



中国辐射防护研究院
CHINA INSTITUTE FOR RADIATION PROTECTION

SWNS 2.0

**Simulation Workplace Neutron Spectrum Monte Carlo
Computation Tool**

用户手册



目录

1. 软件介绍.....	1
2. 软件运行环境.....	1
3. 软件安装说明.....	1
4. 软件使用说明.....	4
4.1 计算方法.....	4
4.2 软件操作.....	5
5. 总结.....	37



1. 软件介绍

本软件主要特色在于无需编程基础，即可轻松完成辐射粒子输运计算与可视化，目的在于根据输入的中子源能谱和预设的屏蔽配置方案获取模拟工作现场中子谱模拟数据并进行可视化显示等问题，旨在为利用机器学习技术结合蒙特卡罗模拟粒子输运方法，来解决模拟工作场所中子谱慢化配置方案的快速构建问题提供技术支持手段。先利用蒙特卡罗方法建立机器学习样本数据库；再基于机器学习得到的网络模型，从而预测任意给定实验室中子源和现场中子谱获取模拟现场中子谱所需的慢化配置方案。本软件可利用实验室中子谱和慢化配置方案获得慢化后的中子能谱，制作用于机器学习的样本数据。软件的主体功能主要包括三维建模与可视化、材料组分设置、射线源特性参数设置、探测器与读出信息设置等功能，核心计算算法采用的蒙特卡罗方法，软件在编程过程中，可使用自定义的射线源能谱、材料等基础数据库，自动识别计算机核数进行多线程计算能力，具有较高的计算效率，能够解决屏蔽精细化和轻量化设计中剂量与光谱表征计算等问题。

2. 软件运行环境

SWNS 2.0 模拟工作现场中子谱计算软件已经在 Ubuntu20、CentOS7 和 CentOS8 等 Linux 系统平台测试过，均可以正常运行。本软件还提供 Windows 平台也可使用的 SWNS-GUI（SWNS 2.0 软件的一部分）图形设置界面。

建议软件运行需要的计算机配置如下：

- 处理器为 2 核及以上；
- 处理器为英特尔酷睿 i3 及其以上配置，或者 ARM 架构处理器；
- 硬盘大小为 50G 及其以上；

3. 软件安装说明

首先介绍 SWNS 2.0 模拟工作现场中子谱计算软件安装包的组成。

SWNS 2.0 模拟工作现场中子谱计算软件采用 C++编程语言编写基于 Geant4 工具包和 Root 工具包，其安装需要依赖以下一些开源软件的支持，

- 安装 CMake 3.16.3
- 安装 GCC 9.3.0
- 安装 QT 5.15.2
- 安装 Root 6.22.06
- 安装 Geant 4.10.07p02

其中，CMake 是一个开源的跨平台的编译链接工具提供源码、库和相关设置文件等的管理和编译帮助。GCC 是由 GNU 开发的编程语言编译器，提供 C/C++ 语言编译器支持。QT 是一个跨平台的开源图像交互界面开发工具，提供交互界面支持。Root 与 Geant4 均有欧洲核子中心 CERN 联合十几个国家共同开发，日常由欧洲核子中心提供维护。Root 提供数据存储和数据分析支持，Geant4 提供粒子输运相关物理库的支持。

3.1 Root 工具包的配置

Root 数据分析工具包的安装可参考其官网安装说明(<https://root.cern/install/>)进行。本软件包基于 Root 开发，其对 Root 配置要求如下，首先进入到 linux 系统主文件夹，打开隐藏文件，然后进入.bashrc 文件夹，在文件尾添加以下命令；根据安装 Root 的位置替换 PATH-to-Root。

```
source /PATH-to-Root/bin/thisroot.sh
```

3.2 Geant4 工具包的配置

Geant4 蒙特卡罗模拟工具包的安装可参考其官方网站的说明而进行(<https://geant4.web.cern.ch/support/download>)。本软件包基于 Geant4 开发，其对 Geant4 的配置要求如下，进入到 linux 系统主文件夹，打开隐藏文件，进入.bashrc 文件夹，在文件尾添加以下命令；根据安装 Geant4 的位置替代 PATH-to-Geant4。

```
source /PATH-to-Geant4/bin/geant4.sh
```

在 Geant4 官网下载低能核数据库 <ftp://gdo-nuclear.ucllnl.org/>，然后将数据库 LEND_GND1.3_ENDF.BVII.1 添加到 Geant4 的核反应截面数据库中。Geant4 的核反应截面数据库所在目录默认在 PATH-to-Geant4/share/Geant4-10.7.2/data 文件夹下。在 geant4.sh 文件中添加以下命令：

```
export G4LENDATA="PATH-to-Geant4/share/Geant4-10.7.2/data/LEND_GND1.3_ENDF.BVII.1"
```

3.3 SWNS 本软件的安装

进入 SWNS 文件夹，打开终端运行 `install.sh` 进行安装，显示 Build target SWNS 和 SWNS-GUI 即表示安装成功，如图 3.1 所示。

```
[ 93%] Linking CXX executable SWNS
[ 93%] Built target SWNS
[100%] Linking CXX executable ../../release/SWNS-GUI
[100%] Built target SWNS-GUI
=====start make install=====
[  6%] Automatic MOC and UIC for target SWNS-GUI
[ 46%] Built target SWNS
[ 46%] Built target SWNS-GUI_autogen
[100%] Built target SWNS-GUI
Install the project...
```

图 3.1 显示安装成功的图

SWNS 与 SWNS-GUI 可执行文件与模拟相关的设置文件将被安装在 `bin` 文件夹下，在相同配置的电脑中，可将 `bin` 文件夹拷贝到任意位置使用，无需再次安装，当多项目使用时为避免混淆，还可对 `bin` 文件夹进行复制与重命名。

本软件还提供了一个 Windows 版本的 SWNS-GUI 安装软件包，该软件包名为 `SWNS-GUI.exe` 文件，双击软件并点击下一步至安装结束为止。注意，Windows 版的 SWNS-GUI 软件不提供运行模型功能，只能设置模型，不需要安装 Geant4 和 Root，其设置好的文件拷贝到已安装 SWNS 软件的 linux 平台上运行即可。

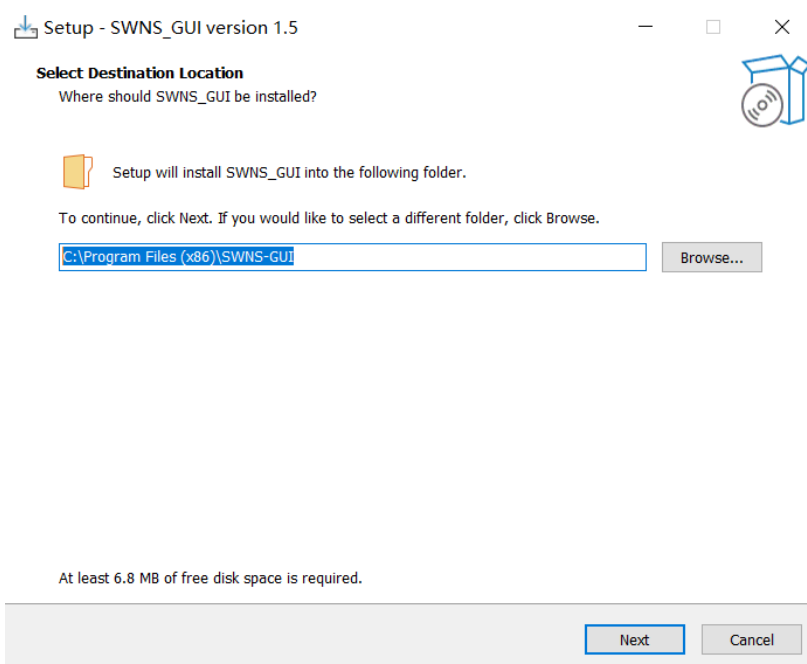


图 3.2 Windows 平台 SWNS-GUI 安装界面

4. 软件使用说明

4.1 计算方法

目前粒子输运过程的模拟主要采用蒙特卡罗方法，蒙特卡罗方法也称为计算机随机模拟基于概率理论，故而，通常需要大量的随机数据，才能够获得逼近真实的结果。SWNS 软件计算平台采用的主要架构如图 4.1 所示，屏蔽几何结构及材料组成是模拟计算的底层要素，根据粒子枪发射的射线，结合粒子与物质相互作用的物理过程（主要涉及核反应、电磁相互作用和光学相关物理过程）完成辐射粒子输运过程模拟及其可视化显示和信息数据存储，SWNS-GUI 为建模与数据读出提供了图像设置界面，根据本说明书相关介绍，无计算机编程经验者可利用 SWNS-GUI 完成辐射粒子输运建模计算与相关数据存储等任务。



图 4.1 SWNS 软件平台的主要架构

本软件可通过文本进行建模、射线源设置和数据读取与存储设置。其中粒子枪的能谱、角分布和位置分布等蒙特卡罗抽样方法。其中能谱抽样方法，主要有以下几种分布类型单能、线性函数、指数函数、幂函数、高斯函数和任意点分布。线性分布通过斜率和截距的形式表示，指数分布通过设置 E_0 表示，幂函数通过设置 α 值表示，高斯函数设置 σ 值表示，形式如下式 1-3 所示。任意点分布采用插值的方式，插值方式有线性、Log、幂函数和三次样条四种方式。

$$y = E_0 e^x \quad (1)$$

$$y = x^\alpha \quad (2)$$

$$y = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{(-\frac{(x-\mu)^2}{\sigma^2})} \quad (3)$$

4.2 软件操作

本部分首先对软件的项目文件进行说明,然后介绍程序的运行与相关实验设置,然后针对某一案例,详细说明使用 SWNS 软件进行建模计算的过程。

4.2.1 项目文件说明

按照第 3 部分完成软件安装后,将在 bin 文件夹下看到如下几个文件。

- SWNS 项目可执行文件
- SWNS-GUI 项目可执行文件建模设置图像界面,用户输入需要修改的相关设置
 - 材料设置
 - 几何结构设置
 - 物理过程
 - 射线源设置
 - 探测器与数据读出设置
- SWNSgeom.txt 用于存储材料与几何设置相关文本文件。
- physiclists.txt 用于存储通用物理过程相关设置文本文件。
- particles.mac 用于储存粒子源设置文本文件。
- scoring_prob.mac 用于储存探测器与数据读出相关文本文件。
- run.mac 用于设置运行显示相关文本文件。
- Y90Spectrum.txt 用于存储能谱数据文本文件,可自定义文件名。
- Mytest.root 用于存储读出数据,可自定义存储文件名。

4.2.2 模拟程序的运行

在项目文件夹中,打开终端运行 ./SWNS-GUI即可打开Qt交互界面进行建模设置。图形交互界面如图4.2所示,主要分为设置生成文件显示框、定义材料与结构、射线源、物理过程和探测器与读出相关设置框和运行与帮助框。

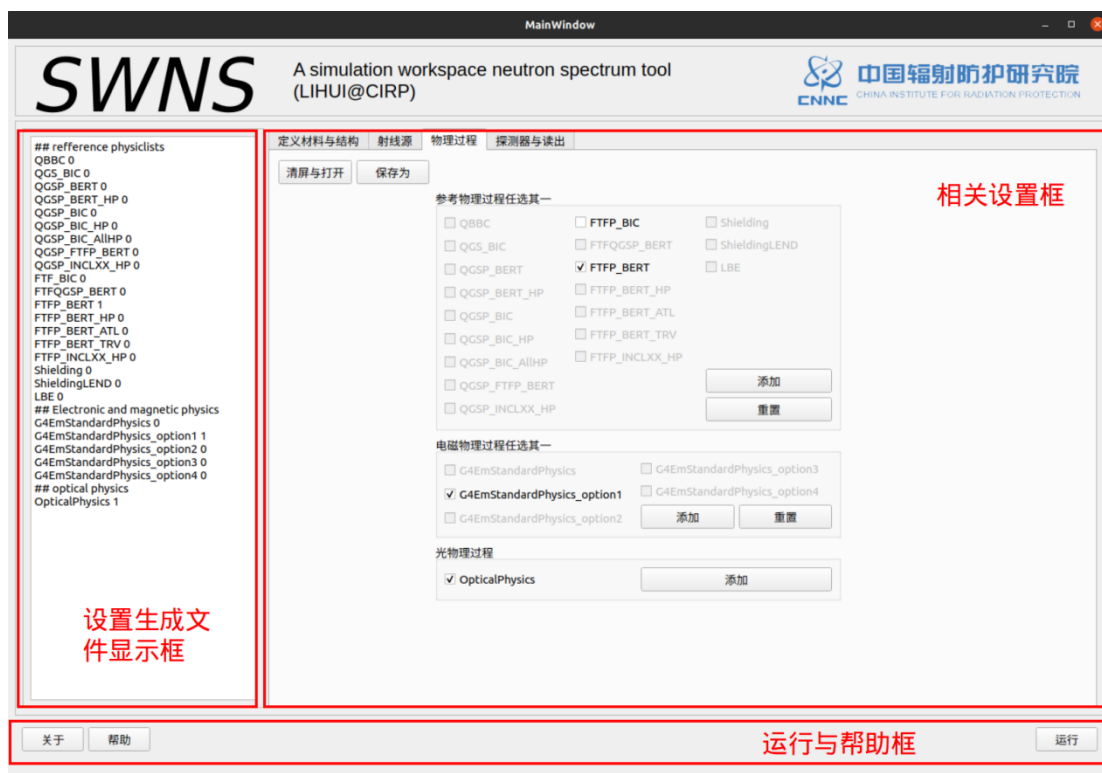


图 4.2 图形交互界面

根据相关设置框生成的设置文件内容将在显示框中进行展示，此外可在显示框中直接删除错误设置以达到撤回的目的。当在使用软件过程中遇到困难时，可通过帮助查看使用说明文件。当结构材料、射线源、物理过程和探测器与读出相关设置均正确的情形下，点击运行即可完成粒子输运的模拟。模拟完成后，其结果将显示在如图4.3所示的交互界面中。由于显示设有限制，仅象征性的显示50000个以内的碰撞点。模拟数据存储为root类型文件，文件名可自定义设置。本软件默认案例中，模拟数据存储为Mytest.root文件。能谱数据存储放在Y90Spectrum.txt中，第一列数据为能谱数据点横坐标，单位为MeV，第二列数据为能谱数据点纵坐标，其中横坐标数据点按升序排列。

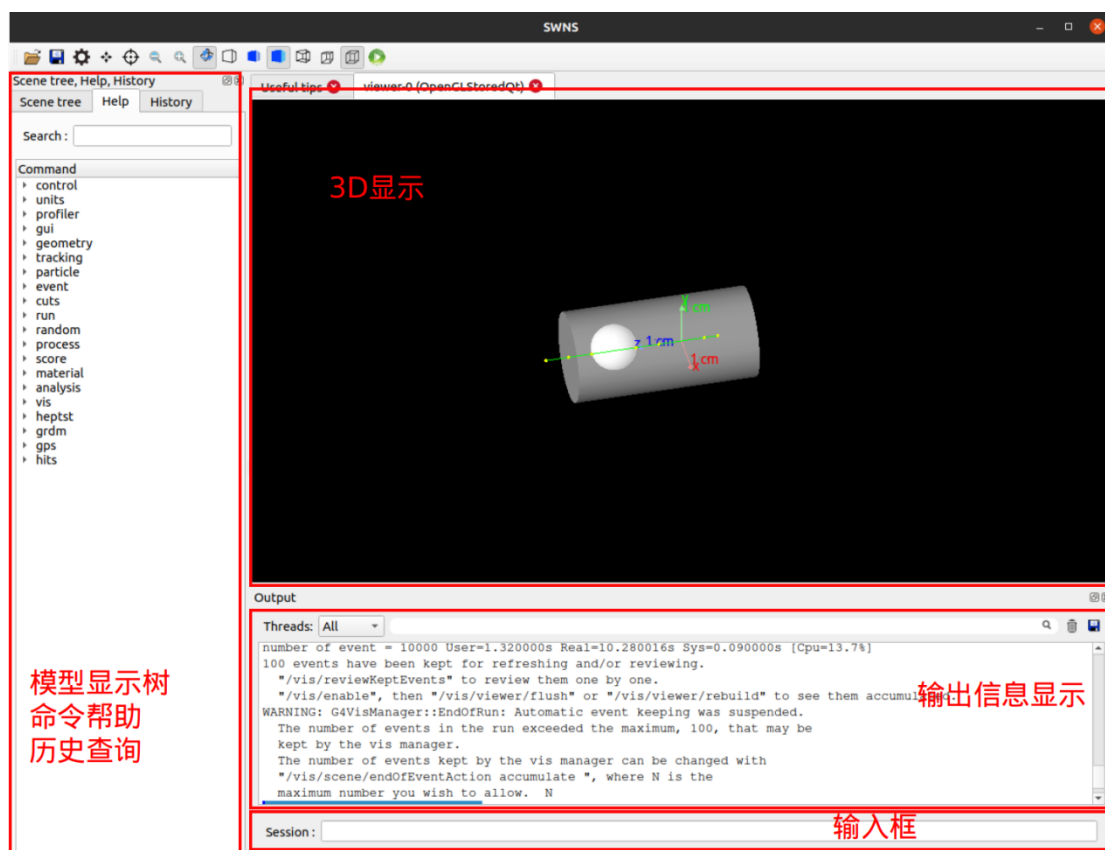


图 4.3 运行显示界面

4.2.3 物理过程设置

物理过程的设置分为三部分，由 Geant4 官网提供的 19 个参考物理过程、5 个可选的电磁物理模型和 1 个光物理模型，如图 4.4 所示。其中 19 个参考物理过程注册有常用的标准电磁辐射、同步辐射物理、衰变、强子散射、强子物理、级联过程模拟截断物理、离子物理和中子径迹截断等物理模型。三部分物理过程中，参考物理过程任选其一，电磁物理过程也是如此，若选择多个，将默认选中第一个读取到的物理过程，并将其他设置成不可选取，点击重置后，所需选项重置为初始可选择状态，若要更新设置，需要在显示框删除设置生成的文本。参考物理过程对应## reference physiclists 以下到下一个##的内容，电磁物理过程删除对应## Electronic and magnetic physics 以下到下一个##的内容，光物理过程类型删除上一次生成的内容。其中，需要注意各个参考物理过程的使用范围，具体差异如下所列：

- QGS 夸克胶子串模型 >~20GeV

- FTF Fritiof 模型 $>\sim 10\text{GeV}$
- BIC 二次级联模型 $<\sim 10\text{GeV}$
- BERT Bertini 级联模型 $<\sim 10\text{GeV}$
- HP 高精度模型 $<20\text{MeV}$
- LBE 物理模型包括可见光输运、放射性衰败、电磁过程中的线发射和低能电磁过程等，应用较为广泛。

各电磁物理过程的使用范围，具体差异如下所列：

- G4EmStandardPhysics 参考物理过程常使用的默认电磁过程
- G4EmStandardPhysics_option1 高能物理实验常用，速度快但不精确
- G4EmStandardPhysics_option2 实验物理常用
- G4EmStandardPhysics_option3 医学和空间应用常用

光物理过程常用于闪烁体材料发光模拟。

完成上述设置内容后，通过保存为将物理过程生成的设置内容存储到 physiclists.txt 文件中，即完成了物理过程设置。

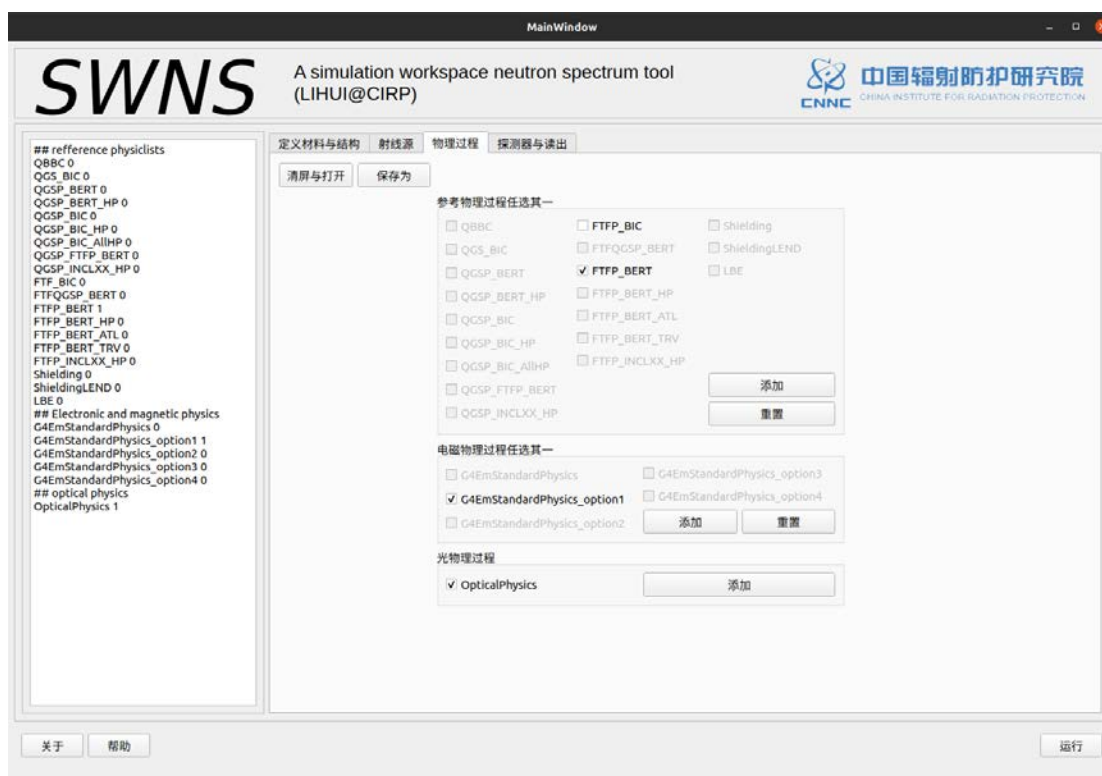


图 4.4 物理过程设置界面

4.2.4 射线源设置

射线源的设置主要包括四个部分，粒子枪发射的粒子种类、位置分布、角分布和能量分布四个要素。可在 SWNS-GUI 中完成这四个要素的设置，点击清屏与打开已有的 particles.mac 文件，对其进行修改；若没有该文件点击取消，接着添加射线源项设置完成后保存为 particles.mac 文件。

1. 粒子种类

粒子与位置部分设置射线源的简单属性，包括粒子种类（含离子）、单能粒子动能、源的发射点位置和源的发射方向四个部分，如图4.5所示。常用粒子选项下拉框有geantino、gamma、neutron、proton、e-、ion、opticalphoton、alpha、deuteron和triton等十种粒子。若发射离子需要设置原子序数、原子质量（g/mol）、带电量量和激发能，点击添加完成设置。注意目前本软件的粒子源仅支持发射单一的粒子，常用粒子框仅选择一个添加即可。若为单能粒子需添加单能粒子动能，单位下拉框包括eV、keV、MeV和GeV几个选项。放置位置为粒子源的发射位置坐标，发射方向为粒子发射方向向量。参数的调节显示可在运行界面进行测试。



图 4.5 粒子与位置设置框

2. 位置分布

在上一部分已介绍过射线源点发射位置的设置方式，然而，对于射线源发射位置分布较复杂时需要在位置分布部分进行设置，首先需要选择分布类型，下拉框可选项包括点源、射线束、平板、面源和体源五种类型。射线束可能还涉及X方向、Y方向或r方向的位置和角度偏差，如图4.6所示。面源和体源的设置，包括源的形状类型、中心放置位置、旋转矩阵和几何设置参数等。源的形状下拉框选项包括圆、圆环、椭圆、正方形、矩形、圆柱、椭圆柱和平行六面体。旋转矩阵1和2的作用可用图4.7进行说明，通过旋转矩阵1和2可将图中黑色圆柱旋转到红色圆柱位置，其中，旋转矩阵1定义X'方向，默认值（1，0，0），旋转矩阵2在xy平面上，默认值（0，1，0）；几何设置参数部分需要注意，涉及长宽高的添加XYZ长度、涉及圆的或球的需要添加内外半径参数，而涉及平行六面体的需要添加alpha、theta和phi角度，分别对应平行六面体的平行面与Y轴的夹角、Z轴的极角与方位角，如图4.8所示给出了平行六面体alpha、theta和phi角的定义。



图 4.6 射线束角度分布设置

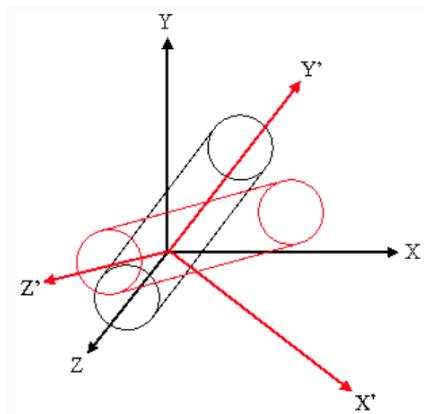


图 4.7 旋转矩阵的作用

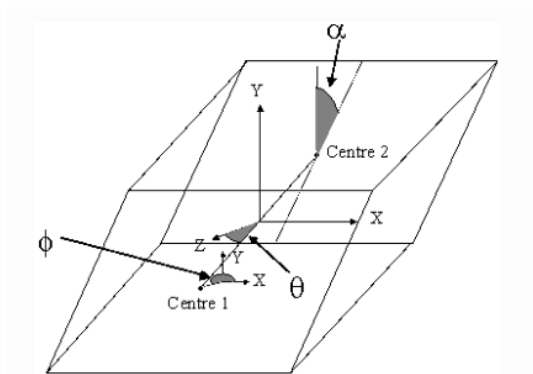


图 4.8 平行六面体角度定义

3. 角分布

角分布是指粒子源发射方向的分布，相关设置包括 θ 角度（极角）范围、 ϕ 角度（方位角）范围、射线束聚焦中心位置和旋转矩阵，如图4.9所示。角分布类型下拉框选项包括各向同性iso、余弦分布cos、平面分布planar、一维射线束beam1d、二维射线束beam2d和聚焦束focused共6种类型。X标准偏差和Y标准偏差是beam2d才需要设置的量，r标准偏差是beam1d才需要设置的量。射线束需要给出束流聚集中心位置。 $\min\theta$ 和 $\max\theta$ 确定 θ 角的范围， $\min\phi$ 和 $\max\phi$ 确定 ϕ 角的范围。旋转矩阵1和旋转矩阵2定义角分布在空间中的旋转。

各向同性是指射线源发射的射线在 4π 空间均匀分布。射线源按余弦分布发射是指发射粒子强度在空间角上按极角的余弦进行分布，如图4.10所示。beam1d是指射线束是圆形束斑，beam2d是指射线束是矩形束斑，focused是聚焦的锥形束，可通过设置 θ 和 ϕ 角将射线源发射方向控制在锥角范围内。



图 4.9 角分布设置界面

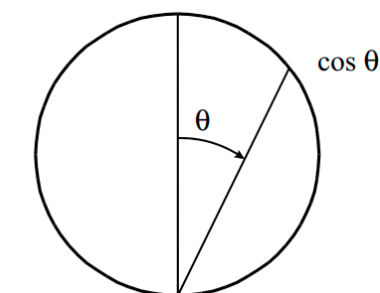


图 4.10 余弦分布

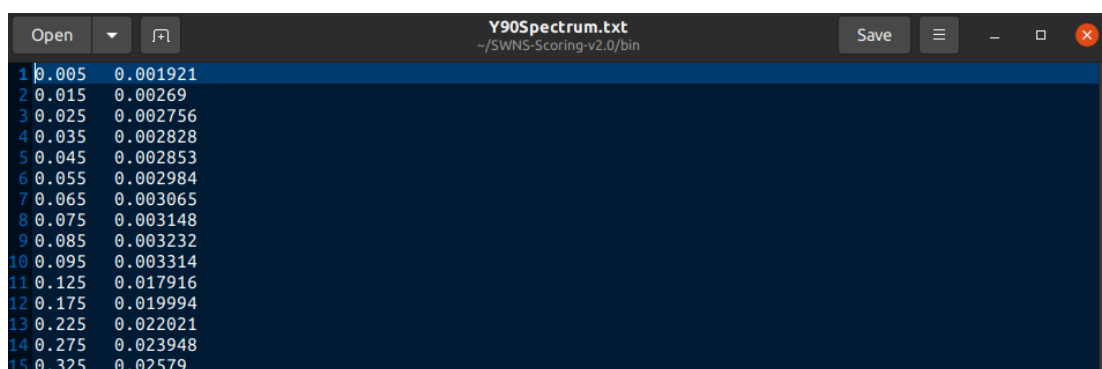
4. 能谱分布

能谱分布是指射线源发射粒子的能量分布，主要设置参数包括能量分布类型以及各个对应类型的分布参数设置，如图4.11所示。分布类型下拉框包含六个类型，单能、线性分布、指数分布、幂函数分布、高斯分布和任意点插值。线性分布采用斜率和截距式表示，指数分布设置 α 值，幂函数设置 E_0 值，高斯分布设置方差 σ 值，具体见计算方法部分。当使用任意点分布Arb时，需要采用插值方法，有线性、对数、指数和三次样条四种可选方法。插值能谱数据点可通

过一点一点添加能量和权重，也可以将数据点存储到文件然后直接从文件添加，即添加文件名即可。默认文件第一列为能量，单位为MeV，第二列对应为能谱纵坐标即权重，如图4.12所示为Y90的 β 射线能谱（部分）。注意文件名请勿用中文。点击重置按钮，重置所有数据点。



图 4.11 能谱分布设置界面


图 4.12 Y90 的 β 射线能谱（部分）

4.2.5 实验设置

实验设置部分主要包括定义材料和几何建模两个部分，本软件均已实现了无编程建模，设置界面如图 4.13 所示。其中，材料部分包括定义元素、单质、化合

物和混合物等；几何建模部分包括旋转矩阵、几何尺寸、逻辑体、几何布置和其他设置五个部分。可在 SWNS-GUI 中完成材料与结构设置，点击清屏与打开已有的 SWNSgeom.txt 文件，对其进行修改；若没有该文件点击取消，接着添加材料与结构项设置完成后另存为 SWNSgeom.txt 文件。

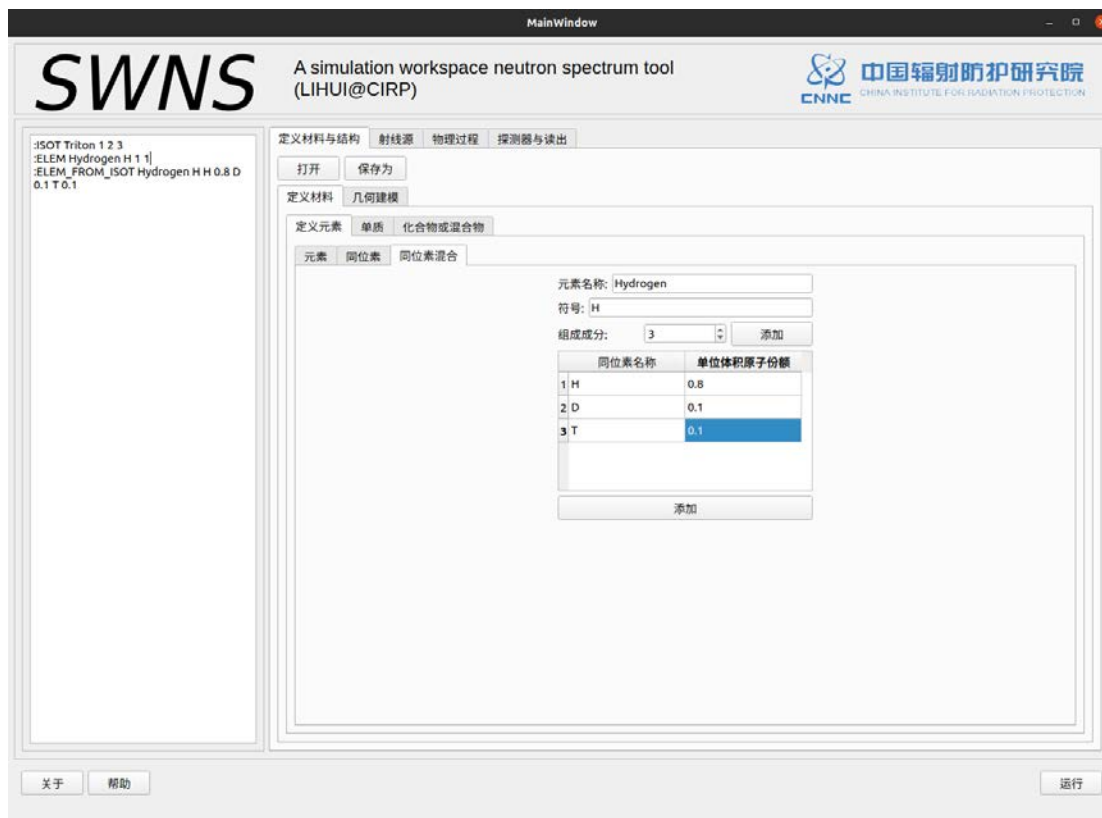


图 4.13 材料与几何设置界面

1. 定义材料

实验材料通常是单质、化合物和混合物，定义实验材料前需要指定其化学组成，故而需要定义元素或同位素等。本软件除支持自定义的单质、化合物和混合物外，还支持 Geant4 材料数据库中的材料。Geant4 材料库中的材料可在几何建模中直接使用，无需自定义，以 Geant4 单质材料为例，使用表 4.1 中的名称即可，其他材料如化合物等可查看网站 <https://geant4-userdoc.web.cern.ch/UsersGuides/ForApplicationDeveloper/html/Appendix/materialNames.html#nist-compounds>。下面介绍自定义材料的方法。注意材料和几何名称请勿用中文。

表 4.1 Geant4 单质材料数据库

原子序数	名称	单质	激发能 I(eV)
		密度(g/cm ³)	
1	G4_H	8.3748e-05	19.2
2	G4_He	0.000166322	41.8
3	G4_Li	0.534	40
4	G4_Be	1.848	63.7
5	G4_B	2.37	76
6	G4_C	2	81
7	G4_N	0.0011652	82
8	G4_O	0.00133151	95
9	G4_F	0.00158029	115
10	G4_Ne	0.000838505	137
11	G4_Na	0.971	149
12	G4_Mg	1.74	156
13	G4_Al	2.699	166
14	G4_Si	2.33	173
15	G4_P	2.2	173
16	G4_S	2	180
17	G4_Cl	0.00299473	174
18	G4_Ar	0.00166201	188
19	G4_K	0.862	190
20	G4_Ca	1.55	191
21	G4_Sc	2.989	216
22	G4_Ti	4.54	233
23	G4_V	6.11	245
24	G4_Cr	7.18	257
25	G4_Mn	7.44	272
26	G4_Fe	7.874	286
27	G4_Co	8.9	297
28	G4_Ni	8.902	311
29	G4_Cu	8.96	322
30	G4_Zn	7.133	330
31	G4_Ga	5.904	334
32	G4_Ge	5.323	350
33	G4_As	5.73	347



原子序数	名称	单质	
		密度(g/cm ³)	激发能 I(eV)
34	G4_Se	4.5	348
35	G4_Br	0.0070721	343
36	G4_Kr	0.00347832	352
37	G4_Rb	1.532	363
38	G4_Sr	2.54	366
39	G4_Y	4.469	379
40	G4_Zr	6.506	393
41	G4_Nb	8.57	417
42	G4_Mo	10.22	424
43	G4_Tc	11.5	428
44	G4_Ru	12.41	441
45	G4_Rh	12.41	449
46	G4_Pd	12.02	470
47	G4_Ag	10.5	470
48	G4_Cd	8.65	469
49	G4_In	7.31	488
50	G4_Sn	7.31	488
51	G4_Sb	6.691	487
52	G4_Te	6.24	485
53	G4_I	4.93	491
54	G4_Xe	0.00548536	482
55	G4_Cs	1.873	488
56	G4_Ba	3.5	491
57	G4_La	6.154	501
58	G4_Ce	6.657	523
59	G4_Pr	6.71	535
60	G4_Nd	6.9	546
61	G4_Pm	7.22	560
62	G4_Sm	7.46	574
63	G4_Eu	5.243	580
64	G4_Gd	7.9004	591
65	G4_Tb	8.229	614
66	G4_Dy	8.55	628
67	G4_Ho	8.795	650
68	G4_Er	9.066	658



原子序数	名称	单质	激发能 I(eV)
		密度(g/cm ³)	
69	G4_Tm	9.321	674
70	G4_Yb	6.73	684
71	G4_Lu	9.84	694
72	G4_Hf	13.31	705
73	G4-Ta	16.654	718
74	G4_W	19.3	727
75	G4_Re	21.02	736
76	G4_Os	22.57	746
77	G4_Ir	22.42	757
78	G4_Pt	21.45	790
79	G4_Au	19.32	790
80	G4_Hg	13.546	800
81	G4_Tl	11.72	810
82	G4_Pb	11.35	823
83	G4_Bi	9.747	823
84	G4_Po	9.32	830
85	G4_At	9.32	825
86	G4_Rn	0.00900662	794
87	G4_Fr	1	827
88	G4_Ra	5	826
89	G4_Ac	10.07	841
90	G4_Th	11.72	847
91	G4_Pa	15.37	878
92	G4_U	18.95	890
93	G4_Np	20.25	902
94	G4_Pu	19.84	921
95	G4_Am	13.67	934
96	G4_Cm	13.51	939
97	G4_Bk	14	952
98	G4_Cf	10	966

元素的定义分为三类，单一元素、同位素和多个同位素混合组成的元素。单一元素需要设置元素名称、符号、质子数和摩尔质量，点击添加完成设置。当元素由多个同位素混合组成时，设置组分数，点击紧随其后的添加按钮生成对应数量行数的表格，设置同位素名称及各组分单位体积原子份额，如图 4.13 设置生

成框展示的是 H 元素由 3 种同位素混合组成时的定义方式。

单质与元素的定义类似只需给出单质材料的名称、质子数、摩尔质量和密度点击添加即可。

化合物和混合物的定义相对较复杂，由于它们的组成成分较多，故而需要首先定义其组分。化合物则需要先定义其组分元素；混合物需要先定义其组分，即先定义其组分单质或化合物。注意，化合物或混合物的定义需要先定义其组分，否则运行模拟时将出错。

2. 几何建模

几何建模部分涉及到的设置量最多，但总体可归为四个部分——旋转矩阵、几何尺寸、逻辑体、几何布置及其他设置。下面分别针对四个部分进行介绍。几何体的建模可通过运行程序进行查看正确与否并进行设置参数调整验证。注意每次运行查看建模的正确性前，需要先将建模设置保存SWNSgeom.txt文件中。

（1）旋转矩阵

几何建模旋转矩阵的作用是用于设置几何体在坐标系中的放置位置和姿态，这与射线源部分旋转矩阵的作用类似，但其定义不同。几何建模部分的旋转矩阵定义有两种方式，第一种方式，设置几何体绕X、Y和Z轴旋转角度。第二种方式，设置几何体绕X、Y和Z轴的旋转极角与方位角。

（2）几何尺寸

几何尺寸部分用于定义几何尺寸及形状，本软件包括19种几何形状的定义，其各相关设置量的含义如下所述：

● 立方体

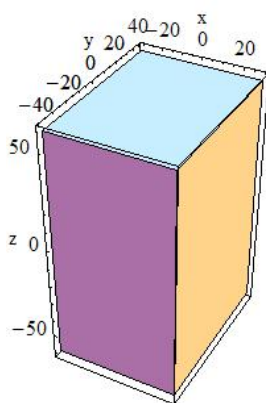


图 4.14 立方体

需要设置的参数:

- 几何体名称
- X 方向半长度, 图中, $X=20$
- Y 方向半长度, 图中, $Y=40$
- Z 方向半长度, 图中, $Z=50$
- 管道

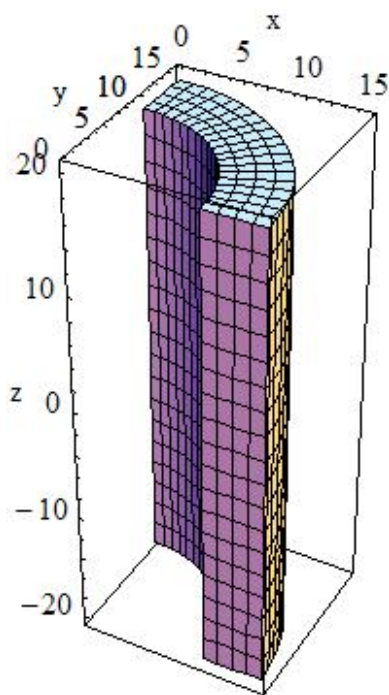


图 4.15 管道

- 几何体名称
- 内半径, 图中, $R_{min}=10$
- 外半径, 图中, $R_{max}=20$
- 半长度, 图中, $Dz=20$
- 起始角度, 图中, 0 度
- 角度增量, 图中, 90 度
- 圆锥

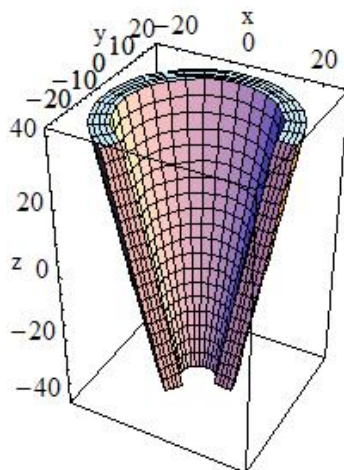


图 4.16 圆锥

- 几何体名称
- 平面 1 内半径，图中， $R_{min1}=5$
- 平面 2 内半径，图中， $R_{min2}=20$
- 平面 1 外半径，图中， $R_{max1}=10$
- 平面 2 外半径，图中， $R_{max1}=25$
- 半长度，图中， $Dz=40$
- 起始角，图中，0 度
- 角度增量，图中，240 度

- 梯形
 - 梯形

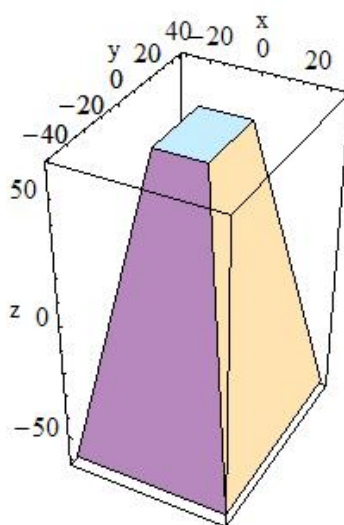


图 4.17 梯形

- 几何体名称
- 平面 1X 半长度，图中， $Dx1=30$
- 平面 1Y 半长度，图中， $Dy1=40$
- 平面 2X 半长度，图中， $Dx2=10$
- 平面 2Y 半长度，图中， $Dy2=15$
- 半高度，图中， $Dz=60$

■ 泛梯形

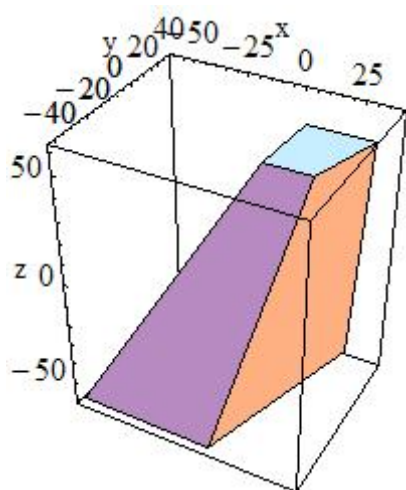


图 4.18 泛梯形

- 几何体名称
- 半高度，图中， $Dz=60$
- 两平面中心连线极角，图中，20 度
- 两平面中心连线方位角，图中，5 度
- 平面 1Y 半长度，图中， $Dy1=40$
- 平面 X1 半长度，图中， $Dx1=30$
- 平面 X2 半长度，图中， $Dx2=40$
- 平面 1 中心与 y 轴的夹角，图中，10 度
- 平面 2Y 半长度，图中， $Dy2=16$
- 平面 X3 半长度，图中， $Dx3=10$
- 平面 X4 半长度，图中， $Dx4=14$
- 平面 1 中心与 y 轴的夹角，图中，10 度

● 平行六面体

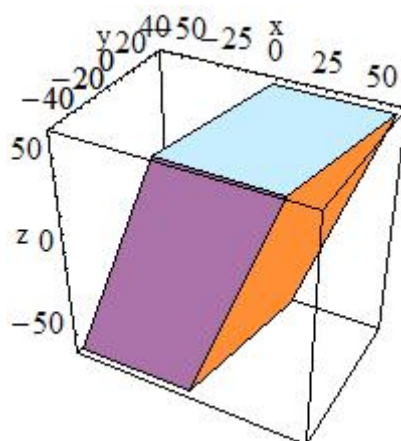


图 4.19 平行六面体

- 几何体名称
- X 方向半长度，图中， $D_x=30$
- Y 方向半长度，图中， $D_y=40$
- Z 方向半长度，图中， $D_z=60$
- alpha 夹角，定义见图 4.8
- theta 夹角，定义见图 4.8
- phi 夹角，定义见图 4.8

● 球壳体

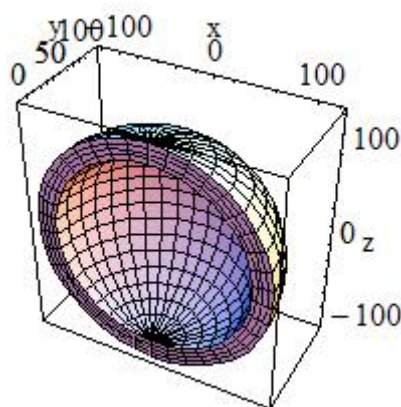


图 4.20 球壳

- 几何体名称
- 内半径，图中， $R_{min}=100$

- 外半径, 图中, $R_{\max}=120$
- ϕ 起始角度, 图中, 0 度
- ϕ 角度增量, 图中, 180 度
- θ 起始角度, 图中, 0 度
- θ 角度增量, 图中, 180 度

● 圆环

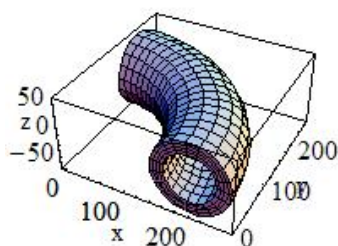


图 4.21 圆环

- 几何体名称
- 内半径, 图中, $R_{\min}=40$
- 外半径, 图中, $R_{\max}=60$
- 环半径, 图中, $R_{\text{tor}}=200$
- 起始角度, 图中, 0 度
- 角度增量, 图中, 90 度

● 多锥体

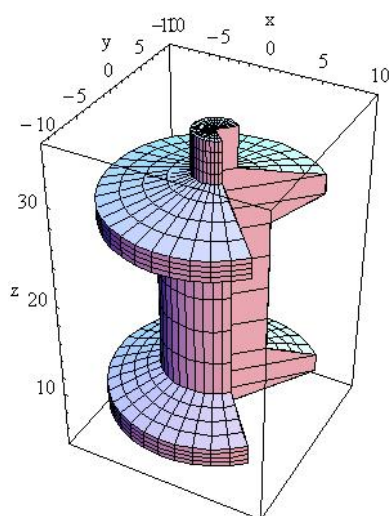


图 4.21 多锥体

- 几何体名称
- 起始角度，图中，45 度
- 角度增量，图中，270 度
- RZ 截面点数，图中，9 个点
- Z 坐标值，图中，[5, 7, 9, 11, 25, 27, 29, 31, 35]
- 内半径，图中，[0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0]
- 外半径，图中，[0, 10, 10, 5, 5, 10, 10, 2, 2]
- 多棱锥体

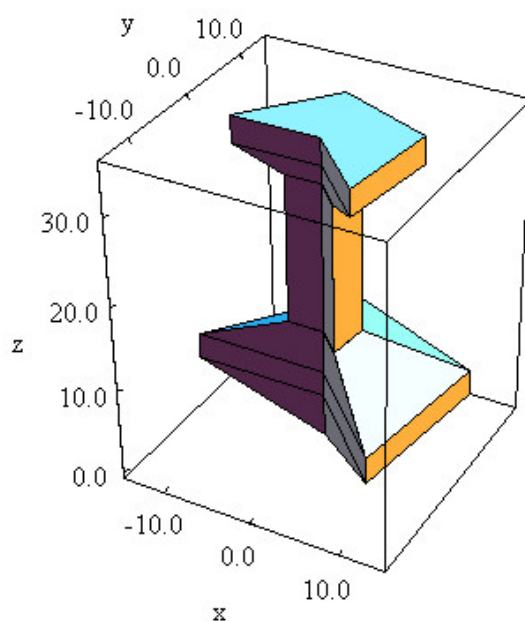


图 4.21 多棱锥体

- 几何体名称
- 起始角度，图中，-45 度
- 角度增量，图中，225 度
- 边数，图中，3 个边
- RZ 截面点数，图中，7 个点
- Z 坐标值，图中，[0, 5, 8, 13, 30, 32, 35]
- 内半径，图中，[0, 0, 0, 0, 0, 0, 0]
- 外半径，图中，[0, 15, 15, 4, 4, 10, 10]

● 椭圆管

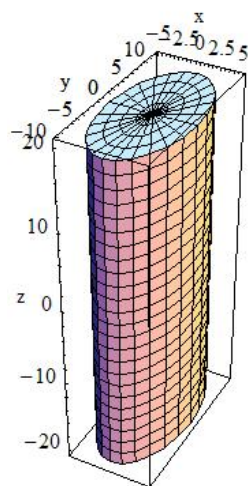


图 4.22 椭圆管

- 几何体名称
- X 半长度，图中， $D_x=5$
- Y 半长度，图中， $D_y=10$
- Z 半长度，图中， $D_z=20$

● 椭球体

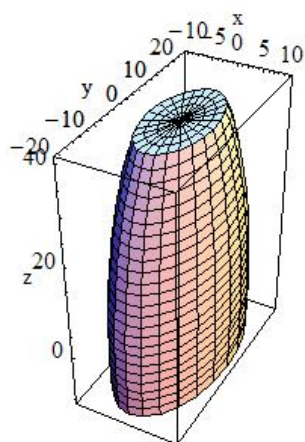


图 4.23 椭球体

- 几何体名称
- X 半轴长度，图中， $Semix=10$
- Y 半轴长度，图中， $Semiy=20$

- Z 半轴长度，图中， $Semiz=50$
- Z 轴底部截断面，图中， $ZbottomCut=-10$
- Z 轴顶部截断面，图中， $ZtopCut=40$
- 椭圆形锥体

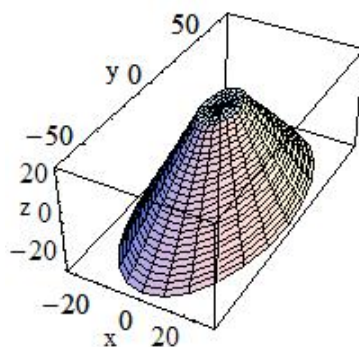


图 4.23 椭圆形锥体

- 几何体名称
- X 半轴长度，图中， $Semix=30/75$
- Y 半轴长度，图中， $Semiy=60/75$
- Z 轴高度，图中， $Zmax=50$
- Z 轴截断面，图中， $ZtopCut=25$
- 双曲面

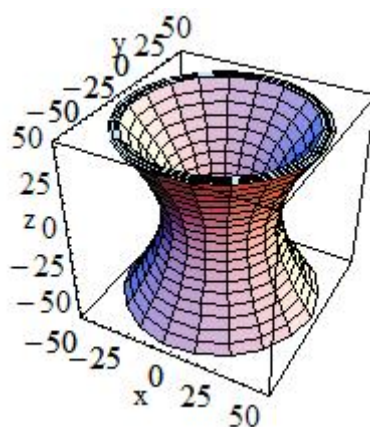


图 4.24 双曲面

- 几何体名称
- 内半径，图中， $Rin=20$
- 外半径，图中， $Rout=30$

- 内立体角，图中，inSR=0.7 弧度
- 外立体角，图中，OutSR=0.7 弧度
- Z 轴半长度，图中，Dz=50
- 四面体

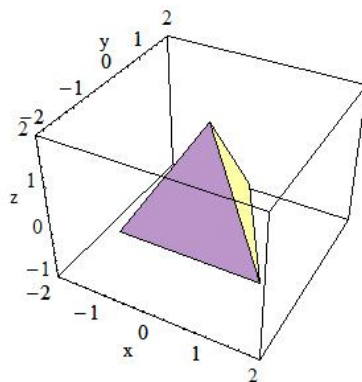


图 4.25 四面体

- 几何体名称
- 锚点坐标，图中， $(0, 0, \sqrt{3})$
- 点 1 坐标，图中， $(0, 2\sqrt{\frac{2}{3}}, -\frac{1}{\sqrt{3}})$
- 点 2 坐标，图中， $(-\sqrt{2}, \sqrt{\frac{2}{3}}, -\frac{1}{\sqrt{3}})$
- 点 3 坐标，图中， $(\sqrt{2}, \sqrt{\frac{2}{3}}, -\frac{1}{\sqrt{3}})$
- 腐蚀顶点，图中，否
- 扭曲立方体

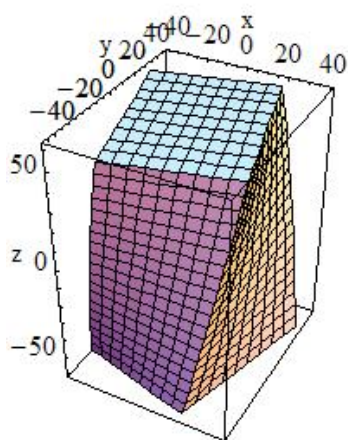


图 4.25 扭曲立方体

- 几何体名称
- 扭曲角度，图中，30 度
- X 半长度，图中， $D_x=30$
- Y 半长度，图中， $D_y=40$
- Z 半长度，图中， $D_z=60$
- 扭曲管

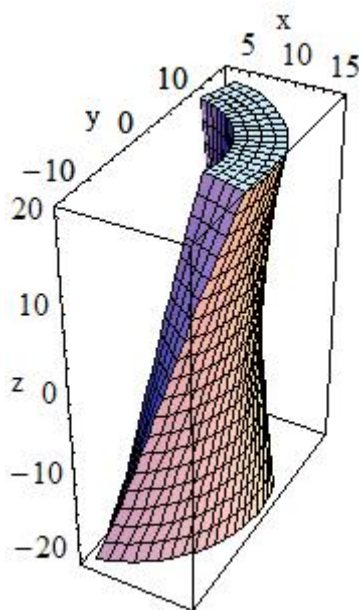


图 4.26 扭曲管

- 几何体名称
- 扭曲角度，图中，60 度
- 内半径，图中， $R_{in}=10$
- 外半径，图中， $R_{max}=15$
- Z 轴半长度，图中， $D_z=20$
- Phi 角度增量，图中， $D_{phi}=90$ 度
- 布尔运算

布尔运算的作用是对两个几何体进行交、并和剪除操作构造一个新的几何体。需要给出布尔操作类型（并、交和减）、进行布尔运行的两个几何体的名称，对几何体进行的旋转变换矩阵，以及进行运算时两几何体的放置位置坐标。

(3) 逻辑体

逻辑体的作用是给几何实体设置其材料属性。其设置相对较简单，需要设置的量包括逻辑体名称、上部分定义的几何实体名称和所用材料名称。注意，所用材料必须是前面以及定义过的材料或者直接调用Geant4材料数据库中的材料。

(4) 几何布置

几何布置方式分为简单放置、复制和组装体三种。本软件中几何体放置采用嵌套式原理，首先要设置实验大厅，然后将实验几何体及材料放置到实验大厅中，层层嵌套。对于实验器材来说，实验大厅就是放置母体，实验大厅的中心为坐标原点，所有实验器材不能超出实验大厅，否则计算出错。

简单放置，需要设置该放置几何体名称、放置编号、放置母体名称、旋转矩阵名称和放置位置坐标。

复制放置方式设置量包括：复制体名称、放置母体名称、分布轴、复制体个数与放置间距。

组装体放置方式需要首先添加组装体名称、组件个数、分布轴、分布个数和分布距离，然后添加组件名称、旋转矩阵名称和放置位置坐标，最后，放置组建，放置组件设置方式与简单放置设置量类似。

(5) 其他设置

其他设置包括显示属性与几何体重叠检测。主要功能是在运行时指定几何体显示与否、以及显示的颜色（归一化的RGB值）。重叠检测用于检测几何体是否重叠，重叠几何将影响计算结果的准确性。

4.2.6 探测器与数据读出

探测器与数据读出设置界面如图4.28所示，首先需要对探测器进行设置，然后设置数据读出量保存到文件或者直方图。设置流程如下，点击清屏与打开已有的scoring_prob.mac文件，对其进行修改；若没有该文件点击取消，接着添加探测器与数据读出设置，完成后另存为scoring_prob.mac文件。下面部分将详细介绍探测器与数据读出设置。



图 4.28 探测器与数据读出设置界面

1. 探测器设置

本软件提供三种常用于剂量和能谱读出的简单探测器设置方式：真实探测器、虚拟探测器和网格化空间。真实探测器的意味着使用几何建模中已有的几何体作为数据记录空间，需要设置所要使用的几何体名称和复制编号。虚拟探测器是指采用假想的探测器作为数据记录空间，需要设置探测器名称、正方体尺寸、探测器材料、放置位置（虚拟探测器几何形状仅支持正方体）。网格化空间是指将某一尺寸的空间网格化记录模拟数据，需要设置网格空间的名称、尺寸、网格划分方式，以及网格空间的放置位置及旋转角度(网格化空间目前仅支持立方体和圆柱体)。

2. 数据读出量设置

本软件提供17个数据量读出并提供能量上下限、粒子名称和两者结合的过滤项设置，此外，用户可将数据全部存储到文件或选择将指定量存储到文件，用户还可以建立直方图，将数据绘制成直方图。读出量下拉框含17个选项，每个选项的含义以及绘制成直方图横纵坐标的含义如表2所示。

表 2 数据读出力及其含义

读取量名称	含义	单位	横坐标	纵坐标
体积内成绩电荷量	探测器内部电荷沉积	e+	-	-
体积内总径迹长度除体积	径迹长度的和除以探测器体积	cm ⁻²	MeV	体积内通量的权重
体积内透过径迹长度除体积	穿透探测器的径迹长度的和除以体积	cm ⁻²	MeV	体积内通量的权重
体积内透过径迹数量	穿透探测器的径迹数	-	MeV	径迹数的权重
剂量沉积	体积内的吸收剂量	Gy	每一步的吸收剂量	径迹的权重
能量沉积	体积内的能量沉积	MeV	每一步的能量沉积	径迹的权重
Box-z表面流量	立方体-z表面的粒子流量	cm ⁻²	MeV	流量的权重
Box-z表面通量	立方体-z表面的粒子通量	cm ⁻²	MeV	通量的权重
核碰撞次数	物理相互作用点数	-	-	-
次级粒子径迹产生数	体积内产生的次级粒子数	-	-	-
步数	体积内作用的步数	-	步长mm	对应步长区间的步数
在体积内消失的径迹数	在体积内由于衰变、相互作用或截断等消失的径迹数	-	-	-
总径迹数	体积内的总径迹数包括穿透和消失的径迹	-	-	-
穿过体积的总径迹长度	穿透体积内的径迹长度总和	mm	-	-
繁衍粒子数	一个事件在体积内产生的次级粒子数	-	-	-
体积内的径迹长度	体积内总径迹长度包括穿透和消失径迹的长度	mm	-	-
体积内的径迹数	径入体积内的总径迹数	-	MeV	径迹权重

为了更好的帮助用户理解各个量的含义，在此介绍一下软件模拟过程时如何提取数据的。粒子枪发射一个粒子即是一个事件（Event），粒子与物质的一次碰撞点与下一次碰撞点是一步(Step)，两点的连线是步长,粒子的产生到消亡是一个径迹（Track），新的粒子产生后将产生新的径迹。径迹是由步构成的，径迹长度等于该径迹上所有步长之和。模拟过程中的碰撞轨迹（Track）与步（Step）之间的关系如图4.29所示，每一个Track代表粒子的轨迹，Step和Track为模拟粒子输运过程信息提取提供了途径。

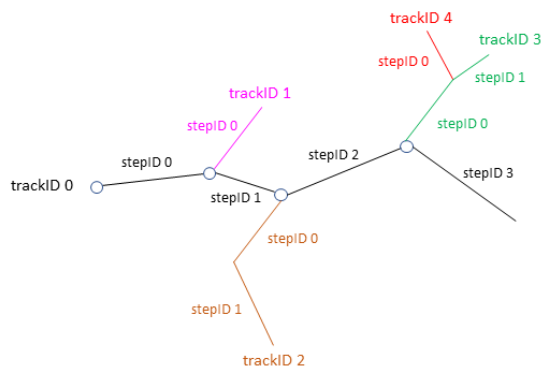


图 4.29 Track 与 Step 之间的关系

数据读出设置完成后点击提交，然后设置运行粒子数和打印显示，最后将设置生成文件保存为scoring_prob.mac文件，点击运行即可进行模拟，模拟结束后将见到如图4.3所示的运行界面，输入框输入exit结束模拟。注意，在定义和填充直方图时，首先要设置粒子出射能谱直方图，软件会自动将第0个编号直方图填充射线源粒子枪能谱，其他读取量直方图编号从1开始。

4.2.7 案例展示

演示案例将要完成以下任务，首先自定义空气，然后设置实验放置空间立方体，体积为 $60 \times 60 \times 60 \text{ mm}^3$ ，实验大厅空间材料为空气，然后在实验大厅中放置一内半径为0mm、外半径为10mm，厚度为5mm的铁片，铁管的中心放置坐标为实验大厅中心即坐标原点处；采用虚拟探测器，立方体边长6mm，放置在实验大厅（0，0，10 mm）处，采用Cf252中子源能谱，射线源放置在（0，0，-10 mm）处，沿Z轴正向发射中子，发射粒子数为 10^6 个，记录发射中子谱和虚拟探测器-Z表面的通量能谱并存储到文件Mytest1.root中，具体实验布置如图4.30所示。

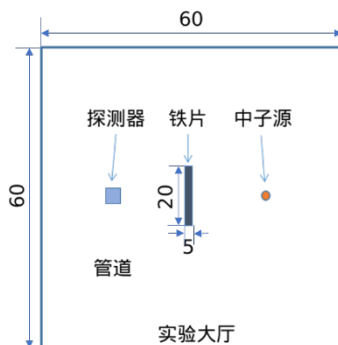


图 4.30 实验布置图



1. 物理过程

由于 LBE 物理模型包括放射性衰变、电磁过程中的线发射和低能电磁过程等，应用较为广泛，故而，建模所使用的物理过程选择 LBE 模型。设置过程如下，在 bin 文件夹下，打开终端运行 ./SWNS-GUI，点击物理过程，选择 LBE 参考物理过程，点击添加，完成后点击保存为 physicalists.txt 文件。

2. 射线源设置

点击射线源窗口，然后点击清屏与打开，若存在 particle.mac 文件，并且想对其进行修改，则点击打开，否则点击取消。下面进行射线源设置，点击常用粒子下拉框选择 neutron，然后点击添加；设置放置位置坐标， $X=0$ ， $Y=0$ ， $Z=-10$ 点击添加；设置发射方向向量， $X=0$ ， $Y=0$ ， $Z=1$ ，点击添加。点击能谱分布窗口，点击分类型下拉框，选择任意 Arb 点击添加，接着设置数据点来自文件，文件名 Cf252Spectrum.txt，点击添加；设置能谱数据点插值方式下拉框，选择线性插值 Lin 点击添加。完成上述步骤后，点击保存为 particle.mac 文件。

3. 材料与几何建模

点击定义材料与结构窗口，点击打开，若存在 SWNSgeom.txt 文件，并且想对其进行修改，则点击打开文件，否则取消。接着进行材料定义，首先定义空气组分 O、N 元素，点击定义元素，1) 元素名称：Oxygen, 符号：O，质子数：8，摩尔质量：16 g/mol，点击添加完成 O 元素设置；2) 元素名称：Nitrogen, 符号：N，质子数：7，摩尔质量：14 g/mol，点击添加完成 N 元素设置；然后，点击化合物或混合物窗口，定义空气；名称：Air, 密度： $1.214E-3 \text{ g/cm}^3$, 组成成分输入 2，点击添加；组分名称和份额表中填写 O、N 元素的名称和质量分数 (Oxygen, 0.25, Nitrogen, 0.75)，混合类型下拉框选择质量分数，点击提交完成空气设置。

点击几何建模窗口，定义旋转矩阵，选择方法 1，选择矩阵名称设置为 R0, 旋转角度 $X=0$ ， $Y=0$ ， $Z=0$ ，点击添加；

定义实验大厅，点击几何尺寸，点击立方体，添加名称 world，设置立方体 X 方向半长度、Y 方向半长度和 Z 方向半长度均等于 30，点击提交；点击管道窗口，添加名称 mytube，设置内半径 0，外半径 10, 半长度 2.5，起始角度 0 度，角度增量 360 度，点击提交。定义几何体材料属性，点击逻辑体窗口，1) 逻辑体名称，world;



几何体名称world;材料Air;点击添加; 2) 逻辑体名称, mytube;几何体名称mytube;材料G4_Fe;点击添加; 定义几何布置属性, 点击简单放置, 1) 几何体名称, mytube; CopyNumber,1;母体几何名称, world; 旋转矩阵名称, R0; 放置位置, x=0,y=0,z=0; 点击添加。完成上述设置后, 点击保存为SWNSgeom.txt文件。

4. 探测器与数据读出

点击探测器与读出窗口, 点击清屏与打开, 若存在scoring_prob.mac文件, 并想对其进行修改则点击打开, 否则点击取消。

点击探测器窗口, 点击虚拟探测器, 添加探测器名称, myProbe, 半尺寸3, 点击添加; 探测器材料, 填写Air, 点击添加; 放置位置设置为x=0, y=0, z=10, 点击添加。

点击数据读出窗口, 读出量选择Box-z表面通量, 名称zFlux, 点击添加; 点击过滤量的粒子名称窗口, 过滤量名称zFlux, 粒子名称neutron, 点击添加; 点击写入到文件, 文件名Mytest1, 点击添加; 点击定义直方图, 第一个直方图默认填充粒子枪发射粒子能谱, 故统计量名称, Primary, 直方图名称Primary, Bins1000, 能量下限0.00001, 能量上限100, 单位填写MeV, 类型, 对数横坐标, 点击添加; 第二个直方图填充虚拟探测器-z表面粒子流量能谱, 故统计量名称提填为zFlux, 直方图名称histFlux, Bins1000, 能量下限0.00001, 能量上限100, 单位填写MeV, 类型对数横坐标, 点击添加; 点击右上角小三角出现直方图写入到文件, 点击该窗口; 第一个直方图默认填充了粒子枪发射能谱, 其直方图编号为0, 故只需设置探测器-z表面粒子流量能谱直方图写入到文件, 直方图编号为1, 探测器名称myProbe, 写入量名称zFlux, 点击添加; 点击提交, 设置打印显示间隔数10000点击添加, 运行粒子数1000000点击添加, 注意单次运行粒子数不能超过 2×10^9 个。

完成上述设置后, 点击保存为scoring_prob.mac文件, 然后点击运行, 将获得如图4.31所示实验运行界面。调试过程要求必须有材料和几何建模和物理过程设置文件, 可将其他设置文件清除成空文件即可。调试运行可直接在终端运行./SWNS获得调试结果输出。

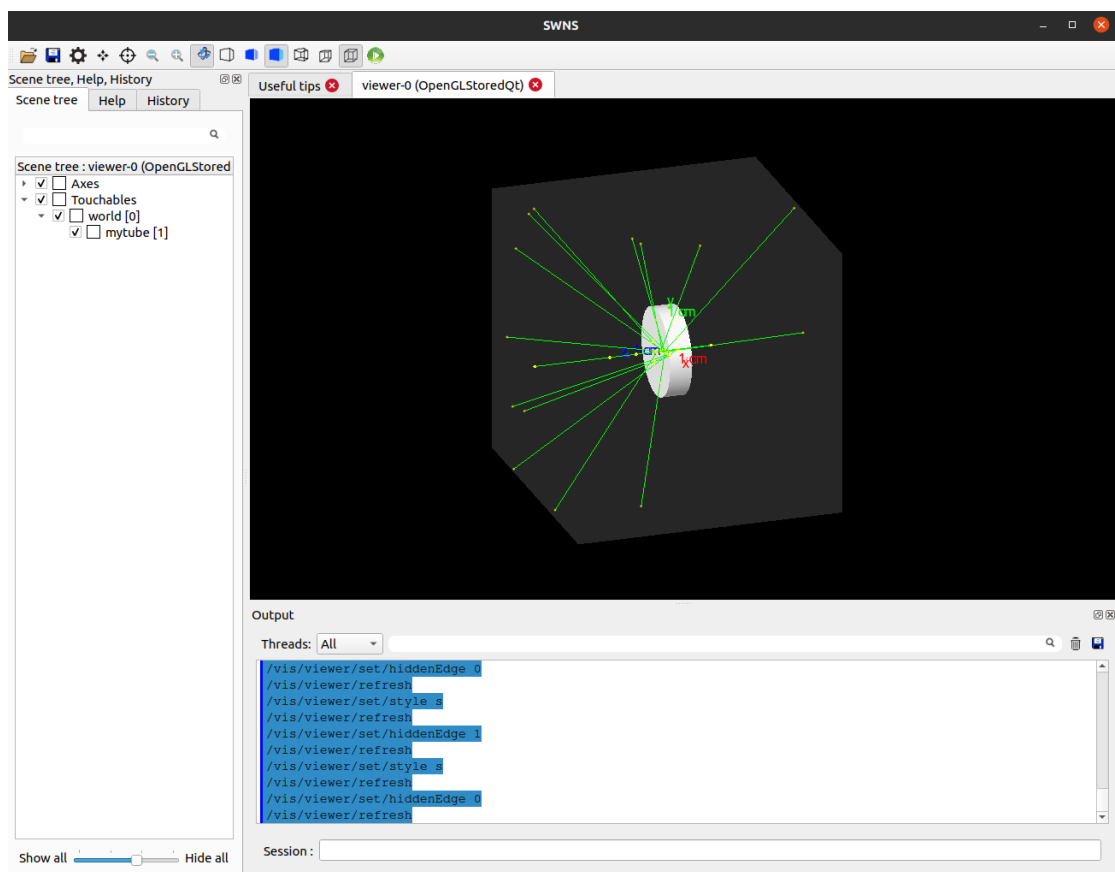
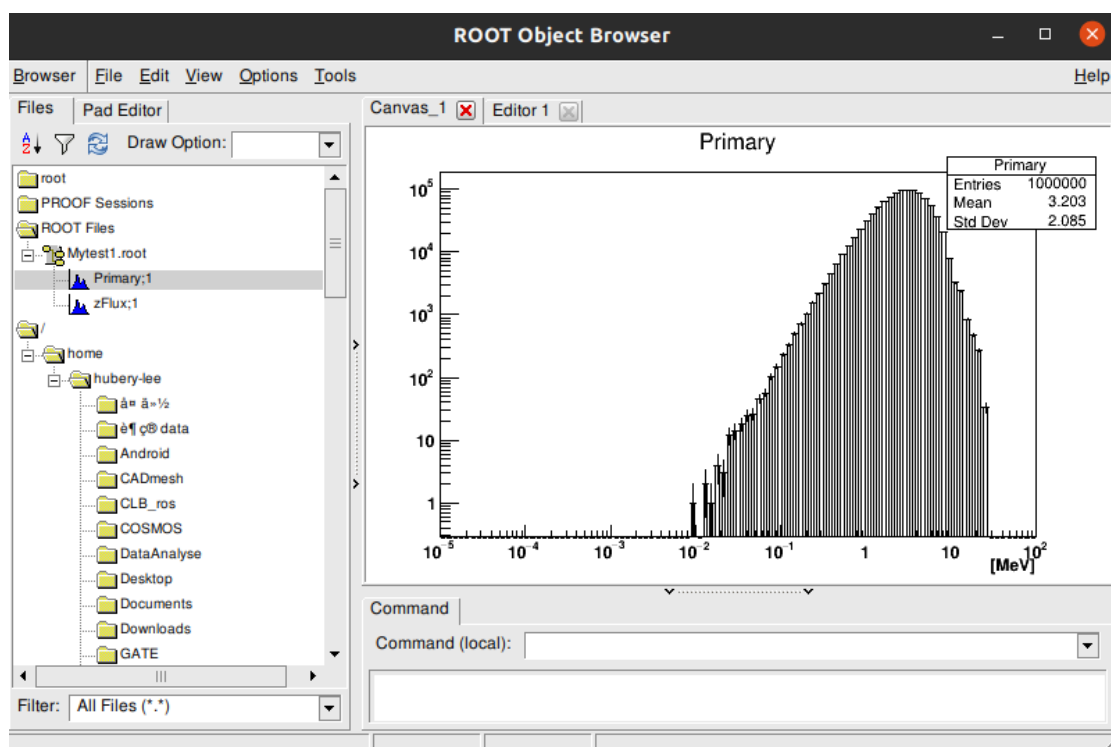
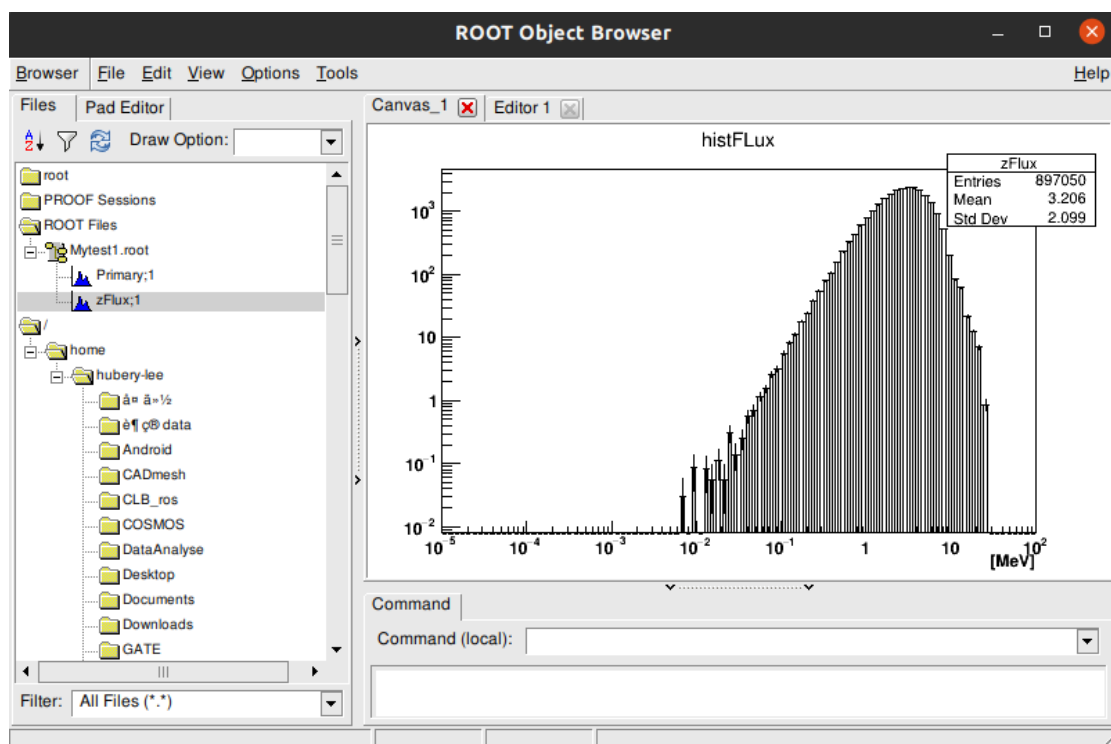


图 4.31 实验运行界面

实验结束后，结果输出文件为Mytest1.root，可在终端采用命令root Mytest1.root，然后输入TBrowse t命令查看文件内容，点击Viewer 然后点击Editor，将直方图横总坐标设置成对数显示，并且将数据点设置成柱状，则能谱直方图如图4.32所示。此外还可以通过VSCode编辑工具安装ROOT File Viewer 拓展包查看Mytest1.root文件内容。演示案例的设置文档在demo_case文件夹下，用户安装完软件后，将bin文件夹下的SWNS和SWNS-GUI可执行文件拷贝到其文件下即可重现本演示案例内容。



(a) 粒子枪发射 Cf252 源中子谱



(b) 虚拟探测器-z 表面中子通量能谱

图 4.32 能谱直方图



5. 总结

SWNS 2.0 计算软件是中国辐射防护研究院核与辐射前沿技术研究中心核探测与成像应用研究室开发的一款用于根据输入的中子源能谱和预设的屏蔽配置方案获取模拟工作现场中子谱计算软件,其旨在为屏蔽轻量化和屏蔽优化的光谱分析提供仿真工具。

软件虽然已经进行了测试,但仍有出现 BUG 的可能,希望用户在使用时能够及时将出现的 BUG 反馈给我们,我们的邮箱是: hrbeulh@126.com。

在后续的时间里,我们还会对软件进行更新与完善,发布新的版本时可以进行更新升级。

本软件的最终解释权归中国辐射防护研究院。