

射线光学模块

简介

射线光学模块简介

© 1998–2018 COMSOL 版权所有

受列于 cn.comsol.com/patents 中的美国专利 7,519,518、7,596,474、7,623,991、8,457,932、8,954,302、9,098,106、9,146,652、9,323,503、9,372,673 和 9,454,625 保护。专利申请中。

本文档和本文所述的程序根据《COMSOL 软件许可协议》(cn.comsol.com/comsol-license-agreement) 提供，且仅能按照许可协议的条款进行使用或复制。

COMSOL、COMSOL 徽标、COMSOL Multiphysics、COMSOL Desktop、COMSOL Server 和 LiveLink 为 COMSOL AB 的注册商标或商标。所有其他商标均为其各自所有者的财产，COMSOL AB 及其子公司和产品不与上述商标所有者相关联，亦不由其担保、赞助或支持。相关商标所有者的列表请参见 cn.comsol.com/trademarks。

版本：COMSOL 5.3a

联系信息

请访问“联系我们”页面 cn.comsol.com/contact，以提交一般查询、联系技术支持或搜索我们的联系地址和电话号码。您也可以访问全球销售办事处页面 cn.comsol.com/contact/offices，获取更多地址和联系信息。

如需联系技术支持，请访问 COMSOL Access 页面 cn.comsol.com/support/case，创建并提交在线请求表单。其他常用链接包括：

- 技术支持中心：cn.comsol.com/support
- 产品下载：cn.comsol.com/product-download
- 产品更新：cn.comsol.com/support/updates
- COMSOL 博客：cn.comsol.com/blogs
- 用户论坛：cn.comsol.com/community
- 活动：cn.comsol.com/events
- COMSOL 视频中心：cn.comsol.com/video
- 技术支持知识库：cn.comsol.com/support/knowledgebase

文档编号：CM024202

目录

简介.....	5
关于本书	5
基于空间维度和预设研究类型的物理场接口指南	6
几何光学	6
射线加热	6
射线追踪基本原理.....	7
射线传播	7
反射、折射和吸收	8
复色光	11
强度与偏振.....	13
反射线和折射线强度	13
边界上的电介质涂层	14
偏振的可视化处理	14
控制偏振的其他边界条件	15
建模工具.....	16
射线 - 热耦合.....	18
射线源	18
分析光学像差.....	20
教学案例：通过双高斯透镜追踪射线.....	21

简介

“射线光学模块”是利用射线追踪方法对光及其他电磁辐射传播建模的计算工具。射线可以通过模型几何传播，同时在边界发生反射、折射或被吸收。

射线光学的基本假设是辐射波长远小于模型中最小的几何细节。可见光传播的模型中通常适用此假设；典型房间的尺寸可能比可见光谱中的真空波长大几千万倍。

“射线光学模块”利用无序的射线追踪，在边界使用确定的射线分裂算法。换言之，射线可以与传播到的模型几何中的任意表面发生相互作用，而不必提前指定射线 - 边界相互作用的顺序。在不同介质的边界处，每条入射线都会分成反射线和折射线。

在仿真域内，介质可以是均匀的，或其折射率存在梯度，光能沿曲线路径传播。此外，“射线光学模块”还与计算温度和结构变形的其他物理场接口完全兼容，支持对折射率与温度相关的介质中光的传播以及光与变形结构发生相互作用后的传播进行高度逼真的仿真。

最后，此模块提供的各类专用的后处理工具支持对射线传播进行可视化处理、提取品质因数以及导出相关数据。

关于本书

本书下一节列出了“射线光学模块”适用的物理场接口和多物理场耦合。后续的章节叙述了射线光学仿真中物理场接口的不同设置和特征。

本书最后一节提供了双高斯透镜系统的循序渐进的教学案例，其中详细描述了这一系统的设置、射线追踪及后处理。

基于空间维度和预设研究类型的物理场接口指南

物理场接口	图标	标记	空间维度	适用的预设研究类型
 光学				
 射线光学				
几何光学		gop	三维、二维、二维轴对称	射线追踪；双向耦合射线追踪；瞬态
射线加热		—	三维、二维、二维轴对称	射线追踪；双向耦合射线追踪；瞬态

几何光学

“几何光学”接口  位于“模型向导” 的“射线光学” 分支下，适用于模拟电磁射线的传播。默认情况下仅求解射线路径，不过也可以求解附加变量，分析射线强度、偏振、相位以及光路长度等。射线可以在均匀介质以及缓变折射率的介质中传播。此接口支持各类射线源，释放的射线可以在模型的任意边界发生反射、折射或被吸收。

射线加热

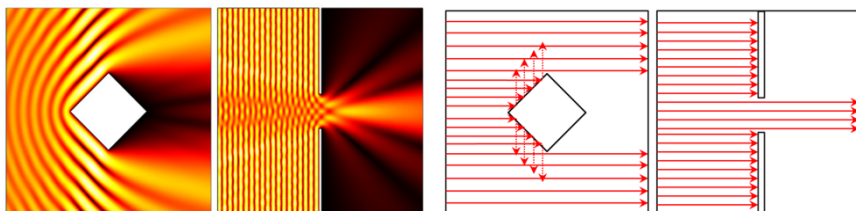
“射线加热”接口  位于“模型向导” 的“射线光学” 分支，耦合了“几何光学” 接口和“固体传热” 接口。这两个接口通过“射线热源”多物理场节点  耦合在一起。

当射线穿过折射率为复数值的吸收介质时，射线强度减弱，域内产生一个沉积热源。随后这一热源可以和其他热源以及边界条件相结合，用于计算域的温度。

此接口中可以设置双向耦合模型，这时射线衰减引起的温度扰动会显著改变介质的折射率或导致边界发生热变形。随后通过这一扰动系统追踪的射线会产生一个自洽解。

射线追踪基本原理

射线光学方法中的最重要假设是几何尺寸相当大，这意味着，即使是模型几何中的最小细节也仍远大于辐射波长。在许多应用中，几何尺寸比波长大几个数量级。“几何光学”接口未包含衍射效应，当电磁波与周围几何的边或点发生相互作用时，在波长尺度会发生此效应。



障碍物和狭缝与波长可比拟的情况下，障碍物周围波的传播产生的衍射条纹（左一）以及狭缝中波的传播产生的衍射条纹（左二）。狭缝较宽（右一）时或大型障碍物周围（右二）的射线传播产生清晰的光和阴影区域。

射线传播

射线传播受到介质折射率的控制。它会影响射线在该域内的传播速度，

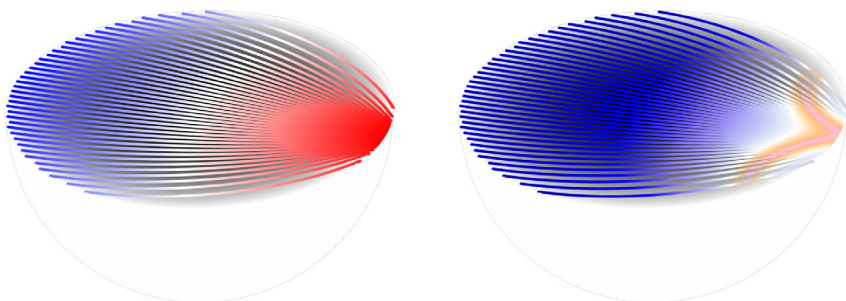
$$\text{光速} = \frac{\text{真空中的光速}}{\text{折射率}} = \frac{299,792,458 \text{ m/s}}{n}$$

如果介质均匀，即域内的折射率恒定，且仅在不同域的边界处发生变化，则射线在每个介质中呈直线传播。

但是，域内的介质也可能发生变化。这类介质称为**缓变折射率介质**，由于折射率在空间区域呈连续变化，因此梯度不为零。

总之，当折射率随空间呈连续变化时，该区域可模拟为一个仿真域，其间射线遵循曲线路径；但是如果折射率的变化不连续或在某一位置发生突变，则更合适的做法是将不连续的两侧视为不同域。随后通过内置的边界条件自动处理不连续处的反射和折射。

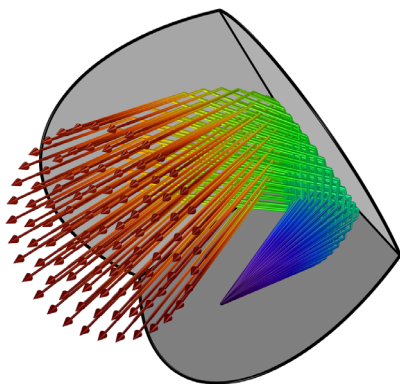
在耦合的仿真中通常存在缓变折射率介质，这时除了求解射线路径外，还要在仿真域求解场变量。例如，大多数实际材料的折射率都与温度相关，因此如果某一区域的温度不均匀，则通常其折射率也不均匀。如果化学扩散模型中折射率随稀物质浓度而变化，则其中也会存在缓变折射率的介质。



射线通过 Luneburg 透镜中的缓变折射率介质遵循曲线路径。射线颜色表明光路长度（左图）以及采用对数刻度的射线强度（右图）。背景中的灰度为折射率，呈球形对称。

反射、折射和吸收

由于“射线光学模块”本质上是无序的射线追踪工具，因此射线可以与模型中任意数量的边界进行无序交互。基于射线的当前位置及方向，可以检测到射线与某一表面交互的下一个交点，随后将射线外推到该表面，在此处应用边界条件。在缓变折射率介质中，时间步要小且是离散的（或相当于光路长度），这样才能精确预测交点，因为射线路径可能呈非线性。



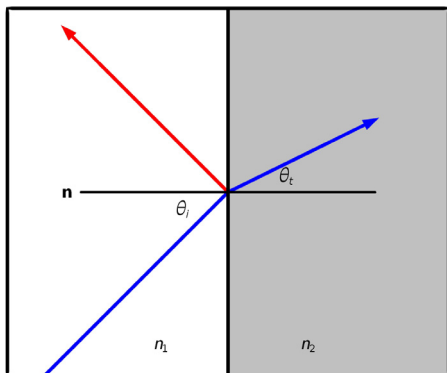
射线经角锥棱镜发生的镜面反射。

折射

每当射线到达两个折射率不同介质的边界时，确定的射线分裂算法会生成折射线和镜面反射线。使用斯涅耳定律可以计算折射线的方向，

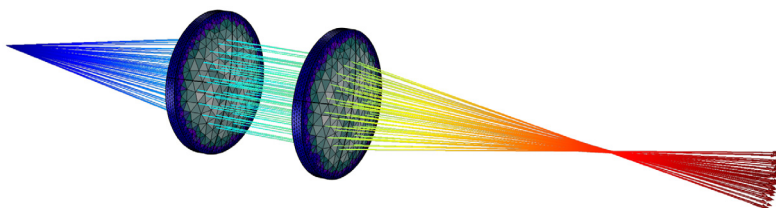
$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$

射线分裂算法还会自动检测到何时射线发生全内反射，同时相应抑制折射线的释放。



边界处入射线发生折射（蓝线）。还释放了另一条反射线（红色）。

在材料不连续处要抑制反射线的释放很简单。这样做可以使您完全关注于透镜系统中的折射线，因为杂散光不是研究的重点。

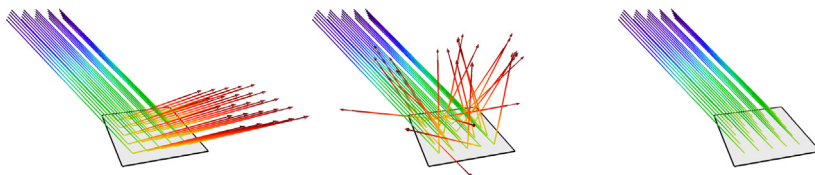


一对凸透镜中的射线追踪。射线颜色与光路长度成正比。透镜颜色与网格单元大小成正比。透镜表面已抑制反射光的释放。

反射和吸收

“几何光学” 接口的默认特性是将每个表面视为两个电介质间的反射和折射边界。在表面也可以应用其他边界条件，通过镜面反射或漫反射生成反射线。在这里，“漫反射”意味着适用朗伯定律，即反射角的分布遵循余弦定律。

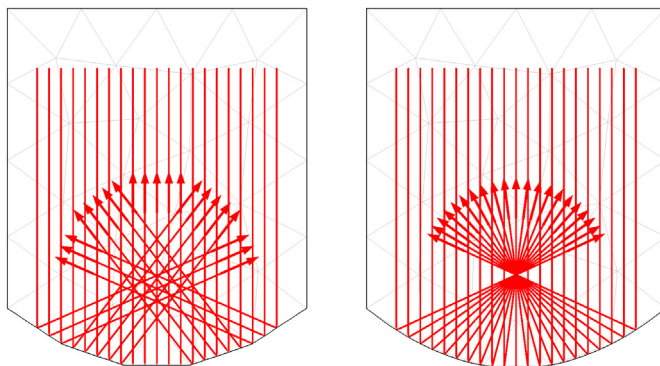
此外，还可以基于概率或逻辑表达式结合使用不同的边界条件。例如，可以采用镜面反射率为 70%，漫反射率为 30%；或者当射线与表面相交处满足 $x > 0$ 时采用漫反射，其他条件下所有射线将被吸收。



任何边界上都可以发生镜面反射（左图）、漫反射（中间图）或吸收（右图）。

网格的影响

“射线光学模块”中的射线 - 边界相互作用是通过底层有限元网格进行模拟的，这类网格决定了射线与边界的交点，以及每个交点上的表面法向。要得到高度精确的解，需要细化网格，尤其是在离散化误差最明显的曲线边界处。



当离散化方法为线性几何函数阶次（左图）时，网格对射线追踪的影响最明显，这时对于这个二维抛物线反射镜，采用二次以上的形函数阶次后，得到的光斑中几乎不存在衍射（右图）。

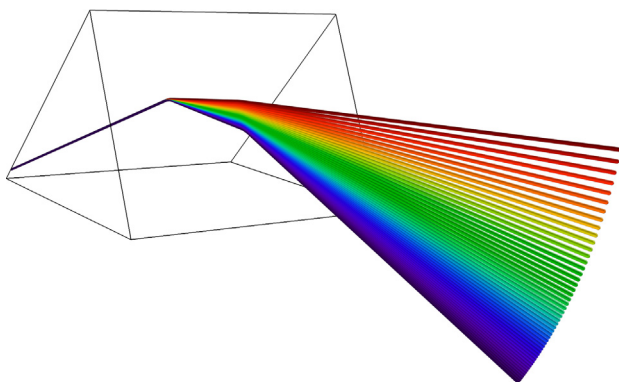
复色光

默认情况下，“几何光学”接口中的射线是单色的，不过可以轻松变成多色。启用模拟复色光的选项后，您可以指定从模型的每个辐射源上释放射线的频率。这个频率可以是表达式、显式值列表，也可以从分布中取样。

在“几何光学”接口中，分离波长不同的光采用的主要机理是定义色散介质或使用衍射光栅。

色散介质

“材料库”中内置的多种材料中已定义折射率函数，其中使用了根据科学文献编译的经验数据。您也可以输入显式包含真空波长或频率的用户定义表达式。

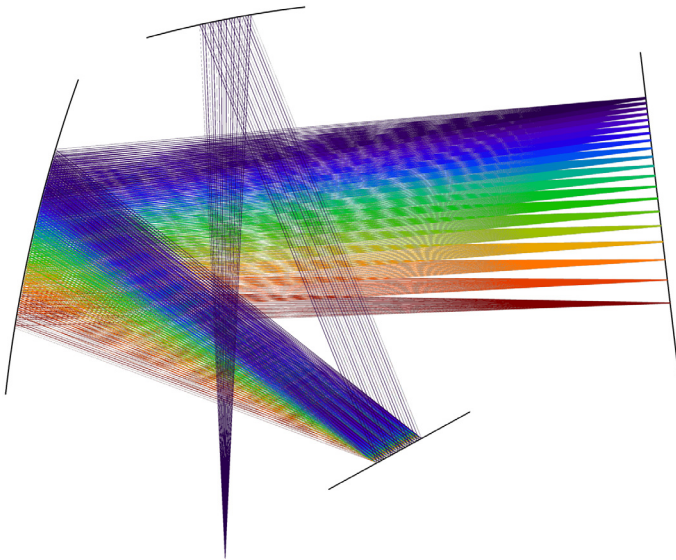


含有色散介质的棱镜可以将光分成不同的颜色。

衍射光栅

内置的边界条件可用于衍射光栅建模。衍射光栅实现为释放指定衍射级射线的边界。可以释放反射线和透射线，还可以在同一边界释放多个不同衍射级的射线。

衍射光栅的内置边界条件会自动计算每个指定衍射级的方向，但不能自动计算每个衍射级的强度，因为强度与波长尺度的光栅结构相关。不过，使用“RF模块”或“波动光学模块”，您通常可以采用各种射线光学方法在一个基本单元上耦合频域计算。



Czerny-Turner 单色器：正交 Czerny-Turner 构型中布置的准直镜、聚焦镜和衍射光栅，用于将复色光分成单色光。射线图中的不同颜色与波长成正比。

强度与偏振

为计算每条射线的强度，可以求解称为*斯托克斯参数*的四个变量。由于射线表示电磁波，因此一般而言，通常不仅要存储电磁场的大小，还要存储其矢量方向的信息，斯托克斯参数可以轻松实现这样的存储。

在“几何光学”接口中求解射线强度时，还会记录射线偏振的完整状态。同一模型中可以包含不同偏振态的任意组合，表示射线可以是以下各类偏振的任意组合：

- 非偏振、
- 圆偏振、
- 椭圆偏振、
- 线偏振或
- 部分偏振，且用户定义的偏振度介于 0 和 1 之间。

请注意，求解射线强度时总是采用辐射度单位，而不是光度单位，这一点很重要。

反射线和折射线强度

射线偏振的信息非常重要，即使是最简单的反射和折射模型中的材料不连续处也是如此。反射和折射系数取决于入射线是在入射平面发生偏振（**p** 偏振）还是在入射平面的垂直方向发生偏振（**s** 偏振）。这种相关性可显式表示为菲涅耳方程：

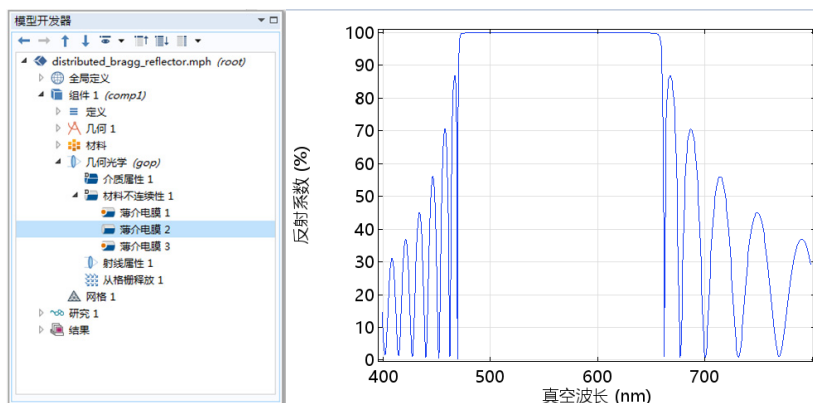
$$\begin{aligned}t_p &= \frac{2n_1 \cos\theta_i}{n_2 \cos\theta_i + n_1 \cos\theta_t} \\t_s &= \frac{2n_1 \cos\theta_i}{n_1 \cos\theta_i + n_2 \cos\theta_t} \\r_p &= \frac{n_2 \cos\theta_i - n_1 \cos\theta_t}{n_2 \cos\theta_i + n_1 \cos\theta_t} \\r_s &= \frac{n_1 \cos\theta_i - n_2 \cos\theta_t}{n_1 \cos\theta_i + n_2 \cos\theta_t}\end{aligned}$$

其中下标 p 和 s 分别指 **p** 偏振光和 **s** 偏振光。

边界上的电介质涂层

在实际中，两个折射率不同的域的折射边界仅是不连续的情况相当少。大多数的透镜和反射镜上都涂有一层或多层薄电介质，将反射和透射系数与菲涅耳系数的简单实现相区分。

如果电介质涂层每一层的属性（每层的厚度和折射率以及各层所在的阶次）已知，则可以将这些层直接构建成“材料不连续性”边界条件。随后菲涅耳系数会进行自动调整，除了包含两个相邻域的折射率外，还会包含每一层的属性。您还可以将这其中的一些电介质层指定为周期性，进而快速创建几十个或上百个涂层。

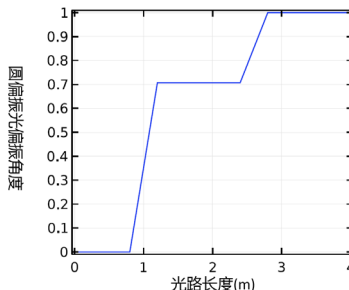
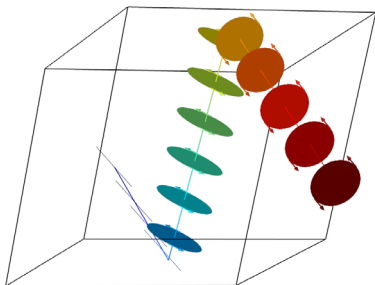


分布式布拉格反射器 (DBR): 在同一边界可以添加多个薄电介质膜，这些层可以指定为周期性，含大量基本单元。这里，含 21 个电介质层的 DBR 的反射率绘制为随波长变化。

另外，如果涂层的反射率或透射率已提供为一个产品，而不是层属性，则只须在模型中输入反射率或透射率即可。指定值无须是常数；如果模型中的光线是复色光，则您也可以定义射线频率或波长的任意函数。

偏振的可视化处理

在后处理过程中沿光线绘制偏振椭圆可以观察不同边界条件对偏振的影响。这些椭圆表明光线是线偏振光、圆偏振光还是椭圆偏振光，还表明偏振的方向和电场矢量的旋转方向（椭圆偏振和圆偏振），因此可以轻松区分左旋和右旋圆偏振。

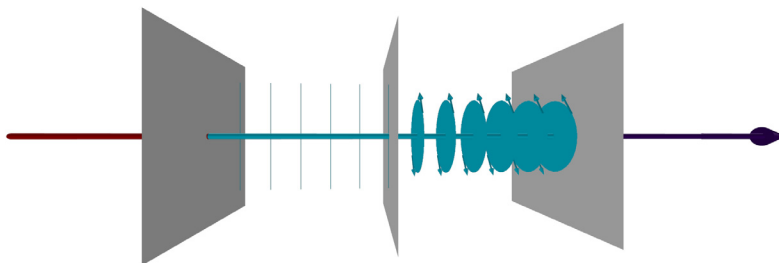


菲涅耳菱形镜中线偏振光在其内部发生两次反射（左图）。其结果是，光线的偏振椭圆先变为线性，接着变为椭圆，最后变为圆。绘制圆偏振度随光路长度变化的图形（右图）也可以表明这一点。

控制偏振的其他边界条件

本接口提供了操控射线强度和偏振的专用边界条件。这些边界条件不会影响射线方向，但会改变出射射线的斯托克斯矢量，这些条件包括：

- 理想线性偏振器、
- 线性波延迟器或圆形波延迟器、
- 消偏器、
- 定制的 4*4 Mueller 矩阵，可以表示光学元件的几乎任意组合。

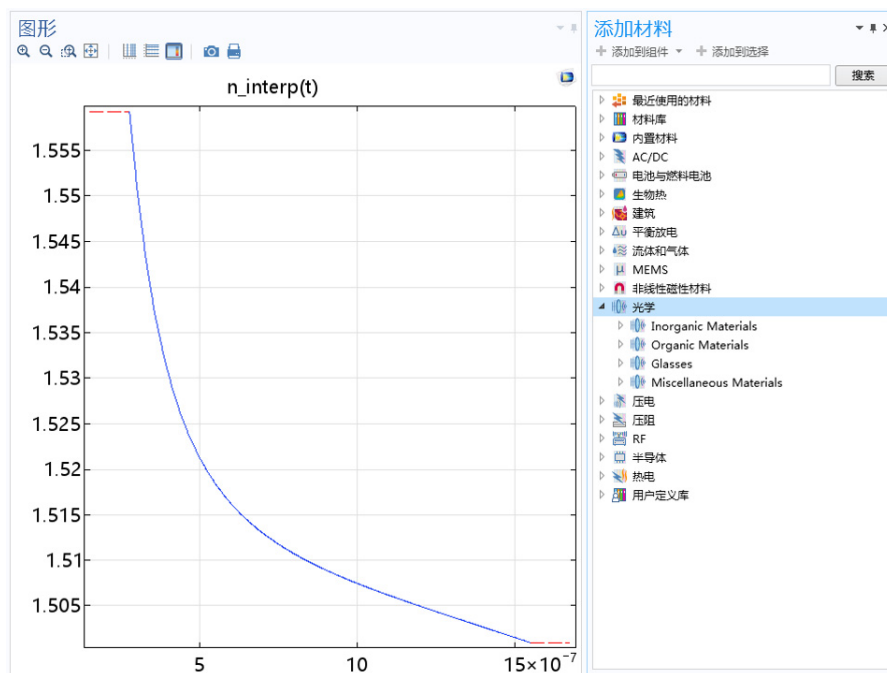


线性波延迟器教学案例：非偏振光依次在线性偏振器、四分之一波延迟器以及第一个线性偏振器正交的第二个线性偏振器中传播（从左向右）。射线图中显示了偏振椭圆。不同颜色表明射线强度。

建模工具

光学材料数据库

“射线光学模块”提供了专用的材料数据库，称为“光学”数据库，其中包含1400多种材料的折射率信息，其折射率通常与射线频率相关。



光学材料数据库（右）和典型输入材料的与自由空间波长相关的折射率（左）。

零件库

“射线光学模块”包含一个专用的“零件库”，其中包含射线光学仿真中常用的几何实体，包括球面和非球面透镜、反射镜、反光镜、棱镜和分光器。这些几何零件已完全参数化，包含各类预置选择，可方便地将防反射涂层用于大量透镜的外表面。

内置的零件库可以轻松扩展，只须修改内置零件或创建特定于应用的全新几何体素。

零件库

刷新 更新 COMSOL 零件库

搜索

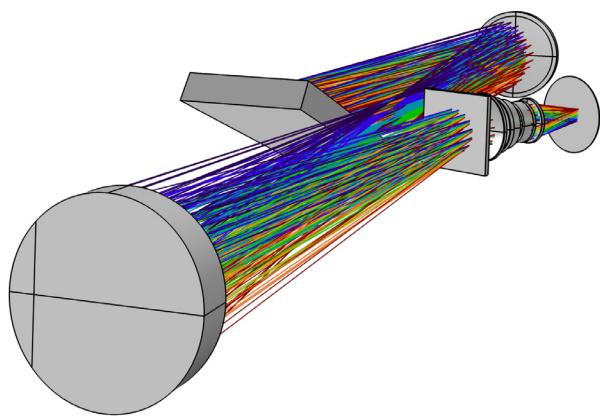
- COMSOL Multiphysics
 - 传热模块
 - 微流体模块
 - 搅拌器模块
 - 多体动力学模块
 - 射线光学模块
 - 二维
 - 孔径和障碍物
 - 非球面透镜
 - 分光器
 - 双胶合透镜
 - 柱面透镜
 - 镜
 - 棱镜
 - 反光镜
 - 球面透镜
 - spherical_equi_concave_lens_3d
 - spherical_equi_convex_lens_3d
 - spherical_general_lens_3d**
 - spherical_meniscus_lens_3d
 - spherical_plano_concave_lens_3d
 - spherical_plano_convex_lens_3d
 - RF 模块
 - 结构力学模块

普通三维球面透镜

具有任意凹面或凸面的球面透镜。

名称	spherical_general_lens_3d
模型版本	1
空间维度	3
使用的产品	COMSOL Multiphysics
创建版本	COMSOL Multiphysics 5.3a (Build: 121)
作者	COMSOL
上次修改时间	2017-9-22 20:51:56
创建时间	2017-9-22 20:51:56

“射线光学模块”的“零件库”。

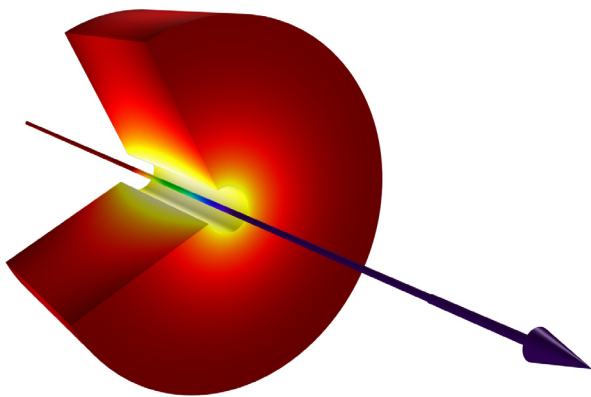


白瞳中阶梯光栅光谱仪中的射线图。“射线光学模块”的“零件库”中提供了离轴抛物反射镜和非球面透镜。

射线 - 热耦合

射线传输的能量取决于射线强度、波前曲率半径以及波前正对的立体角。本模块还提供了—个内置选项，用于将射线传输的能量存储为助因变量。

专用的“射线加热”多物理场接口适用于将吸收介质中射线传播生成的热量与“固体传热”接口等其他物理场接口相结合，计算温度分布。“射线加热”接口支持设置双向耦合，可以模拟热透镜效应等现象。



射线穿过吸收材料层，引起层温上升。

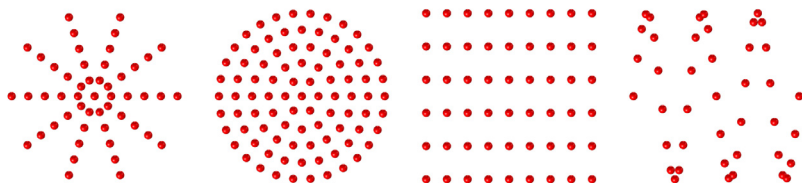
射线源

“几何光学”接口提供了各类射线源，或射线释放特征，用于指定射线的初始位置 and 方向。在同一模型中可以使用任意多种不同类型的射线源。

栅格源

指定射线释放位置的最直接方式是使用基于栅格释放。如下图所示，可采用多种方式控制射线的初始位置。

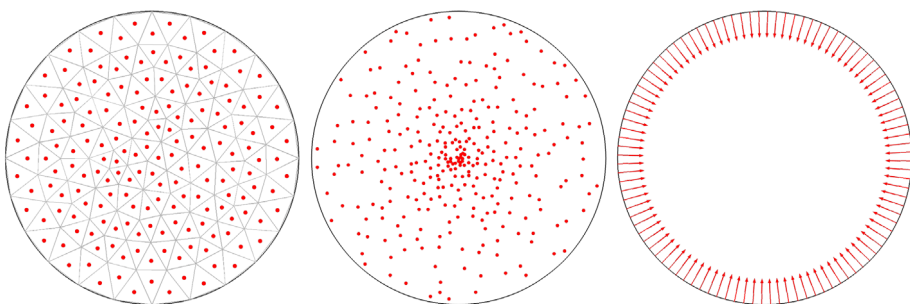
在每个释放位置，射线可以在一个方向向外传播，也可以呈球面分布、半球形分布、锥形分布或朗伯分布（余弦定律）向外传播。此接口还提供了—个专用的“太阳辐射”特征，用于基于地球表面位置和日期时间对射线方向进行初始化。



射线释放的形式可以呈柱面（左一）、六边形（左二）、非均匀栅格（右一）或矩形（右二）。

域和边界源

您可以从一组选定的域或边界释放射线。释放点的分布可以是均匀的、与用户定义的密度函数成正比、随机或基于底层有限元网格。



释放点基于域网格（左图）、非均匀密度表达式（中间图）以及沿边界均匀分布（右图）。

接口还提供了一个专用的释放特征，用于通过镜面反射或通过受照面发生折射来释放射线。释放反射线或折射线时只须提供外部辐射源的位置。

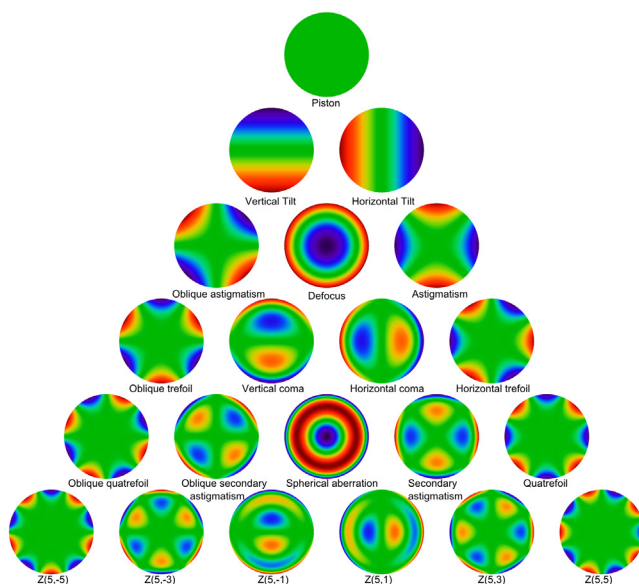
其他源

可以从几何的选定点释放射线。在三维中，还可以在选定边释放射线。因此，可以从任何维度（直至模型的全维度）的几何实体上释放射线。

也可以从文本文件加载释放位置和初始方向，这时每列对应于一个位置或方向矢量分量。

分析光学像差

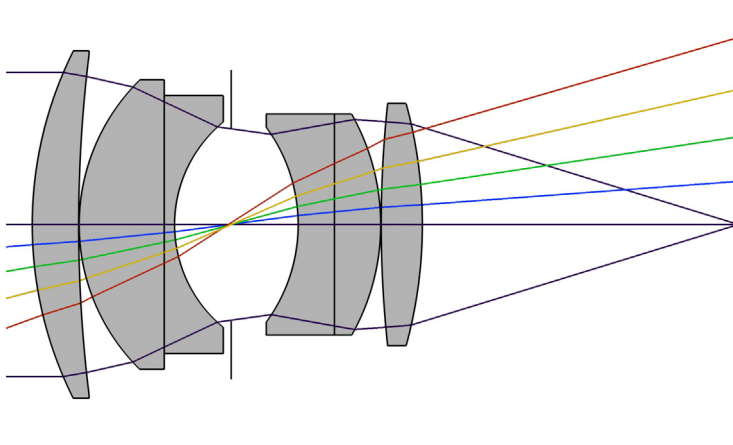
“射线光学模块”适用于研究透镜系统中的单色像差。为此，可使用“光学像差”图或“像差评估”特征。这两个特征可计算由透镜和反射镜系统聚焦的射线的波前误差，然后将此波前误差表示为 Zernike 多项式的线性组合。



Zernike 多项式，常用于描述单色像差的标准正交多项式基。

教学案例：通过双高斯透镜追踪射线

本节将模拟简单的多元透镜。模型将使用由 Lautebacher 和 Brendel 研制的 $f/1.7$ 光圈、焦距为 100.2 毫米的双高斯透镜（Agfa Camera Werk Ag 公司，美国专利号 2784643）。有关这一研究中模拟的透镜的更详细信息，请参见教学案例 [Double Gauss Lens](#)。下图为透镜概述。下页中的表格提供了光学规格参数。



双高斯透镜概述。视图中显示了轴上追踪的边缘光线以及另外四个场的主射线。

需要强调的是，“几何光学”接口使用的射线追踪方法本质上是无序的，因此以任何顺序构建几何都会得到相同的结果。但是，在这个仿真中，透镜几何是通过将 COMSOL “零件库” 中的零件实例重复插入而构建得到的，每个透镜元件（包括光阑）都是按顺序插入的。工作平面已在每个透镜（及光阑）零件实例中定义，后续每个透镜都相对于工作平面而放置。

有关创建透镜几何的完整信息，请参见教学案例 [Double Gauss Lens](#) 的 [Appendix - Geometry Instructions](#)。教学案例 [Double Gauss Lens Parametric Sweep](#) 对此教学案例进行了扩展，演示如何对多个波长和视场角进行参数化扫描。

双高斯透镜光学规格参数

索引	名称	半径 (MM)	厚度 (MM)	材料	有效半径 (MM)
—	对象	∞	∞	—	—
1	透镜 1	75.050	9.000	LaF3	33.0
—	—	270.700	0.100	—	33.0
2	透镜 2	39.270	16.510	BaF11	27.5
3	透镜 3	∞	2.000	SF5	27.5
—	—	25.650	10.990	—	19.5
4	光阑	∞	13.000	—	18.6
5	透镜 4	-31.870	7.030	SF5	18.5
6	透镜 5	∞	8.980	LaF3	21.0
—	—	-43.510	0.100	—	21.0
7	透镜 6	221.140	7.980	BaF11	23.0
—	—	-88.790	61.418	—	23.0
—	映像	∞	—	—	42.5

模型向导

注：这些操作说明基于 Windows 用户界面，但同样适用于 Linux 和 Mac 系统，只是略有不同。

- 1 双击桌面上的 COMSOL 图标，启动软件。软件打开后，您可以选择使用“模型向导” 创建新的 COMSOL 模型，也可以使用“空模型” 进行手动创建。对于本教程，单击“模型向导”按钮。

如果 COMSOL 已打开，要启动“模型向导”，可以从“文件”菜单中选择“新建”，然后单击“模型向导”.

“模型向导”会引导您完成建立模型的最初几个步骤。接下来的窗口可供您选择建模空间的维度。

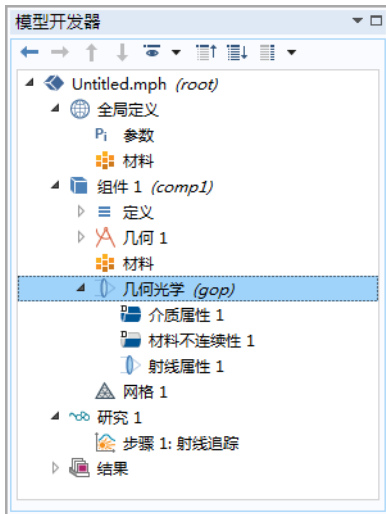
- 2 在“选择空间维度”窗口中单击“三维”按钮.
- 3 在“选择物理场”树的物理学 > 射线光学 下单击“几何光学”.
- 4 单击“添加”，然后单击“研究” 按钮。

5 在选择研究树的“预设研究”分支下，单击“射线追踪”。

“射线追踪”研究步骤的作用类似于“瞬态”研究步骤，但还包含适合计算射线轨迹的其他设置和默认项。为防止射线传播到任意远的距离外，追踪射线时要么采用最长时间，要么采用最大光路长度。

6 单击“完成”按钮。

下图显示了创建的“几何光学”接口以及默认节点。



全局定义

从文本文件加载“双高斯透镜”的全局参数。在插入几何序列时，将添加详细的透镜规格参数。

1 在“主屏幕”工具栏中单击“参数” P_i 。此外，也可以在“模型开发器”窗口中单击“参数” P_i 节点。

注：在 Linux 和 Mac 上，“主屏幕”工具栏是指 Desktop 顶部附近的一组特定控件。

2 在“参数” P_i 设置窗口，定位到“参数”栏。

3 单击“从文件加载”。

4 浏览到模型的“案例库”文件夹，然后双击文件 `double_gauss_lens_parameters.txt`。本练习中所用文件的位置根据安装

目录的不同而有所变化。例如，如果安装在硬盘上，文件路径应类似于
C:\Program Files\COMSOL\COMSOL53a\Multiphysics\applications\。
参数列表应类似如下：

名称	表达式	值	描述
lam_vac	550[nm]	5.5E-7 m	Nominal vacuum wavel...
theta_x	0[deg]	0 rad	Nominal x field angle
theta_y	0[deg]	0 rad	Nominal y field angle
N_ring	18	18	Number of hexapolar...
P_nom	58.941[mm]	0.058941 m	Nominal entrance pupi...
P_fac1	-1.30	-1.3	Pupil shift constant 1
P_fac2	-0.60	-0.6	Pupil shift constant 2
n_air	1.000277	1.0003	Refractive index of air
vx	$\tan(\theta_x)$	0	Ray direction vector, x...
vy	$\tan(\theta_y)$	0	Ray direction vector, y...
vz	1	1	Ray direction vector, z...
z_stop	$T_{c,1}+T_{c,1}+T_{c,2}+T_{c,2}+T_{c,3}+T_{c,3}$	m	Stop z-coordinate
z_image	$T_{c,1}+T_{c,1}+T_{c,2}+T_{c,2}+T_{c,3}+T_{c,3}+T_{c,4}+T_{c,4}+T_{c,5}+T_{c,5}+T_{c,6}+T_{c,6}+T_{c,7}+T_{c,7}$	m	Image plane z-coordin...
dx_pupil	$P_{fac} \cdot z_{stop} \cdot \tan(\theta_x)$	m	Pupil shift, x-coordinate
dy_pupil	$P_{fac} \cdot z_{stop} \cdot \tan(\theta_y)$	m	Pupil shift, y-coordinate
P_fac	$P_{fac1}+P_{fac2} \cdot \sin(\sqrt{\theta_x^2+\theta_y^2})$	-1.3	Pupil shift factor
nix	0	0	Global optical axis, x c...
niy	0	0	Global optical axis, y c...
niz	1	1	Global optical axis, z c...

红色的行表明参数缺失，因此无法计算表达式。在从其他文件插入几何序列时将添加其余的参数。

组件

- 1 在“模型开发器”窗口中，单击“组件 1 (comp 1)”。
- 2 在“组件”的“设置”窗口中，定位到“常规”栏。

3 找到“网格坐标系的坐标”子栏。从“几何形函数阶次”列表中选择“三次”。

射线追踪算法基于底层有限元网格对几何执行离散化计算反射线和折射线方向。与默认的、使用线性和二次多项式的几何形函数阶次相比，采用三次引入的离散化误差通常会比较少。

定义

变量

从文本文件加载变量定义。在对结果执行后处理过程中会用到这些变量。

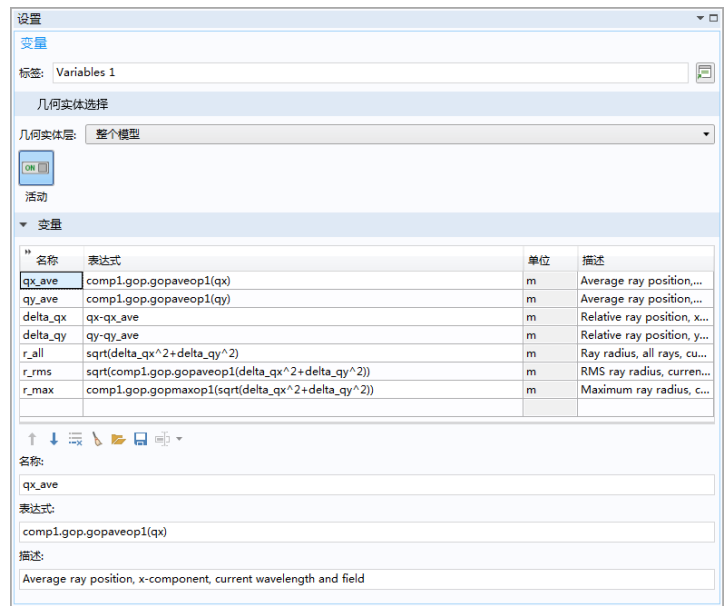
1 在“主屏幕”工具栏中单击“变量”。选择“局部变量”。

2 在“变量”的“设置”窗口中，定位到“变量”栏。

3 单击“从文件加载”。

4 浏览到模型的“案例库”文件夹，然后双击文件

`double_gauss_lens_variables.txt`。

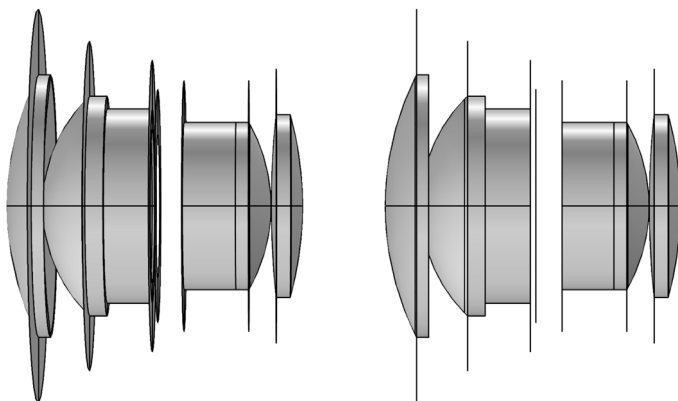


相机

将默认透视图切换到正射投影。这是观察光学装配的首选视图。

- 1 在“模型开发器”窗口中展开“组件 1 (comp1) > 定义 > 视图 1”节点 ，然后单击“相机”。
- 2 在“相机”的“设置”窗口中，定位到“相机”栏。
- 3 从“投影”列表中选择“正射”。
- 4 单击“更新”。
- 5 单击“图形”工具栏中的“切换到 ZX 平面视图”按钮 。

为了解投影对观察几何所产生的影响，下图显示了本例的几何序列，并将两个投影并排排列。



使用默认的透视投影（左图）以及本例中推荐的正射投影（右图）时，所渲染的几何序列比较。

几何

从文件插入就绪的几何序列。请参见教学案例 [Double Gauss Lens](#) 的 [Appendix - Geometry Instructions](#)，了解创建透镜几何的详细信息。

- 1 在“模型开发器”窗口的“组件 1 (comp1)”节点下，单击“几何 1”。
- 2 在“几何”的“设置”窗口中，在“标签”文本框中键入双高斯透镜。

- 3 在“几何”工具栏中单击“插入序列”。
- 4 浏览到模型的“案例库”文件夹，然后双击文件 `double_gauss_lens_geom_sequence.mph`。插入后，透镜规格参数的详细信息将显示在“参数” 节点中。此外，现在还可以计算所有的表达式。参数列表现在应如下表所示，之前的红色文本现在均显示为黑色，“值”列已完全填充。

设置

参数

参数

名称	表达式	值	描述
lam_vac	550[nm]	5.5E-7 m	Nominal vacuum wavel...
theta_x	0[deg]	0 rad	Nominal x field angle
theta_y	0[deg]	0 rad	Nominal y field angle
N_ring	18	18	Number of hexapolar...
P_nom	58.941[mm]	0.058941 m	Nominal entrance pupi...
P_fac1	-1.30	-1.3	Pupil shift constant 1
P_fac2	-0.60	-0.6	Pupil shift constant 2
n_air	1.000277	1.0003	Refractive index of air
vx	$\tan(\theta_x)$	0	Ray direction vector, x...
vy	$\tan(\theta_y)$	0	Ray direction vector, y...
vz	1	1	Ray direction vector, z...
z_stop	$T_{c_1}+T_{c_1}+T_{c_2}+T_{c_2}+T_{c_3}+T_{c_3}$	0.0386 m	Stop z-coordinate
z_image	$T_{c_1}+T_{c_1}+T_{c_2}+T_{c_2}+T_{c_3}+T_{c_3}+T_{c_4}+T_{c_4}+T_{c_5}+T_{c_5}+T_{c_6}+T_{c_6}+T_{c_7}...$	0.13711 m	Image plane z-coordin...
dx_pupil	$P_fac \cdot z_stop \cdot \tan(\theta_x)$	-0 m	Pupil shift, x-coordinate
dy_pupil	$P_fac \cdot z_stop \cdot \tan(\theta_y)$	-0 m	Pupil shift, y-coordinate
P_fac	$P_fac1+P_fac2 \cdot \sin(\sqrt{\theta_x^2+\theta_y^2})$	-1.3	Pupil shift factor

名称:

lam_vac

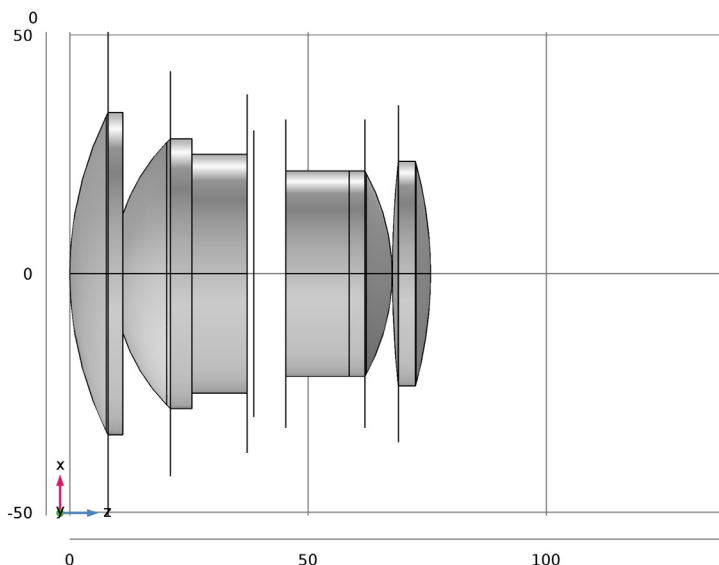
表达式:

550[nm]

描述:

Nominal vacuum wavelength

- 5 在“几何”工具栏中单击“全部构建”。
- 6 单击“图形”工具栏中的“缩放到窗口大小” 按钮。几何应如下图所示：



双高斯透镜的几何序列。光线从左向右（在正 z 向）穿过透镜。

显示的几何尺寸采用毫米单位；这个尺寸是自动调整的，以与导入的几何序列的长度单位匹配。

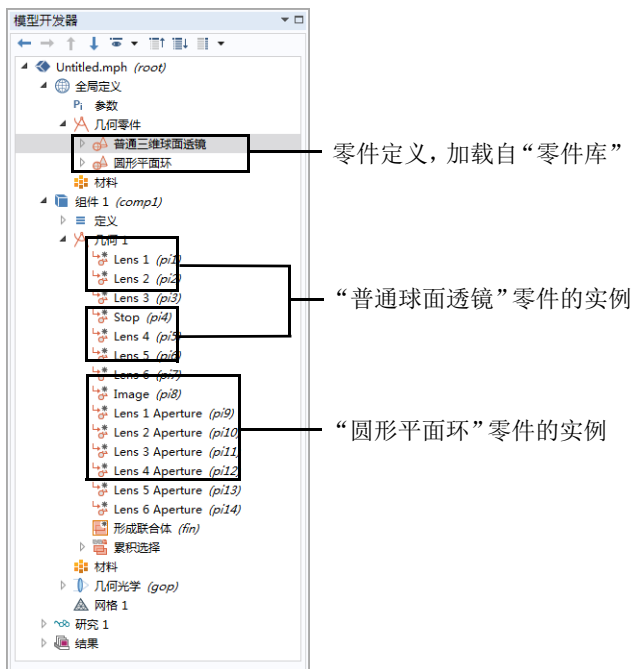
有关零件和零件实例的说明

为节省时间，这里的操作说明省略了几何序列的设置，但还是应该看一下“模型开发者”中的几何节点，了解几何序列是如何创建的。

在“全局定义  > 几何零件  ”下已加载两个零件定义：普通三维球面透镜  和圆形平面环  。在“组件 1  > 几何 1  ”下已创建大量的零件实例。

每个零件实例都会调用一个零件定义，作为包含各类输入参数的几何操作说明的子序列。例如，“普通球面透镜”零件接受透镜厚度和表面曲率半径这些输入参数，随后使用这一信息构建透镜。

使用“射线光学模块”进行的光学仿真中会用到大量的零件实例，因为这样做可将标准透镜规格参数轻松加载到几何序列中。



材料

以下各命令用于对每个透镜添加和指派材料属性。这些材料是专用的“射线光学库”的一部分，在“射线光学模块”或“波动光学模块”中可以使用这个库。

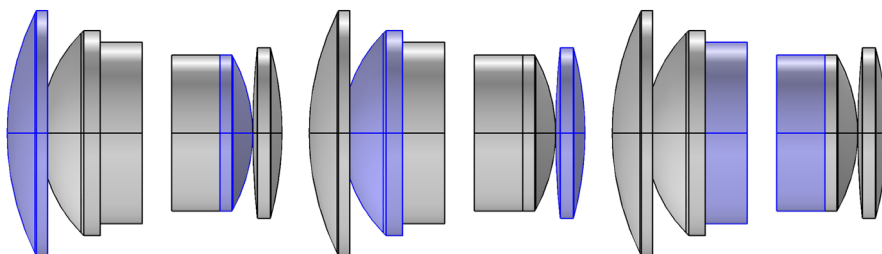
- 1 在“材料”工具栏中，单击“添加材料”，打开“添加材料”窗口。
- 2 转至“添加材料”窗口。
- 3 在树中选择“光学 > Glasses > HOYA-LaF (LAF3)”。
- 4 在窗口工具栏中单击“添加到选择”。

软件自动将刚添加的材料突出显示。接着，将此材料指派到相关透镜：

- 5 在“材料 HOYA-LaF (LAF3) (mat1)”的“设置”窗口中，定位到“几何实体选择”栏。
 - 6 从“选择”列表中，选择“透镜材料 1”。
- 这是几何序列中已定义的“累积选择”。6个透镜中的每一个都已指派三种透镜材料选择的一种。

- 7 在树中选择 “光学 > Glasses > HOYA-BaF (BAF11)”。
- 8 在窗口工具栏中单击 “添加到选择” 。
- 9 在 “材料 HOYA-BaF (BAF11) (mat2)” 的 “设置” 窗口中，定位到 “几何实体选择” 栏。
- 10 从 “选择” 列表中，选择 “透镜材料 2”。
- 11 转至 “添加材料” 窗口。
- 12 在树中选择 “光学 > Glasses > SCHOTT-SF (SF5)”。
- 13 在窗口工具栏中单击 “添加到选择” 。
- 14 在 “材料 SCHOTT-SF (SF5) (mat3)” 的 “设置” 窗口中，定位到 “几何实体选择” 栏。
- 15 从 “选择” 列表中，选择 “透镜材料 3”。
- 16 在 “材料” 工具栏中，单击 “添加材料” ，关闭 “添加材料” 窗口。

材料选择应如下各图所示。



HOYA-LaF（左图）、HOYA-BaF（中间图）和 SCHOTT-SF（右图）玻璃的选择。

物理场接口

模型中插入了几何与材料后，现在开始设置物理场接口。在添加任何射线源或边界条件之前，更改几个控制射线追踪仿真的物理场接口属性。

- 1 在 “模型开发器” 窗口的 “组件 1 (comp1)”  下，选择 “几何光学 (gop)” 。
- 2 在 “几何光学” 的 “设置” 窗口中，定位到 “射线释放和传播” 栏。
- 3 在 “外部域折射率” 文本框中，键入 $1/n_{\text{air}}$ 。此参数表明使用的是真空波长。不过，材料折射率是相对于空气（标准温度和压力）定义的。

4 在“最大二次射线数”文本框中键入 0。此教学案例未追踪杂散光，因此在透镜表面不会产生反射线。

在追踪射线时不需要以下各变量，但在后处理过程中会用到。

1 定位到“附加变量”栏。选中“计算光路长度”复选框。

2 选中“反射计数”复选框。

3 选中“存储射线状态数据”复选框。

材料不连续性

“材料不连续性”是“几何光学”接口中的默认边界条件。它基于边界任一侧的折射率对射线进行反射和折射。

1 在“模型开发器”窗口的“组件 1 (comp1) > 几何光学 (gop)”下，单击“材料不连续性”。

2 在“材料不连续性”的“设置”窗口中，定位到“释放的射线”栏。

3 从“释放反射射线”列表中，选中“从不”。

注：“几何光学”接口在“材料不连续性”处总是使用确定的射线分裂，生成反射线和折射线，不过以下情况例外：(i) 明确抑制反射线（就如此处），(ii) 发生全内反射，(iii) 正在计算强度，导致反射线的强度非常小。

射线属性

1 在“模型开发器”窗口的“组件 1 (comp1) > 几何光学 (gop)”下，单击“射线属性”。

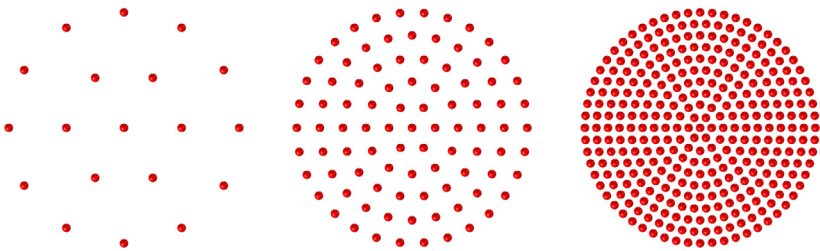
2 在“射线属性”的“设置”窗口中，定位到“射线属性”栏。

3 在“真空波长”文本框中，键入 `lam_vac`。此波长已在“参数”节点中定义。

从栅格释放

使用“参数”节点中定义的物理量从六边形栅格释放射线。

- 1 在“物理场”工具栏中，单击“全局” 并选择“从栅格释放”.
- 2 在“从栅格释放”的“设置”窗口中，定位到“初始坐标”栏。
- 3 从“栅格类型”列表中选择“六边形”。径向位置数将决定释放的总射线数。由下图可知，六边形分布产生了均匀的空间分布。



六边形栅格。从左到右依次为：包含两个、五个和十个径向环的六边形栅格。每种情况中释放的射线数为 19、91 和 331。

4 指定“中心位置”($\mathbf{q_c}$) 矢量：

中心位置:

$\mathbf{q_c}$	dx_pupil	x	m
	dy_pupil	y	
	-5[mm]	z	

六边形栅格的中心位置 ($[x_c, y_c] = [dx_pupil, dy_pupil]$) 将根据视场角而变化。这样可确保光阑位置处光学轴上的主射线一致。

5 指定圆柱轴向 ($\mathbf{r_c}$) 矢量：

圆柱轴向:

$\mathbf{r_c}$	nix	x	1
	niy	y	
	niz	z	

圆柱轴向与全局光学轴同向，为正 z 向。这是垂直于射线分布的方向，因此释放点的六边形栅格所在的平面将与 xy 平面平行。

- 6 在半径 (R_c) 文本框中，键入 $P_nom/2$ 。标称瞳孔直径为 P_nom 。
- 7 在“径向位置数” (N_c) 文本框中，键入 N_ring 。在编辑框的下方，“设置”窗口将报告六边形栅格共包含 1027 个释放位置。

8 定位到“射线方向矢量”栏。指定“射线方向矢量”(L_0):

射线方向矢量:			
L_0	vx	x	1
	vy	y	
	vz	z	

使用“参数”节点中定义的视场角计算射线方向矢量。本例中，视场角为零，但只须调整模型参数，即可轻松重新计算视场角不为零的情况。

障碍物

- 1 在“物理场”工具栏中，单击“边界” 并选择“壁”。
- “壁”是可吸收射线或通过镜面反射、漫反射或在用户定义方向反射射线的通用边界条件。本例中，在所有的透镜边和孔径光阑上定义吸收壁。
- 2 在“壁”的“设置”窗口的“标签”文本框中，键入透镜障碍物。
- 3 定位到“边界选择”栏。从“选择”列表中，选择“透镜障碍物”。这些选择已在几何序列中指定，包括通光孔径、透镜边、透镜孔径以及光阑以外的透镜表面。
- 4 定位到“壁条件”栏。从“壁条件”列表中选择“消失”。传播到这些表面的任何射线都将消失。

映像平面

- 1 在“物理场”工具栏中，单击“边界” 并选择“壁”。
- 2 在“壁”的“设置”窗口的“标签”文本框中，键入映像平面。
- 3 定位到“边界选择”栏。从“选择”列表中选择“映像平面”。将使用默认的壁条件（冻结）。任何到达映像平面的射线都将停止传播，但不会从仿真中移除。这样可以在焦平面上创建斑点图。

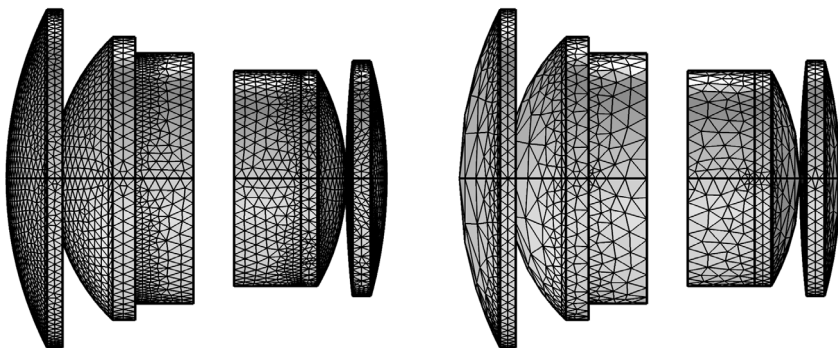
网格

调整默认的网格，改进弯曲透镜表面的分辨率。如上所示，网格设置应与几何函数阶次一起考虑。

- 1 在“模型开发器”窗口的“组件 1 (comp1)”下，单击“网格 1”.
- 2 在“网格”的“设置”窗口中，定位到“网格设置”栏。
- 3 从“序列类型”列表中选择“用户控制网格”。

大小

- 1 在“模型开发器”窗口的“组件 1 (comp1) > 网格 1”下，右键单击“自由四面体网格 1” 并选择“大小”.
- 2 在“大小”的“设置”窗口中，定位到“单元大小”栏。
- 3 单击“定制”按钮。
- 4 定位到“单元大小参数”栏。选中“最大单元大小”复选框。
- 5 在关联文本框中键入 2.5。
- 6 选中“最小单元大小”复选框。
- 7 在关联文本框中键入 0.2。
- 8 选中“最大单元增长率”复选框。
- 9 在关联文本框中键入 2.0。该值可使单元增长 100%（近似），从一个单元增长为另一个单元。
- 10 选中“曲率因子”复选框。
- 11 在关联文本框中键入 0.25。值越小，沿弯曲边界的网格则越精细。
- 12 单击“全部构建”.



本例中使用的用户定义网格（左图）与默认网格（右图）的比较。在弯曲边界使用较细化网格可提高射线追踪的精度。为清楚起见，视图中隐藏了孔径光阑。

研究

查看“研究 1”的设置 .

- 1 在“射线追踪”的“设置”窗口中，定位到“研究设置”栏。
- 2 从“时间步明细”列表中，选择“指定最大路径长度”。
- 3 从“长度单位”列表中选择 mm。
- 4 在“长度”文本框中键入 0 200。这一最大光学路径长度足以使采用较大视场角释放的射线到达映像平面。

注：“射线追踪”研究步骤类似于“瞬态”研究步骤，但其默认时间步大小和终止准则有所不同。对于此研究，最大时间步根据最大路径长度指定，这一长度可根据几何尺寸轻松估计得到。还应注意，虽然仅指定了两个时间步（对应于光路长度 0 和 200 mm），对中间时间步执行的研究还是会在所有的材料不连续处使射线发生折射，即使这些时间步与指定的任何输出时间步不匹配时也是如此。

射线追踪算法可以在连续时间步之间或在求解器采用的光路长度区间上应用大量的反射和折射。默认情况下，每条射线在每个时间步上发生的最大相互作用数为 1000，不过可以在物理场接口的“高级设置”中调整该值。

- 5 在“主屏幕”工具栏中单击“计算”.

结果

在“几何光学”接口中第一次运行“射线追踪”研究时，默认情况下会生成“射线轨迹”图。绘图设置中可以使用任意表达式对射线着色，也可以使用逻辑表达式过滤射线（以及将其在视图中隐藏）。以下各步将创建两个不同的射线图，其中使用了不同的定制过滤器。

射线图 1

要创建第一个射线图，对默认绘图作一些修改。在此绘图中，根据光路长度对射线着色。

- 1 在“模型开发器”窗口的“结果”下，单击“射线轨迹 (gop)”。这是“三维绘图组”.

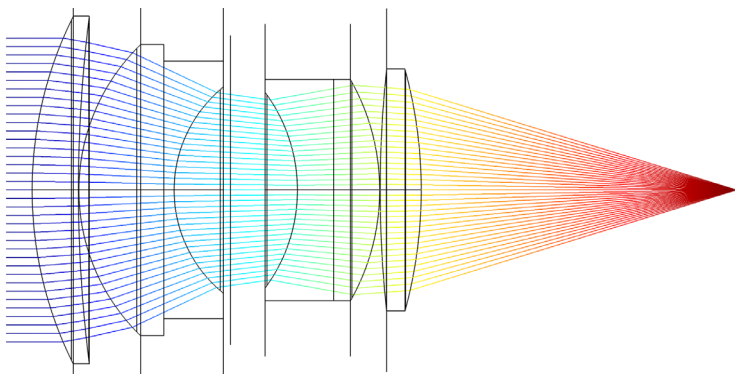
- 2 在“三维绘图组”的“设置”窗口的“标签”文本框中，键入射线图 1。
- 3 单击展开“标题”栏。从“标题类型”列表中选择“无”。
- 4 定位到“颜色图例”栏。清除“显示图例”复选框。
- 5 单击展开“窗口设置”栏。单击“添加绘图窗口”.
- 6 选中“窗口标题”复选框。
- 7 在关联文本框中键入射线图 1。

射线轨迹

- 1 在“模型开发器”窗口中，展开“结果 > 射线图 1” 节点，然后单击“射线轨迹 1”.
- 2 在“射线轨迹”的“设置”窗口中，定位到“着色和样式”栏。
- 3 找到“点样式”子栏。从“类型”列表中选择“无”。

过滤器

- 1 在“模型开发器”窗口中，展开“射线轨迹 1” 节点，然后单击“过滤器 1”.
- 2 在“过滤器”的“设置”窗口中，定位到“射线选择”栏。
- 3 从“包含的射线”列表中，选择“逻辑表达式”。
- 4 在“包含逻辑表达式”文本框中，键入 `gop.fs==2 && at(0,abs(qy-dy_pupil) < 0.1[mm])`。这样可确保仅渲染到达映像平面的射线。即，最终的射线状态(fs)为 2（冻结）。另外，此视图仅显示弧矢光线。
- 5 在“射线图 1”工具栏中，单击“绘制”.
- 6 在窗口工具栏中单击“缩放到窗口大小”.



射线图 2

创建第二个射线图。这次，根据射线在映像平面中的位置到质心的径向距离对射线着色。这样做可以对形成映像平面光斑像差的射线进行可视化。

- 1 在“模型开发器”窗口的“结果”下，右键单击“射线图 1” 并选择“生成副本”.
- 2 在“三维绘图组”的“设置”窗口的“标签”文本框中，键入射线图 2。
- 3 定位到“颜色图例”栏。选中“显示图例”复选框。
- 4 单击展开“窗口设置”栏。单击“添加绘图窗口”.
- 5 选中“窗口标题”复选框。
- 6 在关联文本框中键入射线图 2。

颜色表达式

- 1 在“模型开发器”窗口中，展开“结果 > 射线图 2 > 射线轨迹 1”节点，然后单击“颜色表达式 1”.
- 2 在“颜色表达式”的“设置”窗口中，定位到“表达式”栏。
- 3 在“表达式”文本框中，键入 `at('last', r_all)`。这是相对于映像平面质心的径向坐标。
这一颜色表达式利用了“射线追踪”研究的类似时间的性质。即，“at”算子用于基于射线在某一特定时间点（本例中是“last”）上的特性对沿完整路径传播的射线着色。
- 4 从“单位”列表中选择 μm 。

过滤器

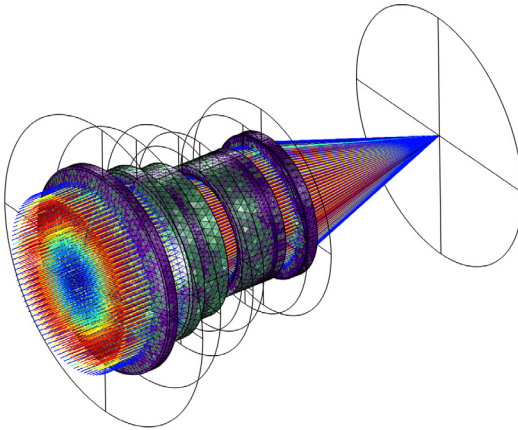
- 1 在“模型开发器”窗口的“结果” > 射线图 2  > 射线轨迹 1  下，单击“过滤器 1”.
- 2 在“过滤器”的“设置”窗口中，定位到“射线选择”栏。
- 3 从“包含的射线”列表中，选择“逻辑表达式”。
- 4 在“包含逻辑表达式”文本框中，键入 `gop.fs==2`。仅绘制到达映像平面的射线。

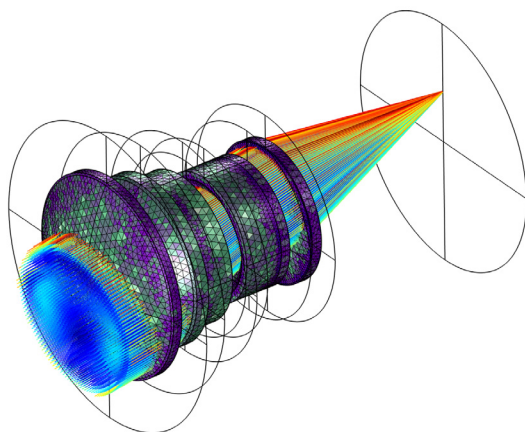
网格

添加网格图，将透镜元件渲染为实体。

- 1 在“模型开发器”窗口的“结果” 下，右键单击“射线图 2” 并选择“网格”.
- 2 在“网格”的“设置”窗口中，找到“层”栏。

- 3 从“层”列表中选择“体”。
 - 4 定位到“颜色”栏。从“单元颜色”列表中，选择“大小”。
 - 5 从“颜色表”列表中选择 AuroraBorealis。
 - 6 清除“颜色图例”复选框。
 - 7 在“射线图 2”工具栏中，单击“绘制”。
 - 8 在窗口工具栏中单击“缩放到窗口大小”。调整视图方向，使对象平面中的颜色表达式清晰可见。该图应如下方第一幅图所示。
- 如上方所述，此图中根据射线到质心的径向距离对射线着色。这样做可以对形成总体光斑大小的大部分射线进行可视化。
- 使用其他视场角参数可以重复执行此研究。下方的第二幅图显示了 $\text{theta_x} = 10[\text{deg}]$ 时的结果。同样，根据射线到质心的径向距离对射线着色。本例中很明显的一点是，映像平面上射线位置与这些射线在入射光瞳处的分布之间的关系完全不同。





光斑图

以下各步将创建光斑图，并添加一个定制的颜色表达式。

截面

- 1 在“结果”工具栏中，单击“截面”.
- 2 在“截面”的“设置”窗口的“标签”文本框中，键入映像平面。
- 3 定位到“数据”栏。从“数据集”列表中选择“射线 1”。
- 4 定位到“平面数据”栏。从“平面”列表中选择“xy 平面”。
- 5 在“z 坐标”文本框中键入 `z_image`。这是“双高斯透镜”映像平面的位置。

二维绘图组

- 1 在“结果”工具栏中，单击“二维绘图组”.
- 2 在“二维绘图组”的“设置”窗口的“标签”文本框中，键入光斑图。
- 3 定位到“数据”栏。从“数据集”列表中选择“无”。
- 4 定位到“绘图设置”栏。选中“x 轴标签”复选框。
- 5 在关联文本框中键入“X 轴”。
- 6 选中“y 轴标签”复选框。

- 7 在关联文本框中键入“Y 轴”。
- 8 定位到“颜色图例”栏。选中“显示单位”复选框。
- 9 单击展开“窗口设置”栏。单击“添加绘图窗口”。
- 10 定位到“绘图设置”栏。选中“窗口标题”复选框。
- 11 在关联文本框中键入光斑图。

庞加莱图

“庞加莱图”是可用于创建光斑图的多图形之一。

- 1 在“光斑图”工具栏中，单击“更多绘图”并选择“庞加莱图”。
- 2 在“庞加莱图”的“设置”窗口中，定位到“数据”栏。
- 3 从“截面”列表中选择“映像平面”。
- 4 单击展开“标题”栏。从“标题类型”列表中选择“无”。
- 5 定位到“着色和样式”栏。选中“半径比例因子”复选框。
- 6 在关联文本框中键入 $1e-3$ 。

颜色表达式

- 1 右键单击“庞加莱图 1”并选择“颜色表达式”。
- 2 在“颜色表达式”的“设置”窗口中，定位到“表达式”栏。
- 3 在“表达式”文本框中，键入 `at(0,r_all)`。这是相对于入射光瞳处质心的径向坐标。这样做可以对每条射线的原点进行可视化。
- 4 从“单位”列表中选择 mm。

注释 1

- 1 在“模型开发器”窗口的“结果”下，右键单击“光斑图”并选择“注释”。
- 2 在“注释”的“设置”窗口中，定位到“数据”栏。
- 3 从“数据集”列表中选择“研究 1/解 1(sol1)”。
- 4 定位到“注释”栏。在“文本”文本框中，键入质心：`[x,y] = [eval(qx_ave),eval(qy_ave)] mm\$\lambda$ = eval(1e6*lam_vac) nm: r$_{rms}$ = eval(1e3*r_rms) $\mu$ m。`
- 5 选中“允许计算表达式”复选框。
- 6 从“几何层”列表中选择“全局”。
- 7 定位到“位置”栏。在 X 文本框中，键入 `qx_ave-1.5*r_max`。
- 8 在 Y 文本框中，键入 `qy_ave+1.5*r_max`。

- 9 单击展开“高级”栏。在“表达式精度”文本框中，键入 4。
- 10 定位到“着色和样式”栏。选中“LaTeX 标记”复选框。
- 11 清除“显示点”复选框。

注释 2

- 1 右键单击“结果 > 光斑图 > 注释 1”并选择“生成副本”.
- 2 在“注释”的“设置”窗口中，定位到“注释”栏。
- 3 在“文本”文本框中，键入视场角：
$$[\$ \backslash \theta _x \$, \$ \backslash \theta _y \$] = [\text{eval}(180 * \theta _x / \pi), \text{eval}(180 * \theta _y / \pi)] \text{ deg}.$$
- 4 定位到“位置”栏。在 X 文本框中，键入 $qx_ave - 1.5 * r_max$ 。
- 5 在 Y 文本框中，键入 $qy_ave - 1.4 * r_max$ 。
- 6 定位到“高级”栏。在“表达式精度”文本框中，键入 4。

注释 3

- 1 右键单击“结果 > 光斑图 > 注释 2”并选择“生成副本”.
- 2 在“注释”的“设置”窗口中，定位到“注释”栏。
- 3 在“文本”文本框中，删除现有文本。此注释仅用于使绘图正确居中。
- 4 定位到“位置”栏。在 X 文本框中，键入 $qx_ave + 1.5 * r_max$ 。
- 5 在 Y 文本框中，键入 $qy_ave + 1.5 * r_max$ 。
- 6 在“光斑图”工具栏中，单击“绘制”.
- 7 在窗口工具栏中单击“缩放到窗口大小”。将得到的图像与下方第一幅图作比较。

正如上方所述，不同的颜色表明入射光瞳处光线的位置。这是对上述各射线图的补充。

将视场角参数设为 $\theta_x = 10[\text{deg}]$ ，重复执行同一研究。结果为下方第二幅图。这里采用与射线图相同的处理，即使用定制颜色表达式，这样做可识别出哪些射线是形成总体光斑大小的主要射线。

