana(Jujuba), Max e Jane, Maria Carolina(Carol), pela amizade e pelo grande apoio nos momentos mais difíceis.

Aos amigos do curso de francês, Marques, Clodine, Wladimir, Damaris, Fernanda e Ligia, pelo companheirismo, incentivo e amizade durante todo o curso.

À todos os amigos que não citei explicitamente, mas que sabem que também foram de grande importância durante esta fase da minha vida.

À todos os funcionários do Departamento de Física Nuclear, que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

À FAPESP pelo apoio financeiro.

Elisangela A. Benjamim

Novembro, 2005.

## ABSTRACT

The angular distributions of the elastic scattering for the  $^{12}\text{C} + ^{28}\text{Si}$  and  $^6\text{He} + ^{27}\text{Al}$  systems have been measured, in energies close to the Coulomb barrier. For the  $^{12}\text{C} + ^{28}\text{Si}$  system the data were obtained at energies  $E_{c.m.} = 12.4 - 25.2\text{MeV}$  and to  $^6\text{He} + ^{27}\text{Al}$  system were measured four energies  $E_{lab} = 9.5, 11, 12$  and  $13.4\text{MeV}$ . The analysis of the angular distributions was performed using an Optical Potential, where the real and imaginary parts of the potential are described through the Non-local Interaction Model called São Paulo Potential.

At energies above  $E_{c.m.} = 16.1\text{MeV}$  the strongly oscillatory angular distributions of the  $^{12}\text{C} + ^{28}\text{Si}$  system were fitted introducing Regge poles in the  $\mathcal{S}$ -matrix. The angular distributions had been reproduced with poles for:  $l_0 = 8$ , between  $16.1$  and  $19.6\text{MeV}$ ;  $l_0 = 10$ , between  $16.8$  and  $22.4\text{MeV}$ ; and  $l_0 = 13$ , between  $20.3$  and  $23.8\text{MeV}$ . For some energies two poles had been introduced in the  $\mathcal{S}$ -matrix. We interpreted the presence of the Regge poles, in an energy region, as quasimolecular states with spin  $J = l_0$ , in the compound system  $^{40}\text{Ca}$ . We determined the existence of states with structure of cluster  $^{12}\text{C} + ^{28}\text{Si}$ , with  $J = 8^+, 10^+$  and  $13^-$ , at energies  $32, 4, 33, 4$  and  $35.2\text{MeV}$  in  $^{40}\text{Ca}$ . These states are in good agreement with theoretical calculations for the hyperdeformed band in  $^{40}\text{Ca}$ .

The results for the  $^6\text{He} + ^{27}\text{Al}$  system were compared with the  $^{6,7}\text{Li}$ ,  $^9\text{Be}$  and  $^{16}\text{O}$  projectiles on  $^{27}\text{Al}$  target. The largest reaction cross section for the weakly bound systems, particularly for the halo  $^6\text{He}$ , shows evidence of the importance of the nuclear break-up for these light systems.

## RESUMO

Foram realizadas medidas das distribuições angulares de espalhamento elástico para os sistemas  $^{12}\text{C} + ^{28}\text{Si}$  e  $^6\text{He} + ^{27}\text{Al}$ , em energias próximas da barreira Coulombiana. Para o sistema  $^{12}\text{C} + ^{28}\text{Si}$  as energias de trabalho estão no intervalo  $E_{c.m.} = 12.4 - 25.2\text{MeV}$  e para o  $^6\text{He} + ^{27}\text{Al}$  foram medidas quatro energias,  $E_{lab} = 9.5, 11, 12$  e  $13.4\text{MeV}$ . As análises foram realizadas dentro do contexto do Modelo Óptico, onde tanto a parte real quanto a imaginária foram descritas por um Modelo de Interação Não-local, chamado de Potencial de São Paulo.

Para as energias acima de  $E_{c.m.} = 16.1\text{MeV}$ , para o sistema  $^{12}\text{C} + ^{28}\text{Si}$ , as distribuições angulares são fortemente oscilantes e foram ajustadas introduzindo-se polos de Regge na expressão da matriz- $\mathcal{S}$ . As distribuições angulares foram reproduzidas com polos de:  $l_0 = 8$ , entre  $16.1$  e  $19.6\text{MeV}$ ;  $l_0 = 10$ , entre  $16.8$  e  $22.4\text{MeV}$ ; e  $l_0 = 13$ , entre  $20.3$  e  $23.8\text{MeV}$ ; sendo que para algumas energias houve a necessidade da introdução de dois polos. Interpretamos a presença dos polos de Regge, numa região de energia, como estados quasimoleculares com spin  $J = l_0$ , no sistema composto  $^{40}\text{Ca}$ . Desta forma, foi previsto a existência de estados com estrutura de cluster  $^{12}\text{C} + ^{28}\text{Si}$ , com  $J = 8^+, 10^+$  e  $13^-$ , nas energias  $32.4, 33.4$  e  $35.2\text{MeV}$  no  $^{40}\text{Ca}$ . Estes estados concordam bem com previsões teóricas para a banda hiperdeformada no  $^{40}\text{Ca}$ .

Os resultados para o  $^6\text{He} + ^{27}\text{Al}$  foram comparados com os sistemas:  $^{6,7}\text{Li}$ ,  $^9\text{Be}$  e  $^{16}\text{O}$ , sobre alvo de  $^{27}\text{Al}$ , e foi observado que a seção de choque de reação é maior para os sistemas fracamente ligados, particularmente para o núcleo halo  $^6\text{He}$ , o que nos mostra a evidência da importância da quebra nuclear para estes sistemas leves.

# Sumário

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Aspectos Teóricos</b>	<b>5</b>
2.1	Modelo Óptico . . . . .	7
2.1.1	Aspectos gerais . . . . .	7
2.1.2	Potenciais fenomenológicos . . . . .	10
2.2	Modelo de Convolução . . . . .	13
2.2.1	Aspectos gerais da Teoria de Reação de Feshbach . . . . .	13
2.2.2	Modelo de potencial de convolução local . . . . .	15
2.2.3	Interação efetiva nucleon-nucleon independente da densidade . . . . .	17
2.2.4	Interação efetiva nucleon-nucleon dependente da densidade . . . . .	19
2.3	Modelo de Interação Nuclear Não-local . . . . .	23
2.3.1	Aspectos gerais . . . . .	23
2.3.2	Densidades nucleares . . . . .	34
2.4	Parametrização do tipo Pólo de Regge . . . . .	37
2.4.1	Aspectos gerais . . . . .	37
<b>I</b>	<b>ESPALHAMENTO ELÁSTICO <math>^{12}C + ^{28}Si</math></b>	<b>38</b>
<b>3</b>	<b>Arranjo Experimental</b>	<b>39</b>
3.1	Fonte de Íons . . . . .	39
3.2	Linha de Feixe do Acelerador Pelletron . . . . .	40
3.3	Câmara de Espalhamento e Sistema de Detecção . . . . .	43
3.4	Alvos . . . . .	47
3.5	Eletrônica e Processamento de Sinais . . . . .	48
3.6	Sistema de Aquisição de Dados . . . . .	51
<b>4</b>	<b>Análise dos Dados Experimentais</b>	<b>53</b>
4.1	Análise dos Espectros . . . . .	53
4.2	Cálculo da Seção de Choque Experimental . . . . .	55



4.3	Resultados Experimentais . . . . .	62
<b>5</b>	<b>Ajustes dos Dados para o Sistema <math>^{12}\text{C} + ^{28}\text{Si}</math></b>	<b>71</b>
5.1	Discussão dos resultados . . . . .	83
5.1.1	$^{12}\text{C} + ^{28}\text{Si}$ . . . . .	83
5.1.2	$^{12}\text{C} + ^{24}\text{Mg}$ . . . . .	92
5.2	Conclusão . . . . .	93
<b>II</b>	<b>ESPALHAMENTO ELÁSTICO <math>^6\text{He} + ^{27}\text{Al}</math></b>	<b>96</b>
<b>6</b>	<b>A Experiência Utilizando Feixes Radioativos Produzidos pelo Sistema RIBRAS (<i>Radioactive Ion Beams in Brasil</i>)</b>	<b>97</b>
6.1	O Sistema de Duplo Solenóides - RIBRAS . . . . .	98
6.1.1	Feixes de Núcleos Exóticos . . . . .	103
6.1.2	Processo de Seleção e Separação do Feixe Secundário . . . . .	105
6.2	Montagem Experimental . . . . .	107
6.2.1	Alvos . . . . .	107
6.2.2	Câmara de Espalhamento e Sistema de Detecção . . . . .	109
6.2.3	Resultados Experimentais . . . . .	112
<b>7</b>	<b>Análise dos Resultados Experimentais obtidos com o RIBRAS</b>	<b>113</b>
7.1	Determinação da Energia do Feixe Secundário de $^6\text{He}$ . . . . .	113
7.2	Cálculo da Seção de Choque Experimental . . . . .	116
7.3	Determinação do Número de Partículas Incidentes do Feixe Secundário de $^6\text{He}$ . . . . .	117
7.4	Correção no Ângulo Médio de Detecção . . . . .	119
<b>8</b>	<b>Distribuições Angulares para o Sistema <math>^6\text{He} + ^{27}\text{Al}</math></b>	<b>123</b>
8.1	Ajustes das Distribuições Angulares . . . . .	124
8.2	Análise e Discussão dos Resultados . . . . .	130
8.2.1	Sistemas Reduzidos . . . . .	136
8.3	Conclusão . . . . .	143
<b>A</b>	<b>Convolução no espaço dos momentos</b>	<b>144</b>
<b>B</b>	<b>Minimização Multidimensional Contínua Utilizando Técnicas de <i>Annealing</i></b>	<b>146</b>

# Capítulo 1

## Introdução

O espalhamento elástico é considerado um processo básico porque acompanha qualquer tipo de reação, e seu pleno conhecimento é um pré-requisito para uma descrição válida de qualquer processo inelástico (como por exemplo transferência). Assim, para o estudo de qualquer reação o entendimento do espalhamento elástico é essencial, pois este fornece importantes informações sobre as propriedades nucleares. Estas informações são obtidas através do estudo do potencial de interação nuclear, o qual reproduz as medidas experimentais da seção de choque para o espalhamento elástico.

O estudo do espalhamento elástico, mesmo este sendo considerado um processo básico, não é simples, devido a complexidade da descrição do problema de muitos corpos com muitos graus de liberdade. Existe uma grande dificuldade de uma descrição explícita sobre o que realmente ocorre durante a interação (excitação, distorção da forma do núcleo, etc), que implica em uma perda de fluxo do canal elástico para canais inelásticos, especialmente na região fisicamente interessante próxima e acima da barreira Coulombiana. Em particular, no modelo óptico o potencial de interação nuclear entre duas partículas, separadas por uma distância  $r$  (entre os centros de massa dos núcleos interagentes), é descrito por uma parte real e por uma parte imaginária, onde a parte imaginária está relacionada com a perda de fluxo do canal elástico (absorção). Existem alguns cálculos para se determinar a parte imaginária[Ma-86,Br-91,Fe-92], mas na prática o potencial imaginário é usualmente tratado fenomenologicamente, como por exemplo, assumindo formas como de Woods-Saxon[Wo-54] e escolhendo os parâmetros que melhor ajustam os resultados experimentais.

Nas últimas décadas ocorreram significantes avanços acerca do entendimento das bases teóricas das propriedades gerais e microscópicas do potencial óptico para o espalhamento nucleon-núcleo[Ca-95,Ma-93] e também acerca do entendimento do espa-

## Gracias por visitar este Libro Electrónico

Puedes leer la versión completa de este libro electrónico en diferentes formatos:

- HTML(Gratis / Disponible a todos los usuarios)
- PDF / TXT(Disponible a miembros V.I.P. Los miembros con una membresía básica pueden acceder hasta 5 libros electrónicos en formato PDF/TXT durante el mes.)
- Epub y Mobipocket (Exclusivos para miembros V.I.P.)

Para descargar este libro completo, tan solo seleccione el formato deseado, abajo:

