TOUCANS：一款基于 GEANT4构建的通用蒙特卡罗中子输运代码。

L. Thulliez[a,*], B. Mom[a], E. Dumonteil[a]

[a] *Université Paris-Saclay, CEA, Institut de Recherche sur les Lois Fondamentales de l'Univers, 91191, Gif-sur-Yvette, France*

arXiv:2304.03678v1 [physics.acc-ph] 6 Feb 2023

摘要

本文介绍了 TOUCANS 的开发，这是一款完全使用 GEANT4工具包编写的新型蒙特卡罗中子输运代码。它借助简洁的键值对输入文件，旨在轻松、快速地模拟复杂系统。该代码主要关注使用评价核截面数据库输运低能中子（低于 20 MeV），同时也利用 GEANT4 在各个能量范围内对几乎所有粒子的核截面进行建模所提供的先进功能。因此，非专业人员也能使用它开展涉及不同粒子的多种应用，例如模拟紧凑型加速器驱动中子源（CANS）；这类模拟最初正是推动其开发的动因。该代码利用 GEANT4 中近期实现的功能，既支持屏蔽计算（采用自适应多层分裂这一全自动方差缩减技术），也支持临界计算（用于估算增殖系统的 k_{eff} ）。此外，它还与 CADMesh 紧密耦合，可直接导入 CAD模型；与 NCrystal 集成，可将热中子输运功能扩展至晶体；与 FIFRELIN 集成，可提高复合核退激精度；并与 FUNZ 集成，为用户提供参数化模拟功能（例如多目标算法、帕累托集计算等）。得益于 GEANT4 Neutron-HP 软件包中近期对中子物理的改进，TOUCANS 代码在中子物理精度方面可与 Tripoli-4® 或 MCNP 等工业级中子输运代码相媲美。该代码预计很快将作为 GEANT4 高级示例的一部分发布。

关键词： TOUCANS、GEANT4、Neutron-HP、中子输运、方差缩减技术、屏蔽研究、自适应多层分裂、临界性研究、多目标优化

1. 引言

由欧洲核子研究中心合作开发的开源蒙特卡罗工具包GEANT4 [1] 拥有广泛的用户群体，应用领域从基础高能物理到医疗和空间应用。在低能中子输运（低于20MeV）方面，由于对评估核截面数据库的特殊处理，以及由此带来的过长计算时间（跟踪步长对所有粒子都是通用的），再加上使用 GEANT4 C++ 工具包开发特定应用所需的初始时间，其过去的应用受到限制。此外，面向核反应堆建模的工业级蒙特卡罗中子输运代码已经能够提供此类功能——以及许多其他功能——因此不利于在该工具包中开发最新的评估中子物理。然而，在过去十年中，热中子源和冷中子源在基础物理研究（例如 [2]）以及凝聚态或软物质实验中的应用有所增加（例如参见 [3]）。此外，许多实验核反应堆的关闭也加剧了对开发专用设施的需求。这些反应堆曾提供用于凝聚态物质研究的中子探针；与此同时，人们也需要研究新的概念，例如使用可裂变介质的中子源放大器 [4]，或紧凑型加速器驱动中子源（也称为紧凑型加速器中子源，CANS）。然而，这些概念的开发需要专用的算法和物理模型。以中子源放大器为例，

*通讯作者*Email address:* loic.thulliez@cea.fr (L. Thulliez)

所谓的幂迭代法可以通过计算其增殖因子（即所谓的 k_{eff}）来对系统进行临界安全研究。对于CANS 的设计，例如目前由CEA-Saclay（法国）开发的 SONATE装置 [5], ，输运代码除了中子输运之外，还需要能够模拟更广泛的物理过程。事实上，中子通过 ^{7}Li(p,n)或 ^{9}Be(p,n) 反应产生，并利用方差缩减技术输运至探测器，在探测器中必须对电磁过程进行建模。所有这些需求促成了 GEANT4 Neutron-HP 软件包模型的改进，以及TOUCANS的开发。TOUCANS 是一种专用的蒙特卡罗中子输运代码，通过灵活且易于使用的键值输入文件向用户提供所有这些功能和算法，从而避免在每次参数研究时重新编译整个 GEANT4 应用程序。TOUCANS 最初代表“统一 CANS 设计工具包”（‘TOolkit forUnifiedCANS design’），但如今其应用范围已扩展到各种中子输运应用的研究。虽然其在中子物理方面的精度如今已接近 Tripoli-4® [6]或 MCNP [7], 等工业输运代码，但该代码还能够准确输运模拟各种物理过程和情形所需的所有其他粒子（伽马射线、电子、正电子、离子等），例如核探测系统、核仪器、临界安全研究或屏蔽研究。该代码已成功应用于众多研究中，例如文献 [8, 9, 10, 11]。本文介绍 TOUCANS 的主要特性，并在可能的情况下通过中子源建模这一具体案例给出其使用示例。本文结构如下：第2节回顾代码的主要功能，第 3 节介绍其用户界面。代码的低能中子物理将在第 4 节介绍。随后，第 5 节和第 6节分别详细介绍初级事件生成器，以及可在 TOUCANS 中使用的各种GEANT4 算法。最后，第 7 节给出其与多目标优化软件耦合的示例。

2. TOUCANS 的主要功能

关键　　TOUCANS 代码的功能总结如下，并将在下一节中详细介绍　　s:

- **采用键值对的输入文件格式** 结构，可直接定义设置的几何元素及其属性（位置、尺寸、材料、计分器等）。

- **CAD几何** 使用 CADMesh 软件导入 [12, 13]。

- **准确的中子相互作用**：采用最新评价核数据的热散射定律（ENDF/BVIII　　.0 和 JEFF-3.3) [14] 和 NCrystal [15, 16], 多普勒展宽拒绝修正（多普勒展宽拒绝修正） [17],用于处理未分辨共振区的概率表 [18], 使用 FIFRELIN 精确描述复合核反应 [19]。

- **内置中子计数器/计分器**，例如轨迹长度和碰撞通量估计器、能量沉积、用于屏蔽应用的二维或三维通量图、裂变矩阵等。可以轻松实现任意用户自定义的计数器。

- **多功能初级事件生成器** 可通过多种格式（例如文本文件、ROOT TH1 或TH2 [20], 等）进行定义，从而使初级事件的特征尽可能贴近实际（能量-角度关联、带电粒子束与靶相互作用产生的空间分布等）。可用的中子源项包括 ^{7}Li(p,n)、^{9}Be(p,n)，以及裂变源，如 ^{252}Cf(sf) 和 ^{235}U(n$_{热}$,f)。

- **乘法因子（$k$eff）估计**：在临界安全研究中，采用结合梳理算法的幂迭代法 [21]。

- **自适应多层分裂**算法 [22]是一种即插即用的方差缩减技术，可用于研究屏蔽应用中遇到的高衰减问题，例如辐射防护 [23] 或低本底实验（暗物质或中微子研究）。

- **易于与外部代码耦合**，例如多目标优化算法，可用于寻找满足要求的实验装置设计的最优解（例如 使用 FUNZ 软件 [24]），也可与求解 Bateman 方程的核素演化代码耦合（例如 FISPACT [25]）。

3. TOUCANS 输入文件

由于 TOUCANS 完全依赖 GEANT4工具包，因此继承了它的众多功能，从几何可视化工具到丰富的物理过程列表，并且还利用了社区成员开发的最新附加工具。然而，功能如此广泛，也意味着构建特定 GEANT4 应用程序需要投入大量初期工作。因此，TOUCANS 的理念是通过一个简单的用户界面，让广大非专业用户也能使用 GEANT4 提供的丰富物理选项，尤其侧重于低能中子物理；该界面可用于轻松描述待模拟的装置。附录 A 中给出了一个完整输入文件示例，本文将详细介绍该示例以及其他许多可用功能。

TOUCANS 输入文件的语法以几何声明这一具体示例呈现在图1中。如果键值数据包含在美元符号$ 内，则会被读取，否则将被丢弃。需要指出的是，该输入文件的键值结构与 FIFRELIN [19, 26] 中使用的结构类似。代码在内部解释这些指令，并通过通用方法执行 GEANT4所需的所有步骤；在本示例中，这些步骤用于获取一个 GEANT4物理体。使用此类输入文件的优势在于，所有参数现在都可以从外部访问，同时隐藏了GEANT4 C++ 对象复杂的底层内部结构，并且无需重新编译任何代码。因此，这种方法在理念上类似于使用GEANT4 用户界面的脚本。它也更易于与外部专用算法（如搜索网格、多目标算法或遗传算法）、多物理现象等进行耦合。

```
$ STRING MyVolume/MotherVolume my_母体体积$ $
STRING MyVolume/Type my_类型$[BOX、圆柱体、球体、多
边形锥体等、STL-CADMesh]$ DOUBLELIST
MyVolume/Dimensions dimXdimYdimZ $[设置与所定义体积
对应的值，单位为厘米]$ DOUBLELIST MyVolume/Position
posXposYposZ $[在母体积坐标系中的位置，单位为厘米]$
STRINGLIST MyVolume/Rotation/Axis my_轴$[X、Y、Z]$
DOUBLELIST MyVolume/Rotation/Anglemy_角度$[单位为度]$
STRING MyVolume/Material my_ 材料 $[ 来自 GEANT4 或
NCRYSTAL 的材料]$ STRING MyVolume/Color my_颜色$[蓝色、
红色、绿色、黄色等]$ STRINGLIST MyVolume/Scorers my_计
分器$[由计分器管理器处理的用户自定义计分器 CELL_FLUX、
TTREE_RECORDER 等]$ STRINGLIST
MyVolume/Subtract/List my_要减去的体积$[要从
MyVolume 中减去的体积列表]$ STRINGLIST
MyVolume/Union/List my_要添加的体积$[要添加到
MyVolume 的体积列表]$
```

图 1：输入文件中的 TOUCANS构建块。

我们特别重视对 CAD 几何导入的支持，因为这一功能是将工业项目（例如由 CAD 软件以 STL 格式描述的项目）转换为蒙特卡罗模拟的关键。在 GEANT4 中，可通过 CADMesh 插件 [12, 13] 实现。以下是一个 CAD 示例。

TOUCANS 中的支持如图2 所示，其中展示了 CANS 靶-慢化剂-屏蔽组件的导入。这一功能有助于识别在设置机械约束以实际建造设施/装置时可能出现的困难，以及由此导致的性能下降或中子活化问题等。如果所有 CAD 体都在同一坐标系中生成，并且相对于其他 CAD 体定位准确，GEANT4 将在空间中准确地放置各个体，使其彼此保持正确的相对位置。在 TOUCANS 中，CAD 导入通过以下指令完成：

$字符串 MyVolume/类型 STL $ $ 字符串 MyVolume/STL/文件路径 my_stl_path$

由于数值精度的限制，在 GEANT4 中很难避免重叠问题（这可能导致粒子追踪问题），也就是说，体积之间往往只有几个飞米的重叠。为避免这种情况，必须从母体积中减去所定义的体积。

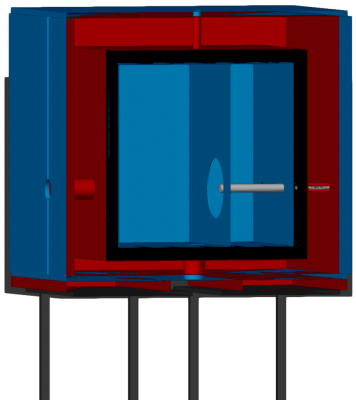

图 2：CAD vi　　紧凑型加速器中子源的靶-慢化剂-屏蔽组件可视化，剖视图。几何已导入 *via* CADMesh中 GEANT 4. 渲染使用 Blender 软件 [27] *via* VRML 格式完成。

4. 低能核物理与中子输运

4.1. 低能中子输运物理的验证与确认

TOUCANS 的最初动机是提供一个简单的代码，专门用于模拟低能中子输运应用（低于 20 MeV），因为它最初的用途就是致力于 CANS 设施的设计与研究。过去几年对 GEANT4 Neutron-HP 软件包进行了重大改进，使得这一目标得以实现 [28, 29, 30, 14, 17, 18], 如今其中子物理精度已达到与 Tripoli-4® 和 MCNP 等参考中子输运代码相当的水平。这些最新进展包括：采用 SVT 算法处理热中子，并使用最新评估的热散射定律（TSL）（ENDF/B-VII.1、ENDF/B-VIII.0、JEFF-3.3） [14], 实现多普勒展宽拒绝修正（DBRC）算法 [31, 17]以及使用概率表描述未分辨共振区的功能 [18]。

上述所有开发均使用专用脚本，通过与 Tripoli-4® 或 MCNP 等参考中子输运代码进行对比，完成了验证和确认。这些脚本现已成为 GEANT4工具包的一部分。TOUCANS，以及 Neutron-HP 软件包，也已通过不同的紧凑型加速器中子源实验配置进行了验证；自 2016 年以来，这些配置一直在 CEA-Saclay（法国）的 3 MeV 质子 IPHI 加速器上使用铍靶进行测试 [32] 。这些验证分别针对 2016 [33], 、 2019 [8] 和 2022 [11, 34]中的不同紧凑型加速器中子源配置进行。结果表明，GEANT4 生成的数值数据与这些紧凑型加速器中子源实验数据一致。最新一次验证，即也就是针对 2022 年配置的验证，见图 3：在 IPHI 实验测得的中子通量随到产生顶点距离的变化，与 TOUCANS 模拟数据吻合良好。

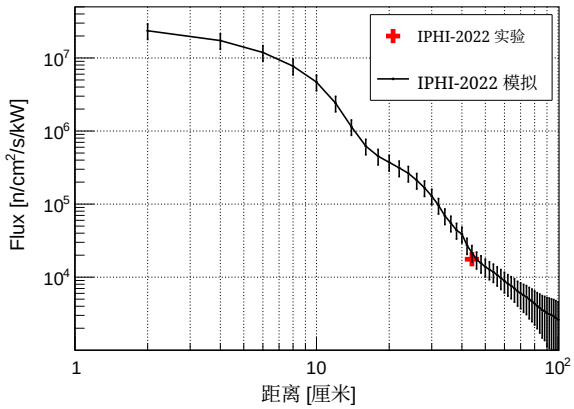

图 3：在 IPHI 加速器（CEA-Saclay）2022 年 CANS 配置下，对 TOUCANS 热中子通量（E $\leq$ 512 meV）预测结果与 Au 和 Au+Cd 剂量计测量结果进行比较，以确定低于 512 meV（镉截止能量）的中子通量。

4.2. 使用 *NCrystal*进行热中子散射

为了补充标准评估库中的热散射数据，可以通过其简单的接口/钩子在 GEANT4中使用NCrystal 库。其最新版本（ncrystal-3.5.1）包含超过 130种材料 [15, 16]。例如，在紧凑型加速器中子源开发中，可以使用它来模拟作为低通热中子滤波器的单晶体的响应。在 TOUCANS 中，可以通过以下键值轻松添加 NCrystal材料通过 以下键值，并且可以调节晶体属性：

$字符串 MyVolume/材料/类型 NCRYSTAL $[NCRSYTAL，GEANT4(默认)]$字符串列表 MyVolume/材料/选项 nc_选项 $[声子_德拜、布拉格、否_布拉格]$ 字符串 MyVolume/材料 nc_材料 $

4.3. 使用 *FIFRELIN* 的复合核反应

为提高 GEANT4 对复合核中子俘获或裂变（即初级裂变碎片）产生的复合核所发射的中子、光子和内转换电子的描述准确性，TOUCANS 已新增使用 FIFRELIN 代码 [19] 的功能。FIFRELIN 是一种退激蒙特卡罗代码，采用 Hauser-Feshbach 框架，并使用最新的中子透射系数、辐射强度函数和能级密度模型，详见 [35]。它还使用 RIPL-3 [35] 和 EGAF [36]评价数据库，以纳入所有实验核能级信息。因此，可以研究这些核模型对结果的影响。初态到终态的能量、自旋和宇称守恒，以及跃迁选择定则，均已在代码中自然考虑。因此，与使用仅在平均意义上满足能量和粒子数守恒的评价数据库相比，使用 FIFRELIN 确有优势。这对于基于先进核材料探测器实施防扩散政策的国土安全工作，或精密物理实验，都可能具有重要意义。事实上，FIFRELIN 与 GEANT4 的耦合已展现出在基础（中微子）物理研究背景下精确描述这些反应的能力 [37, 9, 38]。要在 TOUCANS 中使用 FIFRELIN，必须设置以下 GEANT4 环境变量：*GEANT4_FIFRELIN_DATA="path to fifrelin database"*。随后通过以下命令完成耦合：

$ 布尔值 物理列表/Fifrelin/是否启用 1 $[0=禁用（默认）或 1=启用]$ 整数列表 物理列表 /Fifrelin/ 同位素 ZA$[ZA 中的 Z=Z*1000+A/ 可设置多个同位素]同位素数据必须位于 GEANT4_FIFRELIN_数据]

5. 初级事件生成器

在输入文件中声明初级中子源时，需要定义发射中子的能量、动量和位置。如果处理中子源为固定中子源（例如 紧凑型加速器中子源），或者是代际中子源（例如增殖介质中的中子输运），初级事件生成器的设计理念会略有不同。对于后一种情况，中子的初始位置并不十分重要，因为使用幂迭代法（参见第 6.2 节）时，中子需要在空间上收敛到问题的特征值。因此，在进行计分之前必须达到收敛判据（该判据既可应用于 k_{eff}，也可应用于中子源的熵 [39, 40, 41]）。对于裂变反应产生的中子，可以使用瓦特谱；如果需要更精确的数据，例如考虑中子/伽马射线关联，则可以使用 FIFRELIN 等专用代码。

对于固定中子源应用，例如紧凑型加速器中子源，初始位置可直接由靶转换器上的带电粒子束或中子束流分布，或由主中子源的位置确定。为了确定带电粒子束轰击靶转换器所产生中子的性质（产额、能量、动量等），可根据束流能量使用不同的代码。例如，对于由几 MeV 能量的质子或氘核诱发的核反应，DROSG 代码可为实验室中使用的主要靶材（d、t、Li、Be、B 等）提供微分核截面 [42]。对于 10–100 MeV 的束流能量，理论方法往往会失效，因为难以在同一框架中同时考虑原子核的结构和反应动力学。在这种情况下，可以使用 TENDL 评估数据库 [43] 。在更高能量下，例如散裂反应，可采用 INCL 等核内级联代码 [44, 45] 。为进一步说明 TOUCANS 代码在紧凑型加速器中子源开发中的应用，下面给出用于硼中子俘获治疗的 ^{7}Li(p,n) 反应示例 [46]。在 1.95 MeV 至 7 MeV 范围内，可以使用 Liskien 和 Paulsen 的评估数据 [47]。根据 [46] 中的详细说明，使用 Breit-Wigner 单能级形式将该评估数据扩展至阈能，即 从 1.95 MeV 扩展到 1.88 MeV。结果如图 4 所示，并存储在 TH2F 结构（ROOT-欧洲核子研究中心） [20], 中，可通过以下命令行直接提供给 TOUCANS：

```
$字符串生成器/类型 我的_类型 $[完整_用户、FIFRELIN、TTREE、能
量_角度_相关性]$ 字符串生成器/位置采样器 我的_采样器 $[高斯分布、
均匀分布_圆盘、均匀分布_盒体、TH2F、TTREE]

# in the following trunk=Generator/PositionSampler
$ 双精度列表 主干/全局/位置 x yz $ $ 字符串列表 主干/全局/旋转/轴
我的_轴 $ $ 双精度列表 主干/全局/旋转/角度 我的_角度 $

//IF my_type==ENERGY_ANGLE_CORRELATION:
  $ 整数          生成器/PDG编码                    我的_PDG编码   $
  $ 字符串        生成器/能量角度采样器              TH2F           $
      [文本，TH2F]
  # in the following trunk=Generator/EnergyAngleSampler
  $ 字符串        主干/TH2F/路径                    根_文件_路径   $
  $ 字符串        主干/TH2F/名称                        th2h_name  $
  //OR
  $ 字符串        主干/文本/dXSOverdTheta           root_文件_路径 $
  $ 字符串        主干/文本/对 θ 和 E 的双微分截面       th2_name   $

//ELSE IF my_type==FULL_USER:
  $ 字符串        生成器/EnergySampler              我的_采样器    $
    [固定，WATT_能谱、一维浮点直方图、文本、TENDL]
  $ 字符串        生成器/动量采样器                  我的_采样器    $
```

[受限_极角、各向同性]

```
//ELSE IF my_type==FIFRELIN:
  $ 字符串   生成器/FIFRELIN/路径                    我的_路径        $
    [读取包含PDG编码等信息的FIFRELIN文件]
    [如果 未提供则定义生成器/动量采样器]

//ELSE IF my_type==TTREE:
  $ 字符串   生成器/TTree/路径                       root_文件_路径   $
  $ 字符串   生成器/TTree/名称                        ttree _name      $
```

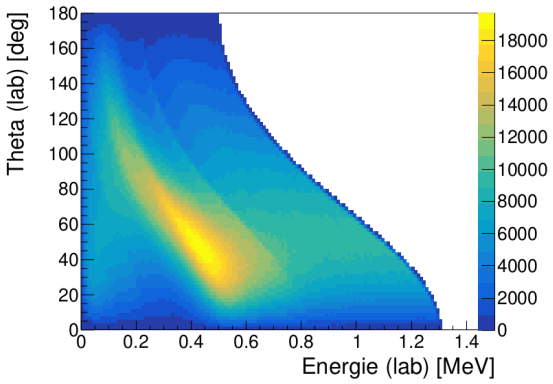

图 4：根据文中所述的 [47，46]，在实验室坐标系中，反应 p(3MeV)+^{7}Li $\rightarrow$ n+^{7}Be 产生的中子的性质。 TOUCANS 可以轻松读取此 TH2F，其中键 =”Generator/Type” 的值设为 =”ENERGY ANGLE CORRELATION”。

6. 复杂系统研究的算法 ies

中子输运的模拟可分为三大类：模拟研究、屏蔽研究和临界性研究。模拟研究旨在计算核系统的平均统计性质，同时也关注其涨落和关联 [48]。在这种情况下，必须对支配中子输运和碰撞的所有规律，以及描述核裂变过程的规律进行模拟 [49]。因此，不能保留涨落和关联的方差缩减技术必须被禁止使用，并且必须使用 FIFRELIN等代码来再现裂变过程中固有的涨落。相反，屏蔽研究需要使用方差缩减技术，以便在强衰减环境下提供良好的计数统计。在这种情况下，TOUCANS 提供了一种即插即用的方差缩减技术，称为自适应多层分裂（AMS），该技术最近已在代码中实现。最后，对增殖介质中的中子输运进行表征需要控制每一代的中子数，以防止中子统计量灭绝或爆炸。这个问题通过众所周知的幂迭代算法加以解决（也称为$Lanczos$ 算法）。该算法在代之间进行迭代，从而能够估计核系统的 k_{eff} 及其对应的特征向量（通量空间分布）。下一小节将介绍使用 TOUCANS 进行屏蔽研究和临界性研究的选项。

6.1. 屏蔽研究和方差缩减技术

AMS 算法最初是在 [22] 中针对稀有事件模拟开发的。H. Louvin 等人已成功将其应用于 Tripoli-4® code 中的中子输运 [23]。该算法采用迭代过程：在每一步中，都会从模拟中移除一定比例 K/N 的 N 模拟粒子（这些粒子对评分的贡献概率较低），

并在其他位置（参数相空间中）对其重新采样，同时利用中子输运过程的马尔可夫性，确保不会引入偏差。用户提供一个代价函数 I，以粗略估计粒子对评分作出贡献的概率。与高度依赖伴随通量准确性的指数变换方法 [6] 相比，AMS 的稳健性极高，因此可视为一种“即插即用”算法，用于提升模拟的品质因数（FOM）。AMS 算法首次通过 TOUCANS 代码在 GEANT4 中实现并得到验证，该代码还为用户提供了一组基本代价函数 I（也可轻松添加其他由用户定义的代价函数）。下面简要介绍 AMS 算法的主要参数及其简化流程图：

///Definition
B = 独立模拟（又称批次）的数量 N = 每批次的中子历史数 K = 每次迭代移除的粒子数 I = 重要性函数（又称代价函数）T = 模拟过程中自适应选取的分裂级别α = 计分量的权重因子

*///Launch B independant simulations*对 批次 B:

> *///Initialization*
> α = 1
>
> *///Simulation*当 (N-K+1)条径迹不在探测器内时：1/ 对 K 条径迹进行模拟输运，直至其被俘获死亡或泄漏出几何体。2/ 使用 I 对 N 条径迹进行计分赋值。3/ 根据计分对 N 条径迹进行排序。4/ 将 T 定义为重要性最差的第 K 条径迹的值。4/ 杀死/移除最差的 K 条径迹。5/ 从（N-K）条剩余径迹中抽取一条，并在 T 略高的位置重新启动这 K 条径迹。6/ 更新权重因子 α 在当前迭代中的值，即 α *= (1-K/N)

///Agregate the batch results, the weighted scored quantities

权重 α 被赋予这组 N 条径迹的构型，即 被赋予计分量。因此，在给定批次的最后一次迭代中，所有粒子的权重都相同，这解释了为何关联和涨落得以保留。权重 α 初始设为 1，并在每次迭代时乘以 $(1-\frac{K}{N})$。我们通过不同的解析基准验证了 AMS 算法的实现。这里报告其中一个基准的结果：在单能组近似（中子能量不变）下，模拟单向中子在嵌套球体中的传播；球体半径从 1 cm 到 90 cm，间隔为 1 cm。中子通量在每个子壳层中进行计数。计算每个子壳层中子通量的解析公式如下 [50]:

$$\phi(x) = \frac{3}{4\pi(x_2^3 - x_1^3)(p-1)}(e^{(p-1)\Sigma_t x_2} - e^{(p-1)\Sigma_t x_1}) \tag{1}$$

其中，Σ_t 为总宏观截面，$p{=}\sigma_{el}/\sigma_t$，其中 σ_{el}、σ_c 和 $\sigma_t{=}\sigma_{el}{+}\sigma_c$ 分别为微观弹性截面、俘获截面和总核截面。在模拟中，截面设为 $\Sigma_t{=}1\text{cm}^{-1}$、$\sigma_{el}{=}5$ barn 和 $\sigma_c{=}5$ barn。在 GEANT4 中，可以通过创建具有用户定义属性（即 用户定义截面）的虚拟原子核来实现这一点。

AMS参数设为 $N{=}10000$、$K{=}100$、$B{=}1000$。代价函数定义为

中子行进的距离（越远越好）。图5展示了GEANT4/TOUCANS模拟结果与理论值的对比，两者吻合度很高；在中子衰减为 10^{+25}时，差异小于2%。这一结果仅通过1小时的单处理器模拟便得以获得，若不采用方差缩减技术，根本无法计算。关于GEANT4中的AMS实现及其向多粒子/多探测器计分器的扩展的论文预计很快发布，届时还将提交相应的GEANT4代码，以便GEANT4社区使用 [51]。

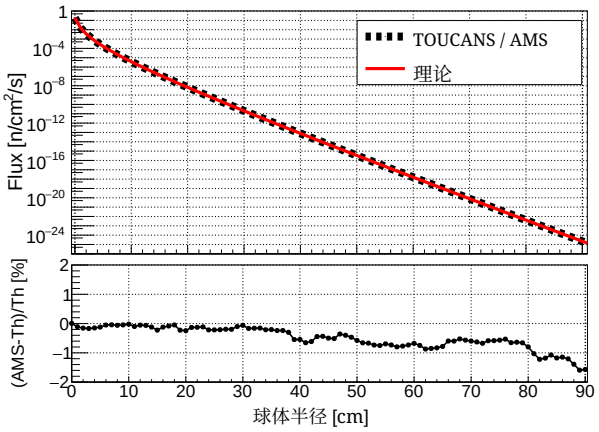

图5： TOUCANS 中的 AMS 与一维解析基准的解析公式之间的比较。

可以使用以下命令在 TOUCANS 中启动 AMS：

$ 布尔值 AMS/是否启用 1 $[0=禁用（默认）或 1=启用]$ 字符串 AMS/Scoring/TFile my_output_file $[保存结果的文件名称]$ 整数列表 AMS/PDG编码 my_pdg_list $[要跟踪的粒子的 PDG 编码]$ 字符串 AMS/靶/Option my_target_opt $[单一_靶，多重_靶]$ 字符串列表 AMS/靶/类型 my_target_type $[体积、中子_代、时间]$ 字符串列表 AMS/靶/名称 my_volume $[靶体积的名称]$ 整数列表 AMS/靶/PDG编码 my_pdg_list $[要计分的粒子的 PDG 编码]$ 双精度列表 AMS/靶/Point x y z $[将粒子推送至的靶位置]$ 字符串 AMS/Importance/Function my_fct $[距离_点、距离_平面、中子_代、时间、重要性_图等]$ 整数列表 AMS/Importance/PDGCode my_pdg $ $ 整数 AMS/Particle/Number my_follow_nb $[跟踪的粒子编号/初始轨迹编号]$ 整数 AMS/ParticleToKill/Number my_kill_nb $[每个算法步要杀死的粒子：K]

6.2. 临界性研究 - 幂迭代算法

为研究临界系统，我们在 GEANT4 中实现了一种基本的幂迭代算法，可用于模拟中子在可裂变介质中的输运（即 CANS设施的中子放大器），或模拟一个简化的核反应堆。可通过以下 TOUCANS 命令使用此算法：

```
$ 布尔值 临界性/是否启用 1$[0=禁用 (默认)或 1=启用]
```

幂迭代算法的基本原理是，在每一代中使用梳理算法 [21] 来控制中子数目，即 确保每一代追踪的中子数相同。算法会选择要移除的中子（主要适用于 k_{eff}¿1 的系统）或要复制的中子（主要适用于k_{eff}¡1 的系统），以便在下一代继续追踪。需要注意的是，该算法从未针对任何国际临界基准进行验证或确认 [52]。尽管如此，它仍可作为一个有趣的简化模型，用于教学目的和基础临界安全研究，例如研究 CANS 的中子放大器。可通过 k_{eff} 或熵准则 [39, 41]检查模拟是否收敛。

最近已有研究表明，群体控制技术可以被视为结合代探测器或时间探测器的方差缩减技术 [53]。例如，研究亚临界系统的性质包括迫使中子存活，并推动其随时间或代演化。这正是AMS算法的作用，因此，与幂迭代法不同，它也可用于研究可裂变介质中中子群体的代际演化。要使用TOUCANS 中的 AMS计算系统的k_{eff}，只需使用下面的命令即可。更多详细信息和示例请参见参考文献 [53]。

```
$ 字符串列表 AMS/靶/类型 中子_代或时间 $
```

7. 与多目标优化算法耦合，实现紧凑型加速器中子源的高效设计

紧凑型加速器驱动中子源可分为四个部分：例如通过（p,n）反应诱发的初级中子源定义；靶-慢化剂-反射体-屏蔽组件（TMRS）的设计，用于将中子慢化至所需能量；提取器/准直器，用于将中子提取并输运至实验点，并使其具备用户定义的特性（中子通量、束流纯度、束流发散度以及探测器位置处的空间分布）；以及中子束流倾倒器，用于降低辐射生物学问题，并减少中子在探测器上诱发的本底。这类设施的示意图见图 6。

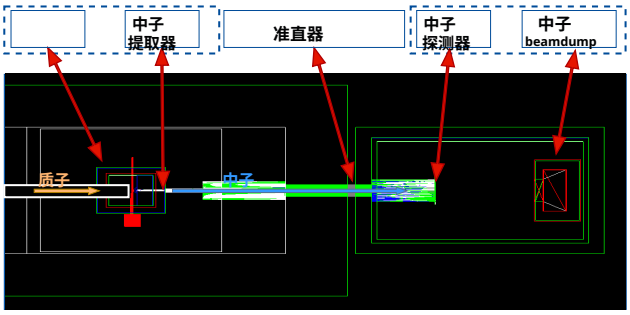

图6：紧凑型加速器中子源设施的概略示意图。

如果采用搜索网格算法等传统方法，对这些部件进行优化可能会耗费大量时间。这一局限性通常被称为“维数灾难”，当同时研究过多参数的影响时就会出现这一问题，因此需要采用评估策略。由于 TOUCANS 凭借其输入文件结构可以轻松地与外部代码耦合，因此能够使用FUNZ 环境 [24]将其与 GPARETO软件包 [54, 55], 中的多目标算法耦合起来。该方法包括研究称为目标的感兴趣输出相对于用户定义的、具有约束条件的输入的变化。这使得可以构建一个元模型（也称为代理模型），它是对模拟代码（定义为黑箱）的输入/输出关系的数学近似，并需从中找到全局最小值。在本工作中，黑箱是蒙特卡罗

TOUCANS 代码本身具有非确定性。下面使用克里金元模型 [56]（也称为高斯过程回归 [57]）介绍基于元模型的优化的一般原理。在这项工作中，通过*FUNZ*使用高效全局优化算法（EGO）（更多详情见 [58]）。图 7 展示了优化过程的流程图，并详细说明了执行各步骤所用的方法和算法。由于各目标之间往往存在冲突，因此通常无法同时实现所有目标的最小化。此时，需要确定输入参数范围内的最优解集合，称为帕累托集。帕累托集在目标空间中的映像称为帕累托前沿，可用于选择最佳解。 [11] 详细介绍了这一优化过程，并将其应用于中子束流倾倒器的设计，以在有限空间内确定其最佳尺寸。



图 7： TOUCANS（待发现的黑箱函数）与 FUNZ 多目标优化代码之间的耦合方案。

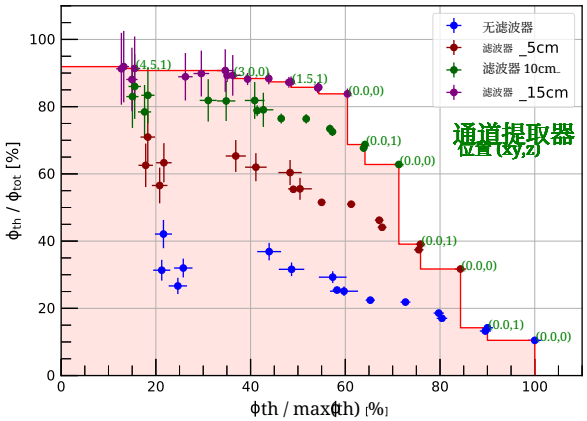

图 8：TMRS 组件内部提取器通道和单晶蓝宝石滤波器的多目标优化结果。

在这项工作中，EGO 算法已应用于中子提取器通道配置中

与单晶蓝宝石滤波器配套的 TMRS 装置，该滤波器用作热中子通滤波器。目标是同时最大化热中子通量（ϕ_{th}）以及热中子通量与总通量的比值（$\frac{\phi_{th}}{\phi_{tot}}$）。优化结果如图 8 所示，其中每种颜色对应一种滤波器长度，并针对每种长度评估了 TMRS 中提取通道的不同位置。提取通道靠近中子产生位置时，热中子通量最大；随着通道移远，通量逐渐降低。图 8 中的粗红线表示 帕累托前沿 ，即最优配置点的集合，决策者可以从中选择，以实现最佳权衡。

8. 结论

TOUCANS 最初旨在支持 CEA-Saclay 的紧凑型加速器中子源设计工作，以及要求准确模拟中子输运的基础物理实验（例如CRAB 实验 [9, 38]），它充分利用了 GEANT4 Neutron-HP 软件包近期的改进。TOUCANS 可通过与 FIFRELIN、NCrystal、CADMesh 或 FUNZ 等其他代码进行多种隐式和外部耦合，在单一框架中模拟并优化实验装置的各个方面，从中子产生到探测器响应。因此，它可用于屏蔽或临界安全研究、中子噪声估算或核仪器等领域。近期，该代码预计将作为 GEANT4 高级示例之一发布。

致谢

作者谨向 Antoine Drouart（法国 CEA-Saclay）致谢，感谢他就紧凑型加速器中子源开展的富有成效的讨论；并向 Olivier Litaize（法国 CEA-Cadarache）和 Yann Richet（法国 IRSN）致谢，感谢他们分别在与 FIFRELIN 和 FUNZ 相关的各方面给予支持。

参考文献

[1] J. Allison等. Geant 4 *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators Spectrometers Detectors and Associated Equipment* 835 186 225, 2016 0168 9002 10 1016 的最新进展. ,,, : – nov . ISSN - . doi: . / J.NIMA.2016.06.125. URL https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900216306957. [2] V. V. Nesvizhevsky等. 地球引力场中的中子量子态. *Nature*, 415(6869):297–299, 2002年1月. ISSN 1476-4687. doi: 10.1038/415297a. URL https://www.nature.com/articles/415297a. 编号：6869 出版商：Nature Publishing Group. [3] 国际原子能机构. 紧凑型加速器驱动中子源. 技术报告, 国际原子能机构报告 IAEA-TECDOC- 1981，2021年9月. URL https://www-nds.iaea.org/public/libraries/drosg2000/. [4] J. Galy、J. Magill、H. Van Dam和J. Valko. 用于散裂源的中子增能器——在加速器驱动系统和同位素生产中的应用. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators Spectrometers Detectors and Associated Equipment* 485 3 739 752, 2002 0168 9002 ,,, ( ): – June . ISSN - . doi: 10.1016/S0168-9002(01)02108-8. URL https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900201021088. [5] F. Ott、A. Menelle和C. Alba-Simionesco. SONATE项目：用于材料科学研究的法国紧凑型加速器中子源. *EPJ Web Conf.*, 231 01004, 2020 10 1051 202023101004 https://doi.org/10.1051/epjconf/ : . doi: . /epjconf/ . URL .[6] 202023101004 E. Brun等. TRIPOLI- 4, *Annals of Nuclear Energy* 82 151 160, CEA、2015 EDF和AREVA参考蒙特卡罗代码. , : – .[7] T. Goorley等. MCNP6首发版本概述. *Nuclear Technology*, 180:298–315, 2012. [8] L. Thulliez、A. Letourneau、J. Schwindling、N. Chauvin、N. Sellami、F. Ott、A. Menelle和B. Annigh¨ofer. SONATE紧凑型加速器驱动中子源的研发初探. *EPJ Web Conf.*, 239:17011, 2020. doi: 10.1051/epjconf/202023917011. URL https://doi.org/10.1051/epjconf/202023917011. [9] L. Thulliez和D. Lhuillier等. 利用中子俘获在 100 *Journal of* eV尺度上校准核反冲. , :P . ISSN - . doi: . / - / / /P . URL *Instrumentation* 16 07032, 7 2021 1748 0221 10 1088 1748 0221 16 07 07032 https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-0221/16/07/P07032 . [10] J. Hirtz、A. Letourneau、L. Thulliez、A. Ibarra、W. Krolas和A. Maj. IFMIF-DONES设施互补实验大厅的中子可用性. *Fusion Engineering and Design*, 179:113133, 2022. ISSN 0920- 3796 10 1016 2022 113133 https://www.sciencedirect.com/science/article/ . doi: https://doi.org/ . / pii/S0920379622001284 j.fusengdes. . . URL .

[11] B. Mom、L. Thulliez、E. Dumonteil、M. Binois、Y. Richet、J. Schwindling和A. Drouart. 基于IPHI的中子源模拟与设计：迈向SONATE的初步工作. *Journal of Neutron Research*, 24(3-4):337–345, 2022 1023 8166 10 3233 220027 https://content.iospress.com/articles/ January . ISSN - . journal-of-neutron-research/jnr220027 doi: . /JNR- . URL . 出版商：IOS出版社. [12] C. M. Poole、I. Cornelius、J. V. Trapp和C. M. Langton. GEANT 4 *Australasian Physical & Engineering Science in Medicine* 2012 10 1007 13246 012 0159 8 September . doi: . /s - - - . URL https://link.springer.com/article/10.1007/s13246-012-0159-8 .[13] C. M. Poole、I. Cornelius、J. Trapp和C. M. Langton. GEANT 4 *IEEE Transactions on Nuclear Science* 99 1 7, 2012 导航. , : – . [14] L. Thulliez、C. Jouanne和E. Dumonteil. 改进Geant4 Neutron-HP软件包：从方法学到评估核数据库. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 1027 166187, 2022 0168 9002 10 1016 2021 , : . ISSN - . doi: https://doi.org/ . /j.nima. . 166187. URL https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S016890022101055X. [15] X.-X. Cai和T. Kittelmann. NCrystal：用于热中子输运的库. *Computer Physics Communications*, 246 10 1016 2019 07 015 :106851, 2020. doi: https://doi.org/ . /j.cpc. . . . [16] T. Kittelmann和X.-X. Cai. NCrystal的中子弹性散射模型. *Computer Physics Communications*, 267: 108082, 2021. doi: https://doi.org/10.1016/j.cpc.2021.108082. [17] M. Zmeˇskal、L. Thulliez和E. Dumonteil. 改进Geant4 Neutron-HP软件包：中子弹性散射核的多普勒展宽与截面. *to be submitted*, 2023. [18] M. Zmeˇskal、L. Thulliez、P. Tamagno和E. Dumonteil. 改进Geant4 Neutron-HP软件包：利用概率表准确描述未分辨共振区. *to be submitted*, 2023. [19] O. Litaize、O. Serot和L. Berge. 使用FIFRELIN进行裂变建模. *Eur. Phys. J. A*, 51(12):177, 2015. doi: 10.1140/ epja/i2015-15177-9. [20] R. Brun 和 F. Rademakers. ROOT—— 面向对象的数据分析框架 . *Nucl. Inst. & Meth. in Phys. Res.* , : – . [21] T. E. *A* 389 81 86, 1997 Booth. 一种守恒权重（电荷）的蒙特卡罗重要性加权梳状算法. 技术报告，洛斯阿拉莫斯国家实验室（LANL），美国新墨西哥州洛斯阿拉莫斯, 1996. URL https://www.osti.gov/biblio/204256. [22] F. C´erou和A. Guyader. 用于稀有事件分析的自适应多层分裂. *https://doi.org/10.1080/07362990601139628*, 25:417–443, 3 2007. ISSN 07362994. doi: 10.1080/07362990601139628. URL https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/07362990601139628. [23] H. Louvin、E. Dumonteil、T. Leli`evre、M. Rousset和C. M. Diop. 用于蒙特卡罗粒子输运的自适应多层分裂. *EPJ Nuclear Sci. Technol.*, 3(29), 2017. doi: 10.1051/epjn/2017022. [24] Y. Richet和N. Chabalier. Funz/funz-client：v1.14，2021年11月. URL https://doi.org/10.5281/zenodo.5731393. [25] J.-Ch. Sublet、J. W. Eastwood、J. G. Morgan、M. R. Gilbert、M. Fleming和W. Arter. FISPACT-II：用于活化、嬗变和材料建模的高级模拟系统. *Nuclear Data Sheets*, 139:77–137, 1 2017. ISSN 0090 3752 10 1016 2017 01 002 https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/ - . S0090375217300029 doi: . /J.NDS. . . . URL .[26] O. Litaize 等 . FIFRELIN-1.0 用户指南 . 私人通信，2017. [27] Blender 在线社区 . Blender—— 一款 3D 建模与渲染软件包，2022. URL http://www.blender.org. [28] E. Mendoza等. 面向GEANT4代码的新标准评估中子截面数据库及其首次验证. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 61:2357–2364, 2014. ISSN 00189499. doi: 10.1109/TNS.2014.2335538. [29] E. Mendoza、D. Cano-Ott和R. Capote. Geant4代码评估中子截面数据库更新，国际原子能机构技术报告 INDC(NDS)-0758（发布版本 JEFF-3.3、JEFF-3.2、ENDF/B-VIII.0、ENDF/B-VII.1、BROND-3 1 4 0 2018 https://www-nds.iaea.org/geant4/figures/G4_ . 和 JENDL- . u）. 10.04.p01_VS_MCNP6_ENDF80.pdf 技术报告，CIEMAT，维也纳，. URL . [30] H. N. Tran等. MCNP6和GEANT4代码中的热中子散射处理比较. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators Spectrometers Detectors and Associated Equipment* 893 84 94, 2018 01689002 10 1016 2018 02 094 , , , : – jun . ISSN . doi: . /j.nima. . . . URL https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0168900218302651 .[31] B. Becker、R. Dagan和G. Lohnert. 理想气体能量相关散射核随机公式的证明与实现. *Annals of Nuclear Energy*, 36:470–474, 5 2009. ISSN 03064549. doi: 10.1016/j.anucene.2008.12.001. [32] F. Sen´ee等. CEA萨克雷中心IPHI束流功率的提升. 载于 *Proc. 9th International Particle Accelerator Conference (IPAC'18), Vancouver, BC, Canada, April 29-May 4*, 2018年，国际粒子加速器会议第9号，694–696页，瑞士日内瓦，2018年6月. JACoW出版公司. ISBN 978-3-95450- 184-7. doi: doi:10.18429/JACoW-IPAC2018-TUPAF016. URL http://jacow.org/ipac2018/papers/tupaf016.pdf. https://doi.org/10.18429/JACoW-IPAC2018-TUPAF016. [33] H. N. Tran等. IPHI加速器产生的中子：用于验证SONATE紧凑型中子源设计. *EPJ Web Conf.*, 231 01007, 2020 10 1051 202023101007 https://doi.org/10. :. doi: . /epjconf/ . 1051/epjconf/202023101007 URL . [34] J. Schwindling、B. Annigh¨ofer、N. Chauvin、J.-L. Meuriot、B. Mom、F. Ott、N. Sellami和L. Thulliez. IPHI 30 kW铍靶的长期运行. *Journal of Neutron Research*, 24(3-4):289–298, 2022年1月. ISSN 1023 8166 10 3233 220024 https://content.iospress.com/articles/journal-of-neutron-research/ - . doi: . /JNR- . jnr220024 URL . 出版商：IOS出版社. [35] R. Capote等. RIPL——用于核反应计算和核数据评估的参考输入参数库. *Nuclear Data Sheets*, 110:3107–3214, 12 2009. ISSN 00903752. doi: 10.1016/j.nds.2009.10.004.

[36] R. B. Firestone 等：《EGAF：伽马射线截面测量与分析》。

Nuclear Data Sheets 119 79 87, , : – 。ISSN 。doi: 。/5 2014 00903752 10 1016 2014 08 024 j.nds. . . .[37] H. Almaz´an 等。使用 FIFRELIN 和新伽马射线能谱改进 STEREO 模拟：激发态轧同位素。 *European Physical Journal A*, 55:1–5, 10 2019。ISSN 1434601X。doi: 10.1140/epja/i2019-12886-y。URL https://link.springer.com/article/10.1140/epja/i2019-12886-y。[38] CRAB 合作组和 NUCLEUS 合作组。观察到中子俘获诱发的 100 eV 尺度核反冲峰，2022。URL https://arxiv.org/abs/2211.03631。[39] I. Lux 和 L. Koblinger。 *Monte Carlo particle transport methods : Neutron and photon calculations*。CRC Press，博卡拉顿，1991。[40] T. Ueki、F. B. Brown、D. K. Parsons 和 D. E. Kornreich。蒙特卡罗临界计算中的自相关与优势比。

Nuclear Science and Engineering 145 3 279 290, 2003 10 13182 03 04 https://doi.org/ , ( ): – 。doi: 。/10.13182/NSE03-04 NSE - 。URL 。[41] M. Nowak 等。蒙特卡罗幂迭代：熵与空间关联。 *Annals of Nuclear Energy*, 94, 2016。[42] M. Drosg。DROSG-2000：60 种中子源反应的代码与数据库。技术报告，国际原子能机构报告 IAEA-NDS-87 Rev. 10，2016 年 1 月。URL https://www-nds.iaea.org/public/libraries/drosg2000/。[43] A. J. Koning、D. Rochman、J. Ch Sublet、N. Dzysiuk、M. Fleming 和 S. van der Marck。TENDL：面向创新核科学与技术的完整核数据图书馆。 *Nuclear Data Sheets*, 155:1–55, 1 2019。ISSN 0090-3752。doi: 10.1016/J.NDS.2019.01.002。[44] D. Mancusi、A. Boudard、J. Cugnon、J. C. David、P. Kaitaniemi 和 S. Leray。将 Li`ège 核内级联模型扩展至轻核诱发的反应。 *Physical Review C - Nuclear Physics*, 90:054602, 11 2014。ISSN 1089490X。doi:

10 1103 90 054602 36 https://journals.aps.org/prc/abstract/10.1103/PhysRevC.90. 。/physrevc. . /054602 figures/ /medium。URL 。[45] J. Hirtz、J. C. David、A. Boudard、J. Cugnon、S. Leray、I. Leya、J. L. Rodr´ıguez-S´ánchez 和 G. Schnabel。新版 Li`ège 核内级联模型中的奇异性产生。 *Physical Review C*, 101:014608, 1 2020。ISSN

24699993 10 1103 101 014608 19 https://journals.aps.org/prc/abstract/10. 。doi: 。/1103/PhysRevC.101.014608 physrevc. . /figures/ /medium。URL 。[46] M. S. Herrera、G. A. Moreno 和 A. J. Kreiner。重新研究阈值附近的

7 7 *Applied Radiation* Li(p,n) Be 反应。, : *and Isotopes* 88 243 246, 2014 18729800 10 1016 2013 11 042 – 。ISSN 。doi: 。/j.apradiso. . . . URL http://dx.doi.org/10.1016/j.apradiso.2013.11.042 。[47] H Liskien 和

A Paulsen。反应 7Li(p, n)7Be 和 7Li(p, n)

7 *Atomic data and nuclear data tables* 15 57 84, 1975 http://www.sciencedirect.com/science/article/ Be 的中子产生截面pii/0092640X75900042 与能量。, : – 。URL 。[48] E. Dumonteil 等。斑块状核链式反应。 *Communications Physics 2021 4:1*, 4:1–10, 7 2021。ISSN 2399-3650。doi: 10.1038/s42005-021-00654-9。URL https://www.nature.com/articles/s42005-021-00654-9。[49] O. Petit 和 E. Dumonteil。用于核仪器应用的模拟中子输运：蒙特卡罗代码 tripoli-

4 *Nuclear Technology* 192 3 259 263, 2015 10 13182 14 128 https://doi.org/10.13182/ 。, ( ): – 。doi: 。/NT14-128 NT - 。URL 。[50] K. M. Case、F. de Hoffmann 和 G. Placzek。 *Introduction to the theory of neutron diffusion*。洛斯阿拉莫斯，1953。[51] L. Thulliez、E. Dumonteil 和 T. Leli`evre。用于蒙特卡罗多粒子/多探测器稀有事件的自适应多层分裂。 *to be published*，待定。[52] 经合组织/核能机构。《国际临界安全基准评估项目》(ICSBEP),

2020 https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_24498/ 。URL 。[53] K. international-criticality-safety-benchmark-evaluation-project-icsbep Frohlicher、E. Dumonteil、L. Thulliez、J. Taforeau 和 M. Brovchenko。蒙特卡罗临界模拟中的代际方差缩减：减轻不必要关联的一种方法——已接收。 *Nuclear Science and Engineering*, 2023。URL https://arxiv.org/pdf/2301.03882.pdf。[54] M. Binois 和 V. Picheny。GPareto：用于帕累托前沿估计与优化的高斯过程。 https://CRAN.R-project.org/package=GPareto 2019 1 1 6 ,。R 包版本 . . 。

[55] M. Binois 和 V. Picheny。GPareto：用于基于高斯过程的多目标优化与分析的 R 包。

Journal of Statistical Software 89 8 1 30, 2019 10 18637 089 08 https://www.jstatsoft.org/ , ( ): – 。doi: 。/index.php/jss/article/view/v089i08 jss.v .i 。URL 。[56] M. Georges。地统计学原理。 *Economic Geology*, 58(8):1246–1266, 12 1963。ISSN 0361-0128。doi: 10.2113/gsecongeo.58.8.1246。URL https://doi.org/10.2113/gsecongeo.58.8.1246。[57] C. K. I. Rasmussen、C. E. 和 Williams。*Gaussian Processes for Machine Learning*。麻省理工学院出版社，11 2005。ISBN 9780262256834。doi: 10.7551/mitpress/3206.001.0001。URL https://doi.org/10.7551/mitpress/3206.001.0001。[58] D. R. Jones、M. Schonlau 和 W. J. Welch。昂贵黑箱函数的高效全局优化。*Journal of Global Optimization* 13 4 455 492, 12 1998 1573 2916 10 1023 1008306431147 , ( ): – 。ISSN - 。https://doi.org/ doi: 。/A: 。URL 10.1023/A:1008306431147 。.

附录 A. 附录

非常简单的输入文件示例，展示了其主要部分（几何、源、计数器）及注释。相应的可视化如图 A.9 所示。此输入文件可用于模拟一种简单的

慢化剂，它位于质子-中子转换器之后，并被放射生物屏蔽层包围。

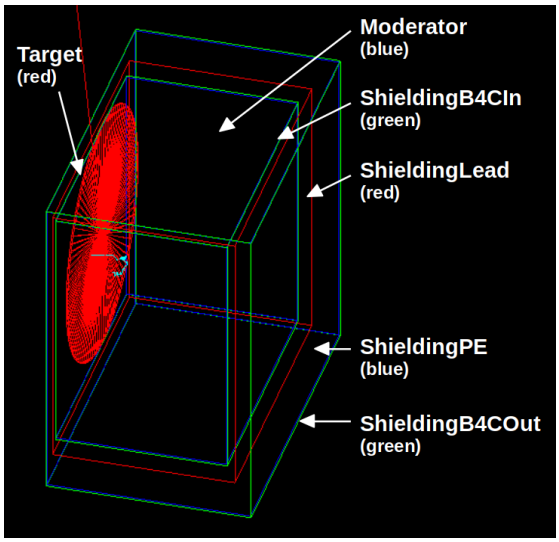

图 A.9： GEANT4 附录中所示输入文件的 TOUCANS可视化。

```
//*****************************************
// TOUCANS input file
//*****************************************

$ 布尔值      GEANT4/可视化                  1                $
$ 字符串      GEANT4/宏                      用户_输入_文件 $
$ 字符串      GEANT4/输出文件名称            用户_输出_文件 $
$ 整数        GEANT4/粒子ToShoot             50000            $
$ 字符串      GEANT4/物理列表                QGSP_BERT_EMZ    $
$ 整数        GEANT4/种子/索引               1156             $
$ 布尔值      GEANT4/步长限制器/实例化       0                $
$ DOUBLE      Geant4/切割/能量               0                $
$ 双          Geant4/截断/范围               0.               $
$ 布尔值      Geant4/检查重叠                1                $
$ 布尔值      Geant4/步进动作/打印           0                $
$ 布尔值      Geant4/交互式会话              0                $
$ 布尔值      Geant4/导出几何GDML            0                $

//*****************************************
// Path to data needed by the simulation
//*****************************************
$ 字符串      数据/目录                 用户_数据_目录_路径 $

//*****************************************
// Mapping
//*****************************************
$ 字符串列表   GEANT4/虚拟映射/列表      MapNeutron      MapGamma $

$ 双精度列表   计分网格0/尺寸            1000 1000       1500     $
$ 整数列表     计分网格0/分箱            100   100       150      $
$ 双精度列表   计分网格0/位置            0.    0. 0.              $
```

$字符串 MapNeutron/网格 计分网格0 $ $字符串 MapNeutron/名称 mapNeutron $ $字符串 MapNeutron/计分器 单元通量 $ $字符串列表 MapNeutron/滤波器/粒子 中子 $ $字符串列表 MapNeutron/滤波器/能区 1E-11 100E-6 $

$字符串 MapGamma/网格 计分网格0 $ $字符串 MapGamma/名称 mapGamma $ $字符串 MapGamma/计分器 单元通量 $ $字符串列表 MapGamma/滤波器/粒子 伽马射线 $ $字符串列表 MapGamma/滤波器/能区 1E-6 20 $

```
//****************************************
// Primary generator
//****************************************
```

$ 整数列表 步进动作/待跟踪粒子/PDG编码 211222$[模拟中仅输运中子和伽马射线]

$ 整数 初级粒子发生器/PDG编码 2112$[发射的粒子类型]

$ 字符串 初级粒子发生器/类型 能量_角度_关联$*///trunk=PrimaryGenerator* $字符串 主干/能量角度采样器 TH2F $ $ 字符串 主干/能量角度采样器/TH2F/路径 用户_ROOT_文件$ $ 字符串 主干/能量角度采样器/TH2F/名称 用户_直方图_名称$

$ 字符串 初级粒子发生器/位置采样器 高斯分布 $ *///trunk=PrimaryGenerator/PositionSampler*$双精度 主干/高斯分布/X方向标准差 1.2 $ $ 双精度 主干/高斯分布/Y方向标准差 0.8 $ $ 双精度 主干/Z深度 0.02 $ $ 双精度列表 主干/全局/位置 0.0.0. $

$ 字符串 初级粒子发生器/动量采样器 受限_极角$ *///trunk=PrimaryGenerator/MomentumSampler*$双精度 主干/受限极角/极角 0 $ $ 字符串列表 主干 / 全局 / 旋转 / 轴 X $ $ 双精度列表 主干 / 全局 / 旋转/角度 0 $

```
//****************************************
// Geomtry - World definition
//****************************************
```

$ 字符串	世界/类型	BOX	$
$ 字符串	世界/材料	G4_银河系的	$
$ 双精度列表	世界/位置	0. 0. 0.	$
$ 双精度列表	世界/尺寸	3000 3000 3000	$
$ 字符串	世界/颜色	黑色	$

```
//****************************************
// Geometry - User own geometry
//****************************************
```

$字符串 几何/实例化/类型 全部_用户 $ $字符串列表 对象/列表靶 外层碳化硼屏蔽 聚乙烯屏蔽

铅屏蔽 B4C内层屏蔽 慢化剂 $

$ 字符串 靶/类型 CYLINDER $ $ 字符串 靶/材料 GRAPHITE $ $ 字符串 靶/母体积 世界 $ $ 字符串 靶/颜色 red $ $ 字符串列表 靶/旋转/轴 X $ $ 双精度列表 靶/旋转/角度 0. $ $ 双精度列表 靶/尺寸 0600.7 $[Rmin, Rmax, Z]$ 双精度列表 靶/位置 20.0.-0.35 $ $ 字符串 聚乙烯屏蔽B4COut/类型 盒体 $ $ 字符串 聚乙烯屏蔽B4COut/材料 BOREFLEX $ $ 字符串 聚乙烯屏蔽B4COut/母体积 世界 $ $ 字符串 聚乙烯屏蔽B4COut/颜色 green $ $ 双精度列表 聚乙烯屏蔽B4COut/尺寸 15215296 $[X, Y, Z]$ 双精度列表 聚乙烯屏蔽B4COut/位置 0.0.48 $ $ 字符串 聚乙烯屏蔽/类型 盒体 $ $ 字符串 聚乙烯屏蔽/材料 POLYETHYLENE $ $ 字符串 聚乙烯屏蔽/母体积 聚乙烯屏蔽B4COut$ $ 字符串 聚乙烯屏蔽/颜色 blue $ $ 双精度列表 聚乙烯屏蔽/尺寸 15115195.5 $ $ 双精度列表 聚乙烯屏蔽/位置 0.0.-0.25 $ $ 字符串 ShieldingLead/类型 盒体 $ $ 字符串 ShieldingLead/ 材料 G4_Pb $ $ 字符串 ShieldingLead/ 母体积 聚乙烯屏蔽 $ $ 字符串 ShieldingLead/颜色 red $ $ 双精度列表 ShieldingLead/尺寸 13113185.5 $ $ 双精度列表 ShieldingLead/位置 0.0.-5 $ $ 字符串 ShieldingB4CIn/类型 盒体 $ $ 字符串 ShieldingB4CIn/材料 BOREFLEX $ $ 字符串 ShieldingB4CIn/母体积 ShieldingLead $ $ 字符串 ShieldingB4CIn/颜色 green $ $ 双精度列表 ShieldingB4CIn/尺寸 12112180.5 $ $ 双精度列表 ShieldingB4CIn/位置 0.0.-2.5 $ $ 字符串 慢化剂/类型 盒体 $ $ 字符串 慢化剂/材料 LIGHT_WATER $ $ 字符串 慢化剂/母体积 ShieldingB4CIn $ $ 字符串 慢化剂/颜色 blue $ $ 字符串列表 慢化剂/旋转/轴 X $ $ 双精度列表 慢化剂 / 旋转 / 角度 0. $ $ 双精度列表 慢化剂 / 尺寸 120120 80 $ $ 双精度列表 慢化剂/位置 0.0.-0.25 $ $ 字符串列表 慢化剂/计分器 CELL_FLUX $