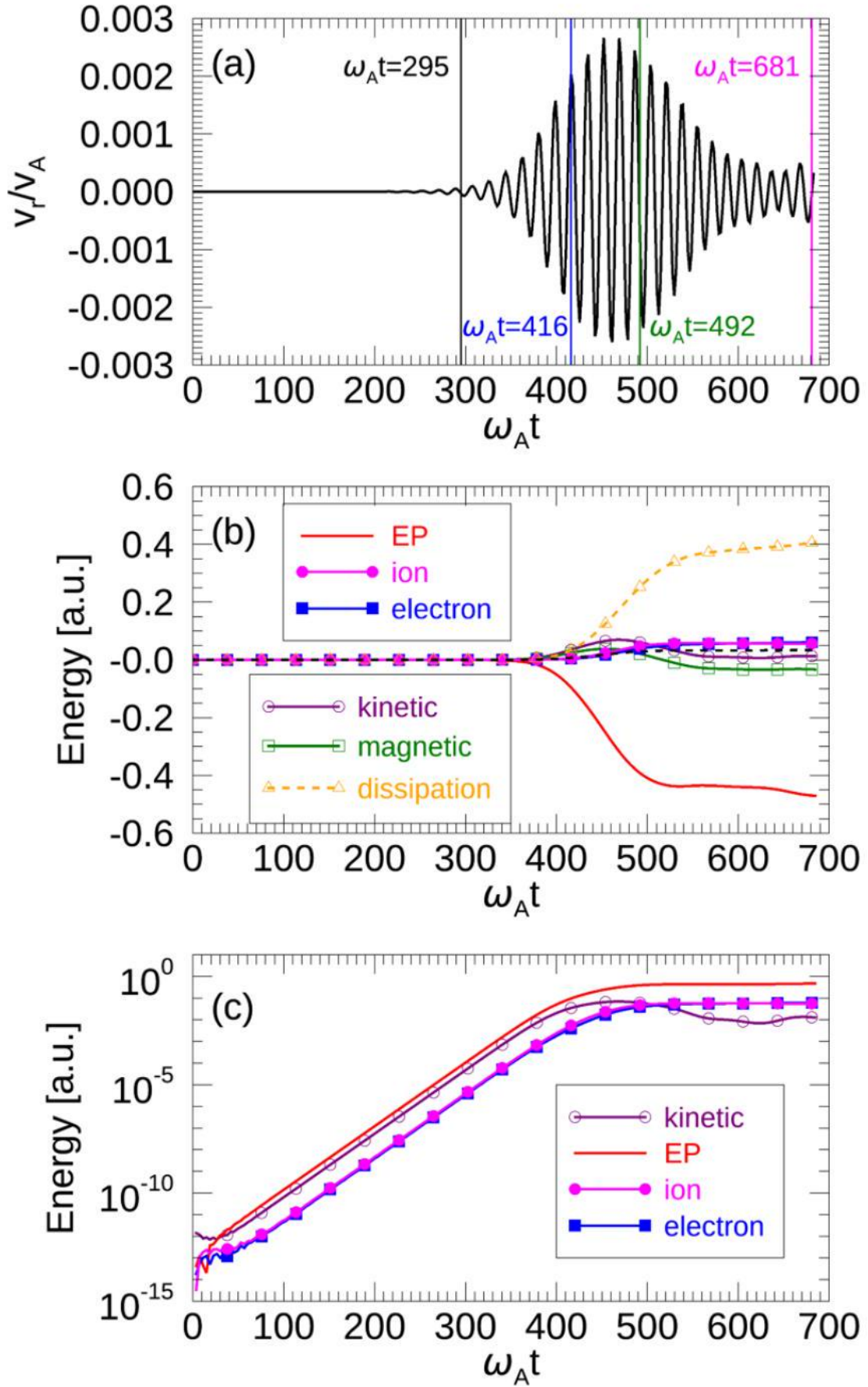
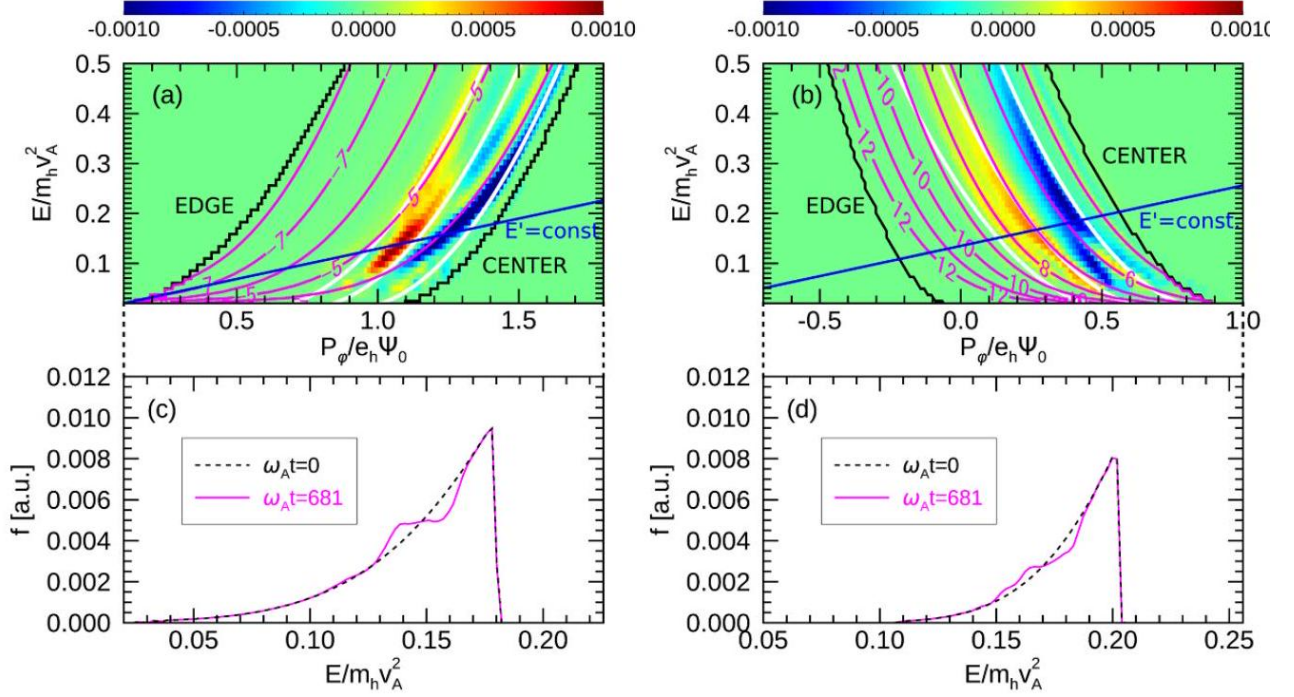


**Figure 1:** (a) 体等离子体beta值、能量离子beta值 (EP) 和安全因子 ( $q$ ) 的空间分布。图(b)、(c)和(d)分别显示了使用以下模型模拟的径向MHD速度的各个极向谐波的环向阿尔芬本细模 (TAE) 的空间分布: (b)传统混合模型, (c)包括动理学热离子的扩展混合模型, 以及(d)包括动理学热离子和电子温度分布演化的扩展混合模型。实线 (虚线) 表示 $\cos(m\theta + n\phi)$  [ $\sin(m\theta + n\phi)$ ]谐波。

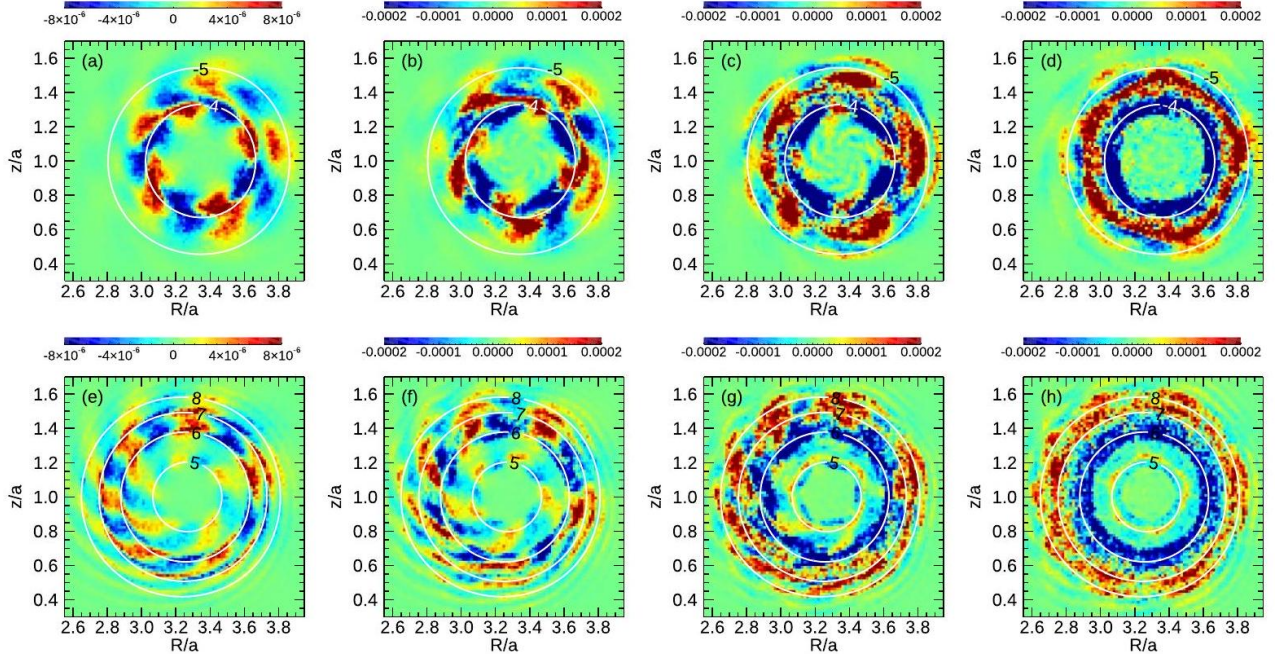


**Figure 2:** (a) 对应于图1(c)中 $m/n = 5/4$ 谐波的余弦部分的径向MHD速度演化，对于 $\beta_{bulk0} = 1\%$ 。(b)  $\beta_{bulk0} = 1\%$ 情况下，能量粒子能量(EP)、热离子能量(ion)、电子能量(electron)、MHD动能(kinetic)、磁能(magnetic)和耗散能量(dissipation)的时间演化的变化情况。(c) 在对数尺度下，比较了能量粒子能量、热离子能量、电子能量和MHD动能的绝对值随时间的演化情况。



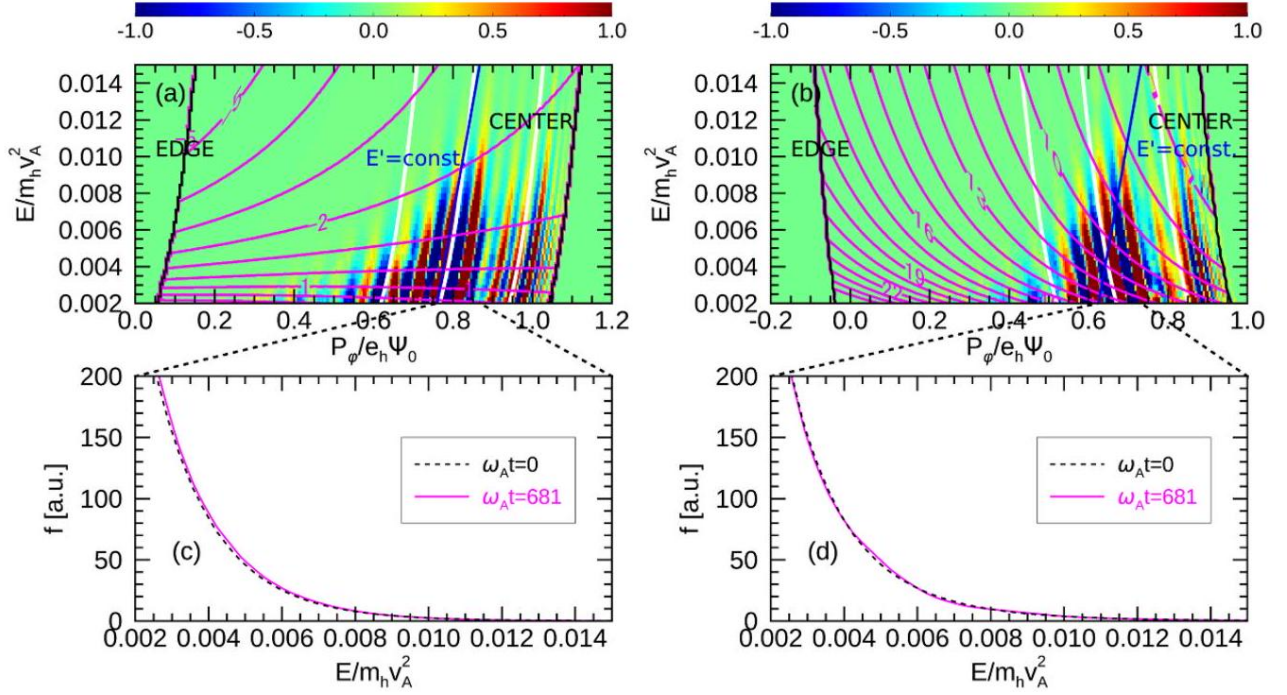


**Figure 3:** 在 $(P_\phi, E)$ 空间中，具有 $\mu = 0$ 的高能离子分布函数的变化如彩色图所示，其中(a)表示与等离子体电流同向的粒子，(b)表示与等离子体电流逆向的粒子，对应于 $\omega_{At} = 681$ ， $\beta_{bulk0} = 1\%$ 的运行情况。品红色线条表示与带有在图中标记的极向谐振数 $L$ 的TAE的共振。白色线条表示与环向模式数为 $n = 4$ ， $q = 9/8, 11/8$ 和 $13/8$ 的TAE间隙位置。蓝色线条表示 $E' = const.$ ，在波粒相互作用过程中忽略模式振幅和频率的时间变化时保持不变。在图(a)和(b)中显示的 $E' = const.$ 线上比较了 $\omega_{At} = 0$ 和681时的高能离子分布函数，分别对应于(c)共向粒子和(d)逆向粒子。将连接面板(a, b)和(c, d)的虚线分别指示与水平轴( $E$ )对应的 $P_\phi$ 范围。

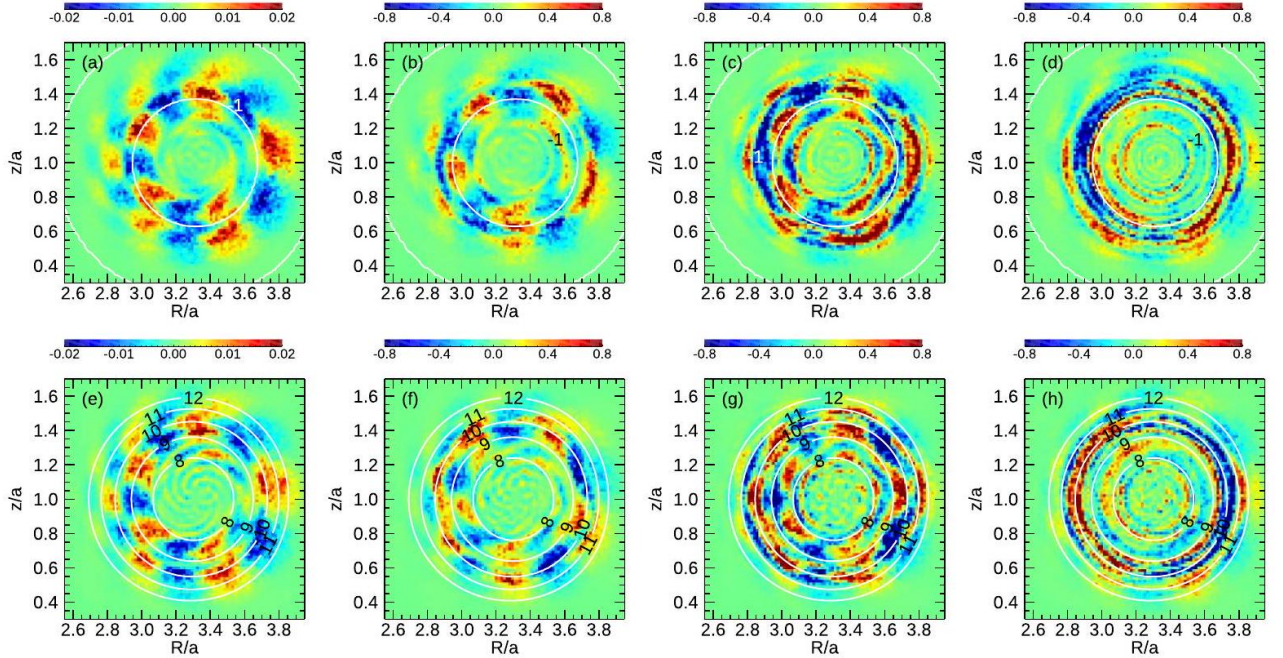


**Figure 4:** 在极向平面上 ( $(R_0 - 0.65a \leq R \leq R_0 + 0.75a, z_0 - 0.7a \leq z \leq z_0 + 0.7a, \phi = 0)$ )，在 $\beta_{bulk0} = 1\%$ 的运行中，以 $R_0 = 3.2a$ 和 $z_0 = a$ 为中心，展示了高能离子分布函数的涨落情况，分别对应于(a)、(e)  $\omega_{At} = 295$ ，(b)、(f)  $\omega_{At} = 416$ ，(c, g)  $\omega_{At} = 492$ ，(d, h)  $\omega_{At} = 681$ 。在图3中显示的常数 $E'$ 选择粒子的动能，并且磁矩 $\mu = 0$ 。上方(下方)的面板显示与等离子体电流同向(逆向)的粒子。共振粒子轨道在极向平面上投影，其中极向谐振数 $L$ 在图中标记。

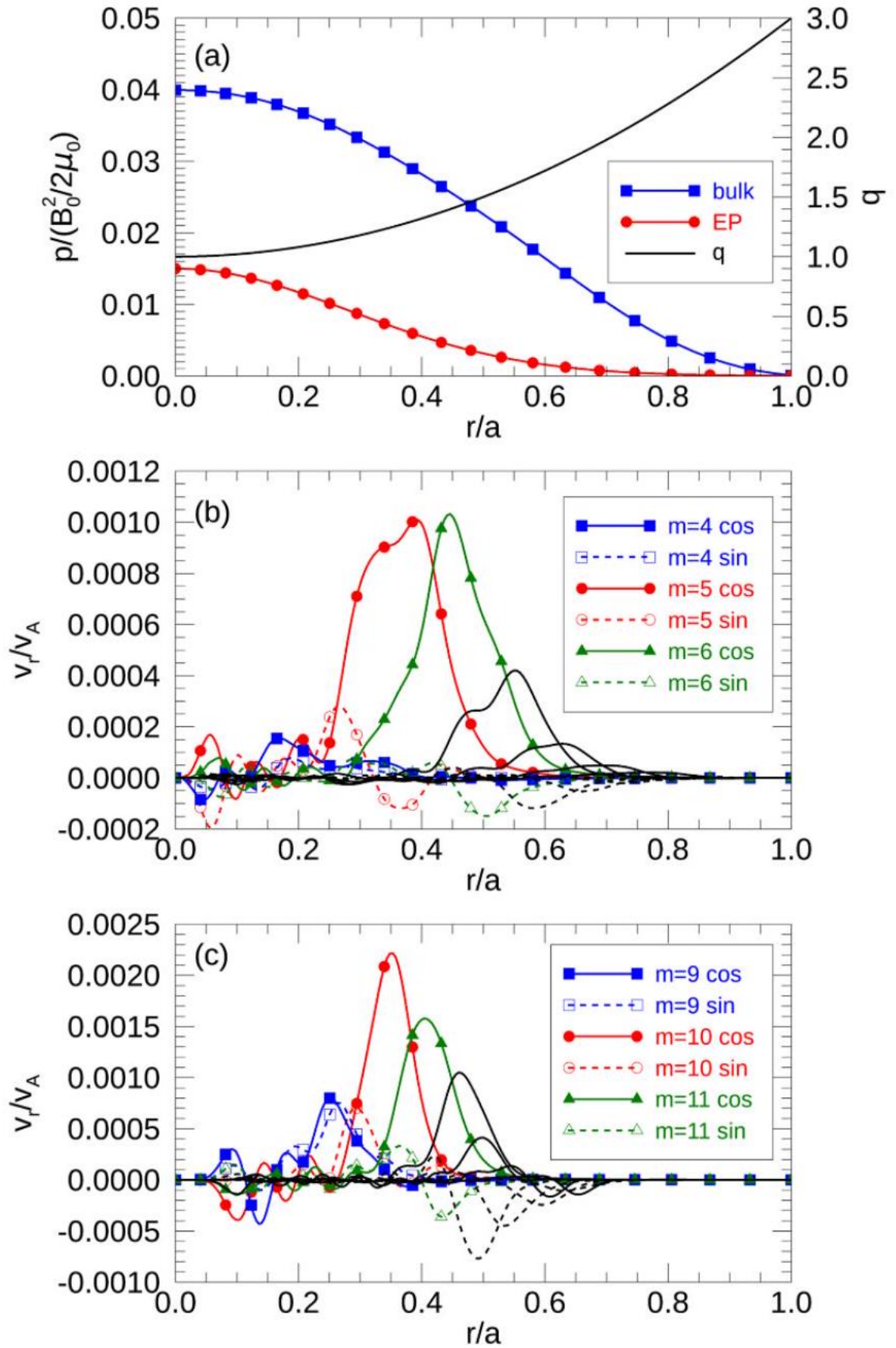




**Figure 5:** 在 $(P_\phi, E)$ 空间中，具有 $\mu = 0$ 的热离子分布函数的变化如彩色图所示，其中(a)表示与等离子体电流同向的粒子，(b)表示与等离子体电流逆向的粒子，对应于 $\omega_{At} = 681$ ， $\beta_{bulk0} = 1\%$ 的运行情况。品红色线条表示与带有在图中标记的极向谐振数 $L$ 的TAE的共振。白色线条表示与环向模式数为 $n = 4$ ， $q = 9/8, 11/8$ 和 $13/8$ 的TAE间隙位置。蓝色线条表示 $E' = \text{const.}$ ，在波粒相互作用过程中忽略模式振幅和频率的时间变化时保持不变。在图(a)和(b)中显示的 $E' = \text{const.}$ 线上比较了 $\omega_{At} = 0$ 和 $681$ 时的热离子分布函数，分别对应于(c)共向粒子和(d)逆向粒子。连接面板(a, b)到(c, d)的虚线分别指示与水平轴( $E$ )对应的 $P_\phi$ 范围。

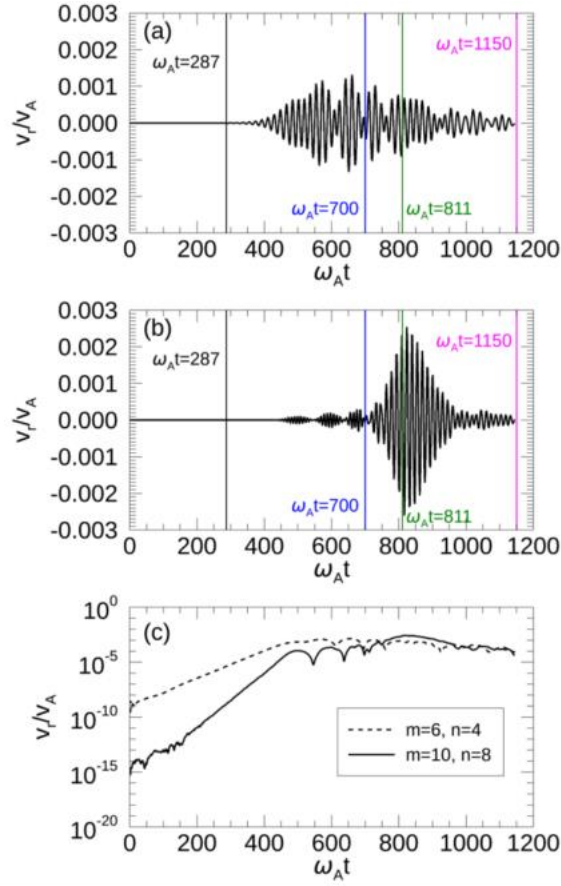


**Figure 6:** 在极向平面上 ( $(R_0 - 0.65a \leq R \leq R_0 + 0.75a, z_0 - 0.7a \leq z \leq z_0 + 0.7a, \phi = 0)$ )，在 $\beta_{bulk0} = 1\%$ 的运行中，以 $R_0 = 3.2a$ 和 $z_0 = a$ 为中心，展示了热离子分布函数的涨落情况，分别对应于(a, e)  $\omega_{At} = 295$ ，(b, f)  $\omega_{At} = 416$ ，(c, g)  $\omega_{At} = 492$ ，(d, h)  $\omega_{At} = 681$ 。粒子的动能为 $E = 5.9 \times 10^{-3} m_h v_A^2$ ，磁矩 $\mu = 0$ 。上方(下方)的面板显示与等离子体电流同向(逆向)的粒子。共振粒子轨道在极向平面上投影，其中极向谐振数 $L$ 在图中标记。

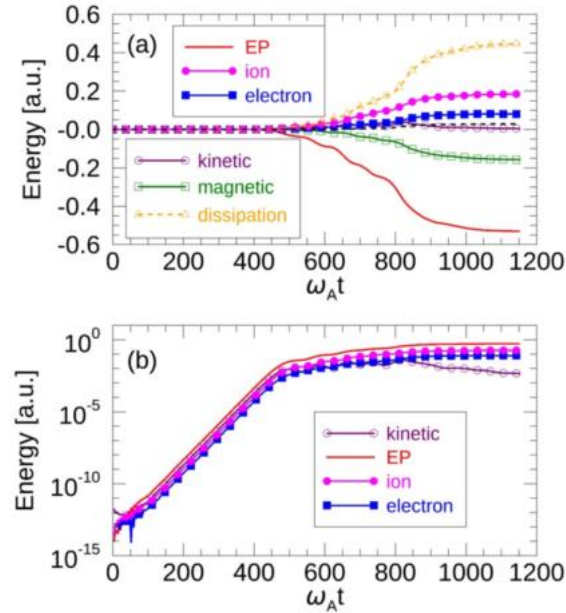


**Figure 7:** (a) 体等离子体 $\beta$ 值, 能量离子 $\beta$ 值 (EP) 和安全系数( $q$ )的空间分布图。环向模数为(b)  $n = 4$ 和(c)  $n = 8$ 的TAE的每个极向谐波的径向MHD速度的空间分布。实线 (虚线) 显示 $\cos(m\theta + n\phi)$  [ $\sin(m\theta + n\phi)$ ]谐波。

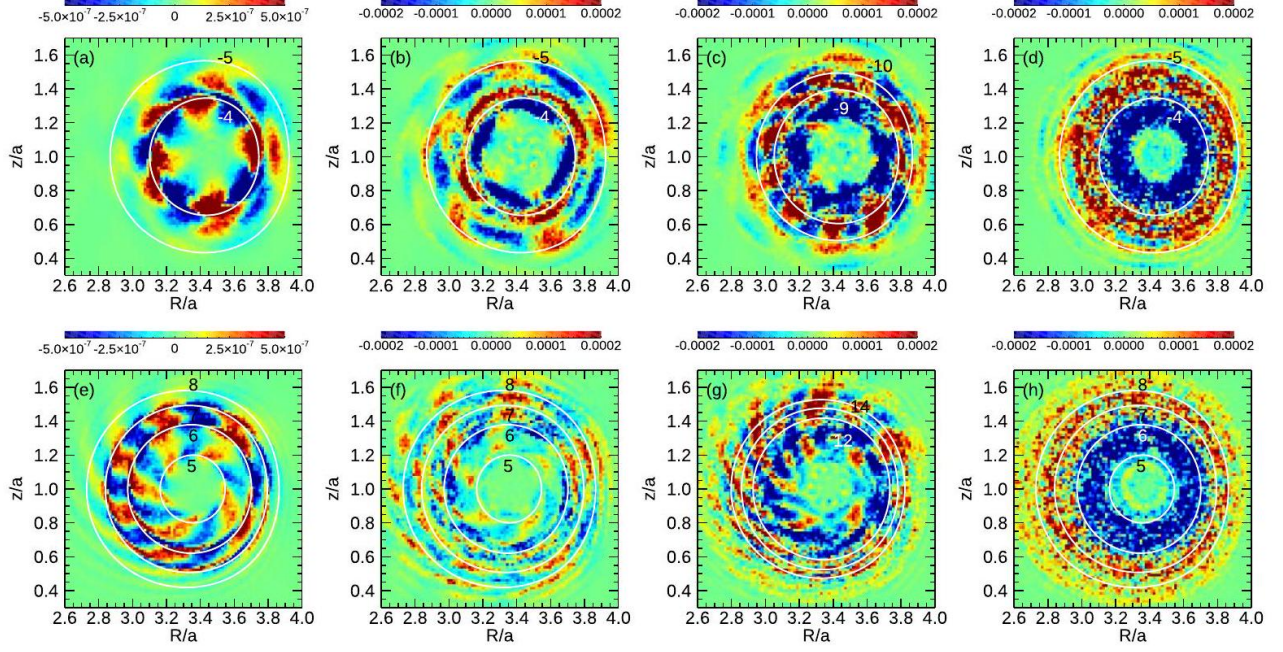




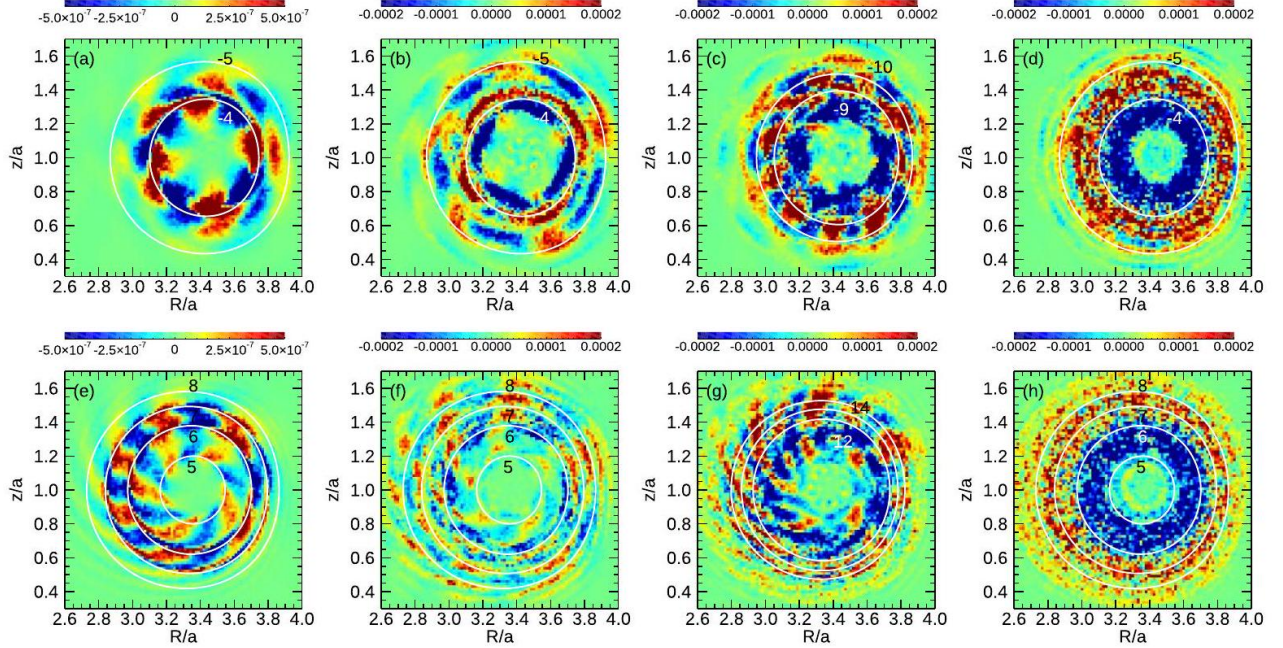
**Figure 8:** 图7(b)和(c)分别展示了 (a)  $m/n = 6/4$  和 (b)  $m/n = 10/8$  谐波的径向MHD速度演化，对应于  $\beta_{bulk0} = 4\%$ 。面板(c)以对数刻度比较了径向MHD速度谐波绝对值的演化。



**Figure 9:** (a)  $\beta_{bulk0} = 4\%$  情况下，高能离子能量 (EP)、热离子能量 (ion)、电子能量 (electron)、MHD动能 (kinetic)、磁能 (magnetic) 和耗散能量 (dissipation) 的时间演化变化。面板 (b) 以对数刻度比较了高能离子能量、热离子能量、电子能量和MHD动能绝对值的演化。

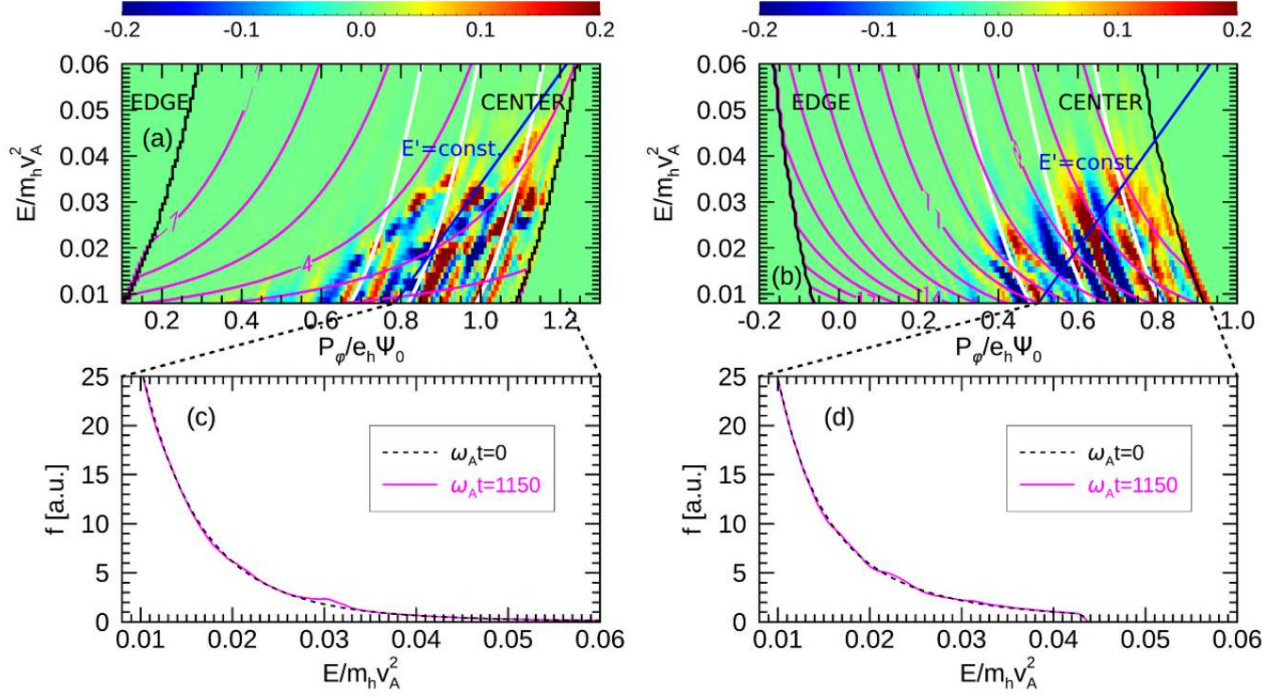


**Figure 10:** 在 $(P_\phi, E)$ 空间中，具有 $\mu = 0$ 的高能离子分布函数的变化如彩色图所示，其中(a)表示与等离子体电流同向的粒子，(b)表示与等离子体电流逆向的粒子，对应于 $\omega_{At} = 1150$ ， $\beta_{bulk0} = 4\%$ 的运行情况。品红色线条表示与在图中标记的极向谐振数 $L$ 的 $n = 4$  TAE的共振。白色线条表示与环向模式数为 $n = 4$ ， $q = 9/8, 11/8$ 和 $13/8$ 的TAE间隙位置。蓝色线条表示在与 $n = 4$  TAE的波粒相互作用过程中，忽略模式振幅和频率的时间变化时保持不变的 $E' = const.$ 。在图(a)和(b)中显示的 $E' = const.$ 线上比较了 $\omega_{At} = 0$ 和 $1150$ 时的高能离子分布函数，分别对应于(c)共向粒子和(d)逆向粒子。连接面板(a, b)到(c, d)的虚线分别指示与水平轴( $E$ )对应的 $P_\phi$ 范围。

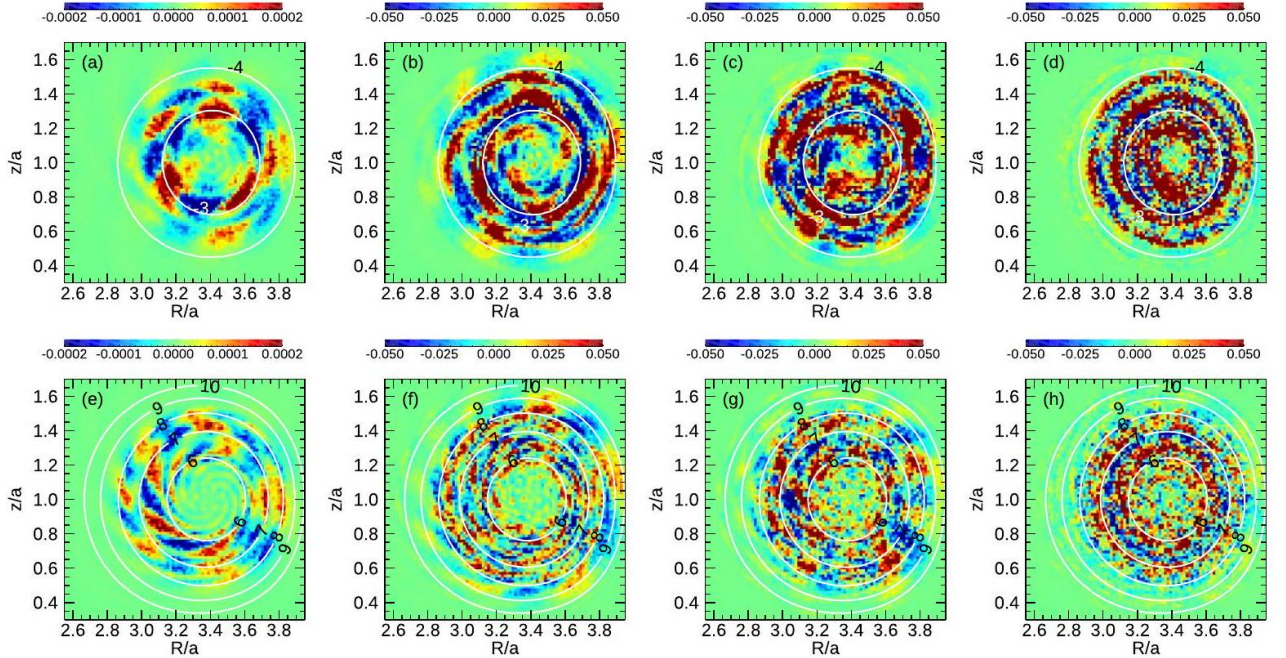


**Figure 11:** 在极向平面上 ( $(R_0 - 0.65a \leq R \leq R_0 + 0.75a, z_0 - 0.7a \leq z \leq z_0 + 0.7a, \phi = 0)$ ), 在 $\beta_{bulk0} = 4\%$ 的运行中，以 $R_0 = 3.2a$ 和 $z_0 = a$ 为中心，展示了热离子分布函数的涨落情况，分别对应于(a, e)  $\omega_{At} = 287$ ，(b, f)  $\omega_{At} = 700$ ，(c, g)  $\omega_{At} = 811$ ，(d, h)  $\omega_{At} = 1150$ 。在图10中显示的常数 $E'$ 选择粒子的动能，并且磁矩 $\mu = 0$ 。上方(下方)的面板显示与等离子体电流同向(逆向)的粒子。共振粒子轨道在极向平面上投影，其中在(c)和(g)中标记了与 $n = 8$  TAE的极向谐振数 $L$ ，在其他面板中标记了与 $n = 4$  TAE的极向谐振数 $L$ 。





**Figure 12:** 在 $\beta_{bulk0} = 4\%$ 的运行中，以 $\mu = 0$ 为条件，展示了热离子分布函数在 $(P_\phi, E)$ 空间中的变化情况，分别对应于(a)与等离子体电流同向的粒子和(b)与等离子体电流逆向的粒子，在 $\omega_{At} = 1150$ 时。图中的品红色线条表示与图中标记的极向谐振数 $L$ 的TAE共振。白色线条表示具有 $n = 4$ 、 $q = 9/8, 11/8$ 和 $13/8$ 的托卡马克模数的TAE间隙位置。蓝色线条表示在波粒相互作用中保持不变的 $E' = const.$ ，忽略模式振幅和频率的时间变化。在图(a, b)中显示的热离子分布函数沿着 $E' = const.$ 线进行比较，分别比较了 $\omega_{At} = 0$ 和 $1150$ 时的共向粒子(c)和逆向粒子(d)。连接面板(a, b)到(c, d)的虚线分别指示了与面板(c, d)的水平轴( $E$ )相对应的 $P_\phi$ 范围。



**Figure 13:** 在 $\beta_{bulk0} = 4\%$ 的运行中，展示了热离子分布函数在极向平面( $R_0 - 0.65a \leq R \leq R_0 + 0.75a, z_0 - 0.7a \leq z \leq z_0 + 0.7a, \phi = 0$ )上的涨落情况，其中 $R_0 = 3.2a$ 和 $z_0 = a$ ，分别对应于(a)和(e)的 $\omega_{At} = 287$ ，(b)和(f)的 $\omega_{At} = 700$ ，(c)和(g)的 $\omega_{At} = 811$ ，以及(d)和(h)的 $\omega_{At} = 1150$ 。粒子的动能为 $E = 3.0 \times 10^{-2} m_h v_A^2$ ，磁矩 $\mu = 0$ 。图中的上方(下方)面板显示了共向(逆向)等离子体电流的粒子。共振粒子轨道在极向平面上投影，其中图中标记了 $n = 4$  TAE的极向谐振数 $L$ 。