



# 光学系统设计

## TracePro 基础

仪器学院

郎贤礼 整理

# TracePro 主要内容

- 光源的建立方法
- 各种参数的设定
- 分析功能的使用
- 档案转换
- 模拟步骤
- 准确模拟
- 分析功能
- 提高运算速度
- 应用实例



# 光学计算软件的计算方法

## ■ Ray Tracing

- Sequential Ray Tracing
  - OSLO, Zemax, CodeV...
- Non-Sequential Ray Tracing
  - TracePro, ASAP, LightTools...

## ■ BPM (Beam Propagation Method), FDTD

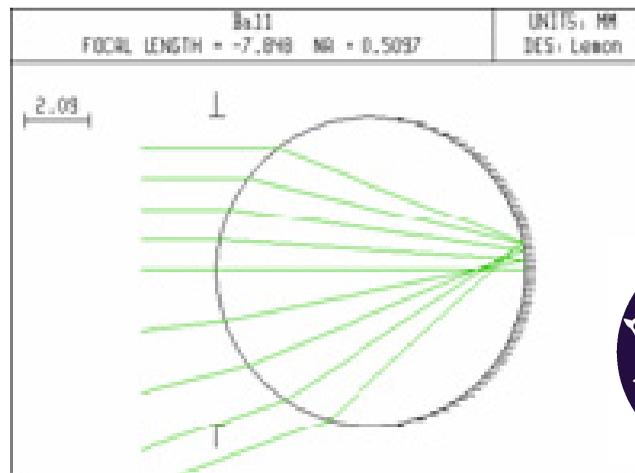
- 光波导, DWDM等
- BPM\_CAD, WDM\_Phasar...



# 光学计算软件的计算方法

## ■ Sequential Ray Tracing(序列光线追迹)

- OSLO 属于序列描光
- 以光学面建立模型
- 单一光源或者对多光源的设置受到局限
- 需要设计者指定光学面的计算顺序
- 各个光学表面仅计算一次（反射、折射、散射）
- 计算速度快
- 可以进行优化和公差分析
- 主要应用
  - 成像设计、透镜，镜头设计



# 光学计算软件的计算方法

## ■ Non-Sequential Ray Tracing（非序列光线追迹）

- TracePro 属于非序列描光
- 以实体对象构建光路系统
- 光线与实体表面的作用顺序不需设计者指定
- 光线与实体表面的作用可以同时计算反射、折射、散射、吸收、衍射等行为
- 需要足够多的光线数量以更接近真实的情况
- 计算速度比较慢
- 不易做自动优化和公差分析
- 主要应用
  - 照明设计、杂散光分析



# TracePro 软件简介

- 美国Lambda Research公司产品
- 一套符合工业标准的ACIS固体模型绘图软件做发展的光机软件；
- 广泛引用于镜头杂散光分析，背光板设计，LED照明，灯具设计，车灯，投影显示器，扫描仪，医疗仪器等领域



# TracePro 软件简介

## ■ 目前版本4.0

- 包含主程序以及与其它CAD软件的档案转换工具
- 主程序包含RC, LC, Standard, Expert四个版本
- 可以对真实场景(Photo realistic)进行计算和显示
- 具有众多的国内外用户群

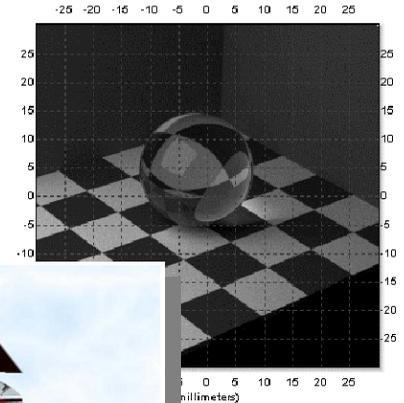
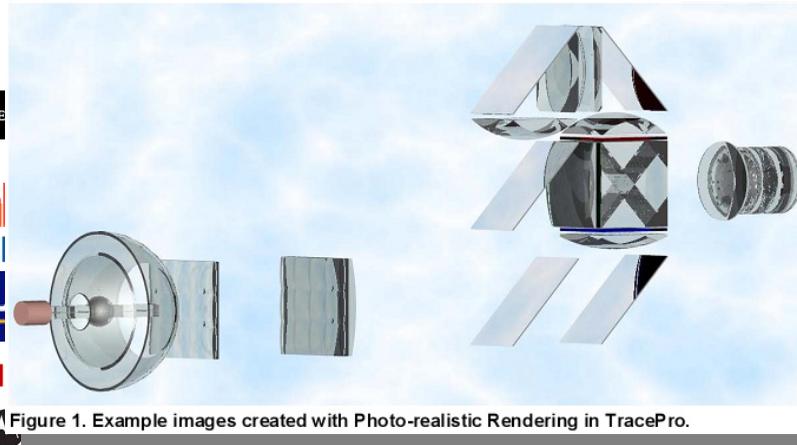


Figure 1. Example images created with Photo-realistic Rendering in TracePro.



# 系统安装

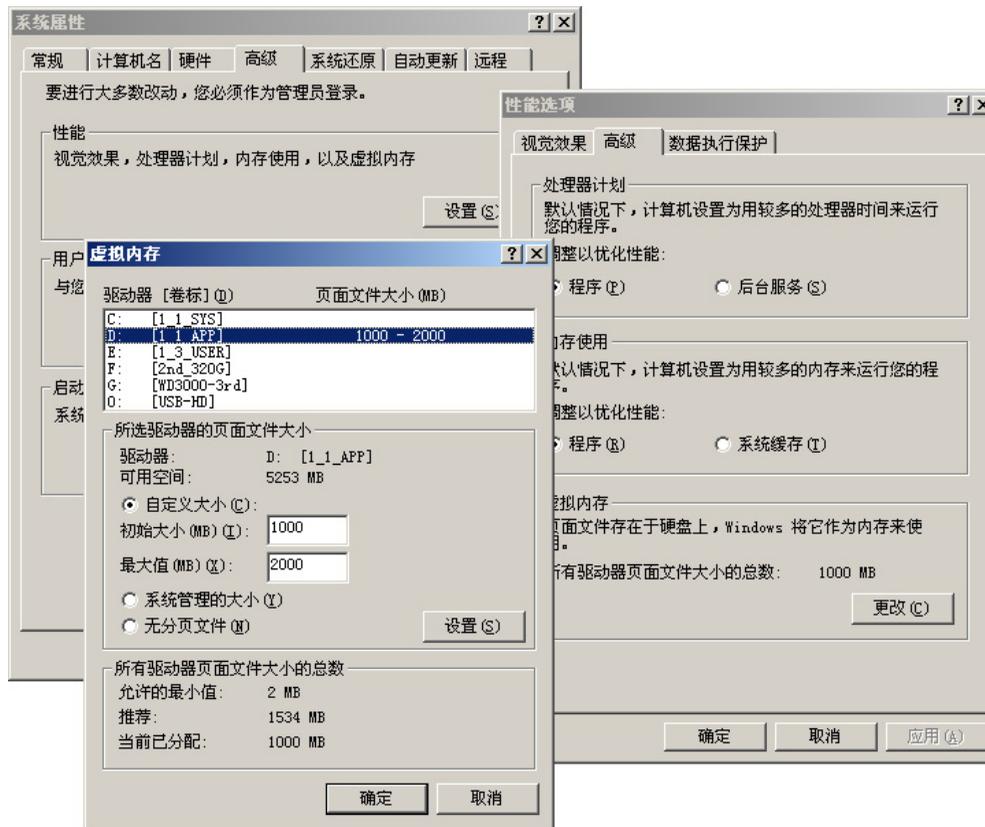
## ■ 系统要求

- CPU: Pentium4 2.0GHz
- 系统: Windows2000/XP/Vista
- 内存: 512MB (2GB)
- 虚拟内存: 2GB
- 硬盘空间: 450MB
- 显卡: 分辨率1208\*1024
- 显存: 64MB以上, 支持OpenGL



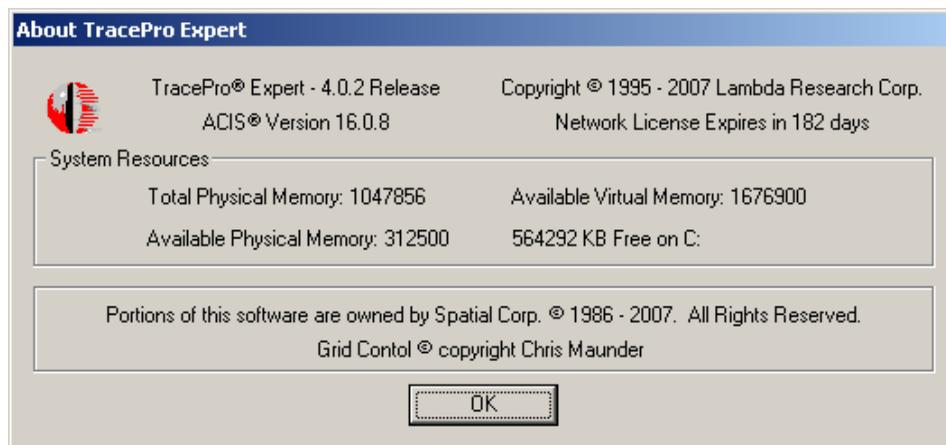
# 初始设定

- 对计算机内存、虚拟内存的要求较高
  - 增加物理内存和虚拟内存的数量
  - 在进度大量光线计算时不要运行其它软件



# 初始设定

- 菜单 → Help → About 查看TracePro版本
- ACIS Version
  - 第一套使用ACIS核心的软件
  - 可以顺畅的与其它造型软件进行文件的相互转换

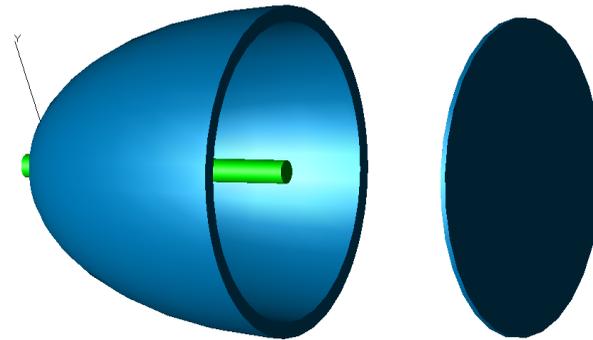
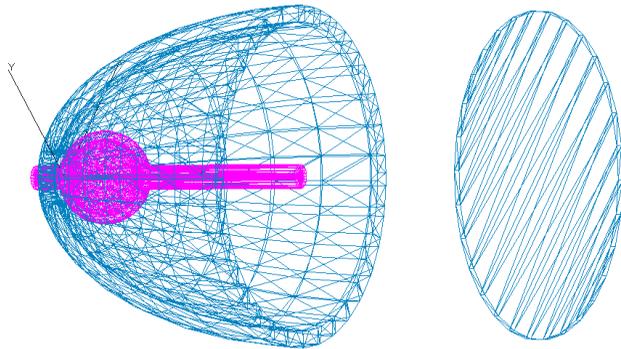


- 菜单 → Help → Linsense 查看软件授权情况



# 初始设定

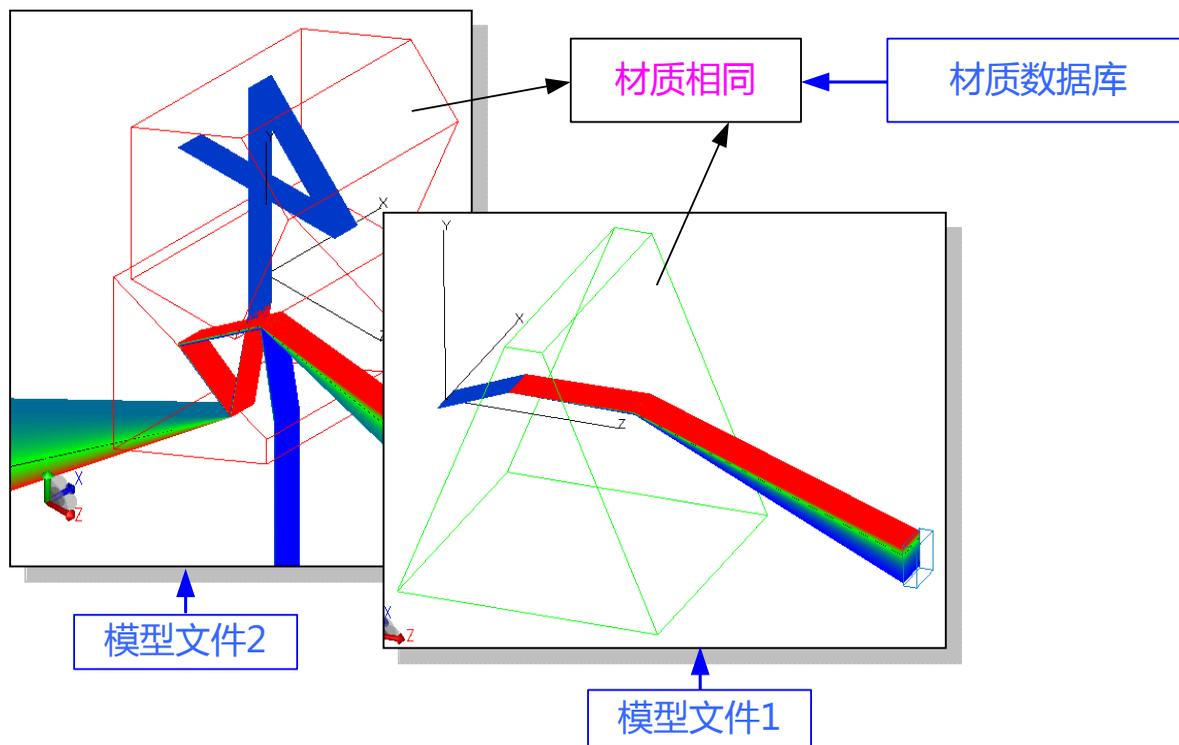
- 打开安装目录下面的EllipticalReflector.oml文件
- 在主界面中从不同角度观察模型，Zoom
- 使用各种渲染方式显示模型
  - Render
  - Wireframe



# 初始设定

## ■ 数据库设定

- TracePro 中表面（镀膜、散射、网点等）、实体（材质、偏振、荧光等）特性都被存在统一的数据库中。
- 该数据库也保存了所有用户自定义材质等信息



# 初始设定

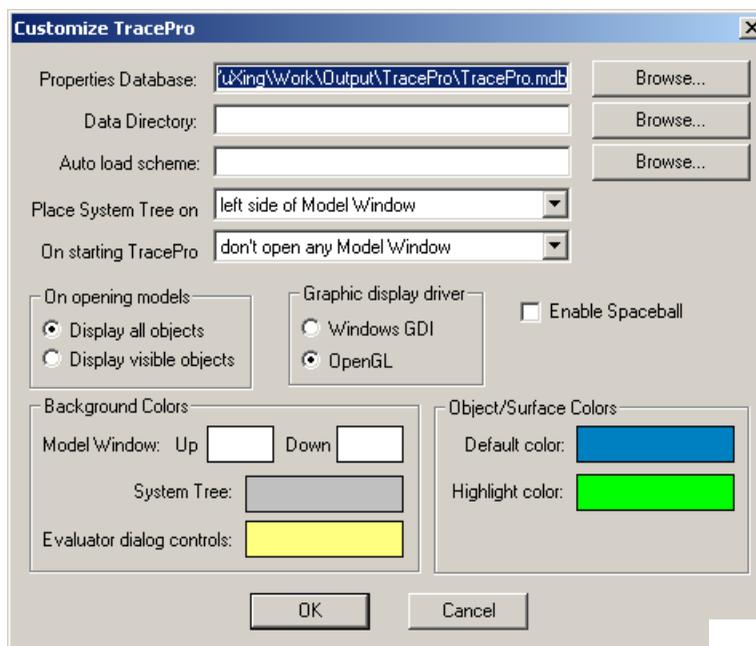
## ■ 数据库设定

□ 设定TracePro数据库TracePro.mdb路径

□ View>>Customize...

□ OML文件仅包含光路系统的部分信息，如果共享资料需要将材质等参数导出成文本文件。

□ Tools → Database → Export (F12)将材料保存成Excel格式文件



# 软件设定

## ■ Tracepro 设定

### □ 系统单位 View/Preference

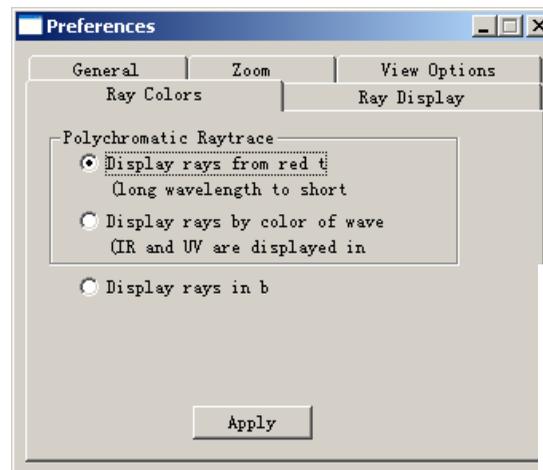
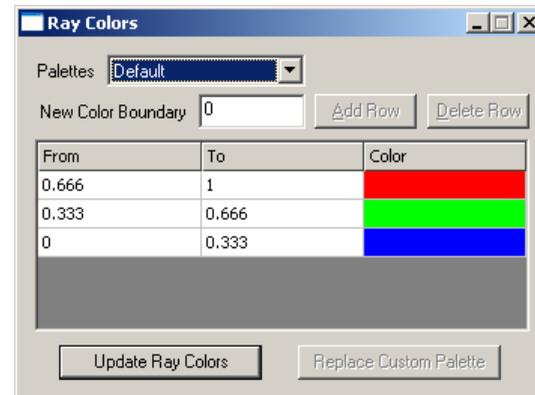
- 单位：从其它CAD软件倒入时单位要一致

### ■ Ray Colors 光线颜色设定

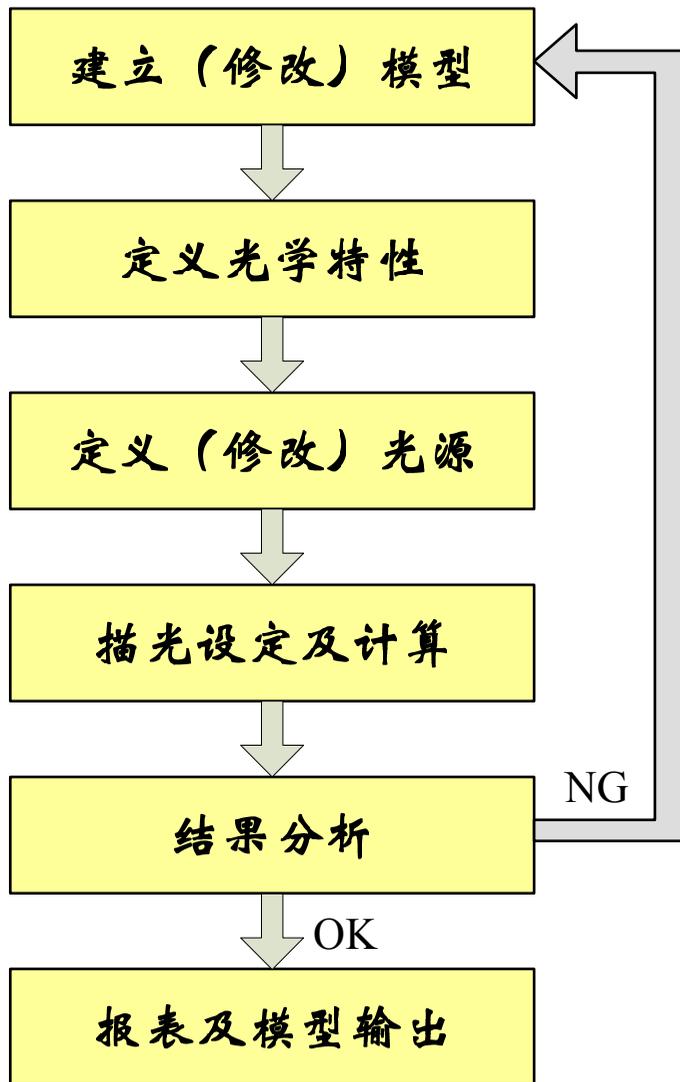
#### □ 用红、绿、蓝表示长波-短波

- 单一波长模拟时：代表光线Flux，假设出射光线Flux为1，经过一些表面反射、衍射后Flux会降低；
- 多波长模拟时：代表波长的长波、短波
- Demo/Color/SF6Prisim 示例

#### □ 用实际颜色表示光线的真实波长（红外、紫外部分用黑色表示）



# TracePro 模拟步骤



# 建立模型

- **TracePro 直接建立**
- **CAD文件转换或者利用Solidworks Bridge**
  - TracePro 与Solidworks搭配很好，可以在Solidworks做所有的建模、光学特性设定，只需在Solidworks中调用TracePro的描光功能即可。
  - 利用CAD软件，如Solidworks, Pro/E, Catia, UG等建立三维实体模型后导入TracePro
- **光学设计软件**
  - 可以读取Zemax, OSLO, CodeV的镜头文件。
  - 导入光学部分，加入机构、光源
- **用宏语言Scheme语言进行**
  - 最早由MIT开发，属于Lisp语言，功能强大，比较复杂

# 建立模型

## ■ 信息栏

- 鼠标在窗口移动，信息栏右侧部分显示当前位置
- 鼠标左键单击，信息栏中间部分显示单击位置的坐标

## ■ Insert菜单

- 透镜
- 菲涅耳透镜
- 反射镜
- 遮光板
- 导光管
- 基本实体
- 文件中的部件



# 建立模型

## ■ Insert/Lens Element...

插入透镜实体

Conic: 二次曲面系数  $z = \frac{cv \cdot r^2}{1 + \sqrt{1 - cv(cc+1)r^2}}$

- cc=0: 球面 cc=-1: 抛物面
- cc<-1 双曲面 -1<cc<0: 椭球面

Obstruction: 透镜是中间带孔

Aspheric: 非球面系数

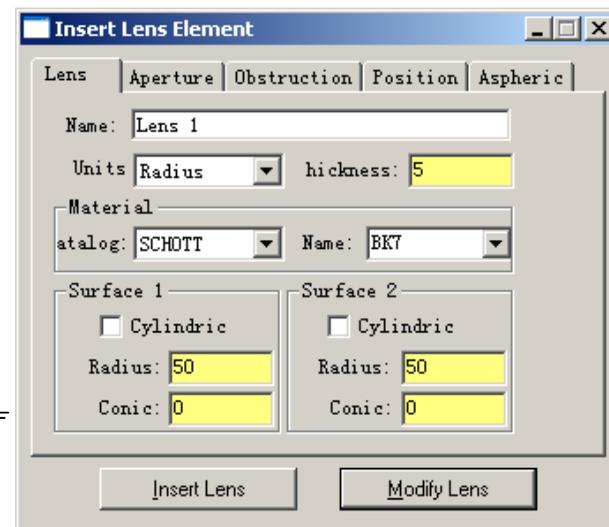
## ■ 选择实体

在Object Tree选中

点击选择实体按钮  后直接用鼠标选择实体

## ■ 修改实体

选中实体后, Modify



# 建立模型

## ■ 模型建立方式的区别

- TracePro内建模型计算最快
- 其它CAD文件导入模型的计算比较慢

## ■ 例如：球面的建模方式不同

- TracePro内建的球面是通过球面半径、球心等参数建立
- 其它CAD软件导入文件的球面则可能是很多点描述的球面
- 在计算光线与球面的反射、折射、散射等行为时不同建模方式需要的计算量区别很大。



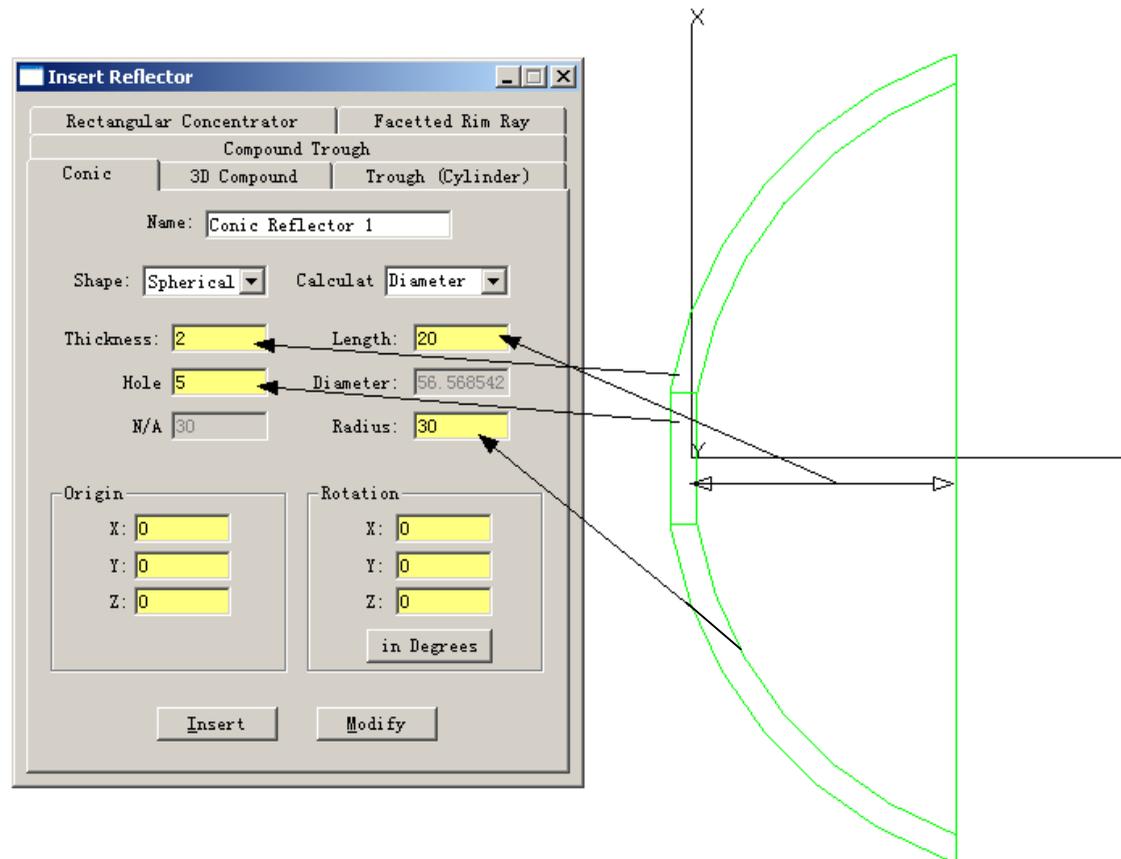
# 建立模型

- 反光杯建模Insert/Reflector...
  - Conic 二次曲面型
  - 3D Compound 复合反射表面
  - Trough 水槽型（二次曲线沿垂直线Sweep得到）
  - Rectangular Concentrator 方形反射面
  - Facetted Rim Ray 多面体反射面
- 每个参数的具体含义可以通过及时帮助   查询



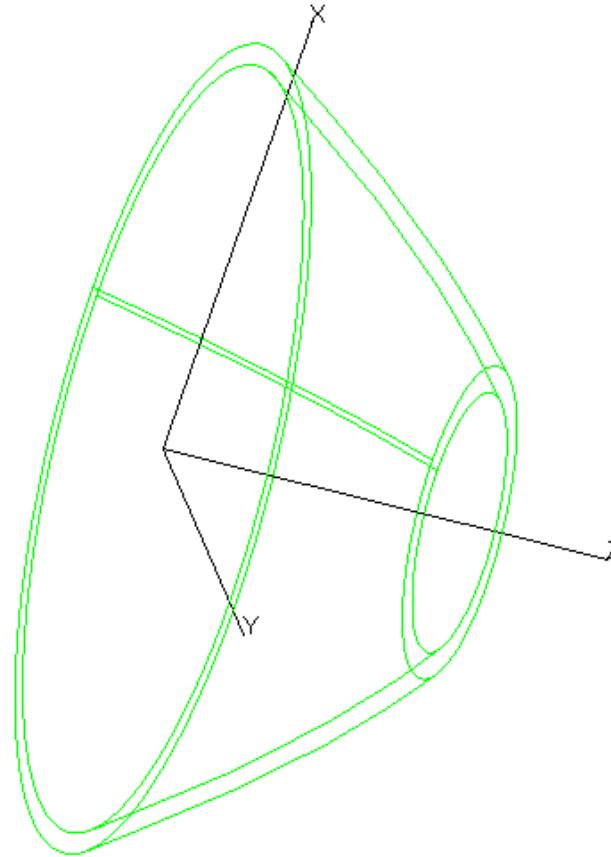
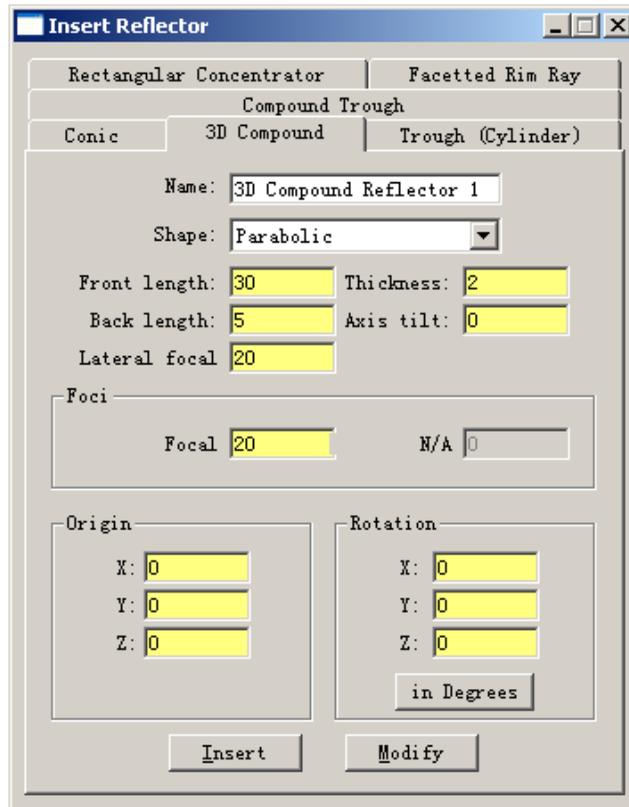
# 建立模型

## ■ Conic



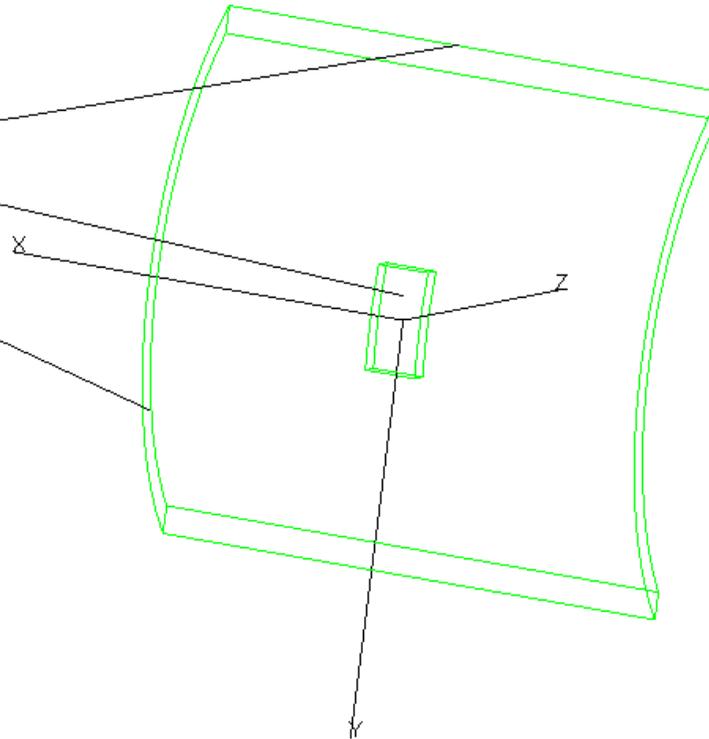
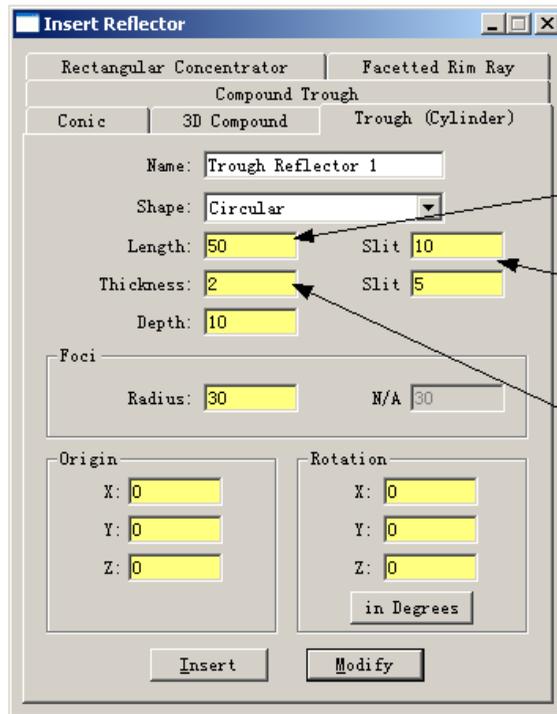
# 建立模型

## ■ 3D Compound



# 建立模型

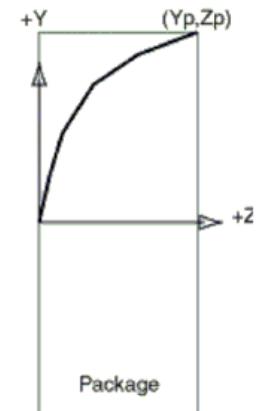
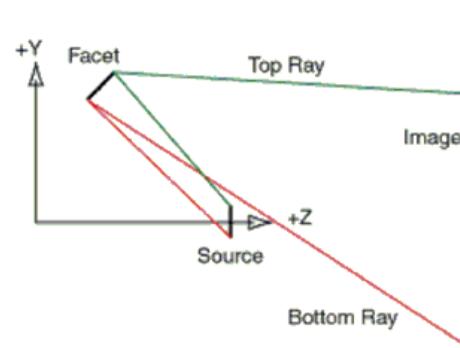
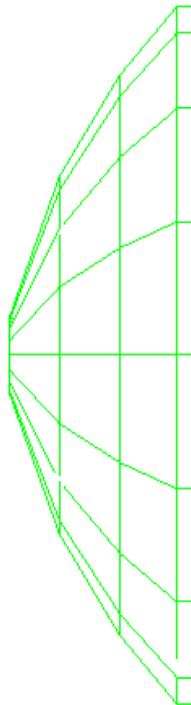
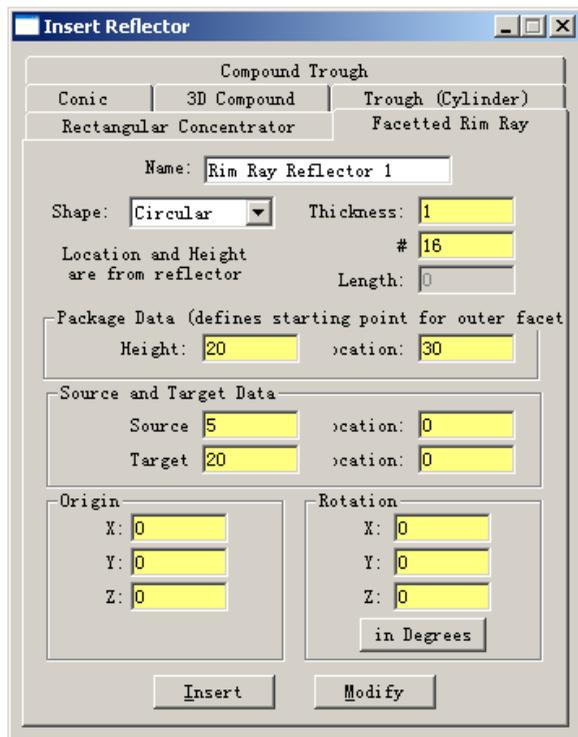
## ■ Trough(水槽型)



# 建立模型

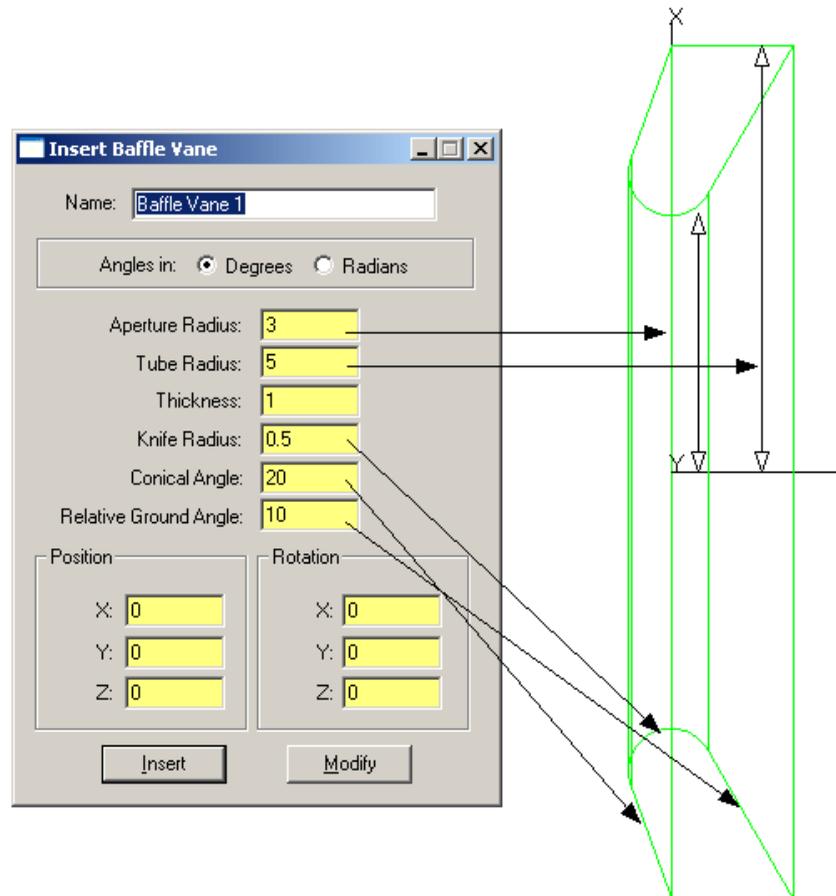
## ■ Facetted Rim Ray

- 多面体反射面：指定光源位置、大小及目标位置、大小，可以自动生成多面体反射面



# 建立模型

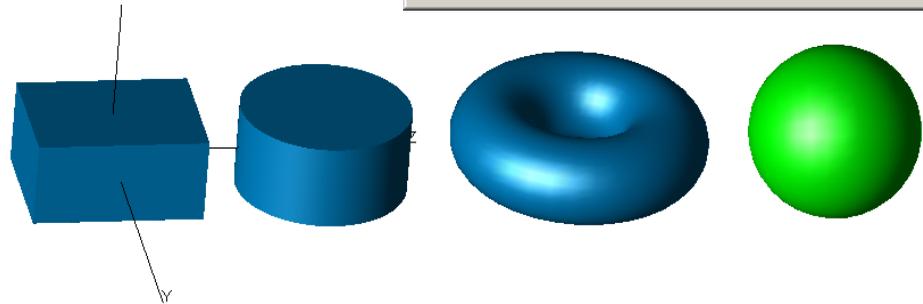
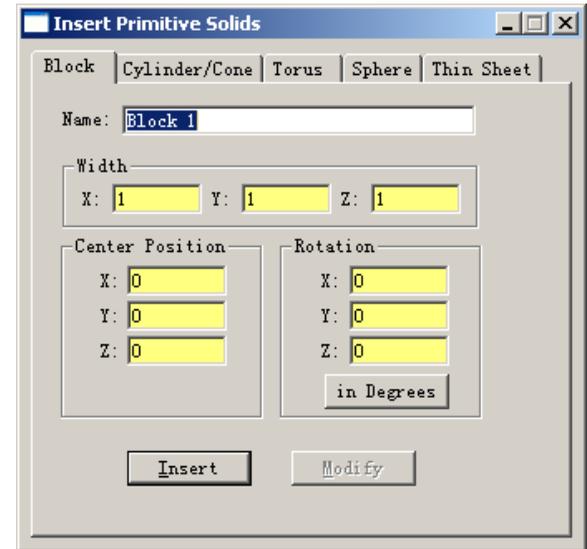
## ■ Baffle Vane 遮光板



# 建立模型

## ■ Primitive Solid 基本形状

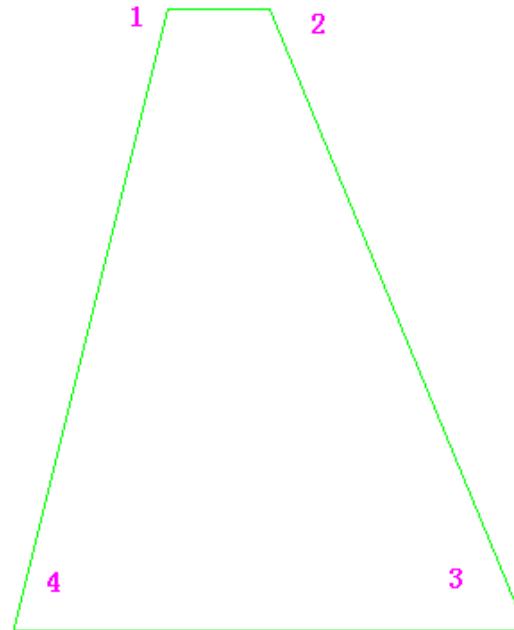
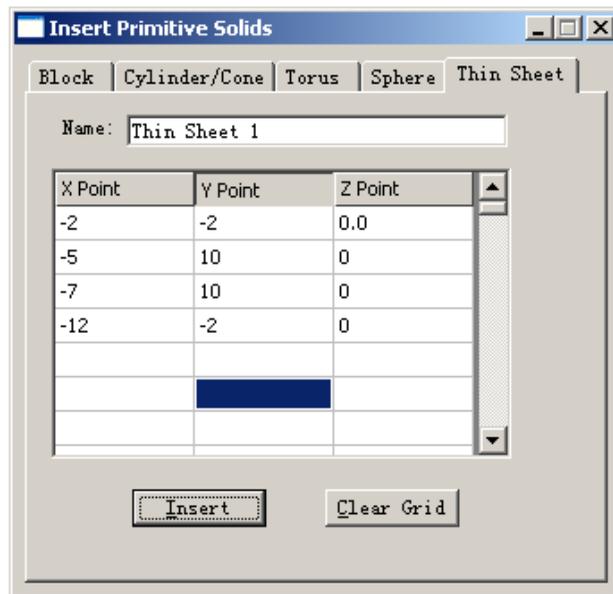
- Block
- Cylinder/Cone
- Torus
- Sphere
- Thin Sheet



# 建立模型

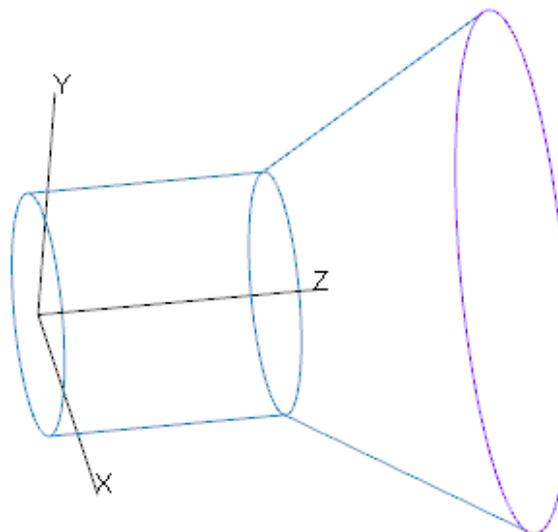
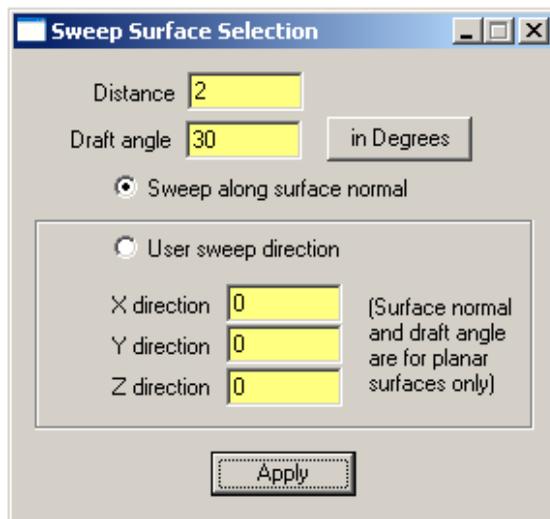
## ■ Thin Sheet

- 用于建立截面形状较复杂的实体模型
- 通过Sweep、Revolve形成实体
- 建立时每个端点要按顺时针或逆时针顺序依次输入



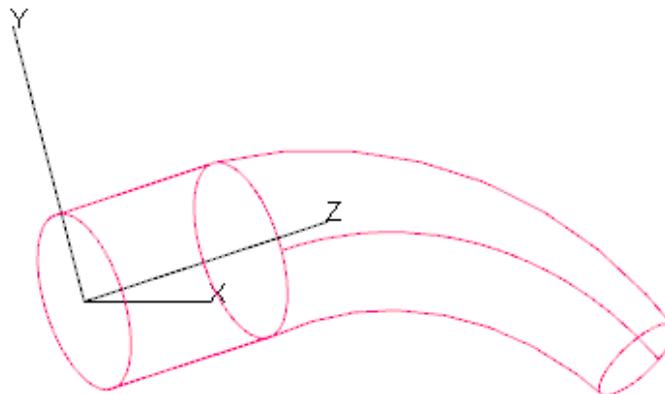
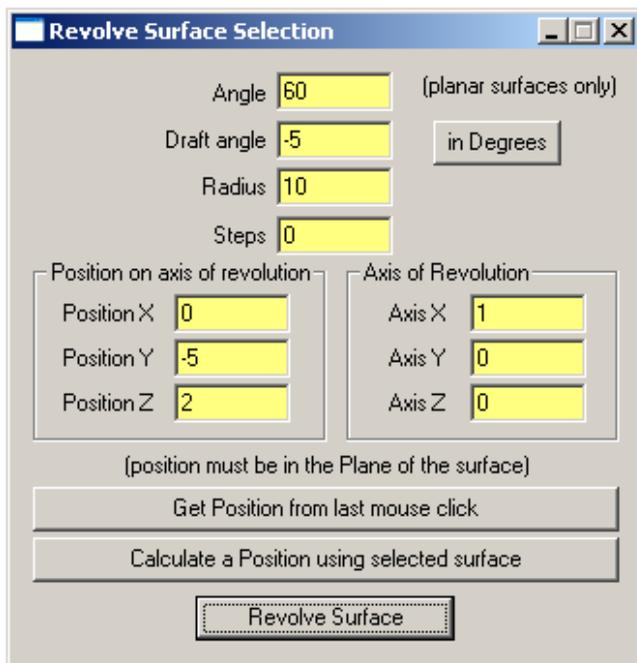
# 建立模型

- Sweep 由Surface沿指定方向扫出实体



# 建立模型

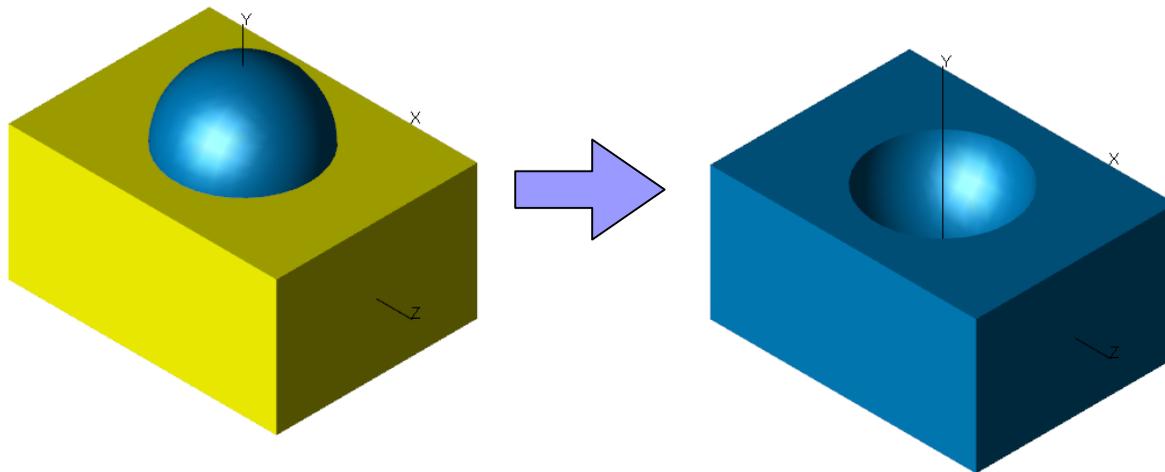
## ■ Revolve Surface 绕指定轴旋转形成模型



# 建立模型

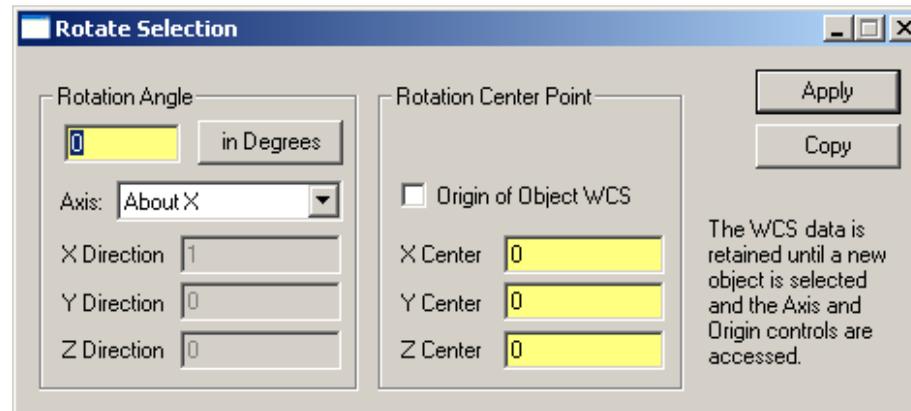
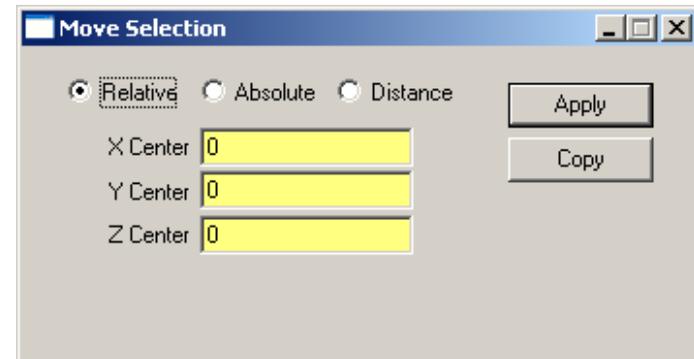
## ■ 布尔运算

- 只针对Object而不能用在Surface上面
- 首先选择一个实体，按住Ctrl同时选中另外一个
- Unite: 实体相加
- Abstract: 实体相减: 选择被减实体、再选择减除实体
- Intersect: 实体交集



# 建立模型

- 对实体的移动和转动 菜单Edit/Object
  - Translate 自由拖动（不准确）
  - Move
  - Rotate
  - Scale
  - Orientation



# CAD转档

## ■ IGES, STEP, SAT, STL, Translator

- 由于TracePro采用ACIS核心，因此对SAT文件支持最为完善
- 可以直接读取SAT文件不需要转换。
- CAD软件导入TracePro时不能保存材料特性，在CAD软件中修改之后只有SAT文件可以保存材料属性信息。

## ■ CATIA, Pro/E Reader & Writer

## ■ Solidworks Bridge

- 安装后可以在Solidworks下建立模型、定义材质特性、建立光源等操作；调用TracePro进行描光和分析。

## ■ Healing 利用Healing修正模型错误，破面修补

# SAT文件格式

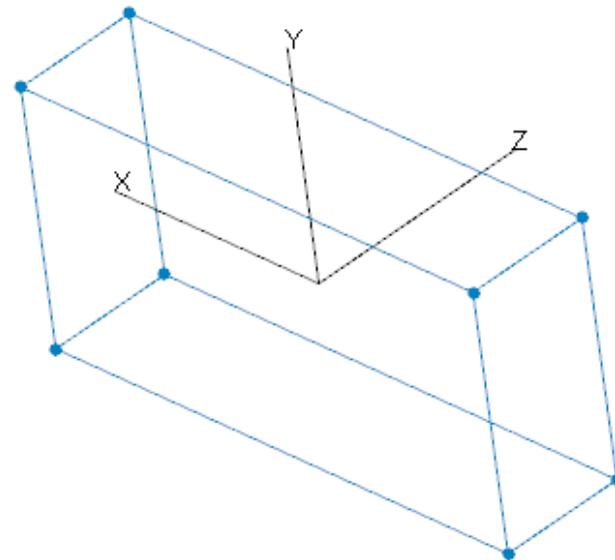
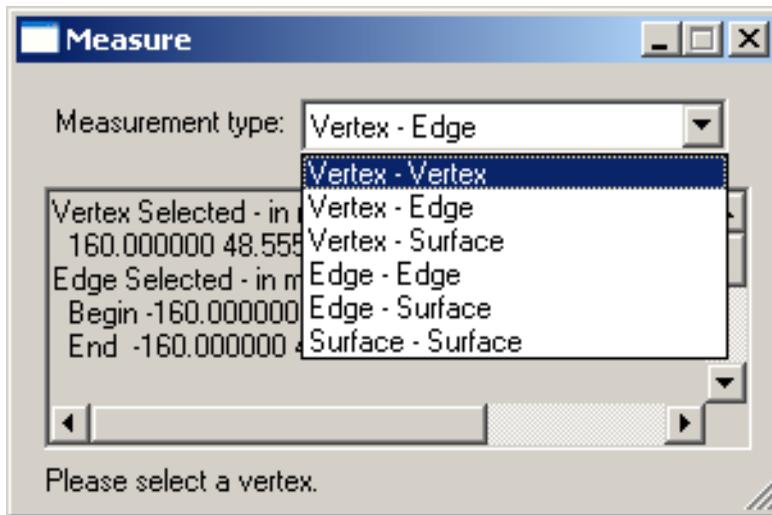
- 在TracePro定义的模型的属性（**Properties**），用其它**ACIS-Based** 建模软件打开档案，其属性仍然存在；用建模软件修改模型后，再用TracePro打开**Properties**不变
- 可以存储在**SAT**文件中的属性包括
  - Material Properties
  - Surface Properties
  - Surface Source Parameters
  - Importance Sampling Targets
  - Prescription Data
  - Object and Surface Names
  - Exit Surface for Simulation mode
- **SAT**不能存储**Analysis**菜单中定义的参数

# 导入镜头设计软件的文件

- Insert Lens Design Software data
  - OSLO
  - Zemax
  - CodeV
  - ACCOS
  - Sigma2000
- File/Open 直接打开相应文件

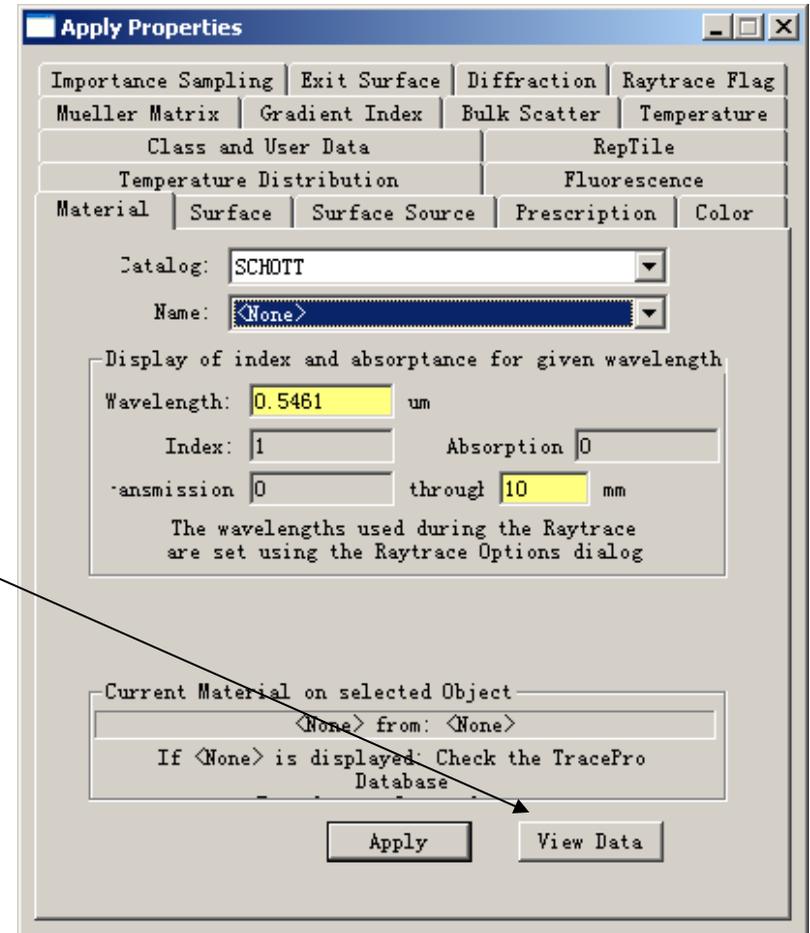
# TracePro空间距离的测量

- Tools/Measure...



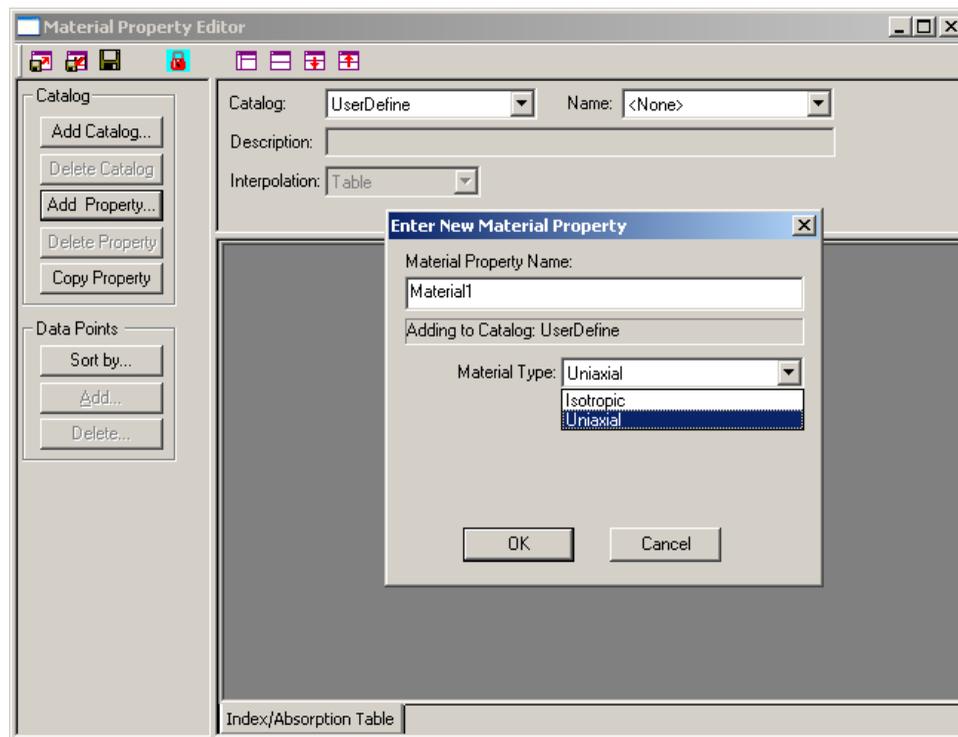
# 定义光学特性

- Apply Properties
  - Material
  - Surface properties
- 材质新增、修改
- 光学特性的编辑



# 定义光学特性

- 材质新增、修改
  - 增加一个Catalog
  - 在新Catalog下面增加新的Property
  - Isotropic: 各向同性
  - Uniaxial: 单轴晶体

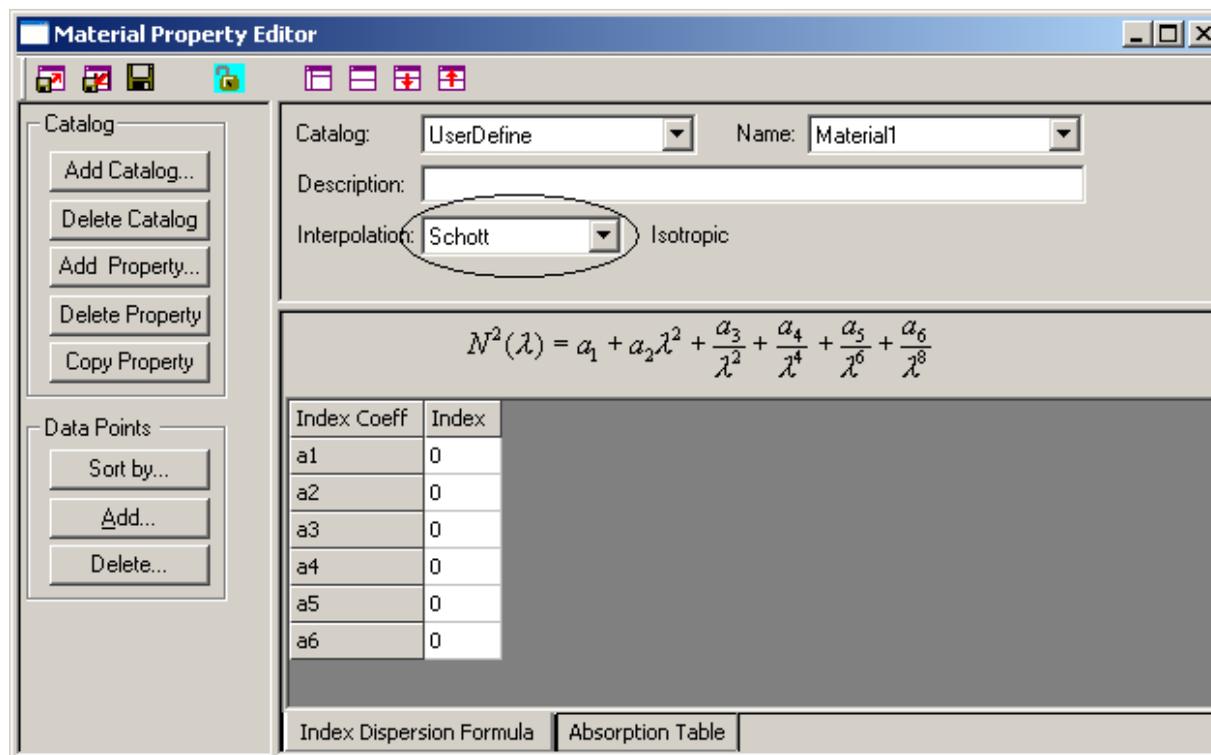


- Add可以增加波长、温度点
- 对于列表中没有的波长、温度点，TracePro采用线性内插方式计算
- 对于列表范围以外的波长、温度点，TracePro采用最近一点的值
- 点储存将新建立的材料储存

# 定义光学特性

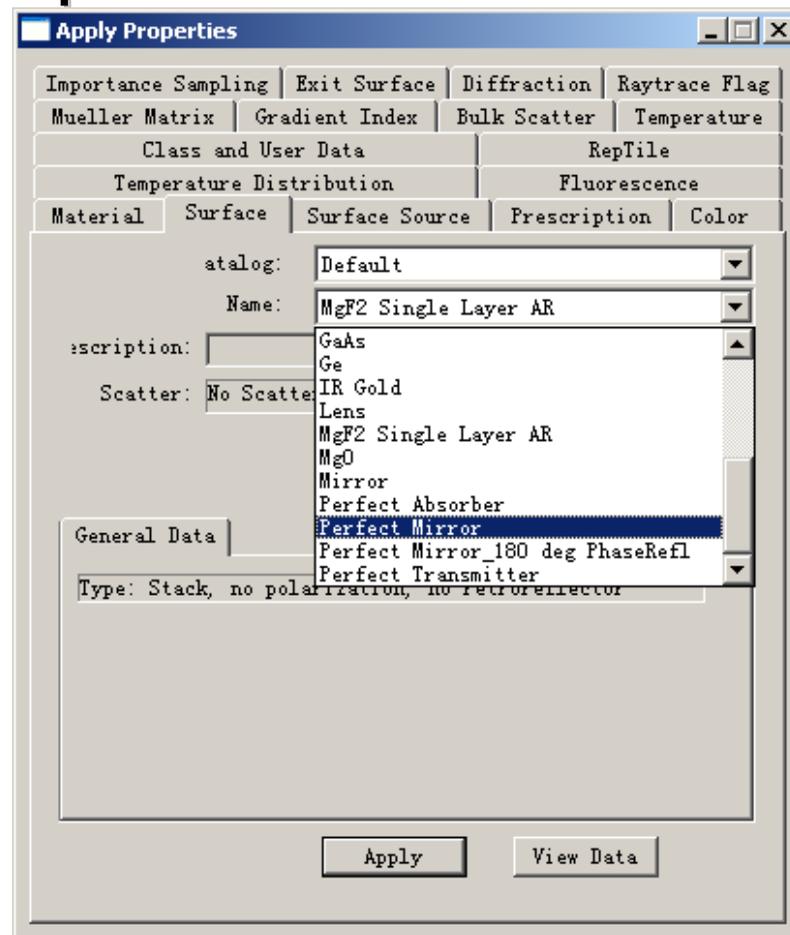
## ■ 材质新增、修改

- 也可以通过材料拟合公式的方式输入折射率公式系数



# 定义表面特性Surface Properties

- 在Object Tree选择需要设定的Surface
- 在Properties里面选择Surface页面



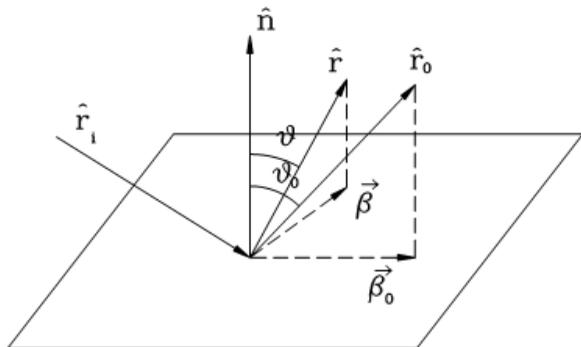
# 定义表面特性 Surface Properties

## ■ 设定散射模型

- BSDF (Bidirectional Scattering Distribution Function)
- BRDF(BTDF) Bidirectional Reflectance (Transmittance) Distribution Function

□ ABg

$$\text{BSDF} = \frac{A}{B + |\vec{\beta} - \vec{\beta}_0|^g}$$



$$a + R_s + T_s + R_{TS} + T_{TS} = 1$$

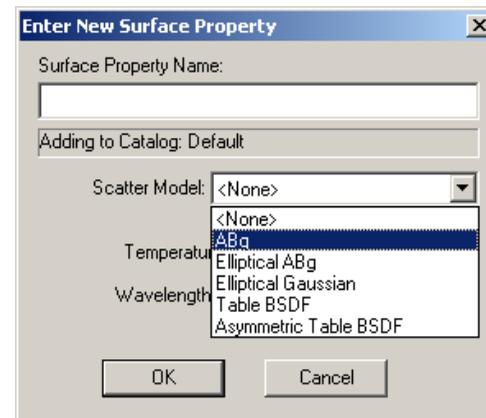
where a = absorptance

$R_s$  = specular reflectance

$T_s$  = specular transmittance

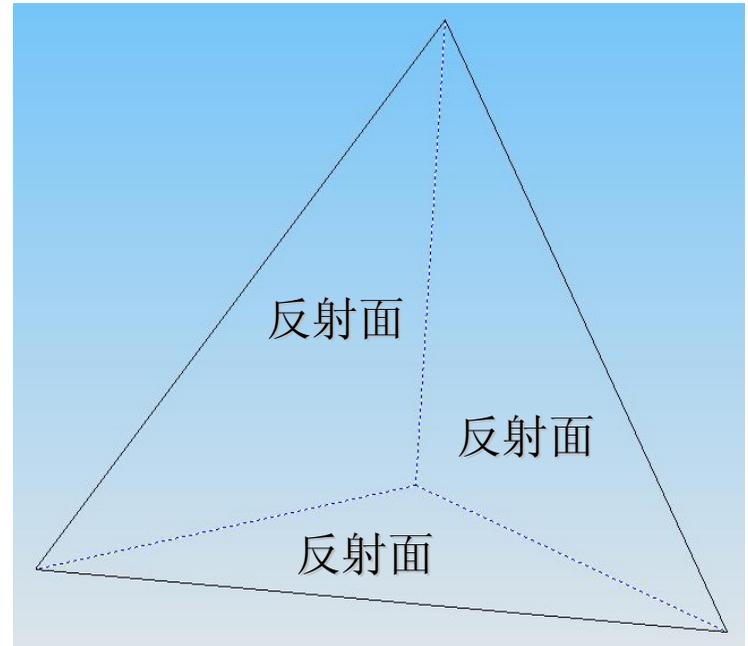
$R_{TS}$  = TS for reflection

$T_{TS}$  = TS for transmission.



# 定义表面特性Surface Properties

- Retroreflector: 棱镜反射器
- Polarization: 偏振

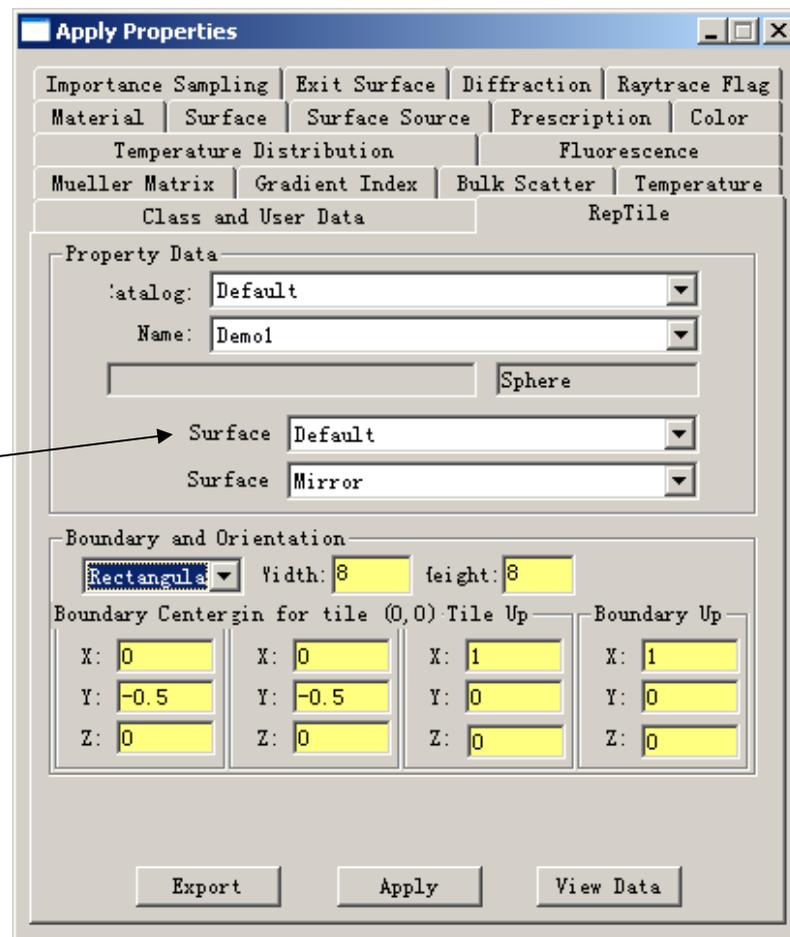
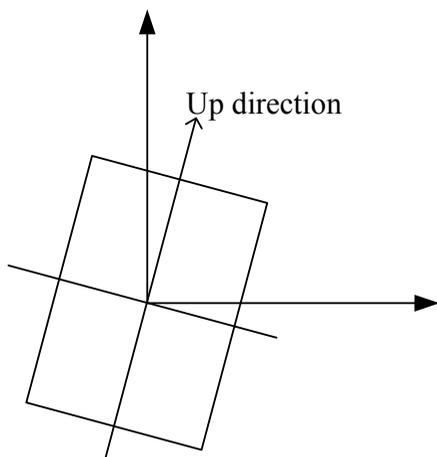


# 定义表面特性Surface Properties

- **Fluorescence:** 荧光粉特性
- **Prescription:** 光线与Surface的作用顺序，用于Auto Importance Sample
- **RepTile:** 设定网点
- **Mueller Matrix:** 定义偏振器件，Polarizers, Wave Plates
- **Bulk Scatter:** 体散射特性（如大气散射，生物医学检测等）
- **Color:** 设定模型颜色，透明度等
- **Temperature:** 设定温度特性
- **Gradient Index:** 渐变折射率材料

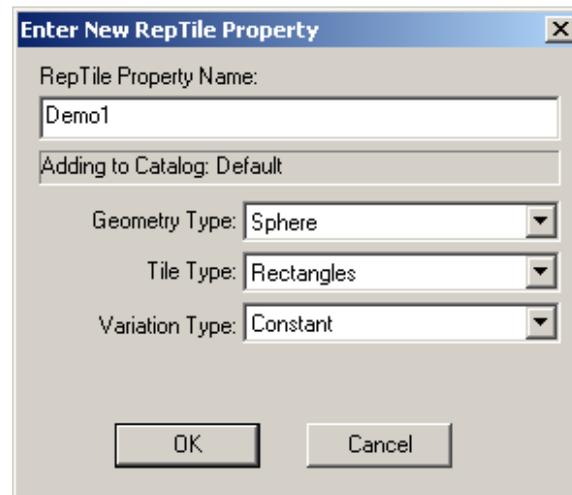
# RepTile定义网点

- 主要用于Back Light
- 首先建立导光板
- 编辑面属性中的RepTile
- 网点位置处表面属性
- **Boundary Up:**  
边界Y方向矢量方向



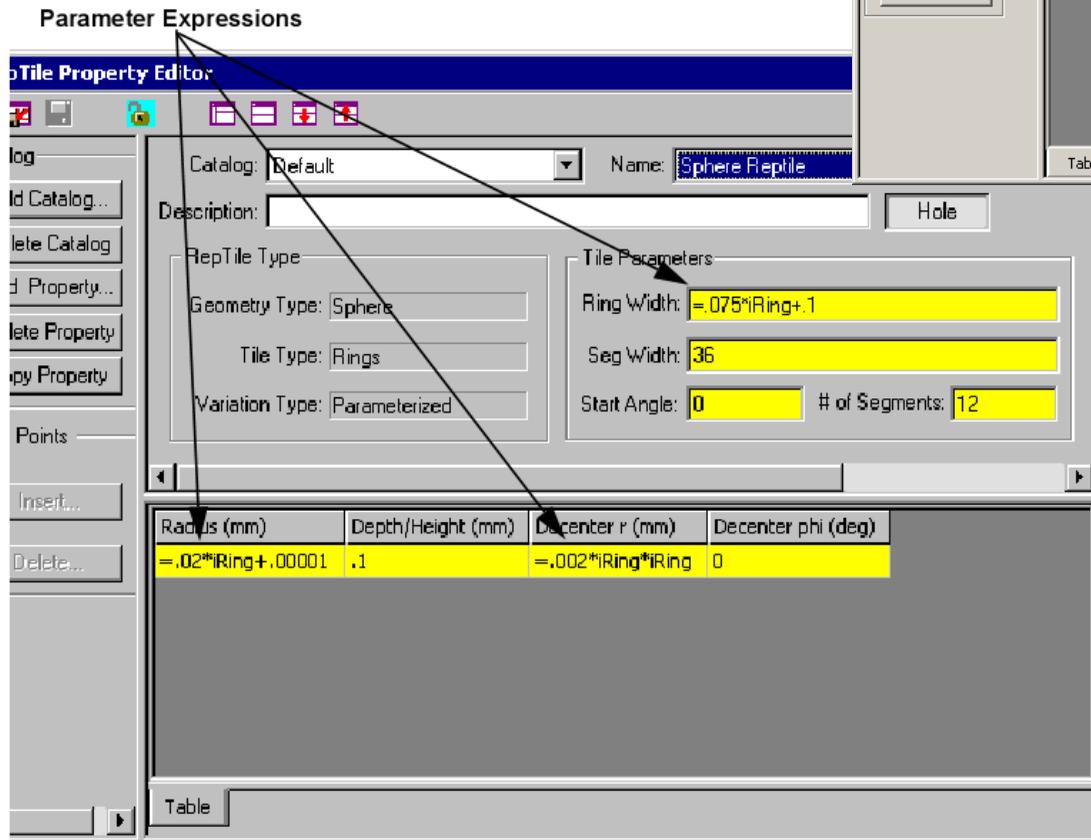
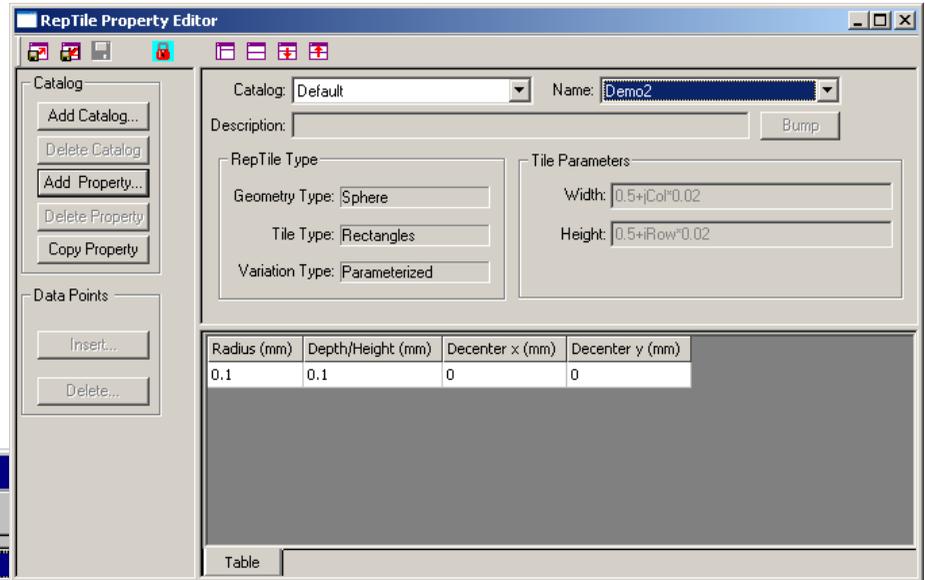
# RepTile定义网点

- 在RepTile属性对话框中点击View Data进入网点属性设置界面
- 新建Property
  - Bump（凸起）,Hole（凹陷）
- 网点形状
  - Fernel、Cone、Sphere、Prism...
- 网点分布形状
  - Ring、Rectangle、Hexagonal...
- 网点分布参数
  - Constant, Variable Rows, Parameterized



# RepTile定义网点

- 网点距离参数
  - iRow 行编号变量
  - jCol: 列编号变量



# RepTile定义网点

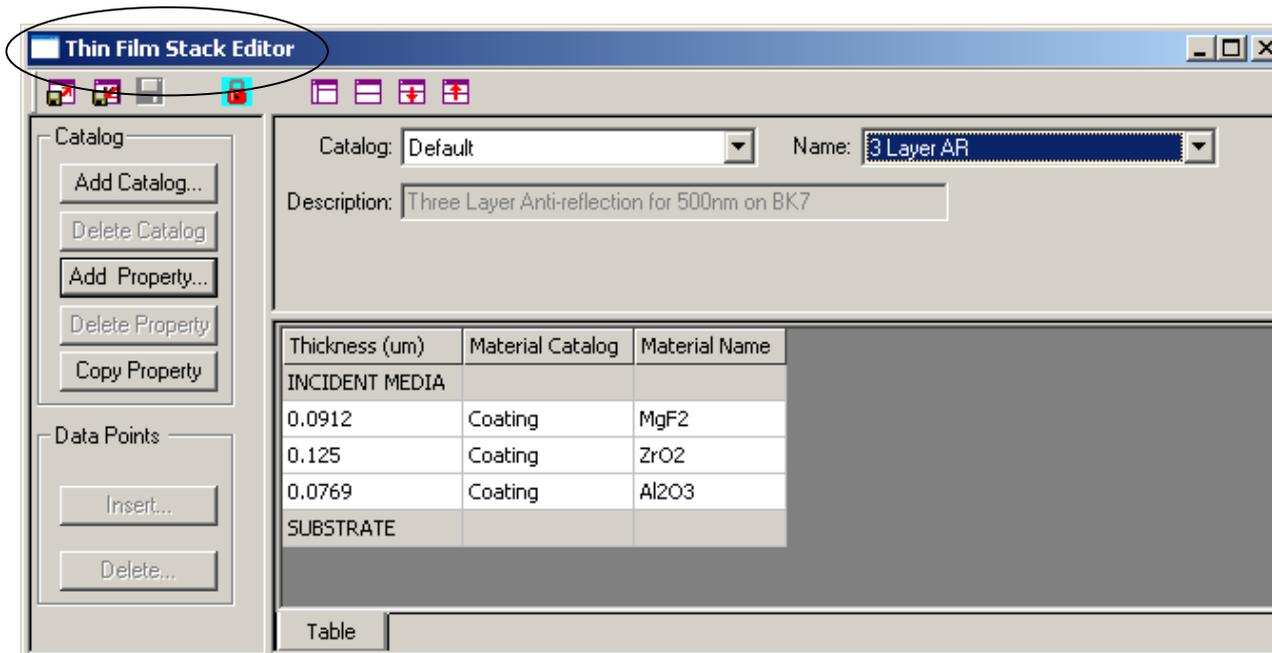
## ■ 网点距离参数

Tile Type	Input Field	Associated Variable Names
Ring	Ring Width	iRing
	Seg. Width	IRing, jAzi
	Start Angle	IRing
	# of Segments	iRing
Rectangles	Width	jCol
	Height	iRow
Staggered Rectangles	Width	jCol
	Height	iRow
	Row Offset	iRow

其它参数参考TracePro用户手册

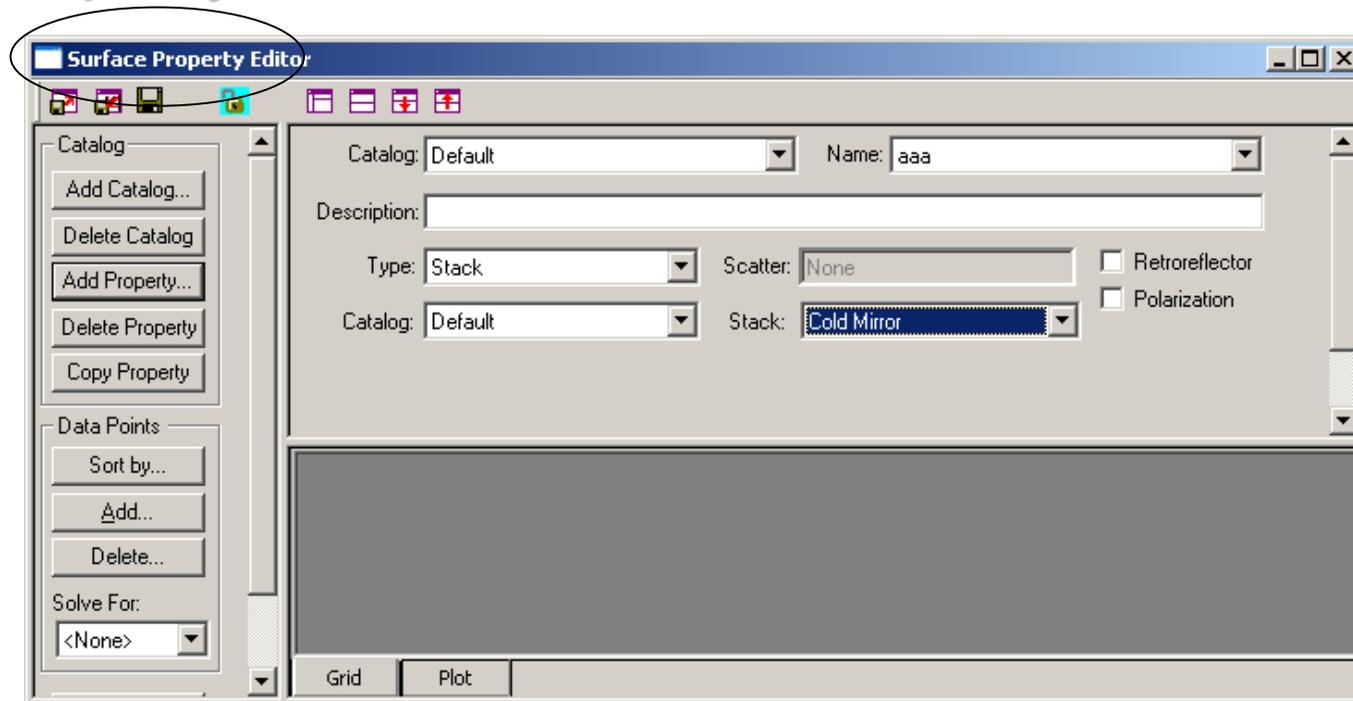
# Surface Properties – Thin Stack膜层

- 1. 建立膜层
  - Define/Edit property data/Thin Stack
  - 输入膜层具体参数



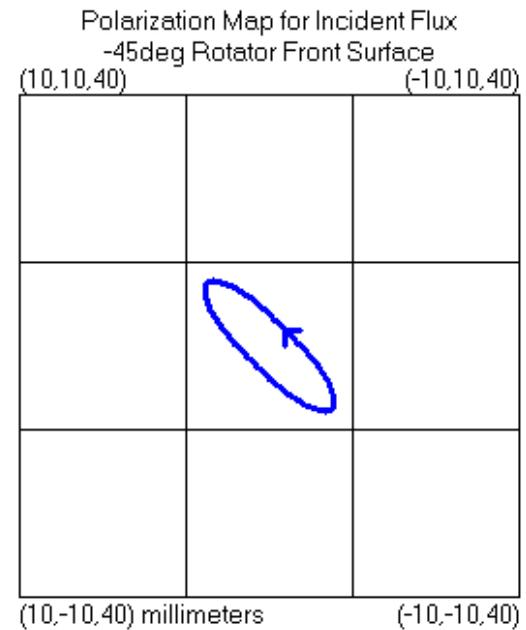
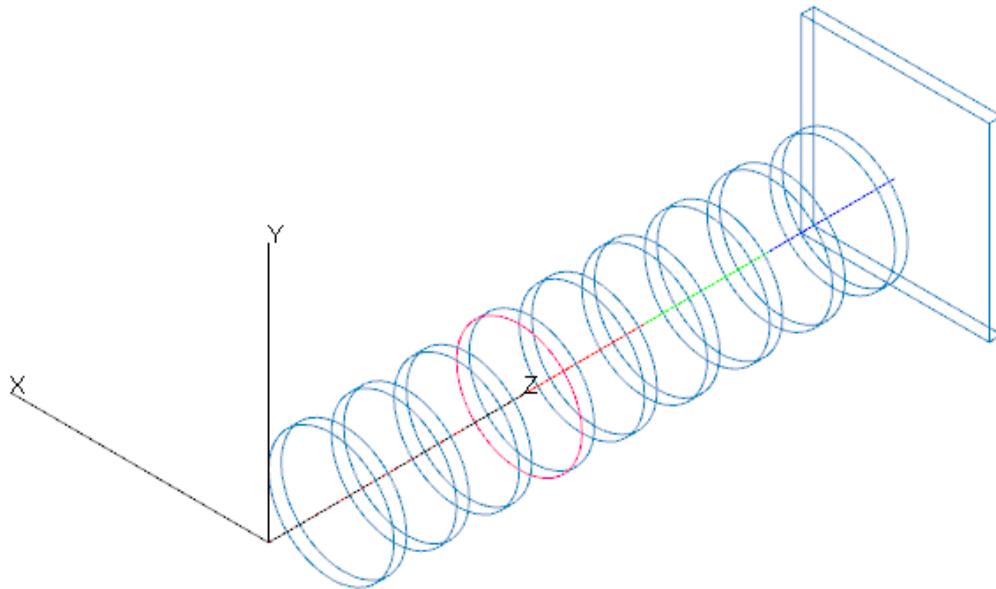
# Surface Properties – Thin Stack膜层

- 2. 建立Surface Property 加入刚刚建立的膜层名称在Type列表中选择Stack
- 3. 在设定面参数时可以使用刚刚加入的Surface Property



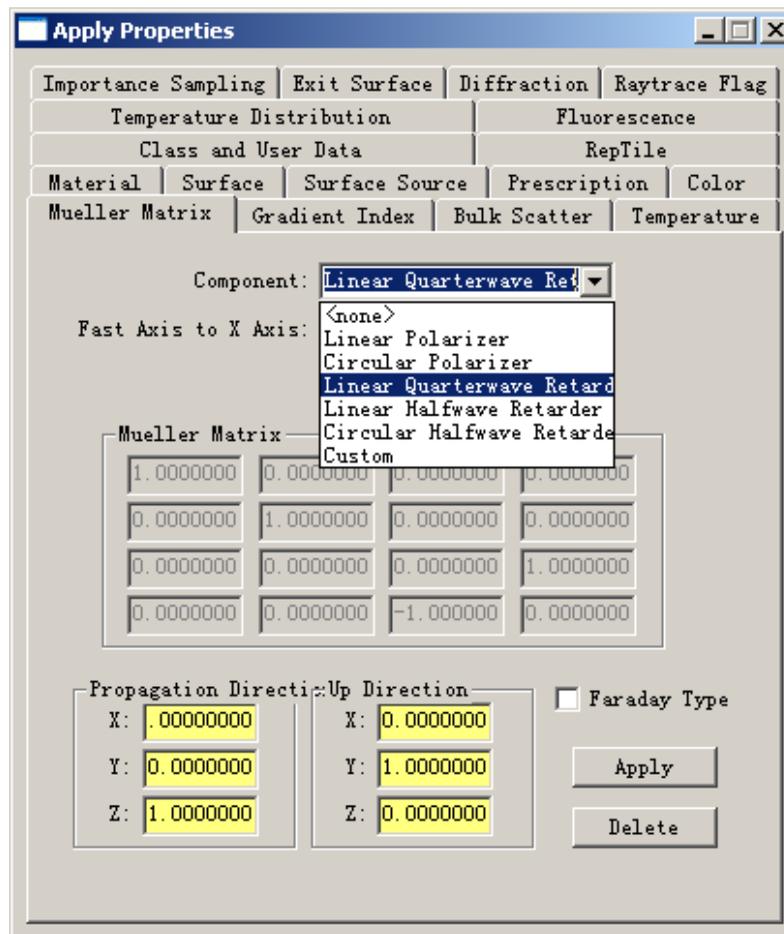
# 偏振计算

## ■ Demo/Polarization 示例



# 偏振设定

## ■ Demo/Polarization 示例

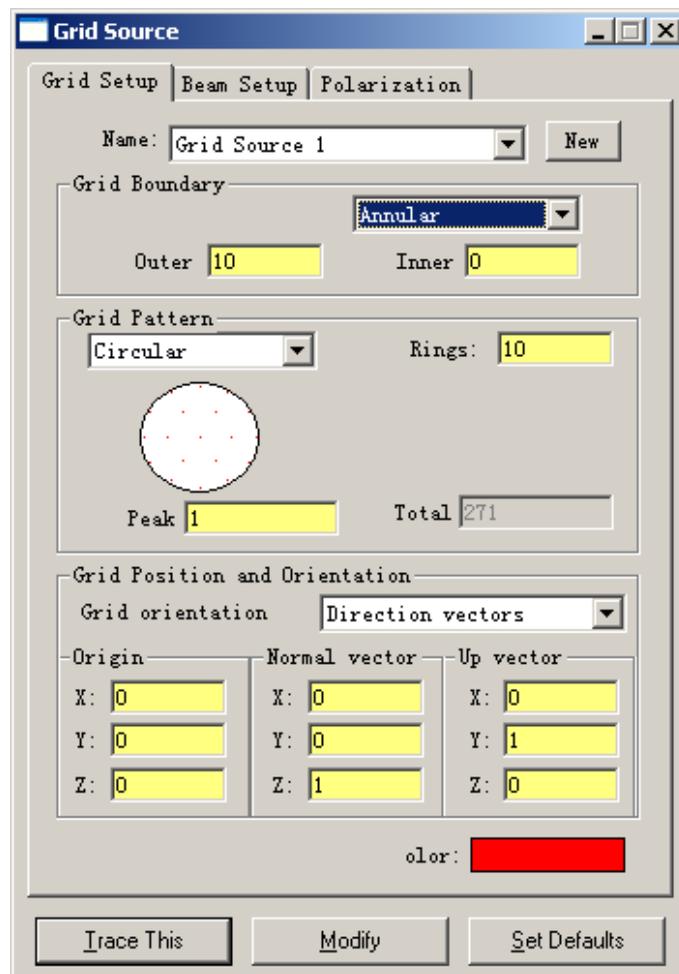


# 光源设定

- **Grid Source 格子光源**
  - 平行光、高斯光束、偏振光
- **Surface Source**
  - 各种灯泡、LED、荧光灯管
- **Source File**

# 光源设定

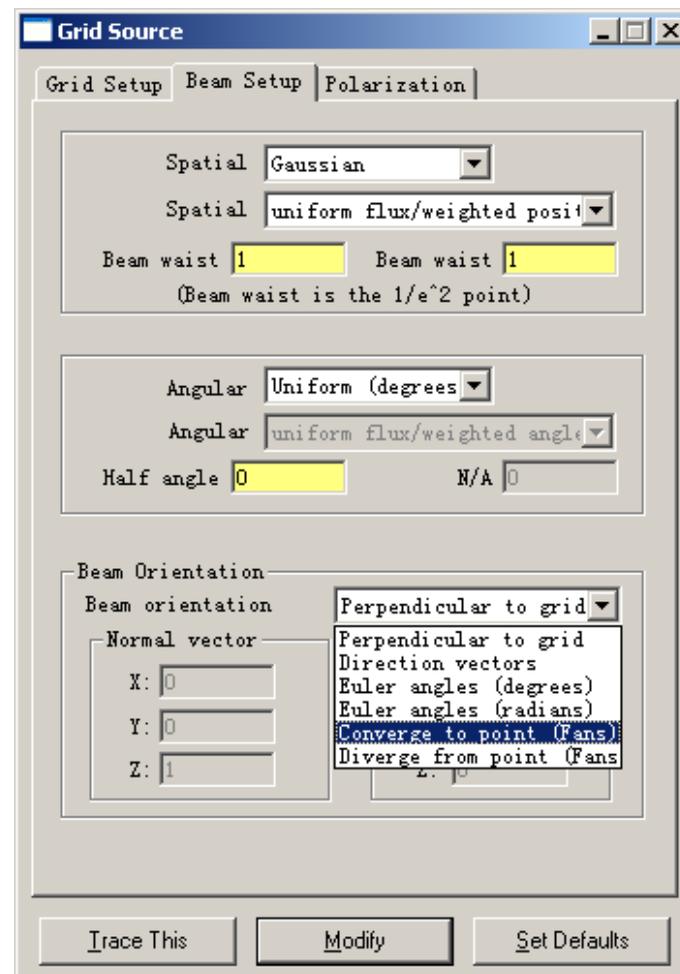
- Grid Source 格子光源
  - 4.0版本之前只能建立一个
  - 4.0版本之后可以建立任意多个
- Up Vector 设定
  - Y轴方位



# 光源设定

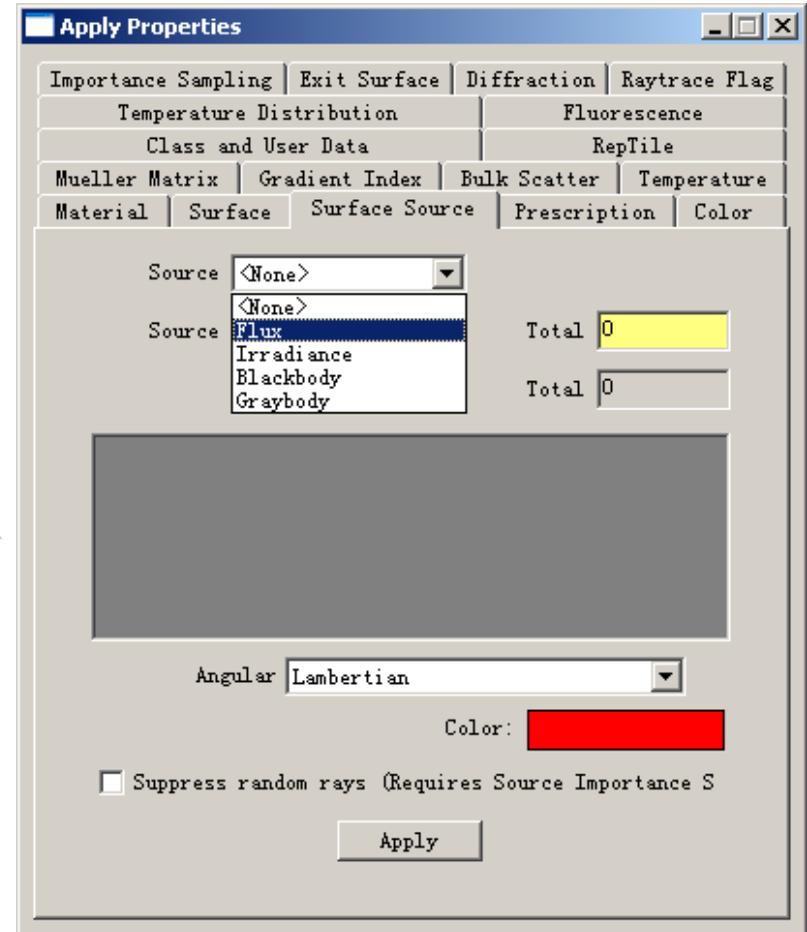
## ■ Grid Source/Beam Setup

- Uniform flux/Weight position 对于高斯光束，设定光线flux相同，光线密度按照高斯分布
- Uniform position/Weight flux 设定密度为相同，光线能量按照高斯分布
- Converge to Point 聚焦到某点
- Diverge from point 从某点发散



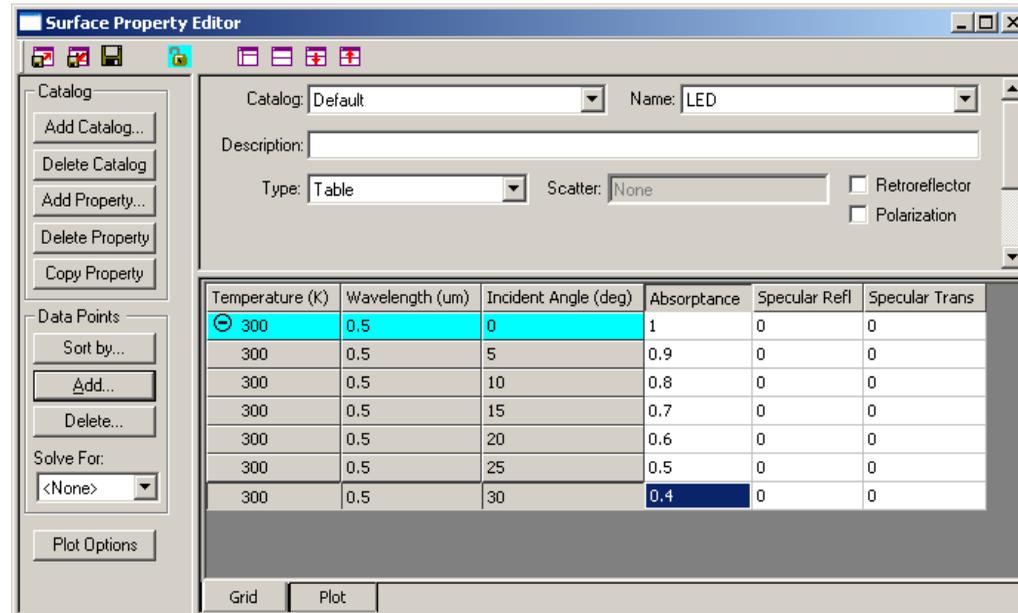
# Surface Source

- 定义发光面，选择Surface Properties里面的Surface Source 页面
  - Angular
    - Lambertian 余弦分布
    - Normal to Surface 垂直于表面
    - Surface Absorptance 自定义光强分布
    - Uniform 均匀分布



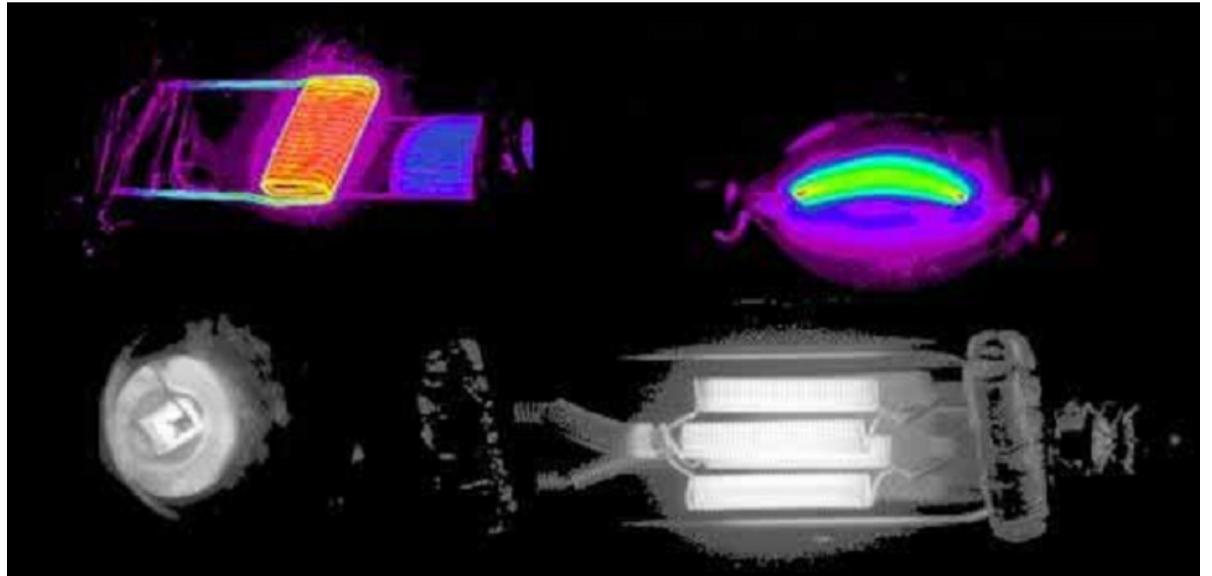
# Surface Source

- Surface Absorptance 自定义光强分布
- 到Surface标签页，点击View Data 进入编辑窗口
- 新建Property
- 输入”角度-Absorptance”参数
- 在保存之前选择Solve For Trans保证能量守恒
- 对于非对称光源在Type中选择 Anisotropic



# 其它光源档案

- Radiant Image Source Model
- Source File



# 描光设定

## ■ Analysis Mode

- 计算光线在所有物体、表面上的位置、方向、Flux、偏振等数据，并将数据存储在硬盘的数据库。
- 光线信息最全，但速度慢，对硬件需求大
- 随时可以分析各个面的光线数据
- “eliprefl.oml”示例

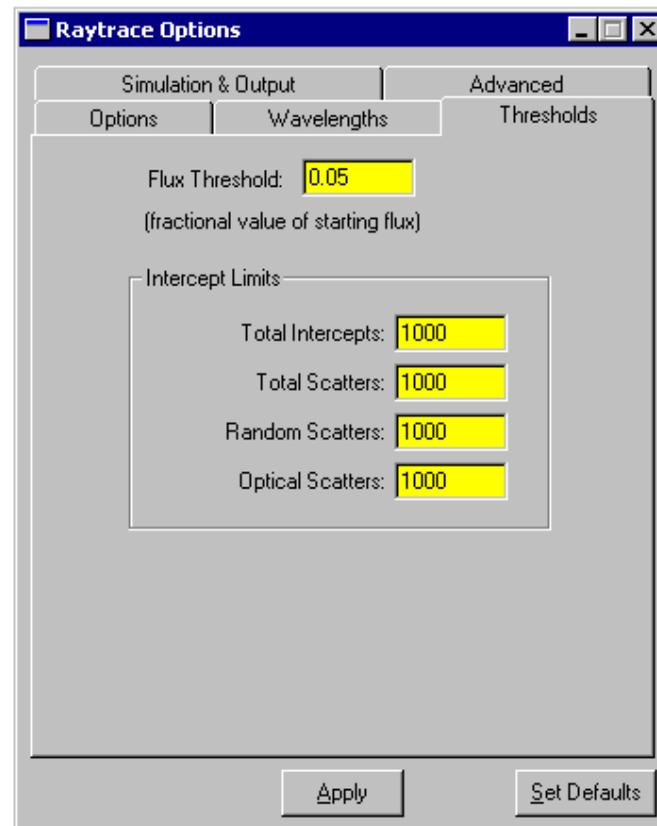
# 描光设定

## ■ Simulation Mode

- 选取一个Exit Surface，TracePro仍然计算所有光线、面的数据，但只存储Exit Surface的光线数据
- 速度快，对硬件需求小
- 选取一个面Properties的Exit Surface
- 在Analysis菜单选择“Simulation Mode”
- TracePro提示哪些数据被保存，哪些数据不保存
- Analysis/Raytrace Options，选择是否保存Candela 数据

# 描光设定

- 设定光通量计算的最低阈值
  - **Thresholds:** 光线经过各面、实体后的**Flux**与最初的光线的比值
  - **Thresholds**的定义与具体的计算目的及探测器灵敏度有关
  - **LensDemo**示例，设定不同**Threshold**观察光线情况
- 提升计算速度



# Voxel

## ■ TracePro 在计算时的两个步骤

- Audit 及 Raytrace

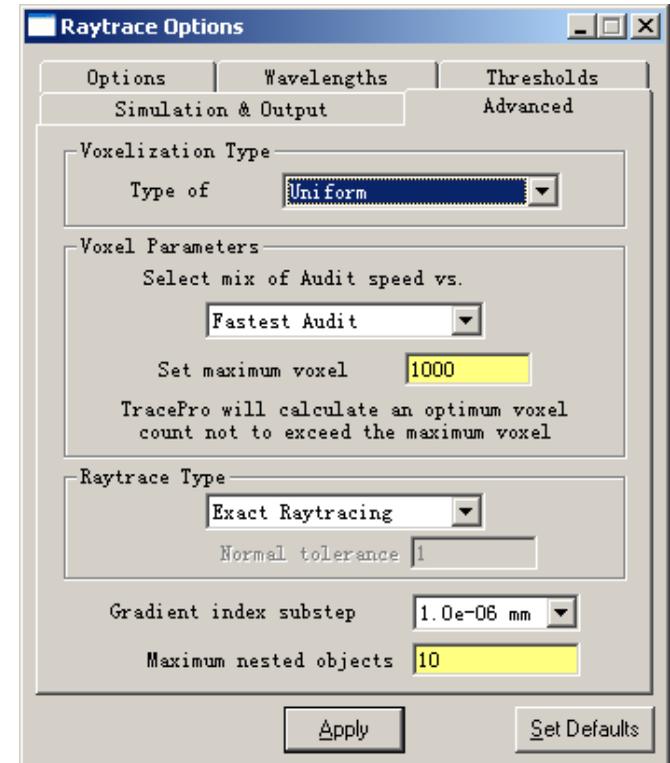
## ■ Audit

- 检测模型的合理性、材料是否存在等前处理

## ■ Voxel概念

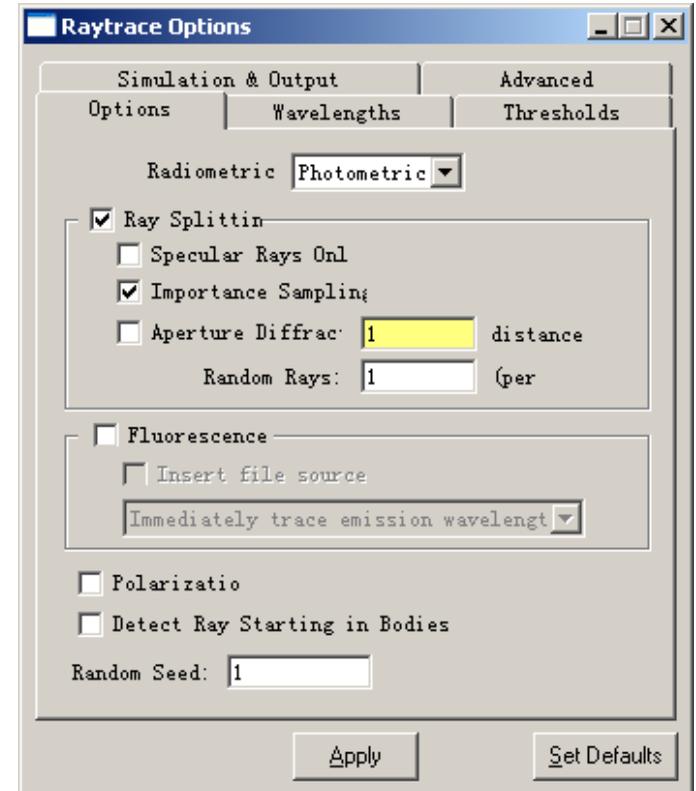
(volumetric + pixel → Voxel )

- 将模型分割成小块
- 菜单View/Display Voxels
- 模型被切割的合理可以有效提升后续RayTrace的速度



# Raytrace Options

- 软件对光线在Surface的行为的计算
  - 不分光，只按照反射率、折射率将改变穿透、反射的光线数量
  - 分光，将光线能量按照反射率、折射率分配
  - 两种方式在光线数量足够多的情况下都可以很好的反应真实状况
  - 分光方式最终会计算数倍于初始光线数量的光线



## 分析功能

- 照度、灰度、CIE坐标、色度分析-Irradiance Map
- 光强度分析-Candela plot
- 光线数据（光线位置、方向、通量）-Ray Histories
- 偏振效应-Polarization Map
- 选择需要分析的光线-Ray Sorting

# 分析功能

- 光度分析的主要参数
  - 照度分析
  - CIE, 色度分析
  - 光强分析
  - 光通量

# 辐射量

## ■ 辐射能（单位：焦耳J）

- 以电磁辐射形式发射、传输或接收的能量  $Q_e$

## ■ 辐射通量（单位：瓦）

- 单位时间内发射、传输或接收的辐射能  $\Phi_e = \frac{dQ_e}{dt}$

## ■ 辐射度/辐照度（单位：W/m<sup>2</sup>）

- 单位面积上出射/接收的辐射通量  $M_e = \frac{d\Phi_e}{dA}$ ;  $E_e = \frac{d\Phi_e}{dA}$

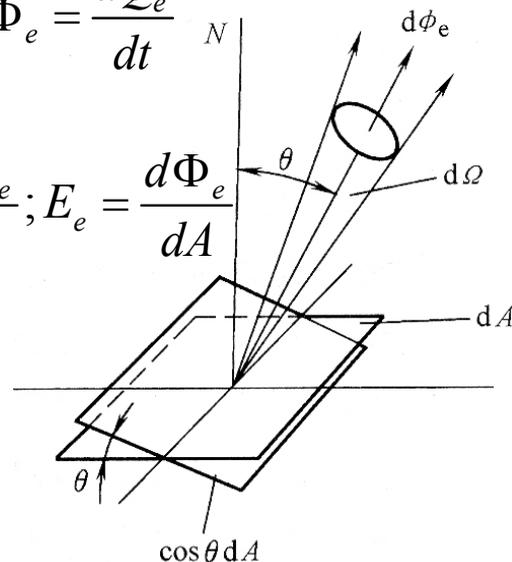
## ■ 辐射强度（单位W/sr）

- 单位立体角内的辐射通量  $I_e = \frac{d\Phi_e}{d\Omega}$

## ■ 辐射亮度（单位W/sr·m<sup>2</sup>）

- 发光面某角度方向上单位面积的辐射强度

$$L_e = \frac{d\Phi_e}{\cos\theta dA d\Omega}$$



# 光学量

## ■ 光通量（流明lm）

- 标度可见光对人眼视觉刺激程度的量称  $\Phi_v$

## ■ 光出射度/光照度（勒克斯1lux=1lm/m<sup>2</sup>）

- 单位面积上出射/接收的光通量  $M_v = \frac{d\Phi_v}{dA}$ ;  $E_v = \frac{d\Phi_v}{dA}$ ;

## ■ 发光强度（坎德拉cd）(lm/sr)

- 点光源在单位立体角内的光通量  $I_v = \frac{d\Phi_v}{d\Omega}$

- 一个光源发出频率  $540 \times 10^{12}$  Hz 的单色光，在一定方向的辐射强度为 1/683 (W/sr)，则该方向的光强为 1 cd

## ■ 发光亮度(cd/m<sup>2</sup>)(尼特nit) (10<sup>4</sup>cd/m<sup>2</sup>)(熙提sb)

- 发光面元某角度方向上单位面积的发光强度

$$L_v = \frac{d\Phi_v}{\cos \theta dA d\Omega} = \frac{I_v}{\cos \theta dA}$$

# 辐射量与光学量的关系

## ■ 光谱光效率函数

□ 光学量与辐射量之间的关系决定于人的视觉特性，人对不同波长光响应的灵敏度是波长的函数，称为光谱光效率函数（或视见函数）

□ 观察场明暗不同时，视见函数稍有不同

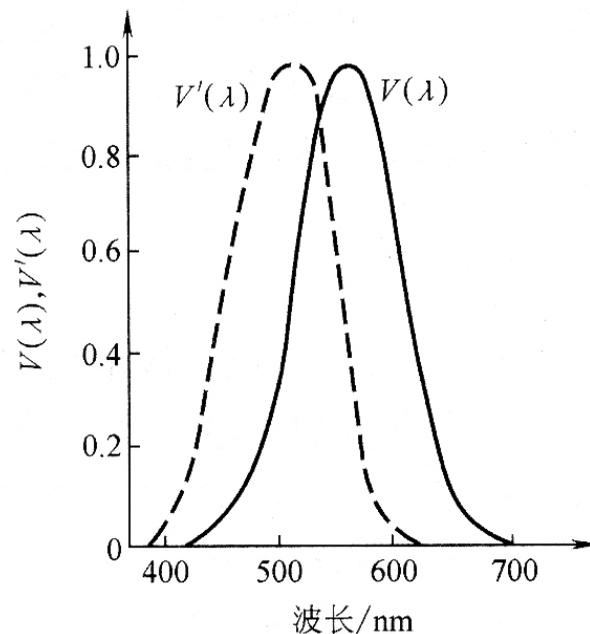
- 明视见函数  $V(\lambda)$  峰值波长555nm
- 暗视见函数  $V'(\lambda)$  峰值波长507nm

□ 光学量与辐射量的关系为

- 明视觉条件  $d\Phi_V(\lambda) = K_m V(\lambda) d\lambda$
- 暗视觉条件  $d\Phi_V(\lambda) = K_m' V'(\lambda) d\lambda$
- 由于  $V(\lambda)$  为归一化函数，因此系数分别为

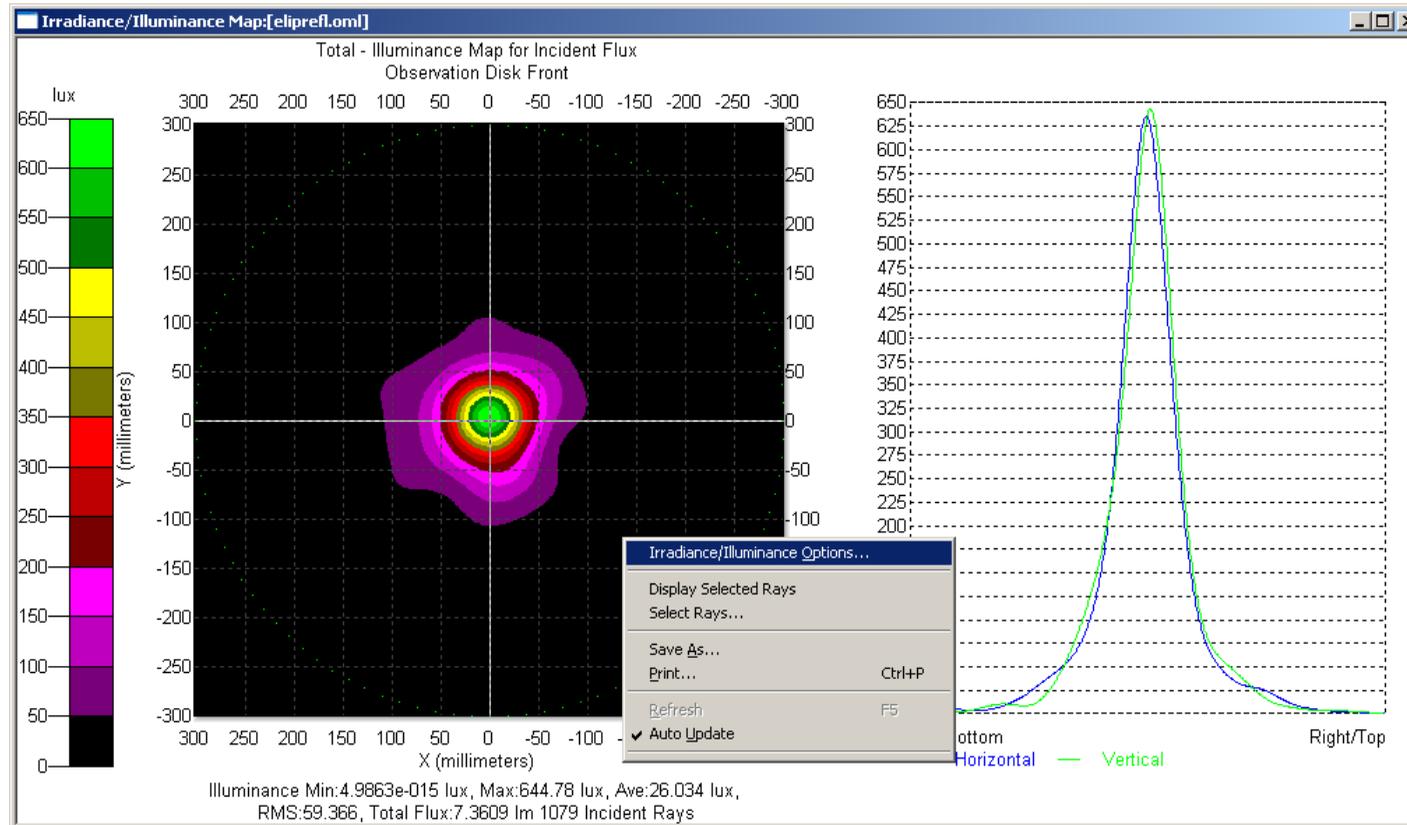
$$K_m = 683lm / W$$

$$K_m' = 1755lm / W$$



# 分析功能

## ■ 照度分析 Irradiance Map



# 分析功能

## ■ 照度分析

### □ Quantities to Plot

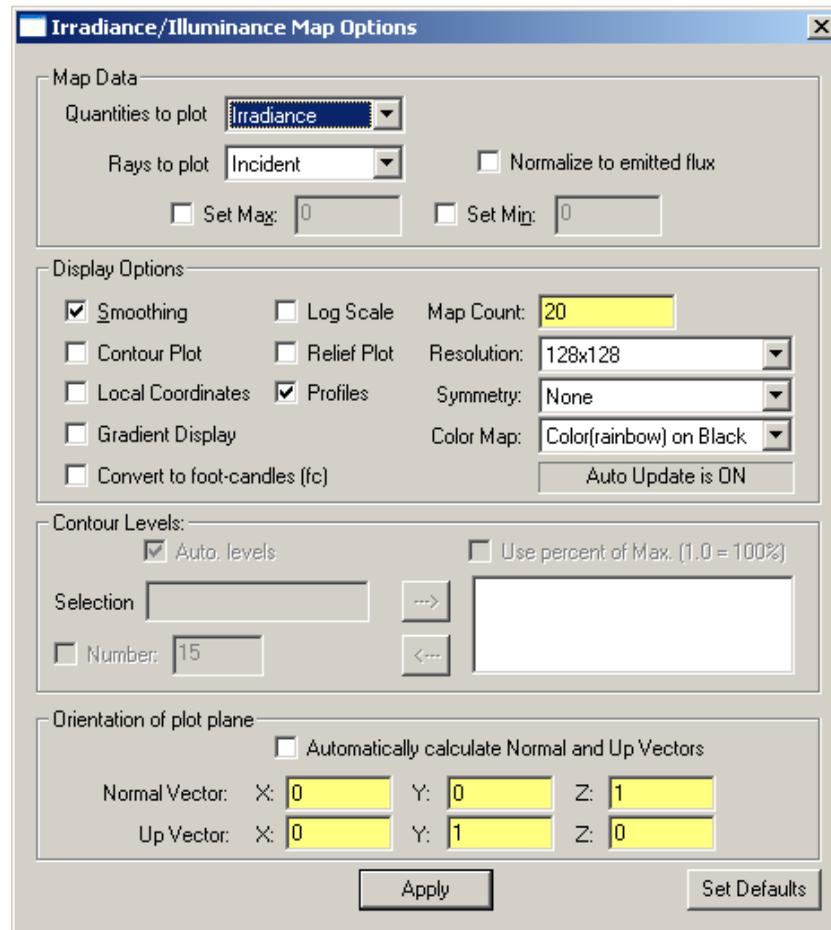
- Irradiance 照度
- CIE 色坐标
- Bitmap RGB 伪彩色  
(用RGB表示三种波长, 系统需要包括3种波长)
- TrueColor 真实色彩

### □ Map Count

- 报告图被分割的数量, 格子分割的越细, 需要计算更多的光线保证在每个格子中有足够多的光线得到准确的计算结果

### □ Orientation of Plot plane

- 报告图的方向和角度, TracePro可以自动计算从垂直与观察面的方向观察计算结果



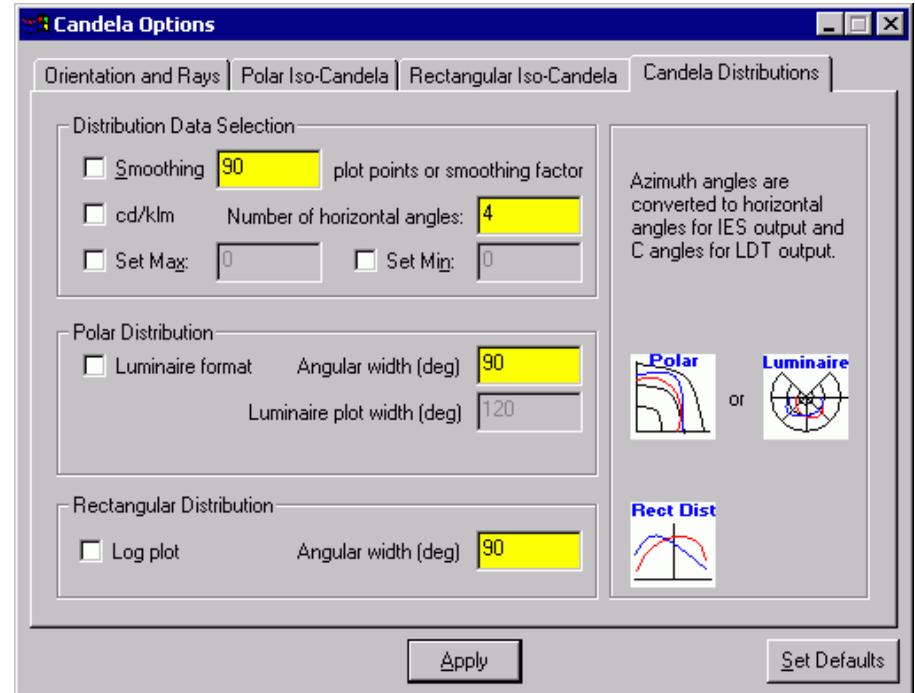
# 分析功能

## ■ 光强分析Candela plot

### □ Candela Distributions

#### 光强分布图分析设定

- **cd/klm** 将纵坐标单位转换为每1000流明的光强
- **Number of horizontal angles** 光强分布切面数
- **Luminaire format** 切换  
半球光强/全景光强  
显示模式



# 分析功能

## ■ 光强分析Candela plot

### □ Orientation and Rays 分析设定

#### ■ Missed rays

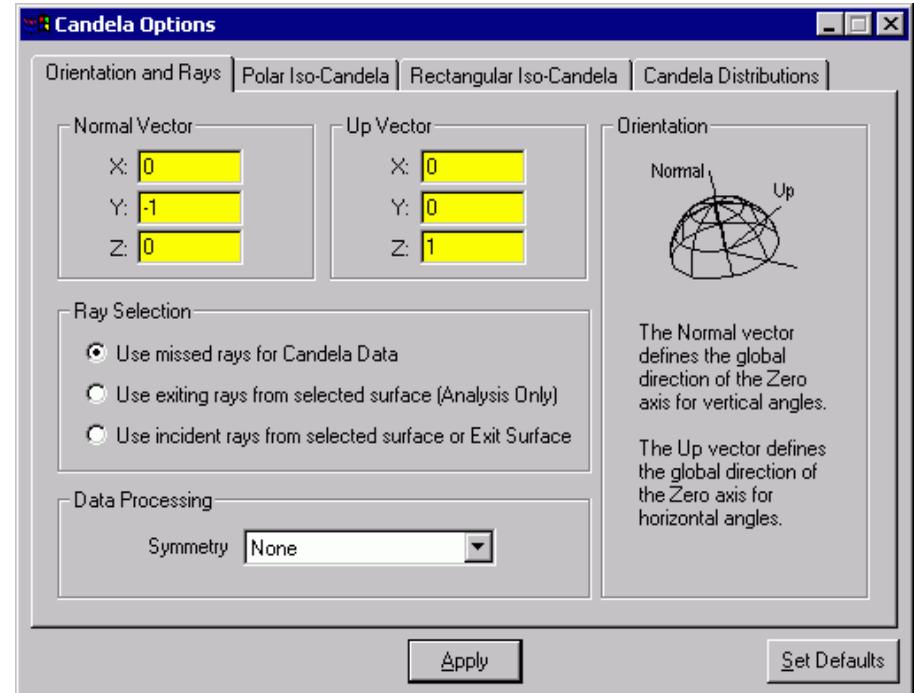
没有照射到任何实体上的  
光线

#### ■ Exiting rays

离开选定表面的光线  
(仅用于分析模式)

#### ■ Incident rays

入射到选定表面的光线

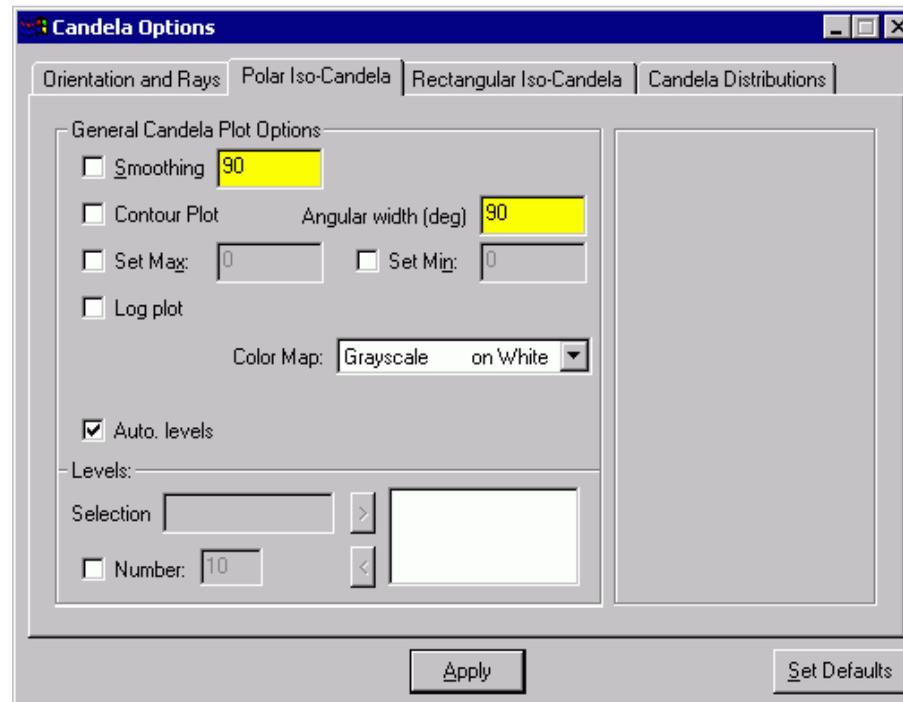


# 分析功能

## ■ 光强分析Candela plot

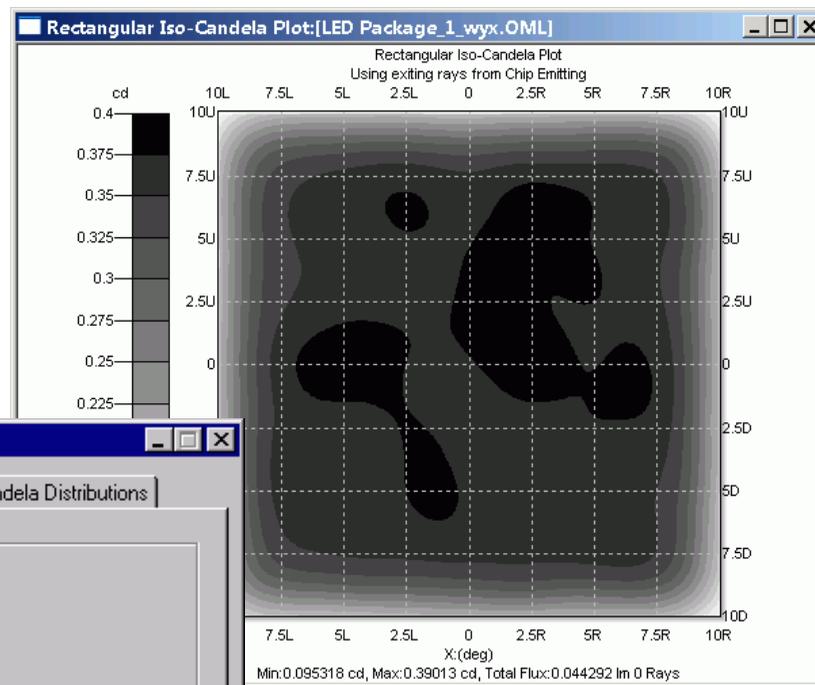
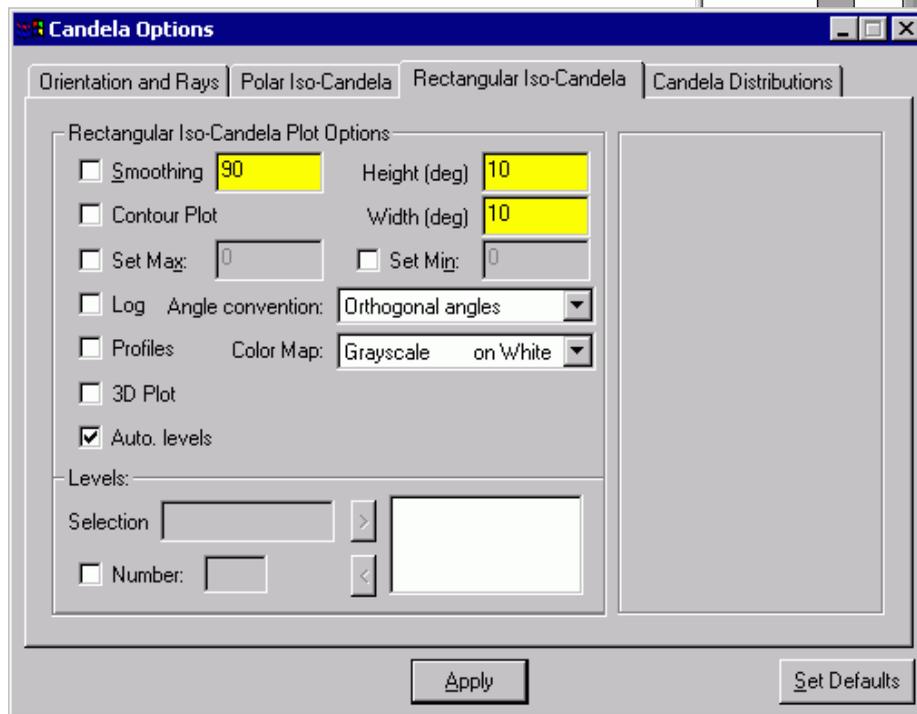
### □ Polar ISO- Candela 极坐标光强图设定

- Smoothing 平滑
- Contour Plot 绘制等高线



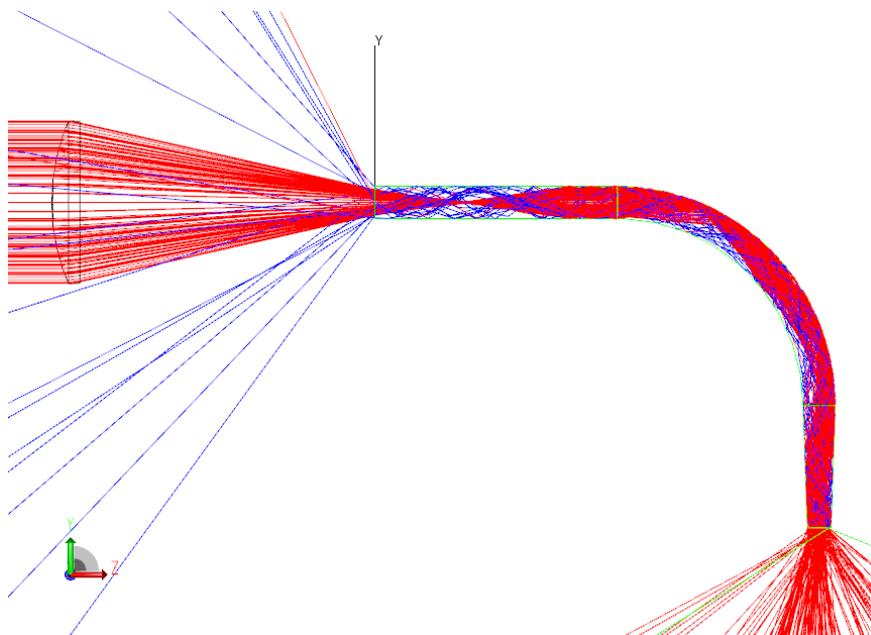
# 分析功能

- 光强分析Candela plot
  - Rectangular ISO- Candela  
直角坐标光强图



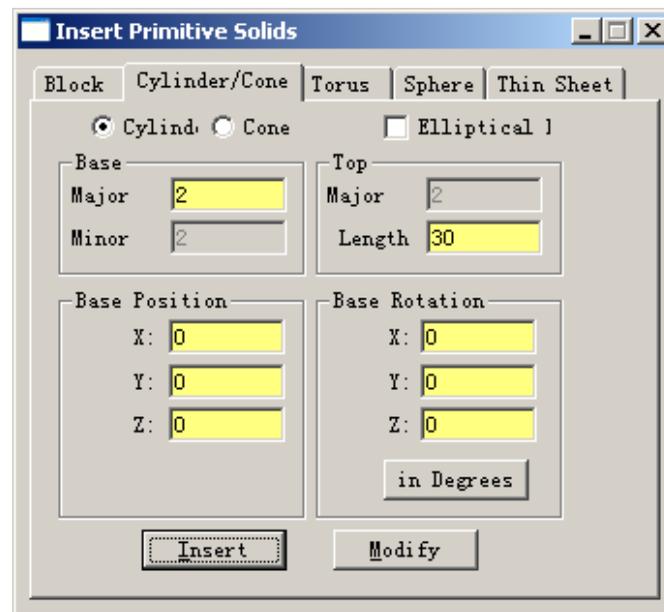
# 导光管实例

- 导光管、积分柱广泛应用于DLP投影设备中
- 首先将TracePro设定为Analysis模式
  - 菜单Analysis/Analysis Mode



# 导光管实例

- 首先建立圆柱形状的Light pipe
  - 选择Insert → Primitive Solid...
  - 选择Cylinder/Cone页面
  - 在对话框中输入圆柱的参数：
    - 起点在原点(0, 0, 0)
    - 长度(Length) 30 mm
    - 半径(Major R) 2 mm



# 导光管实例

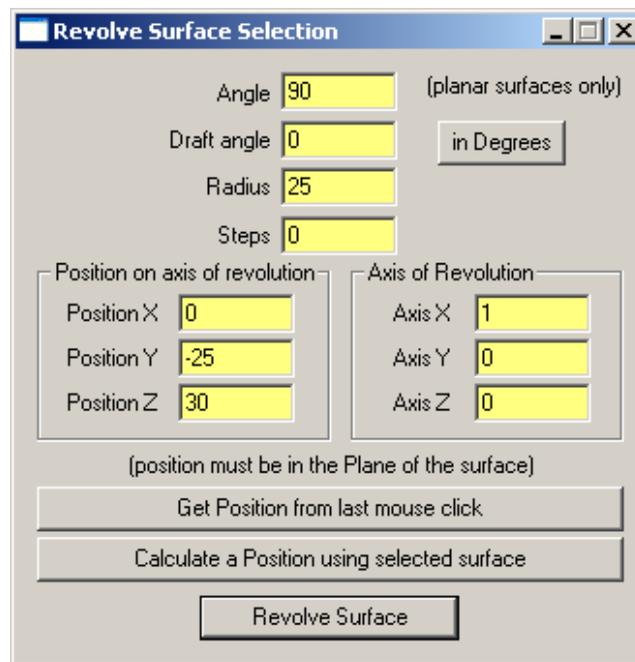
## ■ 将圆柱体的右端面弯曲、拉伸成弧形导光管

□ 在左侧的列表中选择右端面Surface2

□ 选择菜单

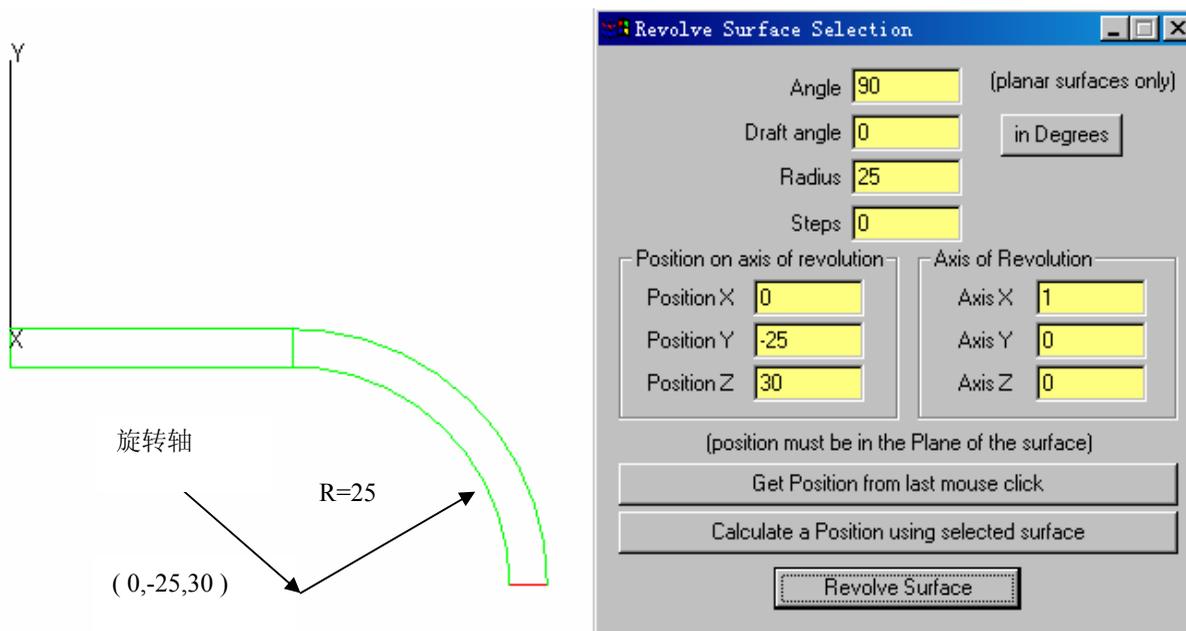
**Edit/Surface/Revolve(旋转),**

该指令使指定平面绕指定轴和方向旋转一定角度



# 导光管实例

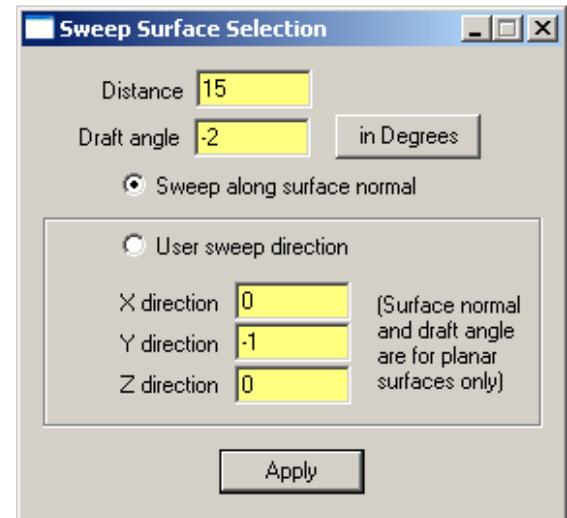
- 将圆柱体的右端面弯曲、拉伸成弧形
  - 在左侧的列表中选择右端面Surface2
  - 选择菜单Edit/Surface/Revolve(旋转), 该指令使指定平面绕指定轴和方向旋转一定角度



# 导光管实例

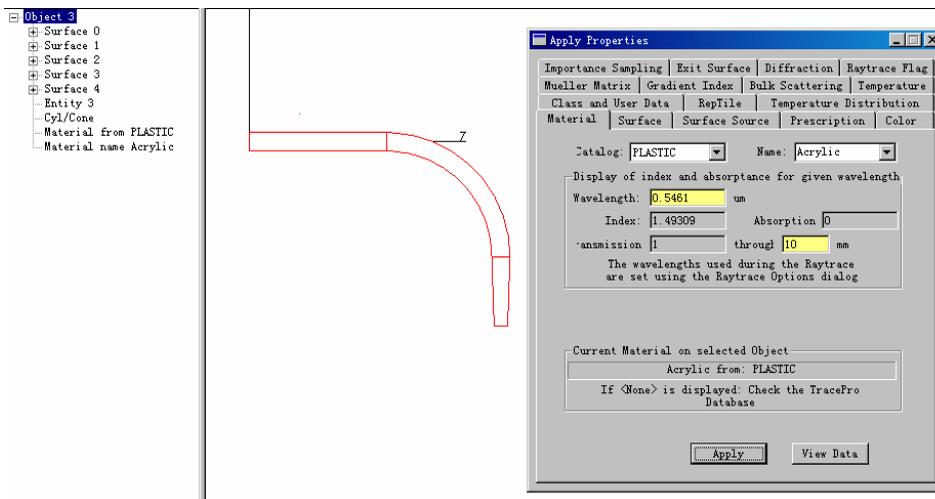
## ■ 将弧形再进行变形拉伸Sweep

- 在列表中选择旋转后的端面Surface4
- 选择菜单Edit/Surface/Sweep(拉伸), 该指令使平面沿预设的方向平行推进一定距离
  - **Draft angle** 平面平移后的锥角, 正数使平面面积变大, 负数使平面面积变小。
  - **Sweep along surface normal** 沿平面法线方向平移
  - **User sweep direction** 由用户自定义平移方向。



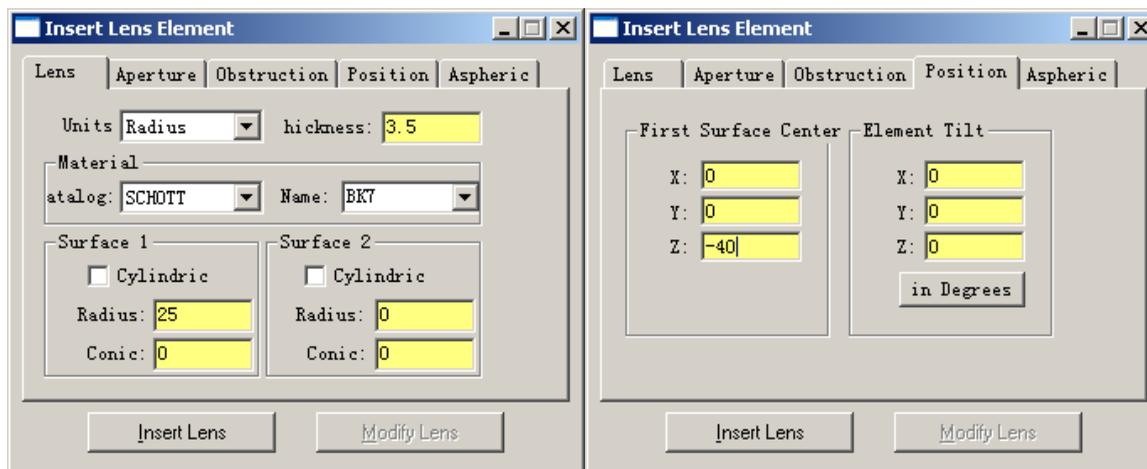
# 导光管实例

- 模型建立完成，接着设定模型的材料
- TracePro 将各种属性赋予物体和表面以使其成为一个具有光学特征的模型
  - 选择物体Object 1，在右键菜单中选择Properties
  - 选择Material材料选项页，在类别Catalog中选择Plastic塑料，在名称Name中选择Acrylic
  - 在下方显示所选材料在指定波长下的吸收率和透过率
  - 应用之后在左侧列表中实体的属性同步更新



# 导光管实例

- 为达到较好的光路耦合性能，在导光管前安置一汇聚透镜
  - 选择菜单Insert/Lens Element，透镜参数为
    - Surface1 Radius : 25
    - Thickness 3.5mm
    - Material BK7
    - Position (0, 0, -40)



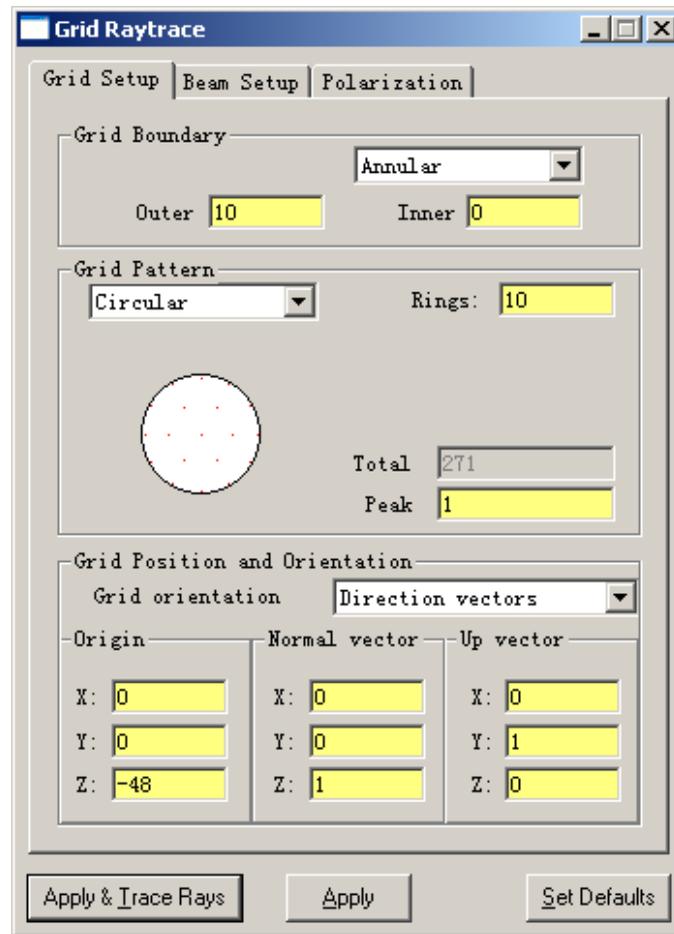
# 导光管实例

## ■ 设定光源

### □ 菜单选择

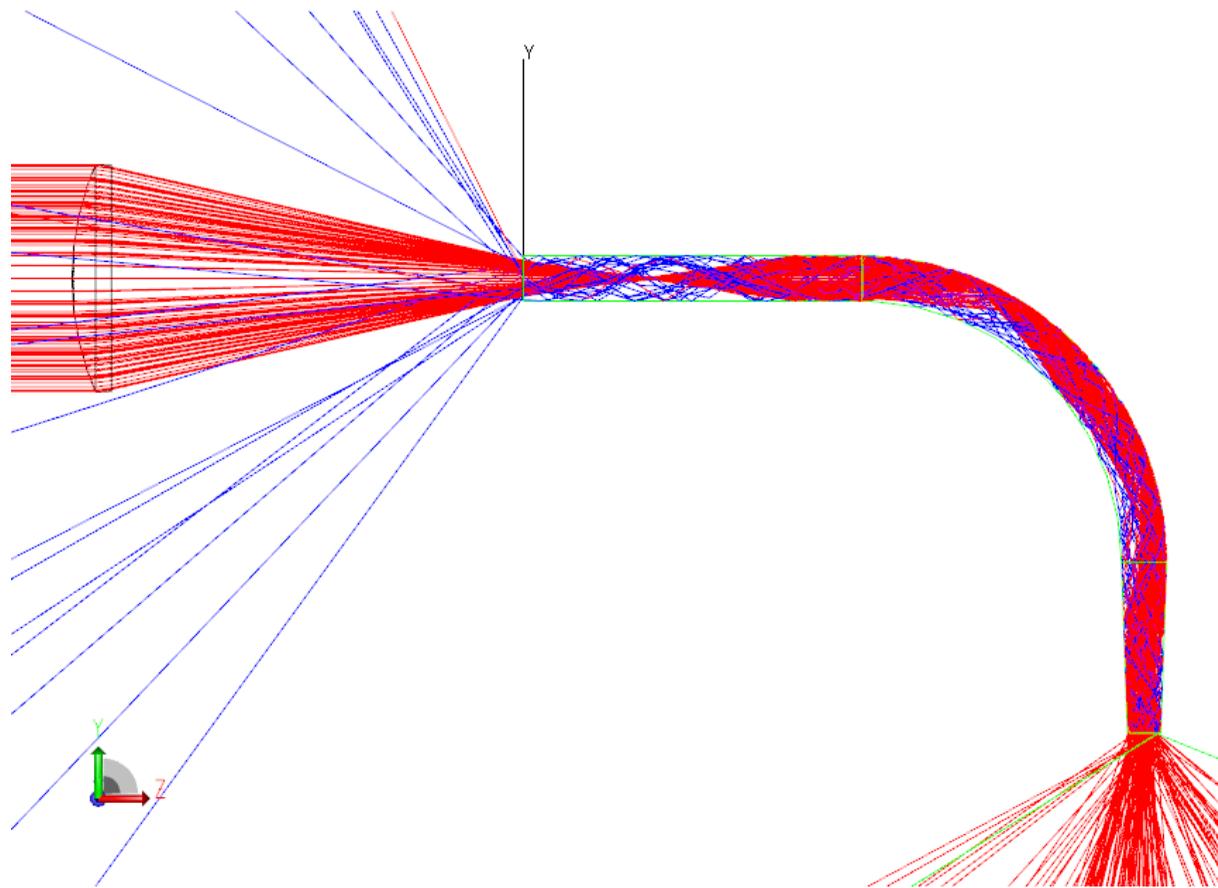
## Analysis/Grid Raytrace

- 网格光线沿圆周排列 Annular
- 半径 Outer Radius 10mm
- 网格光线圆周数量 Rings : 10
- 光线的起点位置 (0, 0, -48)



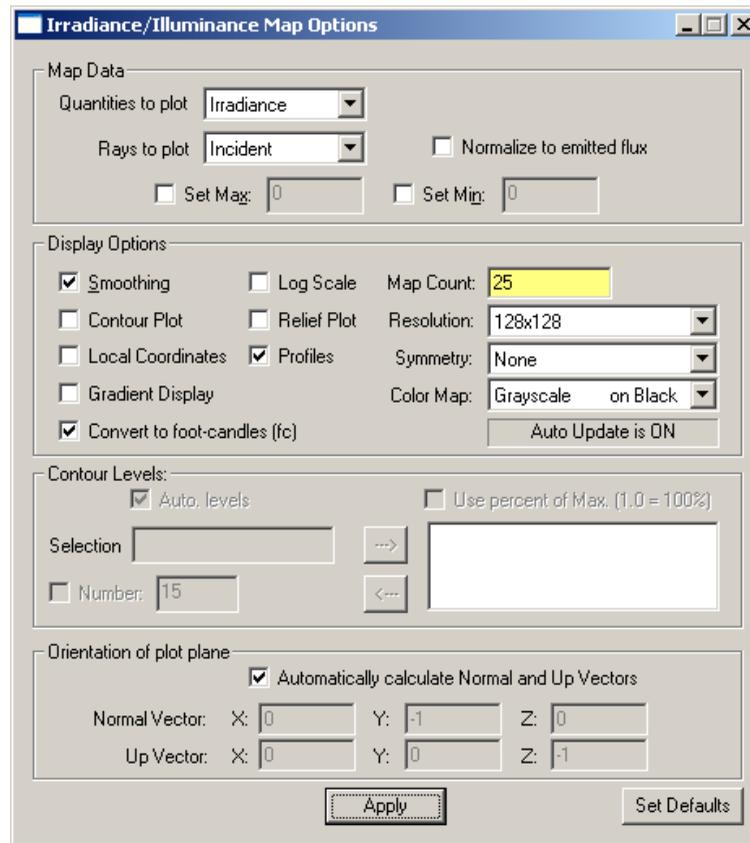
# 导光管实例

- 应用之后可以看到计算结果



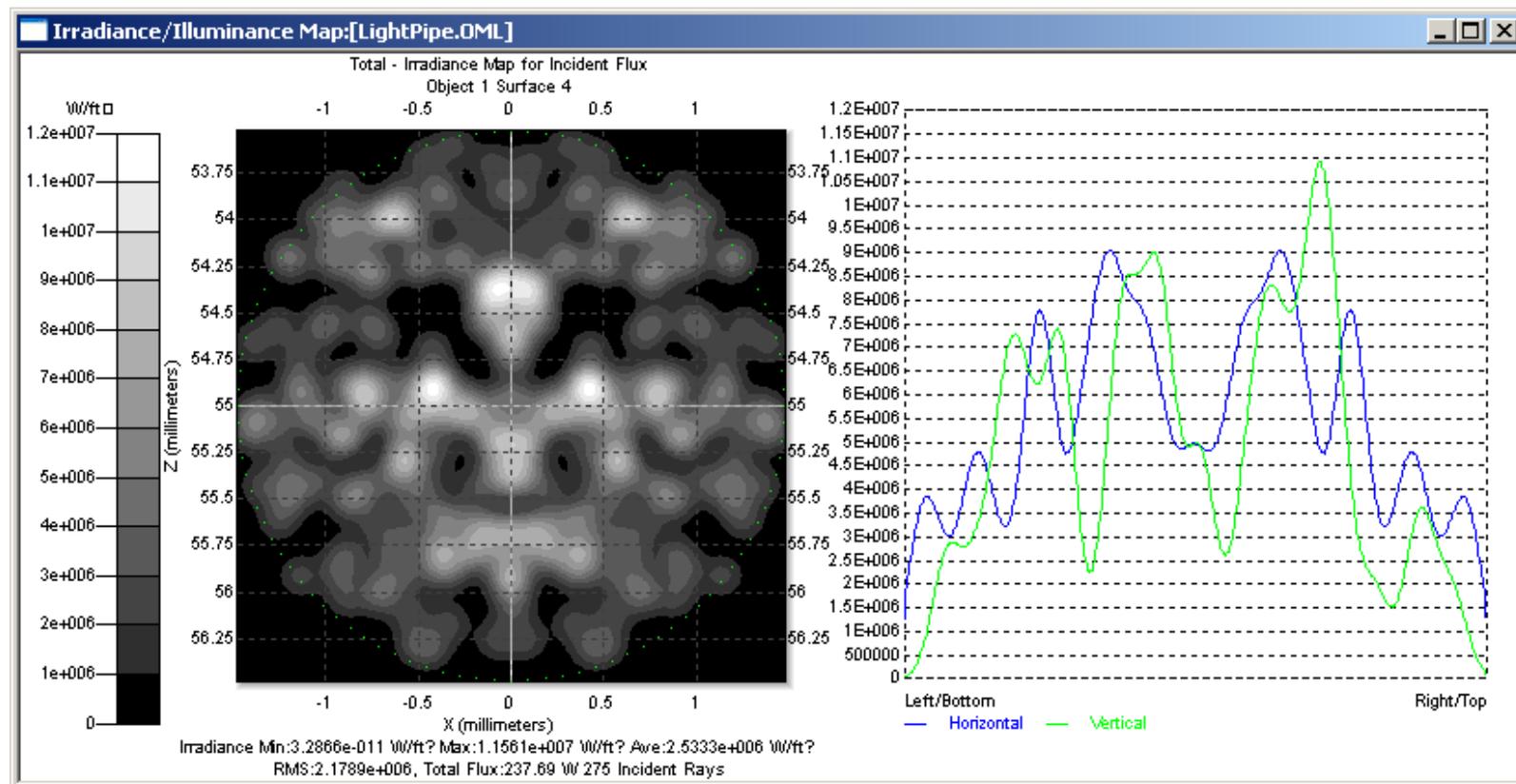
# 导光管实例

- 对计算结果进行分析
  - 选择Surface 4
  - 在菜单中选择  
Analysis/  
Irradiance/Illuminance Maps  
出现Surface4的照度图
  - 在右键菜单中选择  
Illuminance Options  
对照度图进行设定



# 导光管实例

## 对计算结果进行分析



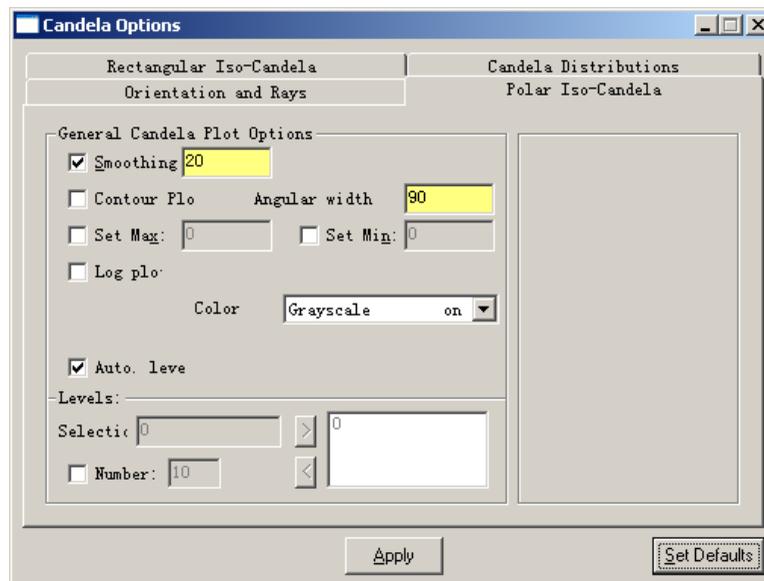
# 导光管实例

## ■ 照度图界面设定介绍

- **Normalize to emitted flux** 将每条光线的能量除以从光源发出的总的出射光线的能量，这样对计算效率非常方便
- **Quantities to plot:** 显示不同坐标尺度的数据（照度 $W/m^2$ 、亮度 $W/m^2/sr$ 等）
- **Rays to plot:** 设定观察吸收/入射光线数据
- **Smoothing** 对观察面接收到的辐射值进行高斯平滑滤波
- **Profiles** 产生辐射分布图的横断面图点击辐射分布图上任何一点都会同时产生水平与垂直的横断面图
- **Normal Vector** 和 **Up Vector** 代表光线收集平面的法线方向与垂直方向，若不能确定其值，则可通过选择 **Automatically calculate Normal and Up Vector** 项，让 TracePro 自动计算。

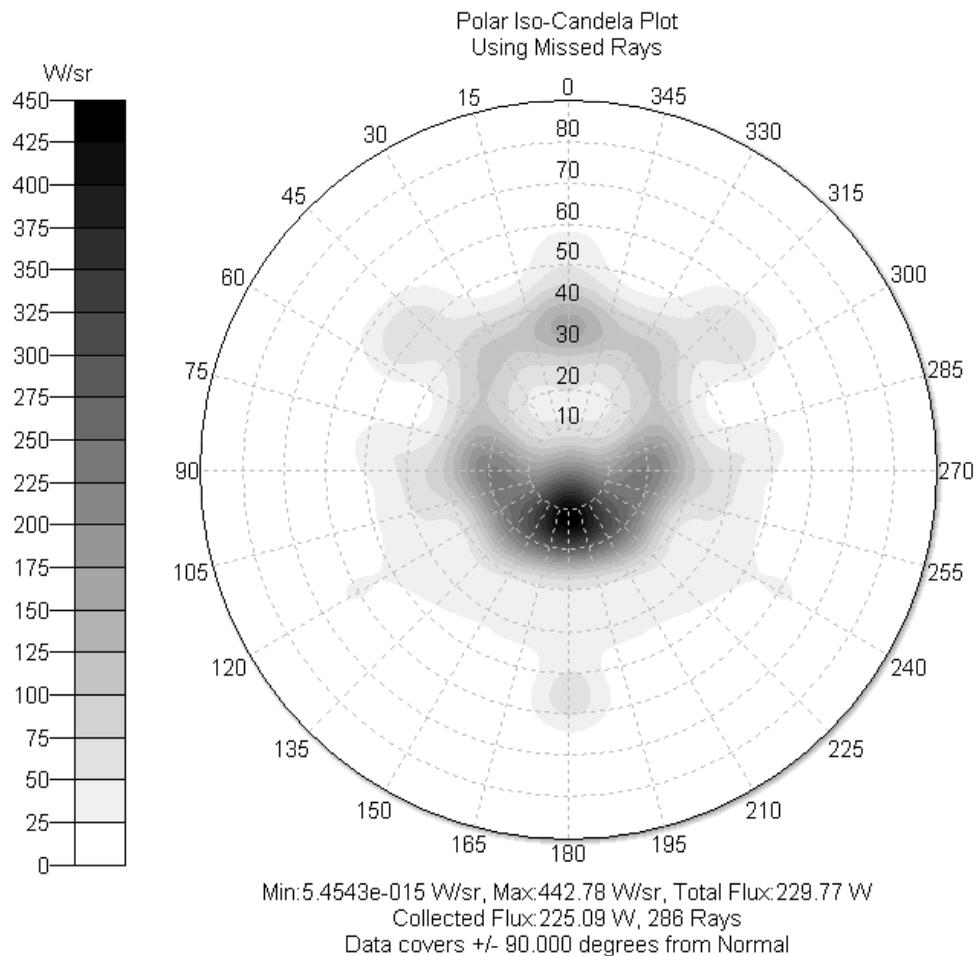
# 导光管实例

- 对计算结果进行分析
  - 选择Surface 4
  - 在菜单中选择 Analysis/  
Candela plot/Polar ISO-Candela  
出现Surface4的光强度图
  - 在右键菜单中选择  
Candela Options  
对圆周光强图进行设定
  - Angular width 显示的角宽度
  - Auto Level 自动设定图比例的级别



# 导光管实例

## ■ 对计算结果进行分析



# 杂散光分析

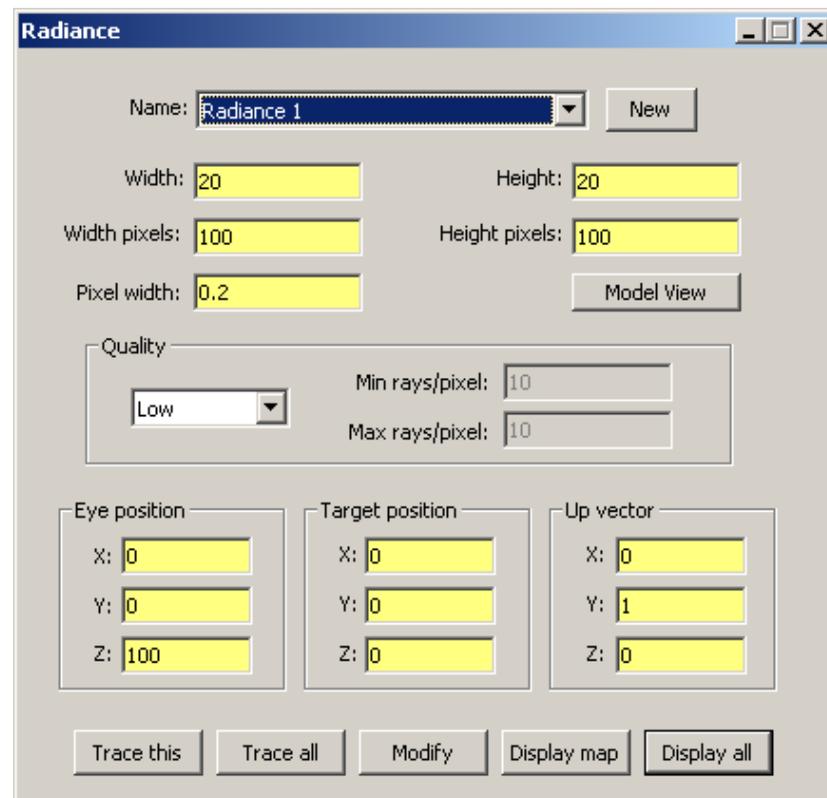
- 杂散光是不需要的或者对成像造成负面效应的光线
- TracePro 可以处理的杂散光
  - Ghost: 在透镜表面产生偶数次反射的光线
  - 一次散射光: 光源直接照射到系统的部件上产生
  - Straight Shot: 光源直接照射到观察面
  - 多次散射光线: 光源先照射到遮光板再照射到光学组件
  - 边缘绕射 (Edge Diffraction) 孔径大小相对波长比值较小时, 视场外的光线也会通过孔径光阑AS到达成像面
  - 红外系统中的自体辐射: 由仪器本身的热辐射产生

# 杂散光分析

- **Display Selected Rays**
  - 菜单**Analysis**，在照度图中按住**Shift**，用鼠标左键选择区域，在模型中显示区域中的光线
- **Ray Sorting**
- **Sort ray path**
- **Ray History & Flux Report**

# Radiance 模拟人眼观察

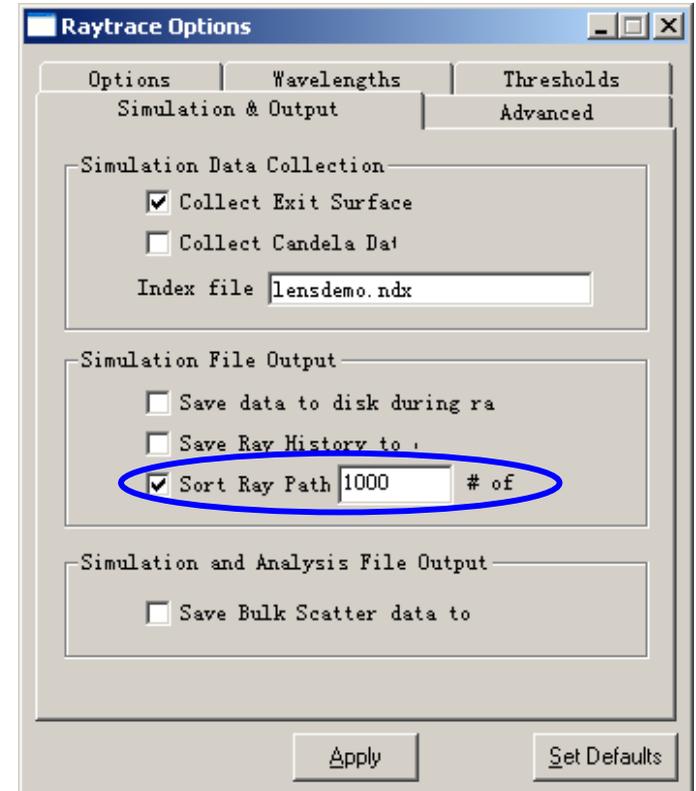
- 人眼观察物体的辉度
- 防止观察位置、观察面宽度、高度
- **Model View:** 当前视窗位置观察
- 需要设置较高分辨率，计算量很大



# Raytrace Options

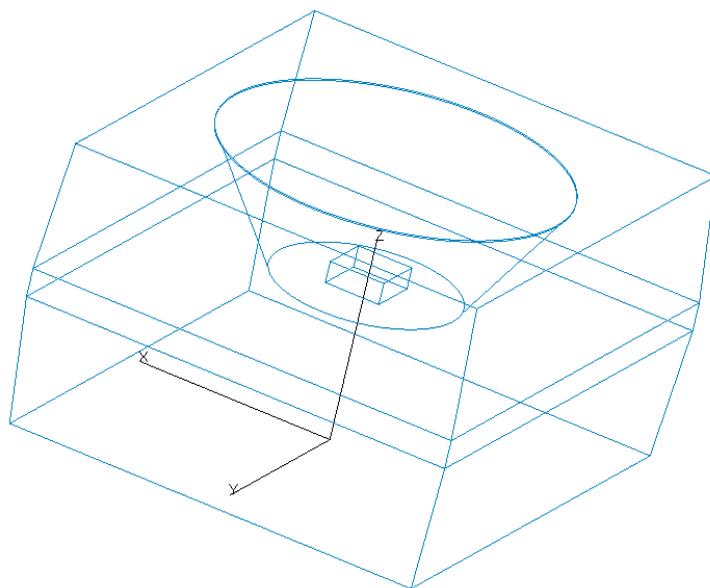
## ■ Sort Ray Path

- 对追击光线的路径进行汇总分类
- 主要用于分析杂散光
- 需要在Simulation 模式
- 在文件目录下生成文件
- LensDemo 示例



# LED 反光杯-练习

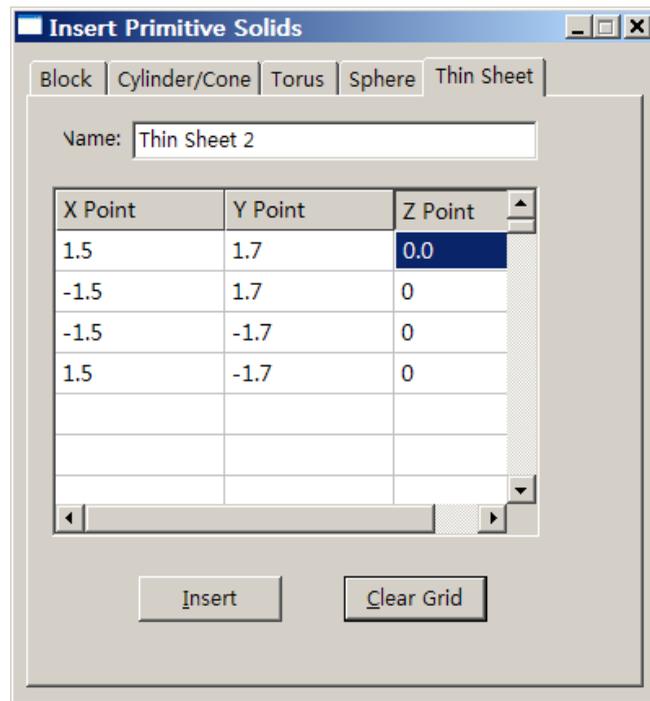
- TracePro 建模时应避免实体间的相互干扰
- 当大实体中包含小实体时，可以同时建立两个相同的小实体
- 在布尔运算中用大实体减去一个小实体，则另一个小实体与大实体严密配合。
- LED 反光杯建模



# LED 反光杯-建模

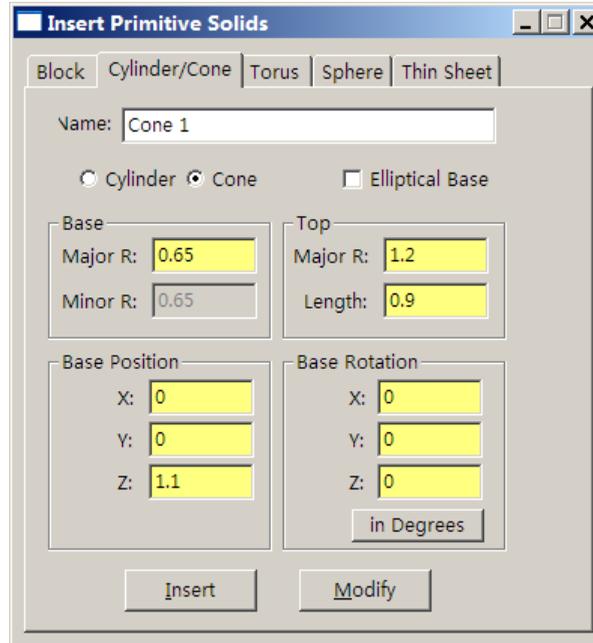
- 1. 建立底面大小为 $3.0\text{mm} \times 3.4\text{mm}$ , 在菜单选择 Insert/Primitive Solids
- 2. 采用沿Z轴正方向, Sweep方式, 3次完成外形

顺序	Distance	Drift angle
1	0.9	4
2	0.2	0
3	0.9	-4



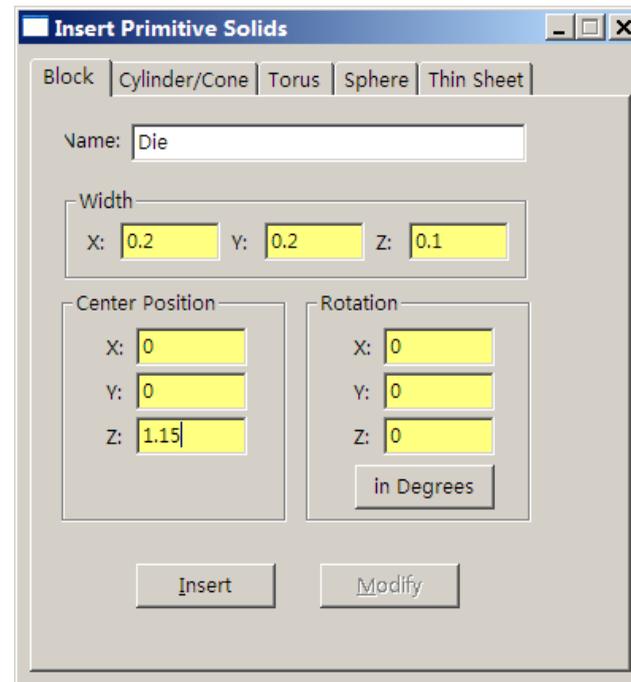
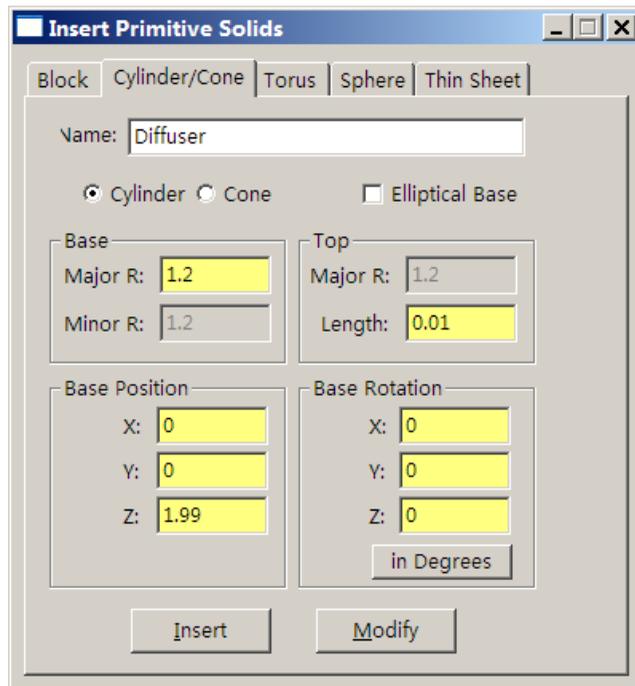
# LED 反光杯-建模

- 3. 建立Cone, Insert/Primitive Solids/Cone
- 4. 将两实体做布尔运算



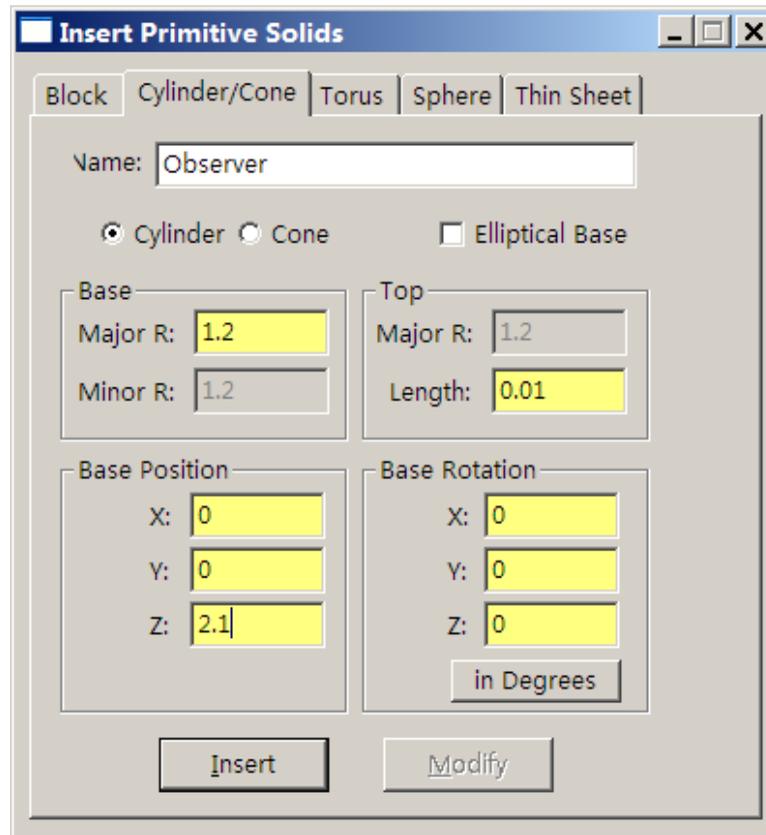
# LED 反光杯-建模

- 5. 建立散光板Diffuser, Insert/Primitive Solids/Cylinder
- 6. 建立发光体, Insert/Primitive Solid/Block



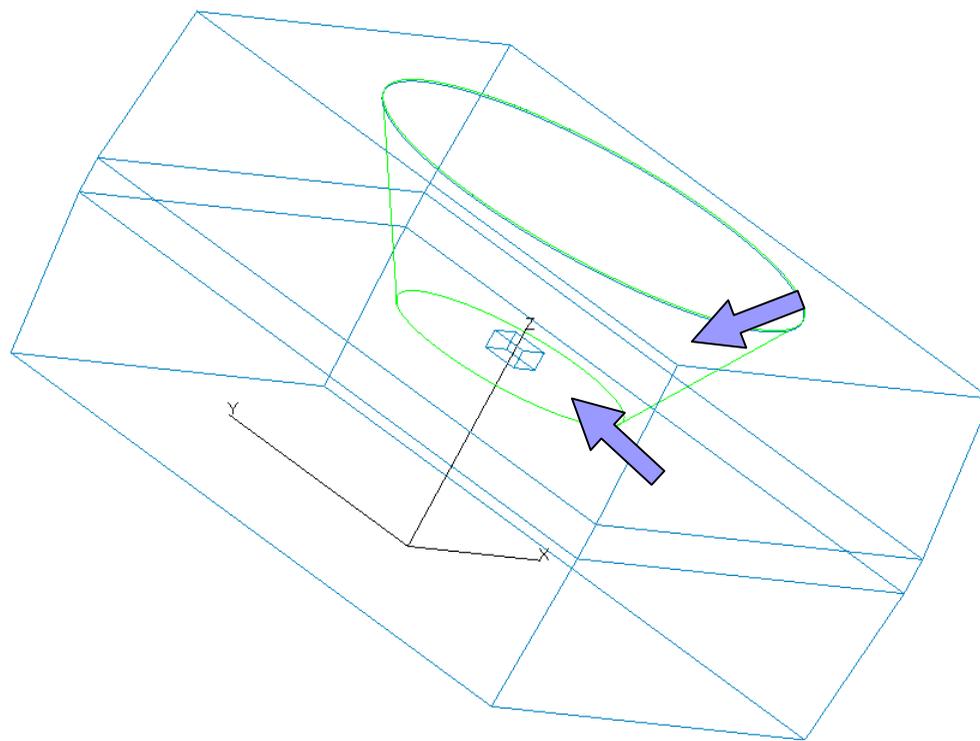
# LED 反光杯-建模

## ■ 7. 建立观察表面



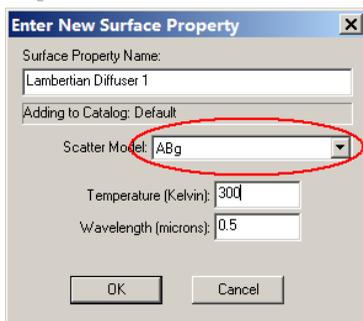
# LED 反光杯-设定材质

- 1.选择杯体内壁和底面， 设置为Perfect Mirror

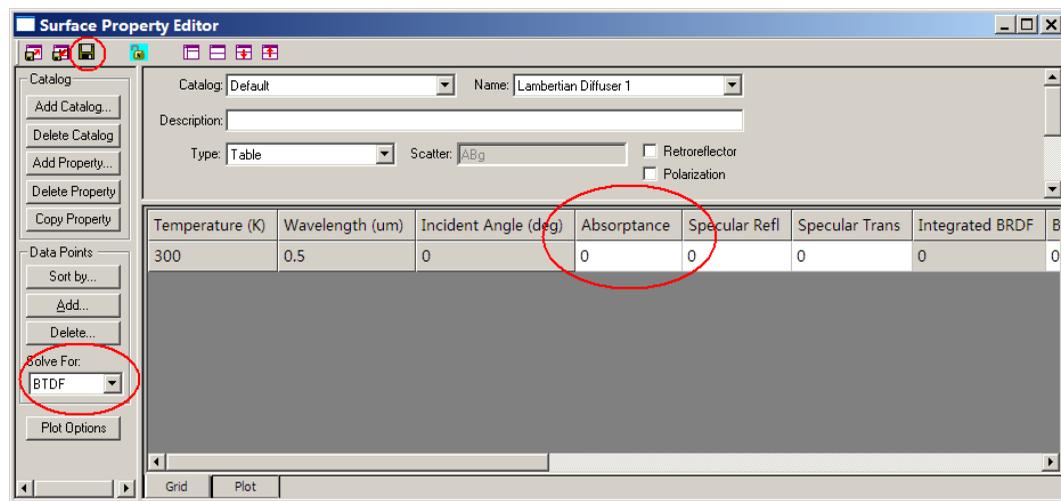


# LED 反光杯-设定材质

- 2. 设定散光板材质, Define/Edit Property Data/Surface Properties/Add Property

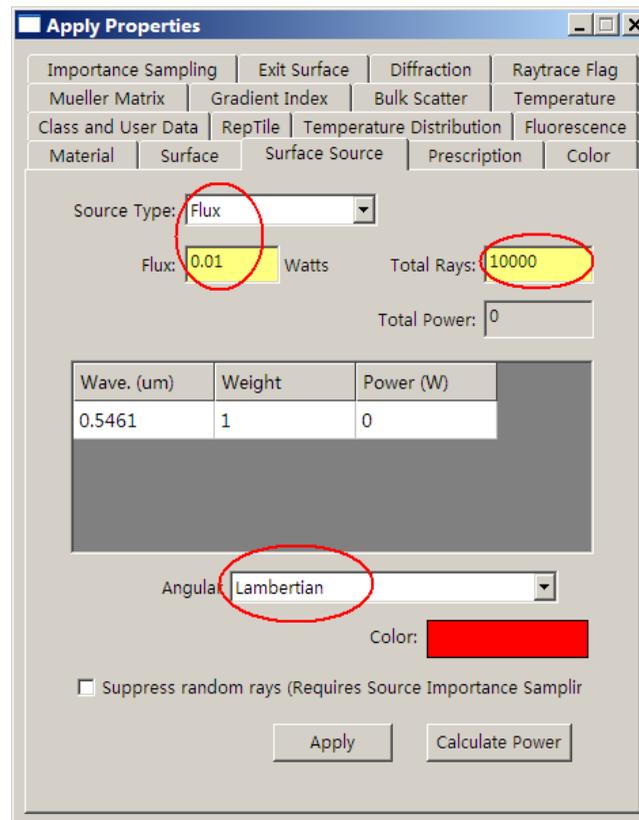


- 3. 将Absorptance 设为0→Solve for BTDF→保存



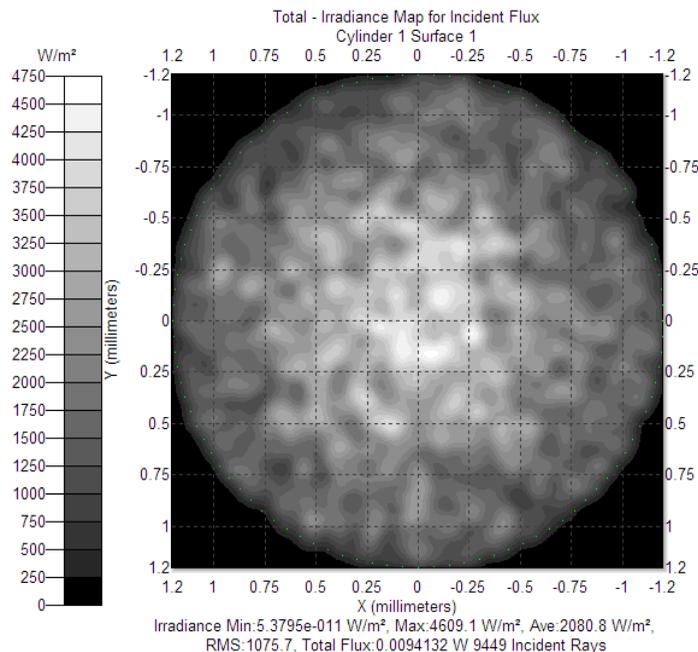
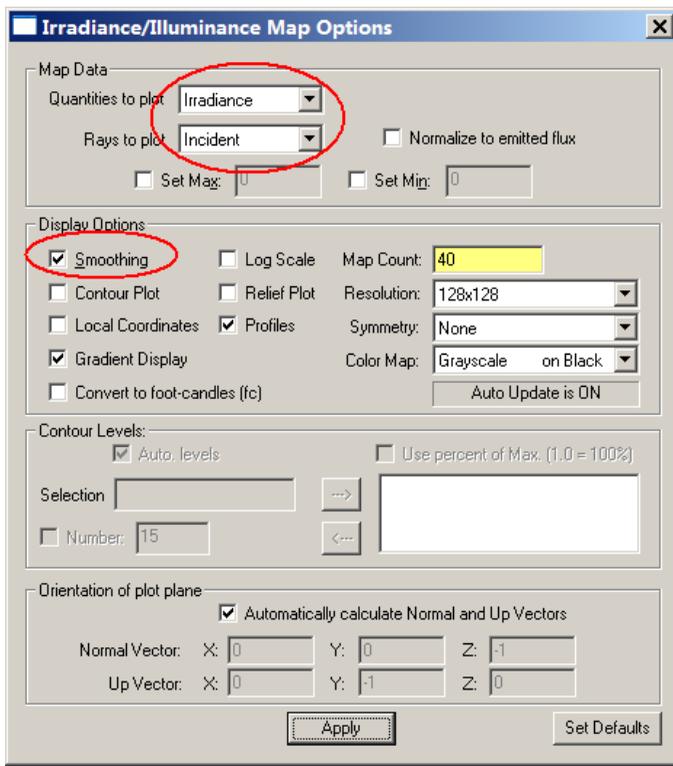
# LED 反光杯-设定材质、光源

- 4. 选择散光板，设置面属性为Lambertian Diffuser
- 5. 选定光源发光表面，选择发光模式与光线数



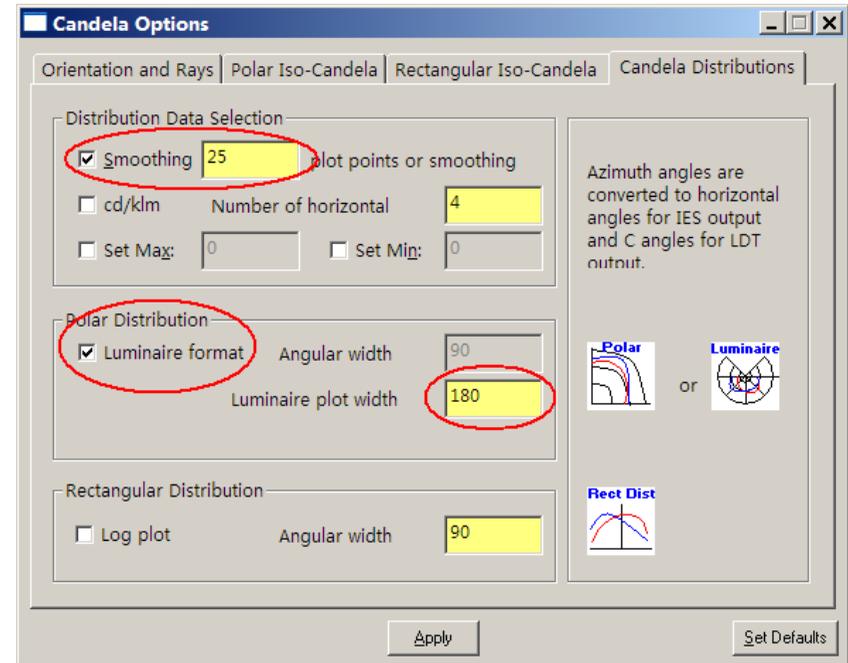
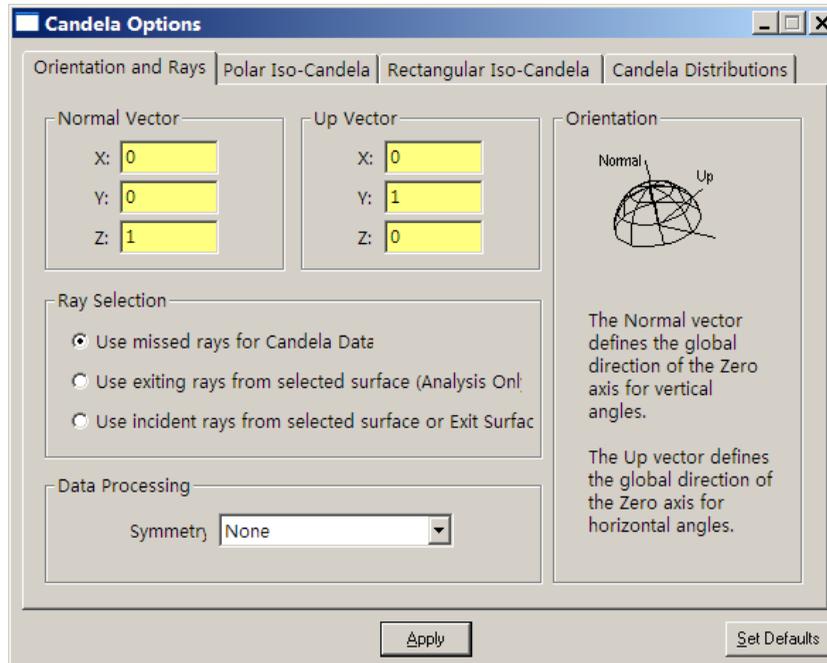
# LED 反光杯-模拟，观察

- 1. 按Ray Tracing开始模拟
- 2. 选择观察面靠近LED方向的表面，点选 Irradiance and Illuminance Options 打开照度设定对话框



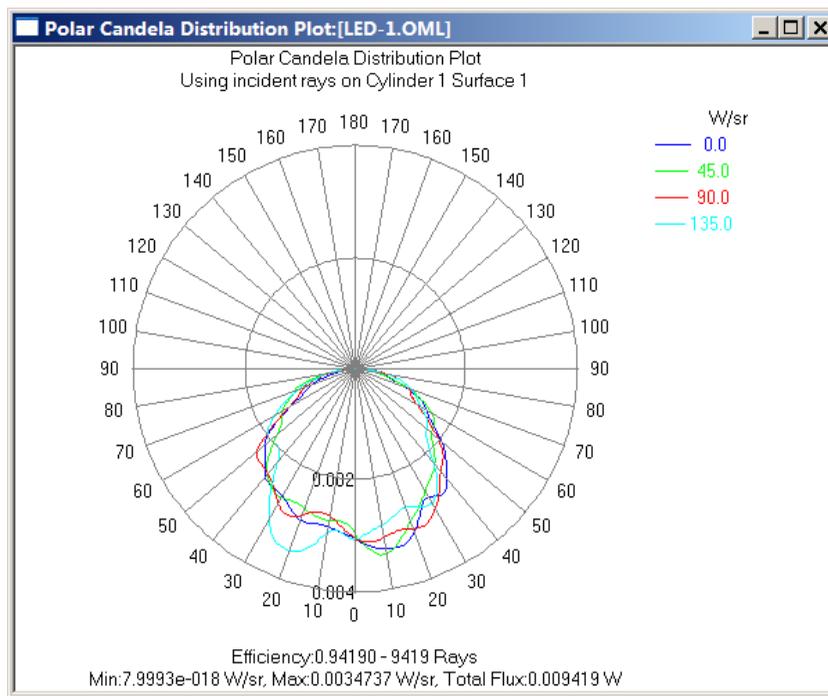
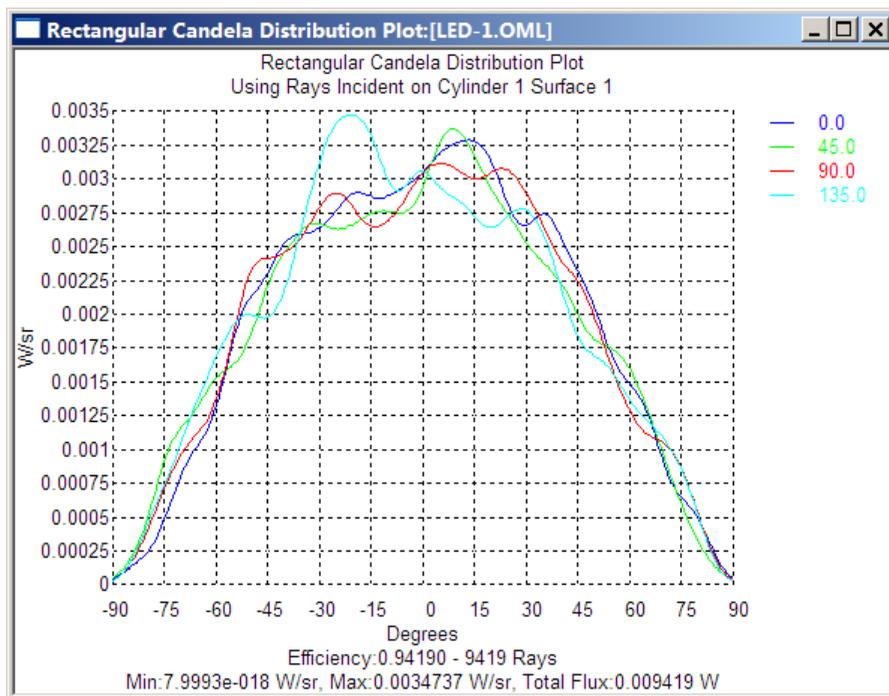
# LED 反光杯-模拟, 观察

## ■ 3. 设定 Candela Option, Analysis /Candela Options



# LED 反光杯-模拟, 观察

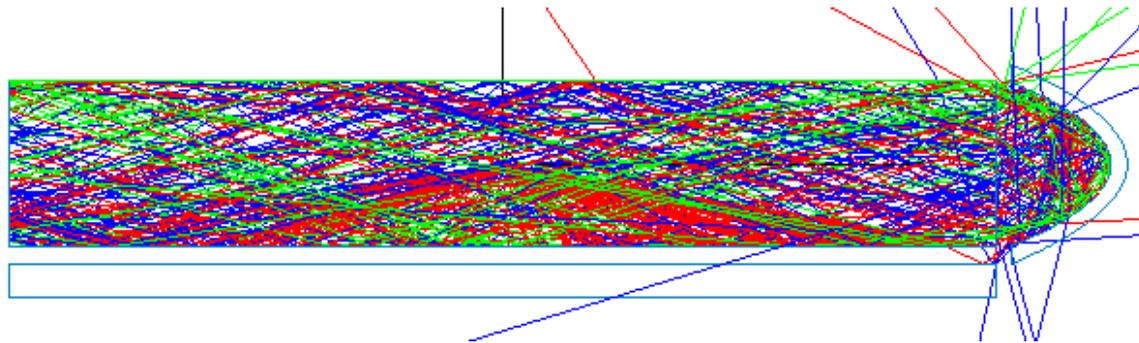
## ■ 4. 烛光分布图 Rectangular Candela, Polar Candela



# LED 三色混光

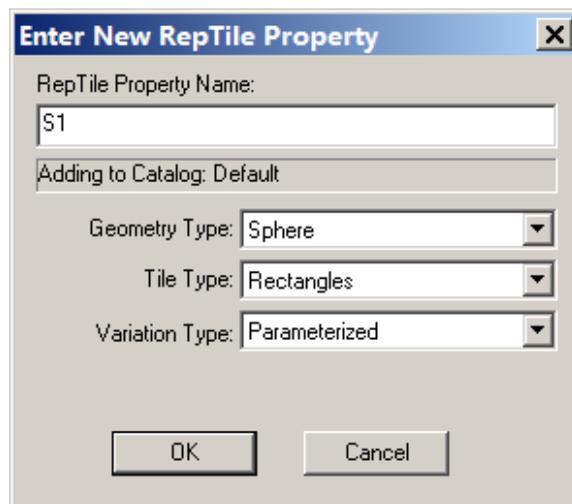
- 几个光源发不同波长色光时如何处理？
- TracePro默认所有光源都发所有波长的光
- 为设定不同光源设定不同波长，要使用**Surface Absorbance**
- LED 示例

# Back Light背光板实例



# Back Light背光板实例

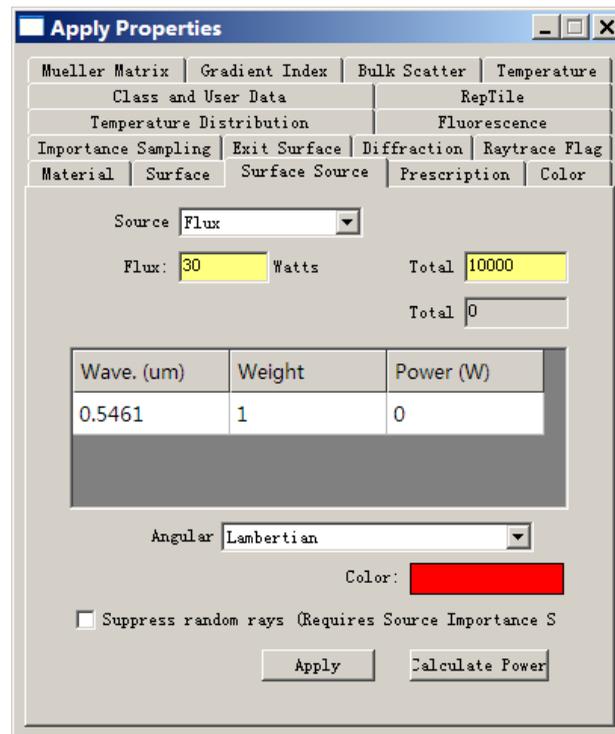
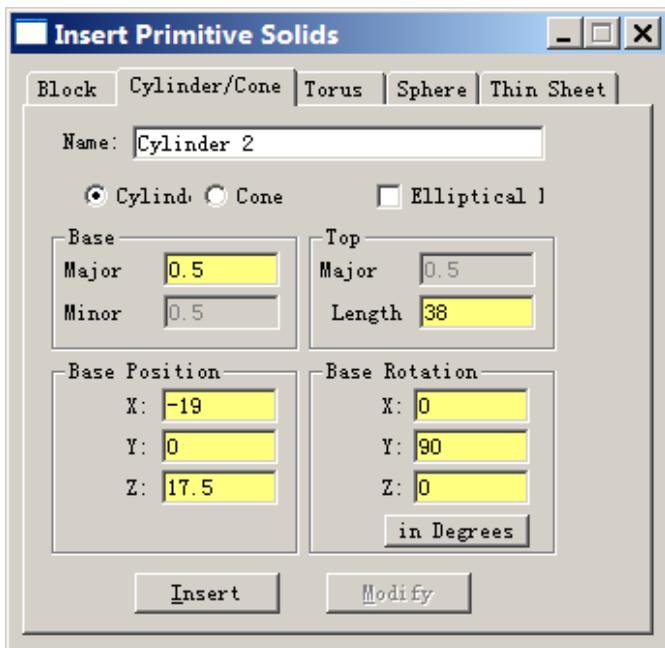
- 定义矩形背光板 长40mm，宽30mm，高5mm
- 设定材质为Plastic/PC
- 建立网点
  - 新建立球状网点
  - 宽度  $0.5+jCol*0.005$
  - 高度  $0.7+iRow*0.005$
  - 曲率半径0.2
  - 深度0.1
- 在模型窗口中显示网点情况
- 网点超过面边界的部分不会被计算



# Back Light背光板实例

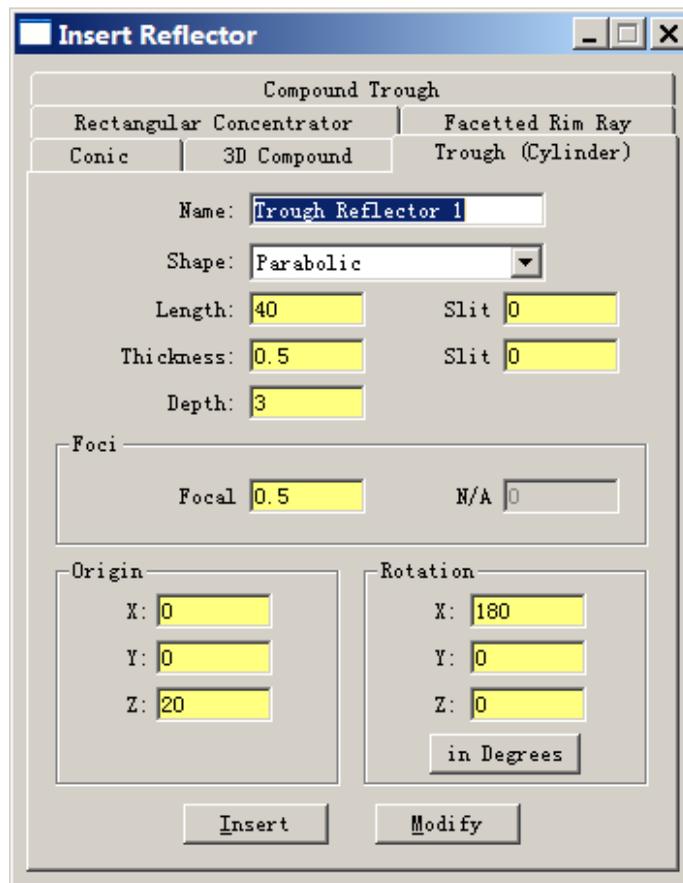
## ■ 建立光源

- 插入圆柱发光体
- 设定发光属性



# Back Light背光板实例

## ■ 建立反光碗

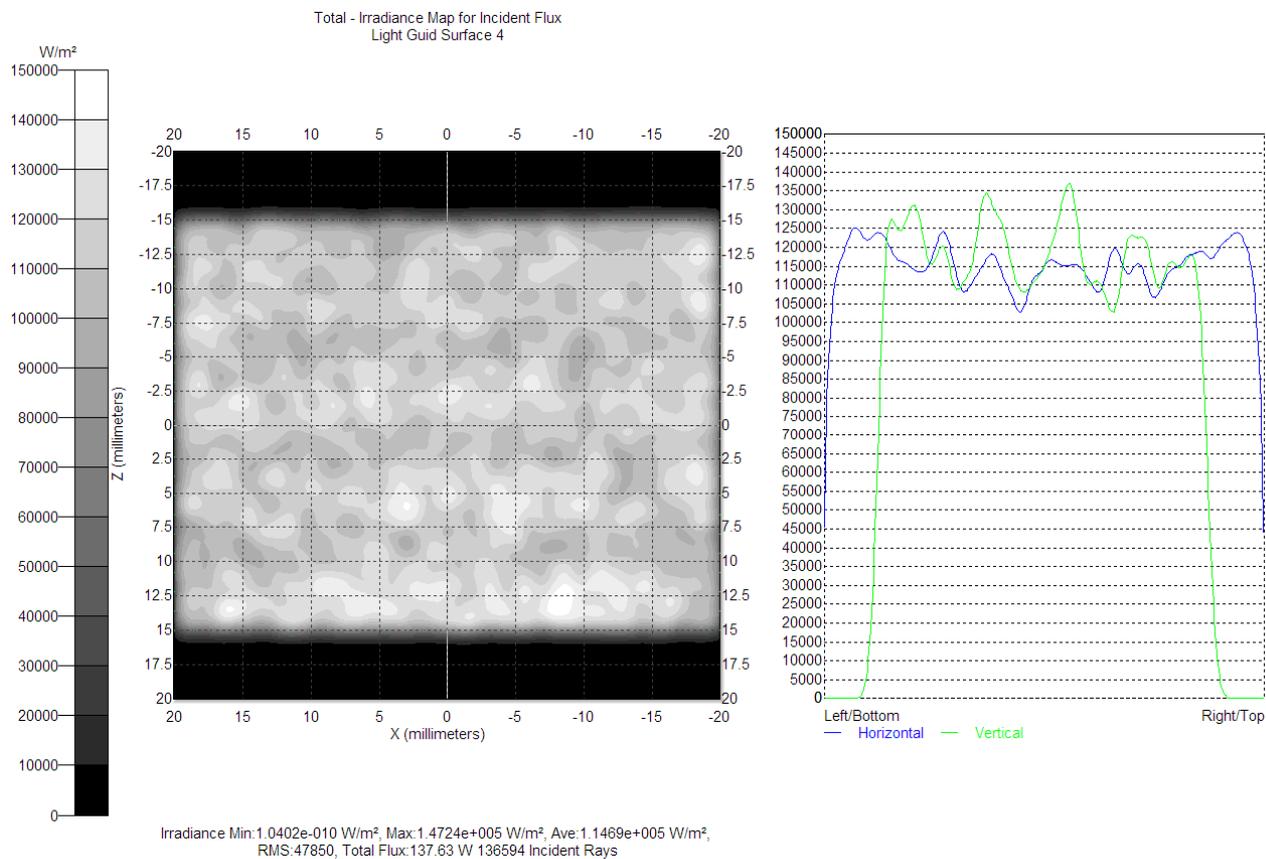


# Back Light背光板实例

- 建立反光板
  - 反光板与RepTile之间最好有小距离
  - 材质设置为Diffuse White（最好有实际数据）
- 导光板光源以外的3个面设定为反光面  
Perfect Mirror

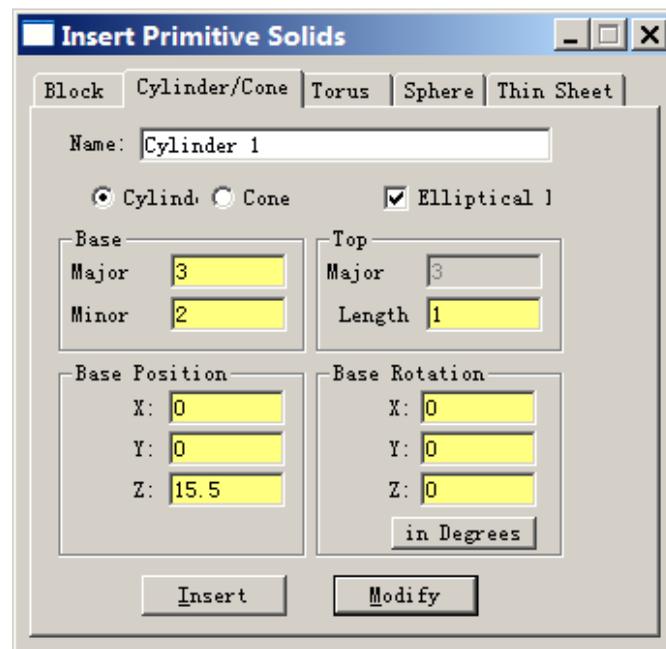
# Back Light背光板实例

- 进行光线追迹
- 观察表面光强分布



# Back Light背光板实例

- 将光源用LED代替
  - 建立椭圆发光区域的LED
  - 将表面光源设定为Lambertian



# 重点采样Importance Sampling

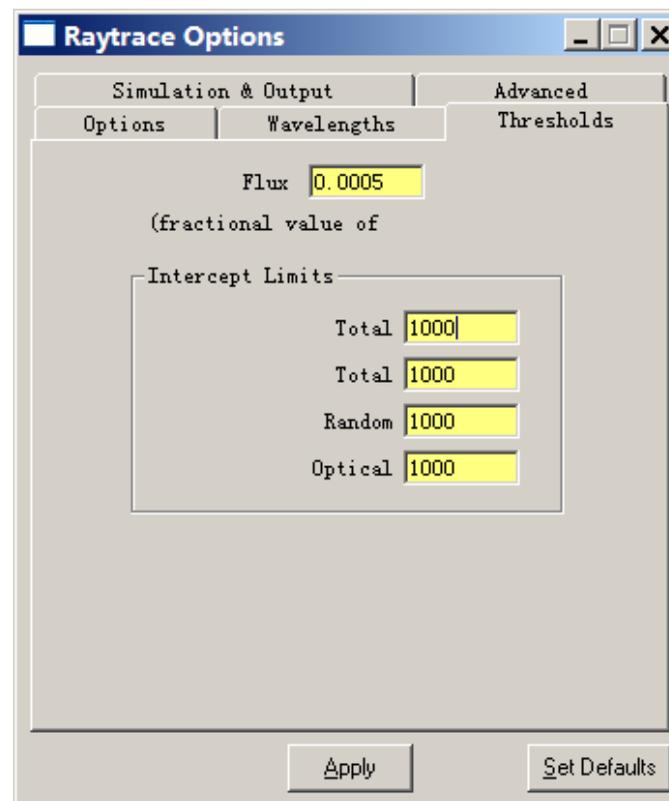
- 改进 Monte Carlo Raytrace的一种技术
- 只能用于具有散射特性的反射、透射表面
- 首先选择散射表面
- 在面特性表中选择Importance Sampling
- 设定重点采样的目标Target位置

## 重点采样实例-积分球

- 建立球壳内径48mm，厚度2mm
- 在球壳下面挖半径8mm圆孔
- 建立探测器在圆孔下方 $Y=-54\text{mm}$ 处，半径为8mm
- 编辑特性
  - 在Surface Property里面增加特性
  - 设定Absorptance 为0.01
  - Solve 中选择BRDF
  - 将新的表面特性应用于球壳内壁

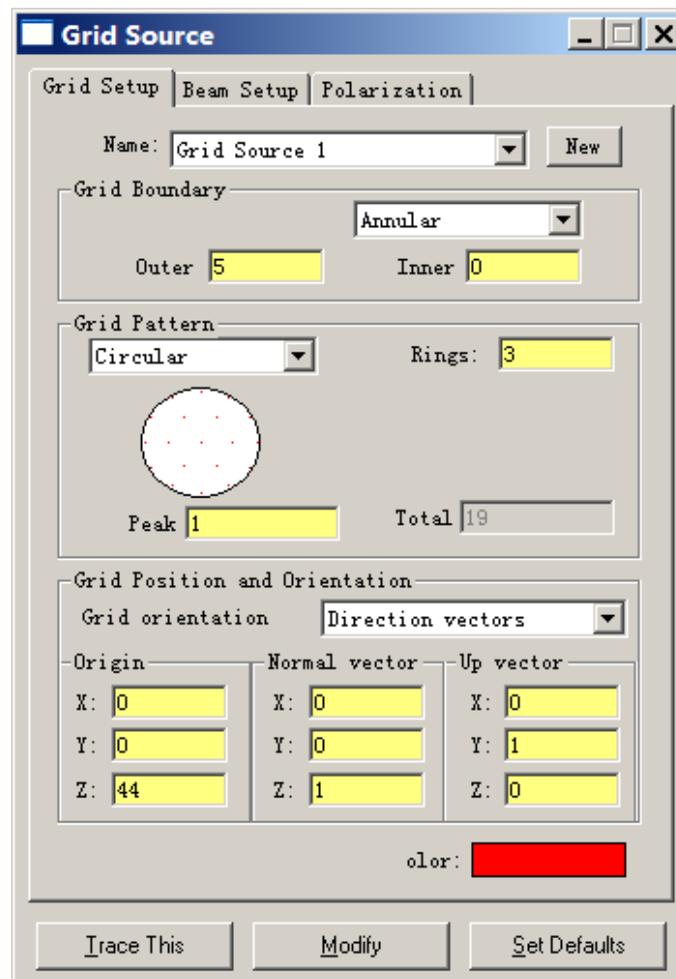
# 重点采样实例-积分球

- 定义光源及计算门坎（Threshold）
  - 定义Threshold为 0.0005



# 重点采样实例-积分球

- 加入Grid光源
- 位置为0,0,44



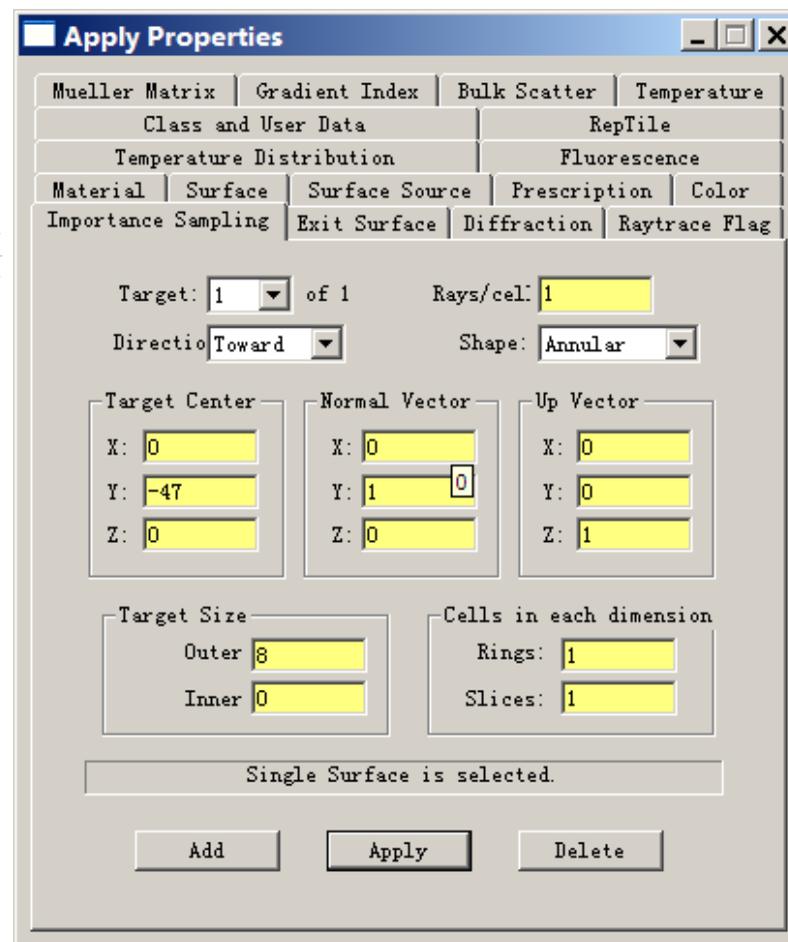
# 重点采样实例-积分球

- 进行光线追迹
- 观察探测器表面的光强分布
- 只有数条光线入射，如何改善？
  - 追迹更多的光线-更多时间、更大的内存
  - Importance Sampling

# 重点采样实例-积分球

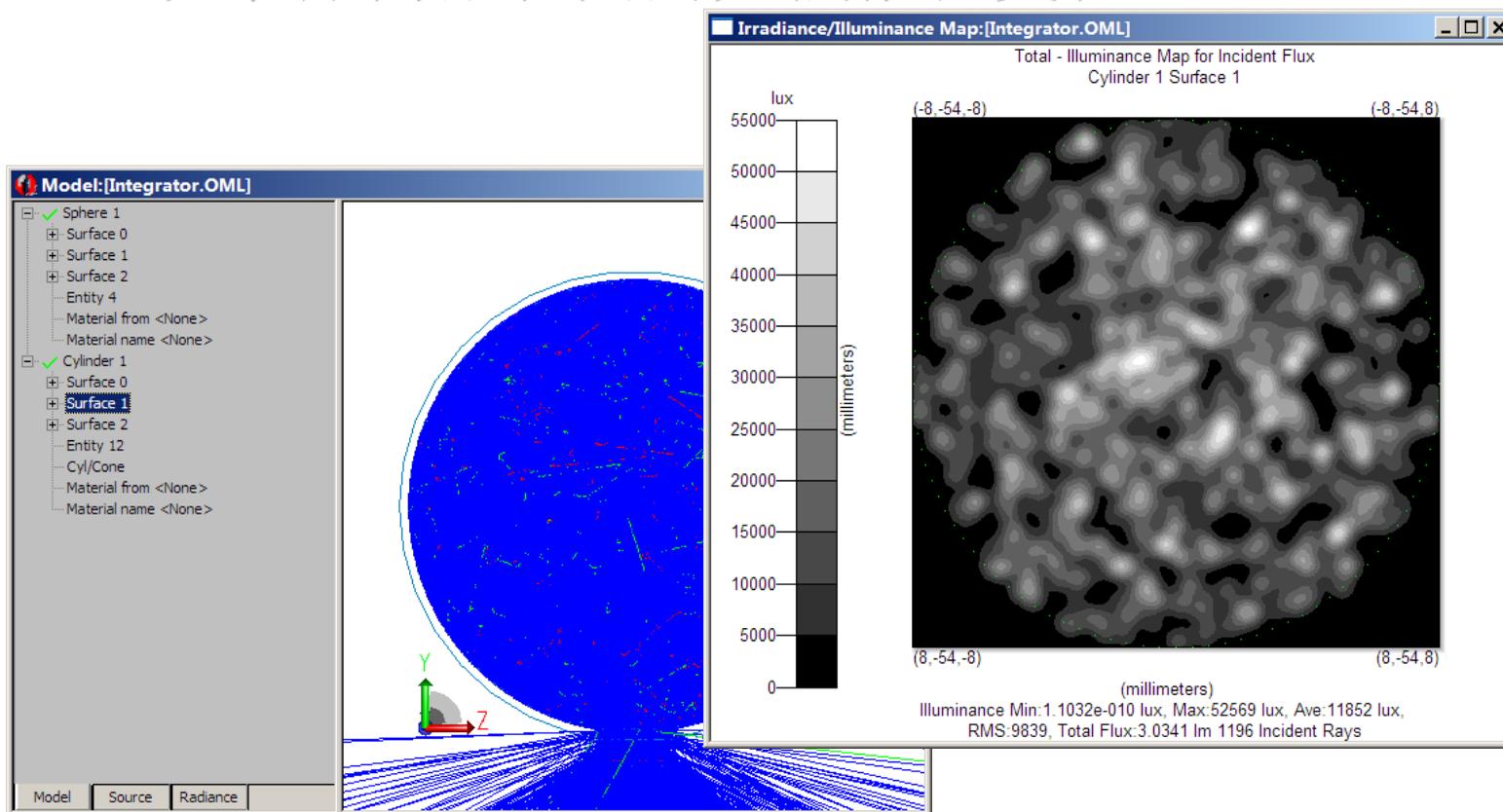
## ■ Importance Sampling

- 选择球壳内壁
- 在面特性表中，选择 Importance Sampling 标签
- 设定Target



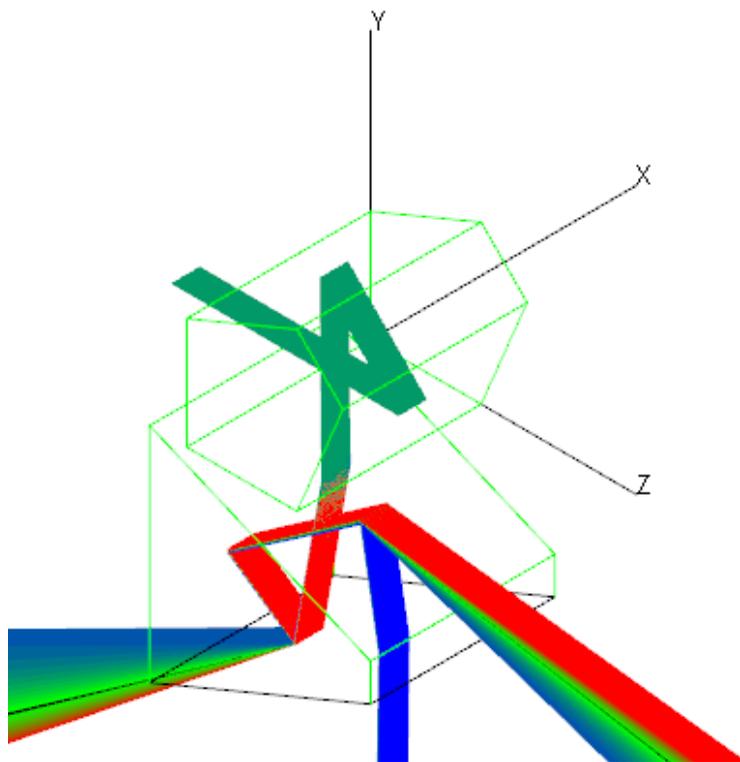
# 重点采样实例-积分球

- 重新计算分析
- 观察探测器表面的光强报告变化



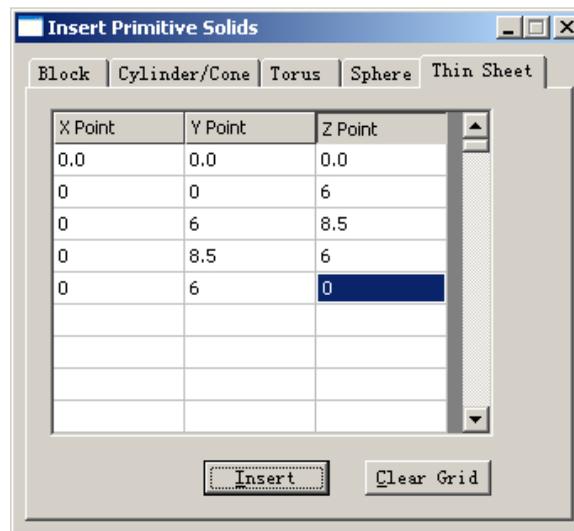
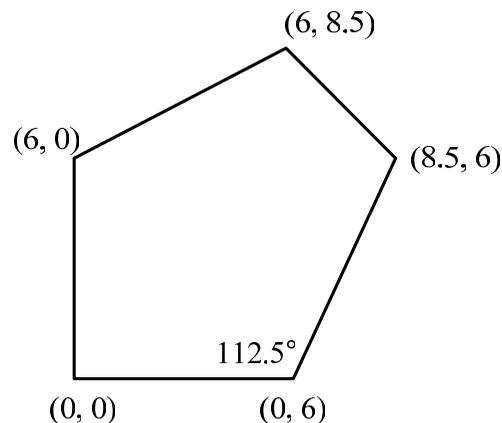
# 分光棱镜实例

- 分光棱镜广泛用于光谱分析等光学系统



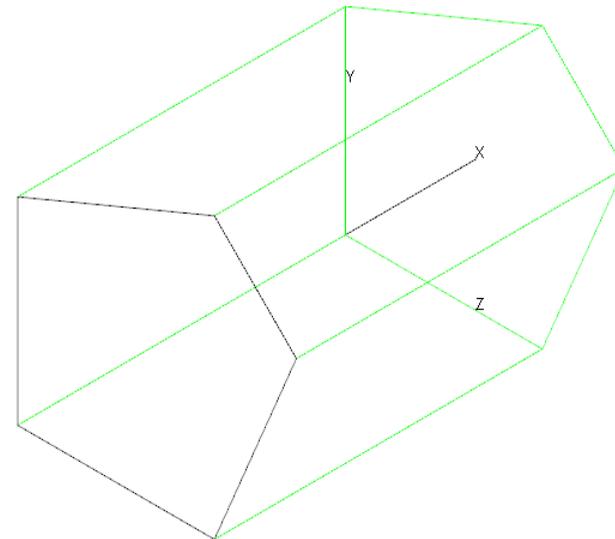
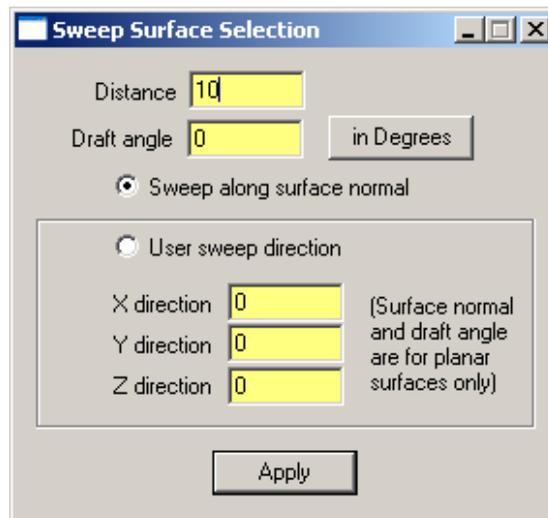
# 分光棱镜实例

- 首先建立实体模型
- 分光棱镜的截面为多边形，采用Thin Sheet 配合 Sweep 指令生成
  - 选择菜单 Insert / Primitive Solid
  - 在对话框中选择 Thin Sheet
  - 按图输入5个多边形顶点坐标



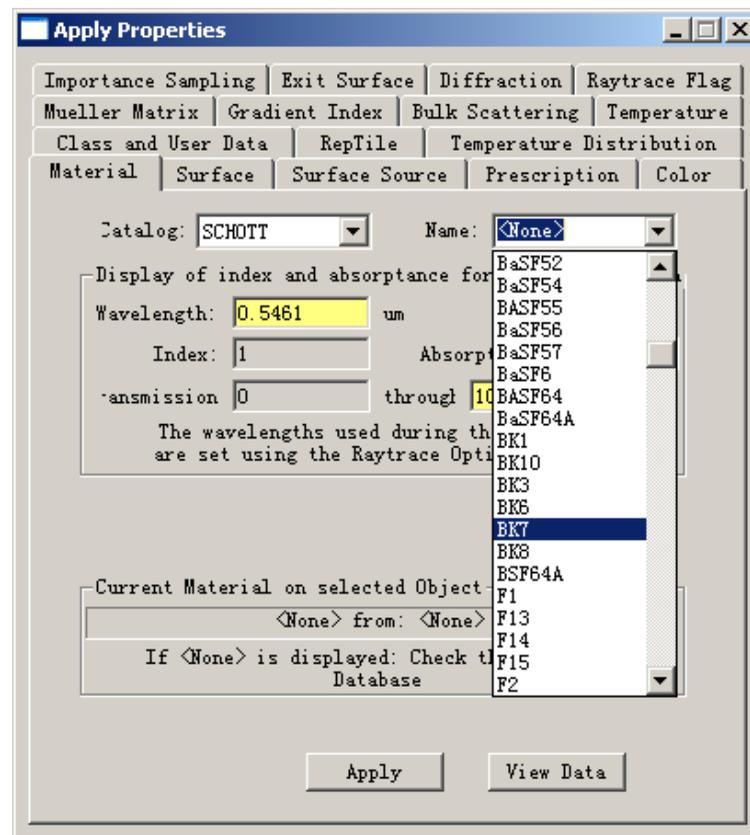
# 分光棱镜实例

- 选择菜单**Edit/Surface/Sweep**将多边形沿x轴进行拉伸形成五棱镜
- 注意：**Thin Sheet**建立时需要按照顺时针或逆时针输入每个节点



# 分光棱镜实例

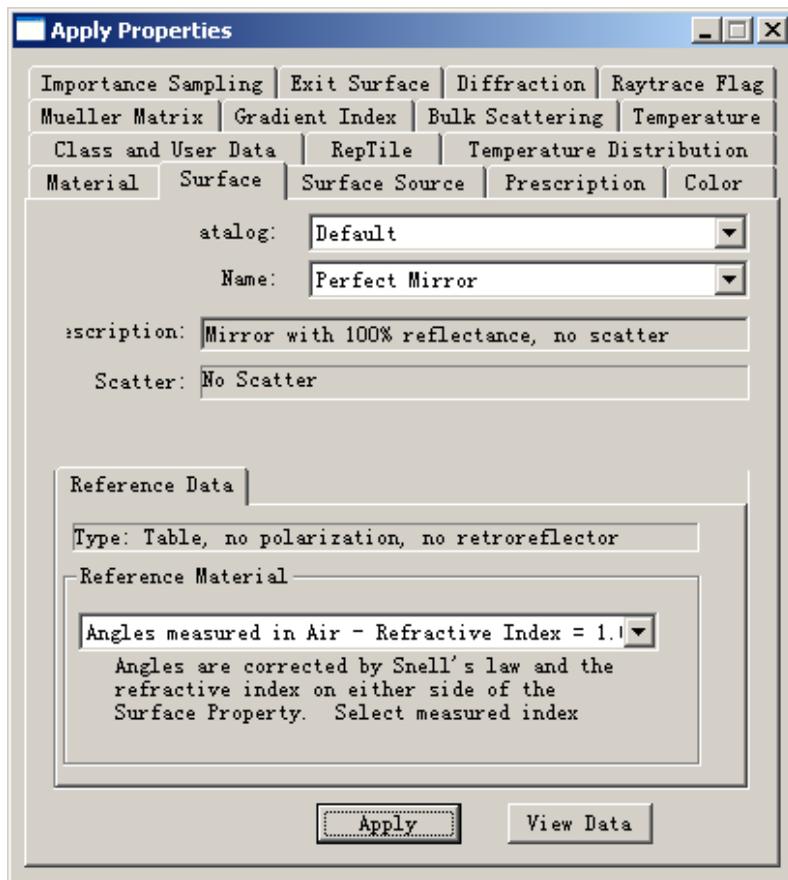
- 设定模型的材料
- TracePro 将各种属性赋予物体和表面以使其成为一个具有光学特征的模型
  - 选择物体Object 1, 在右键菜单中选择Properties
  - 选择Material材料选项页, 类别Catalog中选择SCHOTT名称Name中选择BK7
  - 在下方显示所选材料在指定波长下的吸收率和透过率
  - 应用之后在左侧列表中实体的属性同步更新



## 分光棱镜实例

- 单击目录树中的 **Surface 1**
- 按下 **Ctrl** 键，同时按下 **Surface 3** 。
- 这两个面将被赋予镜面属性，点击 **Surface** 项，在第二个下拉菜单中选择 **Perfect Mirror**。
- 点击 **Apply** 使设置生效。可在目录树中查看设置是否正确。

# 分光棱镜实例



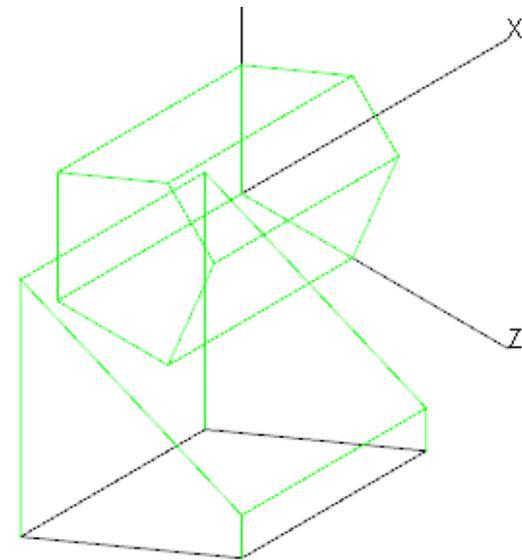
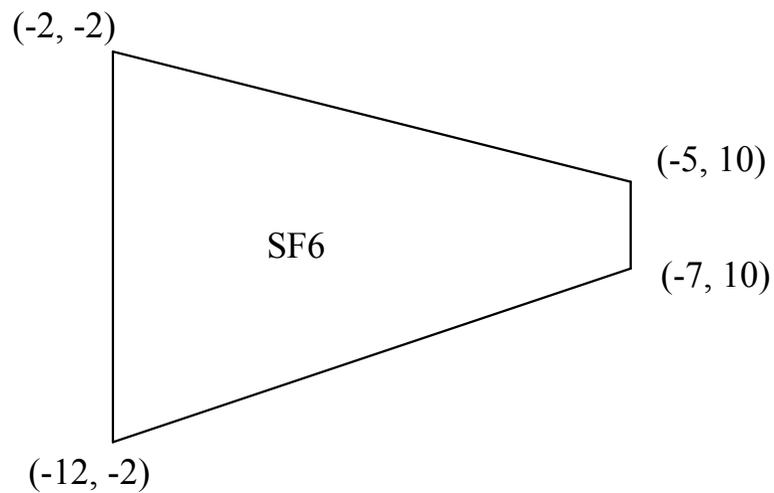
- Object 1
  - Surface 0
  - Surface 1
    - Surface Data from: Default
    - Surface Property: Perfect Mirror
    - Plane
  - Surface 2
  - Surface 3
    - Surface Data from: Default
    - Surface Property: Perfect Mirror
    - Plane
  - Surface 4
  - Surface 5
  - Surface 6
  - Entity 1
    - Material from SCHOTT
    - Material name BK7

# 分光棱镜实例

- 按照同样的方式再建立另外一个棱镜
- 分光棱镜的截面为多边形，采用**Thin Sheet** 配合 **Sweep** 指令生成
  - 选择菜单 **Insert / Primitive Solid**
  - 在对话框中选择 **Thin Sheet**
  - 按图输入4个多边形顶点坐标
- 赋予分光棱镜 **Catalog : SCHOTT |**
- **Name : SF6** 的材料属性

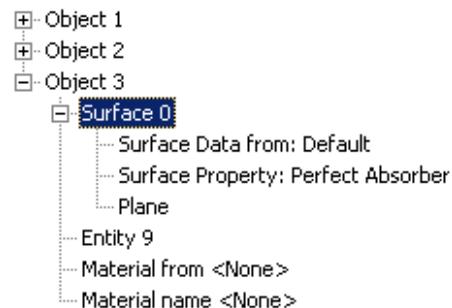
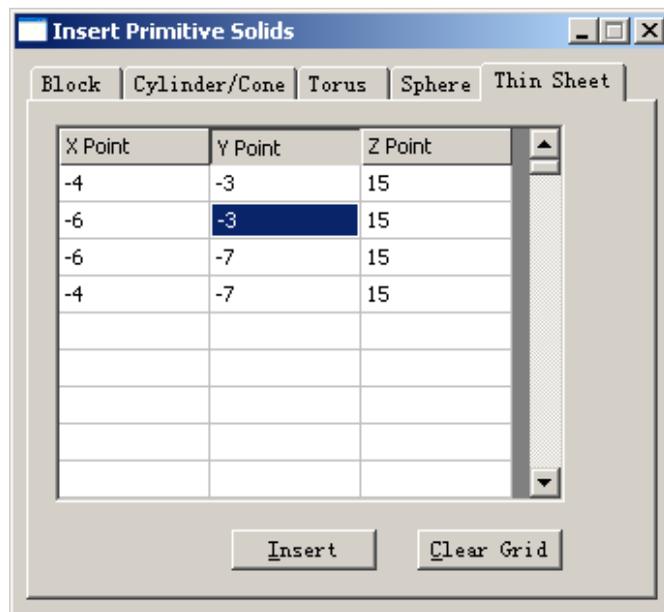
# 分光棱镜实例

## ■ 模型参数及之后的图形



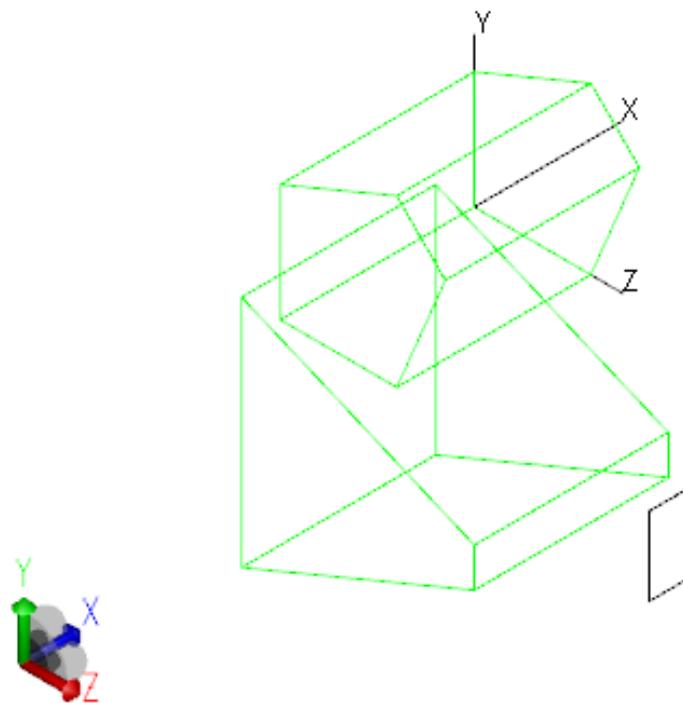
# 分光棱镜实例

- 为观察棱镜组的分光效果，添加一观察面
  - 采用Thin Sheet 在如下坐标建立
  - 将观察面的Surface properties设为Perfect Absorber



# 分光棱镜实例

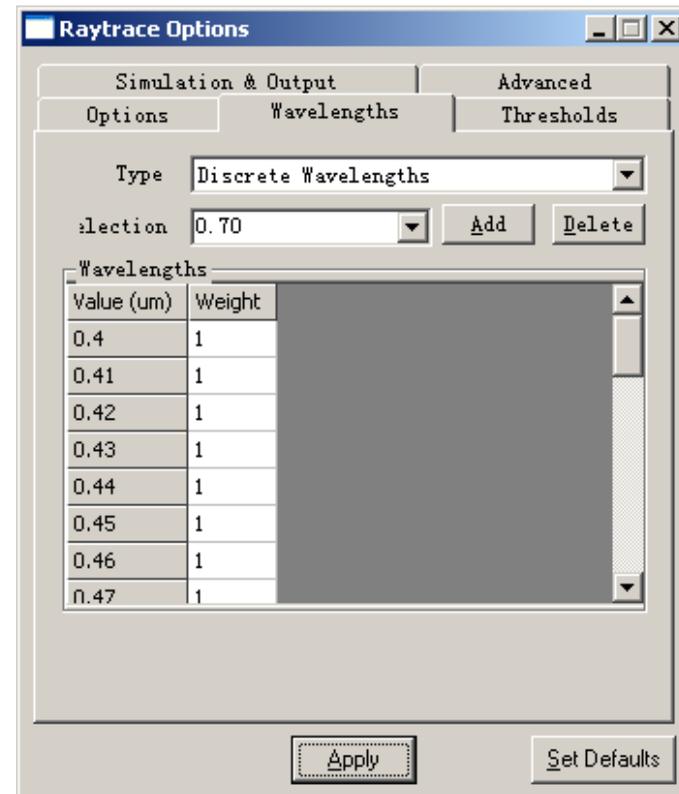
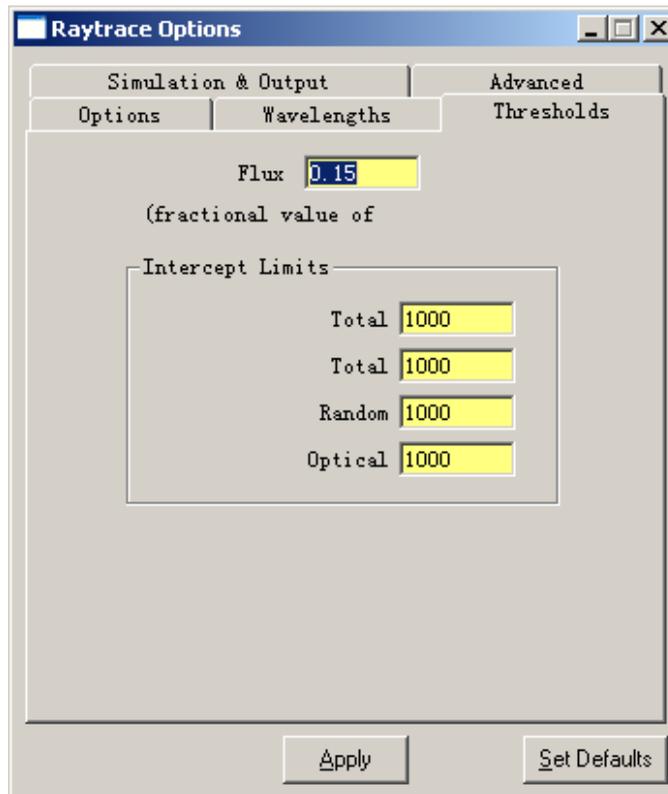
- 模型建立后的图形



# 分光棱镜实例

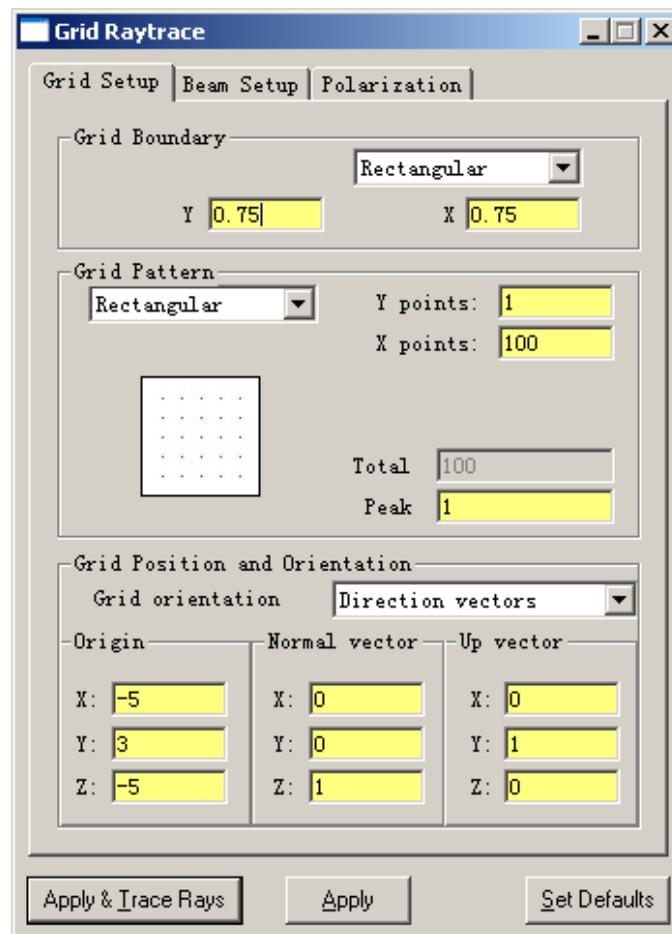
- 使用者可以从新定义光强阈值。默认值是**0.05**，这意味着每根光线向各个方向反射，分解成更多的光线，如果新分解出的光线的强度高于初始强度的**0.05%**，则会被继续追迹，若低于**0.05%**，则不会被追迹。
- 为了能在仿真中更加准确地再现真实情况，应根据实际情况调节这一阈值。
- 点击菜单栏 **Analysis / Raytrace Options** ，选择 **Thresholds** 项，填入**0.15**。
- 此外，注意波长的选取，对于验证分光作用，追迹光线应根据所设计的光谱仪的光谱范围来选取。
- 同样是在 **Analysis / Raytrace Options** 中，选择 **Wavelengths** 项，在 **Type** 栏选择 **Discrete Wavebands** 。本例程选取**0.40um**到**0.70um**，步长**0.01um**的波段

# 分光棱镜实例



# 分光棱镜实例

- 用于光谱仪的分光棱镜，其入射光通常是光束通过一个入射狭缝后形成的窄带
- 所以本例中用于光线追迹的光线在 **Analysis/Grid RayTrace** 中设定



# 分光棱镜实例

- **Grid Boundary** 光束的边界形状，Y、X 中填入的是中心到边的距离，
- **Grid Pattern** 指光线的分布形式，
- **Y points** 、 **X points** 边界中垂直方向和水平方向所包含的光线数。
- **Origin**指边界的中心坐标，
- **Normal Vector** 代表物体（光线）前进方向，
- **Up Vector** 决定垂直于**Normal Vector**方向的物体的方位

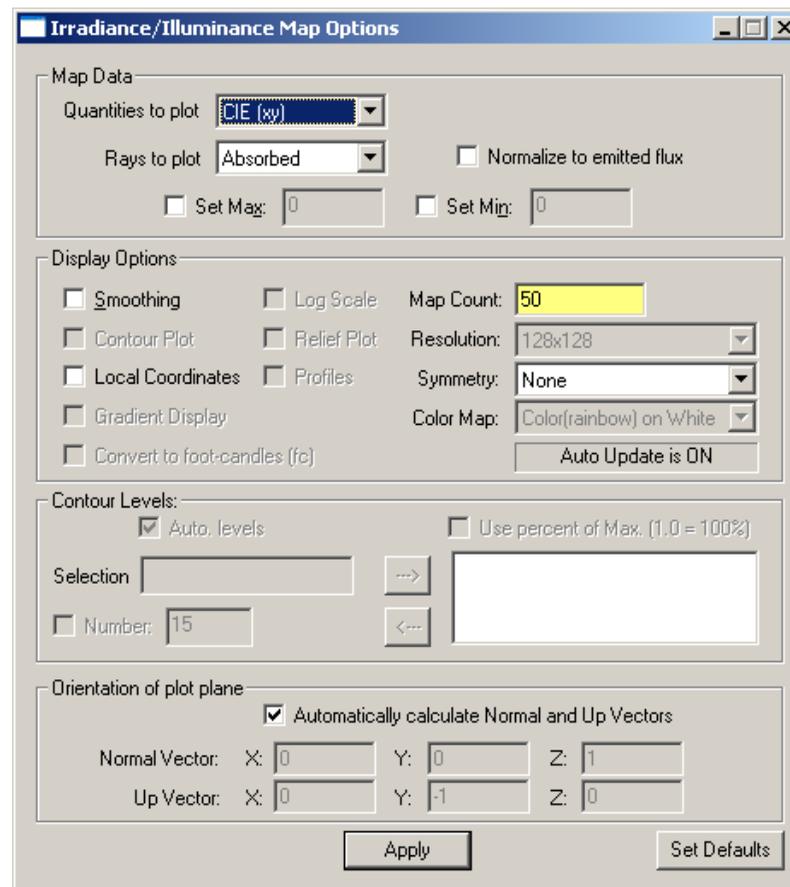
# 分光棱镜实例

- 点击**Apply & Trace Rays**开始进行计算
- 查看观察面的情况
  - 在左侧实体列表中选择观察面Object3的Surface0
  - 在菜单中选择**Analysis/Irradiance/Illuminance Maps**弹出照度图
  - 在右键菜单中选择照度图设定**Irradiance/Illuminance Options**

# 分光棱镜实例

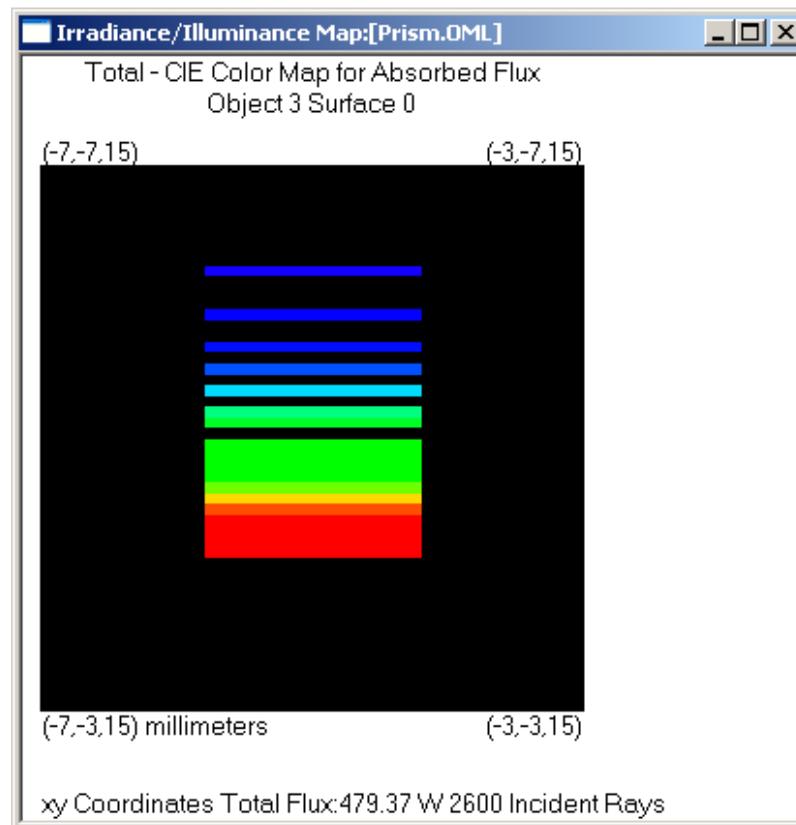
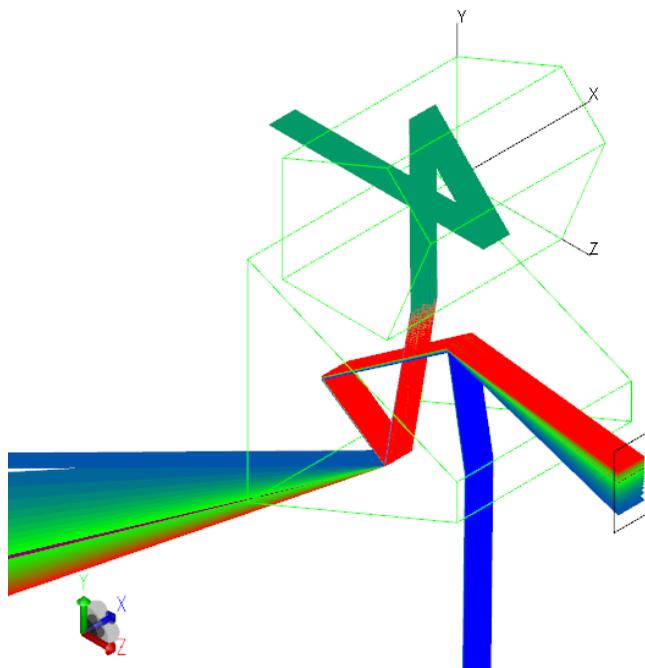
## ■ 结果分析

- 在Quantities to plot中选择CIE(xy)标准色度图
- 在Rays to plot选择被吸收的光线(Absorbed)
- 点击Apply观察结果



# 分光棱镜实例

## ■ 棱镜分光后在观察面得到的结果

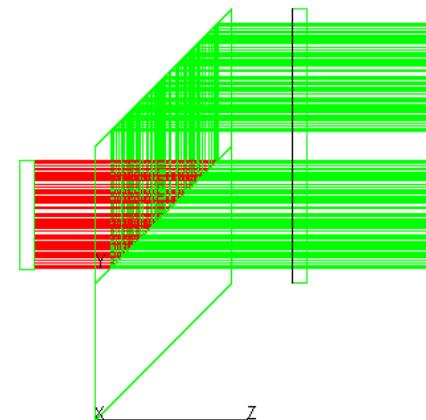


# PS Converter 模拟设计

- 显示光学系统中的PS Converter 模拟设计
  - 显示设备中显示器的发光效率，提高光源的利用率一直是需要重视的问题
  - 液晶显示仅仅利用某一特定方向的偏振光
  - PS Converter将光源中一个方向的偏振光转换到相垂直的可以被液晶片利用的另一个方向，从而提高光能的利用率

# PS Converter 模拟设计

- 电磁波的偏振状态可以分为
  - P偏振，对应TE振动方向
  - S偏振，对应TM振动方向
  - 两种偏振方向互相垂直
- 光波可以表示成 $E_p$ ,  $E_s$ 的不同组合
  - 线偏振光：  $E_p$ ,  $E_s$ 的相对相位不变
  - 圆偏振：  $E_p$ ,  $E_s$ 振幅相同，相位相差90度
  - 椭圆偏振：  $E_p$ ,  $E_s$ 振幅不同，相位不等于90度。



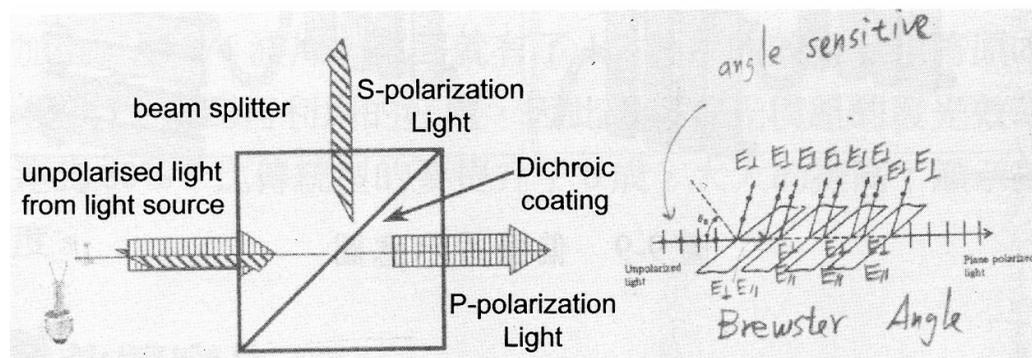
# PS Converter 模拟设计

- 三种基本的光的偏振状态可以通过某些特殊设计的器件相互转换或分离筛选
  - Retarder Plate: 相位延迟片  
通过双折射改变 $E_p$ ,  $E_s$ 的相对相位, 从而改变光波的偏振形式
  - Polarization Beam Splitter (PBS) 偏振分光器  
将入社光波中的 $E_p$ 和 $E_s$ 分量分离
  - Polarizer: 偏振片  
只允许某特定方向的偏振通过

# PS Converter 模拟设计

## ■ 偏振分光器PBS原理

- 光束以布鲁斯特角(Brewster angle)入射到多层膜时，P偏振状态的光束会全部透过而S偏振则被部分反射
- 经过多层膜后S偏振（几乎）全部被反射，P偏振则全部透过



# PS Converter 模拟设计

## ■ 偏振分光器设计思路

- 自然光（包括同样幅度的P偏振和S偏振）入射
- 首先将P偏振和S偏振分开
- 再将一个偏振方向的光束转换为另外一个偏振方向，使最后的出射光束具有单一的偏振状态

# PS Converter 模拟设计

## ■ 偏振分光PBS元件建模

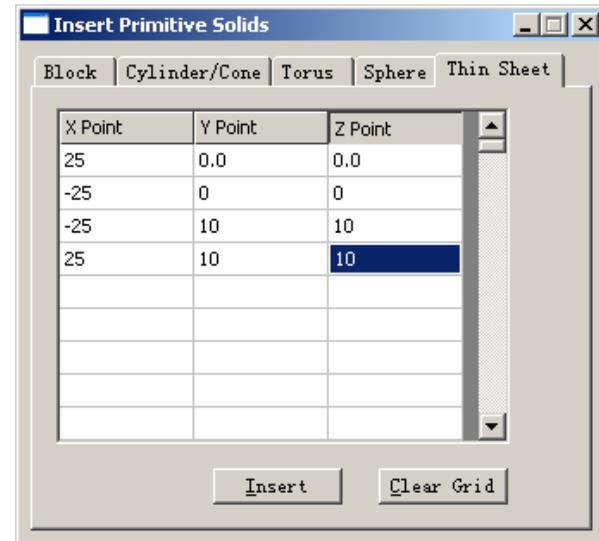
- 厚度50mm
- 材质为SF7

## ■ 步骤

- 菜单指令

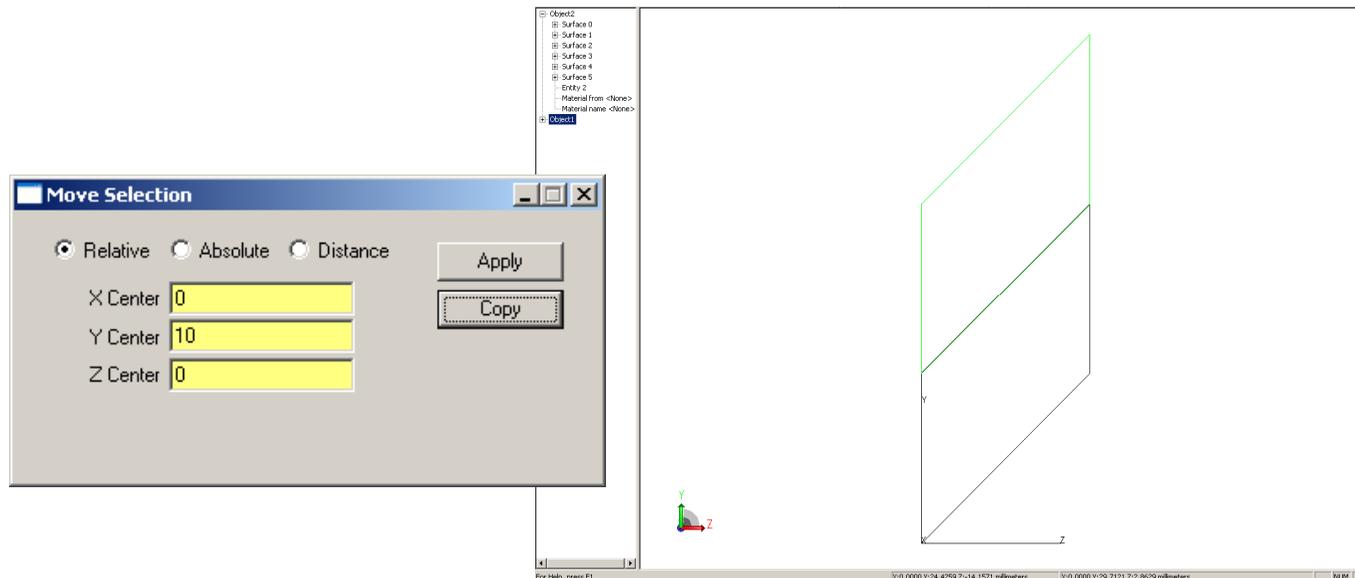
Insert/Primitive Solid/Thin Sheet

- 将该面向Y正方向Sweep 10mm，注意Sweep沿Y方向，因此需要在拉伸方向填入(0,1,0)



# PS Converter 模拟设计

- 将生成的实体沿Y正方向复制一个
  - 选中生成的Object1，在右键菜单中选择Move
  - 填入Y方向的相对移动距离10mm
  - 单击Copy，则在10mm位置复制一个新的实体



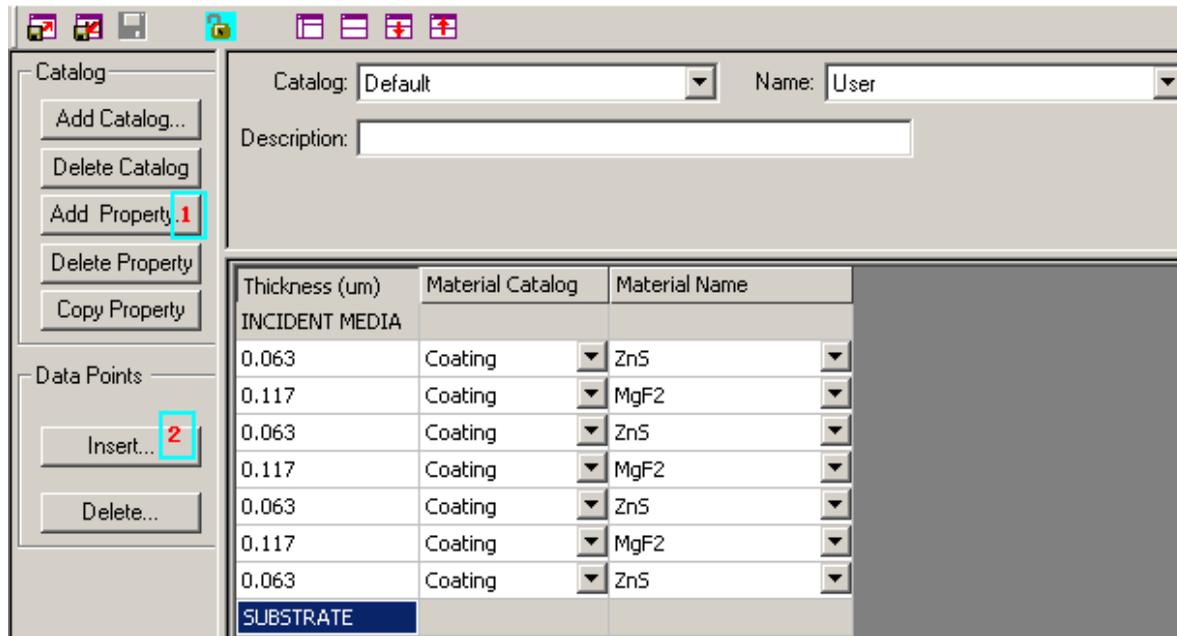
# PS Converter 模拟设计

## ■ 设定材质

- 选择两个新建立的实体，在右键菜单中选择 **Properties/Material**，设定为SCHOTT的BK7
- 选择两个实体的接触表面作为镀膜面
- 选择软件菜单的**Define/Edit Property Data/Thin film stacks**指令
- 在对话框中选择**Add property**建立一个新的膜系
- 选择**Insert**按钮在新膜系中输入7个点（7层膜）

# PS Converter 模拟设计

## ■ 设定材质



# PS Converter 模拟设计

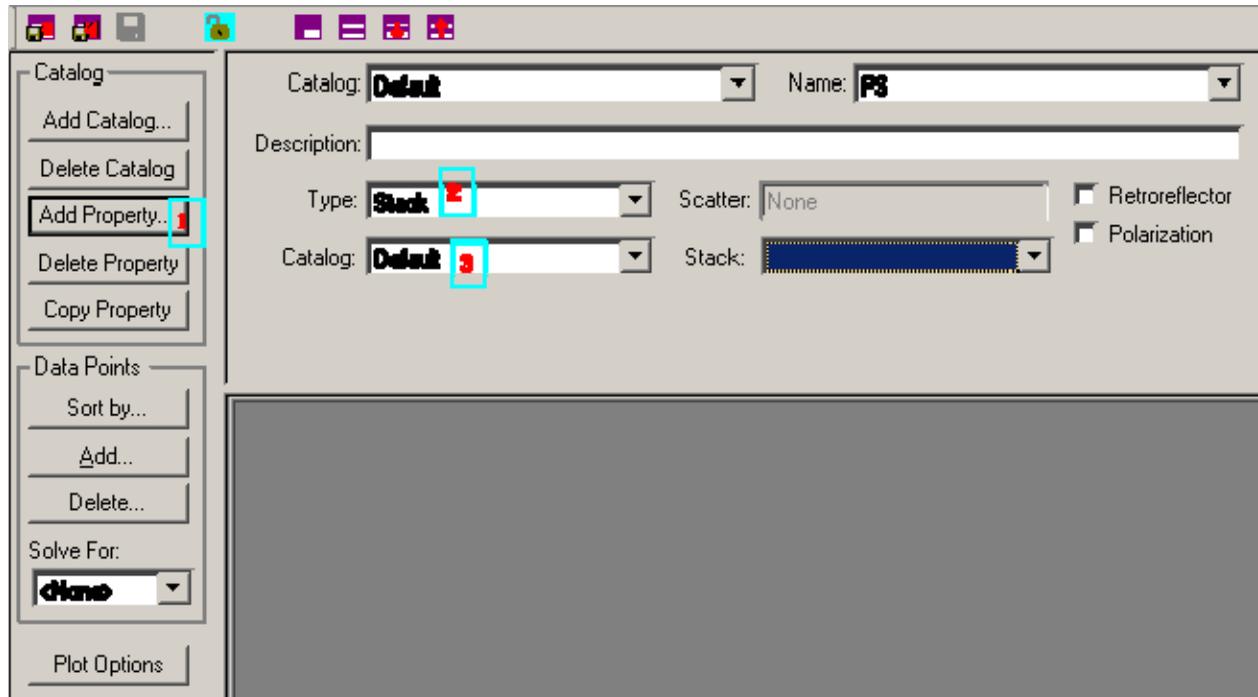
## ■ 设定材质

### □ 将建立好的膜系数据加入表面特征

- 选择工具菜单  
Define/Edit Property Data/Surface Properties
- 选择Add Property新增一个表面特征，取名PS
- 在表面特征类型Type中选择Stack膜层
- 在Stack列表中选择刚刚建好的膜系，保存

# PS Converter 模拟设计

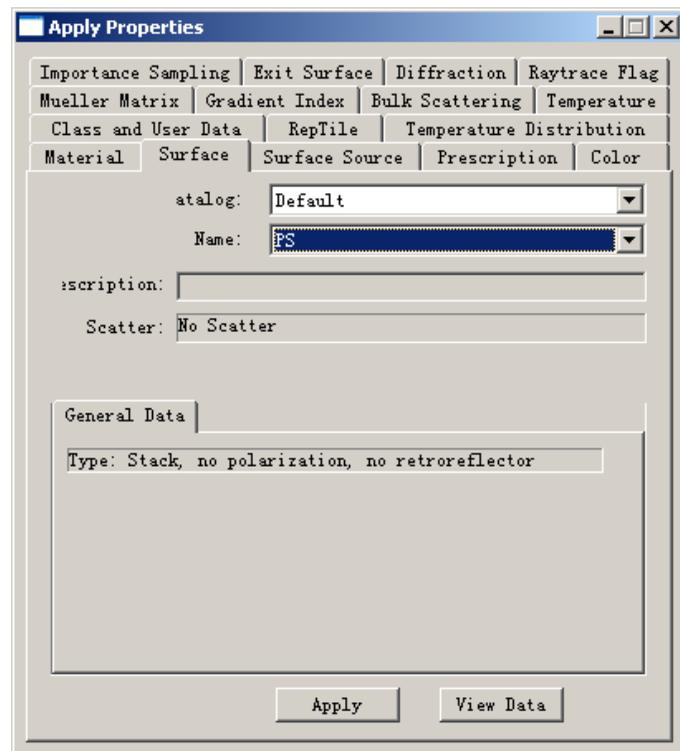
## ■ 设定材质



# PS Converter 模拟设计

## ■ 设定材质

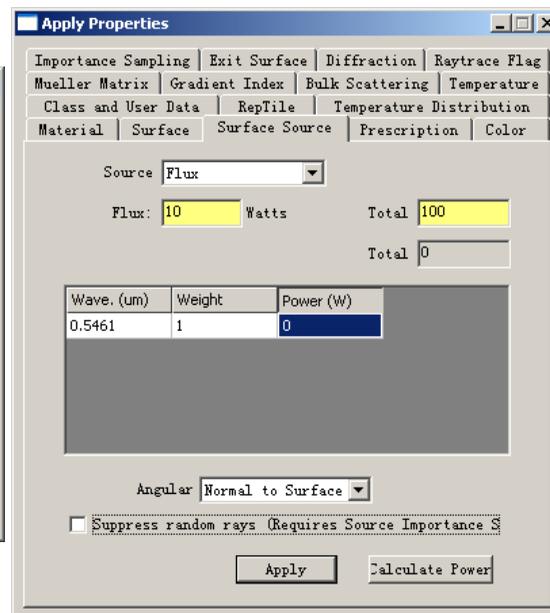
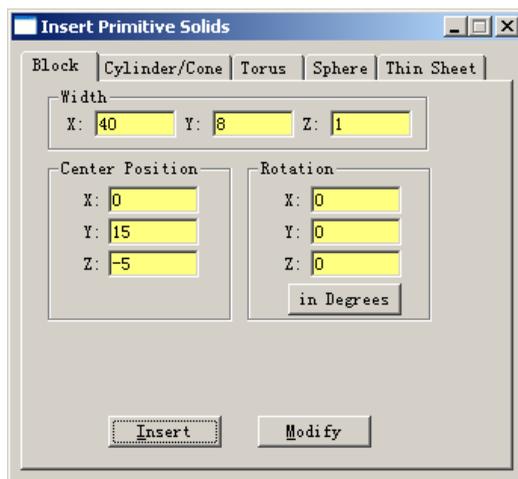
- 选择需要镀膜的两个实体的交界表面
- 在右键菜单中选择 Properties
- 选择 Surface，将建立的表面特性应用在该界面



# PS Converter 模拟设计

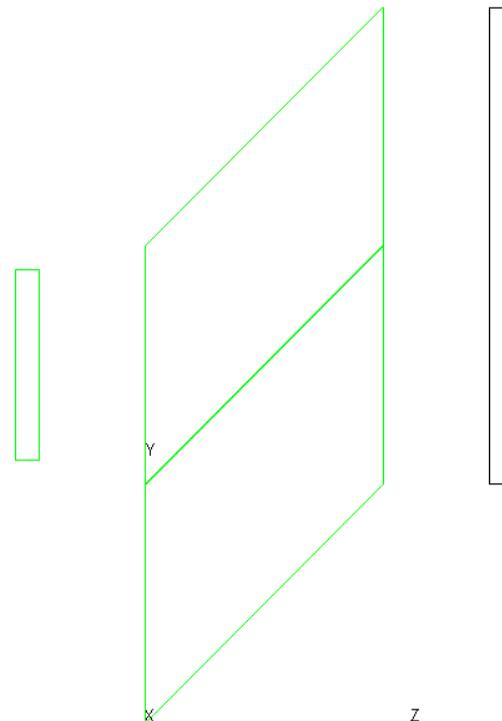
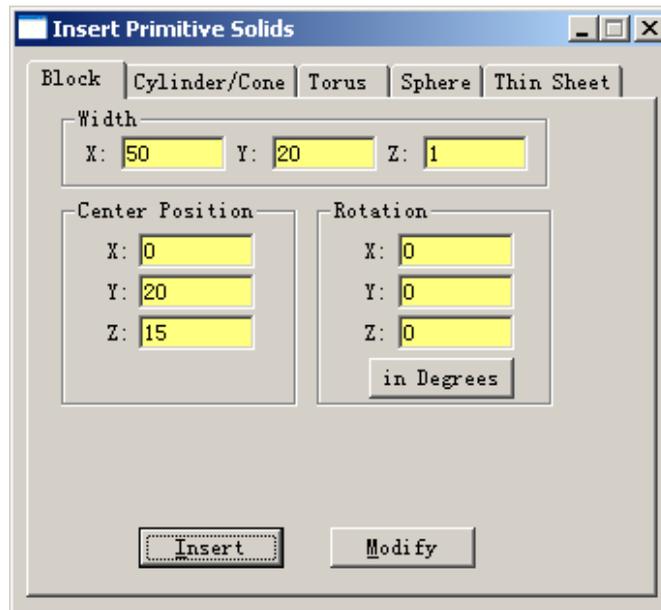
## ■ 建立光源

- Insert/Primitive Solids得到如图参数Block
- 选取Block靠近PBS的表面作为发光面



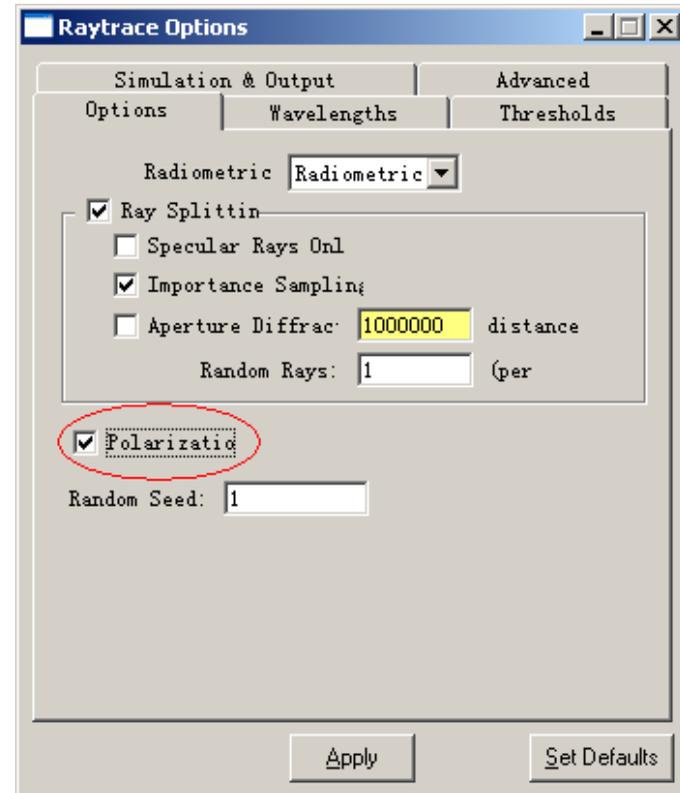
# PS Converter 模拟设计

- 建立检测表面
  - Insert/Primitive Solids得到如图参数Block



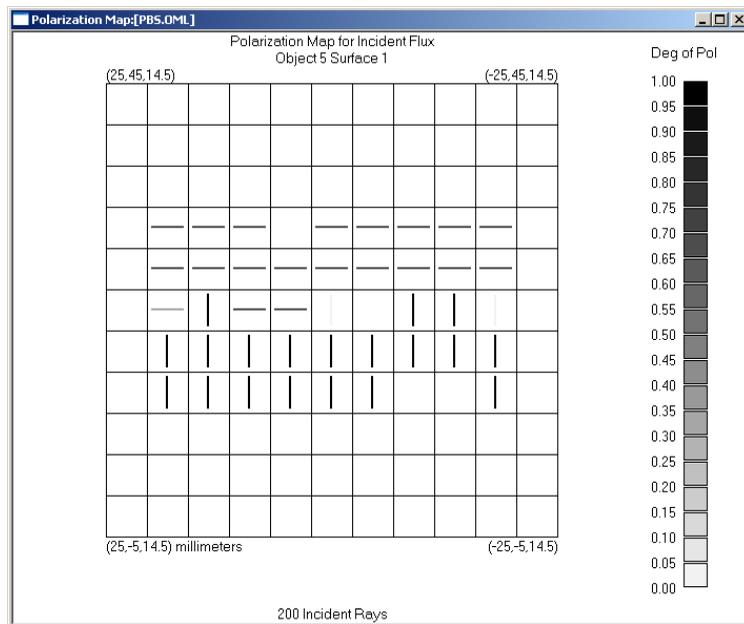
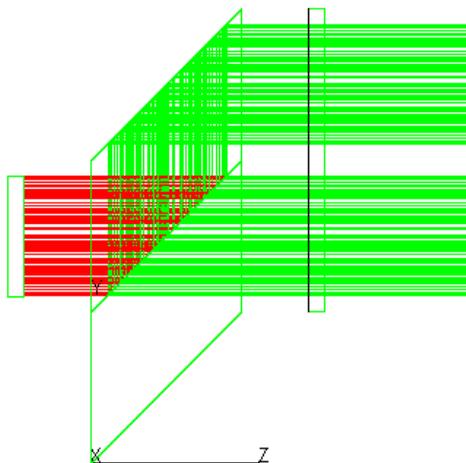
# PS Converter 模拟设计

- 设定光线追迹参数
  - Analysis/Raytrace Options
  - 注意勾选Polarization参数



# PS Converter 模拟设计

- 开始进行追迹计算
- 之后选择探测器元件靠近PBS的表面
- 选择菜单Analysis/Polarization Map显示探测器表面的偏振状态

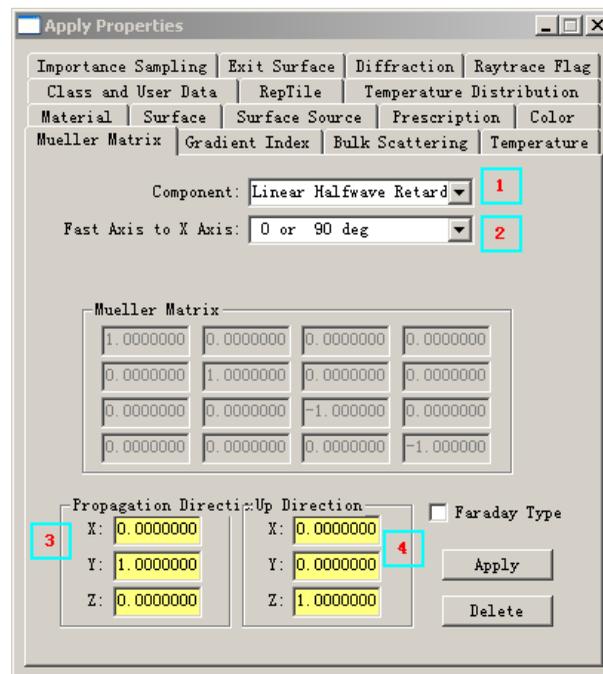


# PS Converter 模拟设计

- 上面的各个步骤建立的PBS元件可以将不同偏振状态的光波分离
- 为更有效的利用光能，需要接着将被分开的两个相互垂直的偏振光转换为同一偏振方向

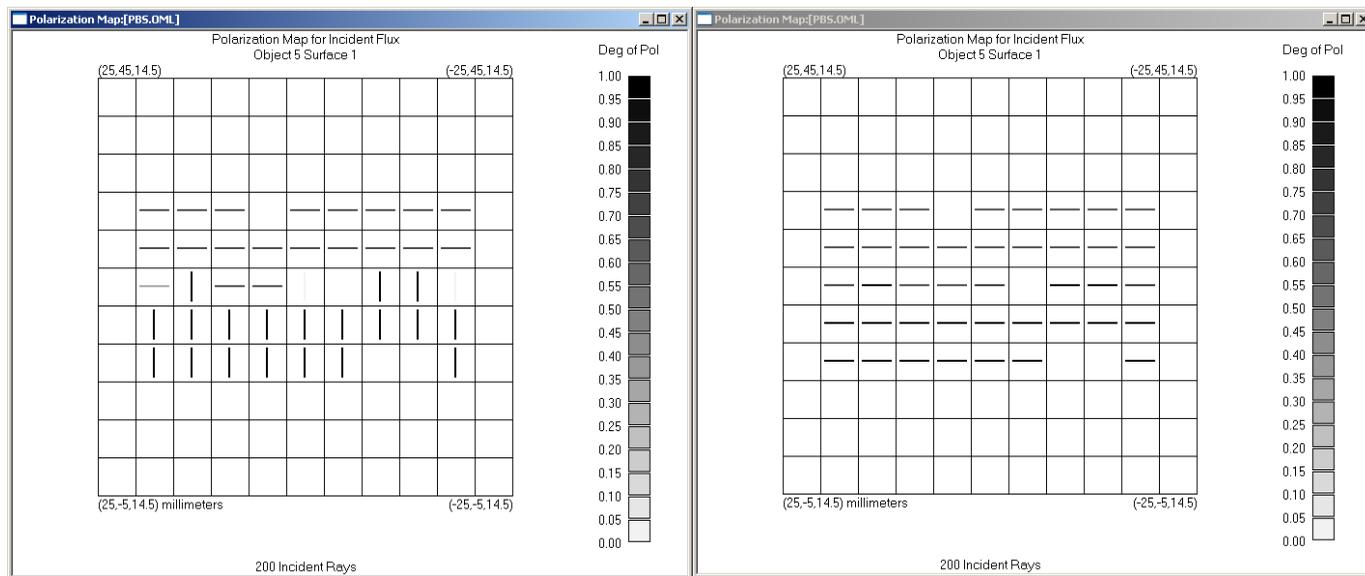
# PS Converter 模拟设计

- 在透射的P偏振位置加入1/2波长片
  - 选取PBS元件下半部分的表面
  - 在该表面的右键菜单中选择 Properties/Mueller Matrix
  - 注意Propagation Direction与Up Direction的填写



# PS Converter 模拟设计

- 再次进行光线追迹计算
- 查看探测器表面的偏振状态，可以看到下半部分的偏振状态已经与上半部分相同

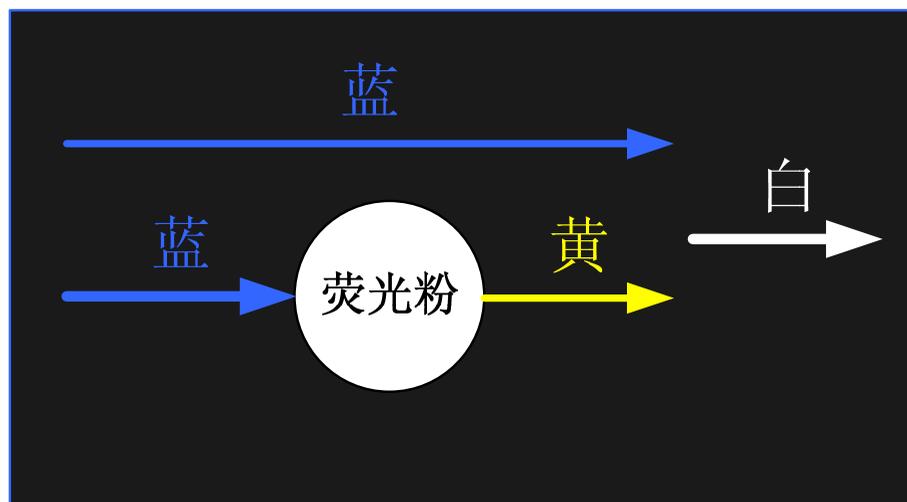


加入1/2 wave plate之前

加入1/2 wave plate之后

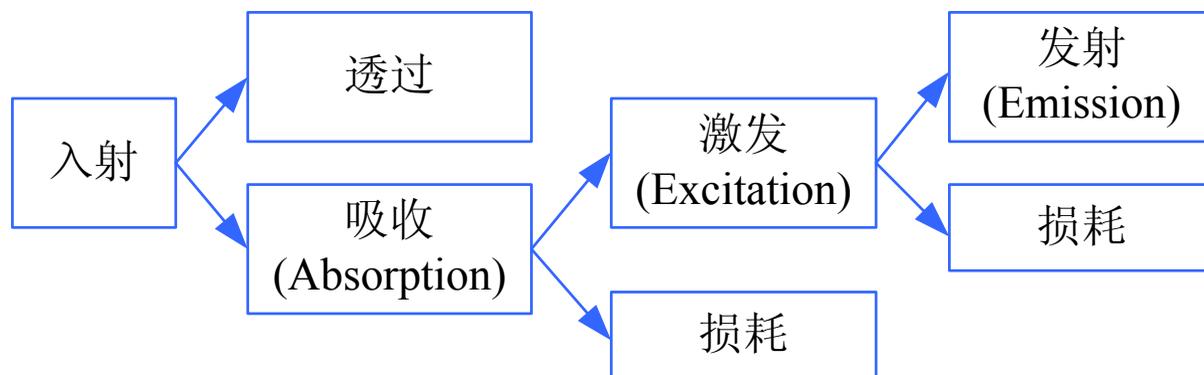
# 荧光分析及计算

- 用荧光粉使LED获得白光
- 四种白光 LED 技术
  - 蓝光 LED + 黄色荧光粉；
  - 蓝光 LED + 红绿双色荧光粉；
  - 紫外 LED + 红绿蓝三色荧光粉；
  - 蓝光 LED + 绿光 LED + 红蓝光 LED



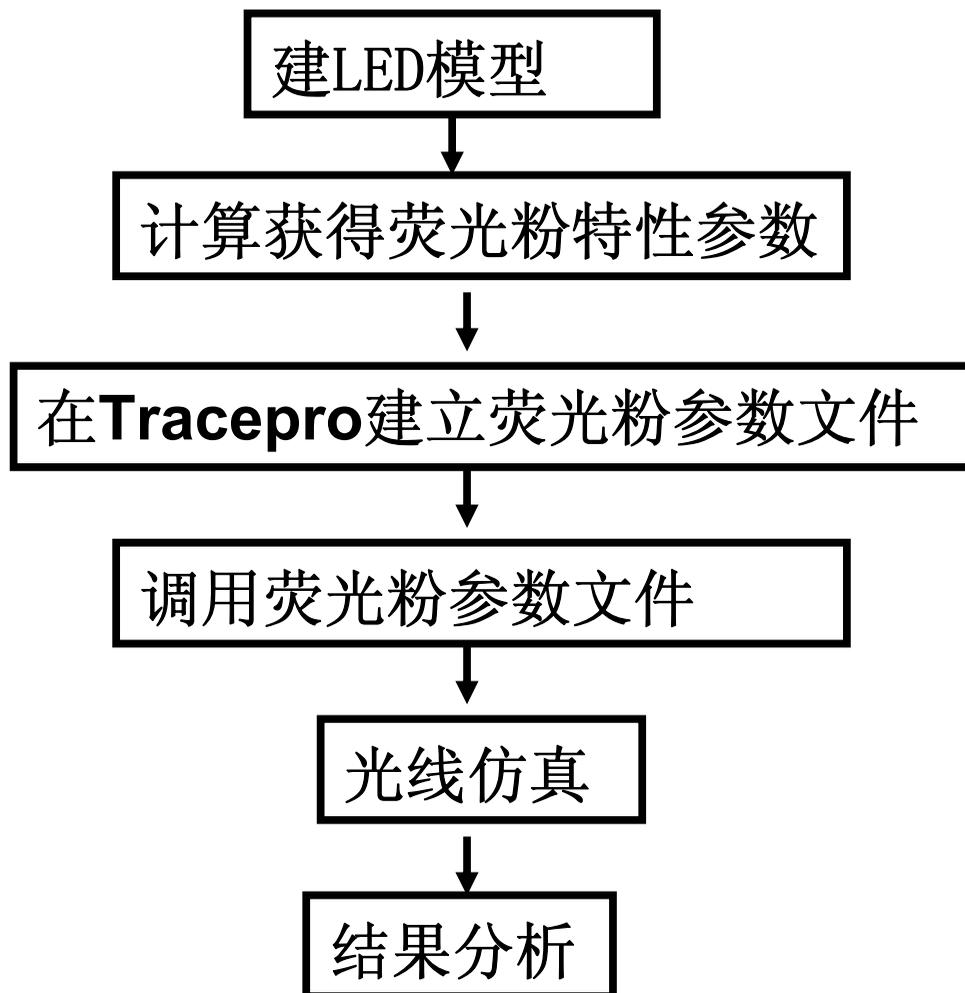
# 原子光谱—荧光光谱

- 原子吸收能量发生跃迁后，原子以光辐射形式释放能量跃迁到较低能级，可形成荧光发射
- 非共振荧光：荧光波长与激发光波长不同
  - 荧光波长比激发光波长长称为斯托克司线（Stokes）
  - 荧光波长比激发光波长短称为反斯托克司线（Anti-Stokes）



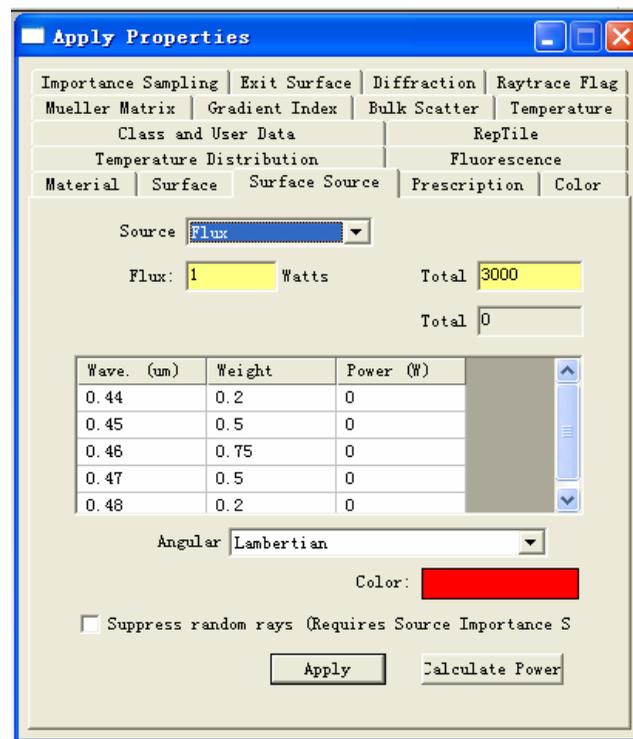
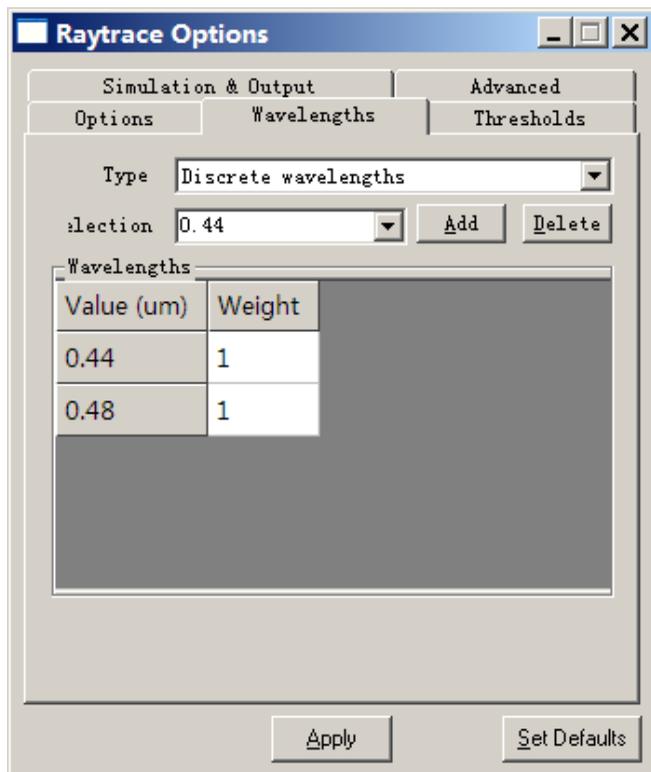
# 荧光分析及计算

## ■ 流程图



# 荧光分析及计算

- 设定波长及光源
- 在设定荧光材料前追迹并观察探测器表面光照度情况



# 荧光分析及计算

## ■ 建立荧光粉特性文档

TracePro Expert - [Fluorescence Property Editor]

File Edit View Define Window Help

Edit Property Data

- Surface Properties...
- Material Properties...
- Bulk Scatter Properties...
- Gradient Index Properties...
- RepTile Properties...
- Fluorescence Properties...**
- Thin Film Stacks...

Catalog: Fluorescence

Description: Spectra represents conjugate prepared by coupling product to protein oi

Quantum efficiency: 0.75 Peak molar extinction: 32000 [liter/(mole\*cm)]

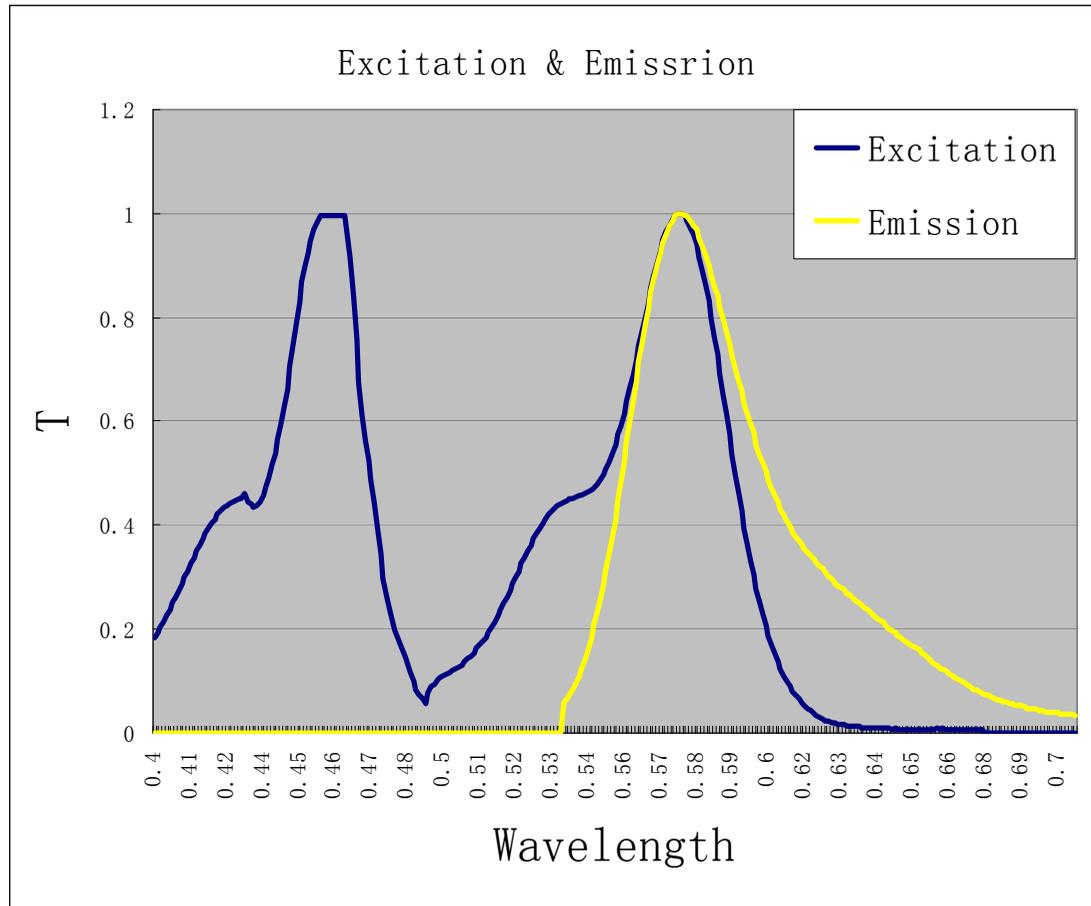
Temperature (K)	Excitation Wavelength (um)	Relative Absorption	Relative Excitation
300	0.4	0.4617754	0.4617754
300	0.401	0.44563	0.44563
300	0.402	0.4399702	0.4399702
300	0.403	0.4354483	0.4354483
300	0.404	0.4369318	0.4369318
300	0.405	0.4431338	0.4431338
300	0.406	0.4564135	0.4564135
300	0.407	0.4703605	0.4703605
300	0.408	0.4913852	0.4913852
300	0.409	0.5166458	0.5166458
300	0.41	0.5394042	0.5394042
300	0.411	0.5661007	0.5661007
300	0.412	0.5942151	0.5942151

Excitation Emission Table

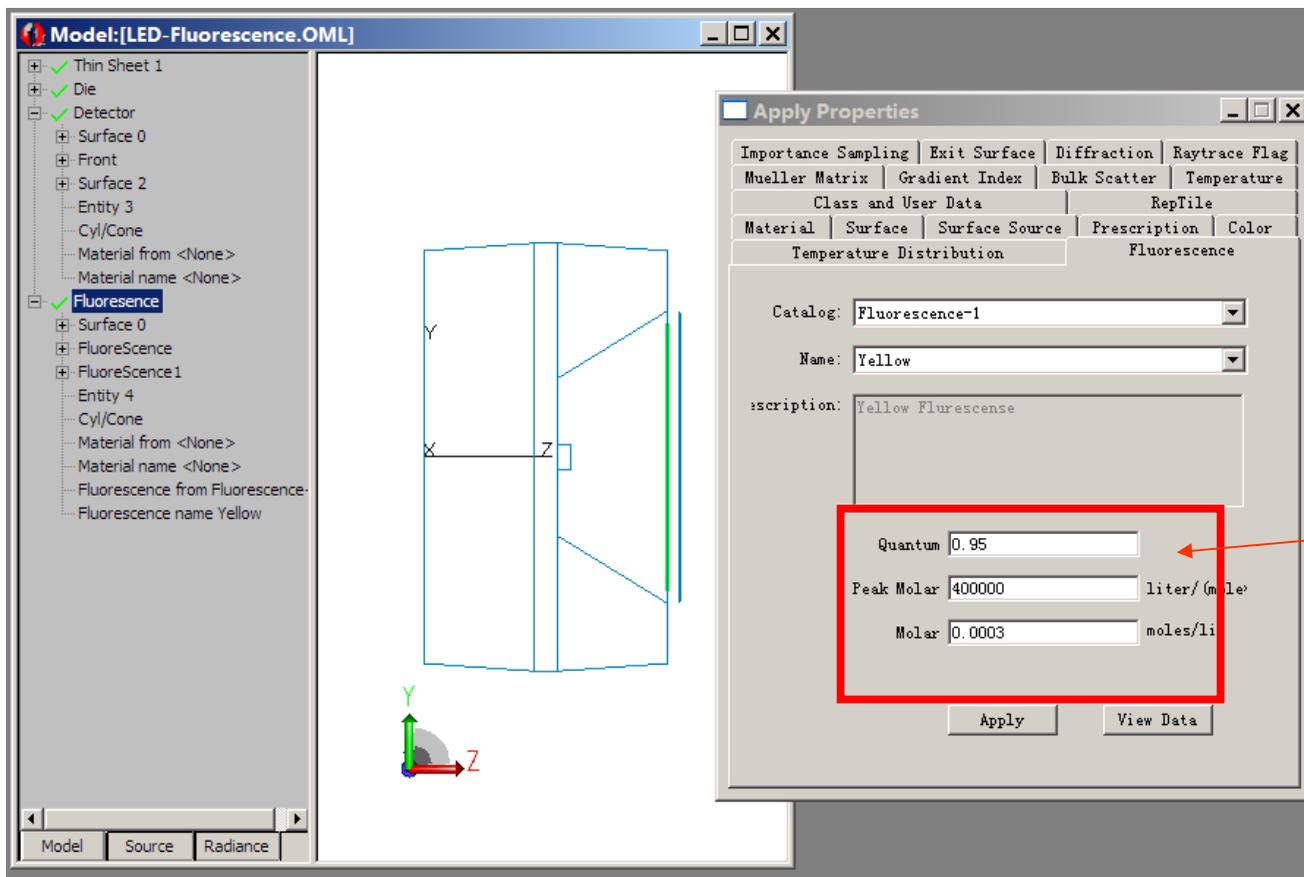
View and modify Fluorescence properties X: -0.0445 Y: 0.0570 Z: 0.2596 millimeters X: 0.0000 Y: 26.9149 Z: -25.0737 millimeters

# 荧光分析及计算

- 蓝光波长激发黄光
- 吸收量 = 激发量



# 荧光粉特性参数



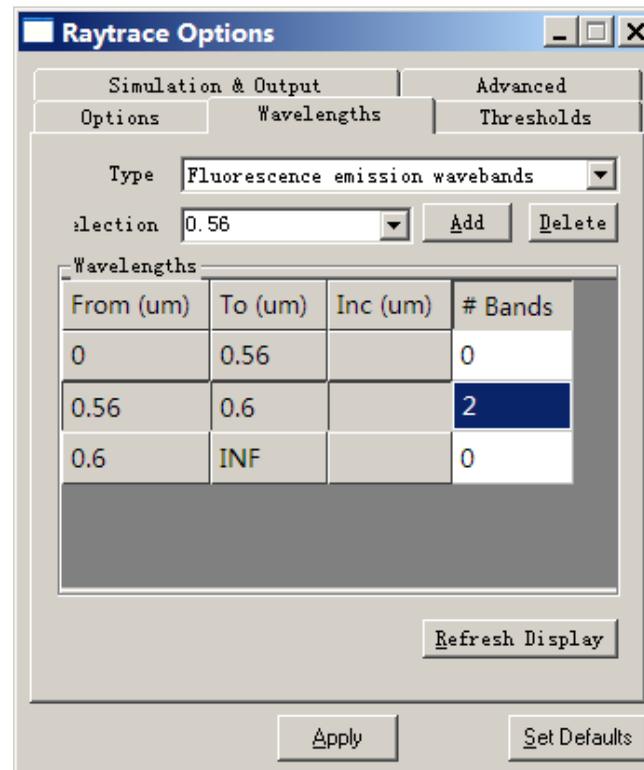
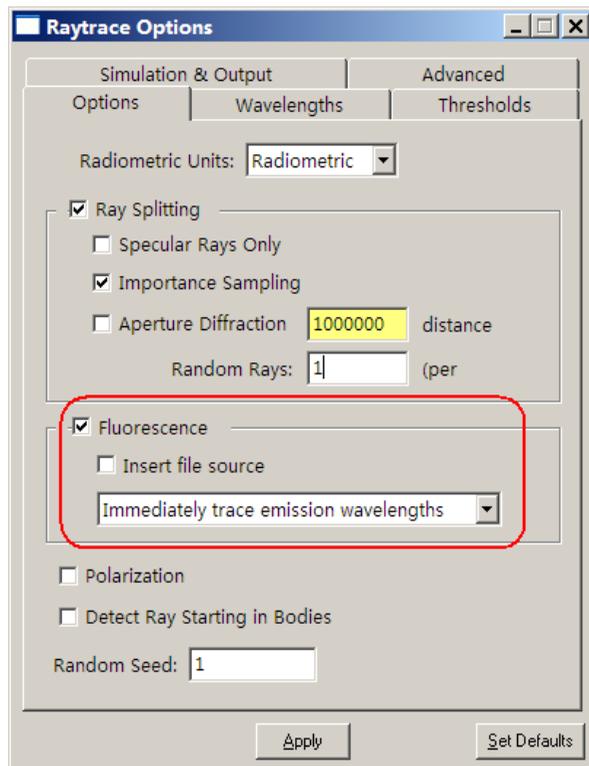
填写荧光特性参数

# 荧光粉特性参数

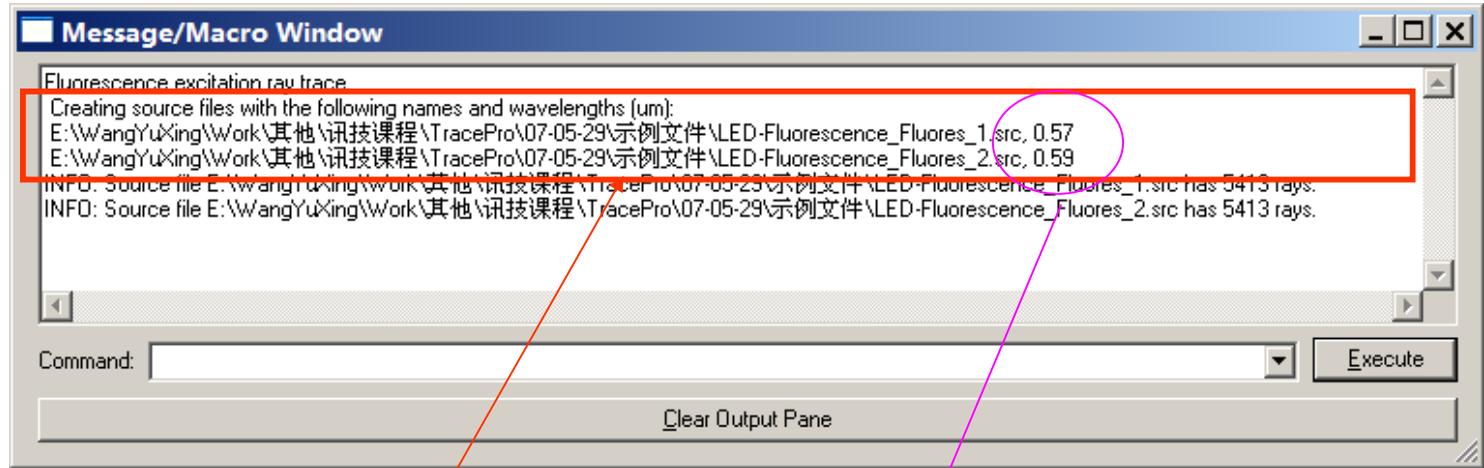
- 1) Quantum Efficiency -----量子效率
  - $B = N_{\text{Emission}} / N_{\text{Absorb}}$ 
    - $N_{\text{Emission}}$  是荧光材料辐射出的量子数
    - $N_{\text{Absorb}}$  是荧光材料吸收被刺激的量子数
- 2) Peak molar extinction -----峰值摩尔消光量  
单位: liter/(mole·cm)
  - 吸收量为最大值“1”的摩尔系数
- 3) Molar Concentration-----摩尔浓度(mole/liter)  
与峰值消光系数共同决定吸收曲线的实际峰值
- 4) Relative Absorption 相对吸收(normalized)
- 5) Relative Excitation 相对激发(normalized)
- 6) Fluorescence Emission 相对发射(normalized)

# 选择荧光模式

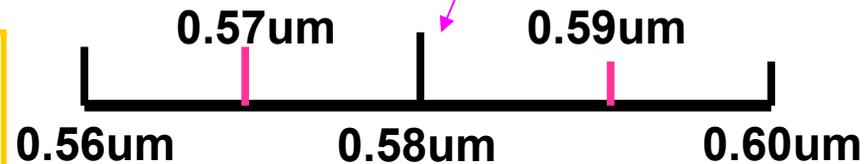
- 0~0.56um没有波长被激发
- 0.56~0.60um将平均激发2个波长
- 0.60-Infinite没有波长被激发



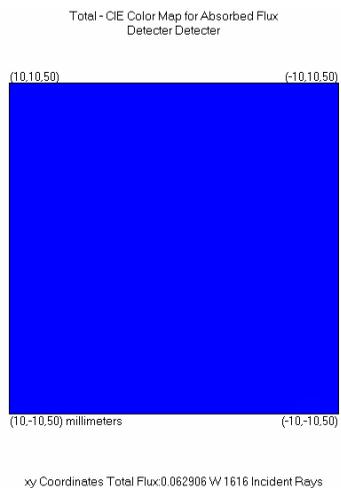
# Trace Ray



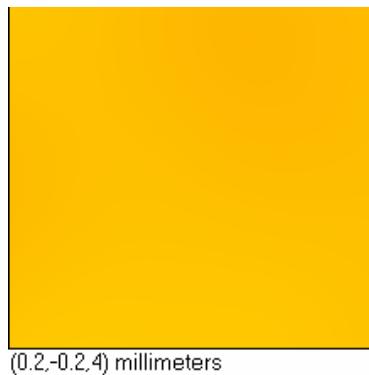
荧光粉激发产生的波长，它们将作为发光光源。



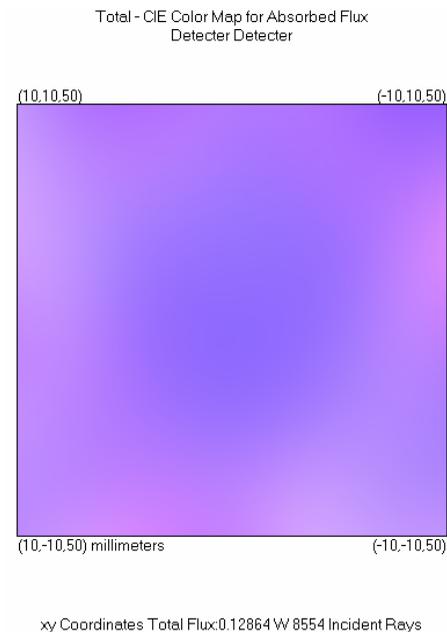
# 色彩合成



+



=



蓝光芯片发光

+

荧光粉激发发光

=

白光合成

# 总结

## ■ 荧光激发的设定要素

- 设定荧光材料的特性

Define>>Edit property data>>Fluorescence Properties

- 设定荧光实体的激发参数

Define>>Apply properties>>Fluorescence

- 描光设置中设置荧光激发

Analysis>>Raytrace Options >>Options>>Fluorescence

- 设定激发波长

Analysis>>Raytrace Options>>Type>>wavelengths

- 设定激发波段

Analysis>>Raytrace Options>>Type>>Fluorescence  
emission wavebands

# 总结

- 荧光激发影响因素
  - LED模型的准确性
  - 荧光粉本身特性（吸收系数、消光系数等）
  - 涂层厚度、掺杂浓度（摩尔浓度）
  - 封装工艺，封装材料

