Mecânica Quântica e os núcleos mágicos

O professor Tiago explica que:

“Em Mecânica Quântica, um hádron é uma partícula subatômica composta formada por um conjunto de quarks unidos pela interação nuclear forte, que é mediada por glúons. Os hádrons dividem-se principalmente em bárions, que são formados por três quarks, como prótons e nêutrons, e mésons, que são formados por um par quark e antiquark, como os píons. Há também hádrons mais exóticos, que fogem do padrão tradicional da matéria estável, como tetraquarks e pentaquarks. No caso de bárions como prótons e nêutrons de um núcleo atômico, podemos modelá-los organizados em camadas ou níveis energéticos. Quando uma dessas camadas fica completamente preenchida, o núcleo atinge uma estabilidade extraordinária, e o número de hádrons necessário para isso é chamado de número mágico. Esses números são exatamente 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126 ou 184. Em Física Nuclear, chamamos núcleos que possuem números mágicos de prótons ou nêutrons, núcleos mágicos.”

“Quando um núcleo possui, concomitantemente, um número mágico tanto de prótons quanto de nêutrons, dizemos que é duplamente mágico, e isso o confere uma estabilidade incomparável. O objeto de investigação da nossa pesquisa foi, exatamente, núcleos duplamente mágicos. É o caso do núcleo do Chumbo-208 (208Pb), que conta com 82 prótons e 126 nêutrons. Devido a essa configuração perfeitamente preenchida, núcleos duplamente mágicos são considerados os blocos de construção mais rígidos e estáveis da matéria subatômica conhecida, funcionando como referências fundamentais para testar qualquer teoria nuclear moderna.”

O professor destaca que compreender como essas partículas interagem e se excitam em canais de troca de carga é fundamental não apenas para a física teórica, mas também para modelos astrofísicos que investigam a evolução e a origem dos elementos pesados no universo, o que, ainda hoje, permanece como uma das questões fundamentais não totalmente respondidas na ciência

O núcleo 208Pb e a ressonância de Gamow-Teller

A publicação, que contou com um trio de físicos nucleares brasileiros, ganha ainda mais relevância diante de acontecimentos recentes na física internacional. Em fevereiro de 2025, um estudo experimental publicado na prestigiada Physical Review Letters, reproduzido pelo renomado portal científico Phys.org, surpreendeu a comunidade científica ao desafiar resultados da teoria nuclear que previam que o núcleo 208Pb seria perfeitamente esférico. Ao mapear suas propriedades em experimentos de altíssima precisão, os cientistas descobriram deformações inesperadas na sua estrutura, caracterizando-o como esferóide prolato, o que geometricamente o assemelha à uma bola de rugby e não a uma esfera como era esperado. Essa observação experimental demonstrou que os modelos teóricos atuais ainda enfrentam um quebra-cabeça para reproduzir fielmente esses estados deformados e coletivos.

É nessa fronteira do conhecimento que o trabalho publicado pelo professor Tiago, em colaboração, se insere. Enquanto os experimentos revelam novas e misteriosas facetas dos núcleos atômicos, como o formato inesperado do 208Pb, ferramentas teórico-computacionais robustas são necessárias para esmiuçar as interações subatômicas por trás desses fenômenos. O código publicado pelo grupo de pesquisadores é capaz de calcular diversos observáveis quânticos, como estados excitados envolvendo transições hadrônicas (prótons e nêutrons) no núcleo, energias de excitação, amplitudes de transição, distribuições para o Estado Análogo Isobárico (IAS 0+), para a ressonância de Gamow-Teller (GTR 1+), além de soluções para a Aproximação Tamm-Dancoff Relativística, um método quântico avançado que integra, na interação residual, mésons e termos de contato Landau-Migdal, combinando a Teoria da Relatividade com o truncamento de espaço de excitação de partícula-buraco em sistemas de muitos corpos.

Hadrodinâmica Quântica e o código RRPA

“Para descrever o interior do núcleo atômico, utilizamos o formalismo da Hadrodinâmica Quântica (Quantum Hadrodynamics - QHD), uma teoria quântica de campos relativística efetiva onde prótons e nêutrons são descritos como férmions de Dirac que interagem fortemente por meio da troca de mésons. O desafio matemático se deu, principalmente, porque o problema, que tem natureza quântica, exige um tratamento totalmente relativístico. Isso exigiu durante alguns anos, a modelagem e a resolução das equações da Aproximação de Fase Aleatória Relativística (RRPA) com base no formalismo de Rowe, que é uma abordagem teórica em mecânica quântica e física nuclear que generaliza matrizes de densidade e utiliza operadores de dupla comutação para descrever excitações coletivas e reações em sistemas de muitos corpos. Na prática, isso significa construir e diagonalizar matrizes matemáticas gigantescas que representam as interações residuais nucleares, incluindo as contribuições dos mésons pi, rho e ômega. Trata-se de um desafio científico que ultrapassa a capacidade de resolução analítica convencional, exigindo o limite do cálculo numérico e do poder computacional moderno.”

Para transpor esse obstáculo, o grupo apresentou o programa computacional RRPA em linguagem Fortran 77, uma das linguagens, embora antiga, mais utilizadas na Física Nuclear em ambientes computacionais de alto desempenho. O software implementa algoritmos avançados, como a redução de Householder e o algoritmo QL de forma totalmente autoconsistente. Ele permite que computadores processem com alta precisão e eficiência as energias de excitação e as probabilidades de transição que ocorrem no cerne da matéria.

“O código demonstrou grande estabilidade e precisão, sendo capaz de reproduzir dados experimentais de ressonâncias nucleares fundamentais, como a ressonância de Gamow-Teller, que é uma excitação nuclear coletiva do tipo spin-isospin em que nêutrons são transmutados em prótons e vice-versa. Além disso, o programa foi disponibilizado sob licença de código aberto (GPLv3), o que significa que o software está, agora, disponível para que cientistas de qualquer lugar do mundo possam utilizá-lo para aprimorar as previsões teóricas em Física Nuclear e Astrofísica Nuclear.”