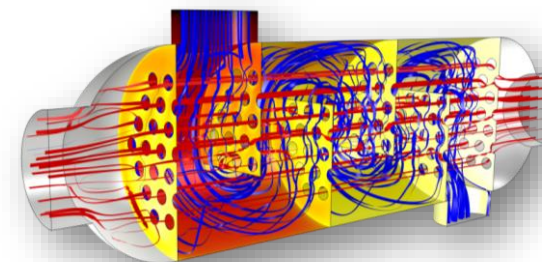


声明：© 2019, COMSOL Co. Ltd. 本课程包含的所有内容版权为 COMSOL® 公司所有。课程内容仅供参加本课程的用户学习使用，严禁个人或组织擅自以任何形式盗录、翻拍及转载。所有未经 COMSOL 公司授权而使用本课程内容的行为均视为侵权行为，COMSOL 公司将保留追究其法律责任的权利。

COMSOL Multiphysics® 传热建模

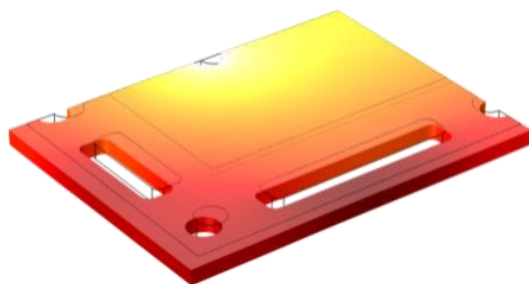
Part IV

王刚 博士
技术总监
COMSOL 中国



第四天

- 模块及传热接口简介
- 传热方程及边界条件
- 非等温流
- 管道与多孔介质传热
- 湿热传递
- 相变传热
- 电磁热
- 热辐射
- 集总热系统

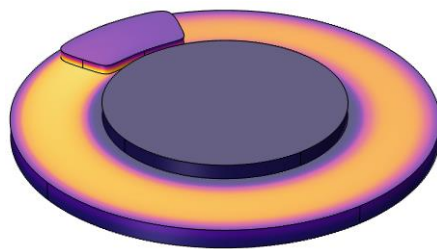


传导

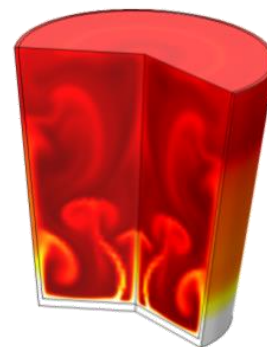


生物加热

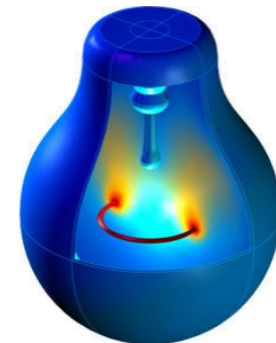
固体移动时的传热



流体中的对流



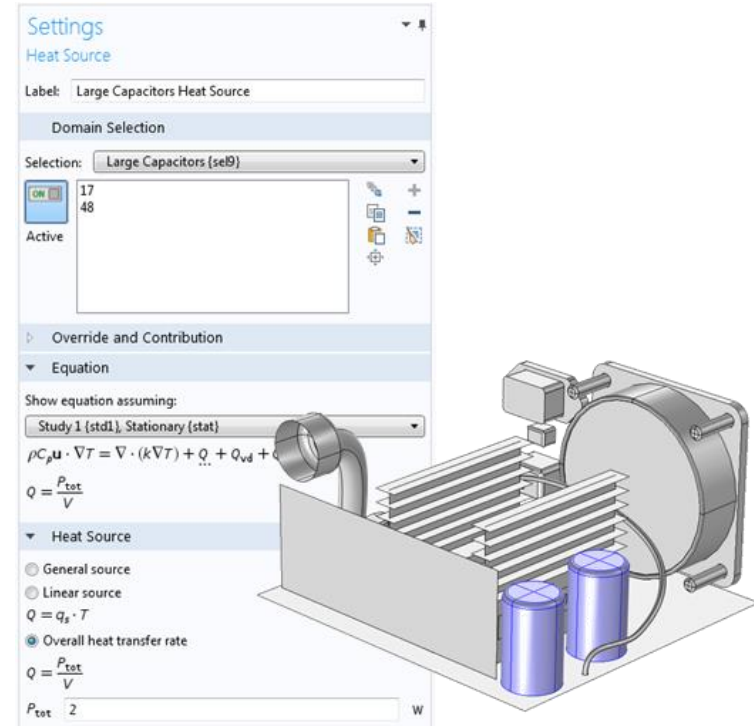
辐射



电磁热

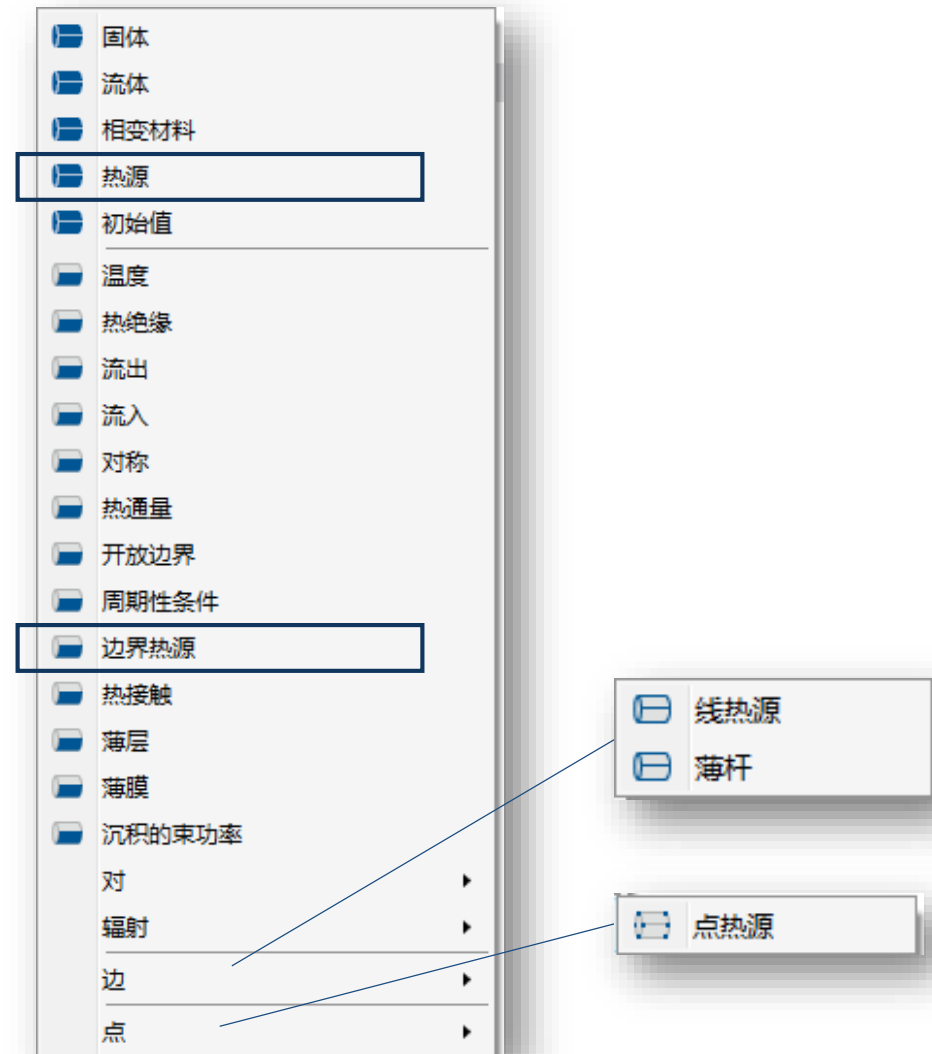
热源

- $\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (-k \nabla T) = Q$
- 可能是一个恒定值, 比如:
 - 从数据表得知
 - 可以是任何函数, 比如:
 $Q_0 \cdot \sin(t[1/\text{min}])$
 - 可以来自于其他物理场 (比如: 焦耳热)
→ 多物理场

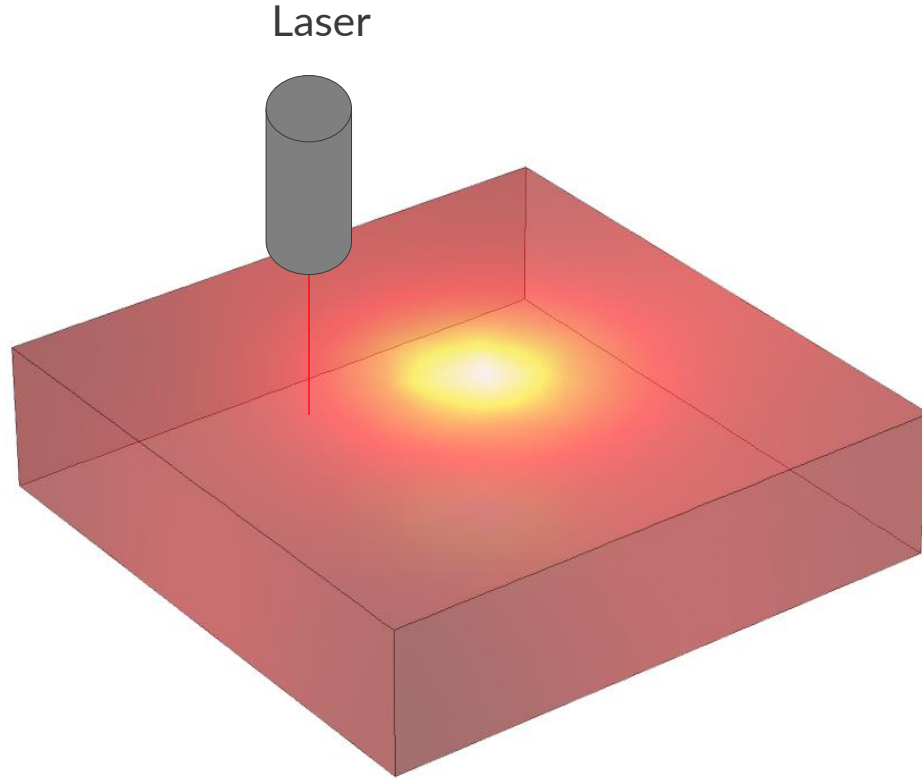


热源

- $\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (-k \nabla T) = Q$
- 可能是一个恒定值, 比如:
 - 从数据表得知
 - 可以是任何函数, 比如:
 $Q_0 \cdot \sin(t[1/\text{min}])$
 - 可以来自于其他物理场 (比如: 焦耳热)
→ 多物理场
- 也可以定义在边界, 边, 点上(边界, 边或点条件)



热源案例：激光加热



通过激光束加热玻璃平板

- 玻璃平板被激光束加热
- 激光没有被模拟，而是通过热源来定义

$$Q(x, y, z)$$

$$= Q_0(-R_c) \underbrace{\frac{A_c}{\pi\sigma_x\sigma_y} e^{-\left\{\frac{(x-x_0)^2}{2\sigma_x^2} + \frac{(y-y_0)^2}{2\sigma_y^2}\right\}}}_{\text{分布在xy平面}} e^{-A_c z}$$

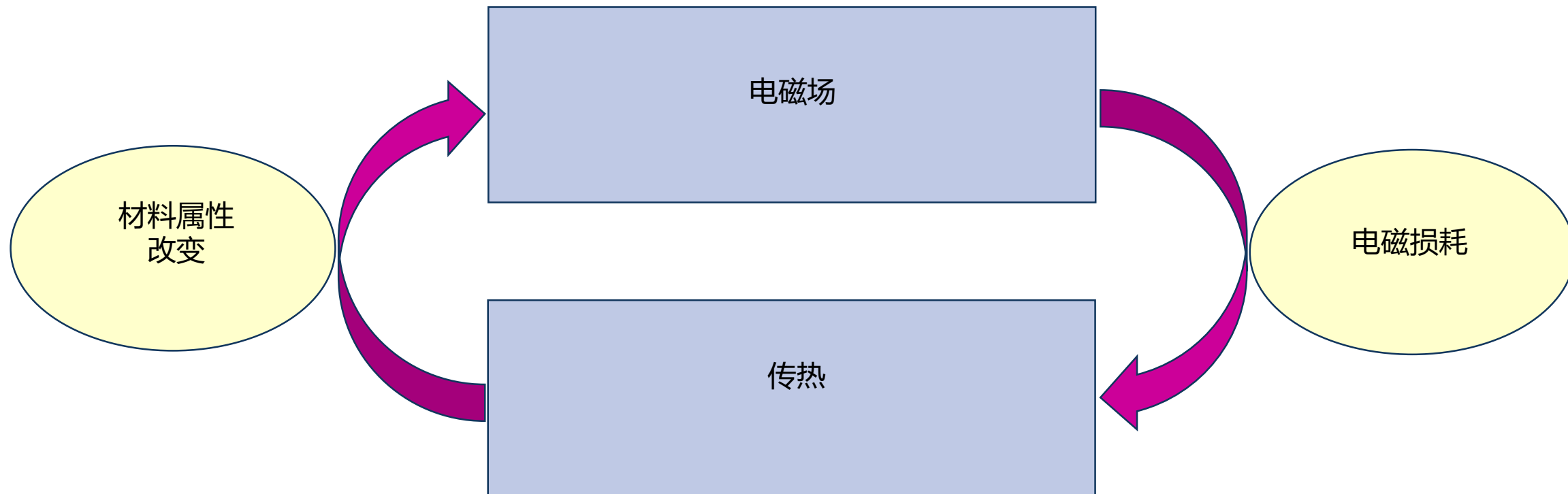
总源项

反射系数

分布在xy平面

由于吸收引起的衰减

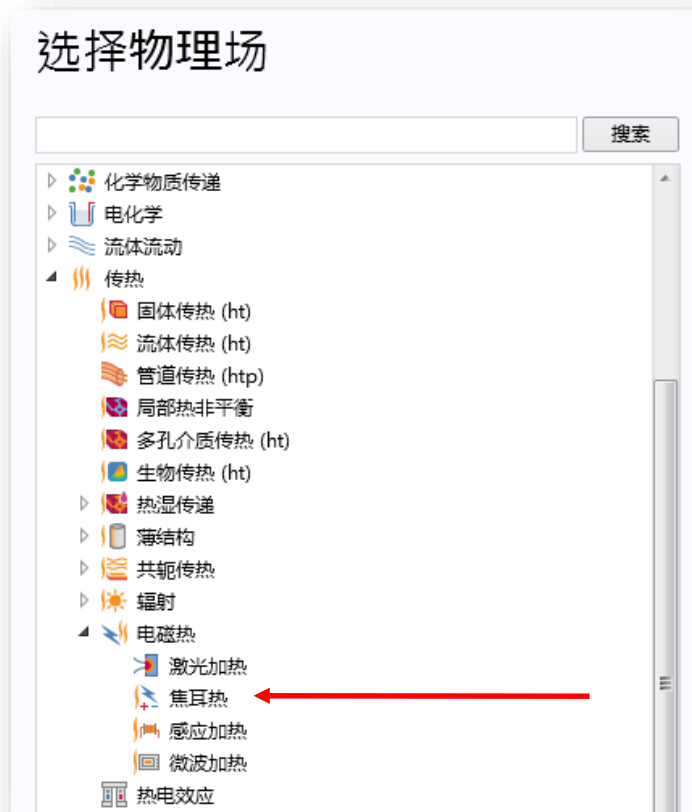
电磁热



电磁场和传热问题的双向耦合

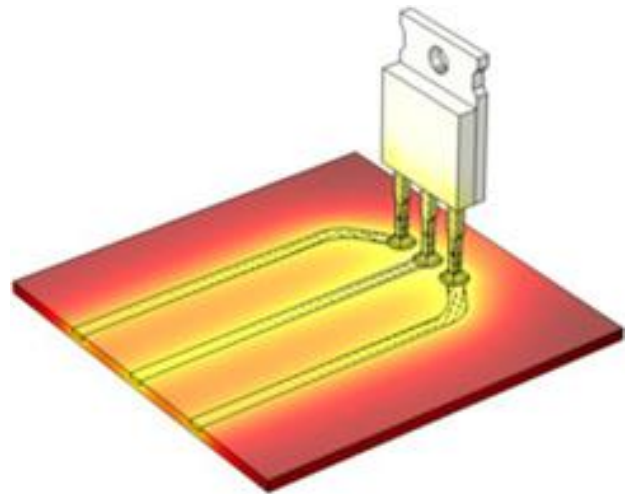
COMSOL 中的电磁热仿真

- COMSOL 用户能够通过选择若干预置接口来模拟各种电磁热现象



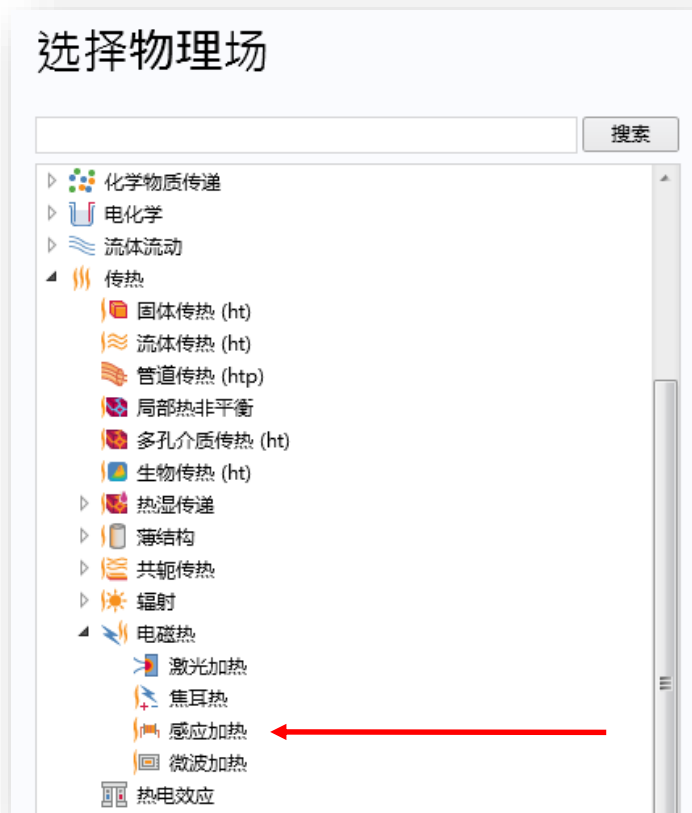
- 焦耳热

- 一个导体和绝缘体系统中的驱动电流



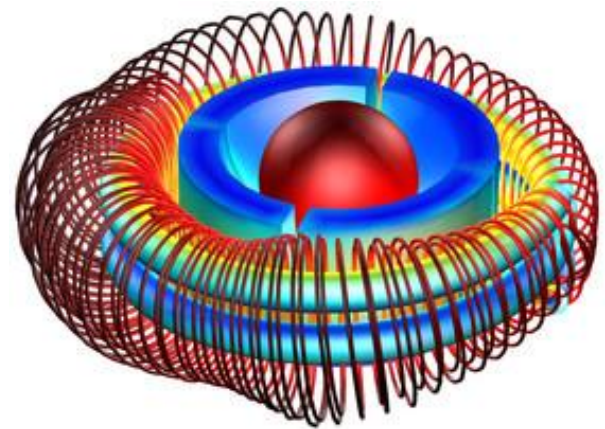
COMSOL 中的电磁热仿真

- COMSOL 用户能够通过选择若干预置接口来模拟各种电磁热现象



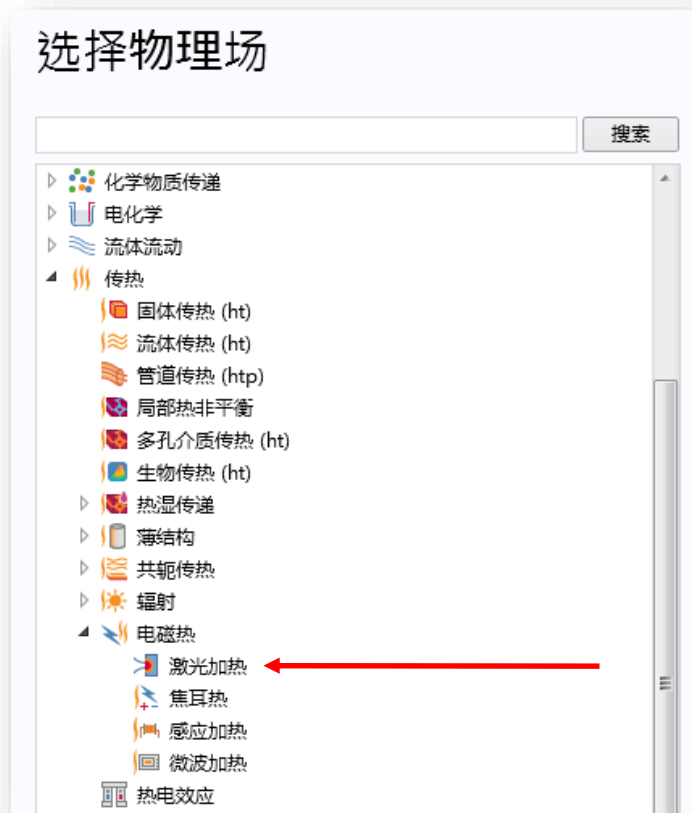
- 感应热

- 时变磁通量在导体域中感应电流
- 涡流
- 集肤效应



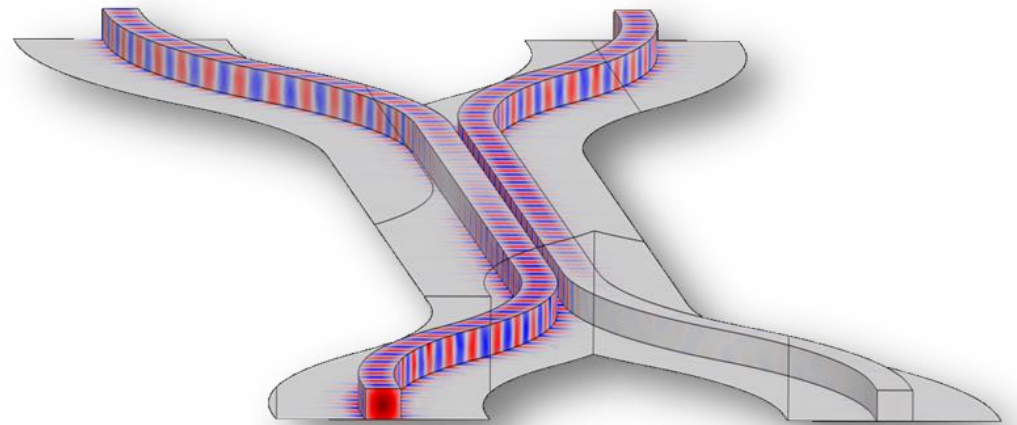
COMSOL 中的电磁热仿真

- COMSOL 用户能够通过选择若干预置接口来模拟各种电磁热现象



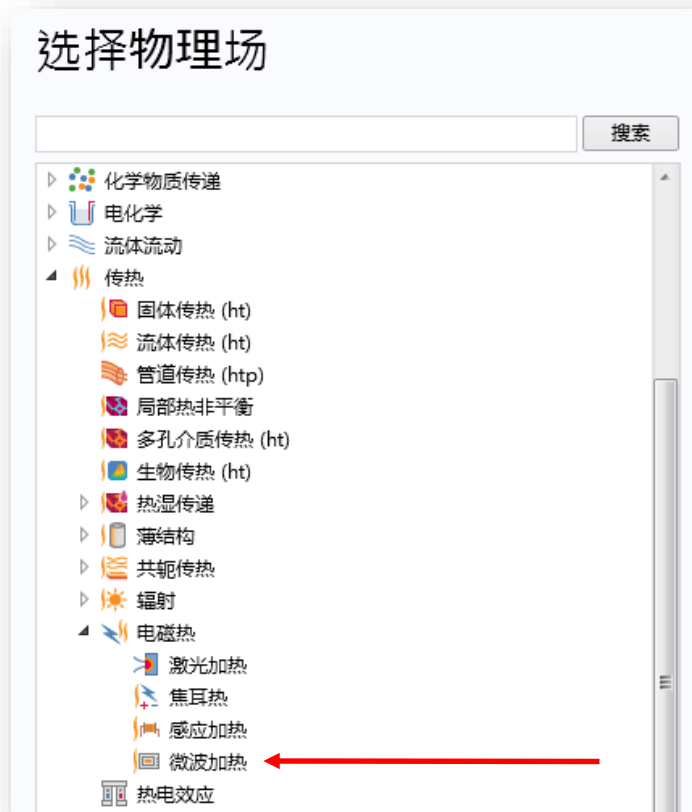
- 激光加热

- 远大于波长区域中的电磁波传输
- 光通信系统

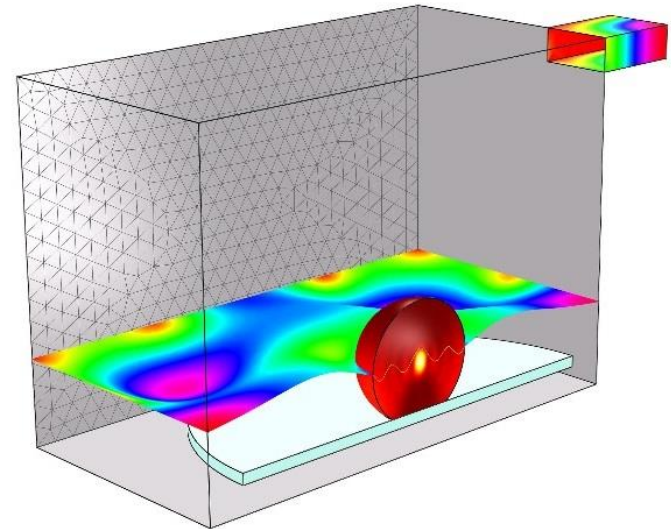


COMSOL 中的电磁加热仿真

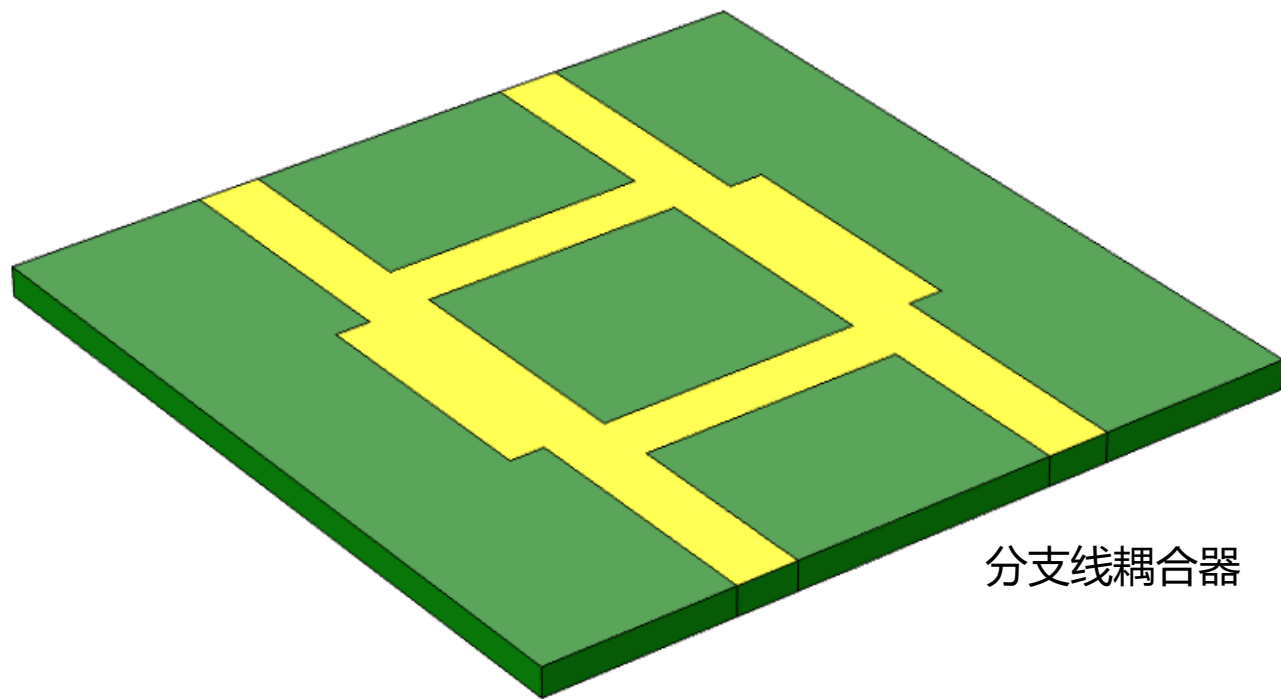
- COMSOL 用户能够通过选择若干预置接口来模拟各种电磁热现象



- 微波加热
 - 电磁场的空间变化与器件尺寸可比拟
 - 微波炉



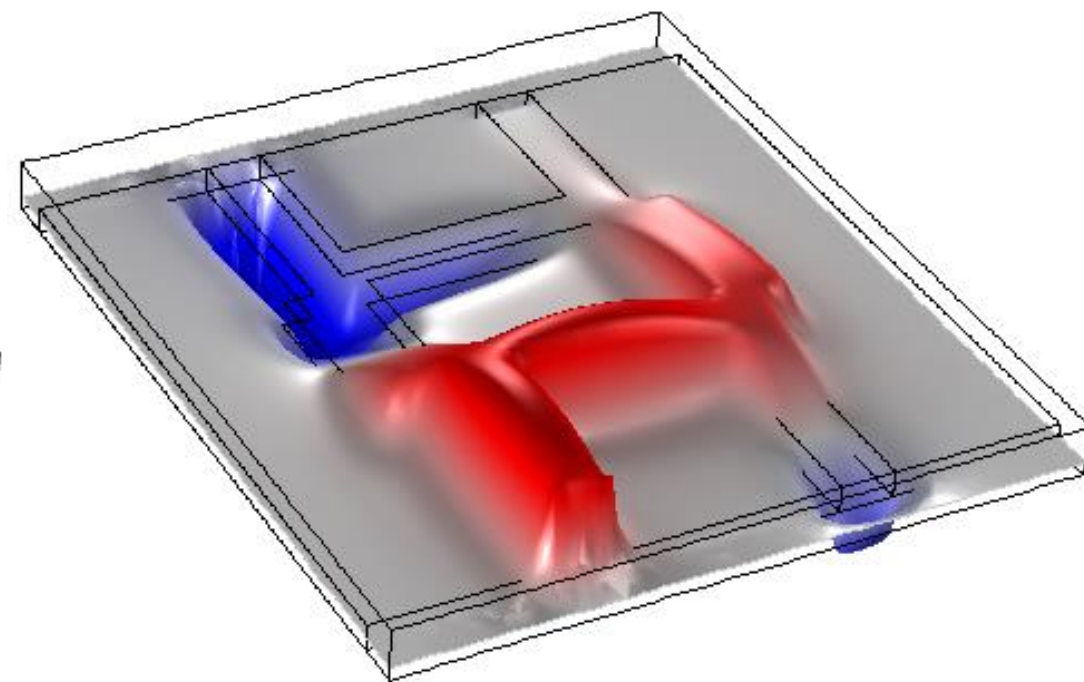
器件尺寸与波长可比拟



分支线耦合器

电磁波，频域接口

$$\nabla \times \frac{1}{\mu} (\nabla \times E) - \epsilon \omega^2 E = -j \omega J$$



RF 模块
波动光学模块

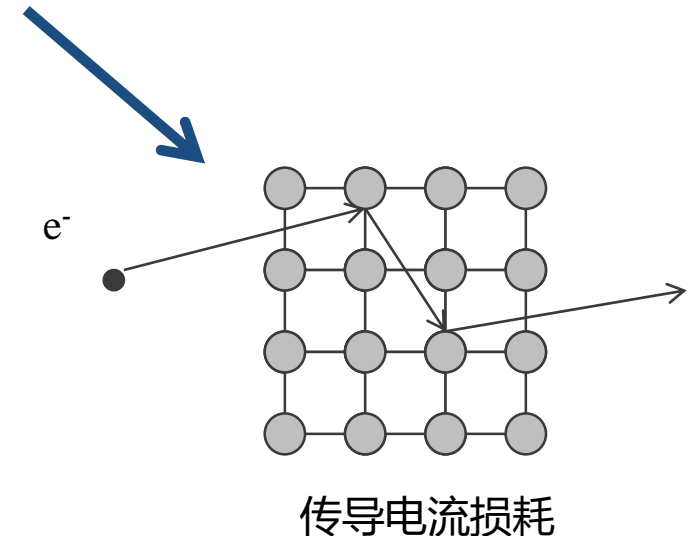
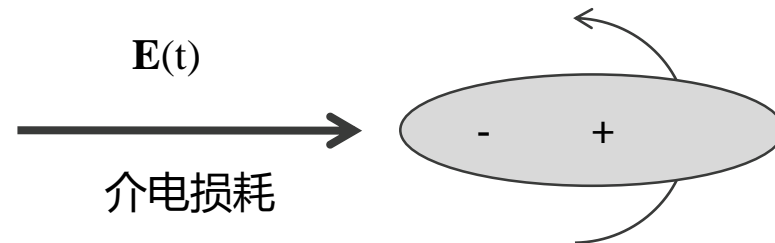
旋度 - 旋度方程包括损耗项

$$\nabla \times (\mu_r^{-1} \nabla \times \mathbf{E}) - k_0^2 (\epsilon_r - j\sigma / \omega \epsilon_0) \mathbf{E} = \mathbf{0}$$

$$\mu_r = \mu'_r - j\mu''_r$$

磁导率，代表磁损耗

$$\epsilon_r = \epsilon'_r - j\epsilon''_r$$



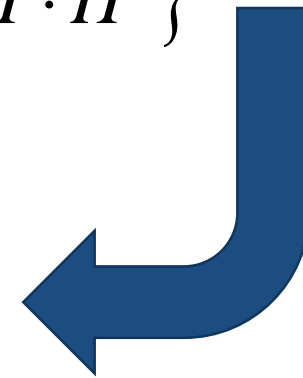
电磁损耗热源

- Poynting定理：损耗的功率

$$\begin{aligned} Q_{RMS} &= \frac{1}{2} \operatorname{Re} \left\{ \sigma E \cdot E^* + j\omega D \cdot E^* + j\omega B \cdot H^* \right\} \\ &= \frac{1}{2} \left\{ \sigma E \cdot E^* + \omega \varepsilon_r'' E \cdot E^* + \omega \mu_r'' H \cdot H^* \right\} \end{aligned}$$

- 传热方程

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (-k \nabla T) = Q$$



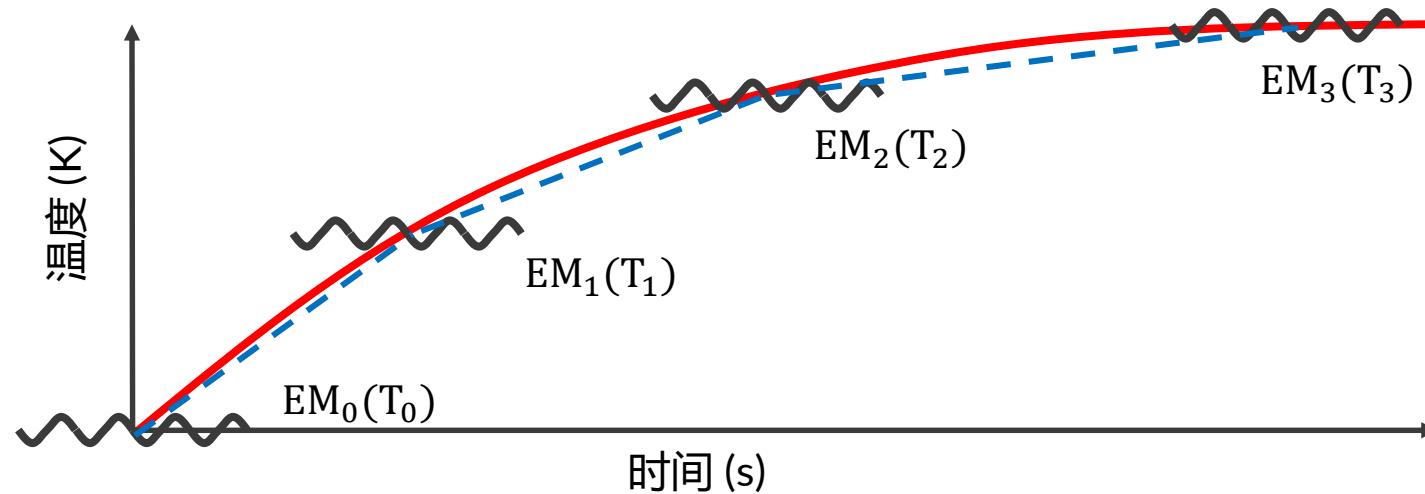
计算中的两种时间尺度

■ 时间尺度

- 电磁场振荡 $\sim 1\text{ GHz}$ \longleftrightarrow $\sim 1\text{ ns}$
- 传热问题的形成量级 $\sim 1\text{ s}$

■ 求解

- 时域中求解传热问题，频域中求解电磁问题，当材料属性明显改变时更新解



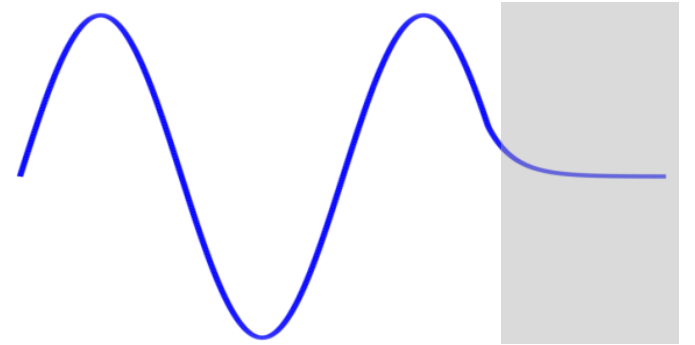
阻抗边界条件

- 集肤深度

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\mu\omega\sigma}}$$

- 良导体、非磁性物质的基本原则： $\sigma \approx 6 \times 10^7 S/m$ $\mu_r = 1$

60 Hz : $\delta \approx 0.8 \text{ cm} \sim 1 \text{ cm}$
1 GHz : $\delta \approx 2 \text{ }\mu\text{m} \sim 1 \text{ }\mu\text{m}$



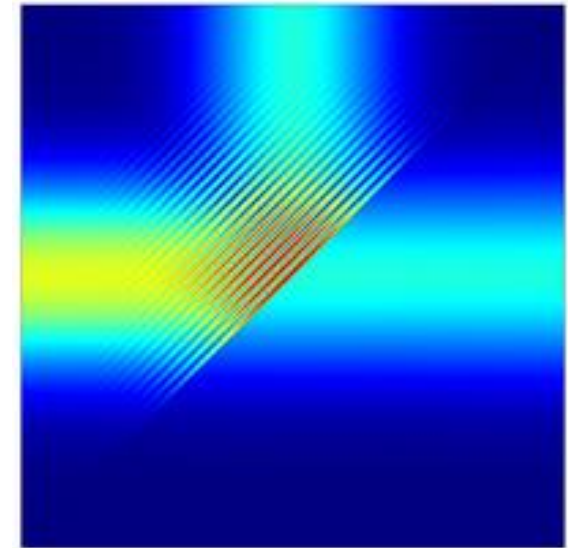
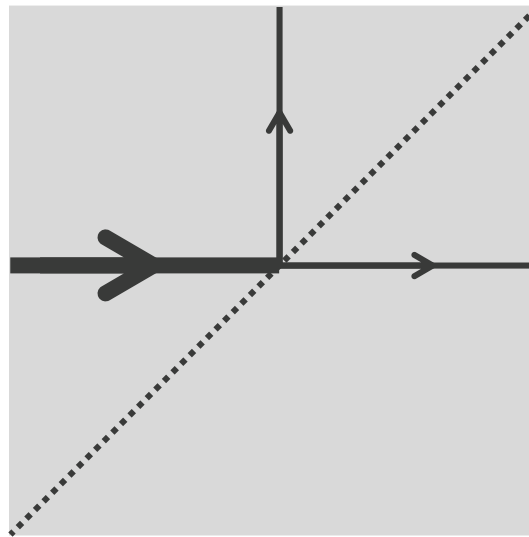
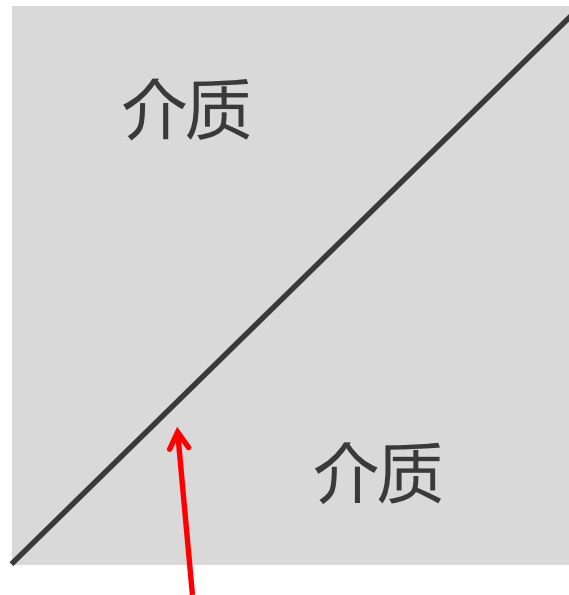
- 如果 $\delta \ll \lambda$ ，不对这个区域剖分网格！使用微扰理论的结果来快速指数衰减导体内部的场



阻抗
边界
条件

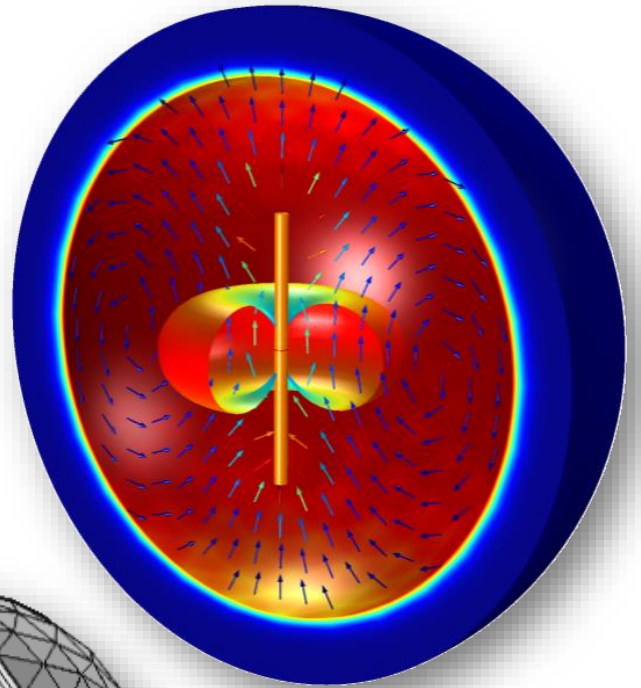
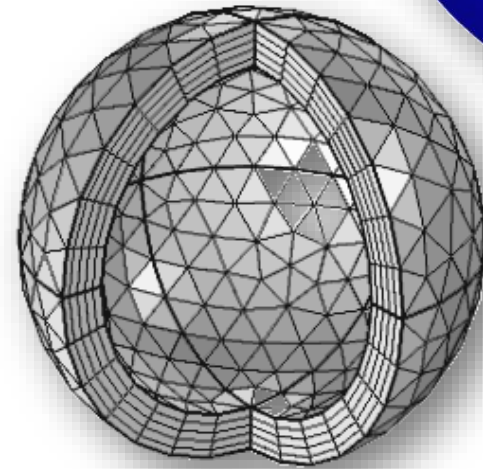
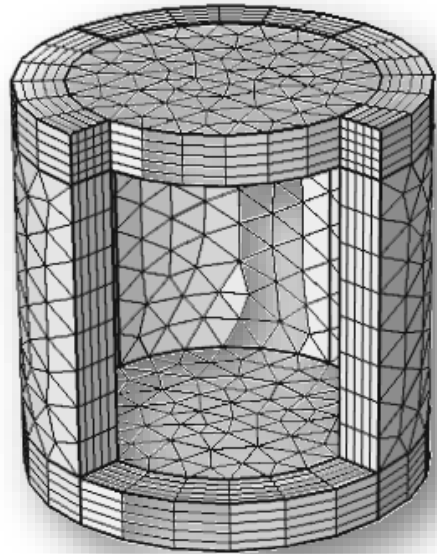
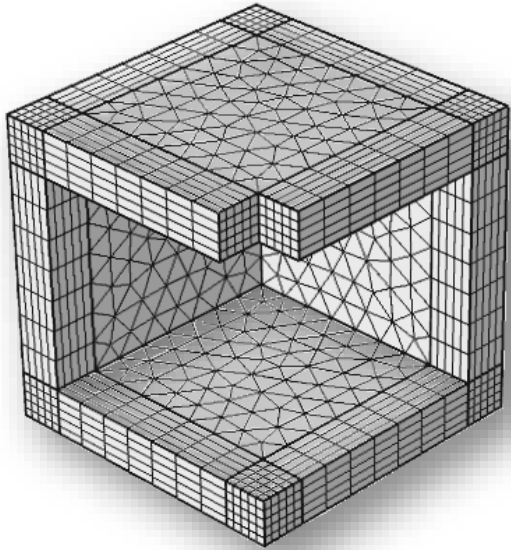
过渡边界条件

- 用于薄、部分透明的区域
- 层很薄且需要极其细化的网格来解析内部
- 衰减长度大于厚度，所以部分电磁场穿过层传输



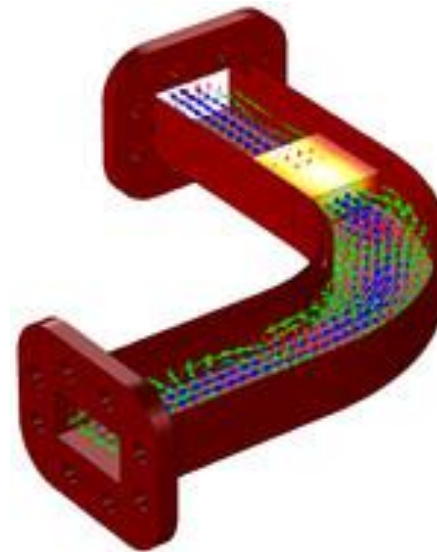
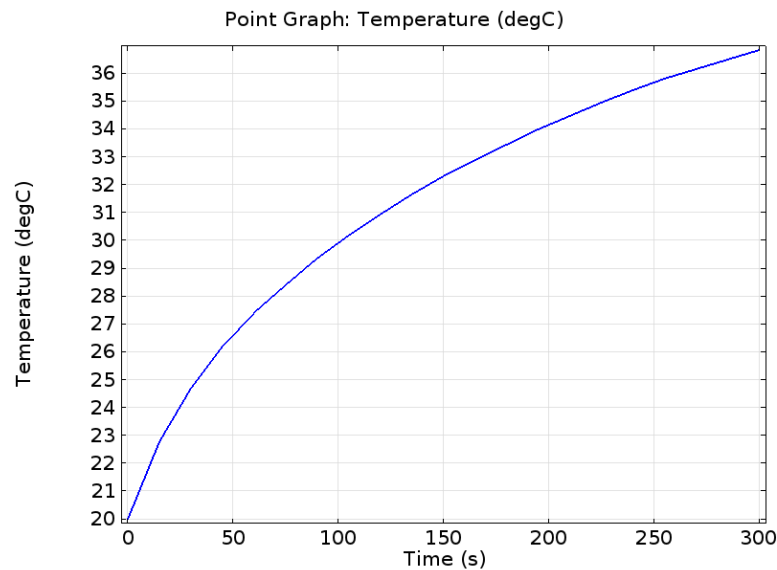
完美匹配层 (PML)

- 使用完美匹配层吸收出射的行波
- COMSOL 包括笛卡尔、圆柱形和球形层域的 PML

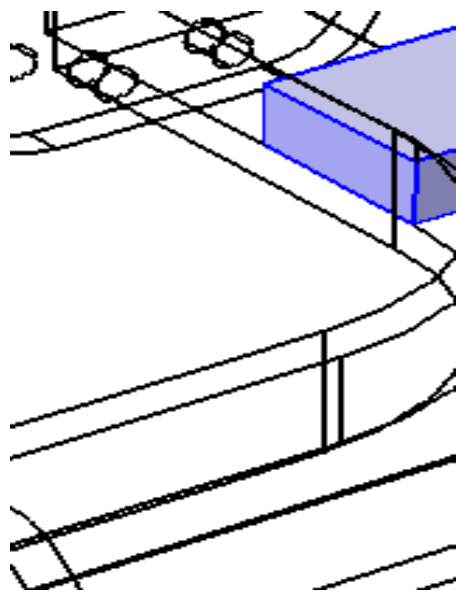


Hands on: 微波加热

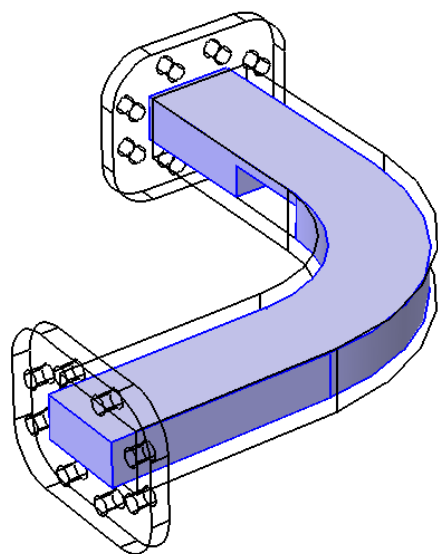
- 有介质块波导的 RF 加热
 - 电磁损耗是热源
 - 时域中求解的传热问题 (5 分钟)
 - 频域中求解的 RF 问题 (10 GHz), 当温度明显改变材料属性时更新



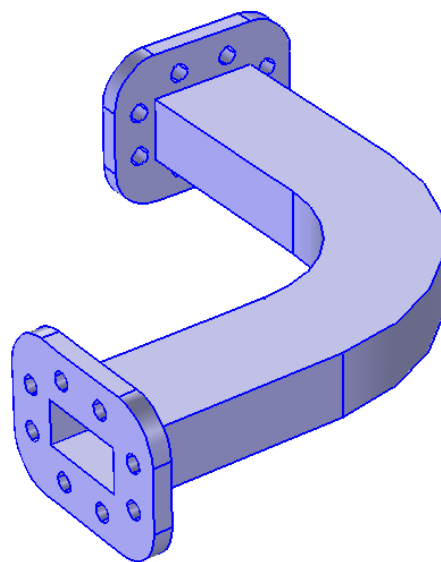
几何



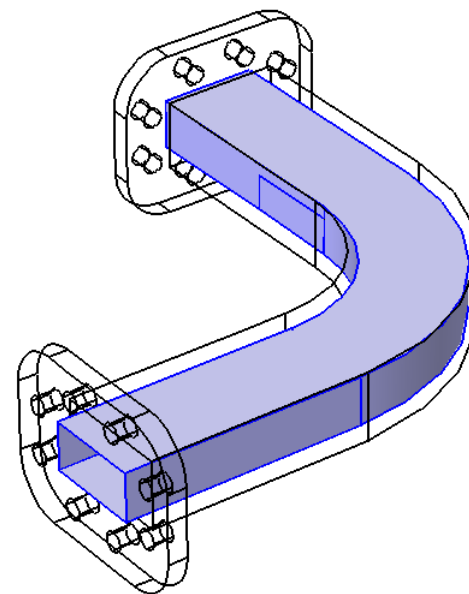
介质块



空气

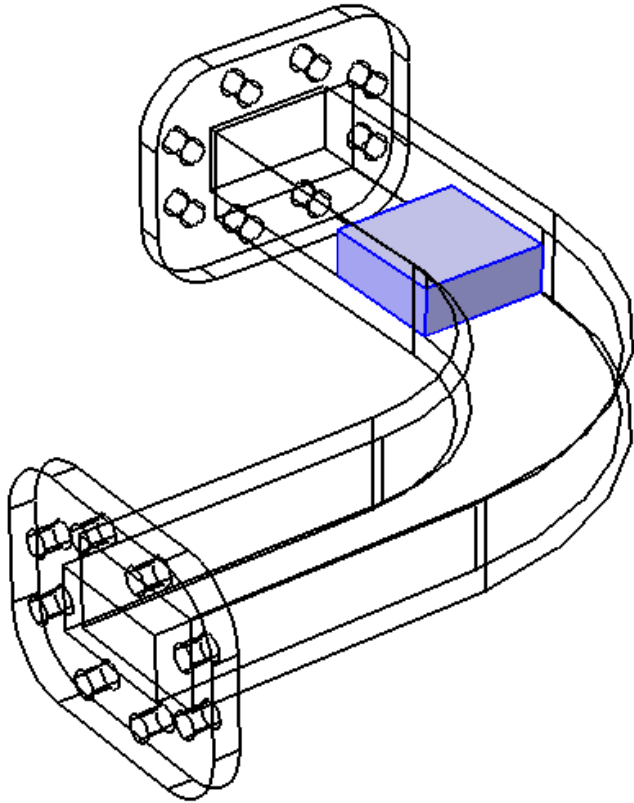


铝体



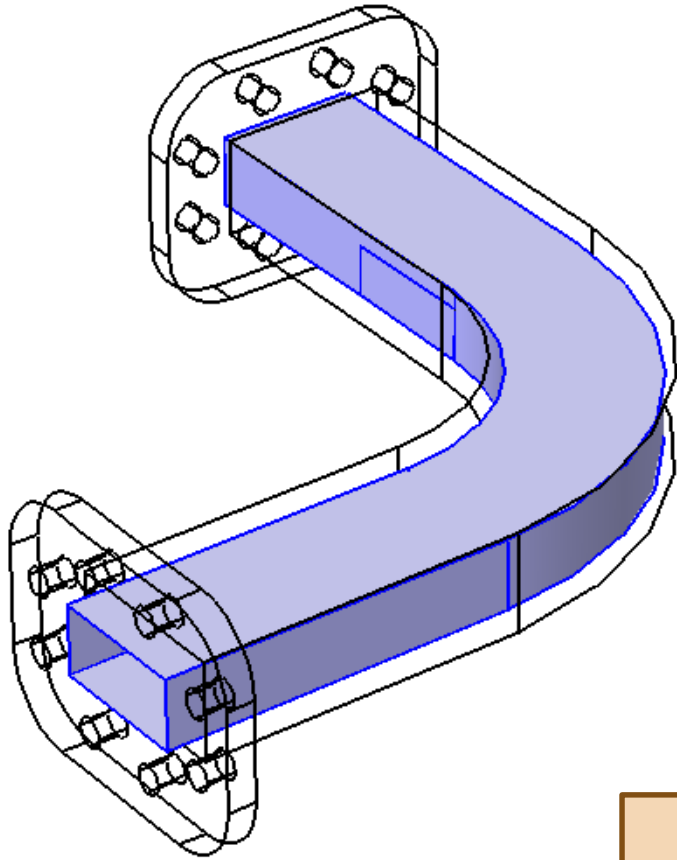
铜涂层

介质块的材料属性



- 介电常数实部 = 2.1
- 损耗角正切: $\epsilon'' = -\epsilon' \tan \delta$
$$\delta = 0.001 \left(1 + \frac{T}{300[K]} \right)$$
- 密度 = 2200 kg/m³
- 热容 $C_p = 1050 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
- 导热系数
- $k = 0.3 \left(\frac{T}{300[K]} \right) \left[\frac{W}{m \cdot K} \right]$

铜涂层中的集肤深度



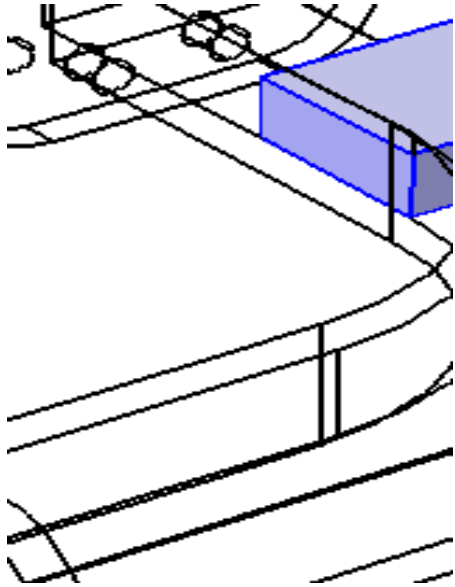
- 电导率 $\sigma \approx 6 \times 10^7 S/m$
- 相对磁导率 $\mu_r = 1$
- 10 GHz 下:

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\mu\omega\sigma}} \approx 0.6 \mu m$$

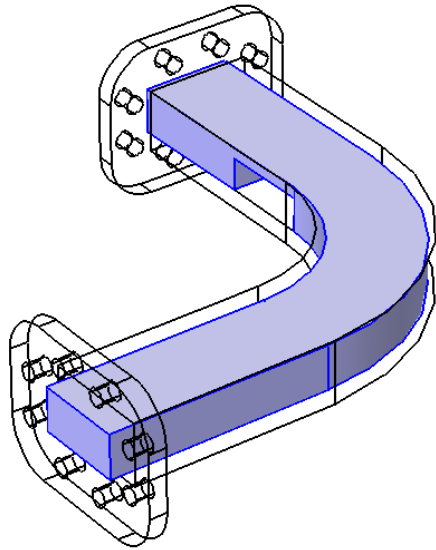
- 器件尺寸 $\sim cm$

使用阻抗边界条件

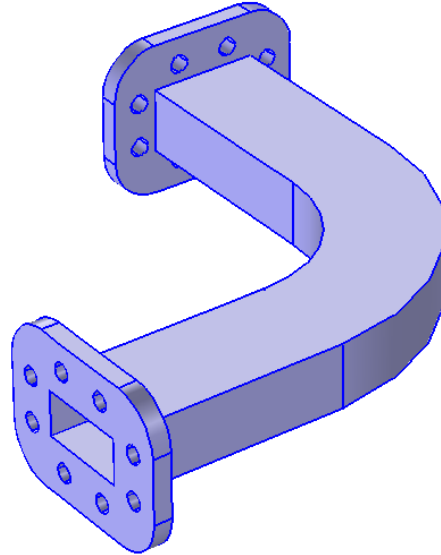
空气和介质中的电磁波



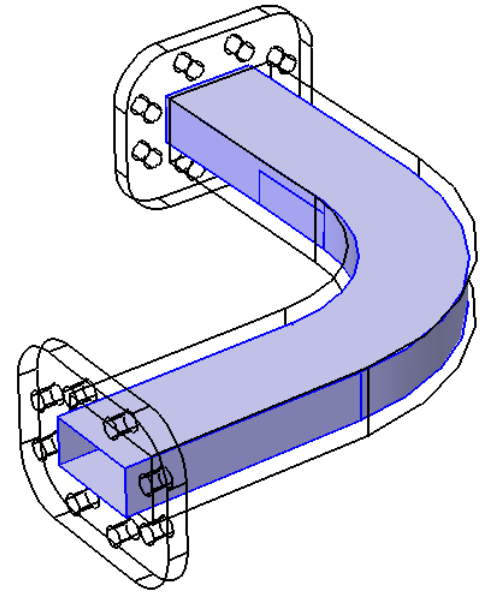
介质块



空气



铝体



铜涂层

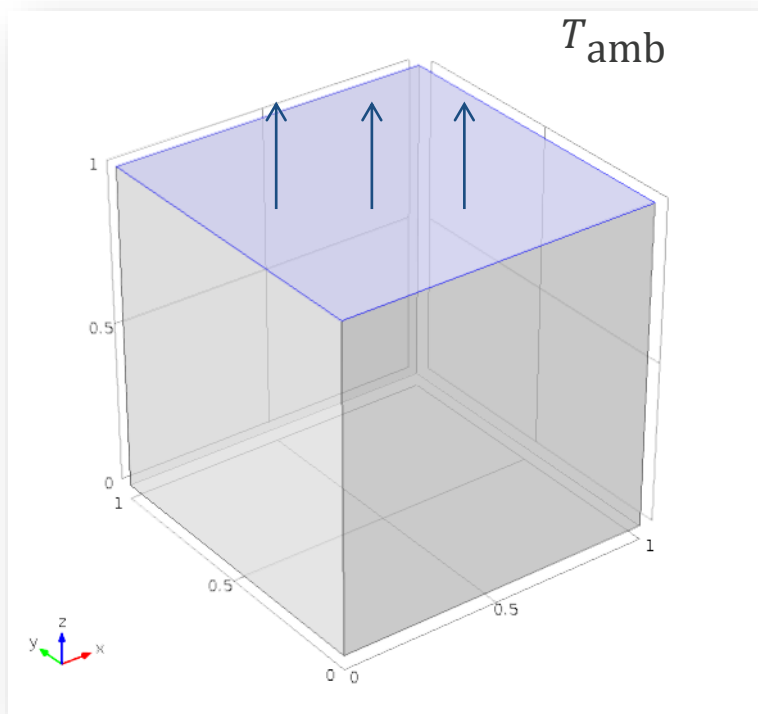
- 电磁波将在波导的铜涂层和铝实体中快速衰减
- 假设导体中的电场可忽略，仅求解空气和介质中的电磁波

热辐射

热辐射

■ 与环境的辐射交换

$$- q = \varepsilon \sigma (T_{\text{amb}}^4 - T^4)$$



热辐射

■ 外部辐射源

- 全局>外部辐射源
- 对于较远的辐射源(在计算区域以外的, 比如太阳)



▼ 外部辐射源

源位置:
太阳位置

位置定义:
坐标

位置

纬度 (+ to N)	经度 (+ to E)	时区 (+UTC)
51.477	-0.0005	0

日期

天	月	年
01	06	2012

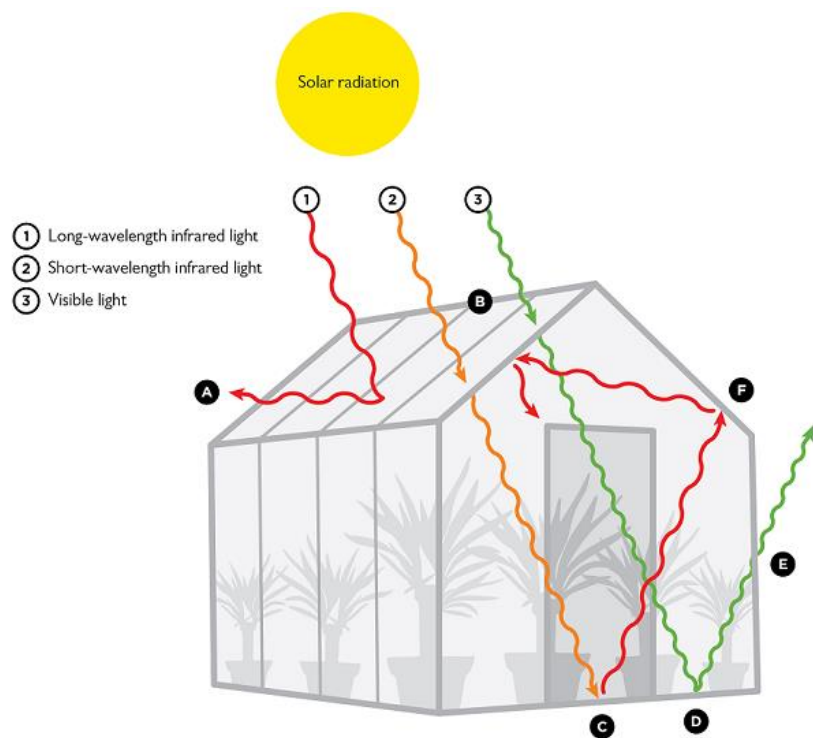
当地时间

小时	分钟	秒
12	0	0

太阳辐射:

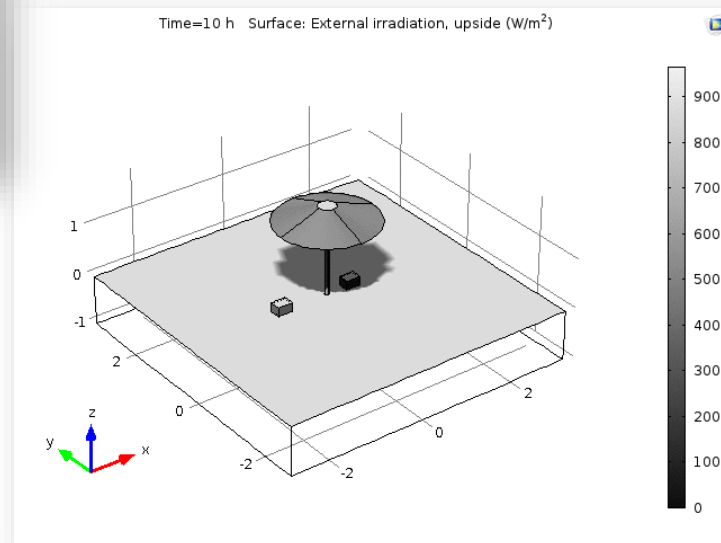
I_s 1000[W/m²] W/m²

太阳对环境辐射



太阳辐射对温室中温度的影响

- ▲ 表面对表面辐射传热: Heat Transfer with Surf
- ▶ 固体传热: Heat Transfer in Solids 1
- ▢ 初始值: Initial Values 1
- ▢ 热绝缘: Thermal Insulation 1
- ▢ 初始值: Initial Values 2
- ▢ 外部辐射源: External Radiation Source 1
- ▢ 温度: Temperature 1
- ▢ 漫射面: Diffuse Surface 1
- ▢ 漫射面: Diffuse Surface 2
- ▢ 薄层: Thin Layer 1
- ▢ 热通量: Heat Flux 1



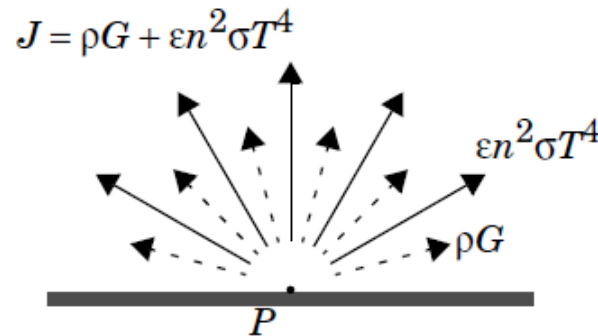
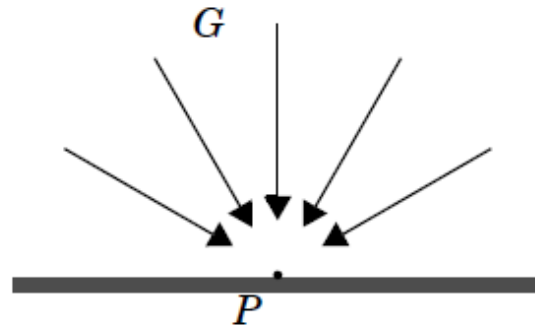
热辐射

■ 表面之间的辐射交换(S2S)

- $q = G - J$
- G 为入射能量通量
- J 为辐射度（通量），包含反射和发射能量
- 辐射可以是波长依赖的

☀ 表面对表面辐射传热 (ht)

- ▢ 固体 1
 - ▢ 不透明度 1
- ▢ 初始值 1
- ▢ 热绝缘 1
- ▢ 漫反射表面 1



▼ 辐射设置

辐射率波长依赖性:

多谱带

波长带数:

2

间隔终点 1:

λ_1 2.5[um] m

透明介质折射指数:

n 1 1

外部辐射, 谱带 "1" :

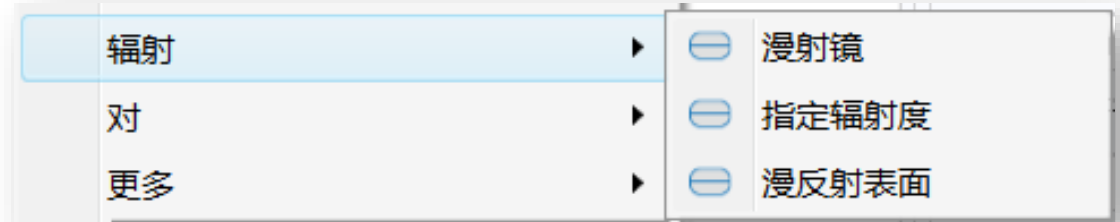
外部透明

外部辐射, 谱带 "2" :

外部透明

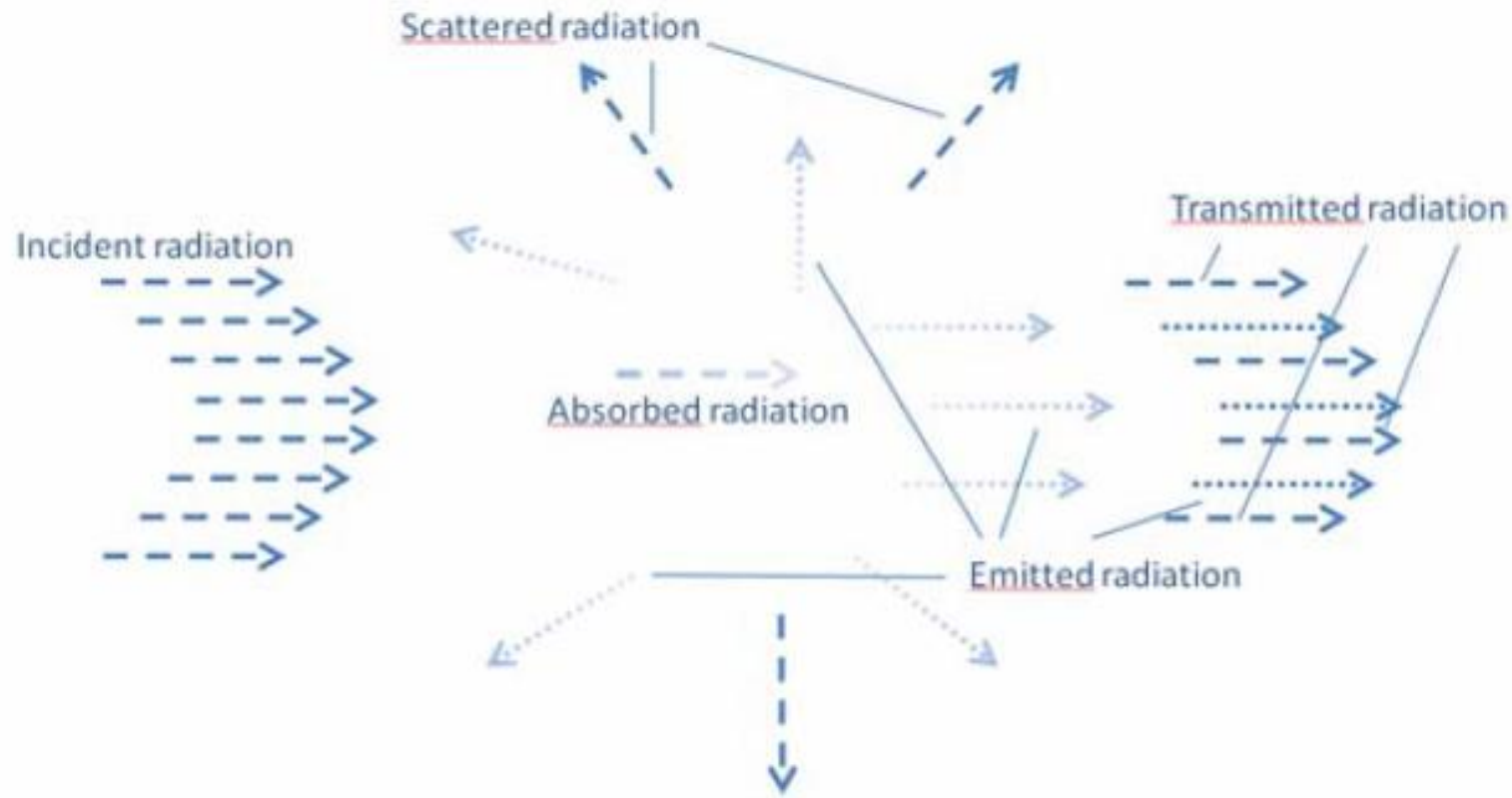
边界条件 (S2S)

- 漫反射表面: $J = \rho G + \varepsilon e_b(T) = (1 - \varepsilon)G + \varepsilon e_b(T)$
- 漫射镜: $J = G \Rightarrow q = 0$
 - 漫射镜面, 完全反射
- 指定辐射度 (无反射): $J = \varepsilon e_b(T)$
 - $e_b(T) = n^2 \sigma T^4$ 黑体辐射定律
 - 波长依赖: 计算每一个光谱带
 - J 也可以自定义



半透明介质中的热辐射 (RPM)

- 存在吸收辐射的介质存在（极性分子）



半透明介质中的热辐射 (RPM)

- 辐射传递方程 (RTE)

$$\Omega \cdot \nabla I(\Omega) = \underbrace{\kappa I_b(T)}_{\text{吸收}} - \underbrace{\beta I(\Omega)}_{\text{衰减}} + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} I(\Omega') \underbrace{\varphi(\Omega', \Omega)}_{\text{散射}} d\Omega'$$

- 计算量非常大:

- 对光学厚介质进行了简化 $\tau = \int_0^S \kappa ds \gg 1$

- Rosseland 近似 → 热导率的额外添加项 $k = \frac{16n^2\sigma T^3}{3\beta_r}$
 - P1 近似 (球谐) → 增加额外的方程 $-\nabla \cdot (D_{P1} \nabla G) = Q_r$

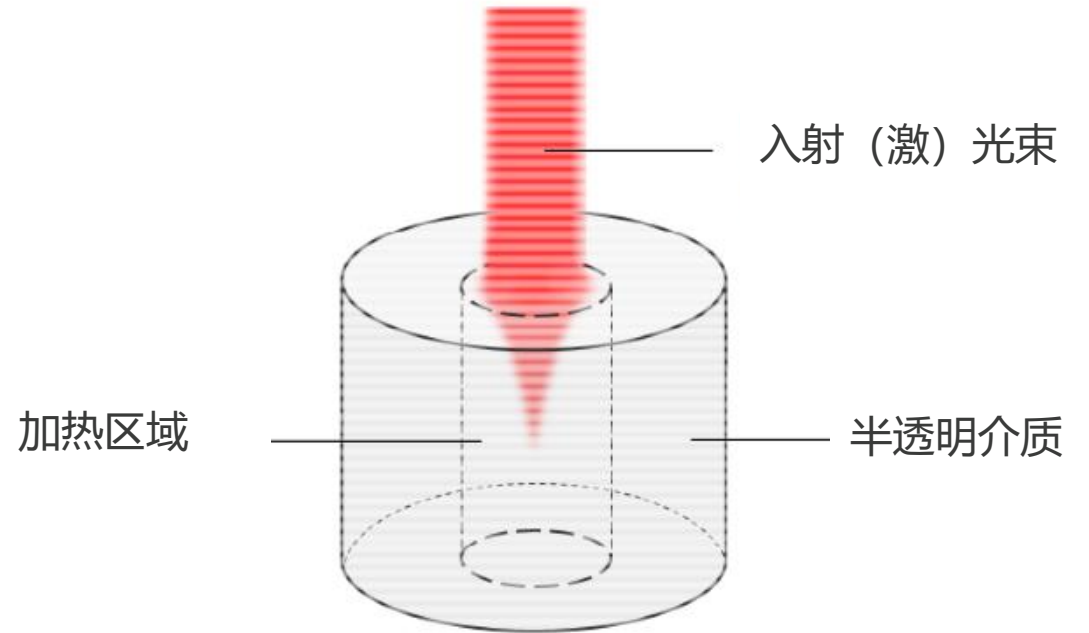
- 做积分形成总和 → 离散坐标方法

吸收介质中的辐射束

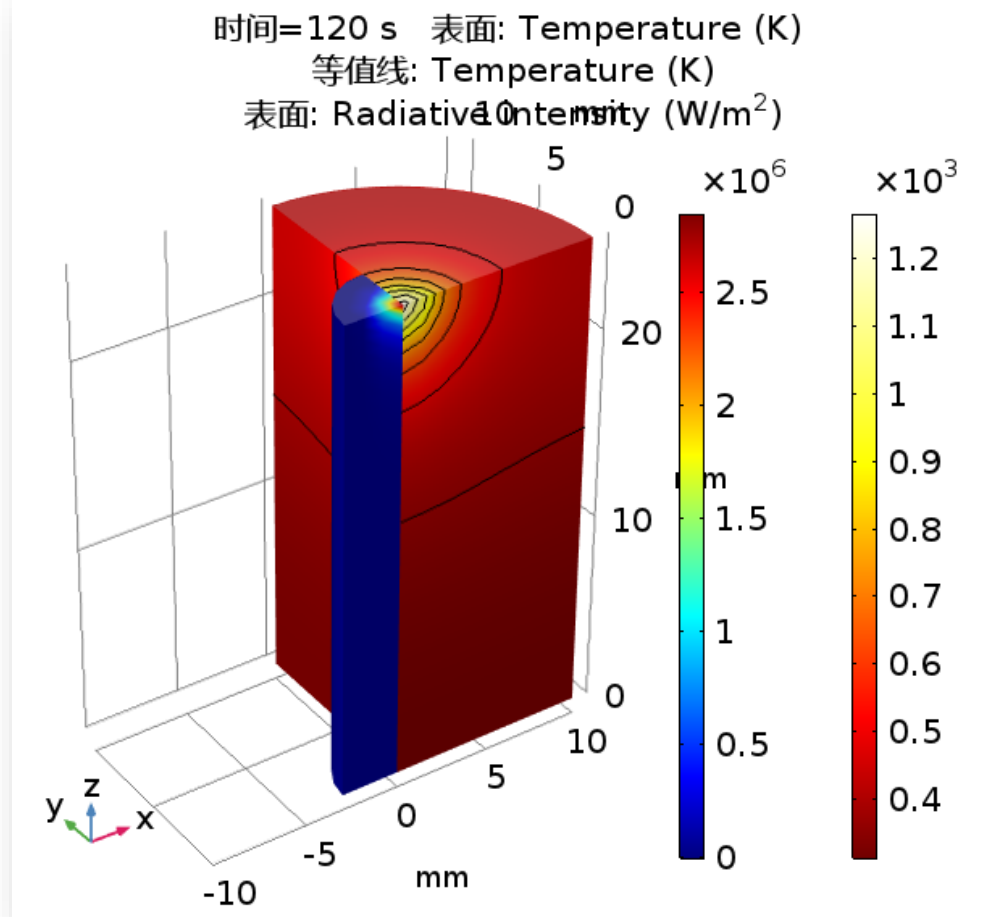
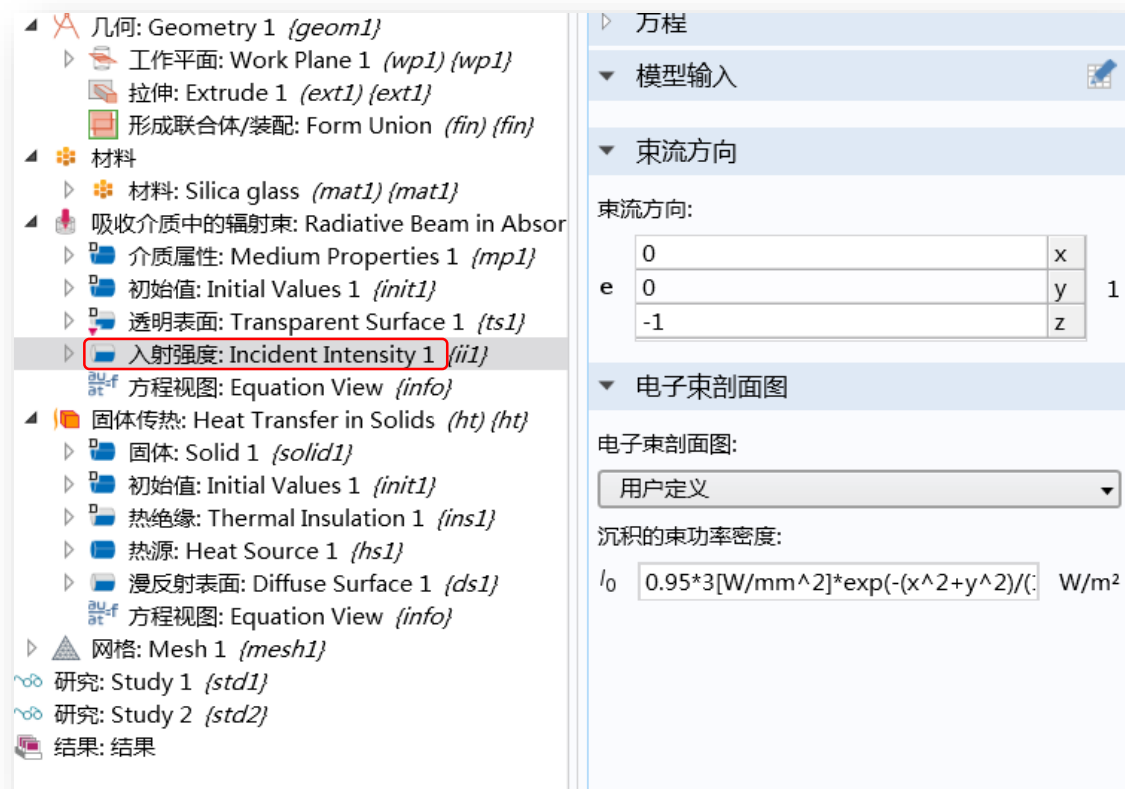
- 描述入射光束在半透明介质中的传播和衰减
- 辐射传递方程（RTE）的简化
 - 辐射光束在传播过程中保持方向不变
 - 传播过程中无折射、无反射、无散射
 - 在入射波长范围内无发射（适用于激光）
- Beer-Lambert 定律：

$$\frac{\mathbf{e}_i}{\|\mathbf{e}_i\|} \cdot \nabla I_i = -\kappa I_i$$

$$Q_r = \sum_i \kappa I_i$$

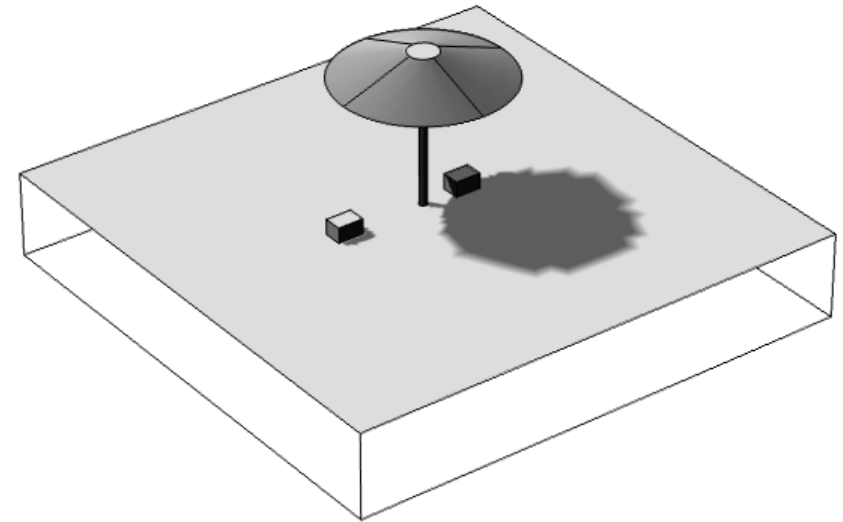


吸收介质中的辐射束



Hands-on: Parasol

- 怎样对放在沙滩阳伞底下冷藏盒中的饮料温度变化进行建模？
 - 表面-表面辐射
 - 发射率与波长相关
 - 太阳热源和环境温度随时间发生变化

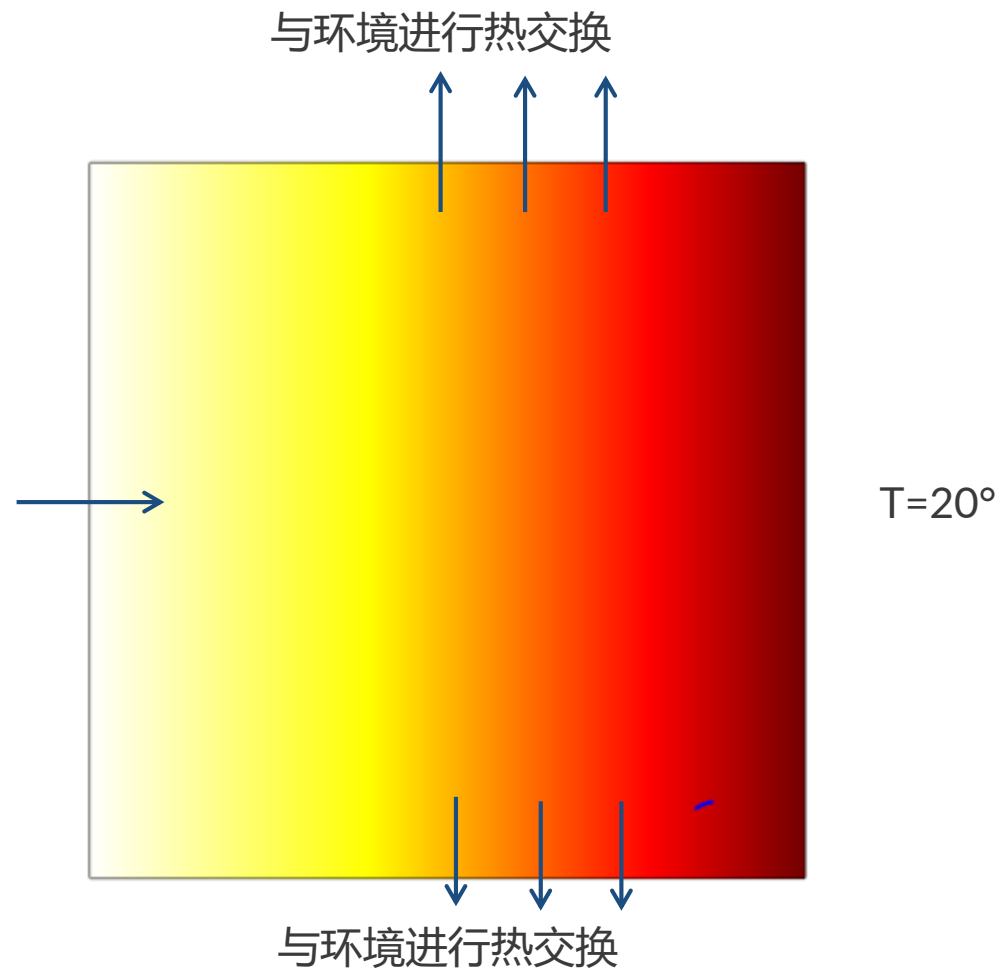


高级特征

等温域, 曲线坐标系, 停止条件, 无限元, 集总热系统

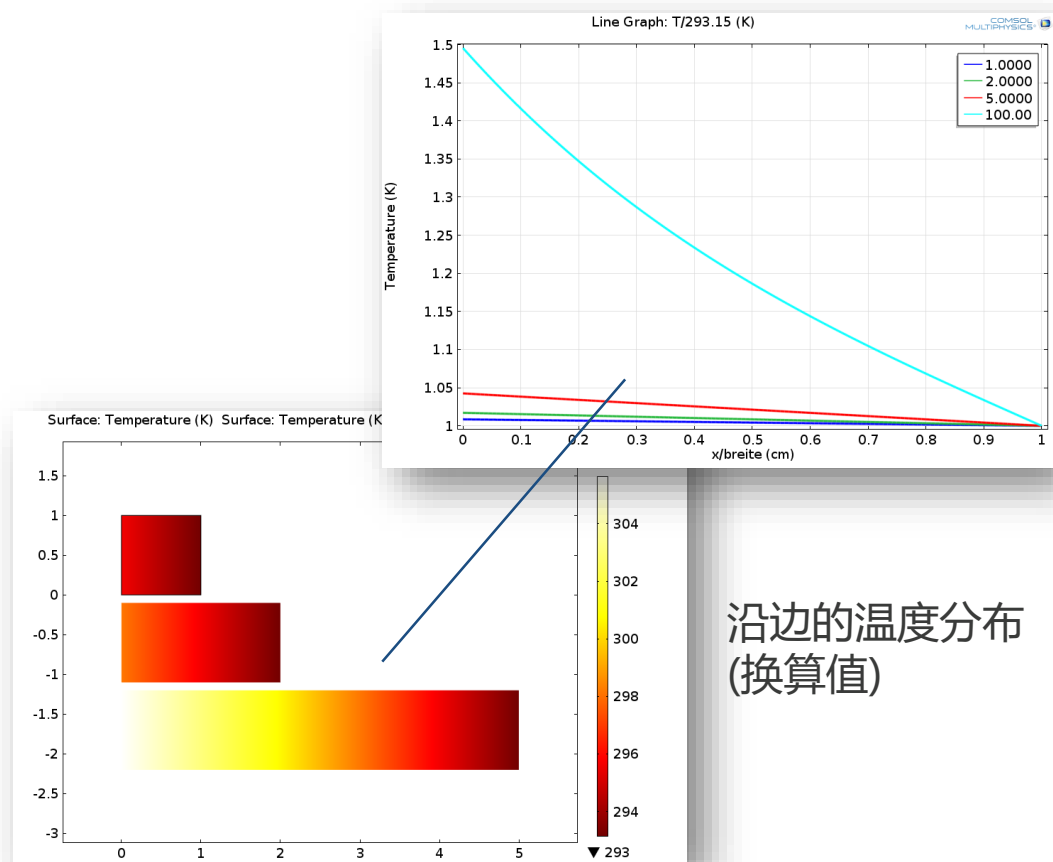
无限元

- 边界可以限制计算区域但可能会导致边缘效应, 比如: 温度边界条件
- 无限元 将温度边界, 移动“到”无限远处 (比例因子: $10^3 \cdot$ 特征长度)



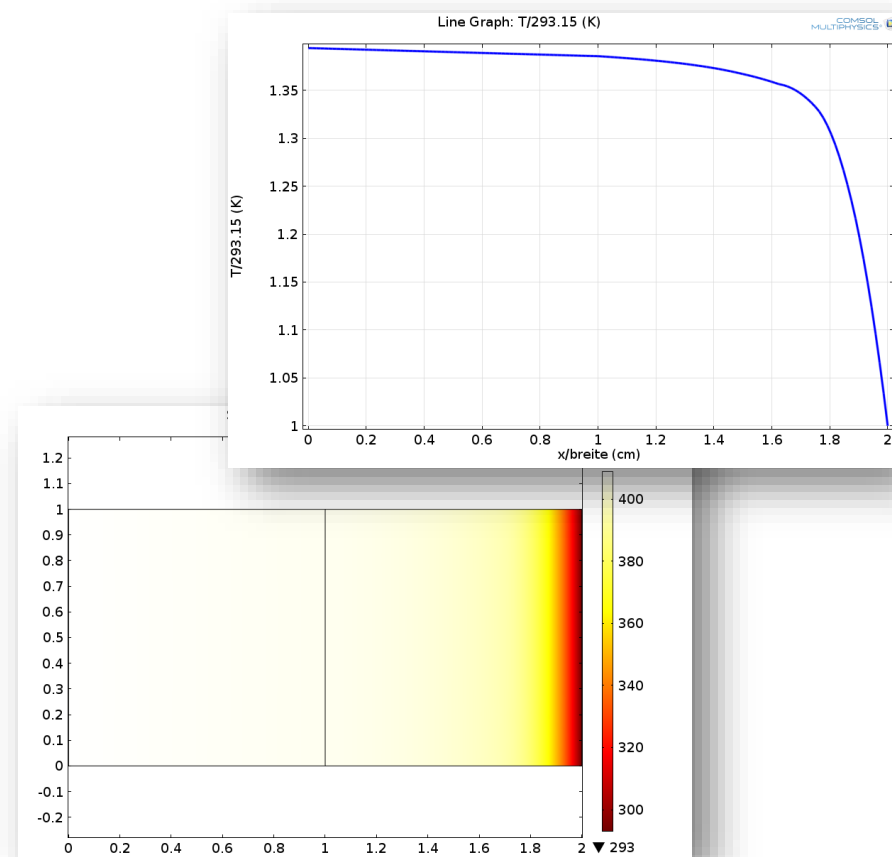
无限元

■ 各种宽度模拟



沿边的温度分布
(换算值)

■ 带有无限元的模拟结果



频域中的传热

固体传热: 固体传热 (ht)

固体: 固体 1

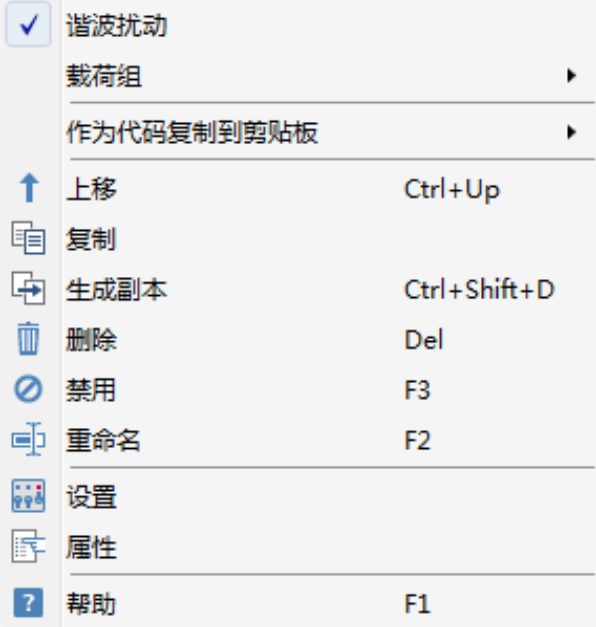
初始值: 初始值 1

热绝缘: 热绝缘 1

温度: 温度 1

谐波扰动: 谐波扰动 1

热源: 热源



研究: Study 1 (Frequential)

步骤 1: 稳态: Stationary

步骤 2: 频域扰动: Frequency-Domain Perturbation

求解器配置 (Solver Configuration)

作业配置 (Job Configuration)

研究: Study 2 (Time-dependent)

参数化扫描: Parametric Sweep

步骤 1: 稳态: Stationary

步骤 2: 瞬态: Time Dependent

求解器配置 (Solver Configuration)

作业配置 (Job Configuration)

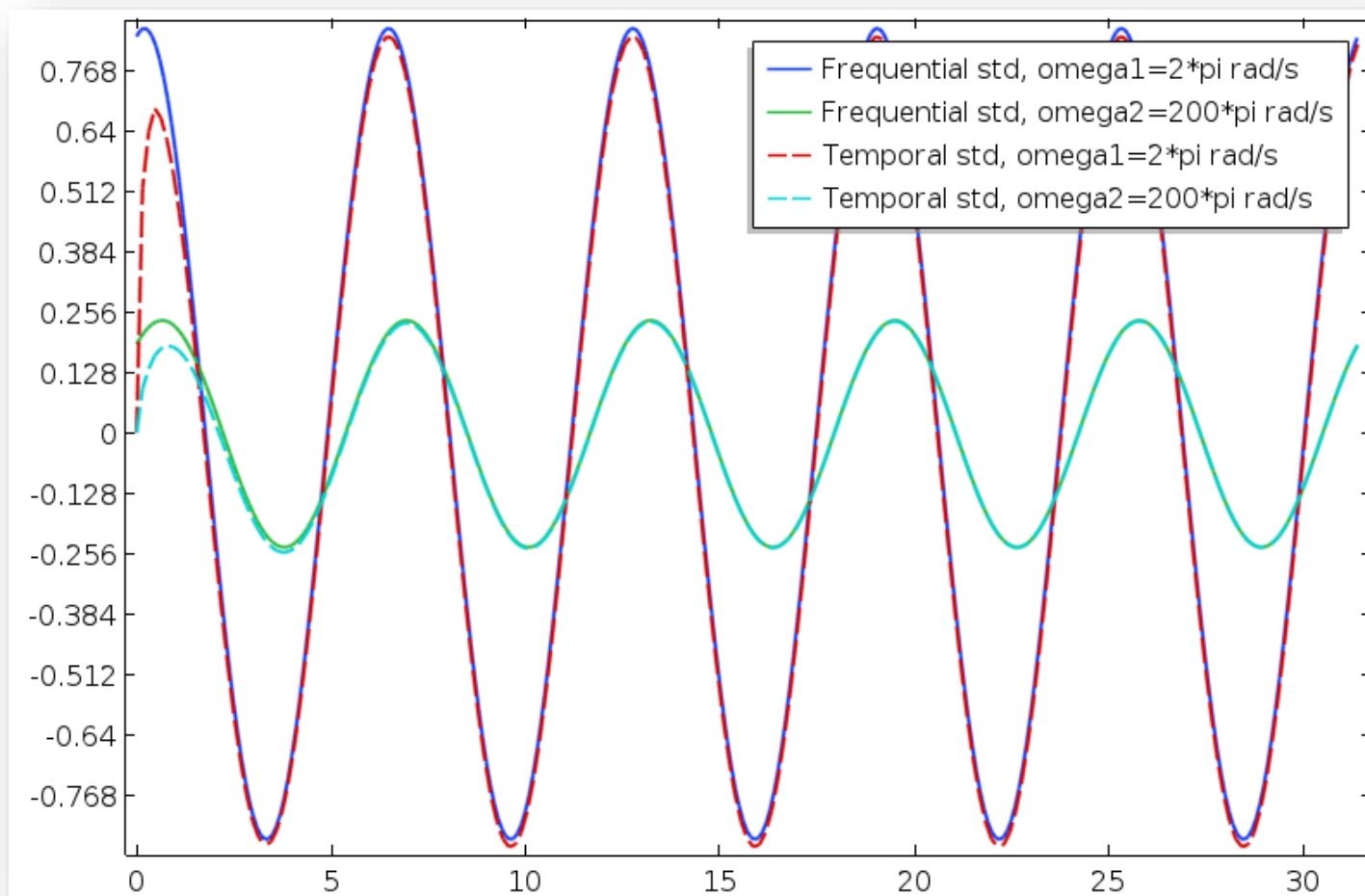
研究: Study 3

步骤 1: 时域到频域 FFT: 时域到频域 FFT

求解器配置 (Solver Configuration)

作业配置 (Job Configuration)

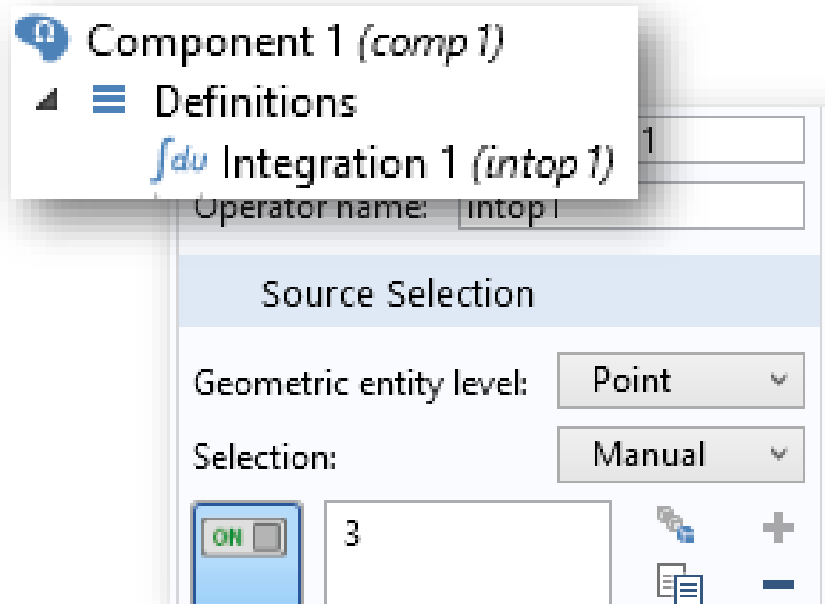
开关中心的温度震荡



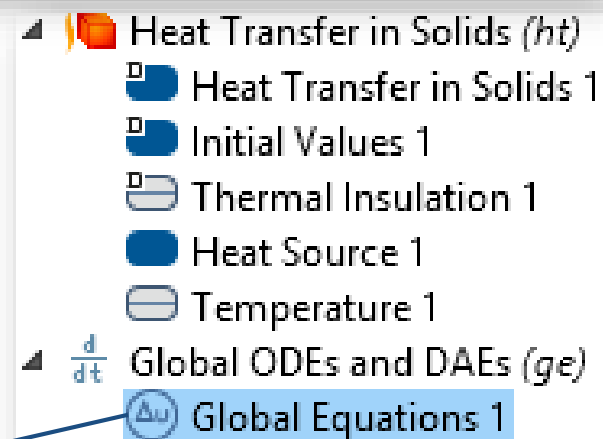
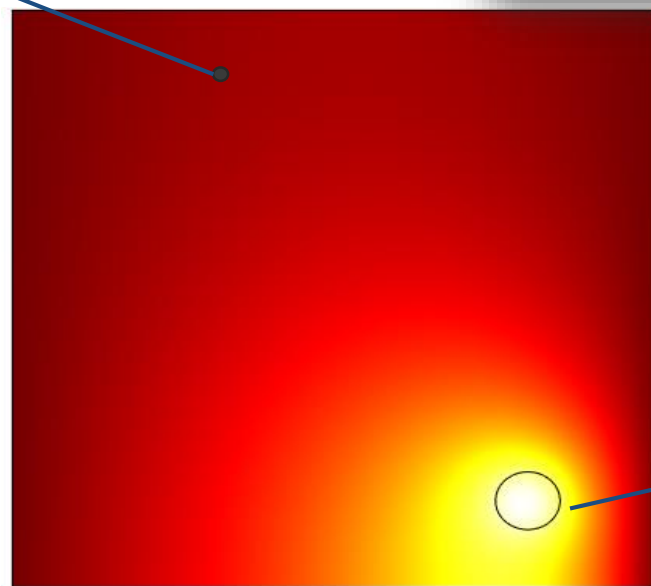
简单的优化

- 使用 „Global Equations“ 可以实现简单的优化问题, 比如: 热源需要有多大, 才能使测量点的温度达到 50°C ?

测量点:
 T 应该为 50°C



Global Equations				
$f(u, u_t, u_{tt}, t) = 0, u(t_0) = u_0, u_t(t_0) = u_{t0}$				
Nam	$f(u, u_t, u_{tt}, t)$ (1)	Initial value (u_c)	Initial value (u_t)	Description
Q_in	intop1(T[1/degC])-50	0	0	Heat source
		0	0	



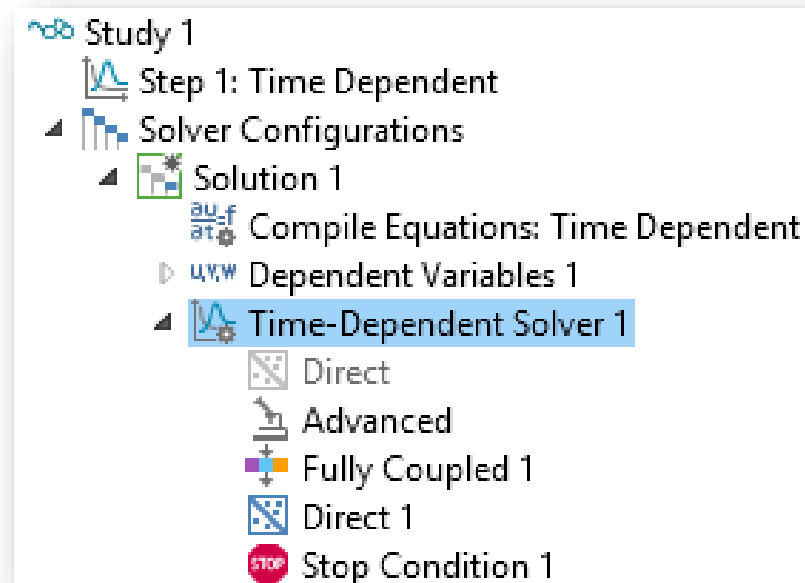
停止条件

- 当特定的条件达到之后需要多久？
- 比如: 咖啡冷却到65° C 需要多长时间？
- 在停止条件中定义的一定是全局表达式:
 - 即使是接口中的因变量, 也必须带上“标签”!

Stop Expressions			
Stop expression	Stop if	Active	Description
comp1.ht.id1.T<65[degC]	True (≥ 1)	✓	Stop express...

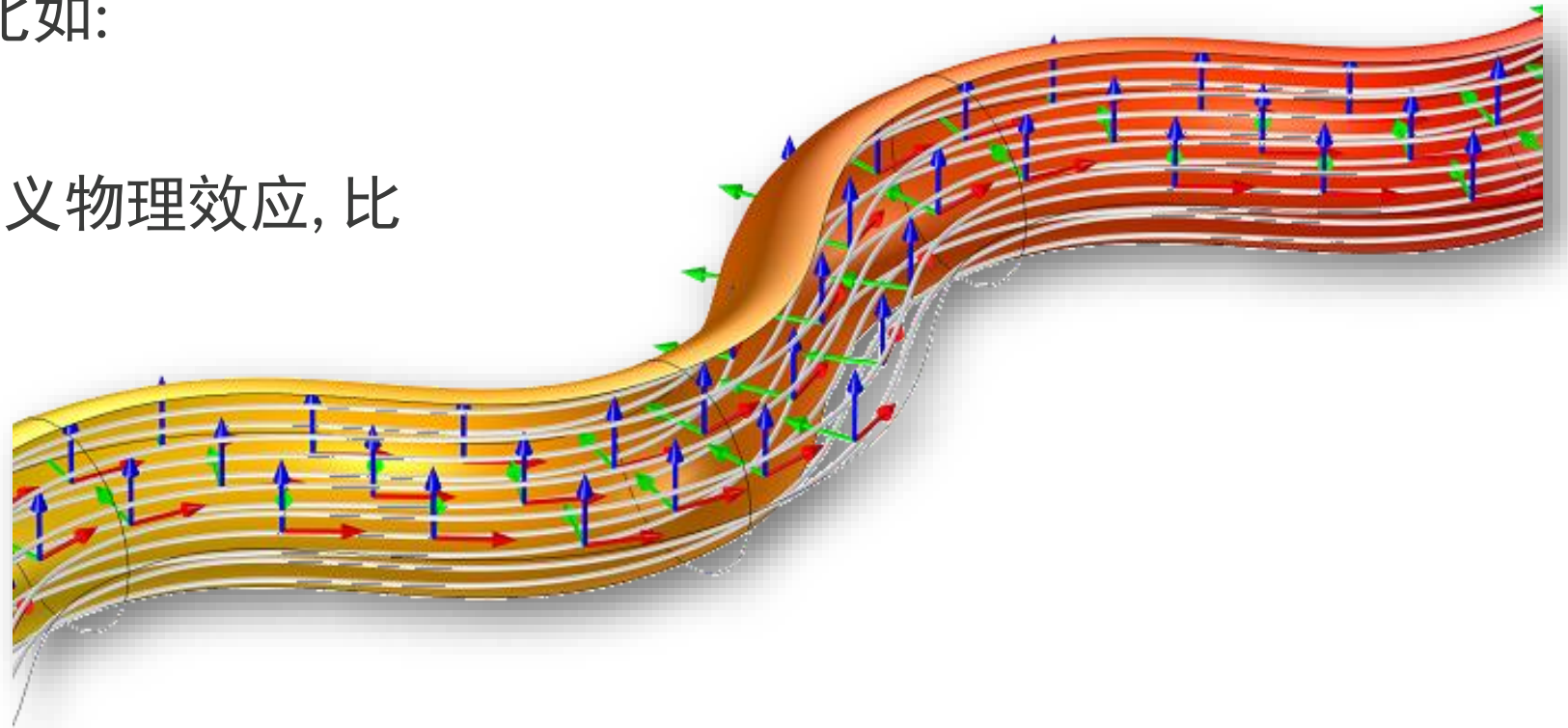
Warnings

Stop condition fulfilled at t = 27540 (Stop expression 1).



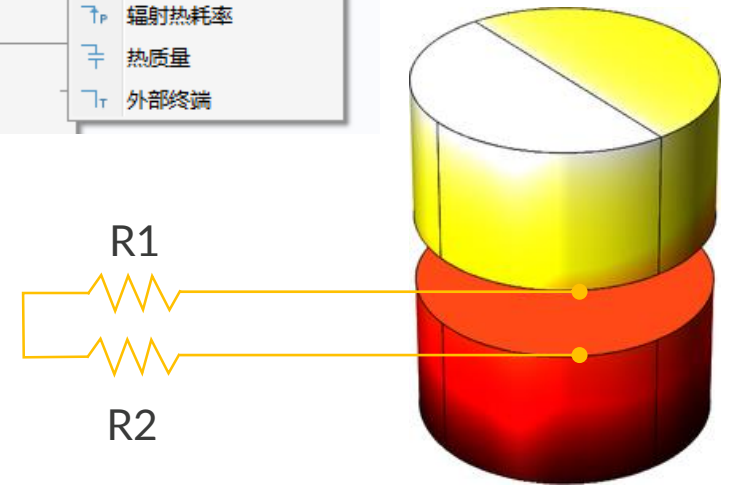
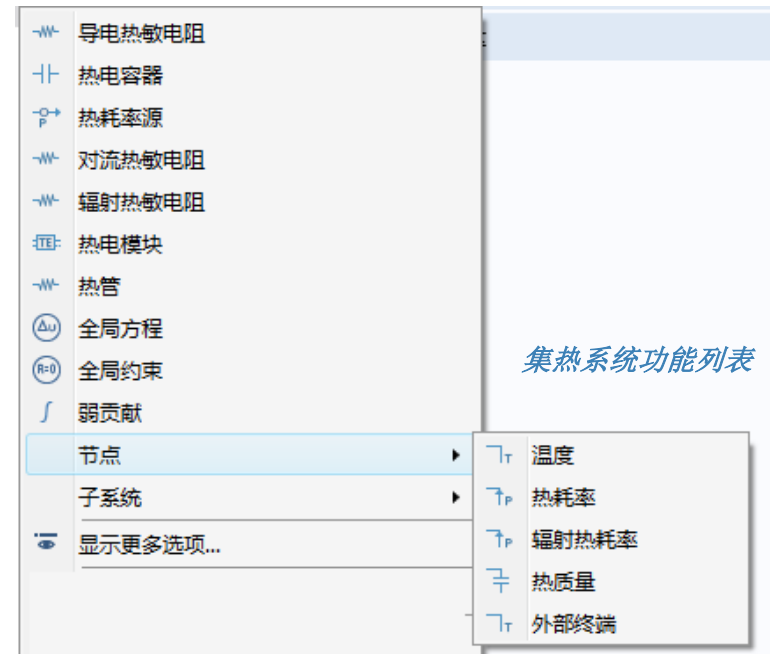
曲线坐标

- 坐标系, 沿着几何形状
- 各向异性材料定义, 比如:
 - 沿着纤维方向
- 关于局部坐标系, 定义物理效应, 比如:
 - 速度场
 - 多匝线圈 (AC/DC Module)
 - 压电设备



集总热系统

- 用于0D建模的热设备
- 经典和高级功能
- 耦合到常规传热物理接口，使用热连接器特征
- 用于
 - 专用建模方法（例如电缆）
 - 模型零件之间的耦合（传导，对流，辐射）



使用集总热系统连接的两固体中的温度