

Radyolojik Uygulamalar için Monte Carlo

Prof.Dr. Ahmet Bozkurt

XV. Ulusal Medikal Fizik Kongresi
Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon
16-19 Mayıs 2015



Harran Üni., Fen-Edebiyat Fak.,
Fizik Böl., 63300 Şanlıurfa
Email: bozkurt@harran.edu.tr
Web: <http://ahmetbozkurt69.wordpress.com/>

Radyolojik Uygulamalar

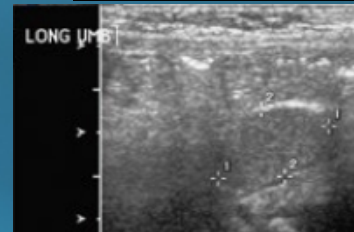
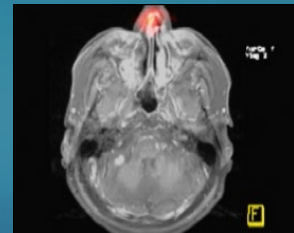
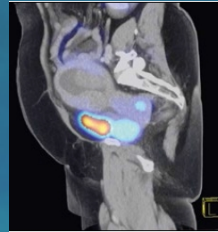
- Radyolojik uygulamalarda radyoaktif kaynaklar ya da radyasyon üreten cihazlardan faydalınılır.
- Bu kaynaklar iyonizan radyasyonlar yayarlar.
 - Parçacık radyasyonu (α veya β ışınları)
 - Elektromanyetik radyasyon (x ya da γ ışınları)
- Endüstride gıda ışınlamaları, çeşitli ölçüm ve testler, güvenlik uygulamalarında;
- Tıpta, bir hastalığa tanı koymada ya da tedavisinde bu ışınlardan faydalanılır.

Radyolojik Uygulamalar

Dikkat

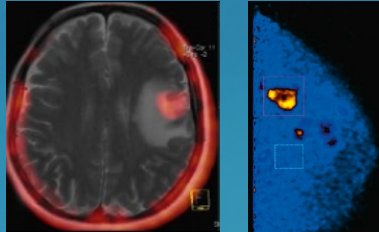
Diyagnostik Radyoloji

- Hastalıklara tanı konmayı amaçlar.
- Keşfedilmelerinden bu yana x-ışınları yüzyıldan fazla bir süredir tıpta yaygın bir şekilde kullanılmaktadır.
- Farklı tanısal bilgiler elde etmek için farklı görüntü türleri (modaliteler) tercih edilir:
 - Radyografi – planer görüntüler,
 - Bilgisayarlı tomografi – kesitsel görüntüler,
 - Manyetik rezonans g. – kesitsel görüntüler,
 - Ultrasonografi – dinamik g.



Nükleer Tıp

- Hastalıklara tanı konmayı amaçlar.
- Belli radonüklitlerle etiketlenmiş ve belli organlarda birikme eğilimi olan maddeler hasta vücuduna verilir.
 - Tc-99m yaygın kullanılan bir radyonüklitdir ($t_{1/2}$: 6.02 sa).
- SPECT ve PET gibi alternatiflerin yanı sıra, PET-CT gibi (F18 ile; $t_{1/2}$: 110 dakika) bütünleşik teknikler de mevcuttur.



- Elde edilebilecek anatomik detay sınırlıdır.
 - Fizyolojik fonksiyonların görüntülenmesinde yararlıdır.
 - Kalp, akciğer, tiroit, karaciğer ve kemikler görüntülenebilir.

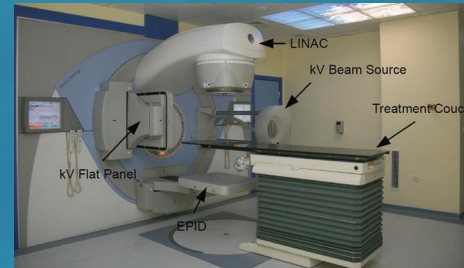
Radyolojik Uygulamalar

Radyoterapi

- Kanserli dokuları tedavi etmeyi amaçlar.
- Sağlıklı hücrelerin minimum doz alması sağlanır.
- Kanserli hücreler yok edilir ya da kontrol altına alınır.

- Eksternal radyoterapi

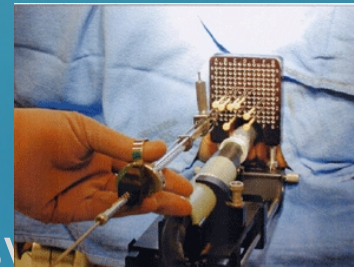
- Radyasyon demeti hastanın belli bölgesini hedef alır.



Dış kaynak

- Brakiterapi

- Kaynak vücut boşluğuna ya da tümör yakınına yerleştirilir.
 - Yüksek dozlarda lokalize radyasyon



İç kaynak

Radyasyon Etkileşimlerinde Monte Carlo

Monte Carlo

- Analitik çözümü mümkün ya da pratik olmayan fiziksel veya matematiksel problemlere
 - Tekrarlanan rasgele örneklemeler yardımıyla
 - Sayısal çözümler oluşturan bir hesaplama tekniğidir.
- 1940'da LANL'de nükleer silahlar üzerine çalışırken Stanislaw Ulam tarafından geliştirilmiştir.
 - İsmi Monte Carlo şehrindeki kumarhanelerden alır (Nicholas Metropolis).
 - John von Neumann ENIAC bilgisayarını Monte Carlo simülasyonları için programlamıştır.

Radyasyon Etkileşimlerinde Monte Carlo

Monte Carlo

- Temelde fiziksel bir süreci doğrudan simüle etmeye yarayan istatistiksel bir tekniktir.
 - Sürecin davranışını tahmin edebilmek için süreci temsil eden analitik denklemlerin bilinmesi gerekmez.
- Yöntemi uygulamak için incelenen sürecin bir olasılık dağılım fonksiyonu ile temsil edilebilmesi yeterlidir.
 - Monte Carlo simülasyonu bu olasılık dağılım fonksiyonundan rasgele örneklemeler yaparak çalışır.
 - Sonuçta bir sürü simülasyon yapılır ve tüm gözlemlerin ortalaması aranan sonuç olarak alınır.

Radyasyon Etkileşimlerinde Monte Carlo

Monte Carlo

- Radyasyonun maddesel ortamlarda taşınması gibi karmaşık problemleri çözmede oldukça yararlıdır.
 - Radyasyon etkileşimleri istatistiksel bir doğaya sahiptir.
 - Rasgele özelliktedir.
- Örneğin bir radyasyon kaynağının bir çok özelliği belli ölçülerde olasılık içeren nicelikler olarak varsayılabılır.
 - Etkileşimlerde yayımlanacak parçacıkların türü,
 - Parçacık enerjisinin spektrumun neresinden seçileceği,
 - Parçacığın kaynak hacminin neresinden yayımlanacağı,
 - Parçacığın hangi doğrultuda uçuşa başlayacağı gibi.

Radyasyon Etkileşimlerinde Monte Carlo

Monte Carlo

- Ayrıca
 - Maddesel ortama giren her bir parçacığın ilk etkileşimini hacmin hangi noktasında gerçekleştireceği,
 - Her bir etkileşimde ne kadar enerji kaybedeceği,
 - Etkileşim sonrasında hangi doğrultuda saçılacağı,
 - Etkileşim sırasında yaratılacak yeni parçacıklar gibi özellikler de rasgele niteliklere sahiptir.
- Bu sebeple Monte Carlo tekniği radyasyon taşıma problemlerine başarılı şekilde uygulanabilmektedir.

Radyasyon Etkileşimlerinde Monte Carlo

Monte Carlo

- Bir kaynaktan yayımlanan her bir parçacığın özelliklerinin ve geçireceği etkileşimlerin belli olasılık dağılımlarına sahip olduğu varsayımından hareketle
- Maddesel ortamda ilerleyen her bir parçacığın izlerini (yolları) birer birer takip eder.
- İzlenen her bir parçacık için (tüm öyküler için) akı, enerji kaybı, soğurulan doz gibi nicelikler kaydedilir.
 - Sonuçta bir ortalama değer (ve istatistik hatayı) hesaplar.

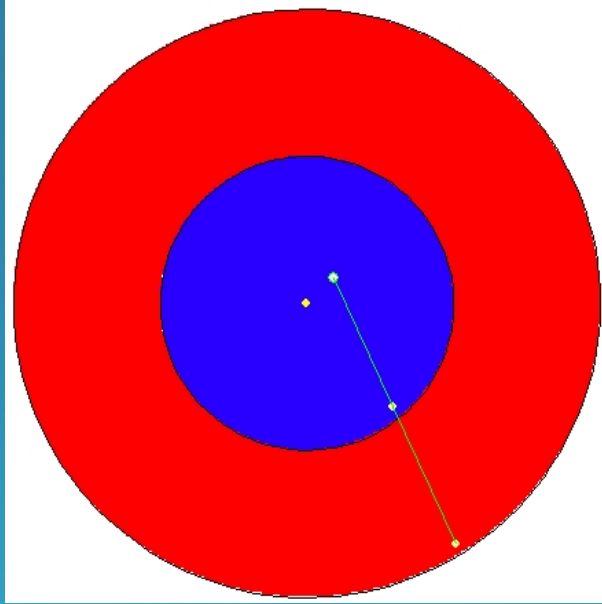
Örnek Monte Carlo Simülasyonu

Örnek Monte Carlo Simülasyonu

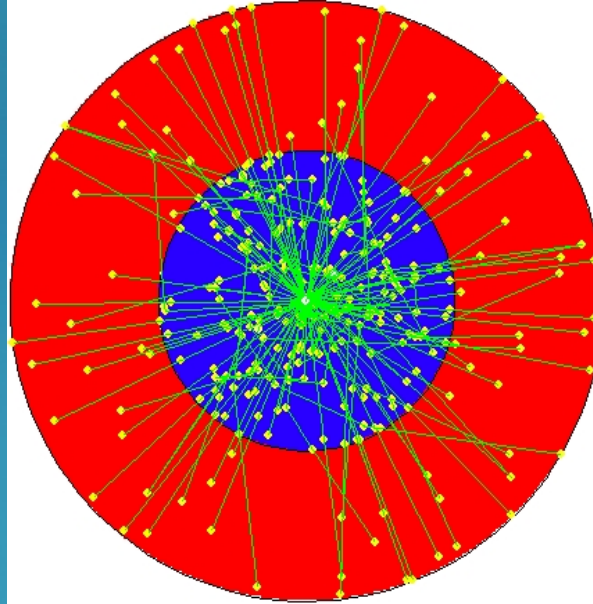
Örnek Monte Carlo Simülasyonu

Örnek Monte Carlo Simülasyonu

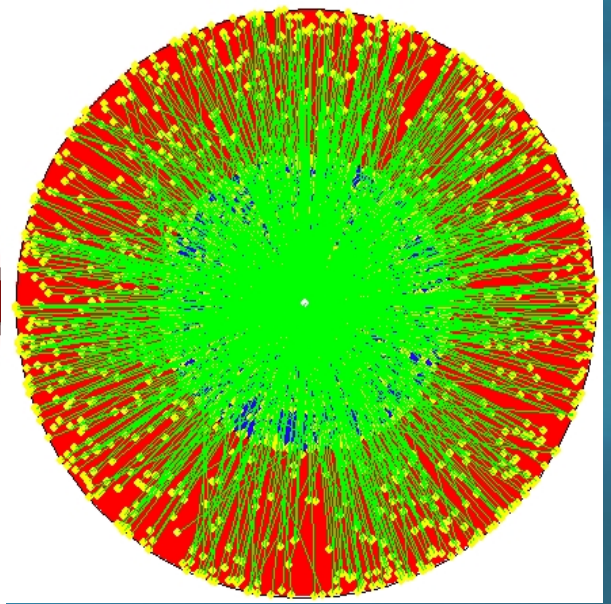
- Şekillerde farklı sayıda öyküler için bir su küresinin merkezinden yayımlanan fotonların izleri verilmiştir.
 - Görüldüğü gibi öykü sayısı arttıkça kaynağın izotropik olma özelliği ve fotonların etkileşmelerindeki rasgele dağılım daha belirgin hale gelmektedir.



1 öykü için:



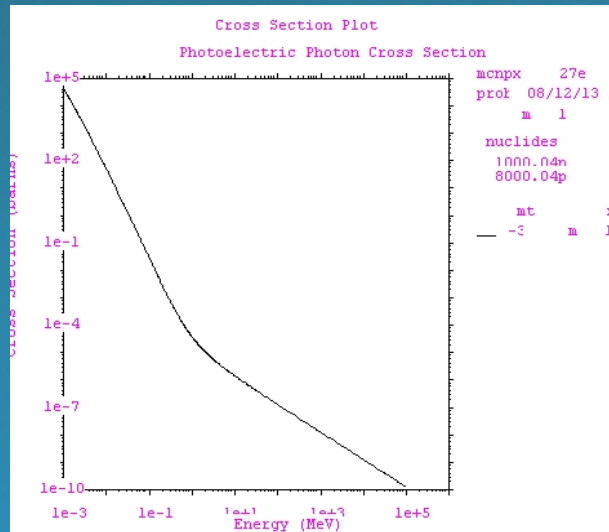
10 öykü için:



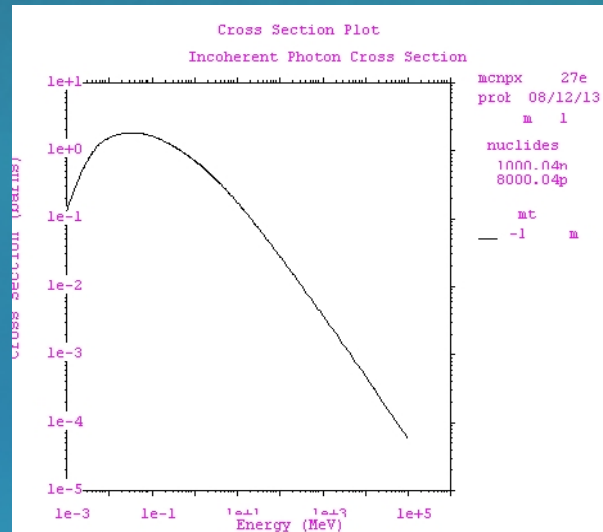
100 öykü için:

Örnek Monte Carlo Simülasyonu

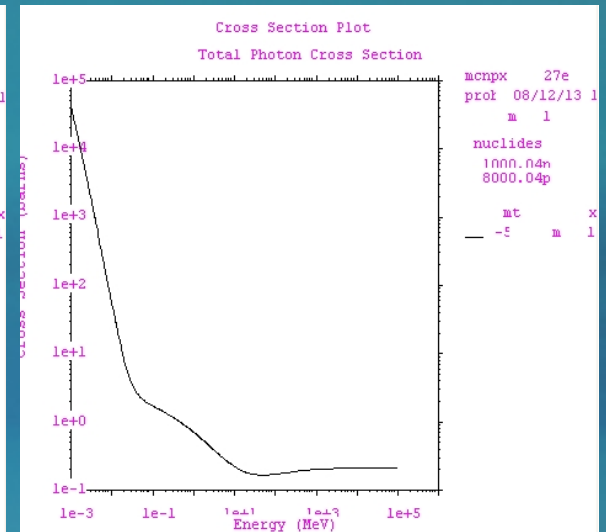
- Şekilde 1 MeV enerjili fotonların farklı etkileşimleri için tesir kesitinin enerjiye göre değişimi görülmektedir.



F o t o e l s e o k t u r r i m k a



C o m p t s c a n l m a s



T o p l e a t m k i l e i m

Radyasyon Taşımada Monte Carlo Tekniği

- Bir kaynağın ürettiği bir ışın, içinden geçtiği bir hacimde etkileşmeye uğradığında enerji ve doğrultusunda değişimler meydana gelir.
 - Bu etkileşimler, radyasyon fiziği açısından iyi anlaşılmıştır; ancak herhangi bir ortamdaki parçacık taşınımını doğru şekilde tanımlayacak analitik bir bağıntı geliştirmek zordur.
- Radyasyon taşınımını MC ile benzetebilmek için
 - Kaynak,
 - Işının yolu boyunca karşılaştığı tüm materyaller ve
 - Uygun nicelikleri hesaplamada kullanılacak detektörlerinbilgisayar ortamında doğru ve gerçeğe mümkün olduğunca yakın bir şekilde tanımlamak gerekir.

Radyasyon Taşımada Monte Carlo Tekniğı

Radyasyon taşınımı için örnek Monte Carlo aşamaları:

Input Aşaması

- Kaynak Tanımı: Kaynağın geometrisi, enerji spektrumu, konumu, uçuş doğrultusu, varsa filtreleme, kolimasyon, vs.
- Geometrik Modelleme: Dış ortam, hasta masası, hasta/doktor vücudu, filmin konumu, büyüklüğü, malzemenin element bileşimi ve yoğunluğu, vs.
- Detektör Tanımı: Programdan istenecek nicelikleri hesaplayacak detektörlerin türü ve konumu tanımlanır.

Monte Carlo Hesaplama Aşaması

- Kaynaktan yayımlanacak her fotonun özellikleri rastgele sayılar yardımıyla belirlenir.
- Her hacmin içerdiği materyal için foton enerjilerine ve saçılma açılarına uygun tesir kesitleri uygun kütüphane dosyalarından alınır.
- Etkileşme türü, aktarılacak enerji ve saçılma açısı rastgele sayılar yardımıyla tayin edilir.

Output Aşaması

- Hesaplanması istenen nicelikler için (parçacık akısı, enerji dağılımı, soğurulan doz gibi) ortalama sonucu oluşturur.

Monte Carlo ile Radyolojik Uygulamalar

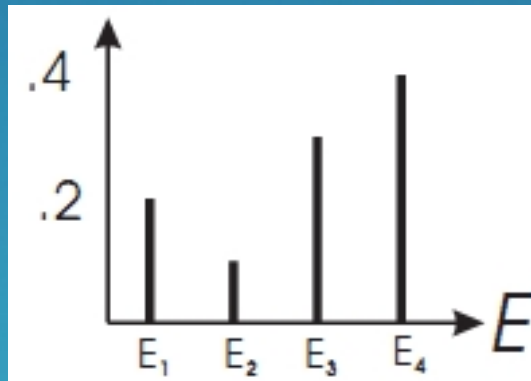
Kaynak Tanımı

- Simülasyonda taşınacak parçacıkları üretecek kaynağın geometrik ve radyolojik özelliklerinin doğru modellenmesi önemlidir.
- Fotonların başlangıç enerjileri, konum bilgileri ve uçuş doğrultuları gerçekçi şekilde belirtilmelidir.
 - Radyolojide ve eksternal radyoterapide bir tüpten yayımlanan demet,
 - Nükleer tıpta hedef organ içerisine dağılmış bir radyofarmasötik,
 - Brakiterapide ise hedef bölgeye yerleştirilmiş radyoizotop olarak düşünülür.

Monte Carlo ile Radyolojik Uygulamalar

Kaynak Tanımı

- Kaynağın enerjisi doğru tanımlanmalıdır.
 - Bir tüpten yayımlanan x-ışınları bir spektrum oluştururken, bir radyonüklit/radyofarmasötik kaynak belli enerjilerde gama ışınları yayar.
 - Bu sebeple kaynağın ürettiği tüm fotonlar kaynağın türüne uygun olarak kesikli enerjilerde (mono- ya da polienerjetik) ya da bir spektrum biçiminde tanımlanmalıdır.



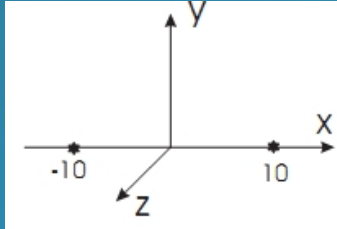
Kesikli enerjili

Enerji spektrumu

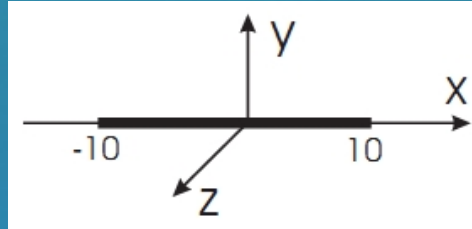
Monte Carlo ile Radyolojik Uygulamalar

Kaynak Tanımı

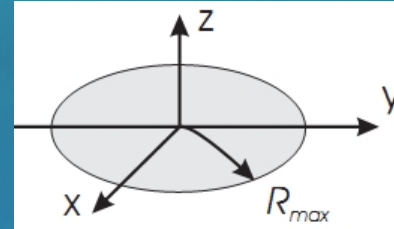
- Kaynağın hacmi gerçekçi tanımlanmalıdır.
 - Radyolojik uygulamaya bağlı olarak, kaynağın ürettiği tüm fotonlar bir noktadan (noktasal kaynak), bir doğru üzerinde (lineer k.), bir yüzey üzerine dağılmış (yüzeysel k.) veya bir hacim içerisinde dağılmış (hacimsel k.) olabilir.



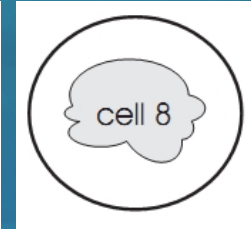
Noktasal



Lineer



Yüzeysel



Hacimsel

Dış
kaynak

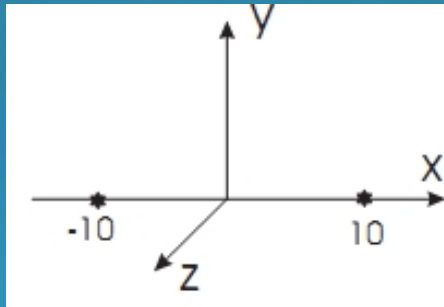
İç
kaynak

- Röntgen tüplü uygulamalarda kaynağa noktasal bir basitleştirme yapılabilir; ya da elektronların anot üzerine çarptırılarak x-ışınlarının üretildiği bir yüzey kaynak benzetmesi de yapılabilir.
- Radyonüklit içeren uygulamalarda ise kaynağın genellikle hedef hacim içerisinde/civarında düzgün dağılmış olduğu varsayılır.

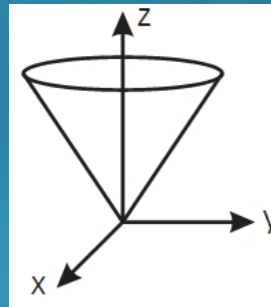
Monte Carlo ile Radyolojik Uygulamalar

Kaynak Tanımı

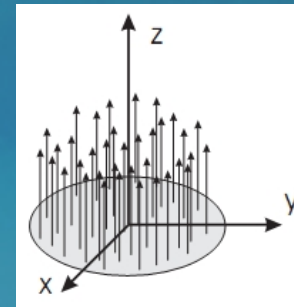
- Kaynağın ürettiği fotonların hangi doğrultularda hareket edecekleri önemli input parametrelerdendir.
 - Nükleer tıpta hedef organ hacminde biriken radyofarmasötikler her yöne eşit olasılıklarla (izotropik) foton yayarlar, bir röntgen tüpü genellikle konik dağılıma sahip bir demet üretir.



İzotropik



Konik yayılım



Paralel demet

- Ayrıca bazı durumlarda paralel demet tanımlanması da gerekebilir.

Monte Carlo ile Radyolojik Uygulamalar

Kaynak Tanımı

- Bunun yanı sıra bazı durumlarda kaynak homojen bir yapıda değil, birkaç farklı hücrede birikmiş olabilir (Nükleer tıpta birden fazla hedef organın varlığı).
- Ayrıca bazen Monte Carlo tekniği ile foton dışındaki parçacıkların da taşınımının yapılması gerekebilir (elektronlar ya da nötronlar gibi).
- Bu durumlarda hangi tür parçacıkların etkileşimlerinin önemseneceğinin sisteme açıkça belirtilmesi gerekecektir.

Monte Carlo ile Radyolojik Uygulamalar

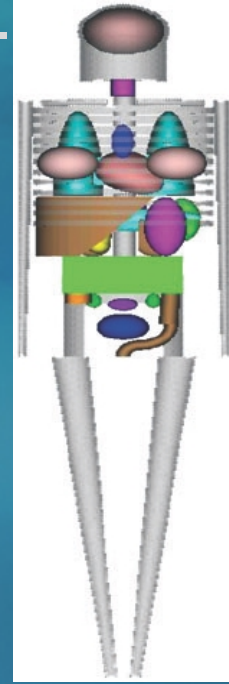
Geometrik Modelleme

- Parçacıkları üretecek kaynağın yanı sıra bu parçacıkların içinden geçeceği tüm hedef hacimlerin (fantom, detektör, film, kayıt sistemi, hava, vs.) Monte Carlo sistemine geometrik ve fiziksel olarak doğru tanımlanması gerekir.
 - Modelleme esnasında göz ardı edilebilecek ya da yanlış tanımlanacak boyut/geometri/bileşim bilgileri Monte Carlo simülasyon sonucuna sistematik bir hata yükleyecek, bu durumda sonuçlar yanlış hesaplanmış olacaktır.
 - Bazı durumlarda sistemin ayrıntılı tanımı, hesaplama zamanı açısından maliyetli olacağından geometrik yaklaşımlar yapmak daha pratik olabilir; sonuç daha kısa zamanda uygun istatistik hata ile elde edilir.

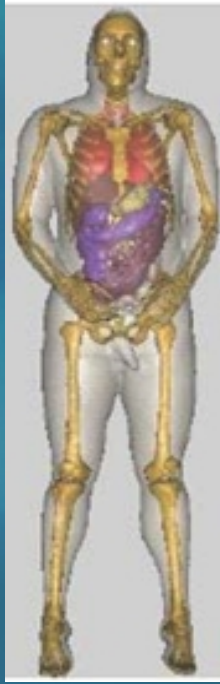
Monte Carlo ile Radyolojik Uygulamalar

Geometrik Modelleme

- Örneğin kaynağın doz profili çıkarılırken sade bir su fantomu yeterli olabilirken, özellikle organ dozlarının hesabı için hasta vücudunun basit geometrik şekillerle kombinatoryal geometrinin kurallarına göre elde edilmiş matematiksel modelleri daha yararlı olur.
 - Ayrıca son yıllarda BT, MR ya da renkli görüntüler kullanılarak elde edilmiş voksel tabanlı modellerin kullanımı hem anatomik ayrıntıların realistik olarak ele alınması hem de sonuçların daha küçük boyutlarda elde edilmesi açısından popüler hale gelmiştir.



Matematiksel
model



Voksel
model

Monte Carlo ile Radyolojik Uygulamalar

Geometrik Modelleme

- Modellenecek problemde mevcut olan tüm hacimler için geometrik bilgilerin yanı sıra uygun materyal özelliklerin de doğru şekilde tanımlanması gerekir.
- Her bir materyalin yoğunluk bilgisi ve hangi elementleri ne oranlarda içerdiği özellikle parçacık etkileşimleri için kullanılacak tesir kesitlerinin seçiminde önemlidir.
- Özellikle konvansiyonel radyografik sistemlerde foton saçıcı ya da soğurucu olarak davranacak olan filtre, kolimatör gibi bileşenlerin materyal bilgilerinin doğru temin edilmiş ve tanımlanmış olması gerekir.

Monte Carlo ile Radyolojik Uygulamalar

Geometrik Modelleme

- Parçacık etkileşimlerini modellemede kullanılacak soğurma/ saçılma/reaksiyon tesir kesitlerinin hangi veri tabanlarından alınacağını Monte Carlo programlarına tanımlanması gerekir.
 - Tesir kesitleri, kaynaktan yayımlanan fotonların geçirecekleri etkileşimlerin tür, olasılık, saçılma açısı gibi özelliklerini belirleyen niceliklerdir.
 - Farklı uluslararası kurumlar tarafından hazırlanmış bazı veri tabanları ENDF/B-VII.0 (USA, 2006), JEFF-3.1, (Europe, 2005), JENDL-3.3 (Japan, 2002), ENDF/B-VI.8 (USA, 2001) olarak sıralanabilir.
 - Bu veri tabanlarındaki tesir kesitlerinden sürekli olanların mı, yoksa kesikli ya da enerjice gruplanmış tabloların mı kullanılacağını da programa belirtilmesi önemli bir husustur.

Monte Carlo ile Radyolojik Uygulamalar

Detektör Tanımı

- Monte Carlo yöntemi ile herhangi bir nokta, yüzey ya da hacim için akım, akı, enerji ya da doz hesabı yapılabilir.
- İstenen değeri, simülasyon sonucunda detektör sunar.
 - Dolayısıyla uygun detektör seçimi, simülasyondan beklenen niceliğin türüne göre yapılmalıdır.
- En sık kullanılan detektör türleri:
 - Bir yüzeyden geçen parçacık akımı (parçacık sayısı),
 - Bir yüzeyden geçen parçacık akısı (parçacık sayısı/cm²),
 - Bir noktadaki parçacık akısı (parçacık sayısı/cm²),
 - Bir hacim içindeki ortalama akı (parçacık sayısı/cm²),
 - Bir hacim içinde ortalama enerji bırakımı (doz; MeV/g; Gy),
 - Bir hücredeki puls yüksekliği (puls).

Monte Carlo ile Radyolojik Uygulamalar

Detektör Tanımı

- Her bir detektörün tanımında gereksinim duyulacak parametreler farklıdır.
- Örneğin bir nokta detektör yerleştirileceği konumun koordinat bilgilerine ihtiyaç duyarken, bir doz detektörü için enerji bırakımının, takip edileceği hücrenin/hacmin bilgilerinin programa tanıtılması gerekir.
 - Ayrıca detektör ile hangi parçacık türleri için kayıt yapılacağının da belirtilmesi önemlidir.

Monte Carlo ile Radyolojik Uygulamalar

Detektör Tanımı

- Bazı Monte Carlo programları, detektörlerin hesaplayacağı değerleri belli çarpanlarla başka birimlere dönüştürebilir.
 - Detektör sonuçları genellikle parçacık başına olacak şekilde hesaplanır ve kullanıcı tarafından probleme özgü ışın şiddeti ya da aktivite gibi parametreler kullanılarak makro ölçeklere dönüştürülebilir.
-
- Bazı durumlarda detektör sonucunun belli enerjiler için ayrı ayrı rapor edilmesi gerekebilir.
 - Bu durumda Monte Carlo programına ihtiyaç duyulan enerji gruplaması ile ilgili bilgiler de girilmelidir.

Monte Carlo ile Radyolojik Uygulamalar

Output Aşaması

- Kaynaktan yayımlanan her fotonun, ilgilenilen bölgedeki istenen niceliğe katkısı her öykü için ayrı ayrı belirlenir.
- Sonuçta program, istenen niceliğin ortalama değeri ile birlikte bağıl hatasını da rapor eder.
 - Tolere edilebilecek hata miktarı ile çalıştırılacak öykü sayısı arasında güçlü bir korelasyon vardır.
 - Düşük bir hata ile sonuç elde etmek istendiğinde, genellikle öykü sayısının arttırılması tercih edilir.
 - Ancak artan öykü sayısı hesaplama süresini de arttıracaktır.
 - Bunun önüne geçmek için programın hesaplayacağı değer sonucunu değiştirmeden hatayı iyileştirmeye yarayan bazı varyans azaltma teknikleri kullanılabilir.

Monte Carlo ile Radyolojik Uygulamalar

Output Aşaması

- Monte Carlo yöntemi ile parçacık etkileşimleri simüle edilirken doğruluk (accuracy) ile hassasiyet (precision) kavramları arasındaki farkı özümsemekte fayda vardır.
 - Yanlış modellenmiş ama hassas (düşük hata payı içerecek) şekilde elde edilmiş bir sonucun pratik bir anlamı olmayacağı gibi,
 - Doğru modellenmiş ama yüksek hata içeren bir sonuç da kullanılamaz.

Monte Carlo ile Radyolojik Uygulamalar

Bazı Monte Carlo simülasyon programları

EGS4	- Monte Carlo transport of electrons and photons in arbitrary geometries
EGSnrc	- Monte Carlo transport of electrons and photons in arbitrary geometries
FLUKA	- a fully integrated particle physics MonteCarlo simulation package
GEANT4	- a toolkit for the simulation of the passage of particles through matter
MCNP	- a General Monte Carlo N-Particle Transport Code - Version 5, Availability
MCNPX	- a General Monte Carlo N-Particle eXtended Transport Code, Availability
A3MCNP	- Automated Adjoint Accelerated MCNP
ATTILA	- radiative solutions for science and industry
COMET	- coarse mesh radiation transport
DORT and TORT	- discrete ordinates transport, Availability http://rsicc.ornl.gov
EVENT	- general purpose deterministic radiation transport
FOTELP-2K3	- 3D Photons, Electrons and Positrons Transport by Monte Carlo
GamBet	- 2D and 3D Monte Carlo simulations of electron/photon/positron radiation transport in matter
ITS	- coupled photon-electron transport, Availability http://rsicc.ornl.gov
MCSHAPE	- Simulation of the Full State Polarization of Photons
MINERVA	- Modality Inclusive Environment for Radiotherapeutic Variable Analysis
PARTISN	- time-Dependent, parallel neutral particle transport, Availability
PENELOPE	- A Code System for Monte Carlo Simulation of Electron and Photon Transport
PENTRAN	- Parallel Environment Neutral-particle TRANsport
PEREGRINE	- 3-D Monte Carlo dose calculation system
PHITS	- Particle and Heavy Ion Transport Code System
SERA	- Simulation Environment for Radiotherapy Applications, Availability
SIMIND	- Monte Carlo Clinical SPECT Simulation
TransMED	- Advanced Particle Transport Software Using 3D Deterministic Methods in Arbitrary Geometry

Kaynaklar

- Andreo, P., “Monte Carlo techniques in medical radiation physics,” Phys. Med. Biol., 36(7):861-920, 1991.
- Rogers, D.W.O., “Fifty years of Monte Carlo simulations for medical physics,” Phys. Med. Biol., 51, R287-R301, 2006.
- Battistoni, G., Muraro, S., Sala, P.R., Cerutti, F., Ferrari, A., Roesler, S., Fasso, A., Ranft, J., “The FLUKA code: Description and benchmarking,” Proceedings of the Hadronic Shower Simulation Workshop 2006, Fermilab 6-8 September 2006, M. Albrow, R. Raja eds., AIP Conference Proceeding 896, 31-49, 2007.
- Agostinelli, S., Allison, J., et al., “Geant4: A simulation toolkit,” Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 506:250-303, 2003.
- Briesmeister, J.F., MCNP-A general Monte Carlo N-particle transport code, Version 4B. Los Alamos National Laboratory Report, LA-12625-M, 1997.
- Shirley, V.S., “Nuclear data sheets for A = 192,” Nuclear Data Sheets, 64:205-322, 1991.

Dinlediğiniz için teşekkürler...