

Evolução de espectros de ondas eletrostáticas e eletromagnéticas em plasmas não térmicos investigada com uso da teoria de turbulência fraca

O trabalho de tese de Larissa Teixeira Petruzzellis, realizado sob orientação do Prof. Luiz Fernando Ziebell, do Programa de Pós-Graduação em Física da UFRGS (PPGFIS), envolveu uma análise teórica e numérica de fenômenos que podem ocorrer em plasmas espaciais, fazendo uso de uma abordagem matemática conhecida como *teoria de turbulência fraca*.

A motivação para o estudo provém de observações relacionadas a emissões solares. De fato, vários tipos de fenômenos de emissão de rádio provenientes do Sol e de seu entorno vem sendo estudados e classificados, desde os anos 1950. Entre esses fenômenos se destacam aqueles conhecidos como “emissões de rádio do tipo II” e “emissões de rádio do tipo III” (em inglês, *type II solar bursts* e *type III solar bursts*). Já desde o início da observação desses fenômenos vem sendo sugerido que eles poderiam ser causados por fluxos de elétrons rápidos escapando de regiões ativas do Sol. Em particular, em 1958 Ginzburg e Zheleznyakov propuseram um modelo para as emissões do tipo III que era baseado na ocorrência desses feixes de elétrons. O modelo sofreu modificações ao longo do tempo, mas essencialmente se tornou o paradigma para explicar as emissões, envolvendo a aceleração de feixes de elétrons nas regiões ativas do Sol durante explosões solares conhecidas como *flares*. De acordo com o modelo, os feixes de elétrons se propagam ao longo das linhas do campo magnético solar, e em sua passagem através do plasma presente na região excitam oscilações conhecidas como *ondas de Langmuir* (L). Essas ondas sofrem interações não lineares, envolvendo ondas de baixa frequência conhecidas como ondas íon-acústicas (S), resultando em ondas de Langmuir contrapropagantes e também em emissão de ondas eletromagnéticas (T) na frequência de plasma e em seus harmônicos, que viriam a constituir as emissões solares observadas à distância.

Mesmo estando o paradigma já está bem estabelecido na comunidade científica, faltava até recentemente uma demonstração formal de sua ocorrência, feita com uso de uma teoria derivada a partir de princípios básicos de eletromagnetismo e física de plasmas. Em 2014, um trabalho produzido por pesquisadores do PPGFIS e colaboradores estrangeiros realizou pela primeira vez uma análise numérica completa, com uso da teoria de turbulência fraca, demonstrando a ocorrência das emissões eletromagnéticas decorrentes de processos não lineares, no contexto da instabilidade gerada por um feixe de elétrons em um plasma.

No trabalho de tese de Larissa Petruzzellis o tema foi retomado, culminando com análises numéricas realizadas considerando diferentes conjuntos de parâmetros. Ao longo do estudo, foi feita uma discussão detalhada dos efeitos de diferentes mecanismos de interação não linear que podem ocorrer associados ao fenômeno feixe-plasma. Os resultados obtidos são importantes, porque tal discussão em separado pode ser feita no âmbito de uma teoria como a teoria de turbulência fraca, mas não pode ser feita em simulações numéricas do tipo *particle-in-cell* (PIC), nem na observação direta dos fenômenos na natureza. A figura abaixo mostra alguns resultados obtidos, com as curvas em vermelho representando o espectro de emissão completo e as curvas em azul representando espectros obtidos com a consideração em separado de diferentes mecanismos físicos. O estudo foi feito inicialmente considerando a presença de apenas um feixe de elétrons, mas foi também estendido para considerar a ocorrência de feixes contrapropagantes, que podem existir no ambiente da coroa solar. Posteriormente, também foi explorada a possibilidade de ocorrência de distribuições de velocidade das partículas do plasma ambiente que estejam fora do equilíbrio termodinâmico, uma vez que tal tipo de distribuições tem sido observado por satélites

viajando através do *vento solar*. Os resultados indicados indicam que as emissões de radiação T não são significativamente modificados pela presença dessas distribuições não térmicas.

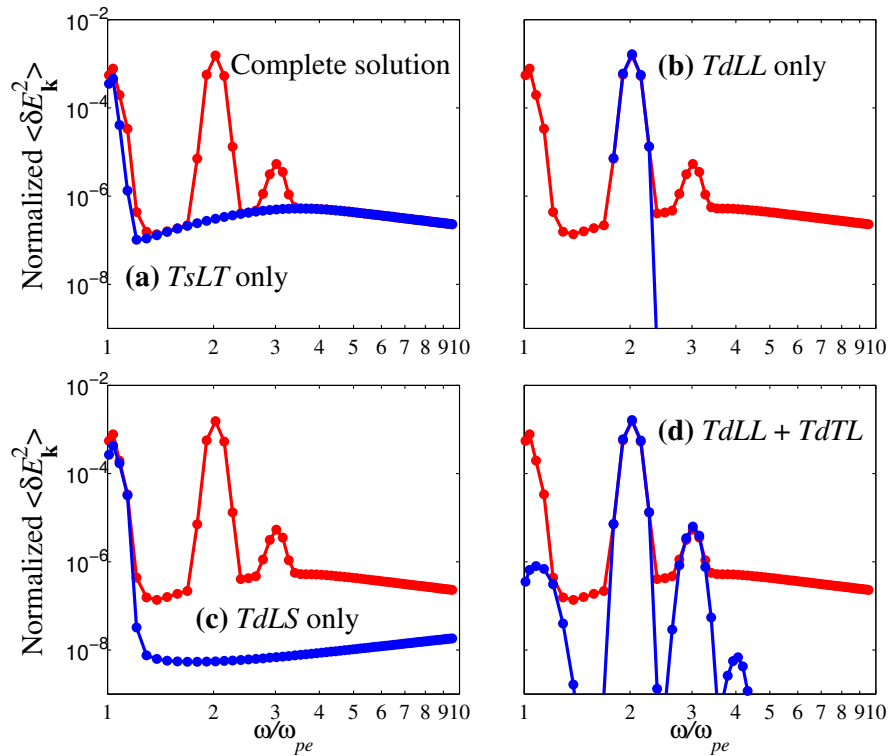


Figure 1: Espectro normalizado das ondas T em função da frequência normalizada, para o instante de tempo normalizado $\tau = t\omega_{pe} = 2000$. As linhas em vermelho representam o espectro completo, enquanto as linhas em azul representam o resultado obtido levando em conta diferentes mecanismos físicos. (a) Efeito do espalhamento envolvendo uma onda L e uma onda T; (b) Efeito do decaimento de duas ondas L, em uma onda T; (c) Efeito do decaimento de uma onda L e uma onda S, em uma onda T; (d) Efeito do decaimento de duas ondas L em uma onda T, junto com o decaimento de uma onda T e uma onda L, em uma onda T