那么ADE为什么会导致电子动量的快速散射？其物理机制是什么？关于这些问题目前的分析大都是建立在准线性理论分析上\cite{RN1801}，从速度分布函数的演化角度解释散射，但ADE的物理本质并没有得到很好的理解,本文将在\autoref{sec:ewmele}对ADE效应的物理本质展开研究。

\par ADE机制与其它两种机制的最大区别就是存在一个由非热电子本身驱动的波。在托卡马克实验中已经有很多与ADE机制相吻合的实验观测\cite{RN975,RN798,RN786,RN1868}，其中最明显莫过于放电初期的电子回旋辐射。

根据理论计算，%通过在HDPE材料表面刻上周期为0.9mm，槽纹深度为1.1mm的一维三角槽纹结构可以实现将1mm厚度平板结构板在40GHZ-160GHZ微波正入射下最低透射率从77\%提高到98\%以上。具体细节可参考附录\autoref{sec:A8}。

通过在HDPE材料表面刻上周期为0.9mm，槽纹深度为1.1mm的一维三角槽纹结构可以将40GHZ-160GHZ微波正入射下最低透射率从77\%提高到98\%以上，实现较宽频广角范围内的增透减反，详细过程可参考附录\autoref{sec:A8}。

\section{ 电流爬升期电子回旋辐射与反常多普勒效应}

\subsection{电子回旋辐射成像诊断简介}\label{sec:ECEI}

电子回旋辐射成像诊断\cite{RN1020}(Electron cyclotron emission imaging [ECEI] )是二维微波成像系统。ECEI大尺度光学透镜能够实现将像面中电子回旋辐射信号投射在物面天线上，实现对像面中温度波动测量。如\autoref{fig:ECEIstru}所示，图中左侧大矩形区域表示EAST装置D型截面，小矩形区域表示ECEI成像区间，红色光束表示接收光路，透镜的功能是实现变焦和场曲调节，使得接收天线能够有效探测到目标空间的辐射信号。天线负责接收等离子体中电子回旋辐射信号并对接收信号通过外差降频传输给后端中频系统，信号在中频经过降频滤波检波后得到的视频信号接入采集卡，通过模数转换变为数字信号，最后通过数据分析即可获得温度涨落分布时间演化图。ECEI具有大尺度高时间空间分辨率的观测优势，通过ECEI可以实现对大尺度MHD行为的直接观察，为研究磁重联过程中丰富的物理提供了有力的诊断工具。\autoref{fig:ECEIimag}展示的是Sawtooth\cite{RN1791}过程中观察到的温度涨落随时间的演化过程，相对于传统的一维电子回旋辐射诊断（ECE）\cite{RN742}，ECEI诊断提供了更加丰富直观的物理图像。

\begin{figure}[ht]

\centering

\includegraphics[width=12cm]{image9.png}

\caption{\label{fig:ECEIstru} ECEI概念图\cite{RN1847}，从左至右分别为EAST极向小截面(蓝色区域为ECEI观测范围)、接收透镜、ECEI天线阵列等 }

\end{figure}

\begin{figure}[h]

\centering

\includegraphics[width=14cm]{image10\_1.eps}

\caption{\label{fig:ECEIimag} EAST装置ECEI诊断观测到的不同时间段Sawtooth破裂演化成像图，图中颜色表示温度涨落分布，红色为正，蓝色为负，图中三条颜色温度涨落曲线对应的空间位置分别对应矩形观测窗口黑红蓝三点}

\end{figure}

ECEI 诊断涉及到辐射频率与空间位置的对应关系，辐射强度与温度的对应关系。

\par \noindent

a.空间位置的对应关系

\par 根据经典电动力学知识，托卡马克中电子绕磁力线回旋运动会辐射出电磁波，由于电子回旋运动的非线性效应，电子回旋频率除了基频$f\_{ce}$以外还存在该频率的高次谐波成分(\autoref{sec:A1})，因此电子回旋频率可表示为

\begin{equation}

nf\_{ce}=n\frac{1}{2π}∙\frac{eB}{\gamma m\_e}

\end{equation}

其中n=1，2，3，…表示谐波次数，γ表示相对论修正因子，B表示托卡马克中纵场强度，B和大半径之间满足反比例关系：

\begin{equation}

B=\frac{B\_0R\_0}{R}

\end{equation}

这里$B\_0$ 、$R\_0$表示磁轴处磁场和大半径。由于纵场强度沿大半径方向单调递减（\autoref{fig:charac-f}），沿水平径向观测方向上，回旋频率和纵场强度满足一一对应关系，

\begin{figure}[ht]

\centering

\includegraphics[width=12cm]{image11\_2.png}

\caption{\label{fig:charac-f} (a)托卡马克纵场分布图(b)EAST托卡马克装置下各特征频率分布图，图片为自绘}

\end{figure}

因此可以通过选择不同的频率实现对径向空间位置的分辨。

如\autoref{fig:charac-f}(b)所示，垂直于磁场的特征频率包括电子回旋频率$nf\_c$、等离子体频率$f\_p$，上杂化频率$f\_{UH}$，左旋截止频率$f\_{L}$以及右旋截止频率$f\_R$等。垂直于磁场传播的电磁波主要存在两种偏振态，其中电场方向平行与磁场的波称为O波，电场方向垂直与磁场的波为X波。X波的截止频率和特征频率中的$f\_R$相同，共振吸收频率为$f\_{UH}$。O波的截止频率对应特征频率中的$f\_p$。为了确保频率和空间位置的一一对应，用于接收的频率必须与其它频率没有重叠，同时该频率能从等离子体中传出来，不被共振或截止。综上所述，只有图中绿色阴影区间的$2f\_c$的X波和$f\_c$的O波可用于电子回旋辐射诊断，$2f\_c$的O波因强度相对X波较弱而被舍弃。

\par 通过光学软件中射线追迹功能可获得ECEI不同极向天线对应的极向观测位置\cite{RN1367,RN1020}，因此ECEI具有径向和极向空间分辨能力的二维空间诊断。

\par \noindent

b.辐射强度与温度的对应关系 \par

电子回旋辐射在等离子体区域的输运主要由发射和吸收两个过程决定。在介电常数近似为1的稀薄等离子体中$(ω\_{pe}\ll ω$，等离子体频率远小于电磁波频率)，辐射输运方程可表示为\cite{RN1414}

\begin{equation}

\frac{\dif I(\omega)}{\dif s}=\eta(\omega)-\alpha(\omega) I(\omega)

\end{equation}

这里s表示辐射路径，$I(\omega)$表示单位面积单位立体角单位角频率的辐射功率，$\eta(\omega)$表示发射率，$\alpha(\omega)$表示吸收系数，从路径位置$s\_1$到$s\_2$过程中，该方程的解为：

\begin{equation}\label{eq:optical\_s}

I\left(s\_{2}\right)=I\left(s\_{1}\right) e^{-\tau}+\frac{\eta}{a}\left[1-e^{-\tau}\right]

\end{equation}

其中光学厚度$\tau$的定义是

\begin{equation}

\tau=\int\limits\_{s\_1}^{s\_2}\alpha(\omega)\dif s

\end{equation}

当光学厚度$\tau\gg1$时有

\begin{equation}\label{eq:Is2}

I(s\_2)=\frac{\eta}{\alpha}

\end{equation}

此时辐射满足黑体辐射。根据黑体辐射定律，单位路径等离子体发射功率等于其吸收的功率，即$\eta+\alpha B(\omega)=0$，且黑体辐射表面亮度为：

\begin{equation}\label{eq:Itik}

B(\omega)=\frac{\eta}{\alpha}=\frac{\hbar \omega^{3}}{8 \pi^{3} c^{2}} \frac{1}{\exp \left(\frac{\hbar \omega}{T}\right)-1}

\end{equation}

这里考虑的是线极化辐射，所以和课本中黑体辐射公式相差1/2 ，在低频区域$\hbar \omega \ll T$时，我们得到Rayleigh-Jeans公式

\begin{equation}\label{eq:blk}

B(\omega)=\frac{\omega^2T}{8\pi^3c^2}

\end{equation}

结合\autoref{eq:Is2}式和\autoref{eq:blk}式得：

\begin{equation}\label{eq:Te-to-I}

T\_e(R(\omega))=\frac{8\pi^3c^2}{\omega^2}I(\omega)

\end{equation}

此时不难看出辐射强度$I(\omega)$与温度$T\_e(R)$满足线性关系，原则上通过测量辐射强度结合温度\autoref{eq:Te-to-I}我们就可以准确获得温度。系统对信号强度I的响应通常满足线性关系，即$I\_{measure}=k I$，实际上精确测量比例系数k是比较困难的，通常需要借助TS诊断或相关等离子体中的物理过程\cite{RN1381}。目前ECEI信号的主流分析手段是通过测量信号$I\_{measure}$的涨落来分析温度的相对涨落，即

\begin{equation}

\frac{\delta T\_e}{T\_e}=\frac{\delta I\_{measure}}{I\_{measure}}

\end{equation}

当光学厚度小于1时对应光学薄，对\autoref{eq:optical\_s}右侧第二项一阶泰勒展开可得

\begin{equation}\label{eq:optical\_s}

I\left(s\_{2}\right)=I\left(s\_{1}\right) +\frac{\eta}{a}\tau \approx I\left(s\_{1}\right)+ \eta \Delta s

\end{equation}

其中$I(s\_1)$表示的是边界反射信号,不考虑反射则为0。此时辐射强度主要取决于发射率$\eta$的形式。如\autoref{fig:etamax}是根据2X波电子回旋辐射方程\eqref{eq:Xradiation}所绘，在固定电子速度条件下电子回旋辐射强度主要由垂直方向电子速度贡献，强烈依赖于

电子垂直方向速度。

\begin{figure}[ht]

\centering

\includegraphics[width=12cm]{etadivideetamax.eps}

\caption{\label{fig:etamax} 垂直磁场方向传播的2X波辐射强度与电子运动角度之间的关系}

\end{figure}

因此光学薄时电子回旋强度的变化主要反映垂直方向电

子速度的变化。在放电初期或低密度放电过程中，光学厚度一般都小于一，电子

速度分布中非热化分布的电子会产生丰富的辐射现象，通过合适的物理模型解释

辐射现象便是本文研究的主要目的。

%\vspace\*{2em}

由于EAST装置大窗口资源有限，ECEI系统处于低杂波系统和NBI系统之间且与NBI系统共D窗口，空间十分狭小。目前中国科大正在致力于合并ECEI和MIR（Microwave Imaging

Reflectometry）光路。合并光路使科大微波成像诊断系统更加紧凑，适应当下

的空间条件。同时通过ECEI和MIR联合诊断可以实现对托卡马克等离子体同一区域

密度和温度波动同时测

量，对研究边界局域模(ELM)、微撕裂模(MTM)等都具有重要的意义。

MIR利用大尺度透镜通过收集等离子体截止层处反射的微波信号，实现对

托卡马克截止层密度波动成像\cite{mazzucato2001microwave}。如\autoref{fig:MIR}所示，MIR的微波为系统主动

发射的多频率信号，通过照明光路对微波波前曲率调节实现和等离子体截止层曲率

匹配，这样反射的微波信号才能避免多普勒效应对相位的影响，同时实现最大反

射信号强度，提高成像质量。反射信号经过接收光路投影在天线位置，通过天线

上二极管混频降频后进入中频系统实现对微波信号IQ鉴相，获得相位波动信息。

不同极向位置的天线对应不同极向位置的截止层位置，不同频率的微波信号对应

不同截止层的径向位置，通过这种二维探测阵列实现对密度波动的二维成像。

\par

大尺度透镜不论在ECEI还是MIR系统中都承担着重要作用，通过多个透镜的组合

可以实现对波前曲率、场曲、聚焦位置、景深等光学参数调节。然而事物的发展

总是具有两面性，透镜组同时会导致微波信号在经过多组透镜时的反射损失增

加。当两套系统合并光路后，原本微弱的辐射的信号还需要进一步一分为二分别

进入两套系统，使得信号弥加珍贵。为了减小信号损失必须要采取相应的手段优

化透镜，降低微波信号在透镜表面的反射损失。其中槽纹表面结构作为广泛应用于可见光学波段增透的技术手段\cite{savin2015black},我们尝试在微波波段同样采用槽纹结构解决透镜表面反射损失问题。根据理论计算，%通过在HDPE材料表面刻上周期为0.9mm，槽纹深度为1.1mm的一维三角槽纹结构可以实现将1mm厚度平板结构板在40GHZ-160GHZ微波正入射下最低透射率从77\%提高到98\%以上。具体细节可参考附录\autoref{sec:A8}。

通过在HDPE材料表面刻上周期为0.9mm，槽纹深度为1.1mm的一维三角槽纹结构可以将40GHZ-160GHZ微波正入射下最低透射率从77\%提高到98\%以上，实现较宽频广角范围内的增透减反，详细过程可参考附录\autoref{sec:A8}。

\begin{figure}[ht]

\centering

\includegraphics[width=15cm]{image12.png}

\caption{\label{fig:MIR}MIR数值合成诊断图，图片来源自

X.Ren\&M.Chen\cite{RN1190}，其中M3D-C1为磁流体程序，用来模拟产生边界

谐频模（EHO），FWR为全波解程序，用来模拟微波在等离子体中的传播。微波

通过照明光路进入等离子体“照亮”截止层，携带截止层相位变化信息的微波经大尺度透镜投影在接收天线被天线收集，经中频系统检波分析获得最终的密度波动成像图}

\end{figure}

%\clearpage

\subsection{电流爬升期电子回旋辐射}

为了更直观地体现ADE在电子回旋辐射上的特点，我们给出一个示例，展示EAST装置在第64987炮（64987炮也就是EAST装置第64987次放电的意思）观测到的实验现象。

\autoref{fig:eceregion} 蓝色矩形区域表示的是384道ECEI观测区间，其中蓝色虚线利用efit反演得到的最后闭合磁面，红色长条对应32道ECE观测位置。\autoref{fig:eceregion}(b)中Vloop表示放电环电压，Ip表示等离子体电流，$<n\_e>$表示电子弦平均密度，HX表示硬X射线谱强度，SXR表示软X射线强度，ECE表示电子回旋辐射信号。从\autoref{fig:eceregion}b中可看到当放电开始时

\begin{figure}[ht]

\centering

\includegraphics[width=14cm]{image96\_2.png}

\caption{\label{fig:eceregion}(a)ECEI观测区域示意图 (b)EAST放电参数图，Vloop表示放电环电压，Ip表示等离子体电流，$<n\_e>$表示电子弦平均密度，HX表示硬X射线谱强度，SXR表示软X射线强度，ECE表示电子回旋辐射信号}

\end{figure}

\begin{figure}[ht]

\centering

\includegraphics[width=14cm]{image20\_1.eps}

\caption{\label{fig:ecestep}电子回旋辐射中的台阶结构，其中$I\_{ecei}$表示测量得到的辐射强度，(r,h)表示三道信号所在托卡马克极向剖面空间位置,r表示托卡马克小半径位置，h表示高度}

\end{figure}

环电压Vloop迅速上升紧接着下降，EAST装置 通过消耗欧姆储能产生等离子体，欧姆加热开始驱动等离子体电流爬升，电子密度出现小幅度上升并在之后的0.5s内维持在约$0.2\times10^{19}/m^3$平台。与此同时，从\autoref{fig:eceregion}(b)可看出在0.5s时间SXR和HX无明显变化，说明此时还未产生高能电子，但是电子回旋辐射信号在约0.2s后迅速抬升并在约0.5s达到顶峰，之后缓慢下降，针对该回旋辐射变化的物理机制本文将在\autoref{sec:startup}展开探究。如\autoref{fig:ecestep}所示，为了观察电子回旋辐射信号更多细节特征，我们将ECE信号其中一段时间展开，此时发现了一种神奇的现象：在辐射信号抬升的过程中存在一个一个step结构。后来发现，这种类似量子跃迁的现象早在上世纪70年代就已经在实验上发现\cite{RN725}。\par

1976年， D.A.Boyd\cite{RN725}在ATC托卡马克装置上通过测量沿装置大半经方向的电子回旋辐射强度，首次发现了辐射过程出现的step结构。如\autoref{fig:DAB}所示，其中上图表示频率在38GHz-110GHz区间的辐射强度，辐射迅速上升时（上升时间<10μs）伴随着环电压信号的迅速上升，D.A.Boyd将这种现象解释为在出现正电压峰时电子速度空间出现了快速角度散射，导致回旋辐射迅速上升。我认为D.A.Boyd是基于这样一种朴素的物理图像提出了这种猜想：首先系统的环电压与逃逸电子有关，环电压出现正电压峰时说明逃逸电子突然出现阻尼或损失，当逃逸电子出现了快速角度散射时相当于增加了逃逸电子的阻尼。同时被散射的逃逸电子垂直能量增加，因此该过程会导致回旋辐射增加和环电压上升。然而D.A.Boyd对逃逸电子被散射的具体原因并没有给出解释，1979年H. Knoepfel将D.A.Boyd观测到的step现象归因于ADE\cite{RN1030}。时至今日，关于这种现象的讨论已经持续了近50年\cite{RN1863,RN964,RN786,RN1866,RN1554,RN2102,RN1868,RN975,RN1859,RN798}，普遍认为产生的原因是ADE。

\begin{figure}[H]

\centering

\includegraphics[width=12cm]{image25\_1.png}

\caption{\label{fig:DAB}辐射强度‘跃迁’和环电压正电压尖峰出现时间一致，上图轨迹线表示辐射强度，辐射频率以$2ω\_{ce}$占主导，下图表示环电压变化(5V/div)，水平参考直线表示辐射本底和电压本底}

\end{figure}