

1. O que é um tokamak e qual o seu papel na pesquisa de fusão nuclear?

Um tokamak é um dispositivo toroidal (em forma de câmara de pneu) que utiliza campos magnéticos intensos para confinar plasma, um gás extremamente quente e ionizado. O objetivo principal da pesquisa em fusão nuclear, utilizando tokamaks como o TCABR, é reproduzir na Terra as reações que ocorrem no interior das estrelas, visando desenvolver uma fonte de energia limpa, segura e praticamente inesgotável. O TCABR, apesar de seu porte reduzido, é valioso para desenvolver e validar tecnologias para fusão, estudar o comportamento do plasma em condições relevantes para a borda de tokamaks maiores e para formular leis de escala.

2. Por que é importante estudar a rotação do plasma em tokamaks como o TCABR?

A rotação do plasma, tanto na direção poloidal quanto toroidal, desempenha um papel crucial na física de plasmas de tokamak. A compreensão dos mecanismos físicos por trás da rotação espontânea (intrínseca) é fundamental para melhorar o confinamento magnético do plasma, suprimir turbulências e instabilidades magnetohidrodinâmicas (MHD), e alcançar as condições necessárias para a ignição da fusão nuclear controlada. O estudo da rotação no TCABR contribui para a formulação e validação de modelos teóricos que podem ser extrapolados para dispositivos de maior porte, como futuros reatores de fusão.

3. O que é o ajuste de curvas a dados experimentais e por que ele é utilizado na análise de dados de plasma?

O ajuste de curvas (ou *curve fitting*) é o processo de encontrar uma função matemática que melhor represente a tendência subjacente em um conjunto de dados experimentais ruidosos. No contexto da análise de dados de plasma, como medições de velocidade ou temperatura em diferentes posições radiais, o ajuste de curvas permite extrair o "sinal" físico do "ruído" experimental. Ele resume grandes conjuntos de dados em formas compactas (os parâmetros da função), permite interpolar valores não medidos, e transforma dados discretos em representações contínuas que podem ser manipuladas matematicamente e comparadas com modelos teóricos. O Método dos Mínimos Quadrados é comumente usado para encontrar o "melhor" ajuste, minimizando a soma dos quadrados das diferenças entre os dados e a curva ajustada (os resíduos).

4. Qual a diferença entre o ajuste polinomial e o ajuste não-linear com base física, e quando cada um é apropriado?

O ajuste polinomial utiliza polinômios (funções da forma $ax^n + bx^{n-1} + \dots + z$) como modelos empíricos, especialmente quando a forma funcional exata da relação física subjacente é desconhecida ou muito complexa. A flexibilidade dos polinômios permite que se adaptem a diversas formas de perfis. O ajuste não-linear com base física, por outro lado, utiliza funções com formas matemáticas inspiradas em observações e modelos teóricos, onde os parâmetros do modelo têm interpretações

físicas diretas. O ajuste polinomial é apropriado para obter uma representação suave dos dados sem assumir uma forma funcional específica, enquanto o ajuste não-linear é preferível quando se tem conhecimento prévio ou uma hipótese teórica sobre a forma esperada dos dados, pois os parâmetros ajustados podem fornecer *insights* sobre os processos físicos subjacentes.

5. O que é o modelo de Helander e qual a sua hipótese central sobre a rotação intrínseca em tokamaks?

O modelo de Helander é um modelo teórico que propõe um mecanismo para explicar a rotação toroidal intrínseca observada em plasmas de tokamak, ou seja, a rotação que ocorre mesmo na ausência de fontes externas de momento angular. A hipótese central do modelo é que, sob certas condições, a velocidade de rotação toroidal (V_ϕ) é impulsionada pelo gradiente radial da temperatura dos íons (dT_i/dr). A ideia é que a variação espacial da temperatura iônica pode gerar um fluxo de momento toroidal líquido devido à geometria toroidal e às colisões no plasma. A fórmula simplificada do modelo relaciona V_ϕ diretamente a dT_i/dr , ao campo magnético poloidal (B_{pol}) e à razão de aspecto inversa do tokamak (ϵ).

6. Como o gradiente de temperatura iônica (dT_i/dr) é obtido a partir dos dados experimentais e como ele é utilizado no modelo de Helander para prever a velocidade toroidal?

O gradiente de temperatura iônica (dT_i/dr) é calculado analiticamente a partir da função canônica não-linear que foi ajustada aos dados experimentais de temperatura iônica. Uma vez que a função de temperatura $T_i(r)$ é conhecida (com os parâmetros ajustados $T_{i,max}$, $T_{i,min}$ e n), sua derivada em relação ao raio r pode ser calculada utilizando as regras do cálculo diferencial, resultando em uma expressão analítica para dT_i/dr . Este perfil de gradiente de temperatura, juntamente com o perfil do campo magnético poloidal $B_{pol}(r)$ (que depende da corrente do plasma e da geometria do tokamak) e a razão de aspecto inversa ϵ , é então inserido na fórmula do modelo de Helander para calcular o perfil radial da velocidade de rotação toroidal prevista pelo modelo, $V_{\phi,Helander}(r)$.

7. Quais métricas são utilizadas para avaliar a qualidade dos ajustes de curva e para comparar a previsão do modelo de Helander com os dados experimentais de velocidade?

Diversas métricas são utilizadas para avaliar a qualidade dos ajustes de curva. O Coeficiente de Determinação (R^2) mede a proporção da variabilidade total nos dados que é explicada pelo modelo, variando de 0 a 1. A Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE) fornece uma medida absoluta da magnitude típica do erro de previsão do modelo, nas mesmas unidades da variável dependente. Para comparar a previsão do modelo de Helander com os dados experimentais de velocidade, calcula-se um R^2

entre a previsão de Helander e os dados experimentais. Adicionalmente, a "**razão de aderência**" é utilizada para avaliar a porcentagem de pontos da curva de Helander que caem dentro do intervalo de confiança do ajuste polinomial da velocidade experimental.

8. O que é a análise de sensibilidade via Monte Carlo e como ela ajuda a entender o impacto da incerteza experimental nas conclusões sobre o modelo de Helander?

A análise de sensibilidade via Monte Carlo é uma técnica computacional utilizada para avaliar como as incertezas nas entradas de um modelo (neste caso, as medições experimentais de temperatura) se propagam para a saída do modelo (a previsão da velocidade de Helander). Ela envolve a geração de múltiplas realizações aleatórias dos dados de entrada, perturbando-os dentro de suas barras de erro experimentais. Para cada realização, o modelo (ajuste da temperatura e cálculo da velocidade de Helander) é re-executado. Ao analisar a distribuição dos resultados (parâmetros ajustados e previsões de velocidade), é possível quantificar a sensibilidade das conclusões às incertezas nos dados originais e determinar a plausibilidade de obter uma melhor concordância entre o modelo e os dados experimentais considerando essas incertezas.