

# Radyasyonun Biyolojik Etkileri

Dr. Aslı AYKAÇ  
NEUTıp Fakóltesi  
Biyofizik AD

# Radyasyonun Biyolojik Etki Mekanizması

Türü ne olursa olsun, radyasyonların temel biyolojik etki mekanizması iki tane.

- **Eksitasyon**  
**“excitation” (uyarma)**

Geçtikleri ortamda karşılaştıkları atomların yörüngelerindeki elektronlara enerji vererek uyarırlar.

- **İyonizasyon**  
Uyarı sonucunda elektronun yörüngesinden çıkması.

- *Eksitasyon ve iyonizasyon etkilerinin sonucunda, molekülün parçalanarak serbest iyonların oluşması, bunların birbirleriyle veya yakınlarındaki moleküllerle birleşip yeni bileşikler (serbest radikaller ve peroksitler) oluşturması ki, bunlar olağanüstü toksik.*

# Eksitasyon ve İyonizasyon

**Canlı organik ortamda ilerleyen radyasyonun, karşılaştığı atomlara çarparak aktardığı enerji;**

- **Az miktarda ise,** elektron kendisini çekirdeğe bağlayan kuvveti yenip, atomu terkedemez, sadece bir üst yörüngeye atlar.
- **Yeterince büyük miktarda ise,** elektron çekirdekten kurtulur ve atomu terkeder. Terkedilen atom iyonlaşmıştır ve bir elektronu eksik, yani +1 yüklü hale gelmiştir. Kazandığı yüksek enerji ile hızlanarak yerinden fırlayan elektron, ortamdaki diğer atomların elektronlarıyla çarpışır ve her çarpışmada enerji kaybeder. Yeni serbest elektronlar oluşur. Böylece birçok atom iyonlaşır. İlgili molekül ikiye parçalanır.

# Lineer Enerji Transferi (LET)

Radyasyonların biyolojik etkilerini açıklamak için kullanılan bir kavram. Radyasyonun oluşturacağı biyolojik etkinin şiddeti, birim hacimdeki dokuda oluşturduğu eksitasyon ve iyonizasyon sayısı ile orantılı.

$$LET = SI \times E_i$$

SI: Spesifik iyonizasyon

Radyasyonun birim uzaklıkta oluşturduğu iyon çifti sayısı (iyon çifti/cm)

$E_i$ : Bir iyon çifti oluşturmak için gerekli enerji (havada; 34 eV/iyon çifti)

Havada, bir atomun iyonizasyonu için, 2,2 atomun eksitasyonu gerekmektedir.

İyonizasyon sayısı, partikülün yükü ile doğru, hızı ile ters orantılı.

Yavaş hareket eden bir partikül, hızlı hareket edene göre, daha uzun süre etkisini gösterir.

$\alpha$  partikülü ağır ve yavaş;  $\beta$  partikülü ise hafif ve hızlıdır.

$\beta$  partikülü,  $\alpha$  ya göre, organizmaya daha fazla girmekte, fakat daha az tehlikeli.

10 keV - 10 MeV enerjili partiküller için; yumuşak dokuda

LET = 0,2 - 2 keV/ $\mu$ m

# **Radyasyonun Erişme Uzaklığı**

$$R = E / LET$$

R: Erişme uzaklığı (cm)

E: Radyasyonun enerjisi (MeV)

LET: Lineer enerji transferi (MeV/cm)

### Örnek:

0,5 MeV enerjili  $\alpha$  partikülünün havadaki erişme uzaklığı nedir?  
(Bu enerjiye sahip  $\alpha$  partikülünün havada oluşturduğu iyon çifti sayısı: 60000, bir iyon çifti oluşturmak için harcadığı enerji: 34 eV/ion çifti).

### **Çözüm:**

$$\begin{aligned} R &= E / LET \\ &= E / S \times E_i \\ &= 0,5 \text{ MeV} / 60000 \text{ iyon çifti/cm} \times 34 \cdot 10^{-6} \text{ MeV/ion çifti} \\ &= 0,24 \text{ cm} \\ &= 2,4 \text{ mm} \end{aligned}$$

# \* Radyasyonun Hücre Bazında Etkisi

<u>evre</u>	<u>süresi</u>	<b>Direkt etki</b>	<b>İndirekt etki</b>
Fiziksel	$10^{-13}$ s	Biyomoleküllere enerji aktarımı	Biyomoleküllerin bulunduğu ortama enerji aktarımı
Fizikokimyasal	$10^{-10}$ s	İyonlaşmış canlı molekül	İyonlaşmış cansız molekül
Kimyasal	$10^{-6}$ s	Serbest radikaller Moleküllerarası reaksiyon	
Biyolojik	1 s - 40 yıl	Biyolojik etki Hücre ölümü → Organizma ölümü	

# Radyasyonun Hücreye Direkt Etkisi

- **Kompartıman Teorisi:**

Her canlı küçük kompartımanlardan oluşur.

Hücre de başlı başına bir canlı olduğundan, kendine özgü kompartımanları vardır.

Büyük kompartımanlar: nukleus ve sitoplazma.

Küçük kompartımanlar: nukleustaki kromozomlar ve nukleolus; sitoplazmadaki mitokondriyumlar ve golgi elemanları.

Bunlar da daha küçük kompartımanlara ayrılırlar.

Mitokondrilerin membranlarının dış ve iç yüzleri gibi.

- **Hedef Teorisi:**

Radyoaktiviteyle oluşan partikül veya fotonlar, hücrenin en duyarlı bölümüne yönelir.



**Hücrenin en duyarlı bölümü:** çekirdek ve özellikle de, hayati önem taşıyan olayların geçtiği **kromozomlar**.

**Habrobracom (parazit bir arı türü) yumurtasında yapılan araştırmalar;** çekirdekten geçen tek bir  $\alpha$  partikülünün bile yumurta için öldürücü olduğunu, sitoplazmadan geçen  $16 \cdot 10^6$   $\alpha$  partikülünün ise yumurtaların sadece %50 sini öldürdüğünü.

**Hücrenin ölümü için 5-10 rad yeterli,**  
**DNA'nın tahribi için ise, 100 ila 10000 misli dozlar gerekli.**

**Radyasyonun etkileri,**  
alındıktan **hemen** sonra görülebileceği gibi,  
aynı hücrede veya yavru hücrelerde **bir süre sonra,**  
ya da **kuşaklar sonraki** hücrelerde ortaya çıkabilir.

Hücrenin o anda bulunduğu **biyolojik durum** önemli.

Hücreler iki durumda bulunabilir: bölünme ve bölünmeme durumu. Gelişmenin ilk aşamasında tüm hücreler bölünme durumunda.

Bölünme durumundaki hücreler, radyasyona daha duyarlı. Lenfositler dışında, bölünmeme durumunda dirençli.

Lenfositler ise, bölünmeme durumunda dahi küçük dozdaki radyasyonlara duyarlı.

Lisozomlardaki membranın yırtılması ile açığa çıkan proteolitik enzimlerin, hücre içindeki proteinlerin parçalanmasına sebep olarak hücreyi öldürdüğü ileri sürülmüş, elektron mikroskobu ile radyasyonun hücre membranlarını tahrip ettiğinin gösterilmesiyle, bu görüş destek bulunmuştur.

**Radyasyonun dozunun yanında,  
şiddeti de (birim zamanda uygulanan radyasyon miktarı)  
önemli.**

Dozun fraksiyonlara ayrılması,  
hücrede tamir olaylarına fırsat verir.

# Radyasyonun Hücreye İndirekt Etkisi

Hücre içeriğinin çoğu su.

Radyasyon su molekülüne çarpınca, elektronlardan biri dışarıya fırlar, su molekülü ikiye parçalanır (iyonlaşır):  $[H^+]$  iyonu ve  $[*HO]$  radikali.

$[*OH]$  radikalinin tek duran elektronu, başka bir elektronla çiftleşmeyi arzular ve bağlayıcı kuvveti su molekülünden daha az olan büyük bir biyomolekülün bir elektronunu çekerek alır. Böylece biyomolekül indirekt olarak parçalanır. Radyasyonun çarpmasıyla su molekülünden fırlayan elektron ise, başka bir su molekülü tarafından yutulur ve bu su molekülü de iki parçaya bölünür:  $[*H]$  radikali ve  $[OH^-]$  iyonu.  $[*H]$  radikalinden zincirleme reaksiyonlarla sırasıyla  $H_2O_2$  ve  $[*OH]$  oluşur.

İndirekt etki sonucunda oluşan, *30 Å difüzyon mesafesine sahip ve olağanüstü toksik* bu maddeler hücrenin yapısını bozar, özellikle çekirdeğe zarar verir.

Bir fotonun su molekülüne çarpması ile 4 biyomolekül indirekt olarak inaktif olur.

Oksijenin yok veya az olduğu organik ortamda (tümör doku); indirekt reaksiyonlarla 2 biyomolekül tahrip olur.

# Radyasyonun İnsan Üzerindeki Etkileri

Diğer tüm canlılarda olduğu gibi, insan organizması üzerinde de zararlı etkiler:

- Deri ve deri altı dokularda tahribat
- Kan ve kan yapıcı organlarda tahribat (anemi ve lösemi)
- Kanser (iyi huylu ve kötü huylu; benign / malignant)
- Katarakt oluşumu
- Kısırlık
- Ömür kısalması
- Genetik etkiler

# Eşikli ve Eşiksiz Radyasyon

- **Eşikli radyasyon** Doz belirli bir seviyeye ulaştınca etkili olan radyasyon.
- **Eşiksiz radyasyon** Sıfırın üzerinde belirli bir alt limiti olmayan radyasyon. En ufak dozdaki bir radyasyon bile zararlı etki oluşturabilir.

\* Vücut içine uygulanan radyoizotoplar küçük dozda, fakat dış radyasyona göre daha uzun süre etkili.

# Radyasyon Hastalığı

- **Akut Radyasyon Hastalığı**

Büyük dozda

(100 R ve daha fazla)

radyasyonun kısa sürede

etkisiyle.

Gün ve hafta gibi kısa sürede

görülen biyolojik etkiler.

Deri, kan ve kan yapıcı organlar

üzerindeki etkiler.

- **Kronik Radyasyon Hastalığı**

Küçük dozda radyasyonun

uzun sürede etkisiyle.

En az birkaç yıl içinde veya

20 - 30 yıl sonra görülen

biyolojik etkiler.

Uzun süre X ışınları alınmasıyla

oluşan cilt kanseri.

Birkaç  $\mu\text{g}$  Ra ile kemiklerde

sarkom oluşması.

Malignant tümörler şeklinde

olduğundan daha tehlikeli.



# **Radyasyonun Tıpta Kullanılması**

- **Noktasal ışınlamanın kısmi etkisi**
- **Yüksek dozda ışınların öldürücü etkisi**
- **Üreme hücrelerinin ışınlamayla etkilenmesi**

# Noktasal Işınlama

- Hücrenin 2  $\mu\text{m}$  çapında çok dar bir alanı ışınlanır. Böyle çok küçük bir alanın ışınlandırılması, hücrenin ölümüne sebep olmaz, fakat o bölgede değişiklik oluşturur.
- Bu yöntemle;  
hücrenin belirli bir bölgesindeki moleküler değişikliğin diğer bölümleri nasıl etkilediği ve ışınlandırılmış hücrelerle ışınlandırılmamış hücreler arasındaki fonksiyonel farklılık araştırılabilir. Nukleolus ışınlandırmasıyla kromozomlarda DNA sentezinin azaldığı görülmüştür.

# **Yüksek Dozlarla Işınlama**

- **Kanser tedavisi**

Yüksek dozda radyasyonun hücreleri öldürme özelliğinden faydalanılarak istenmeyen hücrelerin yok edilmesi.

- **Hububatın ışınlandırılması**

Yüksek dozda ışınların canlıları çok kısa sürede öldürmesinden yararlanarak, buğdaylar siloya alınırken, 200000 R lik ışınlamadan geçirilip, içindeki istenmeyen canlılar (böcekler, bakteriler, mantarlar vb) yok edilir. Böylece buğdayların silo içinde bu canlılar tarafından tahribi önlenmiş olur.

- **Besinlerin ışınlandırılması**

Aynı yöntemle et, sebze ve meyvalar da korunabilir.

- **Tıbbi aletlerin sterilizasyonu.**

# Üreme Hücrelerinin Işınlanması

- **Kısırlaştırma**

Radyasyon üreme hücrelerini döllenmede kullanılamaz hale getirir. Canlı ölmediği halde, üreme hücrelerinin inaktif duruma getirilmesiyle kısırlaştırma gerçekleşir.

- **Kalıtsal değişiklik**

Üreme hücrelerinin ışınlanmasıyla kromozomlarda ortaya çıkan değişiklikler ve bunların kalıtsal yolla sonraki kuşaklara taşınması, daha ekonomik yeni hayvan ve bitki türlerinin üretilmesini sağlar.

**İyonize radyasyonun doğrudan pozitif etkisi yoktur. Fakat kullanım alanları sebebiyle tıp uygulamaları önemlidir**

- X rays diagnostic methods
- Computer tomography
- emission tomography
- radioimmunodetection
- rádionuclide diagnostic methods
- anti-inflammatory and analgetic therapy



# LIMITLER

**maximum permissive (acceptable) doses**

**Maksimum müsaade edilebilir dozlar**

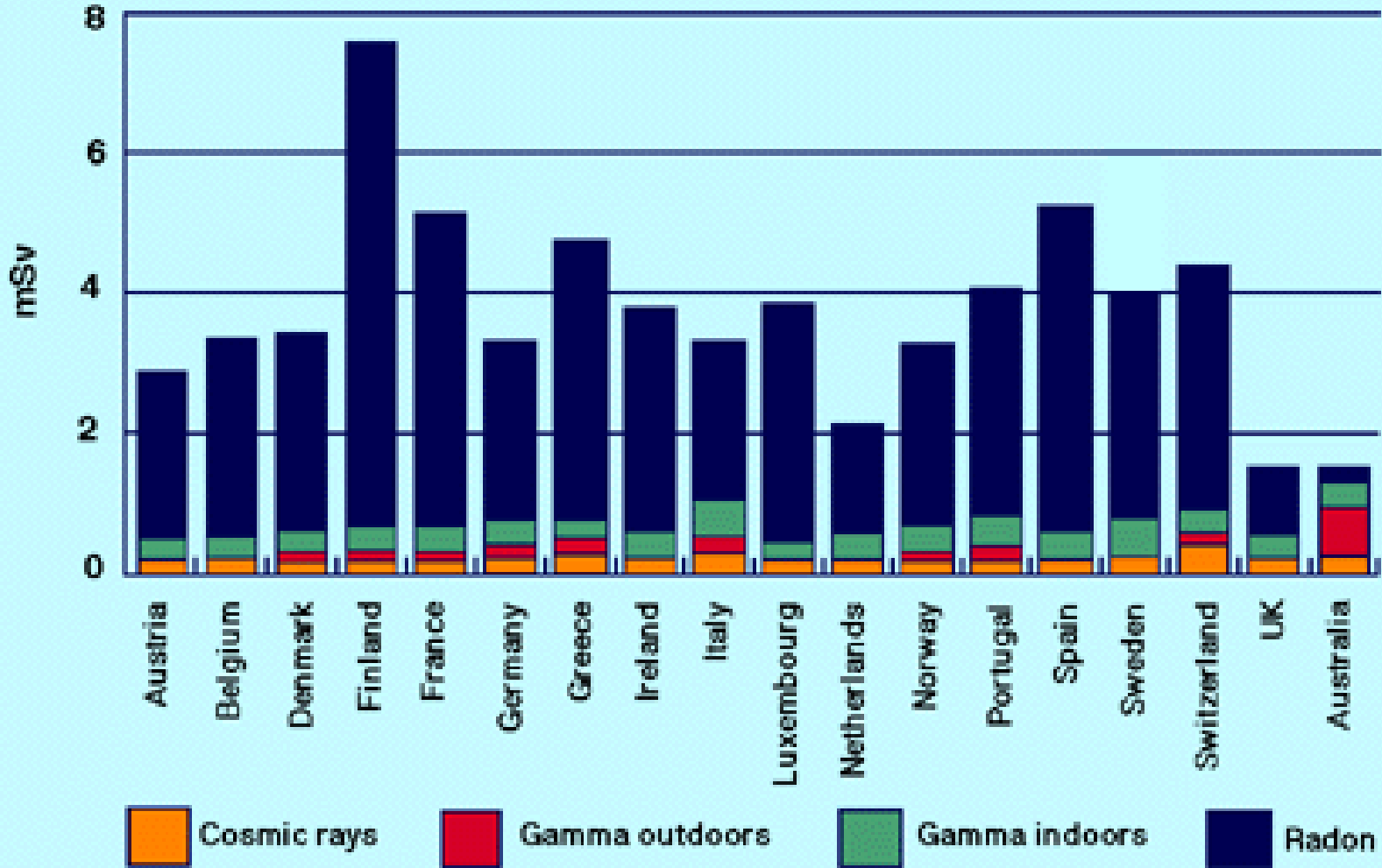
- gonads, bone marrow (the whole body) - 5 mSv / year
- skin, thyroid gland, bone - 30 mSv / year
- hand, forearm, leg, ankle - 75 mSv / year
- rest of tissues - 15 mSv / year

# Maruz kalınan dozlar

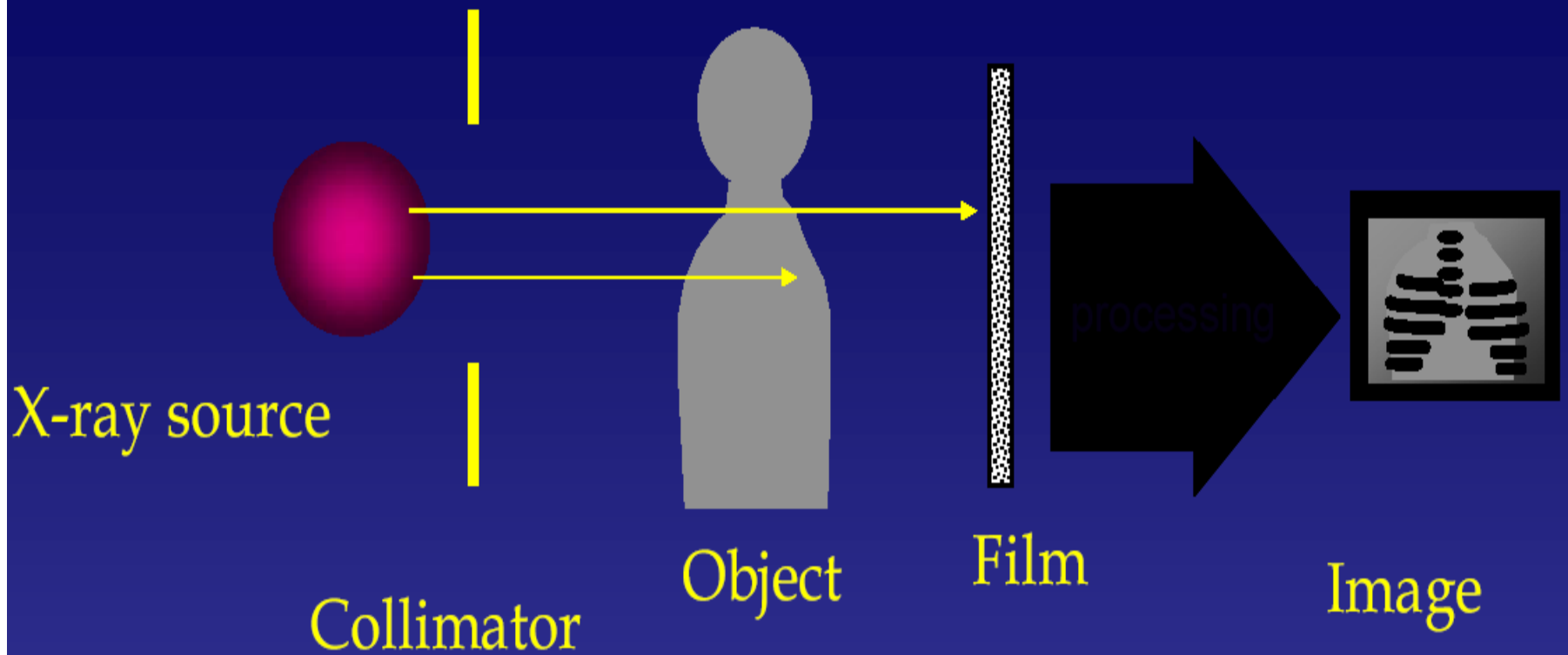
- Doğal kaynaklardan
  - Havadaki Rn, antenler, madeni kaynaklar ve kozmik ışıklardan – yaklaşık 2.5 mSv / yıl
- Yapay kaynaklardan
  - Medikal uygulamalardan, nükleer, askeri atıklar, ve nükleer tesislerden–  
yaklaşık 0.5 mSv / year



## AVERAGE ANNUAL DOSES FROM NATURAL RADIATION SOURCES



# Typical Imaging Chain for Medical X-ray Systems





# Direk grafi



# Radiobiology



- **Mihran Kassabian (1870-1910)**



## Fig. A

6-8 weeks after  
multiple coronary  
angiography and  
angioplasty  
procedures



## Fig. B

16 to 21 weeks a  
procedure, with s  
ulcerated area  
present



**Fig. C**

**18-21 months after  
procedure, evidence of  
tissue necrosis**



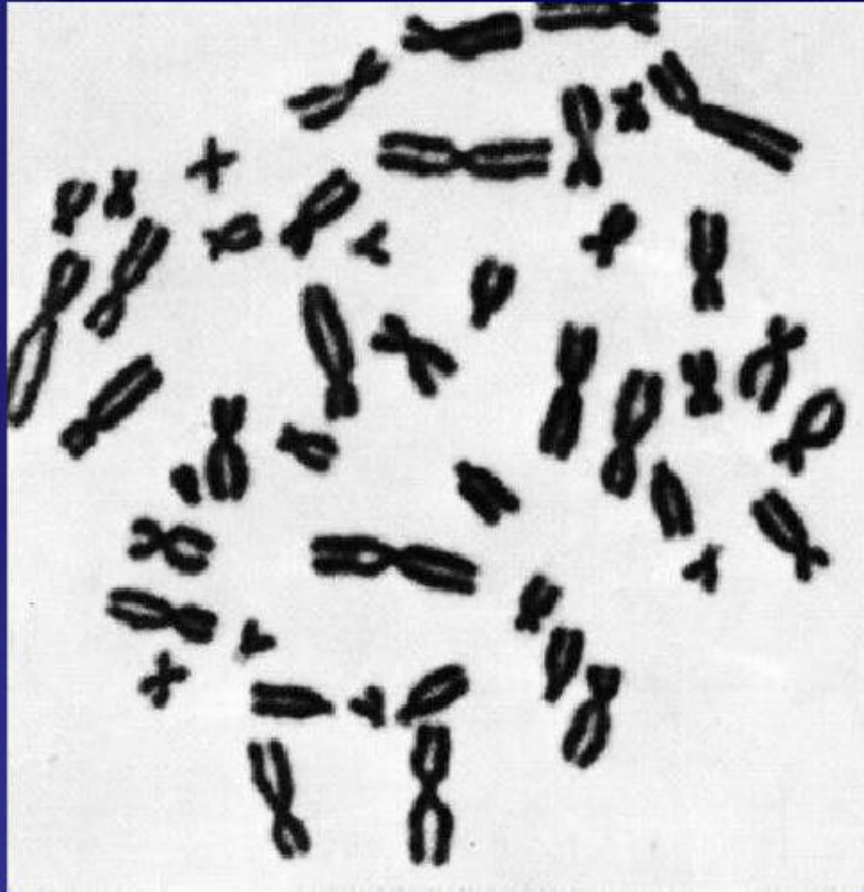


## Fig. D

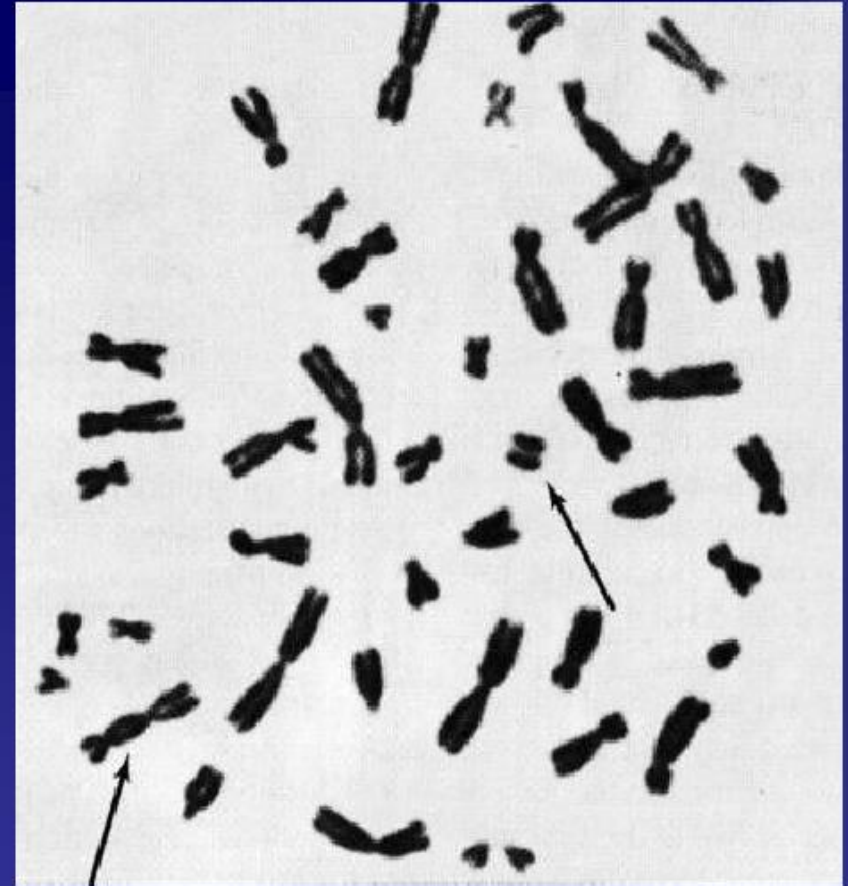
Close up of lesion in  
Fig. C

From injury, dose  
probably in excess of 20  
Gy .

# Examples of Radiation-induced Aberrations



Normal metaphase



Dicentric and fragment

Radiation-induced chromosome aberrations in human leukocytes viewed at metaphase

# **Radyasyon Güvenliđi**

# **Radyasyon Kaynakları**

- **Doğal Radyasyon Kaynakları**
- **Dış Radyasyon**
- **İç Radyasyon**
- **Yapay Radyasyon Kaynakları**

# Dış Radyasyon

- Güneş sistemindeki ve diğer Galaksilerdeki yıldızlardan gelen **kozmetik ışınlar**.  
Yüksek yerlerde, atmosferin emiciliği azaldığından, kozmik ışınların etkisi artar.  
1700 m yükseklikte % 50 fazla.
- Dünya'mızdaki toprak ve kayalarda yeralan **radyoaktif elementler**.  
Bu elementler bakımından zengin bazı bölgelerde, radyoaktivite fazla.  
Radyum madenlerinde çalışanların hastalandıkları ve erken öldükleri, çok eskilerden beri bilinmekte.

# **İç Radyasyon**

**İnsanın kendi vücudu içindeki radyoaktif elementler.**

Ra-226, Ra-228, Pb-210, Po-210, K-40, C-14

*Radyasyon bakımından en önemli dokular:*

- \* Gonadlar (genlerin kalıtımı ile gelecek kuşaklara)
- \* Kemik yüzeyini örten hücreler (tümörler)
- \* Kan yapıcı organlar (lösemi)

# Doğal Radyasyon Kaynaklarından Alınan Radyasyon (mrem/yıl)

	gonadlar	Kemik yüzeylelerini örten hücreler	Kan yapıcı hücreler
Dünya dışından gelen kozmik ışınlar	50	50	50
Dünya'daki radyoaktif elementlerden gelen ışınlar	50	50	50
Ra ve Th serisi iç elementler	5	13	5
K-40 iç elementi	20	15	15
C-14 iç elementi	1	2	2
<b>Toplam doz</b>	<b>126</b>	<b>130</b>	<b>122</b>

# Yapay Radyasyon Kaynakları

İnsanın kendi eliyle oluşturduğu radyoaktivite.

- **Tıpta** tanı ve tedavi amacıyla kullanılan radyoaktivite.
  - \* 1895 yılında bulunan röntgen ışınları, yapay radyasyonun başlangıcı.
  - \* 1934 yılında elde edilen yapay radyoizotoplar
- **Teknolojide** kullanılan çeşitli radyoaktif elementler
- **Nükleer enerji** santralleri
- **Nükleer bombalar**



**röntgen muhayenelerinde  
genetik bakımdan en önemli dokular olan  
gonadların aldığı radyasyon  
(mrem)**

	<u>erkek</u>	<u>kadın</u>	<u>Fetus</u>
Doğumda karın		367	723
Ürografi	765	585	943
Pelvimetri		745	154
Kalça, üst femur	740	102	154
Lumbosakral	370	392	536
toraks	3	5	6
Üst sindirim sistemi	44	333	448

# **Radyografide Kemik İliğinin Aldığı Radyasyon (mrem)**

<b><u>Muhayene türü</u></b>	<b><u>Kemik iliği dozu</u></b>
Dorsal vertebral kolon	30 – 400
Lumbar vertebral kolon	50 – 400
Br lavmanlı kolon	200 - 700
toraks	1,3 – 40
lumbosakral	300
Üst sindirim sistemi	200 - 500
Safra kesesi	150 – 400
pelvimetri	800

**Kemik iliğinin aldığı doğal radyasyon: 122 mrem/yıl**

**Nükleer bombalar sonucunda,**

**Sr-90 tarafından oluşturulan kemik iliği dozu: 20 - 40 mrem/yıl**

# Nükleer Artıklar

İnsanın kendi eliyle oluşturduğu yapay radyasyon kaynaklarından biri:  
**nükleer reaksiyonlar**

- **Fisyon** (bölünme) reaksiyonu (atom bombası)
  - \* Uranyum ve Plutonyum'un parçalanması sonucunda, fisyon ürünü olarak 250 kadar radyoizotop etrafa saçılır
  - \* **Küçük (Kilotonluk) Patlamalar**
- **Füzyon** (birleşme) reaksiyonu (hidrojen bombası)
  - \* Füzyonun gerçekleşmesi için, fisyon gerektiğinden, bir miktar fisyon ürünü sözkonusu ise de, genelde, Fisyon ürünlerine sebep olmaz. (Temiz Bomba).
  - \* **Büyük (Megatonluk) Patlamalar**

# **Küçük Patlamalar**

## **“Kilotonluk Patlamalar”**

Fisyon sonucunda oluşur.

Fisyon ürünlerine sebep olur.

Ateş küresi, toprağın yüzeyine yakın bir yerde, toprakla da birleşerek, rüzgarın durumuna, partiküllerin boyutuna ve yarı ömrüne bağlı olarak kilometrelerce öteye yayılabilir.

Belirli bölgelerde radyasyon artışı yaratır.

Dünya çapında radyasyon artışına neden olmaz.

# **Büyük Patlamalar**

## **“Megatonluk Patlamalar”**

Füzyon reaksiyonu sonucunda oluşur.

Füzyonun gerçekleşmesi için, fisyon reaksiyonuna da ihtiyaç duyulduğundan, bir miktar fisyon ürünü oluşsa da, genelde, fisyon ürünlerine sebep olmaz. Bundan dolayı, temiz bomba adı verilmiştir.

Atmosferdeki nitrojen atomlarına etkisiyle, aşırı miktarda C-14 oluşmasına neden olur.

Ateş küresi, sağlanan büyük enerji ile, 20 - 30 km yüksekliğe çıkar.

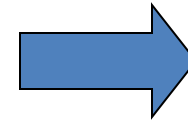
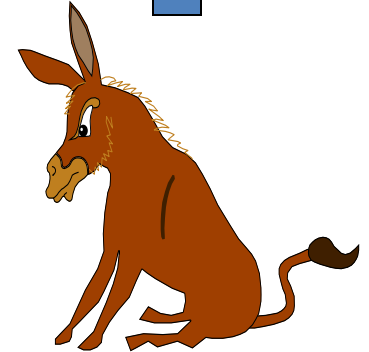
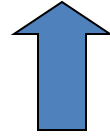
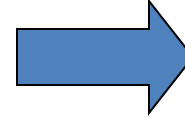
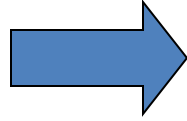
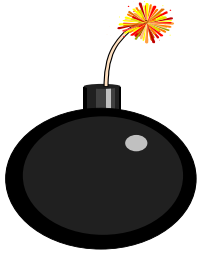
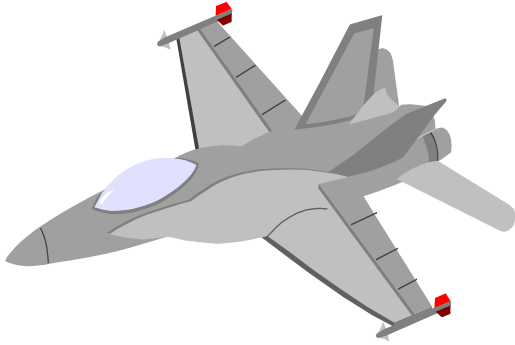
Strasfore ulaşır. Strasfordaki bu radyoaktif depo, Tropopaus'daki bir yarıktan sızarak, Kuzey ve Güney Yarım Küre'nin üst bölgelerine daha fazla olmak üzere yayılır.

Gökten yağın başlıca radyoaktif maddeler: Sr-90, Cs-137, I-131

Buğday ekiminin fazla olduğu yerlerde yoğunlaşmakta.

# Nükeer Artıkların İnsan Vücutuna Girmesi

\*



Nükleer patlamalar sonucunda saçılan Sr-90, Cs-137 ve I-131 gibi radyoaktif elementler, toprakta ve önemli bir bölümü bitkilerin yapraklarında birikir. Bitkilerin kökleriyle topraktan emdiği miktar önemsizdir. Daha çok hububat ekim alanlarını tercih eder.

Doğrudan tüketilen bitkisel besinler veya onlarla beslenen hayvanlar tarafından insana transfer olur.

### İnsanın aldığı Sr-90

- % 25 buğdaydan (depolama ve öğütme sırasında azalmayla)
- % 25-30 sebze ve meyvelerden
- % 40-50 et ve sütten

İnek, Sr-90'a karşı adeta bir filtre gibi çalışmaktadır.

Sr-90'ın çoğu kemiklerde depolanmakta, sadece çok azı süte geçebilmekte, ayrıca sütteki Ca sindirim kanalından emilmesini azaltmakta.

I-131 ve Cs-137 ise kolayca sindirilmekte ve sülle salgılanmakta.



# Müsaade edilen Radyasyon Dozu

## Uluslararası Radyolojik Korunma Komisyonu (ICRP)

görevleri gereği radyasyonla çalışanların vücutlarındaki toplam dozu hesaplamak için,

$$D = 5 (N - 18)$$

**D:** Max müsaade edilen doz

**N:** Kişinin yaşı

Yıllık max müsaade edilen doz: 5 rem

Yılda 50 hafta çalışıldığı düşünülürse,

Haftalık max müsaade edilen doz: 0,1 rem = 100 mrem

Sadece el, kol, ayak ve bacaklar radyasyona mağruz kalıyorsa;

Yıllık max müsaade edilen doz: 75 rem

# **İnsan Vücutunda Müsaade Edilen Radyoizotopların Miktarı ( $\mu\text{Ci}$ )**

\*

<b>Ra-226</b>	<b>0,1</b>
---------------	------------

<b>Sr-90</b>	<b>2</b>
--------------	----------

<b>H-3</b>	<b>1200</b>
------------	-------------

# İçme Suyu ve Solunum Havasında Müsaade Edilen Radyoizotop Konsantrasyonları ( $\mu\text{Ci}/\text{cm}^3$ )

\*

	<u>su</u>	<u>Hava</u>
Sr-90	$4 \times 10^{-6}$	$3 \times 10^{-10}$
I-131	$2 \times 10^{-3}$	$3 \times 10^{-7}$
İçeriği bilinmeyen su		$10^{-9}$
İçeriği bilinmeyen hava		$10^{-9}$

# **Radyoizotopların Tehlikelerine Göre Sınıflandırılması**

## **Çok tehlikeli**

Sr-90  
Ra\*-226  
Pu-239

## **Tehlikeli**

Ca-45  
Sr-89  
Ba-140  
I-131

## **Orta dereceli tehlikeli**

Na-22  
Na-24  
P-32  
S-35  
Cl-36  
K-42  
Mn-52  
Mn-54  
Mn-56  
Fe-55  
Co-58  
Co-60  
Cu-64  
Zn-65  
Br-82  
Rb-86  
Mo-99  
Cs-137  
Ba-137

## **Az tehlikeli**

H-3  
C-14

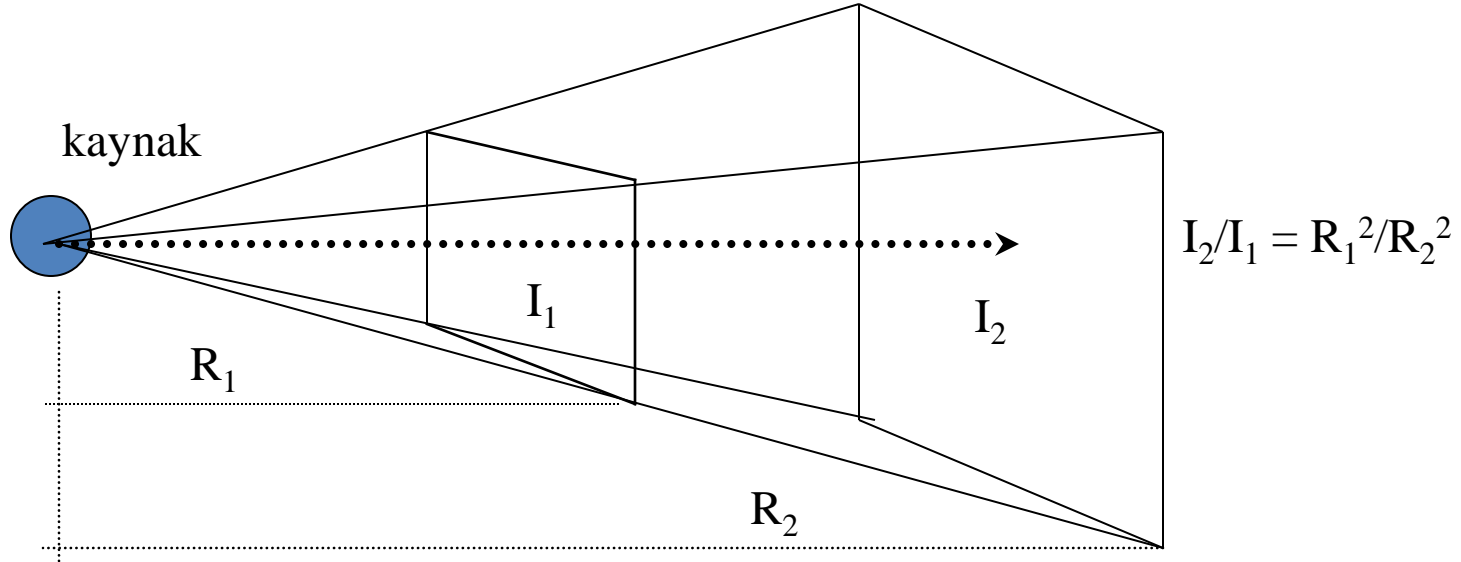
# **Dış Radyasyon Tehlikelerini Etkileyen Faktörler**

- **Uzaklık**
- **Süre**

# Radyasyondan Korunmak İçin Uzaklığın Arttırılması

## Ters kareler kuralı:

Noktasal bir kaynaktan çıkan radyasyon demetinin şiddeti, uzaklığın karesi ile ters orantılı.



Bu sebeple; zayıf kaynaklar bile el yerine pens ile tutulmalı.

10 cm uzunluğunda bir pens, 1 mm'den alınacak dozu  $10 \text{ cm} = 100 \text{ mm} \gg (100)^2 = 10000$  defa azaltacaktır.

# **Işınlama Suresinin Kısaltılması**

Alınan radyasyon dozu  $\alpha$  kaynak yakınında bulunma süresi

Çalışma süresi sınırlandırılmalı.

# Zırhlama Yapılması

Uzaklığın arttırılması ve çalışma süresinin kısaltılması, radyasyonun dozunu yeterince azaltmıyorsa; zırhlama.

C-14, S-35 ve Ca-45 gibi zayıf enerjili  $\beta$  emetörleri, buldukları kabın çeperlerinden geçemeyeceklerinden, bunlar için zırhlama gerekmez.

P-32 gibi yüksek enerjili  $\beta$  emetörleri için ise, 0,5 - 1 cm kalınlığında plastik levhalarla zırhlama gerekli.

Gama ışınları zırhlamasında, kurşun levhalar ve tuğlalar kullanılır.

Kurşun levhaların kalınlığı, gama radyasyonunun enerjisine ve şiddetine bağlıdır.

*Örneğin;*

1 MeV luk gama enerjisi için, radyasyon şiddetini yarıya indiren kurşun kalınlığı: 1 cm.



## Typical scan doses

Examination	Typical effective dose (mSv)	(millirem)
X-ray Personnel security screening scan	0.00025	0.025 <sup>[19]</sup>
Chest X-ray	0.1	10
Head CT	1.5 <sup>[20]</sup>	150
Screening mammography	3 <sup>[12]</sup>	300
Abdomen CT	5.3 <sup>[20]</sup>	530
Chest CT	5.8 <sup>[20]</sup>	580
CT colonography (virtual colonoscopy)	3.6–8.8	360–880
Chest, abdomen and pelvis CT	9.9 <sup>[20]</sup>	990
Cardiac CT angiogram	6.7-13 <sup>[21]</sup>	670–1300
Barium enema	15 <sup>[12]</sup>	1500
Neonatal abdominal CT	20 <sup>[12]</sup>	2000

For purposes of comparison, the average background exposure in the UK is 1-3 mSv per year.