

Radyodiyagnostikte Monte Carlo Tekniđi

Ahmet Bozkurt, Ph.D.



*Harran üni., Fen-Edebiyat Fak.,
Fizik Böl., 63300 Şanlıurfa
Email: bozkurt@harran.edu.tr*

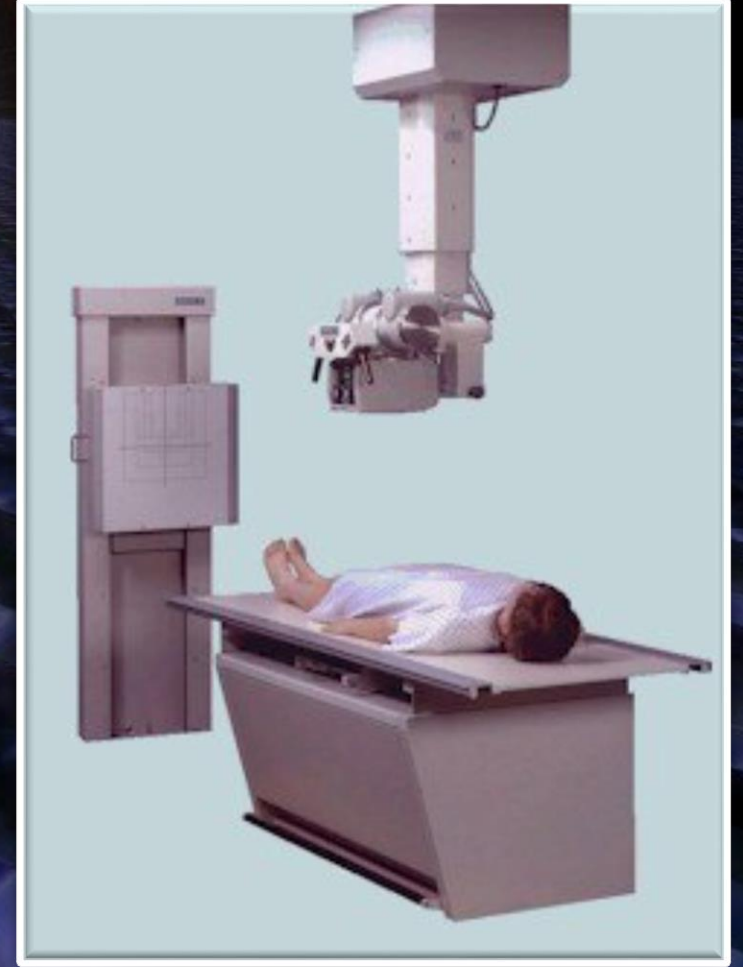
**XI. Ulusal Medikal Fizik Kongresi
14 - 18 Kasım 2007, Antalya**

Diyagnostik radyoloji

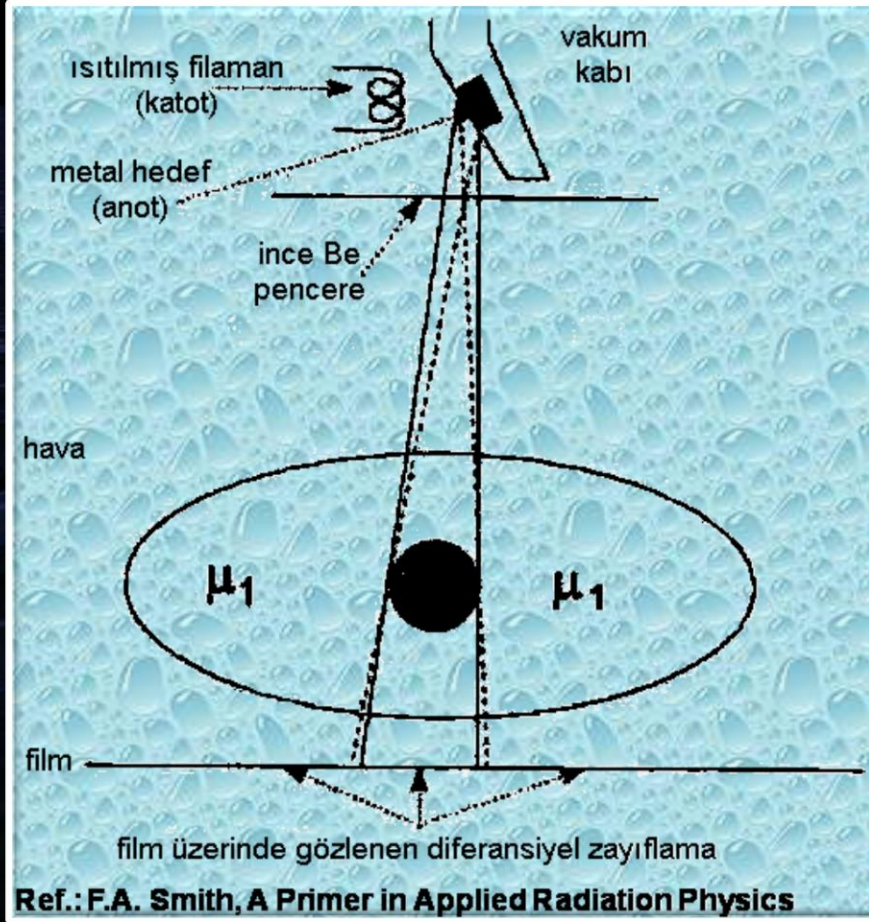
- 20. yüzyılın başlarından beri kullanımdadır.
- X-ışınlarından tanısal amaçlarla yararlanmayı içerir.
- Hasta vücudunun iç yapısının görüntüsü film ya da ekran üzerinde oluşturulur.

- Konvansiyonel radyografi (röntgen)
- Bilgisayarlı tomografi (BT)
- Floroskopi
- Girişimsel radyoloji

- Statik görüntü
- Sürekli görüntü



Diyagnostik radyoloji



Düşük enerjili fotonlar kullanıldığından baskın etkileşim fotoelektrik etkidir.

Kaynak
(kV, mAs) → (spektrum, intensite)

E
t
k
i
l
e
ş
i
m

Bilgi
Spektral zayıflama → (film kararması)

Organ ve dokuların görüntüleri, farklı atom numarasına sahip doku hacimlerindeki diferansiyel soğurma yoluyla oluşturulur.

Diyagnostik radyoloji

AMAÇ

- Optimum görüntü kalitesi
- Minimum radyasyon maruziyeti

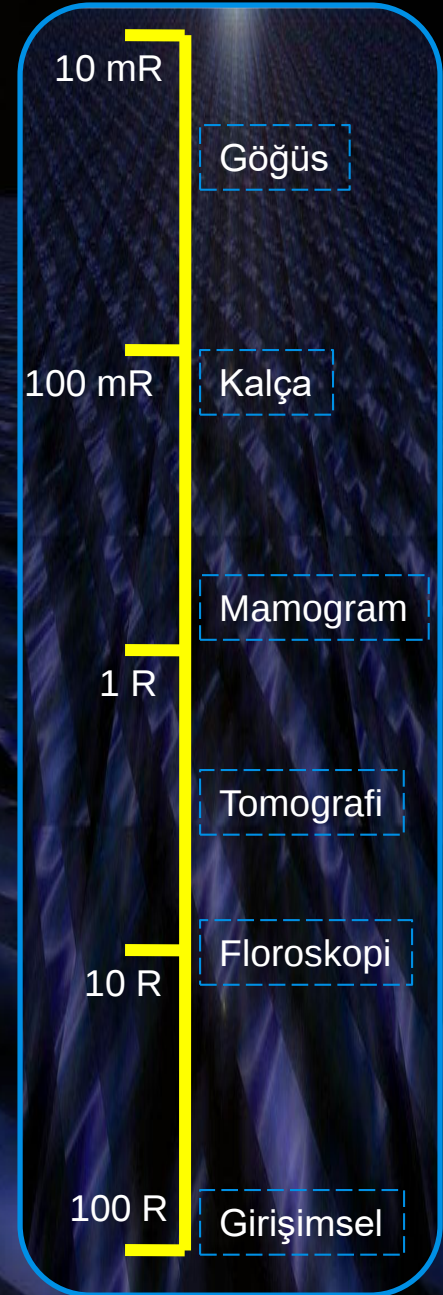
YÖNTEM

Görüntü Kalitesi/Hasta dozu oranı iki şekilde geliştirilebilir.

1. Hastanın maruz kaldığı radyasyon dozunun doğru tespiti
2. Deteksiyon sistemleri ile ilgili fiziksel niceliklerin gerçekçi temsili

KISITLAMALAR

Foton ve elektronların madde içindeki etkileşimleri iyi anlaşılmış olmasına rağmen, bir ortamdaki parçacık taşınımını tanımlayacak bir analitik bağıntı geliştirmek imkansızdır.



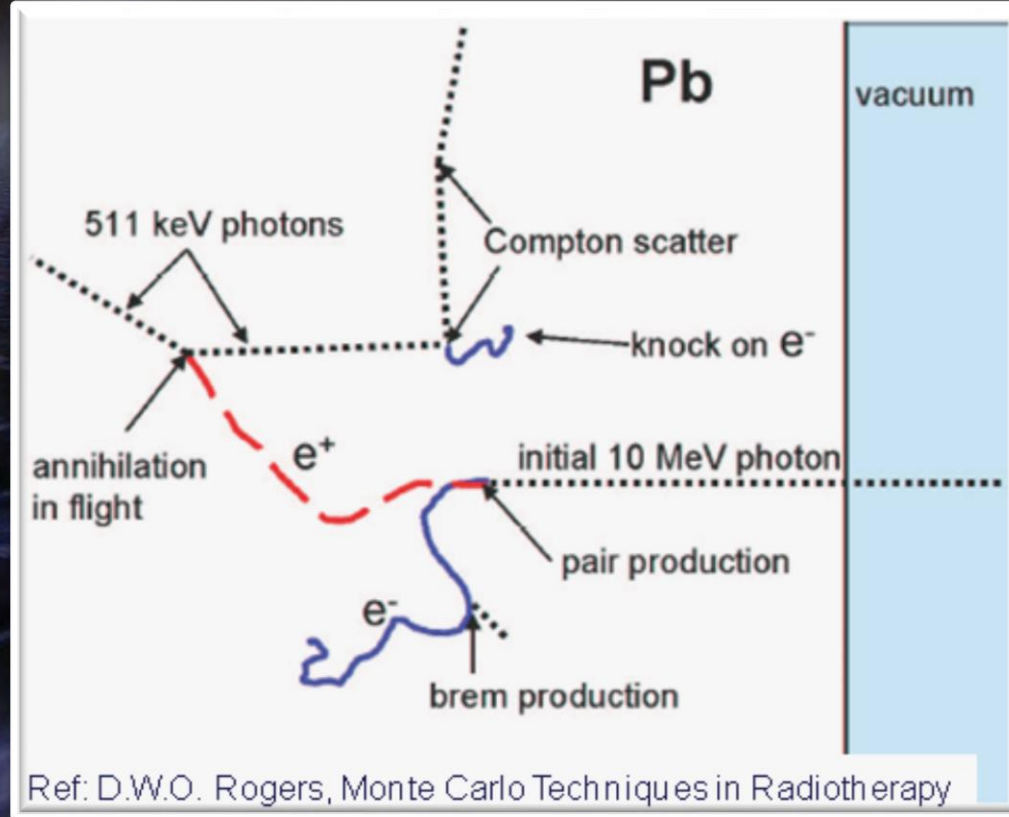
Diyagnostik radyoloji

Uygulamadaki Kısıtlamalar

Elektron etkileşimleri sonucu fotonlar (bremsstrahlung) ve ikincil elektronlar (delta ışınları) oluşabilir.

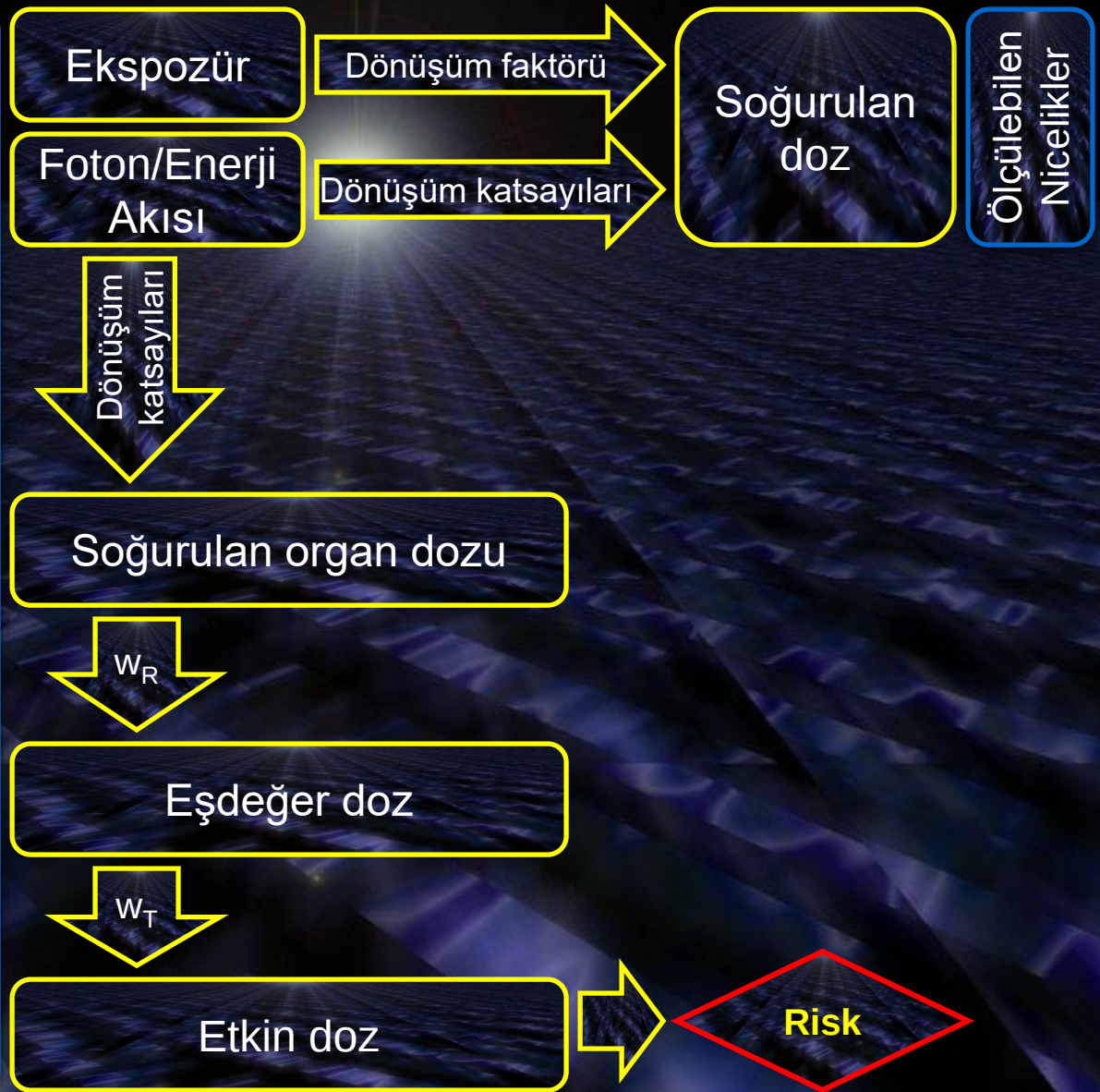
Foton etkileşimleri de elektron ve pozitron yaratılmasına neden olabilir.

Ayrıca elektron ve fotonlar madde içinde oldukça yüksek sayıda saçılmaya uğrarlar.



Hesaplamalar

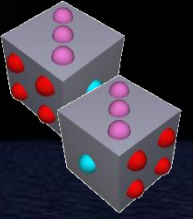
Hesaplanabilen Nicelikler



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

Monte Carlo Yöntemi

Monte Carlo yöntemi analitik çözümün zor ya da imkansız olduğu matematik problemlerinin çözümü için geliştirilmiş istatistiksel bir simülasyon tekniğidir.



MC ismini ilk olarak Nicholas Metropolis, Manhattan Projesi sırasında S. Ulam ve E. Fermi'nin karşılaştıkları nötron yayılım ve çoğalma problemlerini çözmek için yaptıkları istatistiksel simülasyonları tanımlamak için kullanmıştır.



Monte Carlo Yöntemi

Maddesel ortamda parçacık taşınımı gibi karmaşık problemleri çözmede yaygın kullanılan bir yöntemdir.

Yöntemi kullanışlı kılan, parçacık etkileşimlerinin istatistiksel bir doğaya sahip olmasıdır.



Örneğin kaynaktan spektrumun hangi bölgesinde enerji seçileceği, fotonun hangi doğrultuda harekete başlayacağı, ilk etkileşimini hangi noktada gerçekleştireceği, ne tür bir etkileşim geçireceği, etkileşimde ne kadar enerji kaybedeceği, etkileşim sonrasında hangi yönde saçılacağı hep belli olasılıklar dahilinde meydana gelir.

Monte Carlo yöntemi, parçacık etkileşimlerini tanımlayan niceliklerin belli olasılık dağılımlarına sahip olduğunu varsayımdan yola çıkarak, madde içinde yolalan her parçacığın izlerini birer birer takip eder.

Bir çok parçacık için akı, enerji kaybı ve soğurulan doz gibi nicelikler kaydedilir ve bu dağılımlar için ortalama değerler hesaplanır.

Basit Bir Monte Carlo Örneği

Bir su küresinin merkezinde tek-enerjili fotonlar üreten izotropik bir foton kaynağı düşünelim.

Böyle bir problemin analitik çözümü basittir ve su küresi içinde herhangi bir x uzaklığına ulaşabilen foton sayısı zayıflama denklemi ile verilir.


$$N(x) = N_0 \frac{e^{-\mu x}}{4\pi}$$

İlk çarpışmadan sonra fotonun yokolduğunu varsayar.

Problemin Monte Carlo çözümünde ise ürettiğimiz her foton için cevapları fotonun başlangıç enerjisine göre değişecek iki soruya cevap ararız:

[Soru 1]

Bir foton etkileşmeden önce ne kadar yol alır?: (x)

[Soru 2]

Foton x cm yol aldıktan sonra hangi etkileşim gerçekleşir? (FS mi, CS mı RS mı?)

Örneğin 40 keV enerjili fotonların taşınma simülasyonu probleminde, ele alınması gereken üç etkileşim türü olacaktır: Fotoelektrik soğurma, Compton saçılması, Rayleigh saçılması

[Cevap 1]

Katedilen cm başına bir foton etkileşiminin toplam olasılığı (makroskopik tesir kesiti) ile verilir (birimi cm^{-1}).

$$\mu_{\text{Toplam}} = \mu_{\text{FS}} + \mu_{\text{CS}} + \mu_{\text{RS}}$$

μ üstel bir dağılıma sahip olduğundan, 0 ile 1 arasında seçilen bir R_1 rastgele sayısı yardımıyla, etkileşmeden önce fotonun alacağı yol

$x = -\ln(R_1) / \mu_{\text{Toplam}}$ ile bulunur.

Basit Bir Monte Carlo Örneği

[Cevap 2]

0 ile 1 arasında seçilecek 2. bir rastgele sayı ise etkileşmenin türü için kullanılır.

$0 < R2 < \mu_{FS} / \mu_T$ durumunda “Foton Fotoelektrik soğurmaya uğrar.” deriz.

- $\mu_{FS} / \mu_T < R2 < \mu_{CS} / \mu_T$ durumunda “Foton Compton saçılması yapar.” deriz.
- $\mu_{CS} / \mu_T < R2 < 1_T$ durumunda “Foton Çift üretimine neden olur.” deriz.

Etkileşim	Zayıflama katsayısı (cm ⁻¹)	Olasılık dağılımı	Birikimli olasılık dağılımı
Fotoelektrik etki	0.0568	0.212	0.212
Compton saçılması	0.1830	0.682	0.894
Rayleigh saçılması	0.0287	0.106	1.000
Toplam	0.2685	1.000	--

Çarpışmadan sonra, uygun örnekleme yapılarak etkileşimin türü, parçacığın yeni enerjisi ve saçılma açısı belirlenir.

Görüldüğü gibi, parçacık öykülerinin nasıl benzeştirileceği hakkındaki kararlarımızda rastgele sayıları kullanırız.

Simülasyonu ilgilendiğimiz nicelikler hakkında bir çok parçacık öyküsü üzerinden hesaplayacağımız ortalama değerleri belirleyerek sonlandırırız.

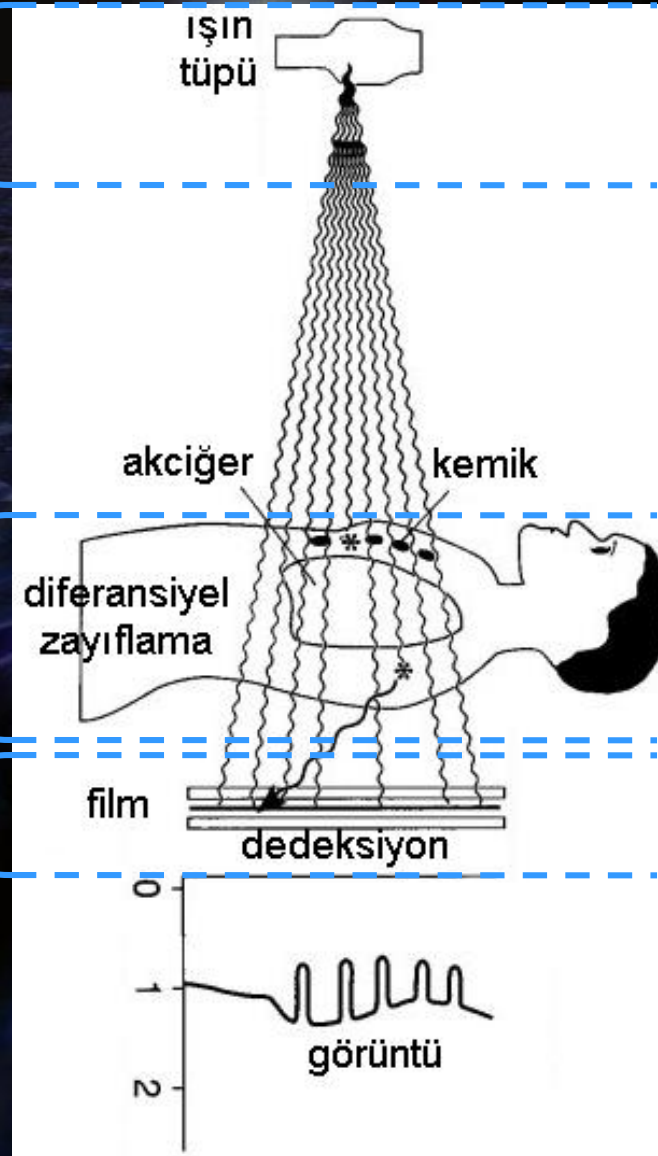
Radyodiyagnostikte Monte Carlo

Üretilen fotonların enerji spektrumları ve uçuş doğrultularının tanımlanması

Hasta ve/veya doktor için vücut modeli

Film/dedektör temsili

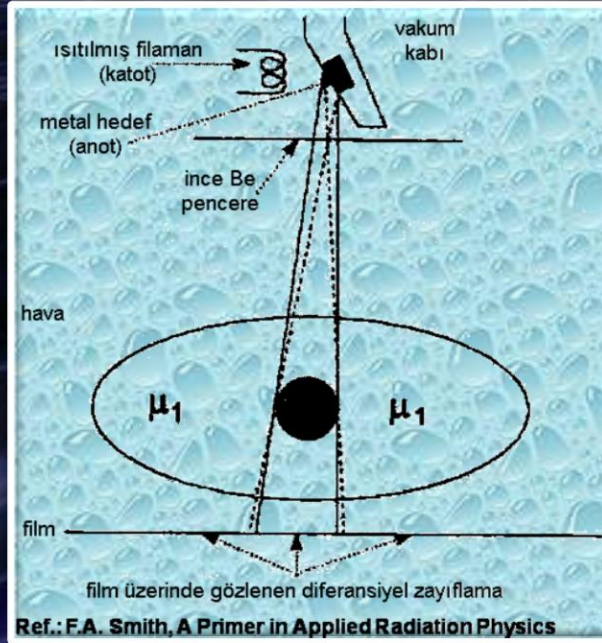
Fiziksel parçacık etkileşimlerinin temsil edilmesi



Radyodiyagnostikte Monte Carlo

İnput

- Kaynak parametreleri: kaynağın geometrisi, enerji spektrumu, konumu, uçuş doğrultusu, varsa filtreleme
- Ortamdaki maddeler: dış ortam, hasta/doktor vücudu ve filmin konumu, ebatı, yapıldığı malzemenin element bileşimi ve yoğunluğu



Output

- İstenen bilgi için (parçacık akısı, enerji dağılımı, soğurulan doz gibi) uygun niceliğin ortalamasını verir.

Monte Carlo

- Her fotonun özelliklerini rastgele sayılar yardımıyla belirler.
- Her malzeme için foton enerjilerine ve saçılma açılarına uygun tesir kesitlerini kütüphane dosyalarından alır.
- Etkileşme türünü, aktarılacak enerjiyi ve saçılma açısını rastgele sayılar yardımıyla tayin eder.

Tüpün/Kaynağın Modellenmesi

Foton kaynağının geometrik ve fiziksel olarak modellenmesi, tüpten çıkıp hasta vücuduna girecek fotonların enerji, konum ve uçuş doğrultularının tanımlanmasını gerektirir.

Kaynak

Fotonlar, nasıl bir kaynaktan yayımlanırlar?

- Noktasal
- Yüzeysel
- Hücresel

Enerji

Kaynak, hangi enerjilerde foton yayar?

- Monoenerjetik
- Spektrum

Uçuş doğrultusu

Kaynak, fotonları nasıl bir dağılımla yayar?

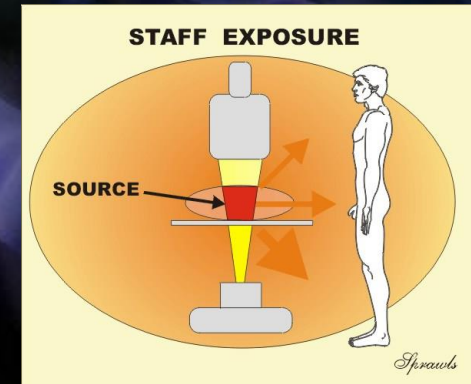
- İzotropik
- Doğrultu tercihli

Filtreleme

Kaynaktan çıkan fotonlar herhangi bir filtrelemeye tabi tutuluyorlar mı?

Radyolojik prosedür

- Konvansiyonel radyolojik
- Girişimsel radyolojik



Etkileşimlerin Temsili

Kaynaktan yayımlanan fotonların geçirecekleri etkileşimlerin tür, olasılık, saçılma açısı gibi özelliklerini belirleyen tesir kesitlerinin tanımlanmasını gerektirir.

Tesir kesiti

İki parçacık arasındaki bir etkileşimin olabilme ihtimalidir.

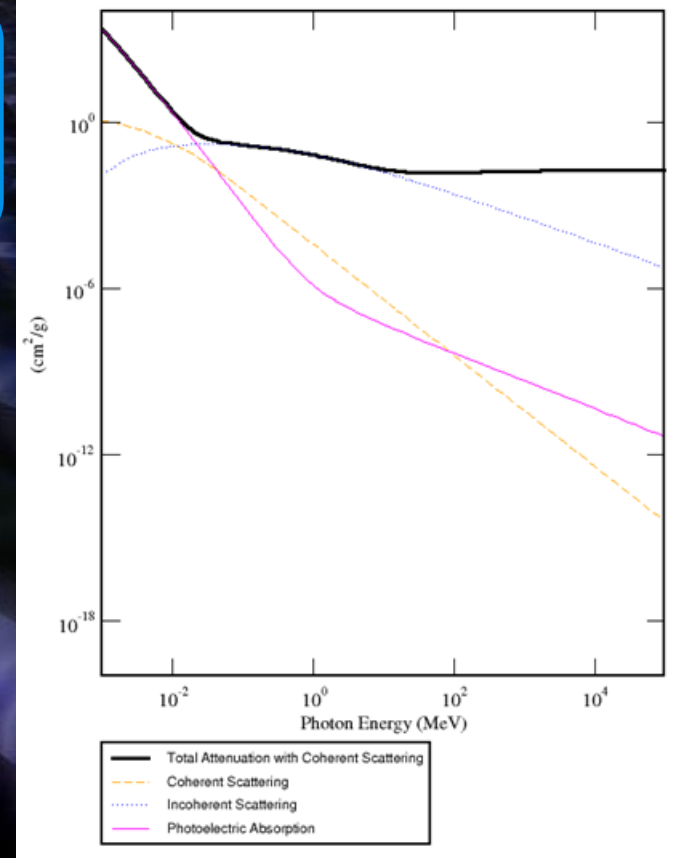
- Soğurma
- Saçılma
- Reaksiyon

Veri tabanları

- ENDF/B-VII.0 (USA, 2006)
- JEFF-3.1 (Europe, 2005)
- JENDL-3.3 (Japan, 2002)
- ENDF/B-VI.8 (USA, 2001)

Enerji

- Sürekli
- Kesikli/grup

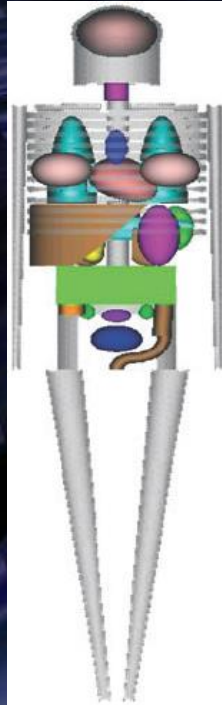


Hasta/Doktor Vücudunun Temsili

Belli bir radyolojik inceleme sırasında hasta ya da personel için sözkonusu olacak radyasyon riskinin belirlenebilmesi için radyasyona maruz kalacak kişinin vücudunu bilgisayar ortamında temsil edecek bir modele ihtiyaç olacaktır.

Matematiksel vücut modelleri

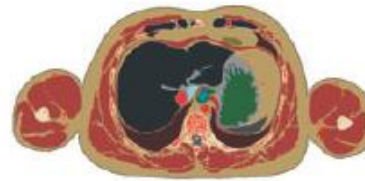
Organ/dokuların konum ve geometrileri matematiksel denklemlerle ifade edilir.



■ Liver ■ Bone
■ Spleen ■ Stomach



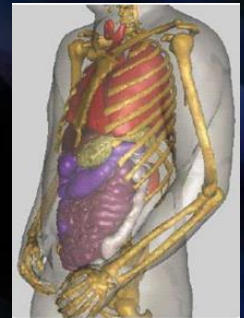
a MIRD stylized model



Visible man

Tomografik vücut modelleri

Organ/dokuların konum, ebat ve geometrileri gerçek görüntüler yardımıyla belirlenir.



Vücut Modelleri

Table 1 Existing tomographic and hybrid human models with their main characteristics

Developer	Name	Images	Race	Age and sex	Subject	Comment	Reference
Flinders University, Australia	ADELAIDE	CT	Caucasian	14-year-old female	Patient	Torso	(64)
Federal University of Pernambuco, Brazil	MAX	CT	Caucasian	Adult male	Patient	VoxelMan with arms and legs added	(55)
Federal University of Pernambuco, Brazil	FAX	CT	Caucasian	Adult female	Patient		(56)
Federal University of Pernambuco, Brazil	MAX06, FAX06	CT	Caucasian	Adult male and female	Patient	MAX06 has skeleton based on the FAX; adjusted to ICRP 2005	(79)
GSE, Germany	BABY	CT	Caucasian	8-week-old female	Cadaver		(63)
GSE, Germany	CHILD	CT	Caucasian	7-year-old female	Leukemia patient	Small for age (5- to 7-year-old)	(63)
GSE, Germany	DONNA	CT	Caucasian	40-year-old female	Patient		(61, 62)
GSE, Germany	FRANK	CT	Caucasian	48-year-old male	Patient	Head and torso	(61, 77)
GSE, Germany	GOLEM/ICRP	CT	Caucasian	38-year-old male	Leukemia patient	Adjusted to ICRP 2005	(109, 110)
GSE, Germany	HELGA	CT	Caucasian	26-year-old female	Patient	Legs absent below mid thigh	(62, 77)
GSE, Germany	IRENE	CT	Caucasian	32-year-old female	Patient		(62, 77)
GSE, Germany	LAURA/ICRP	CT	Caucasian				(77)
GSE, Germany	VISIBLE MAN	CT	Caucasian	39-year-old male	Cadaver (VHP)	No arms	
NIICT, Japan	Nagaoka Man	MRI	Japanese	22-year-old male	Volunteer		(67)
NIICT, Japan	Nagaoka Woman	MRI	Japanese	22-year-old female	Volunteer		
JAERI, Japan	Otoko	CT	Japanese	Adult male	Healthy volunteer		(68)
JAERI, Japan	Onago	CT	Japanese	Adult female	Healthy volunteer		
JAERI, Japan	JM	CT	Japanese	55-year-old male	Healthy volunteer		(69)
JAERI, Japan	JF	CT	Japanese	Adult female	Healthy volunteer		(70)
Johns Hopkins University, USA	NCAT	CT	Caucasian	39-year-old male	Cadaver (VHP)	No arms; motion simulating	(41)
Hanyang University, Korea	KORMAN	MRI	Korean	28-year-old male			(71)

Vücut Modelleri

Lund University, Sweden	VOXTISS8	CT	Caucasian	Adult male	Patient	MANTISSUE3-6 with arms mathematically straightened along the model's side	(54)
NRPB, UK	NORMAN	MRI	Caucasian	Adult male		Only 10 ribs	(57, 59)
NRPB, UK	NAOMI	MRI	Caucasian	Adult female	Healthy volunteer		(60)
ENEA-ION Istituto di Radioprotezione, Italy	NORMAN-05	MRI	Caucasian	Adult male		Adjusted to ICRP 2005	(80)
RPI, USA	Pregnant woman	CT		30 weeks pregnant		Part torso	(75)
RPI, USA	VIP-Man	Color photos	Caucasian	39-year-old male	Cadaver (VHP)	One testicle only	(72)
RPI, USA	VIP-Man 4D	Color photos	Caucasian	39-year-old male	Cadaver (VHP)	Only chest; motion simulating	(103)
UF, USA	UF 2 month	CT	Caucasian	6-month-old male	Cadaver		(65)
UF, USA	UF newborn	CT	Caucasian	6-day-old female	Cadaver		
UF, USA	UF 9 month	CT		9-month-old male	Patient	Head and torso	
UF, USA	UF 4 year	CT		4-year-old female	Patient		(66)
UF, USA	UF 8 year	CT		8-year-old female	Patient		
UF, USA	UF 11 year	CT		11-year-old male	Patient		
UF, USA	UF 14 year	CT		14-year-old male	Patient		
University of Victoria, Canada	MANTISSUE3-6	CT	Caucasian	Adult male	Patient	VoxelMan with arms and legs added from VHP	(53)
Yale University, USA	VoxelMan	CT	Caucasian	Adult male	Patient	Head and torso	(52)

Monte Carlo Radyasyon Taşıma Programları

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
EGS4	- Monte Carlo transport of electrons and photons in arbitrary geometries
EGSnrc	- Monte Carlo transport of electrons and photons in arbitrary geometries
EVENT	- general purpose deterministic radiation transport
FLUKA	- a fully integrated particle physics MonteCarlo simulation package
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
GEANT4	- a toolkit for the simulation of the passage of particles through matter
ITS	- coupled photon-electron transport, Availability http://rsicc.ornl.gov
MCNP	- a General Monte Carlo N-Particle Transport Code - Version 5, Availability http://rsicc.ornl.gov
MCSHAPE	- Simulation of the Full State Polarization of Photons
MCNPX	- a General Monte Carlo N-Particle eXtended Transport Code, Availability http://rsicc.ornl.gov
MINERVA	- Modality Inclusive Environment for Radiotherapeutic Variable Analysis
PARTISN	- time-Dependent, parallel neutral particle transport, Availability http://rsicc.ornl.gov
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 http://rsicc.ornl.gov
SIMIND	- Monte Carlo Clinical SPECT Simulation
TransMED	- Advanced Particle Transport Software Using Three-Dimensional Deterministic Methods in Arbitrary Geometry

Çıkış Bilgilerinin Modellenmesi

Kaynaktan yayımlanan her fotonun ilgilenilen niceliğe katkısı her öyküde belirlenir ve bu niceliğin ortalama değeri hesaplanır.

Hesaplanabilecek nicelikler

- Foton akısı
- Enerji akısı
- Soğurulan enerji
- Soğurulan doz
- Organ dozu

- Noktasal
- Yüzeysel
- Hücresel/hacimsel değerler hesaplanabilir.

- Her niceliğin ortalama değeri ile birlikte bağıl hata da hesaplanır.
- Öykü sayısı arttıkça, bağıl hata azalır.

- Hesaplanan nicelikler, uygun birimler için dönüşüm faktörleri ile çarpılabilir.

Simülasyonlarda Karşılaşılan Zorluklar

Karmaşık geometri

Problemin geometrisi karmaşıklaştıkça,

- Hesaplama için gereken bilgisayar gücü (hız, hafıza, vs.) artar.
- Hesaplama için harcanan süre artar.

Varyans azaltma teknikleri kullanılarak, süre kısaltılabilir.

Elektron taşıma

Simülasyonlarda uzun süre ihmal edilmişti.

- Elektron menzilleri kısadır.
- Bremsstrahlung oluşum şiddeti düşüktür.

Hesaplama hassasiyeti

Düşük hata oranları için uzun süre çalıştırmak gerekir.

Sistemik hata

- Problemin tanımındaki olası sistemik hata sonuçların da hatalı olmasına yolaçacaktır.
- Tespiti zordur.

