

刘茁 \*

May 1, 2019

# 1 绪论

## 1.1 能源与聚变

地球上的能源分为不可更新能源和可更新能源。前者主要指化石能源，即煤、石油、天然气；后者包括太阳能、水能、风能等。随着人类社会的发展，人类对能源需求的增长和现有能源日趋减少的矛盾愈发突出。风能、水能、太阳能等能源效率有限，远远不能满足人类的需求，煤、石油、天然气储量有限，同时也造成了严重的污染，温室效应日渐明显。

核聚变能源是利用热核聚变产生巨大能量的能源

## 1.2 高能粒子与不稳定性

在现代托卡马克装置中，等离子体的主要成分除了热粒子以外，还包括聚变反应和辅助加热产生的高能粒子（快粒子）。一方面，高能粒子是聚变等离子体的重要能量来源，在 DT 等离子体中，聚变产生的  $\alpha$  粒子具有 3.5 MeV 的能量，将是聚变等离子体自持加热的重要手段。另一方面，通过辅助加热手段，比如离子回旋共振加热、电子回旋共振加热、中性束注入等，也可以产生大量的高能粒子。这些高能粒子（EP, energetic particle）影响着装置的运行，一个重要方面就是与等离子体波的相互作用。在托卡马克中，由于波-粒子共振所激发的阿尔芬本征模（AE, Alfvén Eigenmode）、鱼骨模等不稳定性，造成 EP 的大量损失，影响背景热等离子体的约束。这些不稳定性引起的粒子径向输运使装置能量损失，还可能导致装置的损毁。

目前，几乎所有托卡马克装置都诊断到了高能粒子激发的不稳定性，AEs 一直是研究的重点。首先，AEs 由快粒子的径向压强梯度驱动，增强了快粒子的径向输运。其次，AEs 可以和快粒子发生强烈的共振，激发不稳定性模式。

---

\*zliupku@pku.edu.cn, 北京大学物理学院

### 1.3 BAE

## 2 DIII-D 中低频不稳定性的线性模拟

### 2.1 高能离子激发的不稳定性的线性模拟

DIII-D 是 1980 年代位于美国圣地亚哥的通用原子能公司 (General Atomics, GA) 在 Doublet III 装置的基础上建立的一个托卡马克, 其主要目的是为托卡马克的设计优化建立物理基础, 其等离子体截面呈 "D" 型。DIII-D 代表了目前世界最先进磁约束聚变的技术水平, 它最早使用中性粒子数注入手段加热等离子体, 它可以精确并稳定地在一定范围内控制等离子体的形状和位置, 图中展示了一些 MHD 可以产生的 MHD 平衡截面。

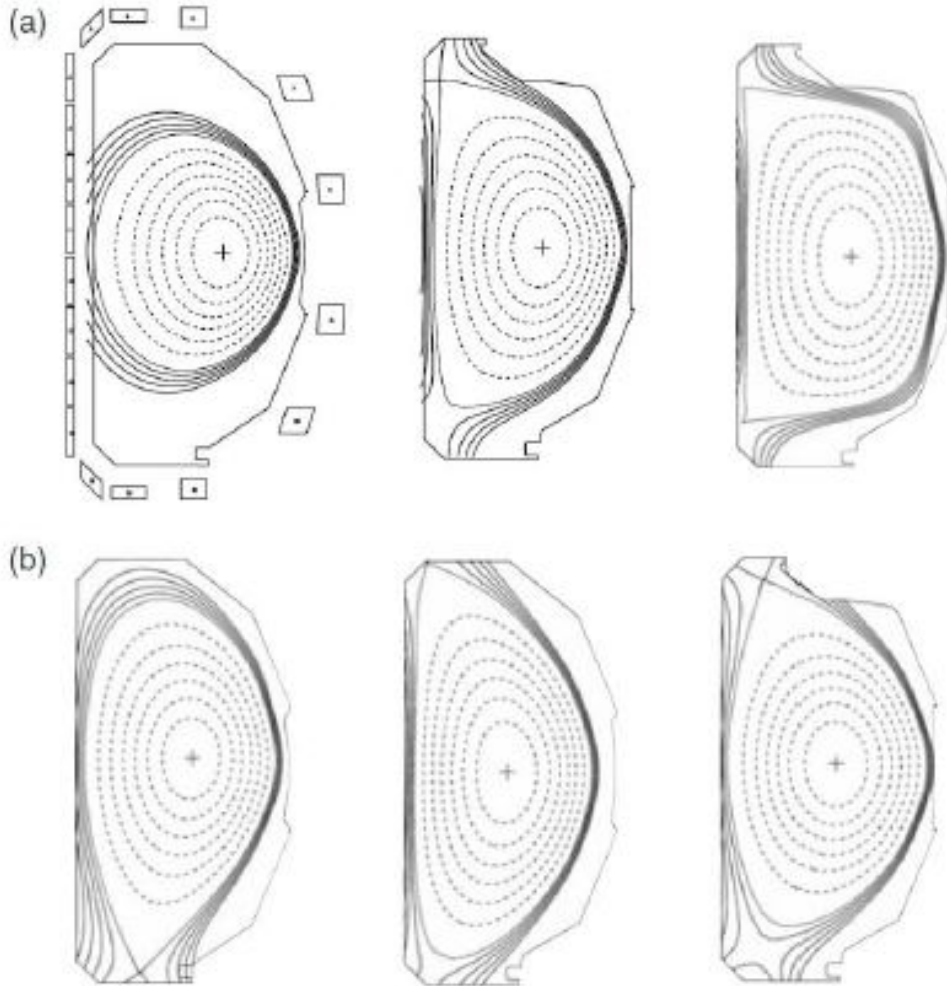


Figure 1: DIII-D 中可以产生的 MHD 平衡截面

近几年在 DIII-D 的实验中, 发现了一些低频的不稳定性。前面已经提到了, 在低频不稳定性爆发期间, 系统损失了约 45% 的加热功率, 而低频频率恰处在 BAE 以及 BAAE 频率段, 这引起了研究

人员的密切关注。在第一章中我已经简要介绍了刘雅琪博士在这一方面的工作，现在我将接着刘雅琪博士的工作，继续使用 GTC 对快粒子激发的低频不稳定性的线性模拟性模式进行模拟以及研究，并偏重于研究 DIII-D 中的对应情况。

本章中模拟采用的数据来自 DIII-D 第 146094 次放电，GTC 采用实验平衡数据 (EFIT) 用 ORBIT 绘图代码转换成 GTC 可以使用的输入数据。这次实验中，最不稳定的环向模数为  $n=2, 4, 6$ ，在  $n=2$  的高频段，较宽的间隙可能存在离散的 TAE 和 RSAE 本征模（约 70 90kHz 等离子体坐标系，或 100 120kHz 实验坐标系），低频段（10 50kHz）的  $\beta$  间隙，可能存在离散的 BAE 和 BAAE 本征模，恰处于实验中低频不稳定性的频率范围。通过阿尔芬波声波连续谱，可以初步判断本征模所处的径向位置以及频率范围。在这一章所有的模拟中，我都将采用这一次放电的平衡剖面。在这次实验中，有效大半

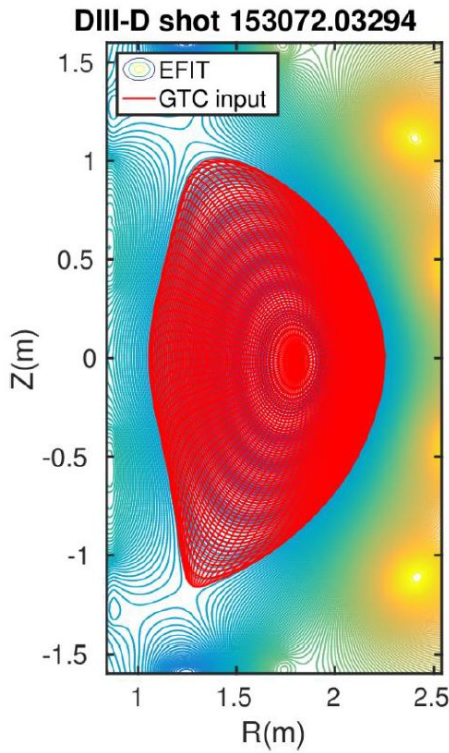


Figure 2: DIII-D 实验 EFIT 输出的平衡位型和 GTC 输入的比较

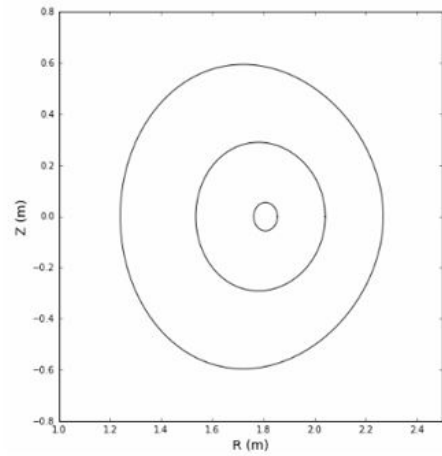


Figure 3: GTC 模拟区域示意图，内外环形是场模拟的内外边界，中间环对应  $q_{min}$  所在位置

径  $R_0 = m$ ，小半径  $a = m$ ，磁轴处磁场为  $B_0 =$ ，磁轴处电子温度，电子密度，离子温度，离子密度，快粒子温度，快离子密度，比压值为。安全因子  $q$  呈剪切位型，最小值  $q_{min} = 1.44$ 。整体模拟所采用背景等离子体的平衡如图所示，快粒子面以及。

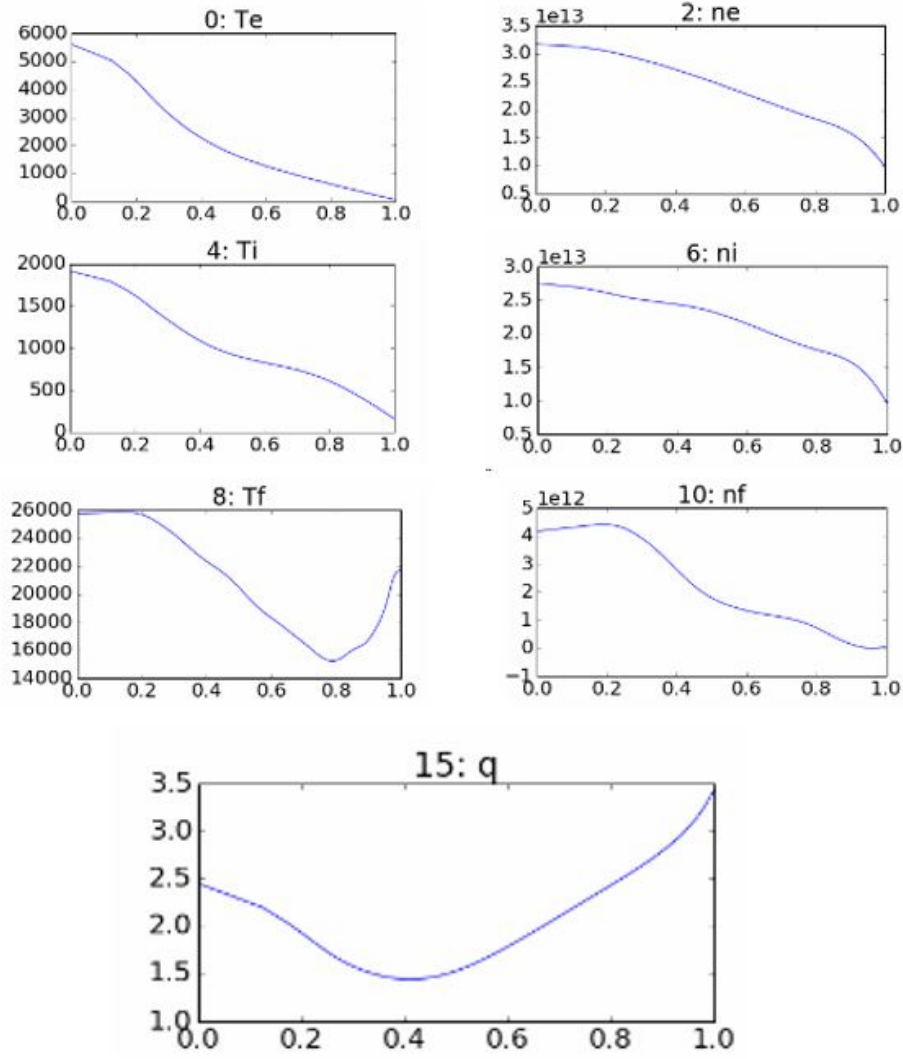


Figure 4: DIII-D #146094 次放电电子、离子、快离子的温度、密度以及安全因子  $q$  的剖面图

我们先采用高能粒子（快粒子）在真实实验参数下进行激发，在模拟开始之前，我们先对抗磁漂移频率以及坐标系之间频率关联作一定的计算。注意 GTC 模拟是包含抗磁漂移效应 ( $\omega_*$ ) 的，实验室坐标下的频率  $\omega_{lab}$  与等离子体坐标下的频率  $\omega_{plasma}$  是有一定差别的，它们具体的解析关系不能清楚地写出，但是我们可以通过加减  $\omega_*$  的方式来做简单的估计。

考虑热离子和快离子的压强梯度（包括密度梯度和温度梯度效应）

$$\begin{aligned}\omega_* &= -i \star \cdot \nabla = m(\mathbf{v}_\star \cdot \nabla \theta) \\ \mathbf{v}_\star &= \frac{n_{oi}m_i\mathbf{v}_{\star i} + n_{of}m_f\mathbf{v}_{\star f}}{n_{oi}m_i + n_{of}m_f} \\ \mathbf{v}_{\star\alpha} &= \frac{c\mathbf{B}_0 \times \nabla P_{0\alpha}}{Z_\alpha B_0^2 n_{o\alpha}}, P_{0\alpha} = n_\alpha T_\alpha\end{aligned}$$

按照上述方法计算，在我们的平衡中，快离子贡献的抗磁漂移占，其中快离子的密度梯度的成分又在快

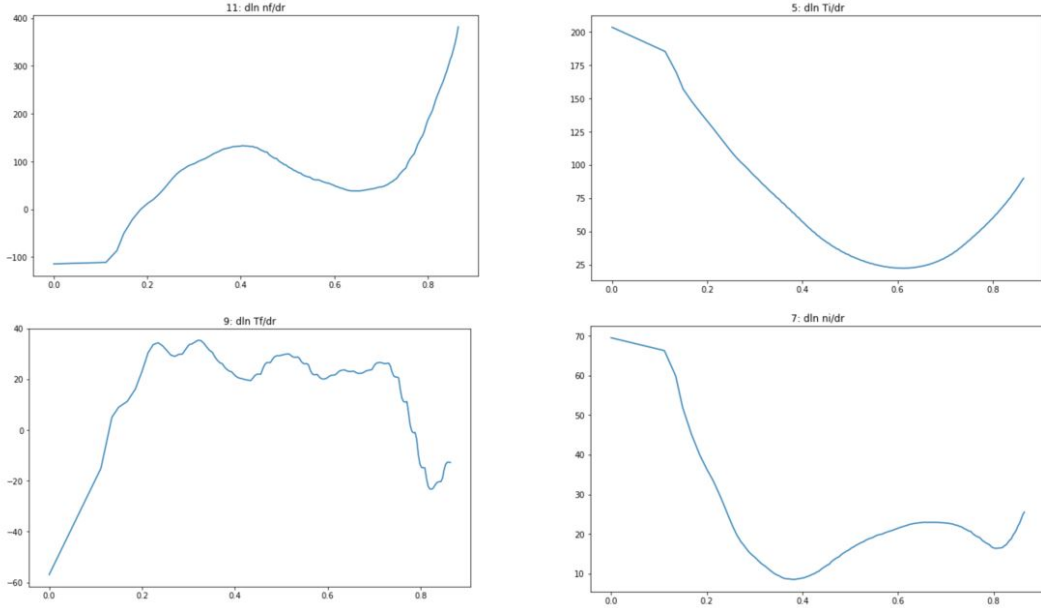


Figure 5: 离子、快离子的温度、密度梯度的剖面图

离子中占主要成分，贡献了。可以看出，在实验位型下，由于快离子面的大梯度，抗磁漂移的频率非常大，在  $m = 6$  的模式中抗磁漂移的频率就与 BAAE 的频率相当了，在更高模数的模式中，或者在更大装置尺寸的模拟中，抗磁漂移的频率甚至超过了 BAAE 的频率，这对我们利用频率的判断造成了非常大的影响，也对模拟中激发 BAAE 所在频率的模式造成了一定的困难。

在这次模拟中，我对环向模数  $n$  进行扫描 ( $n=2,4,6$ )，保留所有纵向模数  $m$  (对应 GTC 中  $nfilter=1$ )，其最不稳定的纵向模式分别为  $m = 3, m = 6, m = 9$ 。提取  $(2, 3), (4, 6), (6, 9)$  这几个模式，得到的频率与增长率结果如图所示。

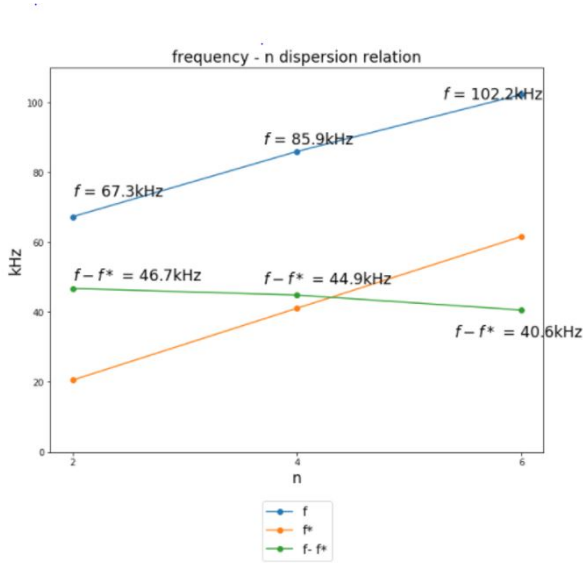


Figure 6:  $(m,n)=(2,3),(4,6),(6,9)$  三支模线性模拟的频率  $f$ ，抗磁漂移  $f^*$ ，以及  $f-f^*$

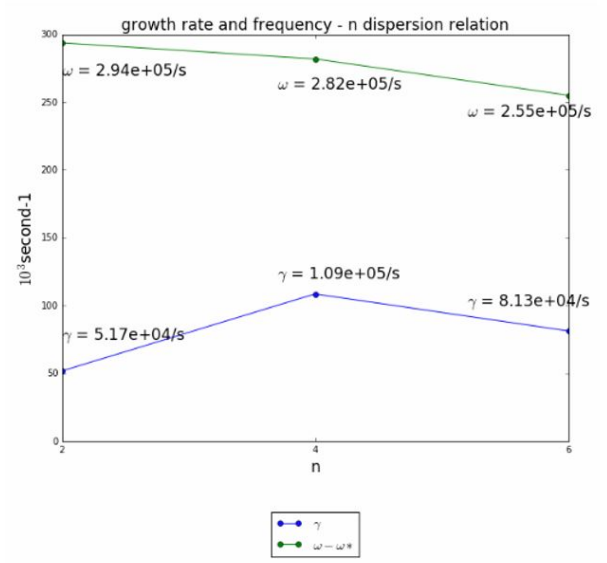


Figure 7:  $(m,n)=(2,3),(4,6),(6,9)$  三支模线性模拟的圆频率  $\omega$ ，以及增长率  $\gamma$

可以看出来，第一，在线性模拟中我们只得到了单一频率的模式；第二，模拟中最不稳定的模式为  $n=4$ ，其频率为，增长率为，；第三，在不同模数的模拟中，得到的频率随纵向模数的增加而增加，我尝试在得到的频率中直接减去每个模对应的抗磁漂移频率，得到的  $f - f^*$  结果还比较一致。从第三点可以看出，假设不同纵向模式数对应的同一种模式频率差别不太大，用减法来估计抗磁漂移频率的作用是比较合理的一种方式。

我们选取最不稳定的模式， $n=4$  的模式，做出其静电势以及矢势的平行分量的极向以及径向的模结构。从极向模结构来看，其拥有类似三角形的模结构，但是又与圆位型下的不太一致。这里的模结构三角形没有那么明显，与之前观测到的 RSAE 的模结构有一些类似之处。利用 MHD 代码 ALCON 绘制阿

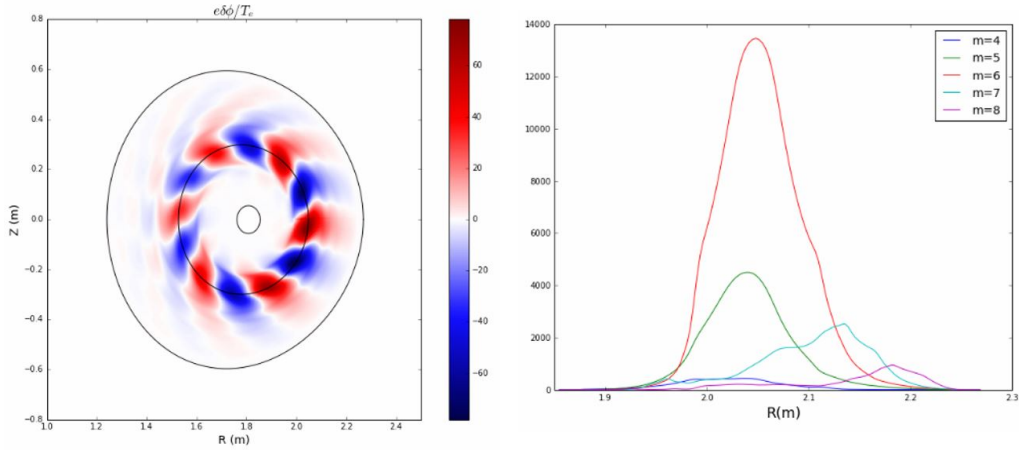


Figure 8:  $(m,n)=(4,6)$  在线性模拟中静电势  $\phi$  模结构

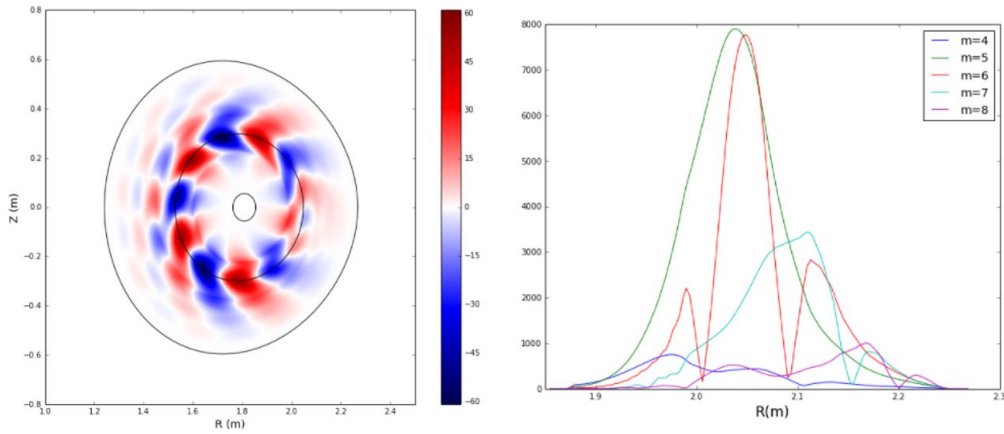


Figure 9:  $(m,n)=(4,6)$  在线性模拟中磁矢势平行分量  $A_{||}$  模结构

尔芬-声波连续谱，我们将  $n=6$  模模拟得到的频率  $f$  和减去抗磁漂移数值的频率同时画在阿尔芬波-声波连续谱中。我们可以发现，GTC 模拟得到的频率落在 BAE 间隙的上方，靠近 RSAE 频率，但是减去抗磁漂移的频率后，其落在 BAE 的区间内。我们初步判定在线性模拟中，我们得到的是一个单一频率的模，它的频率和特征更靠近于 BAE。



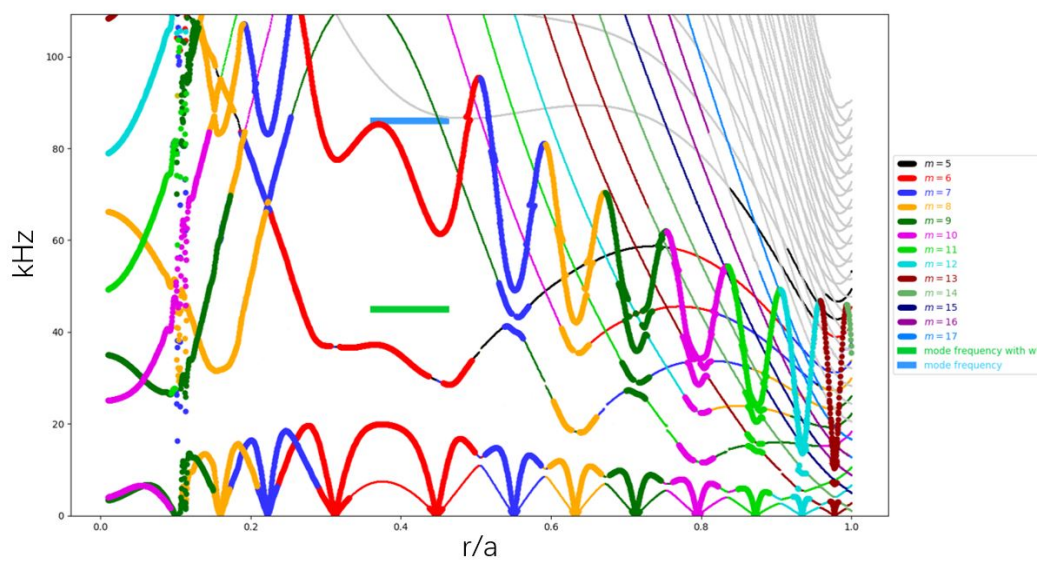


Figure 10: DIII-D #146094 环向模数  $n=4$  的阿尔芬波-声波连续谱，其中粗线是阿尔芬波谱，细线是声波谱

显然在 DIII-D 的 GTC 线性模拟中，我们没有得到 BAAE 的频率。我尝试了天线扫频。