

RADYASYON ÖLÇÜM YÖNTEMLERİ

Konu 4

SİNTİLASYON DEDEKTÖRLERİ

Prof. Dr. Dođan BOR

SİNTİLATÖRLER

Soğurdukları radyasyonun sintilasyon ışığı olarak veren kristallerdir.

FLORESANS : uyarılmış bir maddenin aniden görünür bölgede ışık yayması

FOSFORESANS : Floresansa göre daha uzun dalga boylu ışığın daha yavaş sürede salınması

GECİKMİŞ FLORESANS : Ani floresans ile aynı salınım spektrumunda ancak uyarılma sonrası ışık salınımının gecikmeli olması (ateş böceği)

SİNTİLATÖRLER

İdeal bir sintilasyon maddesinin özellikleri aşağıdaki gibi olmalıdır:

- Yüklü parçacıkların kinetik enerjilerini yüksek bir sintilasyon etkinliği ile dedekte edilebilecek ışığa çevirmelidir.
- Bu dönüşüm doğrusal olmalıdır yani, ışık verimi soğurulan enerji ile geniş bir aralıkta orantılı olmalıdır.
- Işığın etkin bir şekilde toplanması için ortam kendi salınımının dalga boyunu geçirgen olmalıdır.
- Hızlı sinyal pulslarının oluşumu için oluşan luminesansın (aydınlanmanın) azalım zamanı kısa olmalıdır.
- Materyalin optik kalitesi iyi olmalı ve istenilen boyutta dedektör yapılabilmelidir.
- Sintilasyon ışığının fotoçoğaltıcı tüpe (PM tüp) etkin bir şekilde aktarımı için kırılma indeksi camın indeksine yakın olmalıdır.

SİNTİLATÖRLER

İNORGANİK KRİSTALLER

Yüksek ışık verimi ve doğrusallık
Yavaş yanıt süreleri

ORGANİK KRİSTALLER

Düşük ışık verimi
Hızlı yanıt süreleri

Inorganic Scintillators © expensive

Advantages

high light yield [typical $\epsilon \sim 0.13$]

high density [e.g. PWO $\sim 8.3 \text{ g/cm}^3$]

good energy resolution

Disadvantages

complicated crystal growth

large temperature dependence

Organic Scintillators © cheap

Advantages

very fast

easily shaped

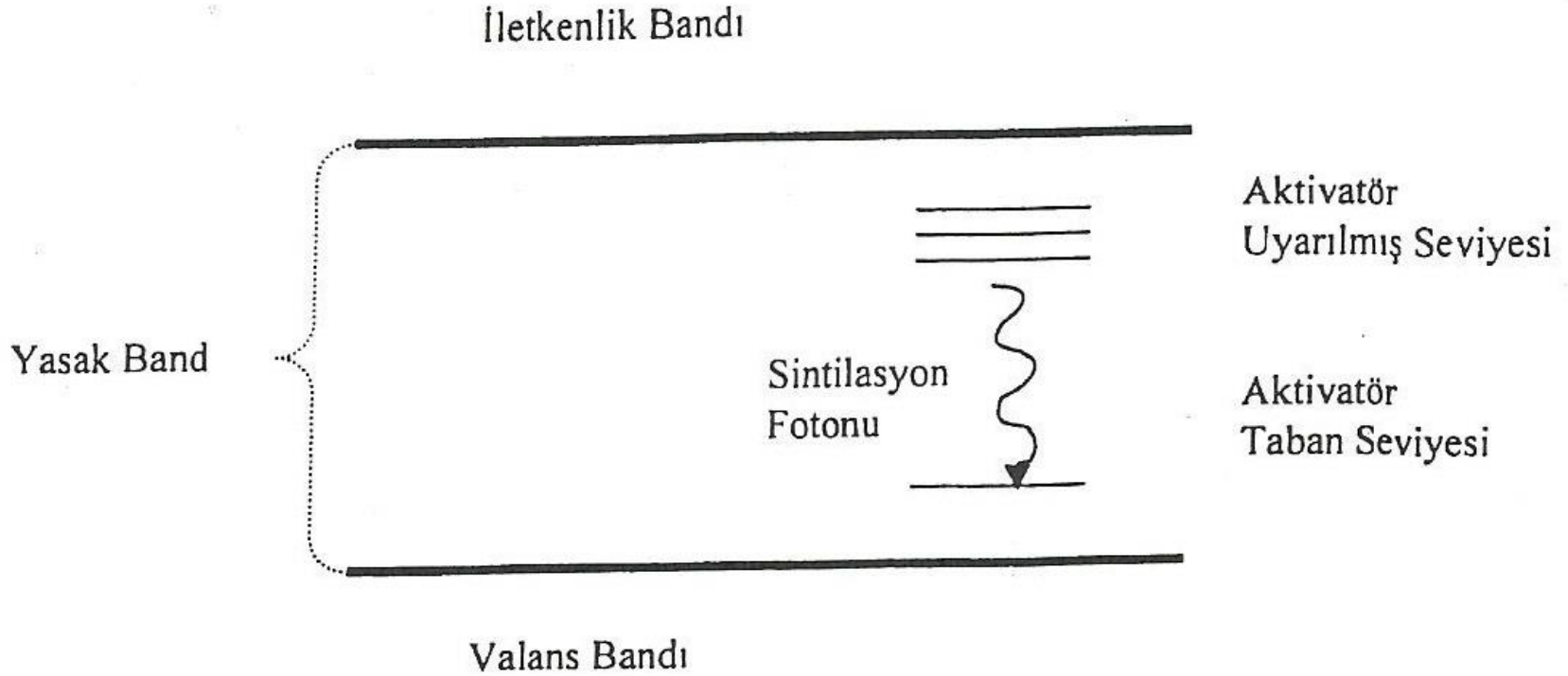
small temperature dependence

Disadvantages

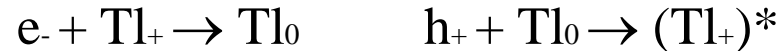
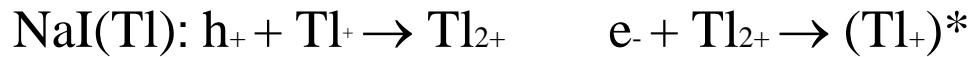
lower light yield [typical $\epsilon \sim 0.03$]

radiation damage

İNORGANİK KRİSTALLER



Aktive edilmiş bir sintilatörün enerji bant yapısı



SİNTİLYASYON FOTONLARININ MEYDANA GELİŞLERİ

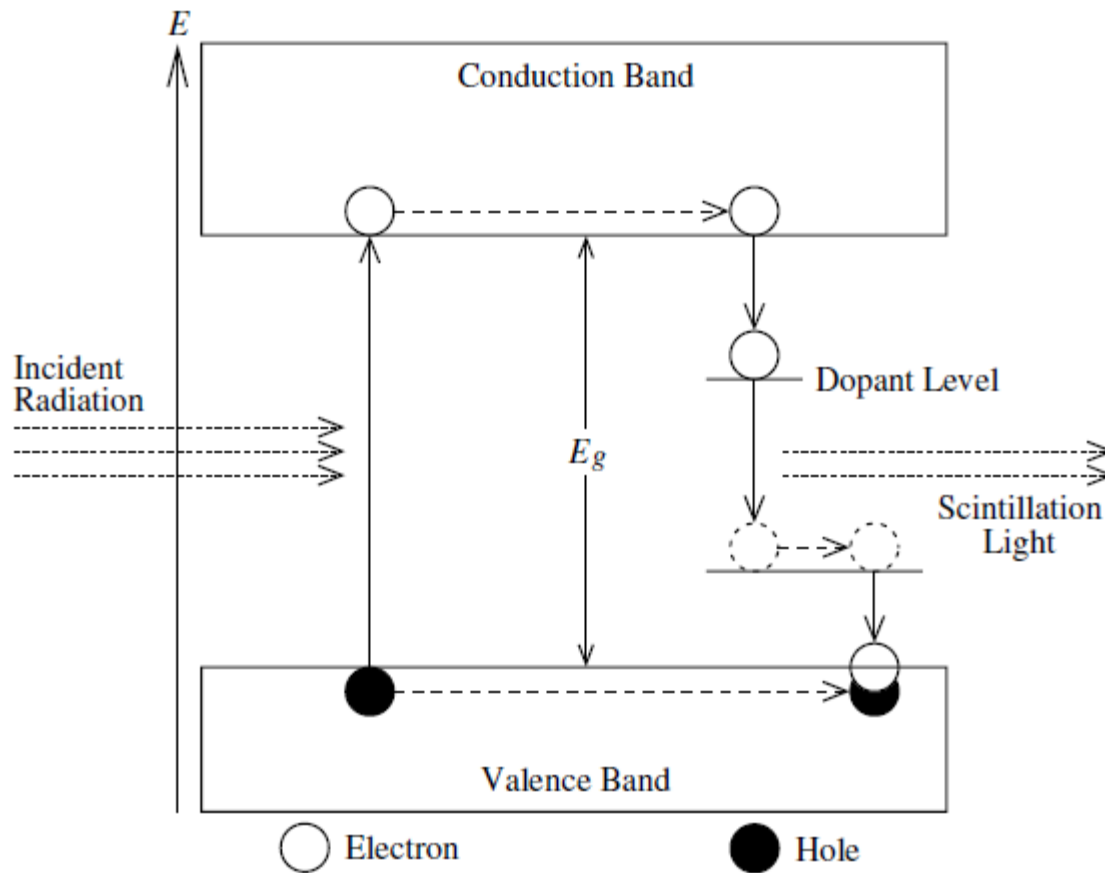
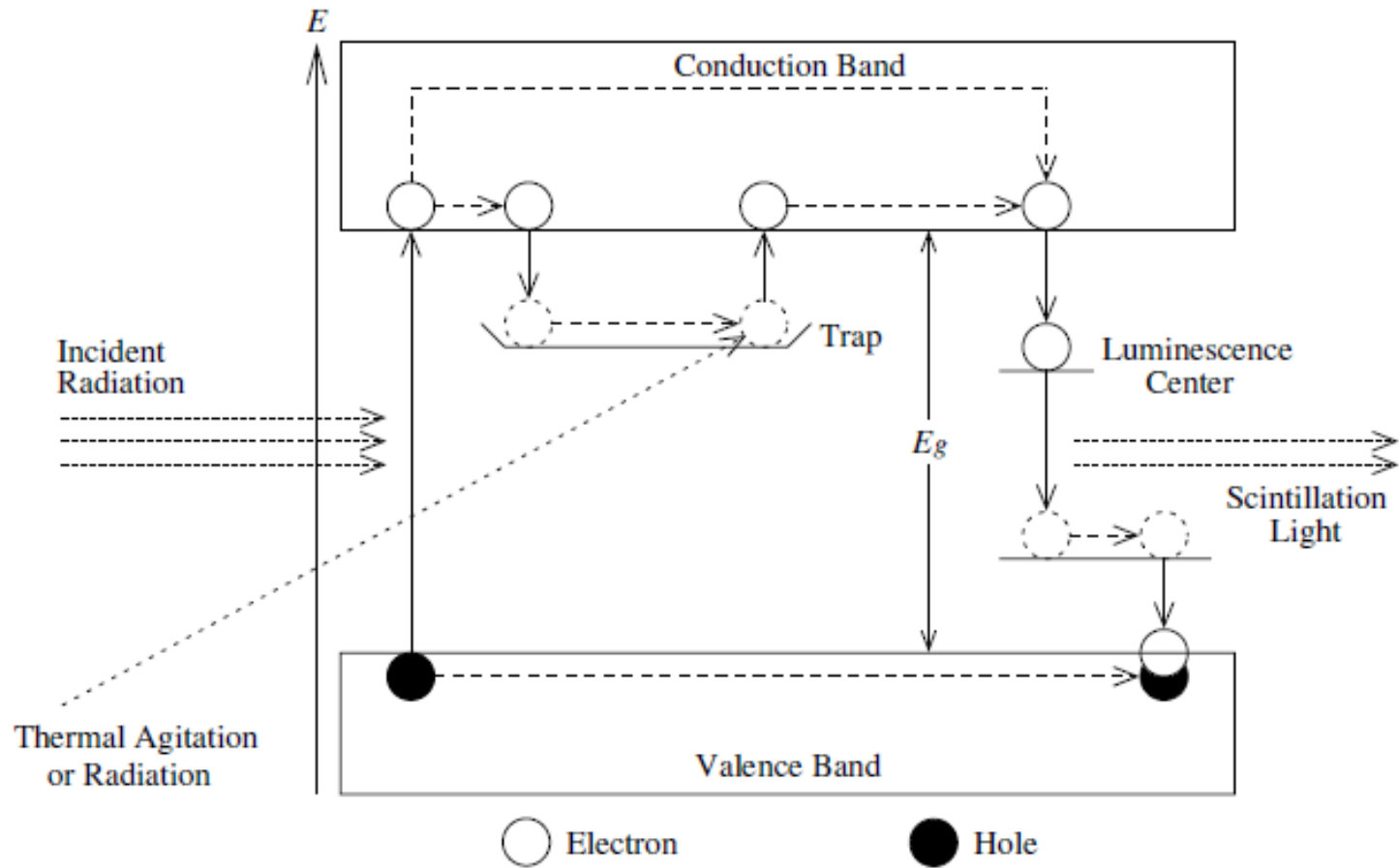


Figure 6.3.2: Principle of dopant luminescence in an inorganic scintillator.

SİNTİLYASYON FOTONLARININ MEYDANA GELİŞLERİ



SİNTİLYASYON FOTONLARININ MEYDANA GELİŞLERİ

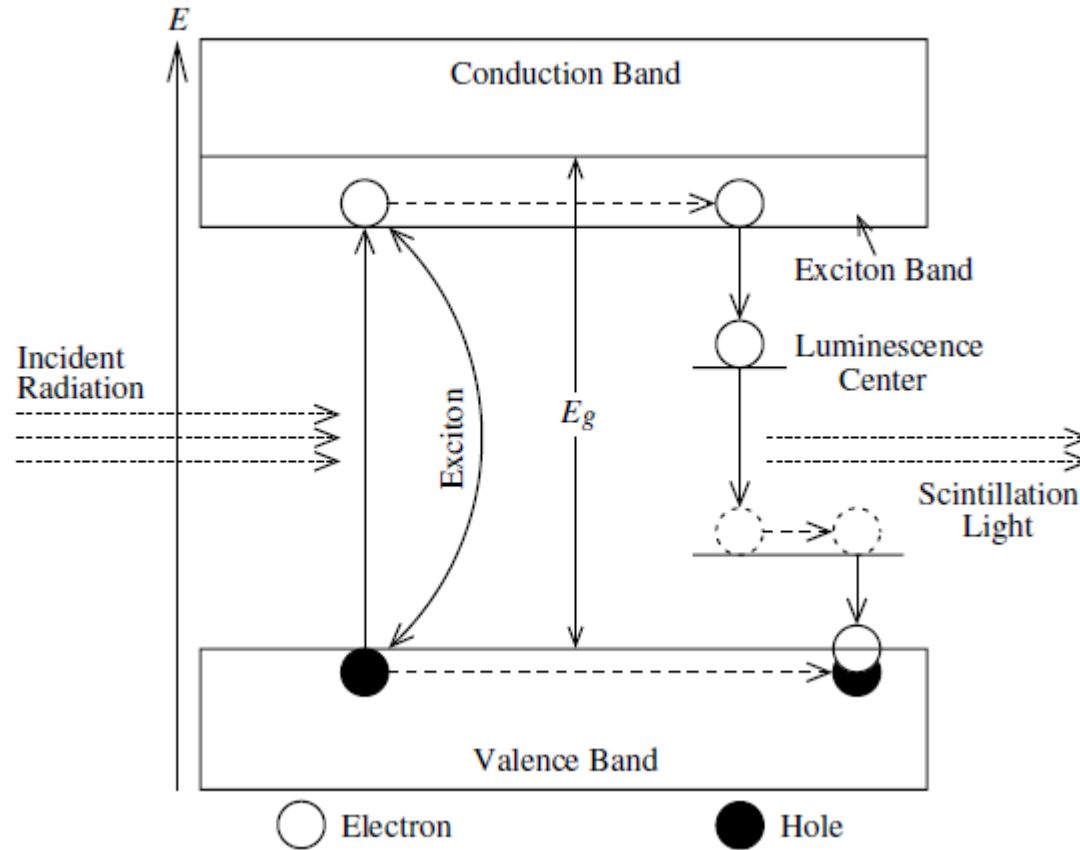


Figure 6.3.1: Principle of exciton luminescence from a partially bound exciton in an inorganic scintillator. If the electron moves up to the conduction band, the exciton thus created will be free to move around. In either case the electron can eventually get trapped by a luminescence center through self trapping or charge transfer process.

SİNTİLYASYON FOTONLARININ MEYDANA GELİŞLERİ

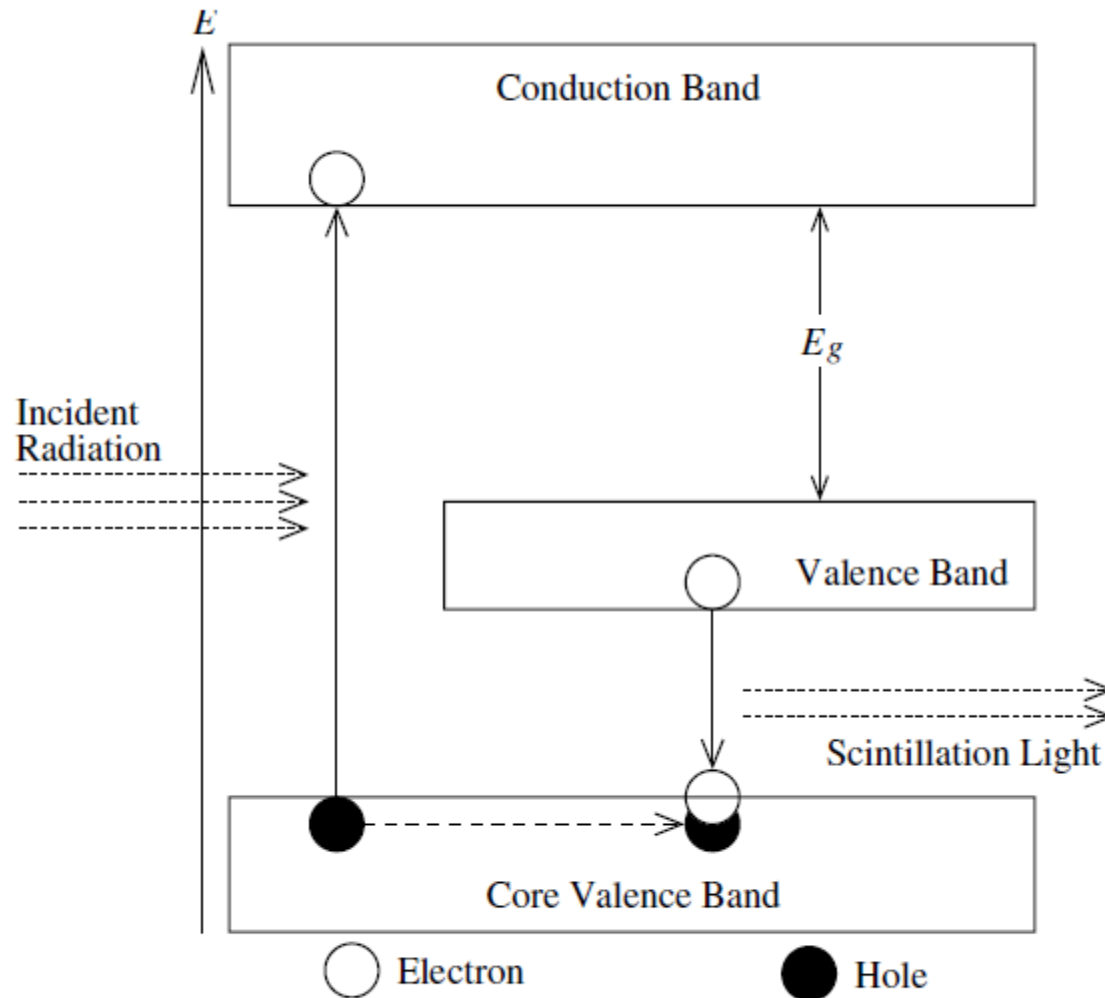


Figure 6.3.3: Principle of core valence band luminescence in an inorganic scintillator.

SİNTİLASYON ETKİNLİĞİ

Örnek : NaI(Tl) kristalinde 1 MeV enerji soğurulması;

Meydana gelen parçacık sayısı :

1 iyon çifti yaratılması için gerekli enerji 20 eV

1 MeV enerji soğurulmasında; $10^6 / 20 = 5 \times 10^4$ e – d çifti

Enerji transferi :

NaI(Tl) kristalinin etkinliği %12

1 MeV enerji soğurulmasında salınan toplam enerji; $10^6 \times 12 / 100 = 1.2 \times 10^5$ eV

Meydana gelen sintilasyon fotonlarının enerjisi 3 eV ise;

Toplam sintilasyon foton sayısı : $1.2 \times 10^5 / 3 = 4 \times 10^4$ foton

1 e – d çifti için 1 Foton

BAZI İNORGANİK SİNTİLATÖRLERİN ÖZELLİKLERİ

Material	Maksimum salınımın dalga boyu (nm)	Sintilasyon verimi (%)	Azalım zamanı (μ s)	Yoğunluk (10^3 kg/m ³)
NaI(Tl)	410	100	0,23	3,67
CaF ₂ (Eu)	435	50	0,94	3,18
CsI(Na)	420	80	0,63	4,51
CsI(Tl)	565	45	1,00	4,51
Bi ₄ Ge ₃ O ₁₂	480	8	0,30	7,13
CdWO ₄	530	20	0,90	7,90
⁶ LiI(Eu)	470	30	0,94	3,49

Comparison of Inorganic Crystals

Parameter:	ρ	MP	X_0^*	R_M^*	dE/dx	λ_f^*	τ_{decay}	λ_{max}	n^{\ddagger}	Relative output [†]	Hygroscopic?	$d(\text{LY})/dT$ %/°C [‡]
Units:	g/cm ³	°C	cm	cm	MeV/cm	cm	ns	nm				
NaI(Tl)	3.67	651	2.59	4.13	4.8	42.9	230	410	1.85	100	yes	~0
BGO	7.13	1050	1.12	2.23	9.0	22.8	300	480	2.15	9	no	-1.6
BaF ₂	4.89	1280	2.03	3.10	6.6	30.7	630 ^s 0.9 ^f	300 ^s 220 ^f	1.50	21 ^s 2.7 ^f	no	-2 ^s ~0 ^f
CsI(Tl)	4.51	621	1.86	3.57	5.6	39.3	1300	560	1.79	45	slight	0.3
CsI(pure)	4.51	621	1.86	3.57	5.6	39.3	35 ^s 6 ^f	420 ^s 310 ^f	1.95	5.6 ^s 2.3 ^f	slight	-0.6
PbWO ₄	8.3	1123	0.89	2.00	10.2	20.7	50 ^s 10 ^f	560 ^s 420 ^f	2.20	0.1 ^s 0.6 ^f	no	-1.9
LSO(Ce)	7.40	2070	1.14	2.07	9.6	20.9	40	420	1.82	75	no	~0
GSO(Ce)	6.71	1950	1.38	2.23	8.9	22.2	600 ^s 56 ^f	430	1.85	3 ^s 30 ^f	no	-0.1

from Particle Data Group, Review of Particle Detectors

* Numerical values calculated using formulae in this review.
 \ddagger Refractive index at the wavelength of the emission maximum.
 \dagger Relative light yield measured with a bi-alkali cathode PMT.
 \ddagger Variation of light yield with temperature evaluated at room temperature.
f = fast component, *s* = slow component

CaF ₂ (Eu)	3.18						940	435	1.47	50	no	
CdWO ₄	7.9						14000	475	2.3	40	no	
LaBr ₃ (Ce)	5.08						16	380	1.9	165	yes	

from Saint-Gobain Crystals

BAZI İNORGANİK SİNTİLATÖRLERİN ÖZELLİKLERİ

C.1 Thallium Doped Sodium Iodide (*NaI:Tl*)

Sodium iodide doped with thallium is the most widely used scintillator. Its key features include

- ▶ high light yield (41,000 photons per *MeV*),
- ▶ blue emission that coincides with the requirement of most PMTs,
- ▶ very low self absorption of scintillation light,
- ▶ good spectroscopic performance,
- ▶ easy availability and low production cost, and
- ▶ possibility to produce large area crystals.

C.2 Sodium Doped Cesium Iodide ($CsI:Na$)

$CsI : Na$ is also one of the most commonly used scintillators. Its distinguishing features include

- ▶ high light yield (40,000 photons per MeV),
- ▶ blue emission that coincides with the requirement of most PMTs, and
- ▶ less hygroscopicity as compared to $NaI:Tl$.

C.3 Thallium Doped Cesium Iodide ($CsI:Tl$)

$CsI:Tl$ is not as widely used as the other two we studied earlier but its following features make it desirable in certain applications.

- ▶ High absorption efficiency.
- ▶ High light yield (66,000 photons per MeV).
- ▶ 550 nm emission that coincides with the requirement of most photodiodes, thus eliminating the need to use bulky and mechanically unstable photomultiplier tubes.
- ▶ Non-hygroscopic.
- ▶ Mechanically stable and shock resistant.
- ▶ Can be cut and shaped as required.
- ▶ Resistant to radiation induced damage.

Photodiodes are semiconductor detectors that are now beginning to replace the PMTs. We will learn more about them later in the Chapter. Their main advantage is that they do not require very high potentials as PMTs and can also be used in high magnetic fields. $CsI : Tl$ is then a good alternative over more commonly used scintillators in applications where using PMTs is difficult or the radiation field is very high.

C.4 Bismuth Germanate (*BGO*)

The chemical composition of *BGO* is $Bi_4Ge_3O_{12}$. Its advantages include

- ▶ high absorption efficiency,
- ▶ high energy resolution,
- ▶ short decay time
- ▶ high radiation resistance,
- ▶ large crystals can be produced, and
- ▶ mechanically stable and strong.

Because of its high γ -ray absorption efficiency, *BGO* is commonly employed in applications involving γ -ray spectroscopy.

C.5 Cadmium Tungstate (*CWO*)

$CdWO_4$ or simply *CWO* is not as widely used as *GBO* even though it has the following desirable properties.

- ▶ Significantly higher light yield than *BGO*.
- ▶ Low intrinsic background.
- ▶ Low afterglow.

The main problem with *CWO* is its large decay time, which makes it unsuitable for most applications. However it has been successfully used in low radiation spectroscopic applications such as spectrometry of very low activity radioactive substances.

C.6 Lead Tungstate (*PWO*)

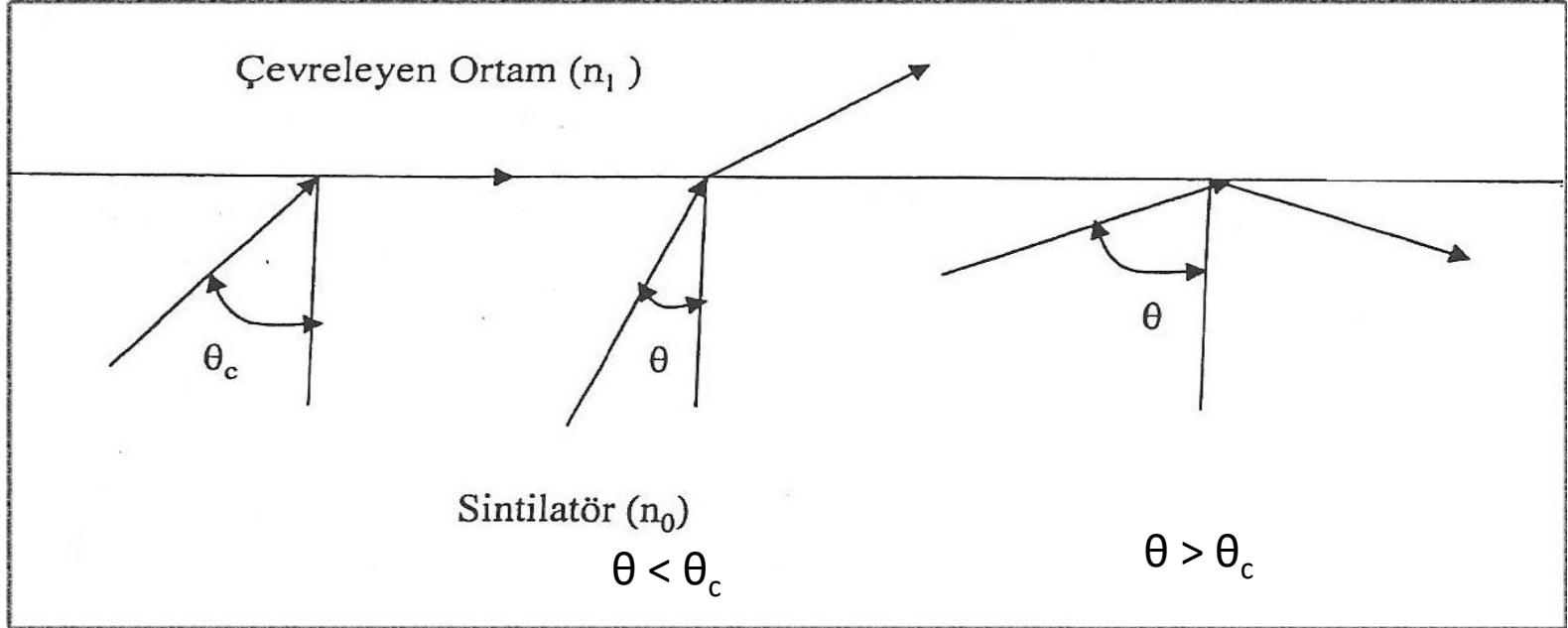
$PbWO_4$ or simply *PWO*, with the following properties, is generally used in high radiation fields.

- ▶ Fast response.
- ▶ High resistance to radiation induced damage.
- ▶ Fast decay time, and
- ▶ Very low radiation length.

Lead tungstate is highly suitable for high radiation fields due to its extremely fast response and radiation hardness. It is mechanically stable and can be cut and shaped according to requirements. Its research and development has been mostly geared towards applications in high energy physics.

SİNTİLATÖRLERDE IŞIK TOPLANMASI

Işık Klavuzu



Optik özelliği farklı iki ortamın ara kesitindeki ışık yansıma ve kırılmaları

$$\theta_c = \sin^{-1} (n_1 / n_0)$$

SİNTİLATÖRLERDE IŞIK TOPLANMASI

Niçin Işık Klavuzu kullanılıyor?

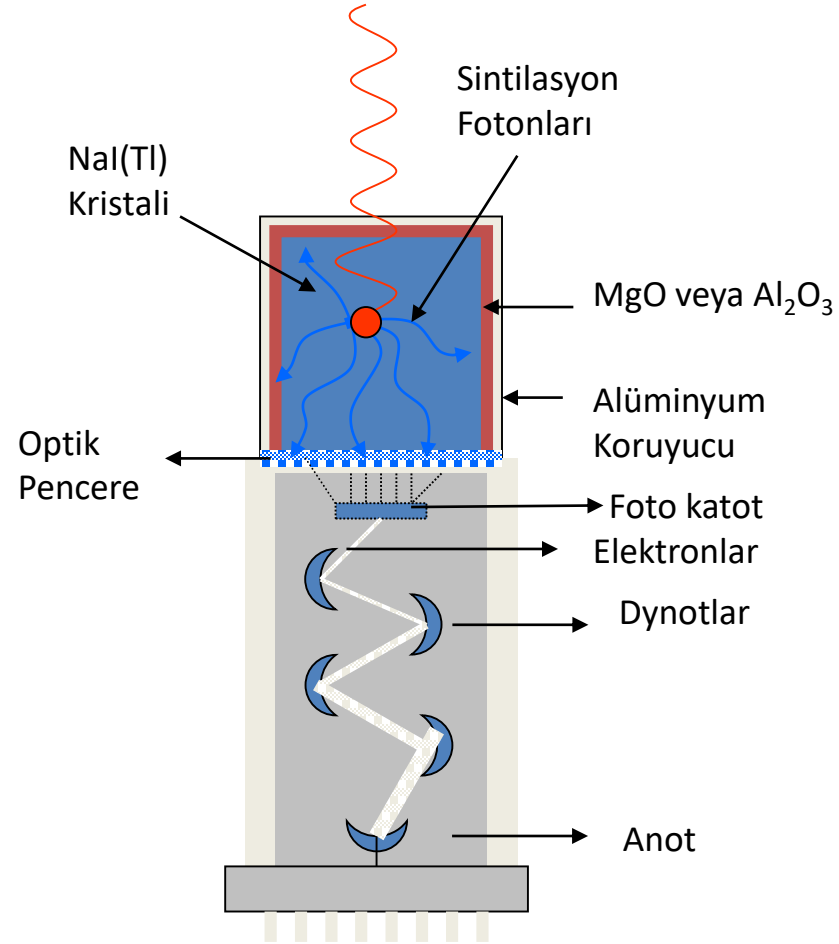
$n = 1$	Fotoçoğaltıcı tüp (hava)
$n = 1.5$	Işık klavuzu (borosilikat)
$n = 1.85$	Sintilasyon kristali (NaI(Tl))

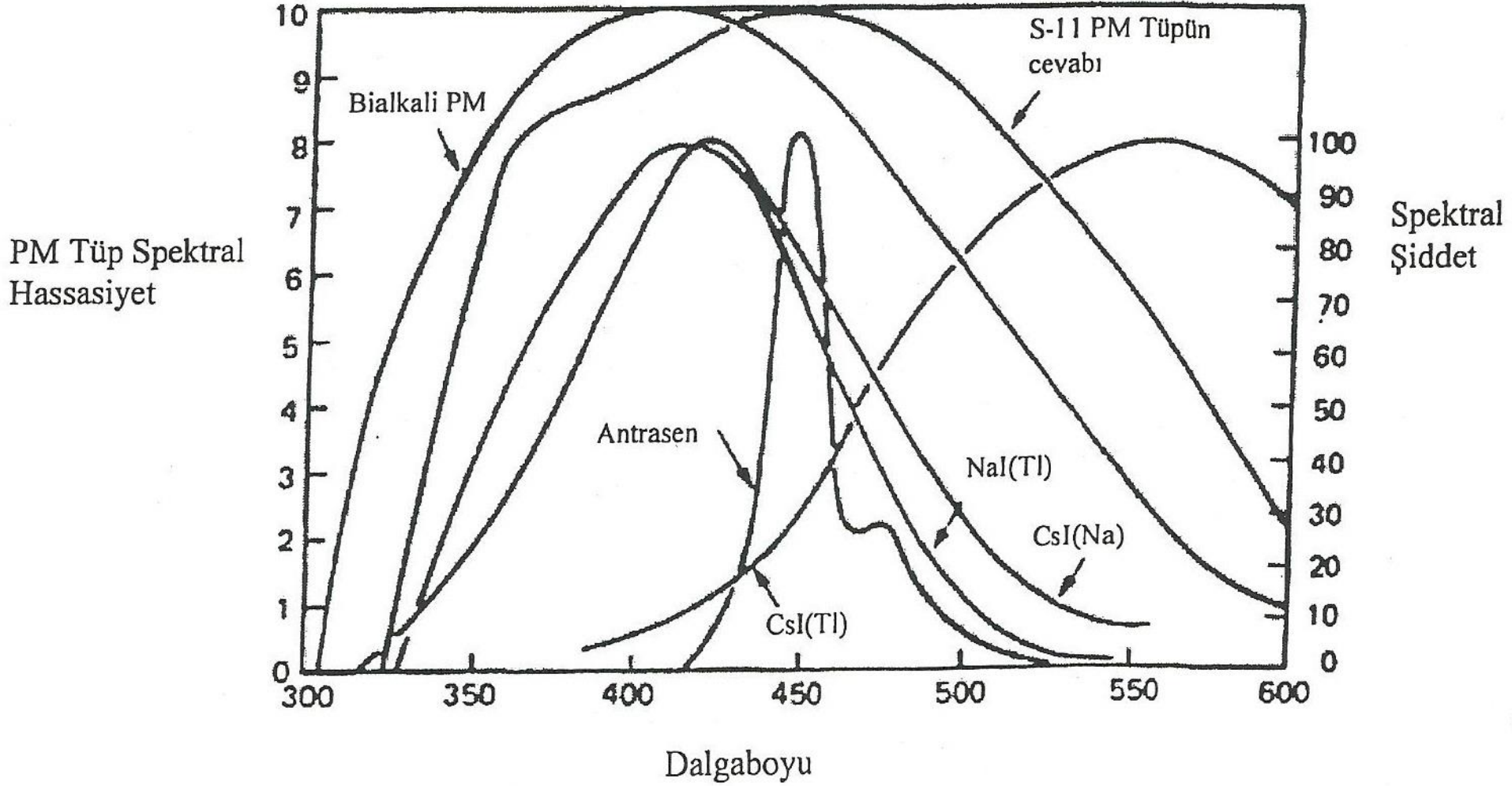
Sintilatör	→	Işık klavuzu	→	$\theta_c = \sin^{-1}(1.5 / 1.85) = 54^\circ$
Sintilatör	→	fotoçoğaltıcı tüp	→	$\theta_c = \sin^{-1}(1 / 1.85) = 32^\circ$
Işık klavuzu	→	fotoçoğaltıcı tüp	→	$\theta_c = \sin^{-1}(1 / 1.5) = 42^\circ$

θ_c ↗ Işık geçirgenliği ↗

$$\theta < \theta_c$$

Nal(Tl) Dedektörü ve Fotoçoğaltıcı tüp





Bazı kristallere ait salınım spektrumları ile iki farklı fotokatotun soğurma bantları

FOTOÇOĞALTICI TÜPLER

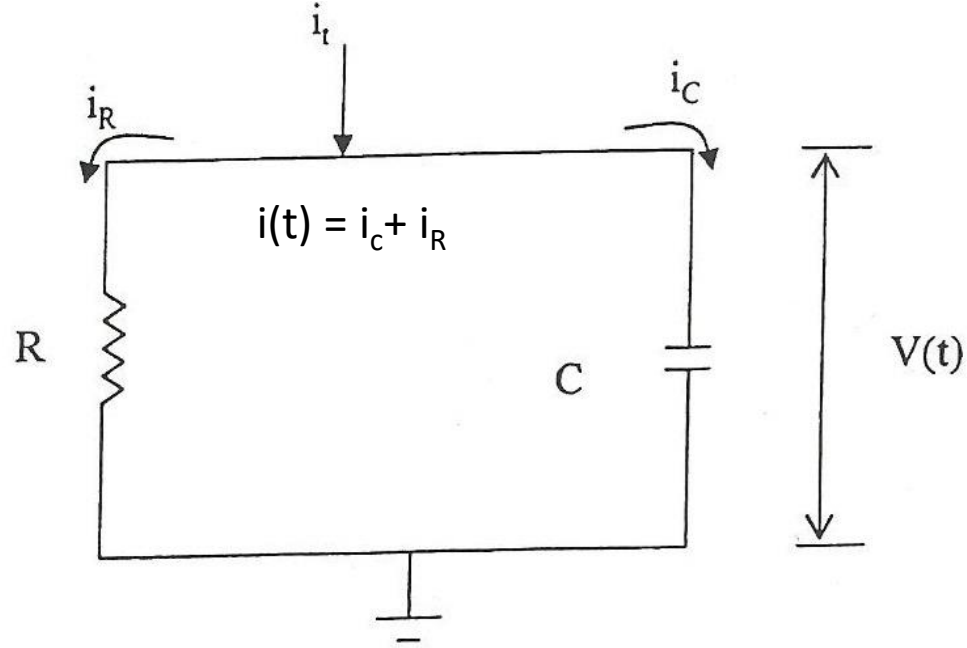
Kuantum Etkinliği ve Spektral Cevap

$$QE = \frac{\text{Salınan fotoelektron sayısı}}{\text{Gelen foton sayısı}}$$

İkincil Elektron Çoğalımı

$$\delta = \frac{\text{Salınan ikincil elektron sayısı}}{\text{Gelen primer elektron}}$$

SİNTİLATÖRLERDE PULS ANALİZİ



Fototüp anot devresini temsil eden RC devresi

Bir sintilasyon olayında meydana gelen ışık fotonlarının zaman içerisindeki davranışları basit bir üstel ifade ile temsil edilebilir.

ANOT AKIMI

Sintilasyon fotonlarının oluşumuna benzer olarak anotta oluşan akım:

$$i(t) = i_0 e^{-\lambda t}$$

λ , sintilatörün azalım sabitidir. Başlangıç akımı ise tüm puls boyunca toplanan Q yüküdür.

$$Q = \int_0^{\infty} i(t) dt = i_0 \int_0^{\infty} e^{-\lambda t} dt = i_0 / \lambda$$

Bu nedenle,

$$i_0 = Q \lambda$$

$$i(t) = Q \lambda e^{-\lambda t}$$

Anotta oluşan $V(t)$ voltaj pulsunun irdelenmesi için önce paralel RC devresine giden akımın, kapasitör ve R direncinden geçen akımların toplamı olduğu dikkate alınır:

$$i(t) = i_c + i_R$$

$$Q = C V \quad i = dQ / dt = C dV / dt$$

$$i(t) = C[dV(t) / dt] + [V(t) / R]$$

$i(t) = Q \lambda e^{-\lambda t}$ ifadesini kullanarak ve C'ye bölerek,

$$[dV(t) / dt] + [1 / RC] V(t) = (Q \lambda / C) e^{-\lambda t}$$

$$[dV(t) / dt] + [1 / RC] V(t) = (Q \lambda / C) e^{-\lambda t}$$

$V(0) = 0$ başlangıç şartı ile çözülmesiyle,

$$V(t) = [1 / (\lambda - \theta)] (\lambda Q / C) [e^{-\theta t} - e^{-\lambda t}] \quad \text{bulunur.}$$

Burada $\theta = 1 / RC$ anot zaman sabitinin tersidir.

Sinyal pulsunun anot ve sintilatörün azalım sabitlerine göre
Ve her sabit için t'nin uzun ve kısa değerleri için irdelenmesi

$$V(t) = [1 / (\lambda - \theta)] (\lambda Q / C) [e^{-\theta t} - e^{-\lambda t}]$$

1. Durum: Anot zaman sabitinin sintilatör azalım zamanına göre uzun olması

$$(\tau \gg t_s) \quad (\theta \ll \lambda)$$

Anot azalım sabiti : $\theta = 1 / \tau$

Sintilatörün azalım sabiti : $\lambda = 1 / t_s$

$$V(t) = (Q / C) [e^{-t/\tau} - e^{-t/t_s}]$$

1.a Pulsun başlangıcı için (kısa zaman durumu) : $t \ll \tau$

Pulsun kısa süredeki ön kenarı dikkate alınıyor. Bu sürenin uzun olan τ göre çok kısa olması gerek

$$V(t) = (Q / C) \left[\underbrace{1 / e^{t/\tau}}_1 - 1 / e^{t/\tau_s} \right]$$

$$V(t) = (Q / C) [1 - e^{-\lambda t}] \quad (t \ll 1 / \theta)$$

1.b Uzun sürede puls şekli : $t \gg t_s$

Pulsun kuyruk kısmı dikkate alınıyor, bu sürenin kısa olan sintilatörün azalım zamanına göre uzun olması gerekir

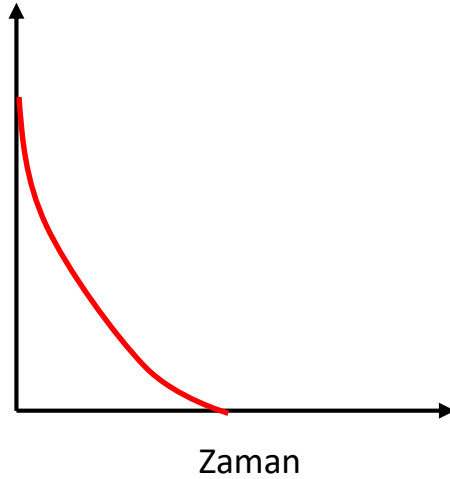
$$V(t) = (Q / C) [1 / e^{t/\tau} - \underbrace{1 / e^{t/t_s}}_0]$$

$$V(t) = (Q / C) [e^{-\theta t}] \quad (t \gg 1/\lambda)$$

SİNYALİN ZAMANA BAĞLI DAVRANIŞI

$$(\theta \ll \lambda) (\tau \gg t_s)$$

1. Pulsun ön kenarının zamana bağlı davranışı $[1 - e^{-\lambda t}]$ ile verilirken, doğuş zamanı sintilatörün (λ) azalım sabiti ile değişir.
2. Pulsun kuyruk kısmının davranışı $e^{-\theta t}$ ile verilir ve anot devresinin zaman sabiti ile $(RC = 1 / \theta)$ azalır.
1. Pulsun genliği basitçe Q / C ile verilir, bu değere ancak $\theta \ll \lambda$ şartında ulaşılır.



Işık pulsunun beklenen davranışı



Uzun zaman sabitinde anot pulsu

2. Durum: Anot zaman sabitinin sintilatör azalım zamanına göre kısa olması

$$V(t) = [1 / (\lambda - \theta)] (\lambda Q / C) [e^{-\theta t} - e^{-\lambda t}]$$

$$(\theta \gg \lambda) \quad (\tau \ll t_s)$$

Anot azalım sabiti : $\theta = 1 / \tau$

Sintilatörün azalım sabiti : $\lambda = 1 / t_s$

$$V(t) = (\lambda / \theta) (Q / C) [e^{-\lambda t} - e^{-\theta t}]$$

2.a Pulsun uzun zaman durumu : $t_s \gg t$

Pulsun ön kenar davranışı için t 'nin uzun olan sintilatör azalım zamanına göre çok kısa olması gerek

$$V(t) = (\lambda \theta / Q C) \left[\underbrace{1 / e^{t/t_s}}_1 - 1 / e^{t/\tau} \right]$$

$$V(t) = (\lambda \theta / Q C) [1 - e^{-\theta t}]$$

2.b Pulsun uzun zaman durumu) : $t \gg \tau$

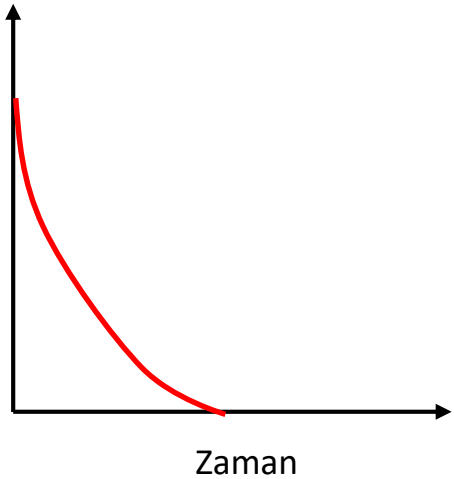
Tüm puls bilgisinin toplanması için t 'nin kısa süre olan τ göre uzun olması gerek

$$V(t) = (\lambda \theta / Q C) [1 / e^{t/t_s} - \underbrace{1 / e^{t/\tau}}_0]$$

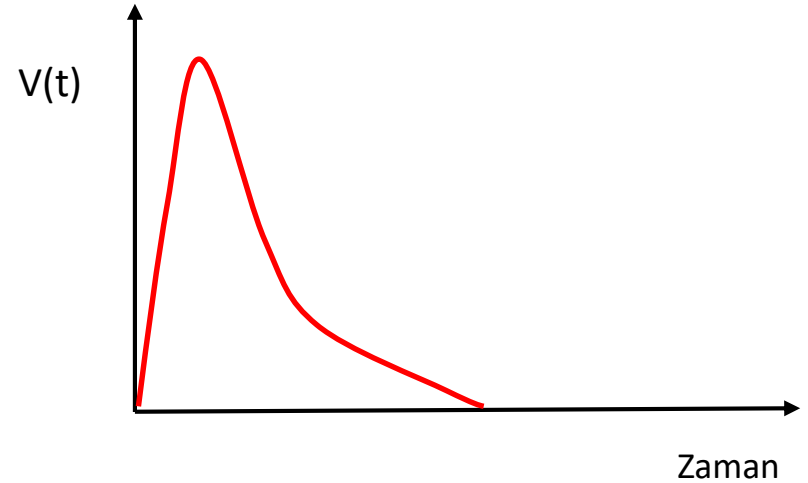
$$V(t) = (\lambda / \theta) (Q / C) [e^{-\lambda t}]$$

SİNYALİN ZAMANA BAĞLI DAVRANIŞI

1. Pulsun ön kenarının davranışı $[1 - e^{-\theta t}]$ ile verilir ve anodun zaman sabiti ile belirlenir $RC = 1 / \theta$
2. Pulsun kuyruk kısmı $[e^{-\lambda t}]$ ile verilmekte olup sintilatör ışığına benzerdir
3. Pulsun maksimum genliği $[\lambda Q / \theta C]$ olup 1'inci durumdakinden hayli küçüktür.

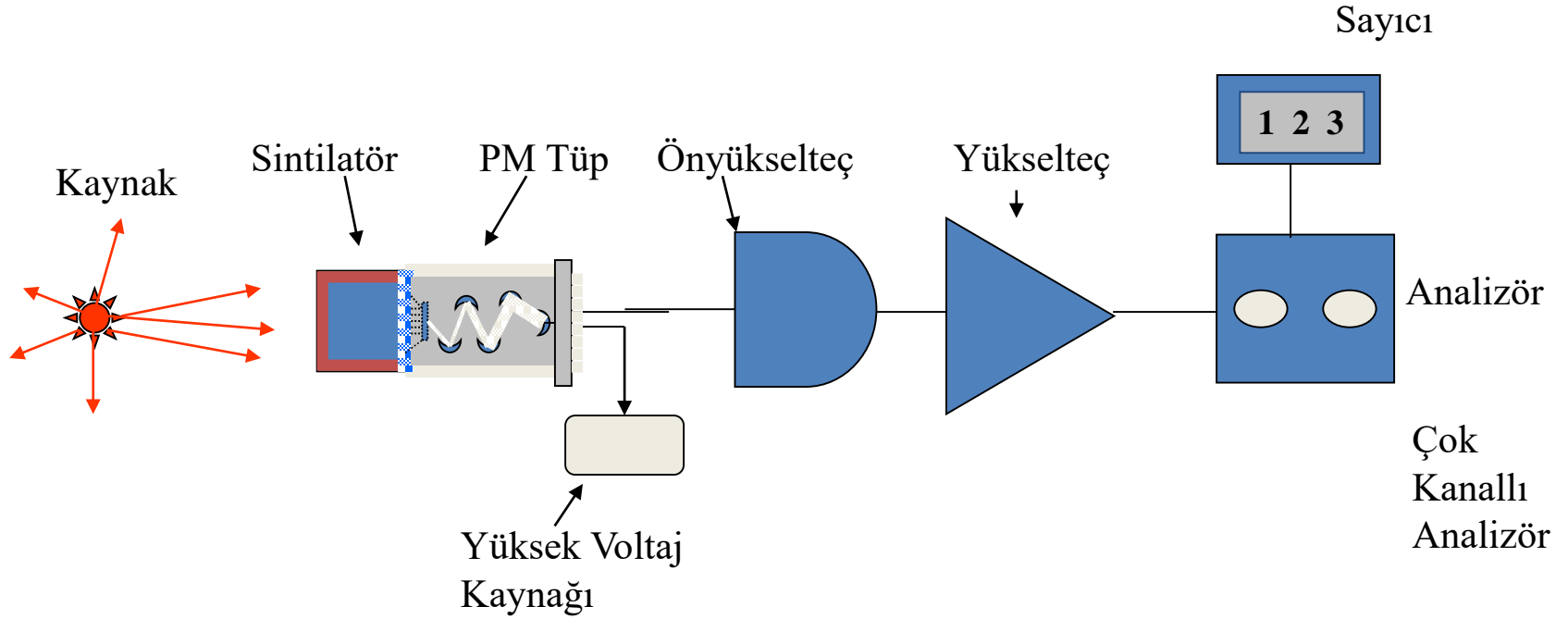


Işık pulsunun beklenen davranışı



Kısa zaman sabitinde anot pulsu

Sintilatör Elektroniğinin Basit Diyagramı



Enerji Ayırımı

Gelen gama foton enerjisi \sim Sintilatörde oluşan ışık fotonu sayısı \sim Kattottan salınan Elektron sayısı \sim Anota gelen elektron sayısı \sim Çıkış pulsunun genliği

$$\gamma_{kf} \rightarrow n \gamma_{sf} \rightarrow xe^- \rightarrow Nxe^- \rightarrow V$$

$$1 \gamma_{kf} \rightarrow 4 \times 10^4 \rightarrow 8-10000 e^- \rightarrow 10^{12} e^- \rightarrow 10 \text{ mV}$$



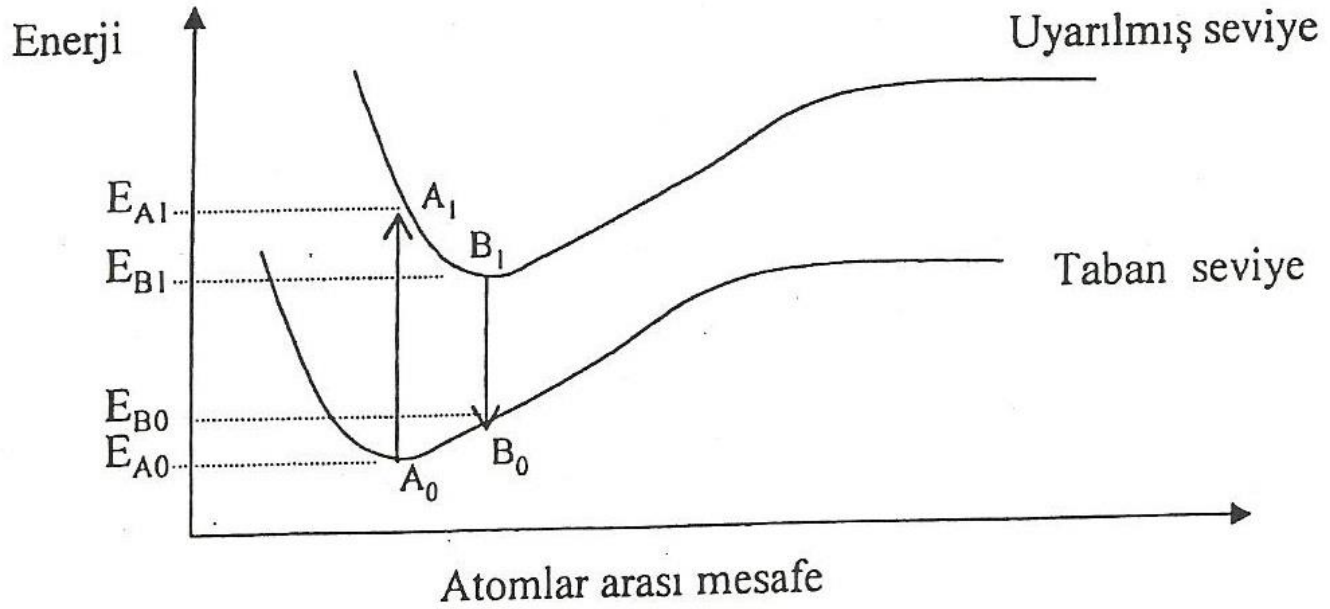
$$1 \text{ MeV} \sim 3 \text{ eV}$$

$$250 \text{ keV} \longrightarrow 2.5 \text{ mV}$$

$$500 \text{ keV} \longrightarrow 5 \text{ mV}$$

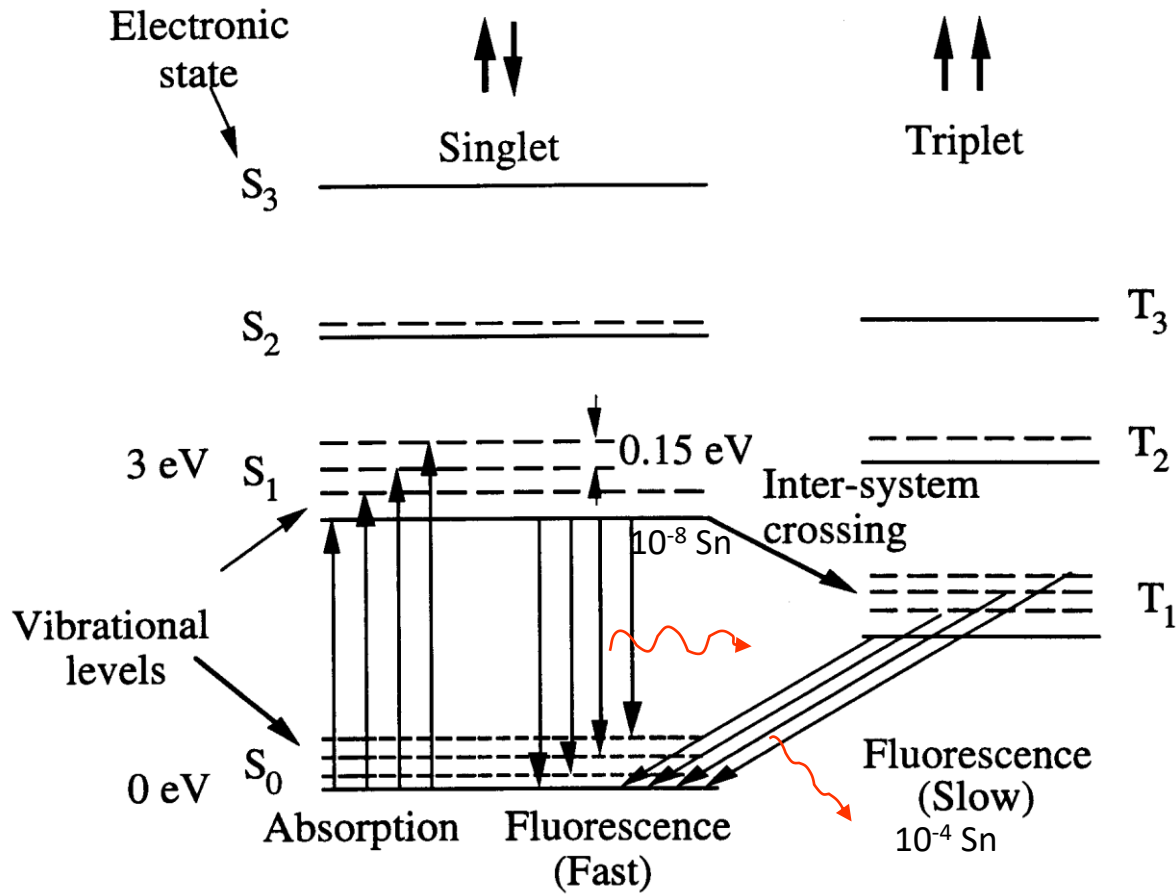
$$1.0 \text{ meV} \longrightarrow 10 \text{ mV}$$

ORGANİK KRİSTALLER



Molekülün basitleştirilmiş enerji diyagramı

TİPİK ENERJİ SEVİYELERİ



- At room temperature practically all electrons in ground state. since energy of S_1 states $\gg 0.025$ eV)
- Incident radiation populates S_1 states vibrational levels within S_1 band decay radiation-less to S_1 base state, which in turn decays under emission of light to the S_0 band.
- S_1 can also decay to adjacent triplet levels. Since their energy is significantly lower, the decay time is much longer.

ORGANİK KRİSTALLER

Sintilasyon olayı molekülün enerji seviyesindeki geçişler ile gerçekleşir ve Sintilatörün fiziksel yapısından bağımsızdır (katı, sıvı veya gaz halinde olabilir veya polimerlerin içine katılabilir)

Yanıt süreleri son derece hızlıdır (10 nSn)

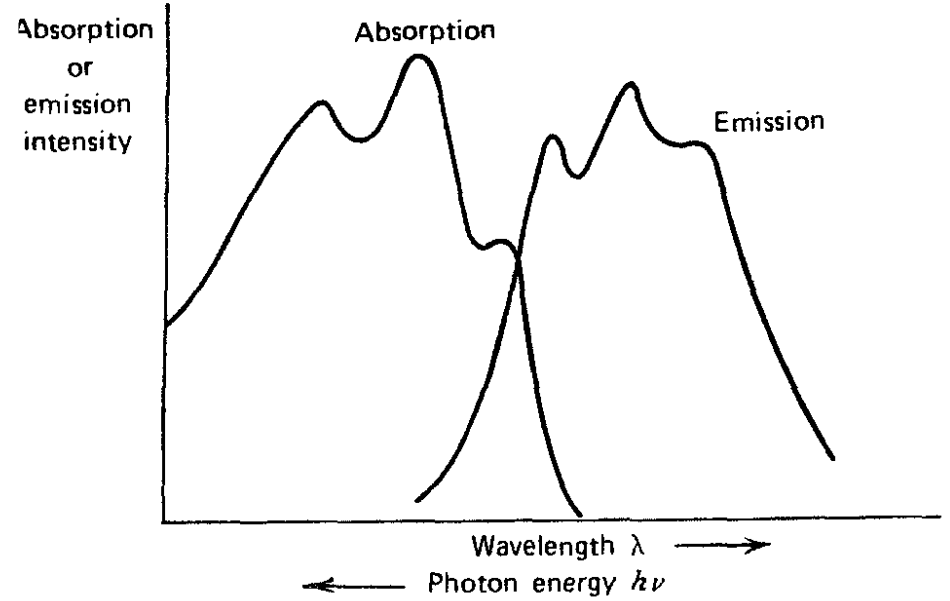
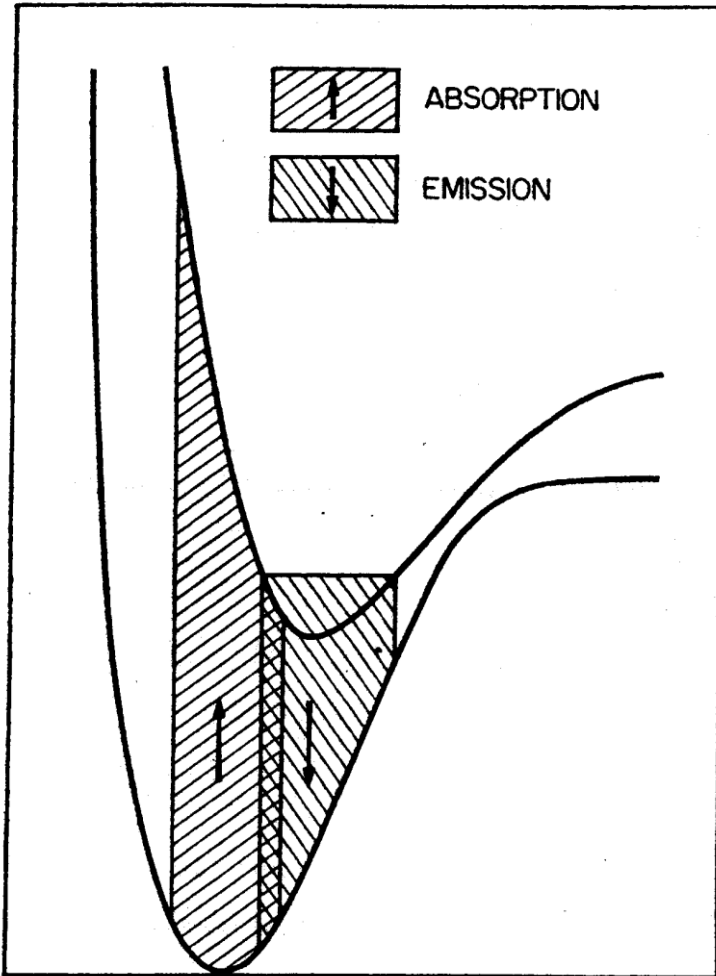
Uyarılma enerjisi bir molekülden diğerine transfer edilir

Sintilasyon etkinliğinin arttırılması için organik sintilatör bir çözücünün içerisine Katılır. Radyasyon önce çözücüde soğurular ve enerji sintilatöre transfer edilir.

Çözücü-sintilatör karışımına bazen sintilatörden salınan dalga boyunu değiştiren Bir madde daha ilave edilir. Böylelikle sintilatörün kendi ışığını soğurması önlenir ve PM tüpe uygun ışık oluşturulur.

Çok düşük atom numaraları nedeniyle gama spektrumlarında fotopik yoktur Compton platosu kullanılır.

SOĞURULMA VE SALINIM SPEKTRUMLARININ ÇAKIŞMASI



SİNTİLYASYON IŞIĞININ ZAMANA BAĞLI DEĞİŞİMİ

Işığın τ_r zaman sabiti ile doğuşu

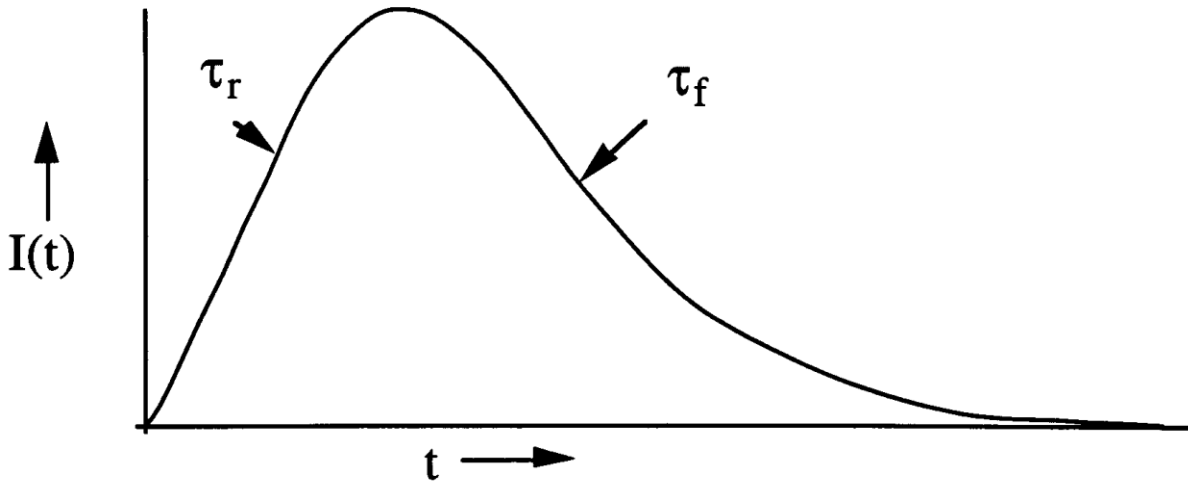
$$I(t) = 1 - \exp(-t / \tau_r)$$

Işığın τ_f zaman sabiti ile sönüşü

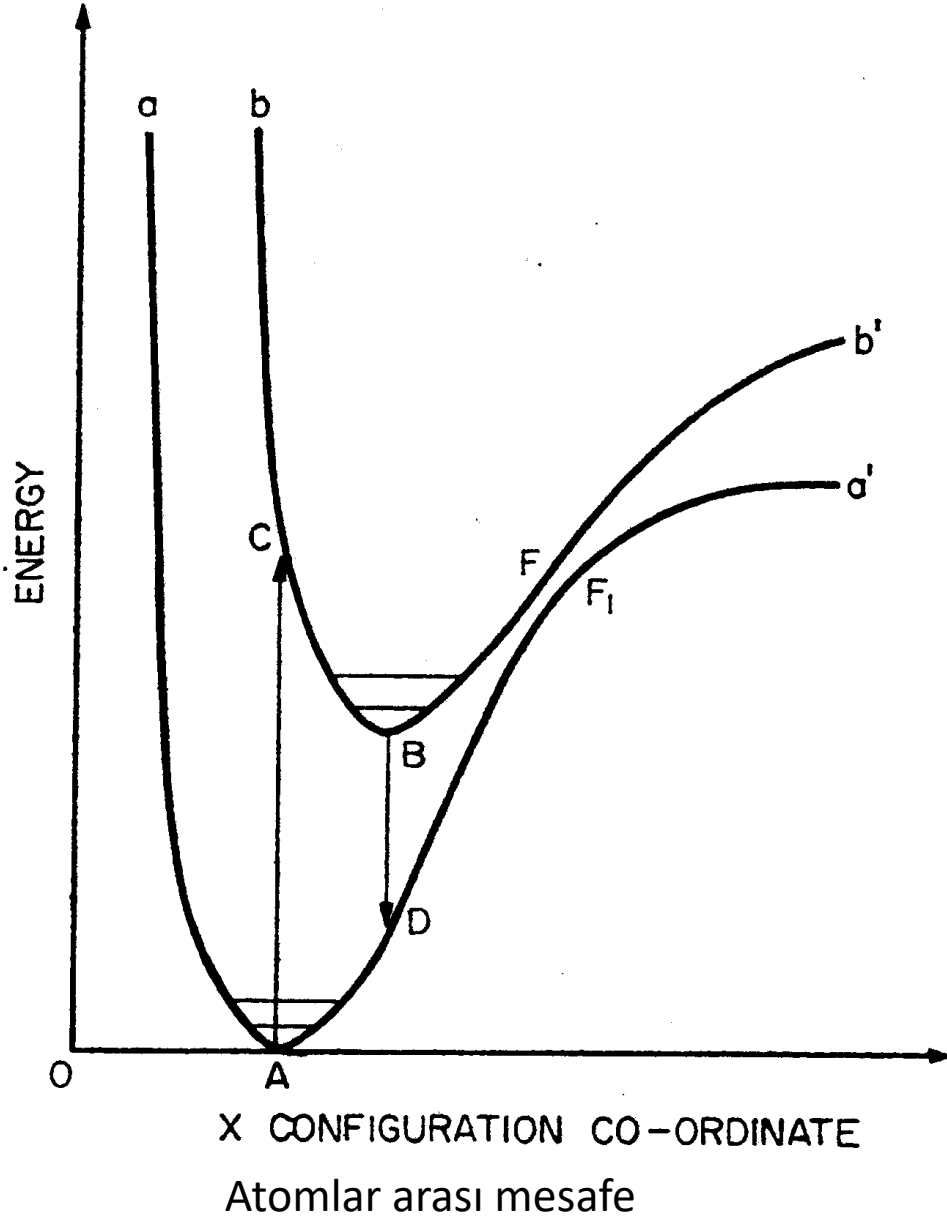
$$I(t) = \exp(-t / \tau_f)$$

Toplam puls

$$I(t) = I_0 (\exp(-t / \tau_f) - \exp(-t / \tau_r))$$



GEÇİŞLERDE FOTON SALINMASI



Uyarılma: $A \rightarrow C$ Çok hızlı

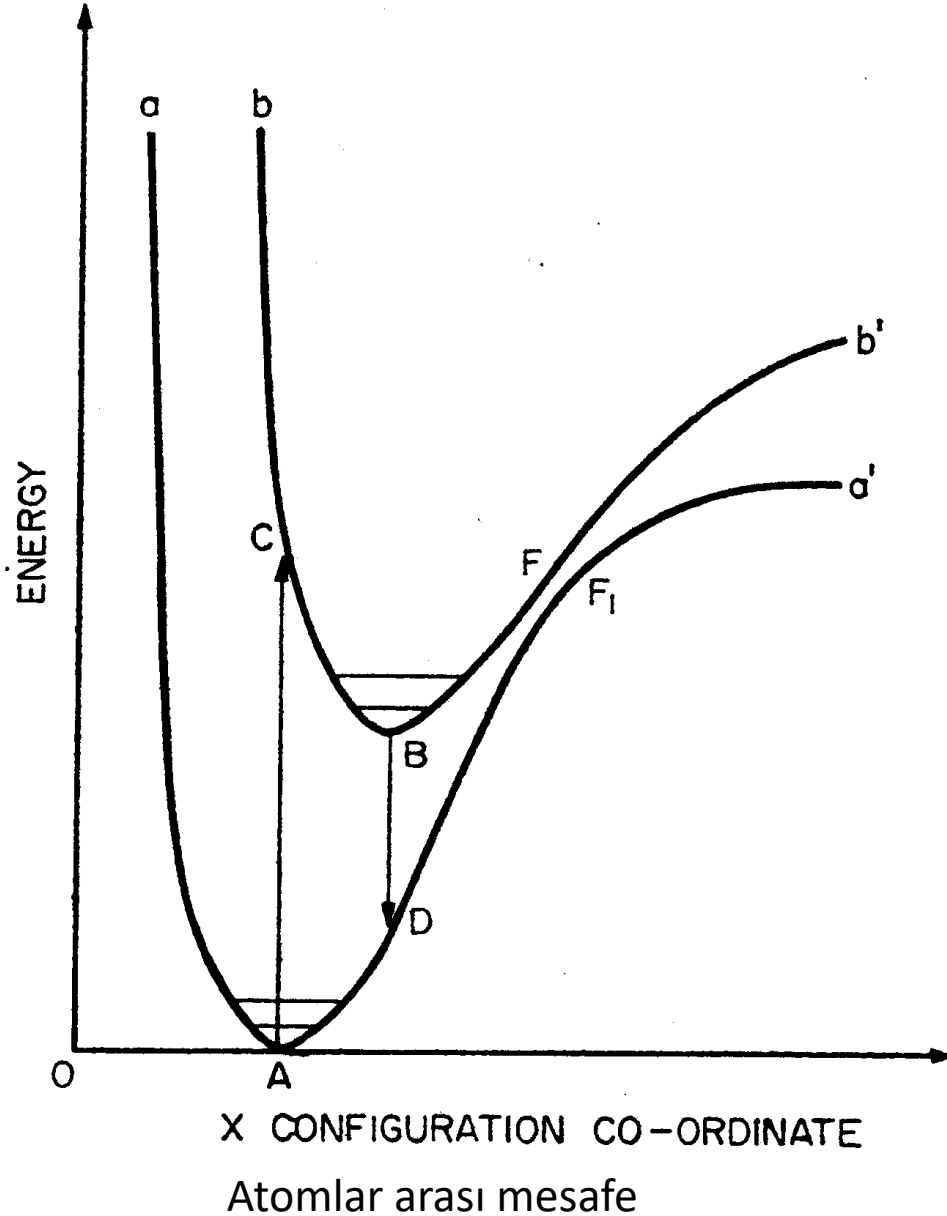
Termal denge $C \rightarrow B$ 10^5 daha uzun

Foton salınımı: $B \rightarrow D$

Termal denge $D \rightarrow A$

$C \rightarrow B$ ve $D \rightarrow A$ geçişlerindeki enerji moleküler veya latis vibrasyonları ile yok olur.

QUENCHING : GEÇİŞLERDE FOTON SALINMAMASI



Uyarılan elektron F'ye ulaşırsa ve $F \rightarrow F1$ geçişi foton salınmadan gerçekleşirse

Uyarılma: $A \rightarrow C$

Taban seviyeye geçiş $F \rightarrow F1$

Termal denge $F1 \rightarrow A$

BAZI ORGANİK SİNTİLATÖRLERİN ÖZELLİKLERİ

Material	Maksimum salınımın dalga boyu (nm)	Sintilasyon verimi (%)	Azalım zamanı (μ s)	Yoğunluk (10^3 kg/m ³)
Antrasen	445	100	~30	1,25
Trans-Stilben	385	~60	4-8	1,16
NE 102	350-450	~65	2	1,06
NE 110	350-450	60	3	1,06
NE 213 (sıvı)	350-450	~60	2	0,867
PILOT B	350-450	68	2	1,06
PILOT Y	350-450	64	~3	1,06

ORGANİK SİNTİLATÖRLER TÜRLERİ

Saf Organik Kristaller

Yüksek sintilasyon etkinliği, yüksek yanıt hızı (Antrasen, Stilben)

Sıvı Organik Kristaller

Çözücü ve dalgaboyu kaydırıcı ile kullanılırlar, sayım etkinliği %100' u ulaşır (Karbon-14 ve Tiryum sayımında kullanılır)

Plastik Sintilatörler

Eriyik haldeki organik sintilatör polimerize edilir

İnce film sintilatörler

Ağır iyonların sayımında kullanılır. Son derece ince ($10\mu\text{m}$) olan detektörden geçen parçacıklar sayılır