



ANKARA ÜNİVERSİTESİ

NÜKLEER BİLİMLER ENSTİTÜSÜ

NÖTRON SAYAÇLARINDA SAYIM HIZI İLE NÖTRON AKISI ARASINDAKİ BAĞINTI

NÖTRON VE REAKTÖR FİZİĞİNE GİRİŞ

PROF. DR. HALUK YÜCEL

101513 - Nötron ve Reaktör Fizikine Giriş -
Prof.Dr.Haluk YÜCEL

21.03.2019

Nötron Sayaçlarında Sayım Hızı ile Nötron Akısı Arasındaki Bağını

Nötron sayacının temel spesifikasyonlar,

- 1) Hassasiyeti $< 1-0.005$,
- 2) Boyutları,
- 3) Doldurma gazının bileşimi (%90 – 96 BF_3),
- 4) Çalışma gerilimi (1000 – 3000V),
- 5) Maksimum çalışma sıcaklığı (BF_3 için max. 100°C)

$$\text{Sayaç hassasiyeti } S = \frac{\text{Gerçek sayım hızı}}{\text{Nötron akısı}} = \frac{r}{\phi} \left[\frac{\text{Counts/s}}{\frac{\text{nötron}}{\text{cm}^2 \cdot \text{s}}} \right]$$

Sayım hızı,

$$\begin{aligned} r &= \varepsilon_p \cdot R = g - b \\ g &= \text{Toplam (gross) sayım hızı} \\ b &= \text{Doğal fon (background) sayım hızı} \\ R &= \text{Reaksiyon hızı} \end{aligned}$$

$$\varepsilon_p \approx 1 \text{ alındığında, } S = \frac{\varepsilon_p \cdot R}{\phi} = \frac{r}{\phi} = \frac{R}{\phi} = N \cdot V \cdot \sigma_o \cdot \frac{v_o(0.025eV)}{\bar{v}}$$

$$R = N \cdot V \cdot \sigma_o \cdot \frac{v_o(0.025eV)}{\bar{v}} \cdot \phi$$

$V = \text{Sayacın gaz doldurma hacmi}$

- Sensitivity eşitliği şunu gösteriyor;

Belirli nötron spekturumu için, sensitivity sayaç içerisindeki boron yoğunluğu (BF_3 gazının basıncı) ve sayacın hacmi ile orantılıdır yani;

$$S \propto N \cdot V$$

Işınlamayla sayaçtaki ^{10}B atomlarının sayısı azalır, sensitiviy de azalır.

Bu azalım $e^{-\sigma_a \phi_0 t}$ çarpanıyla ifadelenebilir ki $\phi \cdot t = \text{fluence}$ 'dir. Sayacın nötronlara maruz kalma süreç ve şiddetini gösterir.

$\bar{\sigma}_a(^{10}\text{B}) \cong 1000b$ termal nötronlar için tesir kesiti değeri

$e^{-\sigma_a \phi_0 t} = e^{-1000 \times 10^{-24} \cdot \phi \cdot t}$, den $\phi \cdot t = 10^{21} n/cm^2$ mertebesinde sensitivite hatırı sayılır değişme olacağını gösterir.

Reaksiyon Hızı

$n(E)dE$ birim hacminden kinetik enerjiler E ile $E+dE$ arasındaki nötronların sayısı
(nötron yoğunluğu = #nötron/cm³)

$\phi(E)dE = v(E)n(E)dE$, kinetik enerjileri E ile $E+dE$ arasında nötronların akısı

$v(E)$ = E enerjisindeki nötronların hızı

E_{max} = Gözönüne alınan maksimum enerji

N = Birim hacimdeki $^{10}_5B$ atomlarının sayısı

V = Sayacın gaz dolu hacmi

$\sigma(E) = ^{10}_5B(n, \gamma)$ tepkimesi için E enerjisindeki tesir kesiti

- Dedektör gaz hacmi üzerinde nötron akısının uniform olduğu varsayılır.

$$R \left(\text{Reaksiyon} \frac{\text{sayısı}}{s} \right) = N.V \int_0^{E_{max}} \sigma(E) \phi(E) dE \quad (1)$$

^{10}B tesir kesiti, $\frac{1}{v}$ bağımlı geniş bir nötron aralığıdır.

$$\sigma(E) = \sigma_0 \frac{v}{v(E)} = \sigma_0 \sqrt{\frac{E_0}{E}} \quad (2)$$

$$E_0 = 0.025 \text{eV} , v_0 = \sqrt{\frac{2E_0}{m_n}} = 2200 \text{m/s}$$

(2) denklemini (1)'de yerine konulursa.

$$R = N.V. \int_0^{E_{max}} \sigma_0 \frac{v}{v(E)} \cdot \phi(E) dE = N.V. \sigma_0 \cdot v_0 \cdot n \quad (3)$$

$$\text{Birim hacimdeki toplam nötron sayısı } n = \int_0^{E_{max}} \sigma(E) dE \quad (4)$$

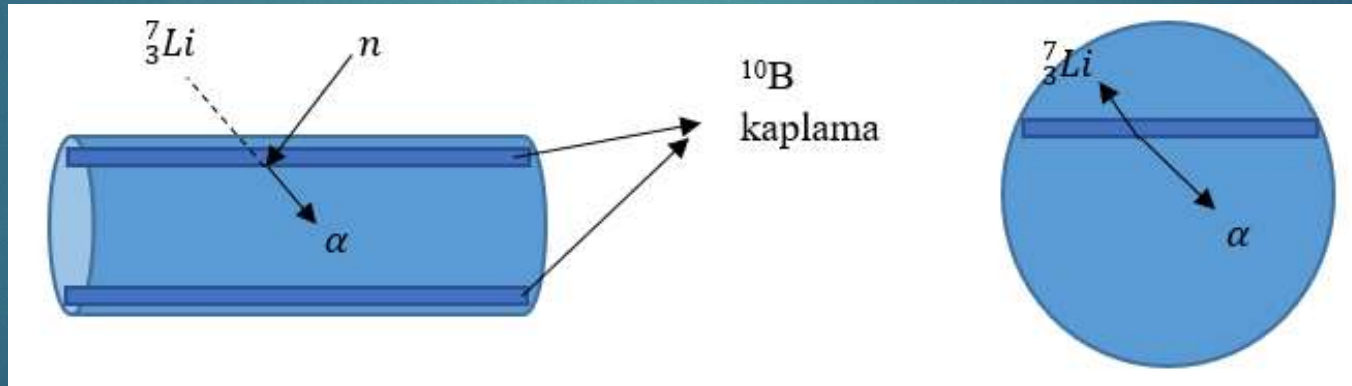
BF_3 termal nötron dedeksiyonu için kullanıldığında ortalama hız \bar{v}

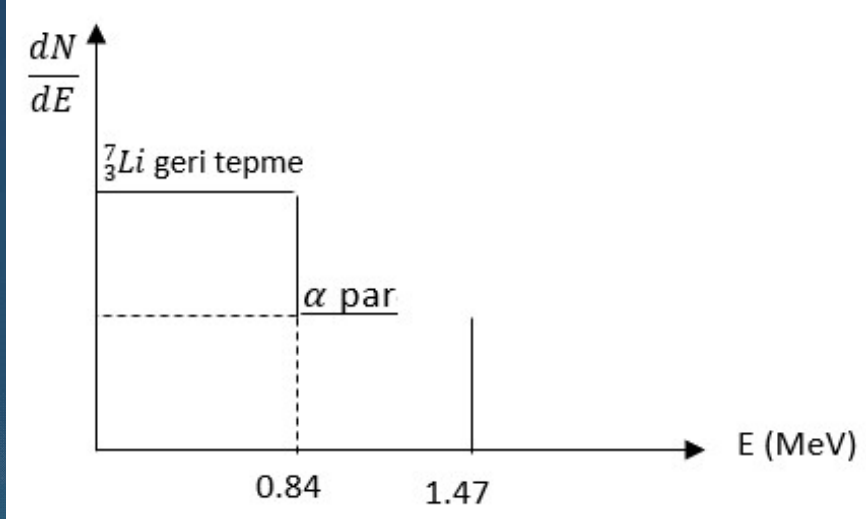
$$\bar{v} = \frac{\int_0^{E_{max}} v(E) n(E) dE}{\int_0^{E_{max}} n(E) dE} \quad (5) \text{ Toplam akı: } \phi = \int_0^{E_{max}} \phi(E) dE = \int_0^{E_{max}} v(E) n(E) dE$$

$$R = N.V. \sigma_0 \cdot \frac{v_0}{v} \cdot \phi \quad (6)$$

Bor Kaplamalı Nötron Sayaçları (Boron Lined Proportional Counters):

1. $^{10}\text{B}(n, \gamma)$ tepkimesi kullanılır. Katı haldeki $1\text{mg}/\text{cm}^2$ mertebesinde ^{10}B izotopu ile gaz doldurulmuş sayaç tüpünün iç duvarları kaplanır. (α ların bor içindeki menzilleri kalınlığı sınırlar.). Kalınlık arttıkça verim artabilir fakat gelen nötronların ilave zayıflatılmalarına yol açmasıyla az da olsa verim düşebilir.
2. Ürün olarak ortaya çıkan α ve ^7_3Li parçacıklarından sadece bir tanesi duyarlı hacime (filling gas) girme şansı elde eder.



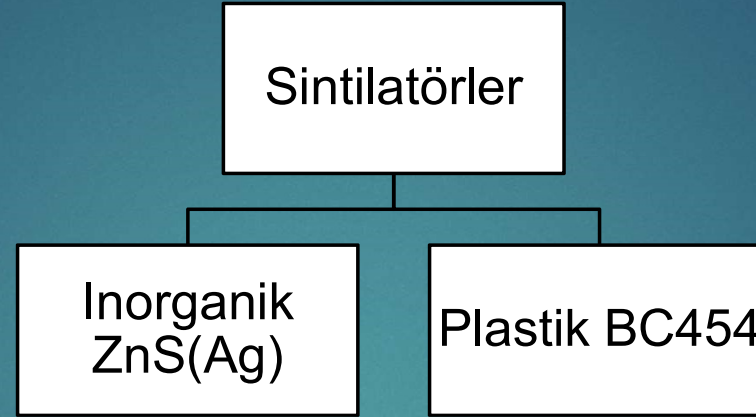


Bor kaplamalı orantılı sayalarda ideal puls yüksekliği spektrumu

Reaksiyon ürünleri birbirine zıt doğrultularda yayınlandıklarında sadece bir reaksiyon ürününün etkileşme yapması beklenecektir. Şayet α parçacığı tüpün içine doğru yönlendiği düşünülürse. İlk kinetik enerjisi 1.47MeV'lik maksimum enerjisini doldurma gazına aktaracaktır. Gaza aktarılan gerçek α enerjisi bu değerden sıfıra kadar değişecektir. Çünkü nötron etkileşmesinin yeri, iç kaplama yüzeyinden itibaren gaz içindeki yerlere kadar girebilir ve nötronun nüfuz derinliği α menziline daha fazla gaz içinde olabilir.

3. Bor kaplamalı orantılı gaz sayaçlarının sağladığı esneklik, BF_3 ' den daha uygun olan başka bir “doldurma gazı” kullanılmasına imkân verir.
4. Bor kaplamalı sayaçta, çalışma gerilimi daha düşüktür.
5. Bor kaplamalı sayaçta γ -ışınlarına daha az duyarlıdır. Bu nedenle, bu sayaçlar şiddetli γ alanlarındaki nötron dedeksiyonu için elverişlidirler.
6. BF_3 ve bor kaplamalı sayaçların her ikisi de termal (kısmen de epitermal) nötronların sayısını ölçmek için kullanılırlar. Enerjilerini ise ölçmezler.
7. Tipik puls doğma zamanları BF_3 tüplerinde 0.3-5 μsec (ortalama tüp boyutu için)

Bor Yüklü Sintilatörler:



a. İnorganik sintilatör ZnS(Ag)

Neutron time of flight (toF) nötron uçuş zamanı ölçümlerinde sintilatör, B_2O_3 + ZnS kaynaştırılarak 1 – 2 mm kalınlığında yapılır.



α 'ların menzilleri ve ZnS sintilatör ışığına karşı opaklığı, dedektör kalınlığını sınırlar.

b. Plastik sintilatör

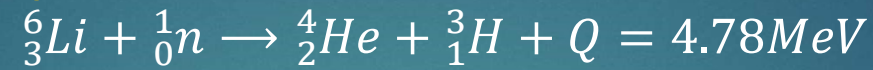
^{10}B (%90 zenginliğinde)

PS + Bor \rightarrow BC - 454

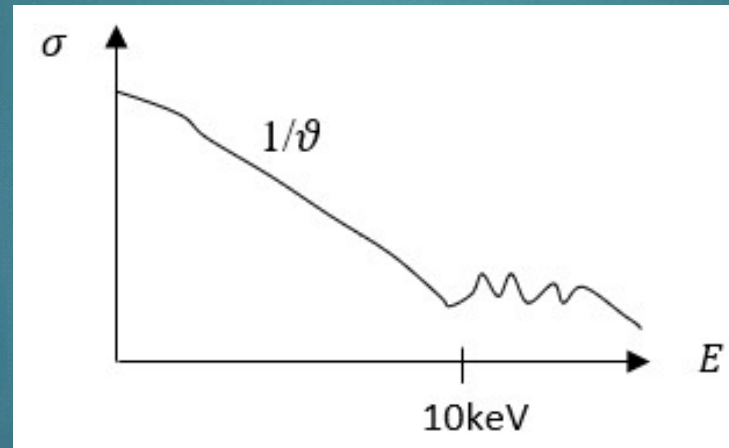
%4.4 – % 5

- Standart plastiğin ışık çıkış veriminin %75' ine ulaşılır.
- PS içindeki %Bor miktarı artırıldığında oluşan ışık çıkışında azalma olur. BF_3 dedektörlerine kıyasla PS+%5 Bor dedektörlerinin γ ayırma özellikleri kötüdür.
- Çünkü γ -ışınlarından kaynaklanan ikincil elektronlar tüm enerjilerini, plastik katıya aktarabilir. Ancak bu ikincil elektronların (γ -ışınları nedeniyle) enerjilerinin ancak belirli bir kısmı BF_3 gaz aktarımına aktarılır.

${}^6\text{Li}$ – Nötron Sayaçları:

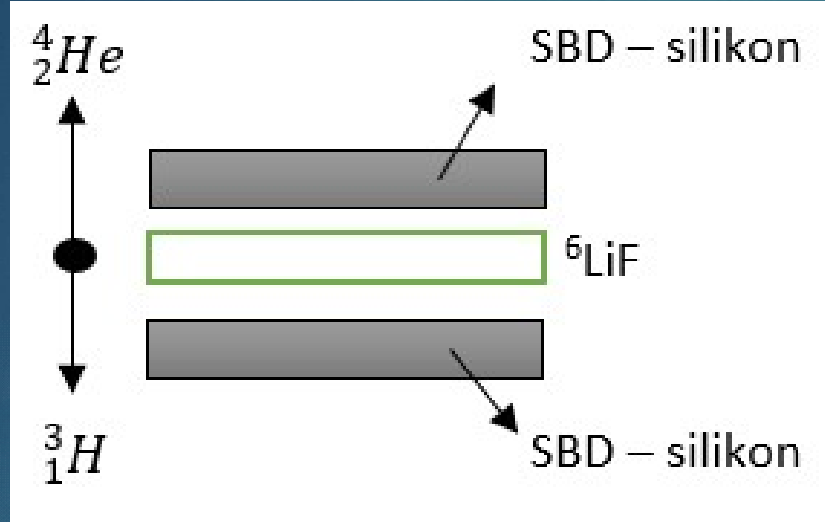


Bu tepkime, 10 keV' e kadar $1/v$ – bağımlı tesir kesiti davranışı gösterir.



$${}^6_3\text{Li} : \sigma (E_n=0.025\text{eV}) = 937\text{b}$$

Sandviç Dedektör:



Eş zamanlı olarak üretilen 3_1H ve 4_2He yüklü parçacıkları eş zamanlı olarak dedekte edilirler. Enerji çözme gücü = FWHM = 400keV termal nötronlar için. Ancak hızlı nötronlar için FWHM enerjiyle gelir.

İnorganik Sintilatörlü Nötron Dedektörü:

- ${}^6\text{Li}(\text{Eu})$:
%0.1
- Enerji ölçümleri için $E_n = 1 \rightarrow 14\text{MeV}$ aralığında çözme gücü;
$$R = \frac{FWHM}{E_n} = \%10$$
- Kristali $\text{LiI} \propto \text{NaI}$
- Scintillation decay time = $0.3 \mu\text{sec}$
- Işık verimi %35 $\text{NaI}(\text{TI})$ verimi
- Çözme Gücü = $1\text{MeV} \times 10/100 = 0.1\text{MeV}$
- Düşük termal enerjiler için dedektör verimi iyidir. Ancak iyot radyoaktif hale gelir ve sorun yaratır. Burada Eu, lüminesans verimini ayarlamak için aktivatör olarak kullanılır.

${}^6\text{Li}$ – Camlaştırılmış Dedektör:

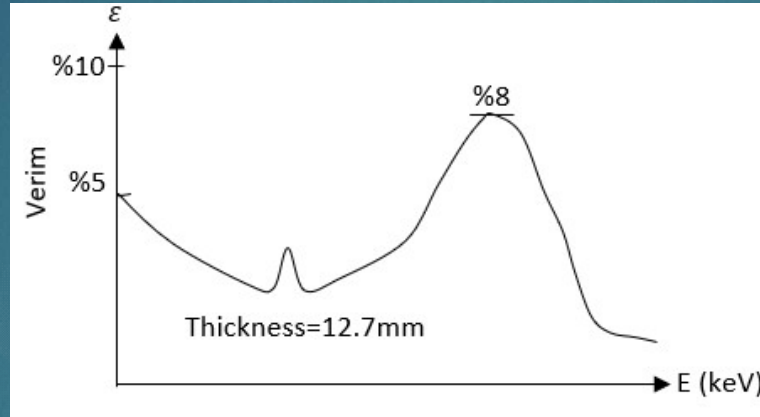
- Ce katkılanan cam + Li_2O dedektör
- Seryum (Ce), lüminesans verimini etkiler (katkı miktarını bağlı olarak).

Φ 125mm (en fazla)



t=0.5-25mm

Li miktarı %11' e kadar
 ^6Li izotop zen. %95



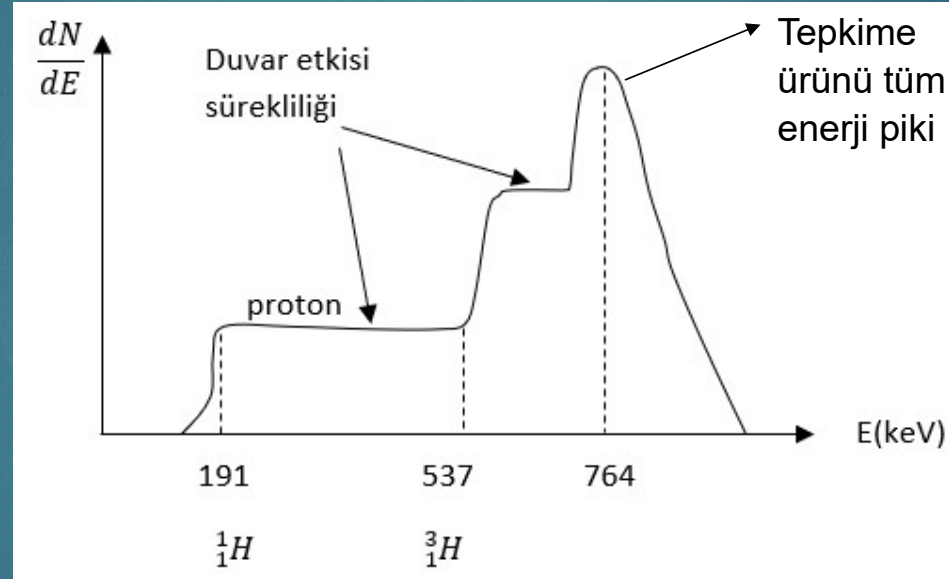
- $^6\text{LiI}(\text{Eu})$, hygroscopic kristallerdir ve hermetik olarak ince bir metalle sızdırmaz şekilde kaplanır.
- İnorganik sintilatör + İnorganik kristal sintilatör
 $^6\text{LiF} + \text{ZnS}(\text{Ag})$
verimleri %25 – 30 @0.1 eV nötronla
- Sıvı sintilatörler ^6Li yüklenmiştir. Li miktarı %0.15

^3He – Orantılı Gaz Sayacında Duvar Etkisi

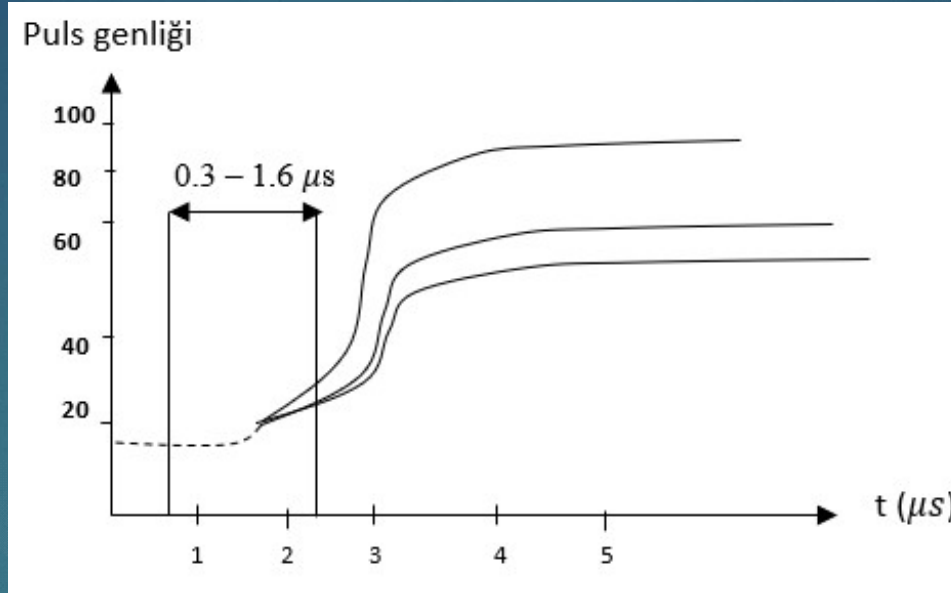


- ^3He tüpünde beklenen puls yüksekliği spektrumu,

$$\begin{aligned} E_p(^1_1\text{H}) &= 191\text{keV} \\ E_t(^3_1\text{H}) &= 573\text{keV} \\ \hline Q &= 764\text{keV} \end{aligned}$$



- Duvar etkisi nedeniyle puls yüksekliği spektrumundaki süreklilik çeşitli noktalar bakımından tüpte zararlı etkileri vardır. Bunlar;
 1. Sayım platosu üzerindeki voltaj aralığı azalır.
 2. Bazı nötron etkileşmelerinden ileri gelen küçük genlikli pulsların, gama etkileşmelerinden olması beklenen düşük genlikli pulslardan ayrılması zorlaşır.
 3. Bu duvar etkisini ^3He -tüpünde gidermek için tüp büyük çaplı yapılır. Böylece çoğu nötron etkileşmelerini duvardan uzak tutmak için büyük yapılır.
- ^3He veya BF_3 tüpünden herhangi birinde gözlenen çıkış pulsunun doğma zamanı (rise time) nötronun tüp içindeki etkileşme konumuna, tüp içindeki etkileşme konumuna ve tüp eksenine göre yüklü parçacığın yönelimine bağlıdır. Bu nicelikleri (konum ve yönelim) her ikisi de rastgele değişkendirler ve pulsların doğma zamanında önemli farklılıklar gözlenir. Őekildeki gibi son genliğin %80'ine ulaşması geçecek zaman 0.3-1.6 μ sec aralığında gerçekleşir.

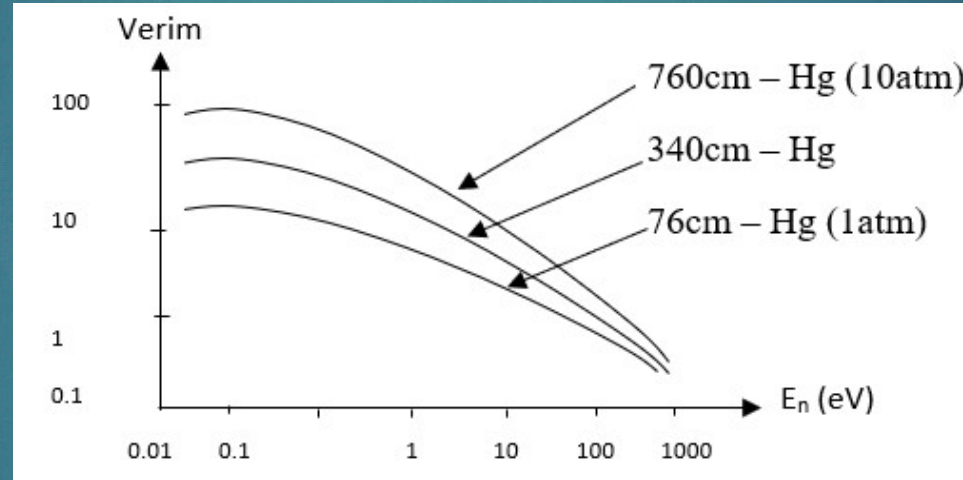


- Çıkış pulsuna neden olan önemli derecedeki elektriksel yükler, sadece anod teli etrafında oluşan çığlarda (avalanches) üretilirler. Şayet elektronlar aynı sürüklenme (drift) zamanına sahip iseler o zaman yük çığları hemen hemen aynı zamanda tetiklenirler. Farklı elektron sürüklenme zamanları nedeniyle elektronlara anod teline ulaşmaları değişimlere uğrarsa, çığ oluşumları zaman geçtikçe etrafa dağılırlar ve puls doğma zamanı azalır, puls oluşumu yavaşlar. Yapılan araştırmalar sonucu, tam puls genliğinin oluşmasının 50 μs geçtikten sonra da gerçekleşmediği gözlemlenmiştir.

- Puls doğmasındaki bu “yavaş bileşen”, anod telinin hemen yakın çevresindeki pozitif iyonlar terkettikten sonra, bu pozitif iyonların yavaş hareket etmeleri sebebiyle meydana gelir. Pratikte, puls yığılma (pile – up) etkisini önlemek için daha kısa puls şekillenim zamanı uygulanmalıdır. Bu yüzden, oluşan pulslarda “balistik zarar” (ballistic deficit) nispeten büyük bir etkiye sahiptir. Puls şekillenim zamanının aşırı küçük olarak seçilmesi sonucunda, puls doğma zamanının değişkenliği balistik zararın artmasına katkıda bulunur ve puls yüksekliği spektrumunda gözlenen pikler genişlemeye başlayacaktır. Yeterince uç durumlarda bu değişimler (balistik zarar ve genişlemeler) sayım platosunun azalmasına ve sayacın gama ışınlarını ayırma yeteneğinin kötüleşmesine neden olur.
-
- ^3He – sayaçları, BF_3 tüpleri ile kıyaslandığında daha yüksek gaz basınçlarında çalıştırılırlar. Bu gaz basınçları kabul edilebilir düzeyde gaz çoğalımı (gas multiplication) davranışını sağlayacak ve bunun sonucunda maksimum düzeyde dedeksiyon verimini sağlayacak şekilde uygulanması önemlidir.

- ^3He -tüplerinde gaz basıncı 4-10 atm (404-1010kPa) arasında değişir. şekilde görüldüğü gibi ^3He -gazı ile doldurulmuş sayacın nötron enerjisinin fonksiyonu olarak dedeksiyon verimi, yüksek gaz dolum basınçlarında daha yüksektir.

Çalışma gerilimi=
3000-5000V

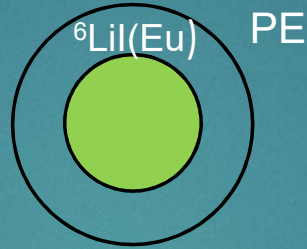


- ^3He – sayaçalarda;

$^3_2\text{He}(n, \gamma)^3_1\text{H}$ tepkimesinin $Q=764$ keV enerji değerinin küçük olması nedeniyle eşdeğer bir BF_3 tüpüne göre, gama ışınlarının neden olduğu pulsların, nötron pulslarından ayrılmasında performansı daha kötüdür. γ -ışınlama hızı arttığında, oluşan pulsların yığılarak (pile-up) toplam etkisi oluşan puls genliklerinin belirli bir derecenin üstünde yükselerek, bu yığılmış pulsların (pile-up γ -ray pulses) nötron indüklemesiyle oluşan pulslardan temiz bir şekilde ayrılmasını artık imkânsız hale getirebilir. γ -ışınlarının puls yığılma etkilerini minimumda tutmak için elektronların sürüklenmesini daha da hızlandıracak CO_2 veya Ar/Kr gibi ilave gazlar ^3He gazına karıştırılır. Böylece bu ilave gaz etkisi puls işleme sırasında daha kısa “puls şekillenim zamanları” uygulama imkânı verir ilave gazlar gazın doldurma gücünü (stopping power) artırır. Yüksek γ ışını ortamlarında, ^3He tüpünün iç kısımları aktif karbonla kaplanır ve tüp içindeki diğer gaz safsızlıkları soğurulur.

(BSS) Bonner Sphere Spectrometers – Bonner küreleri

- Nötronlar, ${}^6\text{Li}(\text{Eu})$ inorganik sintilatörleri kullanarak, nötronlar PE gibi küre şeklindeki malzemelerle yavaşlatıldıktan (moderation) sonra ölçülürler.
- ${}^6\text{Li}(\text{Eu})$ sintilatör PE (Polietilen Malz.) yavaşlatıcı malzemenin merkezine yerleştirilir.
- Çapları 2" → 12"
(5.1cm) (30.5cm)



- Bonner küreleri kullanarak nötron enerjisi, farklı çaptaki kürelerin verimlerinde oluşacak farklılıklar esas alınarak belirlenir.
- Kürenin çapı belirli enerjideki nötronlar için nötron moderasyon derecesini etkileyeceğinden ${}^6\text{Li}(\text{Eu})$ sintilatör verimini de etkiler.

$$\varepsilon_p(R = 6) = \frac{\Sigma_a}{\Sigma_t} [1 - e^{-\Sigma_t R}]$$
$$\varepsilon_p(R = 1) = \frac{\Sigma_a}{\Sigma_t} [1 - e^{-\Sigma_t R}]$$

Kalibrasyon Tablosu

- Tek enerjili (monoenergetic neutron source) ve şiddeti bilinen nötron kaynağı kullanılarak farklı boyutlardaki PE küreler ile hem küre çapının hem de nötron enerjisinin fonksiyonu olarak sayım hızları elde edilir.
- Daha sonra bu kalibrasyon tablosu bilinmeyen bir nötron spektrumunda, nötron enerjisini ve nötron sayılarının belirlenmesi için kullanılır. BSS (Bonner küreli spektrometer) özellikle sürekli enerji spektrumlarının ölçülmesi için kullanışlıdır.

	Sayım Hızı (Count Rate)
R(mm) yarı çap	
E_n (eV) Nötron en.	