蒙特卡罗方法：重复随机抽样以获得数值结果.在1770年代，Buffon最早使用随机抽样1812 年，Laplace提出了另一种方法
20 世纪初，Kelvin在热力学中使用随机抽样，1930 年代，Fermi发明了一种用于中子慢化研究的蒙特卡洛法
1947 年， von Neumann在给同事的一封信中设计了第一个蒙特卡洛程序解决 ENIAC 上的中子扩散和增殖问题
1947 年，Fermi在机械装置 FERMIAC 上使用蒙特卡罗方法模拟了通过可裂变材料的中子运动

两种续行的方法

显式续行：以&结尾的行表示下一行是续行卡。续行卡可在第1~80列

```
my card &
my card cont'd
```

隐式续行：如果不使用&，续行卡的前五个字符必须是空格

```
my card
     my card cont'd
```

曲面类型	描述	关键字	方程	用户需要提供的参数
平面	通用	P	$Ax+By+Cz-D=0$	A B C D
	垂直于x轴	PX	$x-D=0$	D
	垂直于y轴	PY	$y-D=0$	D
	垂直于z轴	PZ	$z-D=0$	D
球面	通用	S	$(x-x_0)^2+(y-y_0)^2+(z-z_0)^2-R^2=0$	x0 y0 z0 R
	以原点为中心	SO	$x^2+y^2+z^2-R^2=0$	R
无限长圆柱	平行于x轴	C/X	$(y-y_0)^2+(z-z_0)^2-R^2=0$	y0 z0 R
	在x轴上	CX	$y^2+z^2-R^2=0$	R

- 正方向：$f(x,y,z)<0$
- 负方向：$f(x,y,z)>0$

对宏功能体

- 正方向：体表面之外的空间
- 负方向：体表面之内的空间

MCNP中的标志

- 正方向：用曲面ID表示
- 负方向：用曲面ID前加负号表示

概念上的布尔运算	MCNP中的实际语法	要求
交 Intersection (X,Y)	X Y （注意XY之间有一空格）	X,Y 是曲面方向
并 Union (X,Y)	X:Y	X,Y 是曲面方向
补 Complement (Z)	#Z	Z 是栅元

➢ 重要性卡：指定感兴趣区（ROI）

```
imp:par_type par1 par2 ...
```

- 在ROI内继续传输（将imp设为1）
- 在ROI外停止传输（将imp设为0）

CT依据X射线在不同物质中衰减不同的原理，利用多角度的投影数据由滤波反投影算法迭代重建出成像物体的断层图像，能够提供患者的解剖结构信息，具有良好的分辨率
目前CT扫描的患者吸收剂量量化方法主要分为：基于估算的方法、基于实验测量的计算方法、基于蒙特卡罗参考剂量数据的方法以及直接蒙特卡罗模拟计算方法和CT辐射剂量的计算软件
核医学中使用的放射性核素和放射性药物发射的辐射主要包括X射线，γ射线，电子，正电子，β粒子和α粒子。光子相互作用涉及瑞利散射、康普顿散射和光电效应。带电粒子主要考虑原子激发和电离、弹性散射与非弹性散射。正电子输运终点需要产生湮灭光子
质子中心几乎都用笔形束算法。

➢ 对于中子，允许发生10B(n,α)反应的物理模型：

（以MCNPX的语法举例）

```
mode n e p a #
同时允许中子(n)，电子(e)，光子(p)，α粒子(a)和一般的重带电粒子(#)进行输运的模型
phys:n 6j 3
表示对于MCNPX的中子物理选项中，前6个参数使用默认值，第七个参数（recl，表示对轻带电粒子和重带电粒子反冲以及中子俘获重离子算法（neutron capture ion algorithm,NCIA）的控制）设定为3，关闭轻带电粒子的反冲，并使用NCIA算法。
```

➢ 栅元卡的语法

```
cel_id mat_id -den par1 par2 par3 ...
```

- cel_id：唯一的栅元ID
- mat_id：均匀填充该栅元的材料的 ID（材料在数据卡中定义）
- den：材料的密度（以负号为前缀时，密度单位为 g/cm3）
- par1 par2 par3：曲面方向或栅元ID（若是栅元ID，则必须有取补操作）
- 特例：真空（即void）栅元

```
cel_id 0 par1 par2 par3 ...
```

➢ 数据卡用于定义一个或多个传输相关参数

- 材料、源、物理、计数，其它（广泛的功能）

➢ 材料卡：材料定义（对于光子和电子输运）

```
mat_id
     ZA frac plib=xxx elib=yyy
     ZA frac plib=xxx elib=yyy
     ...
```

- mat_id：唯一的材料ID，必须以“m”为前缀
- Z：原子数
- A：原子质量数（A>0），天然存在的元素（A=0）
- frac：重量分数（frac<0），原子分数（frac>0）
- plib=xxx elib=yyy：光子/电子截面库

➢ 如果所有材料都使用同一库中的截面数据

```
m0 plib=xxx elib=yyy
```

```
mat_id
     ZA frac
     ZA frac
     ...
```

➢ 例子：定义水（H_2O）的两种方法

```
m2
     1000  2  plib=84p elib=03e
     8000  1  plib=84p elib=03e
c material ID: 2
c 2 hydrogen atoms, Z=1
c 1 oxygen atom, Z=8
c use naturally occurring element
c use photon library 84p, electron library
```

```
m2
     1000  -0.111894 plib=84p elib=03e
     8000  -0.888106 plib=84p elib=03e
c frac data come from NIST library
c rough double-check:
c A(H2O)=1x2+16x1=18
c f(H)=1x2/18=0.11111
c f(O)=16x1/18=0.88889
```

➢ 例子：点源，单向

```
sdef x=0 y=-50 z=0 par=p erg=1 vec=0 1 0 dir=1
c vec=0 1 0: reference vector
c dir=1: the polar angle cosine of the source
c particle flight vector and the reference vector is
c 1, i.e. the particle moves along the reference
c vector
```

➢ 例子：点源，锥形分布

```
sdef x=0 y=-50 z=0 par=p erg=1 vec=0 1 0 dir=d1
si1 0.5 1
sp1 0 1
c dir=d1: the polar angle cosine follows a
c distribution described in si1,sp1 section
c si1 0.5 1: the polar angle cosine ranges from 0.5
c to 1
c sp1 0 1: the polar angle cosine is uniformly distributed within [0.5,1]
```

➢ 对于中子输运涉及到的材料的核数据库，可以查看上节课指导安装时建立的MCNPDATA文件夹下的readme_data.txt和xsdir文件。

➢ 材料卡：材料定义（对于中子输运）

```
mat_id
     ZA.abX frac
     ZA.abX frac
     ...
```

- mat_id：唯一的材料ID，必须以“m”为前缀
- Z：原子数
- A：原子质量数（A>0），天然存在的元素（A=0）
- frac：重量分数（frac<0），原子数占比（frac>0）
- .abX:和使用的数据库相关的后缀，见上述2个文件

例子：定义BF3：

```
m3 5010.66c -0.143198  $ B-10
   5011.66c -0.006562  $ B-11
   9019.62c -0.85024   $ F-9
```

➢ 例子：定义304不锈钢：

```
m4 24052.66c -0.19     $304 steel
   25055.66c -0.02
   26056.66c -0.695
   28061.66c -0.095
```

$$p(\mu)=\frac{\sigma_\mu(hv)}{\sigma_e(hv)}=\frac{\pi r_0^2}{\sigma_e(hv)}\left(\frac{hv'}{hv}\right)\left(\frac{hv}{hv'}+\frac{hv'}{hv}-1+\mu^2\right)$$

加速器中子源的分类：

- 回旋加速器：容易将束流加速至高能量(>13 MeV)，但是束流的流强比较低
- 静电加速器：能量较低(<3 MeV)，但是可以达到较高流强
- 射频直线加速器：可以连续或脉冲运行，能量范围比较广，比较易得到高流强(>10 mA)，但高能量时其造价比较贵

锂靶：

- 利用的反应：$^7Li(p,n)$(阈能为1.88MeV)
- 在较低质子束能量下,比铍靶具有更高的中子产额
- 达到相同中子产额低能加速器的造价更低
- 中子能量低、易于慢化
- 熔点低,不到180℃,为保持其性能延长其寿命,高功率质子束打在上面所沉积的功率很难传导走
- 靶的辐照损伤导致发泡等现象也是延长靶使用寿命的主要挑战
- 废靶的放射性废物^7Be和氚的半衰期较长,分别为53 d和12.5年,需要特别的处理

铍靶：

- 利用的反应：$^9Be(p,n)$(阈能为2.06MeV)
- 熔点高(1287℃), 热传导性能较好
- 无放射性废物
- 为达到所需要的中子通量,打靶的质子束能量要求较高,大于5 MeV

➢ 计数卡：指定要在哪些空间区域中累计和报告什么物理量

```
tally_keyword:par_type par1 par2 ...
```

➢ MCNP 提供两种类型的计数。所有计数结果都归一化到每个源粒子

1. 标准计数：
   - 大多数计数关键字可以以星号 (*) 修饰符作为前缀，以计数与不带 * 的量密切相关的另一个数量
   - 例子：F8 生成每个粒子的计数与能谱的关系，*F8 生成每个粒子的能量沉积与能谱的关系
2. 叠加网格计数(本课程项目不涉及使用)

➢ 辐射剂量学中常用的标准计数

计数关键字	意义	Unit (不带*)	Unit (带*)
F4	栅元上的平均通量	Particles/cm2/source	MeV/cm2/source
F6	栅元上的平均沉积能量	MeV/g	jerks/g (1 jerk=1e9 J)
+F6	碰撞生热	MeV/g	N/A
F8	脉冲能量沉积	Pulse count	MeV
+F8	电荷沉积	Coulomb	N/A

➢ 例子：

```
f6:p 1 $ energy deposition by photons averaged over cell 1
f18:p 6
ft18 geb 0.00073568688 0.00085954495 0.48984239
e18 0.0 180i 3.005
c 记录6号栅元的脉冲能量沉积（在0到3.005MeV之间插入了180个数据进行计数）
```

$$hv'=\frac{hv}{1+(hv/m_0c^2)(1-\cos\varphi)}$$

$$T=hv-hv'$$

$$\cot\theta=(1+\frac{hv}{m_0c^2})\tan(\frac{\varphi}{2})$$

蒙特卡罗模拟软件：GEANT4,EGSnrc,FLUKA,Penelope,Archer

用蒙特卡罗方法求解输运方程的两种基本方法:用于求解积分的数学技术，物理过程的计算机模拟

大多数的蒙特卡罗理论都是处理固定源问题的，而临界性和反应堆物理计算需要特征值问题

拒绝采样:优点,能处理 F(x)和 F-1(x)复杂的 p(x),代价,不合适的 cg(x)选择带来高拒绝（低接受）率,计算 pmax 的额外复杂性

高能情况下散射光子的趋前性十分明显//

MCNP6 在高能粒子模拟方面有较大的发展，提高了其在稀有同位素生产、空间辐射屏蔽、宇宙射线以及加速器领域的可靠性。

MCNP5 只能模拟光子、电子和中子的输运；MCNPX 新增了对重带电粒子的输运功能，如果要模拟 BF3 计数管的壁效应，必须用 MCNPX

可交互式 MCNP 由三部分组成:可执行文件、截面数据、杂项（文档、示例）

一个 MCNP 输入文件由三个板块的卡组成:栅元卡 Cell cards,曲面卡 Surface cards,数据卡 Data cards

MCNP 中：长度单位是 cm；能量单位是 MeV；质量单位是 g；密度单位是 g/cm3；剂量单位是 MeV/g

历史截止卡：指定源粒子的数量 nps number

F18 计数卡结果从左往右 E、dN/dE、计数的相对误差

FT18 GEB 0.00073568688 0.00085954495 0.48984239 这一行表示对 F18 计数卡的结果进行了高斯展宽

如果想要实现对栅元 4 上的光子的平均通量的计数，可以使用的语句是 F4:P4

该输入文件希望模拟中子的输运，那么需要在材料卡中指定核素的质量数和选取的核数据库

MCNP5 不能模拟α粒子//

BNCT:富集10B的靶向药物与中子(n,a)反应,指向性超热中子束(核反应堆粒子加速器),a 粒子和 Li7 杀伤范围单个肿瘤细胞 5-9um,1-2 次照射 1-2d 治疗性价比高，布拉格峰是质子，1935 年 Tylor 和 Goldhaber 提出硼中子俘获反应，查德威克 1932 发现中子获得 1935 诺贝尔奖，早期使用的 B 药物缺乏靶向性是美国 1961 年中止 BNCT 临床研究的重要原因,60-80 年代受制于反应堆中子源的通量和穿透深度限制 BNCT 的研究仍未能普及推广使用，再次低谷：反应堆不可普及性、全球反核热、经费问题天灾管理不善，允许α粒子和重带电粒子输运以模拟壁效应

加速器 BNCT 中子源的核心技术涉及：加速器的种类、靶材料、束流整形器(BSA)

1.下面关于BNCT的原理正确的是
A. BNCT利用的核反应是B11与中子的(n,α)反应
B. BNCT需要使用能在肿瘤富集B-11的靶向药物
C. BNCT利用的α粒子和Li-7粒子的杀伤范围能达到5-9μm
D. 给患者注射B药物后，需要使用指向性的快中子束进行照射

2.下面有关BNCT的优势和特点说法正确的是
A.BNCT不是细胞级精准放疗技术
B.BNCT一般只需要1~10次照射，1天~2周的治疗时间
C.BNCT的优点包括治疗疗程较短，治疗性价比较高
D.BNCT利用中子的布拉格峰可以对靶区实现较好的剂量分布

3.下面有关BNCT的发展说法正确的是
A.1937年，Tylor和Goldhaber提出了著名的硼中子俘获反应
B.1936年，查德威克（James Chadwick）因为提出了BNCT的原理获得诺贝尔奖
C.早期使用的B药物缺乏靶向性是美国1961年中止BNCT临床研究的重要原因
D.上世纪60-80年代，受制于当时加速器中子源的通量和穿透深度限制，BNCT的研究仍未能普及推广使用

4.下列属于BNCT的中子照射系统的是
A.先进加速器中子源
B.周边支持系统
C.治疗计划系统
D.以上都属于

5.在用MCNP模拟硼中子俘获反应的时候，如果设置mode n e p a #，则下列说法正确的是：
A.符号p表示允许质子输运
B.符号e表示允许光子输运
C.符号n表述允许中子输运
D.如果想要模拟壁效应，不需要加上a和#

➢ 源卡：源定义

```
sdef par1 par2 par3 ...
```

➢ MCNP 为源定义提供了极大的灵活性

- 源位置：点、平面、体积源
- 源方向
- 源类型（par=1 中子；2 光子；3 电子）
- 等

➢ 例子：各向同性，点源

```
sdef x=0 y=-50 z=0 par=p erg=1
c x=0 y=-50 z=0: a point source is placed at (0cm,-50cm,0cm)
c source direction is isotropic by default
c par=p: the type of source particle is photon
```

6.关于BNCT反应堆中子源逐步退出的原因说法错误的是
A.反应堆的不可普及性
B.全球反核热
C.经费问题、天灾、管理不善
D.反应堆中子源不能提供“超热中子”或“超热中子与热中子混合束”

7.目前加速器中子源不包括下面哪一种加速器
A.回旋加速器
B.静电加速器
C.射频直线加速器
D.医用电子加速器

8.有关BNCT加速器中子源的靶材说法错误的是
A.靶材主要包括Li-7和Be-9
B.锂靶的优势包括在较低质子束能量下,比铍靶具有更高的中子产额
C.如果选用锂靶，则废靶不会有放射性废物
D.铍靶的优点包括熔点高，热传导性能较好

9.下面有关核事故模拟分析是不正确的：
A. 核电站事故可以用虚拟现实（Virtual Reality，VR）和蒙特卡罗方法相结合来建模
B. 福岛核电站的VR三维模型不准确
C.日本福岛核电站事故的直接原因是海啸（Tsunami）
D. 核事故中工人的姿态也是可以重建模拟的

10. 下面有关空间辐射防护是正确的：
A. 深空辐射防护研究已经很成熟
B. 深空辐射防护不考虑中子
C. 月球是人类开展深空探测的前哨站
D. 空间辐射防护一般不会使用蒙特卡罗模拟

每个电子将光子散射到φ角处的单位立体角的微分截面（单位为$cm^2 \cdot sr^{-1}$/电子）

$$\frac{d_e\sigma}{d\Omega_\varphi}=\frac{r_0^2}{2}\left(\frac{hv'}{hv}\right)^2\left(\frac{hv}{hv'}+\frac{hv'}{hv}-\sin^2\varphi\right) \quad (5\text{-}1)$$

其中：$r_0=e^2/m_0c^2=2.818\times10^{-13}$cm，被称为“电子经典半径”。
hv，hv'分别代表入射光子和散射光子的能量
环形立体角元可以由右式给出：$d\Omega_\varphi=2\pi\sin\varphi d\varphi$

计算RSD的公式：

$$=\sqrt{\frac{n}{n-1}\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i^2)}{\left(\sum_{i=1}^{n}(x_i)\right)^2}-\frac{1}{n-1}}$$

生成均匀分布变量ξ_1

$$\mu_0=2\xi_1-1$$

生成另一个均匀分布变量ξ_2

比较 $\xi_2\le\frac{p(\mu_0)}{cg(\mu_0)}=\frac{K\left(\frac{E'}{E}\right)^2\left(\frac{E}{E'}+\frac{E'}{E}-1+\mu_0^2\right)}{2K}$

即 $\xi_2\le\frac{\left(\frac{E'}{E}\right)^2\left(\frac{E}{E'}+\frac{E'}{E}-1+\mu_0^2\right)}{2}$

- 若是，接受μ_0，return
- 若否，拒绝μ_0，返回步骤1

蒙特卡罗程序-TOPAS

- TOPAS（Toolkit for Particle Simulation）是一款先进的蒙特卡洛蒙特卡罗模拟软件，主要用于放射治疗的模拟，包括X射线和粒子治疗。TOPAS的开发始于一项由美国国立卫生研究院（NIH）资助的项目，合作方包括美国SLAC国家加速器实验室、马萨诸塞州总医院和加利福尼亚大学旧金山分校。该项目在2018年6月至2023年5月期间得到了NIH ITCR的U24资助。
- 尽管TOPAS的早期应用主要在质子治疗中，但现在已经被应用于所有领域的放射治疗研究，也适用于某些医学成像应用、电子设备的辐射损伤、粒子物理、核物理和天体物理等领域。目前正在进行的工作包括将TOPAS扩展到辐射生物学和科学教育等其它潜在应用中。
- TOPAS软件包装并扩展了Geant4通用蒙特卡罗程序包，用户可以使用预先构建的组件（如喷嘴、病人几何形状、剂量测量和成像组件等）来模拟各种类型的放射治疗，而无需了解底层的Geant4模拟工具包或任何编程语言。目前TOPAS的最新版本是3.9，并且该版本的TOPAS是开源的。

蒙特卡罗软件-MCNP

- MCNG：二十世纪50年代至60年代间，LANL发展了一系列用于特殊用途的蒙特卡罗程序，包括MCS、MCN、MCP和MCG。1973年，通过融合三维中子输运程序MCN和输运程序MCG，形成了MCNG程序。
- MCNP：1977年，MCG与光子输运程序MCP结合，诞生了MCNP。MCNP早期的含义是Monte Carlo Neutron Photon。1983年，MCNP3通过美国橡树岭辐射安全信息计算中心（RSICC）向公众发布。1990年，MCNP程序中加入了电子输运，该部分来自圣地亚国家实验室发展的Integrated TIGER Series (ITS)，此时MCNP的含义变成了Monte-Carlo NParticle。自此之后MCNP程序不断发展，包含了越来越多的粒子类型。
- MCNPX：1996年, LANL的LAHET程序被加入到MCNP4B中，产生了“Many-Particle MCNP Patch”。多粒子输运经过持续发展，形成了一个单独的程序MCNPX。
- MCNP5：2001到2002年间，基于现代语言Fortran 90，MCNP4C程序经过了完全的改写，并通过结合MPI和OpenMP实现了并行化，产生了MCNP5。
- MCNP6：2006年7月开始了MCNPX 2.6.B和MCNP5的融合工作，产生了最新的MCNP6。MCNP6在高能粒子模拟方面有较大的发展，提高了其在稀有同位素生产、空间辐射屏蔽、宇宙射线以及加速器领域的可靠性。
- 目前MCNP最新的版本是MCNP6.2。MCNP6.3正在开发中，可以提前预览手册。
  LANL官网：https://mcnpx.lanl.gov/manual.html

MCNP5只能模拟光子、电子和中子的输运；MCNPX在MCNP5的基础上新增了对重带电粒子的输运功能，MCNP6则在两者的基础上有了进一步的发展，如果要模拟BF3计数管的壁效应，必须用到MCNPX或MCNP6

蒙特卡罗方法在外照射放射治疗的应用：质子和重离子放疗

- 相比于传统光子或者电子线放疗，质子与重离子(质量数大于1的离子)束流在深度剂量分布上具有优势——布拉格峰(Bragg peak)
- 利用该特性可以使得剂量在肿瘤靶区内大量沉积，很好地保护束流路径上肿瘤末端的正常器官。再结合已有的调强适形放疗技术，可以进一步提高放射治疗的效果同时降低危及器官的剂量。
- 但由于质子的Bragg峰在末端的剂量梯度非常陡峭，因此对可能引入的误差，尤其是剂量计算误差，非常敏感，尤其是在剂量计算方面。
- 临床上质子放疗的病人治疗计划设计以及剂量计算都是通过TPS来实现的，但目前大多数TPS都采用了解析笔形束算法，只有少数采用了简化的蒙特卡罗算法

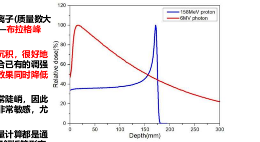


图12.7 6MV光子与158MeV质子在水中的深度剂量分布曲线

蒙特卡罗方法和计算人体模型在辐射防护剂量学的应用

为了更精确地评估职业人员的辐射剂量，我们需要利用最先进的数字化人体模型来模拟和计算。这些模型的发展在过去几十年中已经取得了显著的进步，近60年来计算体模的数量呈指数规律增长。数字人体模型可以按年代分为三代：
①基于二次方程式构建的程式化体模（Stylized phantom）（1960年到2000年）；
②基于断层扫描图像构建的体素化体模(Voxel phantom)（1980年至今）；
③基于非一致有理B样条(NURBS，Non-Uniform Rational B-Splines)或者三面体网格(Triangular Mesh)构建的可变形边界表征（BREP，boundary representation）体模（2000年至今）。
如今，数字体模已经发展到支持对成年男女、孕妇、儿童、肥胖者等各类人群的模拟，此外还有具有中国人特征的体素体模，如CVP、CNMAN、VCH、CRAM和CRAF、USTC等。未来，根据工作人员的影像解剖信息构建的个体化体模有望进一步降低人体建模带来的剂量计算的不确定性。

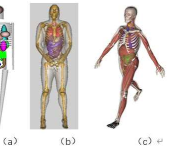


图11.26 用于蒙特卡罗剂量计算的三代计算机人体体模：（1）程式化体模；（2）体素化体模（图中用光滑表面展示）；（3）BREP体模

蒙特卡罗程序-MCNP

- MCNP(Goorley et al 2013)(Goorley et al 2014), 即Monte Carlo N-Particle Code，是由美国洛斯阿拉莫斯国家实验室(LANL)的蒙特卡罗程序小组开发的一个通用蒙特卡罗粒子输运程序。该程序包可以对37种不同粒子和任意重离子的输运问题进行模拟。
- 早在二十世纪40年代，LANL便开始了基于蒙特卡罗方法的粒子输运程序的开发。Drs. Stanislaw Ulam、John von Neumann、Robert Richtmyer、Nicholas Metropolis等人一起在第一代计算机上研究了中子输运问题。
- 1947年3月，John von Neumann 给当时LANL理论物理部的负责人Robert Richtmyer写信提出了使用统计方法计算裂变装置中的中子扩散和增殖问题的思路，第一代电子计算机上的蒙特卡罗计算由此诞生。
- 1947年, 在LANL工作的费米发明了一个叫做FERMIAC11的装置，并在其上实现了基于蒙特卡罗方法的对可裂变材料中的中子运动进行追踪。

蒙特卡罗程序-PHITS

- PHITS（Particle and Heavy Ion Transport code System）是一款由日本原子能研究开发机构（JAEA）、放射性同位素研究开发机构（RIST）、高能加速器研究机构（KEK）以及其他几个机构合作开发的通用蒙特卡罗粒子传输模拟代码。
- PHITS可以处理中子、质子、离子、电子、光子等在1e-4 eV到1 TeV/n内的输运和碰撞，采用了多种核反应模型和核数据库。PHITS的核心数据库包括JQMD（JAERI量子分子动力学模式）和JENDL（日本评价核数据库）等。JQMD可以动态模拟核反应的时间演化，考虑每组核子之间的关联。这对于模拟离子诱导的核反应至关重要。JENDL-4.0为407种同位素提供20 MeV以下的中子截面，JENDL-4.0/HE为25种同位素提供200 MeV以下的中子和质子截面。
- PHITS支持MPI和OpenMP并行化，还提供了用户友好的界面和图形输出工具，如ANGEL、PHIG-3D等，这些工具可以帮助用户直观地理解模拟结果。此外，PHITS还提供了各种有用的功能和工具，如RI和宇宙射线源、RT-PHITS、微剂量函数等，这些功能和工具可以满足各种不同的模拟需求。
- 在实际应用中，PHITS已经被广泛应用于加速器技术、辐射设施的设计、放射治疗空间辐射等领域，如日本的多个机构开发的用于硼中子俘获治疗的治疗计划系统都外接PHITS进行剂量计算。

蒙特卡罗程序-EGS

- EGS (Electron Gamma Shower)是一个通用的电子-光子输运计算程序包(Rogers 2006)。该程序最早是由美国国家加速器实验室（SLAC）开发的。Bielajew 等人于1994年对EGS程序的早期发展历程进行了总结与回顾。
- 美国国家加速器实验室的Ralph Nelson早期关于EGS的工作，诞生了后来的EGS3、EGS4/PRESTA 以及现在的EGSnrc 程序系统。
- 为了扩大EGS3程序的能量适用范围，Ralph Nelson 与来自加拿大国家研究委员会（NRC）的Roger以及日本高能物理中心的Hideo Hirayama (KEK)一起合作，于1985年发布了EGS4程序。
- 基于用户的反馈，EGS的开发者们发布了EGS用户程序BEAM，用来模拟医用放射治疗加速器。BEAM程序是基于之前Pett和Udale的加速器模型产生的。BEAM程序和相关的软件是于1995年发布的，并在之后有持续的发展。BEAM程序现在可以在网上申请用于非商业用途。
- 后来，来自NRC的Kawrakow对电子——光子输运进行了重要改进并于2000年发布了EGSnrc程序。EGSnrc程序提高了带电粒子输运机制和原子散射截面数据的准确度。并采用了C++几何库来定义复杂的源和输运环境。EGSnrc还提供了基于BEAM程序发展的BEAMnrc组件。

蒙特卡罗方法在外照射放射治疗的应用：质子和重离子放疗

（1）设备与射束建模

为满足质子放射治疗对射野的要求，首先需要对质子束流在横向上进行拓展。此外肿瘤具有一定的厚度。而单个质子束斑的Bragg峰非常尖锐，无法在深度上覆盖整个肿瘤区域，沿深度方向的拓展也必不可少。目前实现质子适形调强治疗需要对于质子主要有被动散射和主动扫描两种思路。

a.被动散射模型

被动散射方法中束流的横向散射是通过初级散射体(First Scatterer, FS)和次级散射体(Second Scatterer, SS)实现。沿深度方向的拓展则一般通过射程调制轮(Range Modulation Wheel, RMW)或者脊形过滤器来实现。2019年中国科学技术大学博士生刘红冬在TOPAS中搭建了被动散射加速器模型

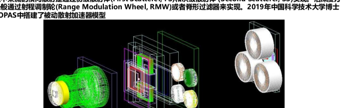


图12.8 中国科学技术大学博士生刘红冬在TOPAS完成的Universal Nozzle被动双散射模型三维可视化结果

空间辐射防护的挑战和需求

载人深空探索任务中的空间电离辐射环境问题是一个重要而复杂的挑战，涉及去往地球磁层外的深空旅行者和未来月球/火星居民的安全。深空中的电离辐射主要包括银河宇宙射线（Galactic Cosmic Ray, GCR）和太阳高能粒子（Solar Energetic Particle, SEP）两大来源，以及月球火星表面的反照粒子和其它次级粒子。

- 银河宇宙射线（GCR）：源于银河系中的超新星爆发，由能量从小于1 MeV/nuc到高达TeV/nuc以上的带电粒子组成，其主要成分是高能质子和重离子。
  - 流量相对稳定，但能量极高，难以屏蔽，对于长期的空间任务来说具有较大的累积辐射危害风险。
- 太阳高能粒子（SEP）：起源于太阳表面的爆发，例如日冕物质抛射或太阳耀斑事件可以加速太阳粒子抛射到行星际空间。
  - 主要是质子（90%以上）和电子，其次是α粒子，另外还有少量Z＞2的粒子；
  - 能量从几个keV/nuc到几百个MeV/nuc（偶尔也会达到1-2 GeV/nuc）；由于其突发性、多变性和不可预测性的本质，其流量和辐射量会在短时间内比背景的GCR通量高出几十甚至上万个量级。

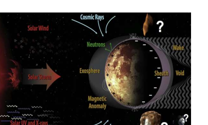


图11.26 深空辐射环境包括银河宇宙射线（Galactic Cosmic Ray, GCR）和太阳高能粒子（Solar Energetic Particle, SEP）两大来源

Sarov核事故模拟

我们以1997年俄罗斯Sarov核电中心发生的临界事故为例介绍一种使用蒙特卡罗方法来重建临界核事故中工作人员的辐射剂量的方法。

- 在事故当天的早晨，该名技术人员正在尝试复现一个临界实验，在构建反射器的过程中，内壳的上半部分（厚度为0.8厘米）过早地接触了下半部分，触发了临界。事故发生时，该技术人员感到极度不适，出现恶心、血压升高。经过首次辐射暴露后约66.5小时，他最终因心力衰竭而去世。
- 在事故后进行的一系列测量和尸检研究基础上，估算了受害者接受的中子和光子剂量。整体来说，全身平均剂量估计为14±4 Gy。尸检进一步评估了骨髓剂量，包括胸骨至少15 Gy，左侧髂前嵴10-15 Gy，右侧髂后嵴6-7 Gy，以及第四胸椎大约6 Gy。

图11.13 文献报道的发生临界时技术人员的可能姿势

蒙特卡罗程序-PENELOPE

- E.PENELOPE(Salvat 2003) (Salvat 2014) (Salvat 2015)是一个用于正负电子—光子输运模拟的Monte Carlo程序包，它可以模拟50 eV到1 GeV能量范围内的正负电子—光子输运问题。PENELOPE程序采用混合模拟法对正负电子与介质的相互作用进行模拟，这些作用包括了正负电子的弹性散射、非弹性散射、韧致辐射、原子内壳层电离以及正电子湮没等。而对光子与介质的相互作用如相干散射（Rayleigh散射）、非相干散射（Compton散射）以及光电吸收、正负电子对效应等则采用详细模拟的方法。PENELOPE程序是用FORTRAN语言编写的基于一系列子程序的大型程序包。程序体的核心是一个叫做PENELOPE.f的子程序，负责在均匀物质中产生电子-光子簇射。Rita.f和penvared.f这两个子程序包分别包含了随机抽样的通用工具以及减小方差技术。PENELOPE程序提供了一个叫做PENGEOM的子程序包来实现由二次曲面定义的均匀几何体构建。PENELOPE程序包还包含了在电磁场中追踪电子和正电子的子程序。此外，PENELOPE还提供了工具用于产生不同物质的截面以及其他反应数据。PENELOPE程序开始于一个主程序，该程序引导控制对粒子轨迹的追踪以及相关数据的存储。通常来讲用户需要自己提供主程序来与其想要解决的问题匹配。PENELOPE程序提供了三个主程序例子，包括通用主程序penmain.f，用于平板结构模拟的penslab.f以及用于多层圆柱体结构模拟的pencyl.f。这几个主程序能够满足大部分普通用户的需求，用户只需要编写相应的输入文件即可。
- PENELOPE程序是由经济合作与发展组织(OECD)的核能署(NEA)发布和维护的，其第一个版本发布于1996年。从那以后，PENELOPE程序经历了多次发展，包括物理相互作用模型、抽样算法、几何描述和减小方差技术等方面。新版的PENELOPE程序使用了更可靠的电子/正电子碰撞的内壳层电离截面数据。还发展了一种更复杂的输运机制算法来产生软碰撞事件的位移和能量转移，这种方法称为random hinge方法。此外，PENELOPE程序还引入了模糊二次曲面来构建几何结构。新版的程序在精度和可靠度上有了进一步的提升。相较于其他蒙特卡罗粒子输运程序而言，PENELOPE程序包含了更为详尽的低能输运截面数据以及灵活的几何建模功能。现在PENELOPE已经发展为一个灵活可靠的工具用于模拟复杂几何体中的电子-光子输运问题，在剂量学、放射治疗、电子探针微区分析等领域有广泛的应用。目前最新的版本是PENELOPE2014。

蒙特卡罗程序-EGS

- Ralph Nelson建立的EGS程序系统是一个开放软件，任何以科研为目的的个人或组织都可以申请使用。申请者得到源程序的同时也可以获得大量的文档资料以供查阅。成千上万的研究者获得了EGS4程序并将其广泛应用在各研究领域，这些工作对EGS程序本身起到了标定和验证其可靠性的作用。此外，通过程序使用者的反馈，也使EGS程序得到不断的修正和改进。这种开放式软件的模式在现在已成为一种普遍现象。
- EGS系统能够获得成功的另一个原因是定期的EGS培训班的开设。早在1986年EGS4刚发布不久，EGS4的开发者们就在NRC开办了第一届培训班。参与培训的26个学生中至少有8个在后来成为了其部门或者实验室的负责人。培训班除了教授学生如何使用该程序之外，也使发布者有机会了解到用户的需求，便于程序的进一步发展。

蒙特卡罗方法在后装机近距离治疗中的应用

背景介绍

- 内照射放射治疗，又称近距离放射治疗(Brachytherapy)，是通过腔道或组织内植入将密封放射源贴近或直接进入肿瘤部位以照射肿瘤组织。由于剂量随着与放射源距离的增加迅速跌落，近距离治疗能够给予肿瘤高剂量的同时避免对于正常器官的过度照射，有利于肿瘤的局部控制，在宫颈癌、阴道癌、直肠癌等靠近天然腔道的疾病治疗中具有独到优势。
- 内照射放疗具体实施方式主要分为组织间近距离放疗和腔内近距离放疗两种。
  - 组织间近距离放疗：利用插植针或导管将放射源临时性放置或永久植入靶区内，主要使用的放射源包括I-125, Pd-103和Au-198等短半衰期低能同位素粒子。
  - 腔内近距离放疗：利用人体的天然腔道通过施源器将放射源放置于靶区附近进行治疗，目前临床主要使用高剂量率CT引导的192Ir远程后装。除以上常规治疗，内照射放疗的应用场景还包括乳腺癌、脑膜瘤等的术中放射治疗，即利用手术开口，在手术过程中一次性给予肿瘤或瘤床大剂量照射。
- 考虑到Ir-192源管理和更换的不便，部分中心使用电子X射线源代替Ir-192，称为X射线近距离放射治疗（X-ray Brachytherapy，XRB）。Xoft的Axxent系统将50kVp微型X射线源放置在线缆末端。该X射线源和Ir-192源一样，能够在施源器管腔指定驻留位置驻留一定时间。相较于Ir-192源，Axxent系统对屏蔽的要求更低，管理更简单，但是其尺寸无法通过插植针或间质导管，仅能应用于腔内近距离治疗。其他电子X射线源系统也有类似的尺寸限制问题，目前仅应用于腔内近距离治疗、皮肤等浅层肿瘤治疗或术中放射治疗中。

月球和火星表面辐射环境

- 月球和火星等表面辐射环境复杂，缺少磁场和大气的防护，且银河宇宙射线和太阳高能粒子事件与月壤作用均可能发生核反应，产生大量的次级粒子，包括带电粒子以及中子和γ射线
- 在月球表面，土壤中产生的向上反照辐射是区分月球辐射场和空间辐射场的重要参数。产生的次级粒子是月球表面中子最主要的来源。月壤中的次级中子的能量范围可以从小于1MeV/nuc到几百MeV/nuc以上，且次级中子也会与土壤碰撞而损失能量，逃逸出月球表面的方向向上的中子既可能有热中子（小于100keV）又会有快中子（MeV量级），这些次级中子是月球辐射防护领域非常令人关注的物理量
- 银河宇宙射线和太阳高能粒子初始粒子在穿过深空中的飞船卫星或者行星大气以及土壤时，会和物质发生电离相互作用和核反应，通过电离辐射、核裂变、核衰变以及撞击核破碎等过程而产生不同能量和种类的次级粒子，从而引发辐射环境的变化。由于核反应过程与入射粒子的能量种类以及穿过物质的特征和强度都有很大关系，有时物质的“屏蔽”反而会适得其反，造成屏蔽后辐射环境的恶化，尤其是在有大量次级中子生成的情况下。中子不受电磁场影响，可持续引发次级粒子高能粒子辐射。另外，突发的极高强度的SEP（在短时间内辐射剂量达到了约1 Gray的量级后）也会引发急性辐射临床症状，包括眩晕、呕吐、辐射中毒等。如若不能及时治疗，甚至会对宇航员造成致命的危害。

Sarov核事故模拟

- 在2014年我们为了重建Sarov临界事故过程中在世界上率先使用了动态捕捉工具来建立一个动态人体计算模型CHAD。
- 我们请一位学生按照文献中能查到的信息来模仿技术人员的事故中的姿势，以及事故后从事故现场快速撤离的动作。这个姿势和随后的动作显示为8个时间步长帧，并且在我们以前开发的一款非动态体模的基础上设计了供蒙特卡罗计算的动态CHAD体模。
- 蒙特卡罗计算里面使用的中子能量分布来自MCNPX内置的lMeV快裂变瓦特谱，假设每次裂变的平均中子产额为2.43，每次裂变产生的γ当量为8.13.γ能谱来源文献。我们使用MCNPX分别对每一帧的中子源和光子源进行了模拟，并对计算得到的器官剂量按照ICRP方法进行计算分析。中子剂量以中子kerma计算并与已发表的估计进行比较，同时也根据ICRP能量相关辐射加权因子进行修正，以确定剂量当量。

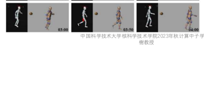


图11.14 使用动态捕捉获得的连续帧图以及相应的CHAD蒙特卡罗计算动态体模的运动序列

蒙特卡罗程序-SuperMC

- SuperMC是中科院核能安全技术研究所FDS团队自主开发的一套核设计与安全评价软件，可用于核反应堆设计、辐射物理计算、医学物理模拟、核探测和高能物理仿真研究等领域，其定位为支持输运(稳态、动力学)、燃耗(同位素燃耗、材料活化停堆剂量等)、多物理耦合(热工水力学、燃料性能、结构力学等)等的高效能精细模拟计算，集几何与物理自动建模、计算、结果与过程可视化分析于一体，并由数据库和云计算框架支撑
- 已应用于国际热核聚变实验堆ITER、中国铅基反应堆CLEAR的核设计与分析中。基于SuperMC创建了系列ITER三维标准中子学计算模型，并开展了ITER基准模型的包层、偏滤器、纵场线圈、赤道口等关键部件的中子学计算及可视化分析。

蒙特卡罗程序-FLUKA

- FLUKA（Battistoni et al 2006）是一个通用的粒子输运蒙特卡罗模拟程序包，被广泛应用在质子和电子加速器屏蔽设计、剂量学、探测器设计、加速器驱动系统、宇宙射线、中微子物理和放射治疗等领域。FLUKA程序最早的工作可以追溯到1962年。1962至1967年间，在Hans Geibel和Lothar Hoffmann的指导下，Johannes Ranft在欧洲核子中心（CERN）从事强子级联方面的研究工作，并发布了第一个高能物理蒙特卡罗输运程序。根据Ranft个人的整理，可以将FLUKA程序的发展分成三代，分别为70年代、80年代和现代的FLUKA程序。这些程序都始于同样的源头，并且每一代程序都是基于上一代的工作。但FLUKA程序每一代都不只是对已有程序的改进，而是在程序的物理设计和目标上都有巨大的突破。尽管为了显示其历史沿革和发展，每一代程序依然沿用“FLUKA”这个名字，但目前的FLUKA程序已经和1990年以前发布的版本截然不同，并且比之前的版本强大许多。
- FLUKA可以对约60多种粒子与物质的相互作用进行精确地模拟。包括从1 keV到数千TeV的电子和光子、低至热能区的中子、重离子、中微子、任何能量的介子、20 TeV以下的强子（FLUKA程序结合DPMJET程序可以模拟高达10 PeV的强子）及其所有相应反粒子。FLUKA程序还可模拟极化光子（如同步辐射）和可见光光子。基于著名的Combinatorial Geometry (CG) 程序包，FLUKA程序可以处理非常复杂的几何体。FLUKA CG可以正确的追踪带电粒子，并能够对电磁场中的粒子进行模拟。
- 对大多数应用而言，用户不需要对FLUKA程序进行改动。用户可以采用卡片式输入方法，采用一定的格式输入各项参数即可生成用于模拟计算的输入文件。对于特殊的用户需求，FLUKA也提供了用户界面程序供用户使用，并提供了很多用于FLUKA程序的调试和可视化工具。

蒙特卡罗方法在BNCT中的应用

MC方法在BNCT中的应用

（1）蒙特卡罗方法用于BNCT的剂量学研究

对BNCT的剂量学研究很早就开始，下面列举了一些BNCT的剂量学研究工作:

- 2001年，为了给其他研究者或治疗计划系统的开发提供参考剂量数据，美国麻省理工学院的Goorley等人使用MCNP4B和头部的体模（Snyder head phantom）对不同体素尺寸、不同入射中子能量、不同γ射线能量的条件进行了模拟，研究了BNCT的剂量分布。蒙特卡罗方法同样在BNCT的微剂量学研究中发挥着重要的作用。
- 南京航空航天大学的韩阳、耿长冉等人基于Topas-nBio工具包完成蒙特卡罗径迹结构模拟（Monte Carlo track structure, MCTS），以研究BNCT的相对生物效应（RBE）的复杂性质和DNA损伤机制。
- 日本筑波大学的Horiguchi等人研究建立了一种新的方法，基于微剂量学动力学（microdosimetric kinetic, MK）模型，估计四种主要BNCT剂量成分的RBE。该方法采用亚细胞结构中线性能量的概率密度y作为表达RBE的指标，可以利用PHITS中的微剂量学函数来计算。
- 多种可用于BNCT微剂量学研究的程序工具如NOREC, PARTRAC, Geant4-DNA, Phits-KURBUC在开发中。

蒙特卡罗方法在核医学诊疗的应用

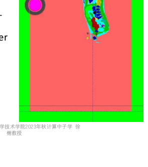
背景介绍：PET成像

- 核医学成像技术探测放药物衰变发射的粒子的位置、数量或能量以提供关于病变的位置、大小、代谢活动以及器官功能的信息，在临床实践中广泛应用于癌症、心脏病、神经系统疾病等多种疾病的诊断和评估。目前三维核医学成像技术主要通过发射型CT（Emission Computed Tomography, ECT）实现。其图像重建原理类似于CT。
- PET成像，即正电子发射断层成像，是目前临床应用最广泛的ECT技术之一
- 显像原理：标记有能够发射正电子的放射性核素的药物注入到人体后通过血液循环经器官参与人体组织代谢，特异性地聚集于靶器官或靶组织。过程中放射性核素衰变发射出正电子。正电子在体内负电子发生湮灭，产生两个能量相等（0.511MeV），方向相反的γ光子。若两个γ光子穿过人体就会几乎同时进入PET环形探测器中。当两个探测器几乎同时探测到两个互成180度（±0.25度）的光子时，进行一次符合事件计数，即确认了一次衰变所在的直线位置，通过对符合事件统计和处理可以得到人体内部放射性核素的分布图像，从而获得人体的代谢活动强度分布信息。

图11.4 PET系统捕获湮灭反应原理示意图

Simulating the Sarov Accident

- CHAD model and assembly model incorporated into MCNPX code
  - F4 tally paired with flux-to-dose conversion factors to determine dose/kerma at dosimeter locations
  - F6 tally used to determine dose equivalent to tissues
    - Paired with radiation weighting factors



蒙特卡罗程序-JMCT

- JMCT(JMonteCarloCode)软件是北京应用物理与计算数学研究所和中物院高性能数值模拟软件中心（以下简称：软件中心）共同开发的一款通用三维蒙特卡罗粒子输运模拟软件，具有自主知识产权JMCT软件的定位是：面向核能领域对粒子输运高分辨率数值模拟软件的需求，基于高性能并行计算，致力于核反应堆物理与几何材料的精细建模与模拟，为反应堆堆芯物理分析、临界安全分析、屏蔽设计等提供系统解决方案，同时也可对确定论程序及算法进行参考验证等。
- JMCT软件成功应用于巴基斯坦卡拉奇K2/K3核电项目相关的临界安全分析的工程设计中，支持了我国自主研发的第三代核电堆型华龙一号的出口项目，后者将JMCT作为核电软件的验证考核标准程序之一。JMCT还得到了科工局核能开发科研项目和能源局大型先进压水堆核电站重大专项支持，用于第三代＋核电堆型CAP1400的屏蔽安全设计。总之，JMCT软件已经获得了我国核电领域用户的初步认可，正在为我国核电软件自主化贡献一份力量。

蒙特卡罗程序-GEANT4

- GEANT4（llison et al 2006)(Geant4 Collaboration 2015)是用C++语言开发的采用面向对象技术构建的蒙特卡罗通用程序包，被广泛应用于高能物理、核物理与加速器物理、医学物理以及空间物理等领域。GEANT4程序包是由欧洲核子中心和日本高能物理中心(KEK)主导,共有20多个机构,几十位科学家参加编写。GEANT4可以精确地模拟多种粒子类型穿过物质的输运过程，这些粒子类型几乎涵盖了目前所有已知的粒子，包括电子、质子、γ等普通粒子，氚核、α等原子核以及夸克、胶子等。GEANT4程序提供了完备的工具包用于各领域的探测器模拟，包括几何建模、追踪、探测器响应、可视化和用户界面等。该工具包适用于多学科领域，提供了丰富的物理过程来处理不同能量不同粒子与物质的相互作用过程，包括多种物理过程的模拟，包括电磁相互作用、强相互作用、可见光过程、光核反应、粒子输运过程，以及带电粒子在磁场中的运动等。用户可以根据自己的任务需求建立独立应用模式或者面向对象的应用叠加模式。无论采用以上哪一种模式，GEANT4工具包都可以对从初始问题的定义到结果的产生以及制图发表的整个过程进行支持。
- 开发GEANT4程序最早的想法始于1993年CERN和KEK的两个独立的研究中。这两个研究小组开始研究如何将现代计算技术应用到CEARN此前开发的基于Fortran的GEANT3程序上。1994年秋，一个正式的提案RD44被提交到CERN的探测器研究和发展委员会。该提案即创建一个全新的基于面向对象技术的蒙特卡罗程序。该提案很快变成了一个大范围的国际合作项目，来自欧洲、日本和美国的多个研究机构的物理学家和软件工程师参与其中。该项目的目标是要编写一个探测器模拟程序，该模拟程序需要具备能够满足下一代亚原子物理实验所需求的功能以及灵活性。这一目标迅速得到了扩展，因为大家发现这样的工具也能够用于核物理、加速器、空间和医学物理领域。RD44项目于1998年完成并发布了第一版的程序。随后该程序被重命名为GEANT4。参与RD44项目的国家各研究所、实验室以及HEP实验组签署了一个正式的MOU协议，该协议就程序的管理、维护、用户支持以及完善和再开发等问题进行了规定。MOU协议还建立了以合作理事会、技术支持理事会和几个工作组为核心的合作结构。目前，GEANT4的最新版GEANT4 11.04已经可以下载。

蒙特卡罗方法在BNCT中的应用

MC方法在BNCT中的应用

（2）MC方法用于BNCT的治疗计划系统的剂量计算。现有的一些BNCT TPS如下表所示

表12.1 现有公开的BNCT的TPS

治疗计划系统	NCTPlan	SERA	JCDS	THORplan	NeuCure	Tsukuba-Plan	NeuMANTA	---
开发团队	Harvard/MIT	INEEL/MSU	日本原子力研究开发机构	新竹清华大学	住友重工	筑波大学	中硼医疗	韩国浦项POSTECH高级核工程部
是否支持影像融合	否	否	否	PET/CT融合	否	否	PET/CT融合 PET/MR融合	--
剂量计算引擎	MCNP	seraMC	PHITS	MCNP	PHITS 3.2	PHITS	MCNP/PHITS/COMPASS	GMCC

蒙特卡罗方法在核医学诊疗的应用

背景介绍：核医学治疗技术

- 核医学治疗技术，又称放射性核素治疗，也是放射治疗的一种特殊形式。放射性核素药物是由核素耦连在细胞特异性识别基团如受体、酶或抗原等构成，通过口服或肠道外给药，使其根据生理或生化现象与肿瘤细胞靶向地结合，发射射线轰击肿瘤细胞，从而实现精准抑制肿瘤细胞增殖甚至杀灭肿瘤细胞的目的
- 相较于外照射，放射性核素治疗可以针对全身范围的肿瘤细胞提供治疗剂量同时最小化对于正常组织的辐射毒性。由于其具有良好的市场和经济效益，近年来放射性治疗药物的研发日益受到重视。其应用范围包括肿瘤治疗和疼痛缓解。
- 在核医学成像及放射治疗过程中，放射性药物均被注射到患者体内，形成了典型的内照射。增加了患者（特别是年轻患者）的辐射诱发癌症风险，有必要对患者接受的辐射剂量予以评估。

MC方法在加速器屏蔽设计中的应用

加速器在运行时，其发出的主射线以及产生的次级射线可能对工作人员及环境产生较大危害，因此有必要针对运行时的加速器进行射线分布模拟以确定最佳的屏蔽设计。

加速器运行时潜在危害

- 放射性危害因素：
  - 医用电子加速器产生的放射性危害主要包含透射辐射、泄漏辐射、散射辐射等
- 非放射性危害因素：
  - 加速器环境下产生的非放射性危害因素包括臭氧和氮氧化物，微波辐射和激光。
  - 臭氧和氮氧化物主要由辐射场中的空气受辐照后发生辐射分解现象所产生，主要产物是臭氧（O3）和氮氧化物（NO3和NO2）
  - 微波辐射主要由电子直线加速器微波传输系统在工作时可能在接口处发生破损导致微波泄露引起
  - 激光用于在医用加速器工作时作为等中心的位置指示，一定功率的激光入射到眼睛后可导致视网膜永久性损伤。因此，摆位时操作人员和患者都应避免激光直接入射眼睛。

图11.22 医用加速器运行时对患者体外剂量场贡献来源：①患者体内散射；②次级准直器散射；③机头泄露辐射

蒙特卡罗程序-RMC

- RMC（Reactor Monte Carlo Code）是由清华工物系REAL实验室自主开发的三维堆用蒙卡输运燃耗程序。RMC程序针对反应堆计算分析中的基本需求，同时结合新概念反应堆系统设计时的几何机构灵活、中子能谱复杂及材料组分多样、各向异性及泄漏强等特点进行的研发，是多物理多尺寸耦合核能系统数值分析平台的物理计算核心。
- 北京清华大学工程物理系根据新概念和先进反应堆分析的需要，利用现代计算机硬件和软件技术的优势，开发了一种新的蒙特卡罗传输代码，命名为RMC (Reactor Monte Carlo code)。代码RMC旨在解决反应堆分析问题，并且能够处理复杂的几何形状，使用不同材料和温度的连续能量点方向横截面。

蒙特卡罗程序-GATE

- GATE（GEANT4 Application for Tomographic Emission）是一款由国际合作组织OpenGATE开发的先进开源软件，专门用于医学成像和放射治疗的数值模拟。GATE基于Geant4通用蒙特卡罗程序包，可以模拟粒子在物质中的输运和相互作用。
- GATE的开发始于21世纪初，主要目的是为学术界提供一款基于Geant4的免费软件，作为发射断层扫描的通用模拟平台。OpenGATE合作组目前包括21个实验室，全力致力于改进、记录和详尽测试GATE，以满足临床应用的PET和SPECT成像系统的需求。
- GATE的功能覆盖了多个领域，包括发射断层扫描（正电子发射断层扫描PET 和单光子发射计算断层扫描SPECT）、计算机断层扫描（CT）、光学成像（生物发光和荧光）和放射治疗。通过易于学习的宏机制，GATE可以为简单或高度复杂的环境进行建模，并在设计新的医学成像设备、优化采集协议以及开发和评估图像重建算法和校正技术中发挥关键作用。它还可以用于放射治疗、近距离治疗或其它临床应用的剂量计算。

Term Project

二、对反应堆全堆进行模拟（50分）

在本项目中，我们使用kcode来定义需要模拟的粒子数和计算keff，KCODE card特点为以循环为单位进行计算，本次循环的计算的结果作为初始条件带入下次循环进行计算。KCODE card进行计算时，首先进行一定循环次数的计算，以得到收敛的Keff，但此部分循环的结果不计入TALLY card的计数。之后再进行一定循环次数的计算，因为目前Keff已经收敛，可以认为反应堆已经处于临界运行状态，因此这部分循环次数的结果计入TALLY card，并会最终作为TALLY card的计算数据呈递出来。根据这些数据，我们可以得到反应堆功率密度分布等计算模拟数据。在提供的输入文件的data cards中有一行：

kcode 1e5 1.0 100 600

其含义是：每次循环模拟1e5个中子，模拟开始时定义keff=1.0，模拟的前100个循环的结果不计数（inactive cycle），总共循环600次。

我们使用f7计数卡（单位：MeV/g）来对燃料组件的裂变能量沉积进行计数，从而得到功率密度的分布。图中分别有2个f7计数卡，对总功率密度和燃料组件的功率

```
kcode 1e5 1.0 100 600  $ 500 active cycles + 100 inactive cycles
c source cards*****************************
sdef x=d1 y=d2 z=d3
     erg=2                    $ why!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
si1 -140 140
sp1 0 1
si2 -140 140
sp2 0 1
si3 -180 180
sp3 0 1
c ***************************************
print -160 -178 -110 -128 -10 -30 -40 -50 -70 -72 -98 -120 -130 -140 -102
c tally cards*****************************
vol 0.5 19r  $ in order not to divide joint tally by volume $ ???????????
f7:n (1 14 17) $ total power
c nps 2
c note that for the following power tallies
c only a very limited number of segments have been included for brevity
c the full list of segments is alredy given for the Term Project
f37:n $ all FAs
      ((1 14 17)<(40[-3 -8 0]41[-3 -8 0]))
      ((1 14 17)<(40[-2 -8 0]41[-2 -8 0]))
      ((1 14 17)<(40[-1 -8 0]41[-1 -8 0]))
      ((1 14 17)<(40[0 -8 0]41[0 -8 0]))
```

(1 14 17)<(40[-3 -8 0]41[-3 -8 0])使用了mcnp中的"Multiple Bin Format"语法，其含义是：对填充进40和41号cell的[-3 -8 0]号元素中的1 14 17号cell进行计数。40和41号cell是2中不同的燃料组件；1 14 17是3种不同的燃料芯块。燃料芯块构成燃料棒，组合排列起来的燃料棒构成了燃料组件。也就是说，这句话是对燃料组件40和41的[-3 -8 0]号元素中的燃料芯块进行了计数

可以查阅mcnp6手册(mcnp61.pdf 3-198页详细了解该语法)

此外，本项目中的几何定义还涉及到mcnp中重复结构定义的关键词lat，该语法在下一节Term Project课上实践中会介绍，也可自行查阅mcnp6手册（mcnp61.pdf）3-30 REPEATED STRUCTURES的内容提前了解

蒙特卡罗方法在外照射放射治疗的应用：光子放疗

（1）设备建模与性能评估

蒙特卡罗技术已被广泛用于电子和光子放射治疗设备的模拟中。也可用于模拟其他专用放射治疗设备，如断层放射治疗机和基于Co-60的伽玛刀

（2）射束建模

射束建模是指在设备几何建模的基础上，确定从加速器初级准直器引出的仅与设备结构有关的射束相空间信息，以及从钨门和次级准直器等病人特异结构后引出的射束相空间信息，是病人体内剂量计算的前提。

射束建模常用的方法有三种，（1）直接使用通用蒙特卡罗软件搭建加速器模型，模拟粒子在内部的输运过程，存储相空间文件作为射束源，也叫做直接蒙卡模拟方法。（2）在通用蒙特卡罗软件搭建加速器模型，根据模拟建立虚拟源模型（如三源模型），并适当结合测量值，作为射束源模型。（3）从测量值反推出射束源模型。

（3）剂量计算与剂量验证

蒙特卡罗模拟放射治疗时，射束建模的结果可以用作模拟射束与病人、体模或探测器相互作用的输入。另外一些研究利用蒙特卡罗模拟方法进行不同照射条件下的剂量学分析，充分发挥了蒙特卡罗方法在实际难以测量和评估条件下杰出的灵活性。

第三方独立剂量验证软件ArcherQA集合了加速器建模和Archer剂量引擎，在加速器建模完成后，得益于GPU加速，可以在几分钟内完成剂量验证工作。

辐射防护与剂量学基础

- 吸收剂量（absorbed dose, D）是辐射剂量学中最广泛应用的基本物理量，定义为单位质量的物质吸收的辐射能量，通常以戈瑞（Gray, Gy）为单位.
- 有效剂量（effective dose, E）是在辐射防护中用于衡量辐射的随机性效应对人体组织或器官的总有害程度的量，它考虑了不同类型和能量的辐射对生物组织的相对生物效应，以希沃特（Sievert, Sv）为单位，且1Sv=1000mSv。根据ICRP 103报告的定义[70]，有效剂量的计算公式:

$$E=\sum_T w_T H_T=\sum_T w_T \sum_R w_R D_{T,R}$$

- 其中E表示有效剂量，$D_{T,R}$表示辐射R对器官/组织T造成的吸收剂量，W_R表示辐射权重因子（考虑到各种辐射对长期随机效应的影响，其值主要根据各种辐射的相对生物效应确定，W_T表示组织权重因子（考虑到不同器官和组织对随机效应诱导的辐射敏感性差异）
- ICRP 103报告中对职业工作人员的有效剂量限值为:连续五年之和不超过100 mSv，任何一年不超过50 mSv。当量剂量限值为眼晶体每年不超过150 mSv，四肢每年不超过500 mSv。公众剂量限值为1 mSv/年