



ANKARA ÜNİVERSİTESİ

NÜKLEER BİLİMLER ENSTİTÜSÜ

# BOR – NÖTRON TEPKİMESİ TEMELİNE DAYALI DEDEKTÖRLER

NÖTRON VE REAKTÖR FİZİĞİNE GİRİŞ

PROF. DR. HALUK YÜCEL

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

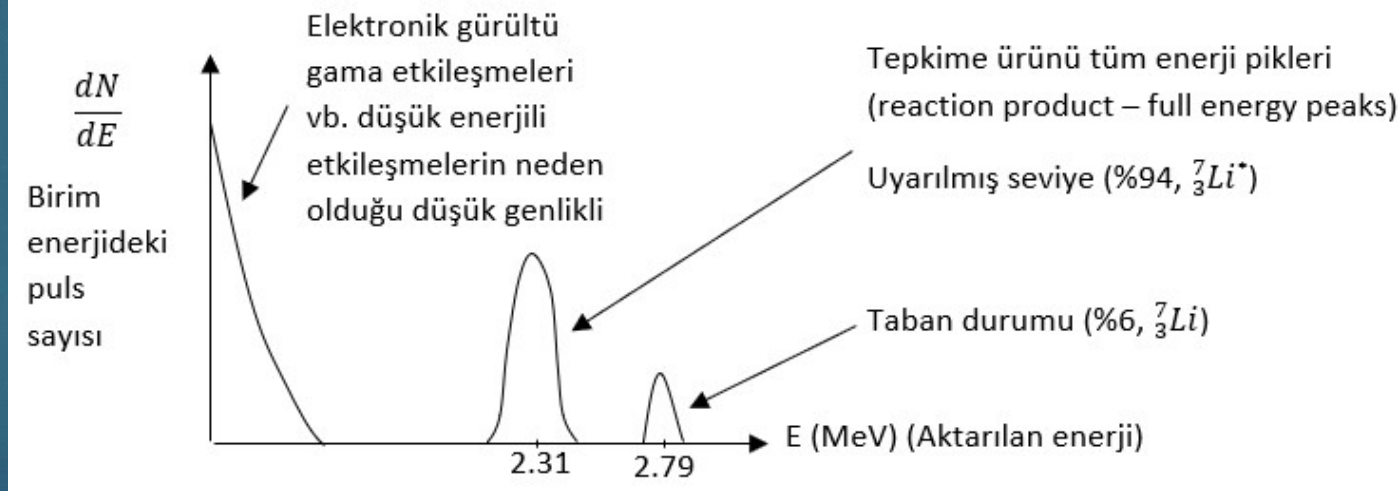
21.03.2019

## Bor – Nötron Tepkimesi Temeline Dayalı Dedektörler

- Nötron dedeksiyonunda en yaygın kullanılan  $\text{BF}_3$  orantılı sayaçlarıdır. Bu sayaçlarda yavaş nötron dedeksiyonunda,  $\text{BF}_3$  hedef malzeme olarak nötronların ikincil yüklü parçacıklara dönüşümünü (alfa) hem de orantılı sayaçtaki ortam gazı “orantılı bölgede çalışma” görevini yapar.
- $\text{BF}_3$ , yüksek derecede bor derişimi ve “orantılı sayaç payı” olarak üstün özellikleri nedeniyle yegane seçilen bir dedektör gazıdır.
- Genelde ticari olarak satılan  $\text{BF}_3$  dedektörlerinde  $^{10}\text{B}$  izotopu %90-96 mertebesine zenginleştirilerek kullanılırlar. Böylelikle dedektör verimi doğal  $\text{BF}_6$  verimine göre yaklaşık 5 kat daha yüksek hale getirilir.
- $\text{BF}_3$  gazı, tüp içerisine yüksek basınçlarda sıkıştırılarak doldurulduğundan  $\text{BF}_3$ 'nin “orantılı sayaç gazı” olarak performansı kötüleşir. Bu nedenle,  $\text{BF}_3$  gazının dedektör tüplerine doldurulma basınçları (absolute pressure), yaklaşık 0.5-1 atm ile sınırlıdır.

## BF<sub>3</sub> Tüpüyle Elde Edilen Puls Yüksekliği Spektrumları

- İdeal bir puls yüksekliği spektrumu, boyutları yeterince büyük, tüm tepkime enerjilerinin soğurulduğu ve bu tepkime enerjilerini tüp duvar malzemesinden ziyade, ortam gazı (orantılı sayaç gazı) BF<sub>3</sub> içerisine bırakıldığı derecede büyük bir dedektör tüpünü varsaymaktadır.
- ideal büyük bir BF<sub>3</sub> tüpünde tüm tepkime enerjilerinin soğurulduğu durumda beklenen puls yüksekliği spektrumu,

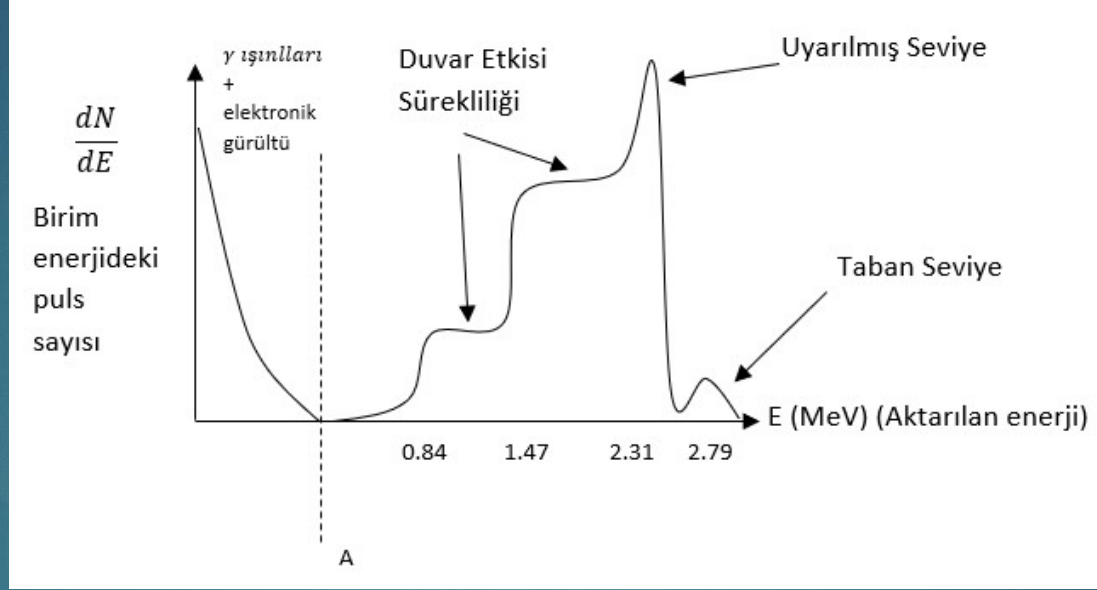


- Spektrumdan görüleceği üzere, ideal büyük bir  $\text{BF}_3$  tüpünde, tüp tepkime enerjisi idealde tamamen soğurulur. Ancak bu tepkimenin dallanması (branching) nedeniyle bir değişim gözlenir.  $^{10}\text{B}$  (n, $\alpha$ ) tepkimesinde  $^7_3\text{Li}$  ürün çekirdeğinin %94'ü  $^7_3\text{Li}^*$ 'nin “birinci uyarılmış seviyesine” yol açarken, termal nötronların neden olacağı bu tepkimelerin sadece %6'sı  $^7_3\text{Li}$ 'nin taban durumuna dönüşmesine yol açar. Bu nedenle şekildeki ideal puls yüksekliği spektrumunda görülen piklerin altındaki alanların oranı;

$$\frac{\text{Uyarılan seviye pik alanı}}{\text{Taban seviye pik alanı}} = \frac{N_{excited}}{N_{ground}} = \frac{94}{6}$$

## Duvar Etkisi

- Dedektör tüpünün boyutu, sonlu bir b y kl ge indirildiğinde tepkimelere ürün olarak ortaya çıkan alfaların ve  ${}^7_3\text{Li}$  nin ulaşma uzaklığı gaz ortamıyla sınırlı kalamayacağından, bazı tepkimelerde ortaya çıkan ürünler artık tüm enerjisini  $\text{BF}_3$  gaz ortamına aktaramayacaktır. Bu alfa ve  ${}^7_3\text{Li}$  den hangisi olursa olsun gazın doldurulduğu tüpün duvarlarına çarparak daha küçük genlikli pulslar üreteceklerdir. Bu istenmeyen proseslerin toplam etkisine gazlı sayaçlarda “duvar etkisi (wall effect)” olarak adlandırılır.  ${}^{10}\text{B}(n,\alpha)$  tepkimesinde ürün olarak ortaya çıkan alfaların menzili, bir kaç santimetre civarındadır ve genelde 0.5 – 1 atm basın lanarak  $\text{BF}_3$  tüpleri, pratikte kullanılan  $\text{BF}_3$  tüpleri yeterince küçük yapıldığında “duvar etkisi” ihmal edilemez derecede önemlidir.



Şekilde BF<sub>3</sub> tüplerinde duvar etkisinin önemli derecede olduğu bir puls yüksekliği spektrumu görülmektedir. Bu daha gerçeğe yakın spektrumda, ideal piklerin alt kısmının duvar etkisi nedeniyle ilave sürekli sayımlar (additional continuum) dahil olduğu görülmektedir. Bu durum BF<sub>3</sub> gaz tüpünde kısmi enerji aktarımına (duvara çarpma nedeniyle) karşılık gelen piklerin sol tarafında sürekli sayımlarda (continuum) önemli değişim olur

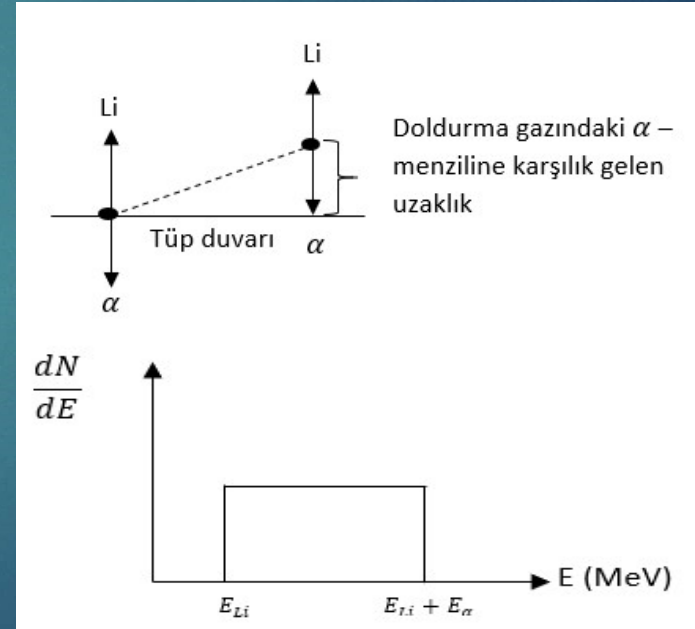
- Şekilde,  $\text{BF}_3$  orantılı gaz sayacında spektrum sürekli devam ederken öncesinde ve sonrasında bu süreklilikte (continuum), kesintiler (discontinuities) veya iki basamak oluşmaktadır. Spekturumun bu özelliği aşağıdaki gibi açıklanabilir.
- Gelen termal nötronların kinetik enerjisi (0.025eV) oluşan iki tepkime ürünü ( $\alpha, {}^7_3\text{Li}$ ) enerjisi yanında çok küçük kalacağından, nötron çok önemsenecek derecede bir momentum taşımaz. Bunun sonucunda iki tepkime ürünü ( $\alpha, {}^7_3\text{Li}$ ) birbirleriyle zıt doğrultularda yönelmek zorundadırlar. Şayet alfa parçacığı dedektör tüpünün duvarına çarparsa,  ${}^7_3\text{Li}$  geri tepkime çekirdeği duvardan uzaklaşacak ve tüm sahip olduğu enerjiyi  $\text{BF}_3$  gaz ortamına aktarması yüksek olasılıklıdır. Ters durumda  ${}^7_3\text{Li}$  geri tepkime çekirdeği tüp duvarına çarpar ve alfanın tüm enerjisini gaz içinde tümüyle soğrulur.
- Bunun sonucunda, bir anda meydana gelen  ${}^{10}\text{B}$  (n, $\alpha$ ) tepkimesinde duvar etkisi nedeniyle sadece bir tepkime ürününün enerjisi kaybolmasını bekleriz.

- Bu iki olasılık:

(1)  $\text{BF}_3$  tüpündeki doldurma gazına oluşan alfa parçacığı enerjini belirli bir kesrini aktardıktan sonra tüp duvarına çarpar, halbuki bu durumda,  ${}^7_3\text{Li}$  geri tepkime ürünü zıt doğrultuda enerjisini tamamen gaz içine bırakır.

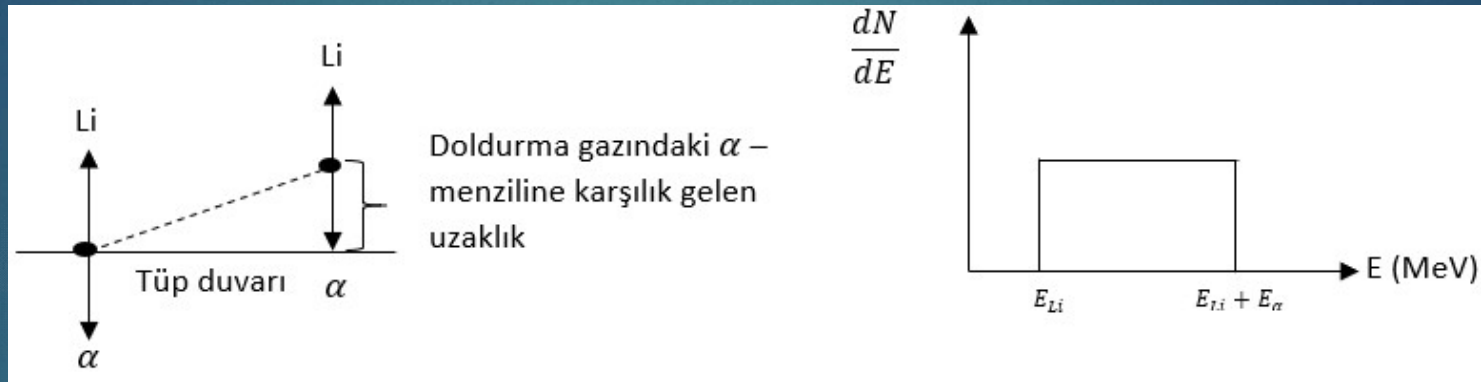
(2)  ${}^{10}\text{B}$  ( $n, \alpha$ ) tepkimesinde açığa çıkan  ${}^7_3\text{Li}$  geri tepme ürünü enerjisini belirli bir kesrini bu defa gaza aktardıktan sonra, tüp duvarına çarparken, zıt doğrultudaki alfa parçacığı enerjisini tümüyle gaz ortamına aktarır.

- (1) durumunda:  ${}^{10}\text{B}$  ( $n, \alpha$ ) tepkimesi tüp duvarından belirli bir mesafede (alfa parçacığının 0'dan tam maksimum menziline karşılık gelebilecek herhangi bir noktada) meydana gelebilir. Buna göre, gaz ortamına aktarılacak enerjinin miktarı aşağıdaki şematik açıklamaya göre ( $E_{\text{Li}} + 0$ ) ile ( $E_{\text{Li}} + E_{\alpha}$ ) arasında değişecektir.

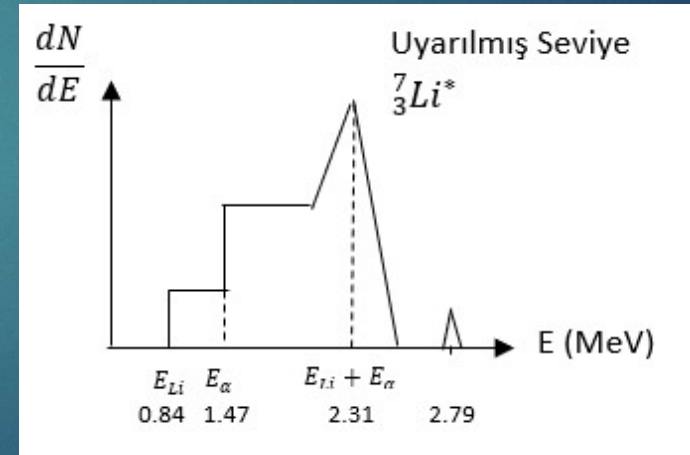




- (2) durumunda: yukarıdakine paralel bir düşünceyle enerji aktarımı ( $E_\alpha + 0$ ) ile ( $E_{Li} + E_\alpha$ ) arasında bir değerde tüpteki gaz ortamına aktarılır.



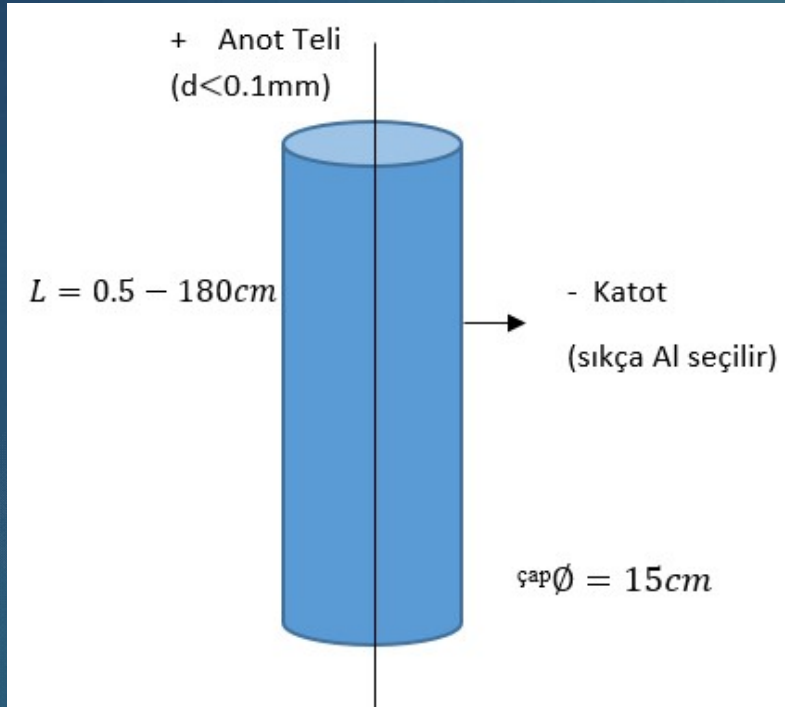
- $BF_3$  tüpündeki tüm bu olayların, yani tepkime ürünleri ister tüp duvarına çarpsın ister gaz ortamına enerjisini aktarsın yukarıdaki iki durumdaki enerji aktarımlarının basitçe toplamı, dedektördeki bileşik enerji soğurulmasına karşılık gelen dağılım yandaki gibidir.



- Duvar etkisi sürekliliği (wall effect continuum)  $E_{Li} = 0.8\text{MeV}$ 'de tüm enerji pik  $E_{Li} + E_{\alpha} = 2.31\text{ MeV}$ 'e kadar uzanır. Bu duvar etkisi sürekliliği uyarılmış seviyeye kadar gösterilmiştir.  ${}^7_3\text{Li}$  taban durumuna karşılık gelen tepkime sayısı çok az olduğundan kalan spektrumun altında kalarak gömülür.
- $\text{BF}_3$  dedektöründe,  $\frac{dN}{dE} \propto \frac{dN}{dH}$  puls yüksekliği spekturumu, gelen nötronun enerjisi hakkında hiçbir bilgi vermez. Spektrum dedektörün boyutu ve geometrisinin bir fonksiyonudur. Bu nedenle, rutin uygulamalarda  $\text{BF}_3$  tüpünden bir puls yüksekliği spektrumu elde ederek kayıt etmenin dolaylı yollardan kullanılmayacaksa hiçbir anlamı yoktur. Bunun yerine,  $\text{BF}_3$  tüpünde kararlı bir çalışma noktası sayım platosu elde ederek kullanmak daha elverişlidir. Bu sayım platosu içinde, çalışma voltajı ortam şartları nedeniyle çok küçük kaymalara (small drifts) veya sapmaların,  $\text{BF}_3$  sayacının nötron hassasiyetini önemli derecede etkilenmeyeceği varsayılır. ŞekilX'te A harfi ile gösterilen seviyede sabit bir ayırma seviyesi (fixed discrimination level) ayarı yapılır. Bunun amacı, nötron etkisiyle tüp içinde oluşabilecek minimum bir pulsun daha altındaki genliklerde meydana gelebilecek  $\gamma$  – ışın etkileşmeleri elektronik gürültü gibi düşük genlikli pulsların sayılmasını önlemektir.

## BF<sub>3</sub> Tüpü Tasarımı ve Yapımı

- Dedektör gaz tüpü boyutu artırılarak, nötron dedeksiyon verimi yükseltilebilir ve dedektör duvar etkisi azaltılabilir. Dedektördeki doldurma gazı nasıncı yüksek tutularak yukarıdaki dedeksiyon verimi ve duvar etkisinin azaltılmasında iyileştirmeler sağlanabilir. Bu amaçla, BF<sub>3</sub> tüp boyutları çap  $\Phi=15\text{cm}$ ,  $L=180\text{cm}$ 'ye kadar başarıyla uygulanmıştır.
- Gaz doldurma basınçları: 100 – 600 torr (13~80kPa)
- En iyi çözme gücü (puls yüksekliği spektrumunda) 200 – 300 torr (27~40kPa) gaz basıncında elde edilirken, spektrumundaki tüm enerji pikleri bu değerden daha yüksek gaz doldurma basınçlarında negatif iyon oluşumu ve iyonların tekrar birleşmesiyle (recombination) oluşan etkiler nedeniyle önemli derecede genişlemeler olmaktadır.



- Voltaj = 2000-3000 V
- Optimum gaz basıncı = 200-300 torr (27~40kPa)
- Diğer basınç = 100-600 torr (13~80kPa)

- Tüp malzemesi olarak sıkça Al seçilir. Ancak düşük background uygulamalarda st.st tercih edilir. Çünkü Al azda olsa  $\alpha$ -aktivitesi ihtiva edebilir. Tüpün azot teli çapı 0.1mm'den azdır. Çalışma gerilimi 2000-3000 Volt civarındadır. Daha yüksek gaz doldurma basınçları (P(filling)) uygulamalarında daha yüksek çalışma gerilimleri gerekli olur. Normal çalışma voltajında gaz çoğaltma (gas multiplication), 100-500 mertebesindedir.

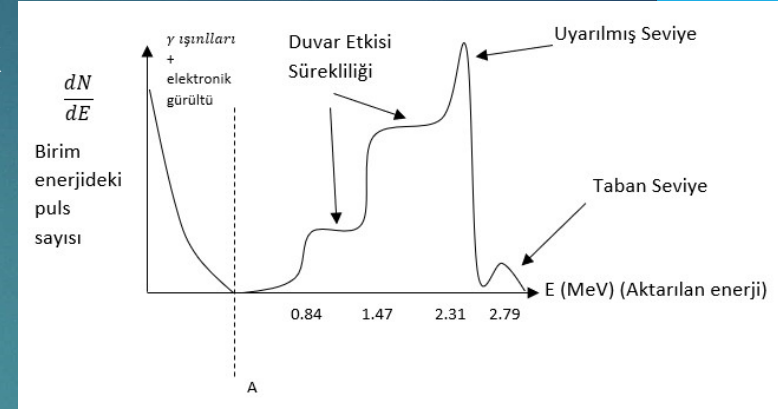
- $\text{BF}_3$  tüplerinin tasarımı, normal ortam çalışma sıcaklıklarının ( $20-30^\circ\text{C}$ ) ve en fazla  $\sim 100^\circ\text{C}$  sıcaklığa göre yapılır. Bu tüplerin  $150^\circ\text{C}$ 'ye kadar yüksek sıcaklıklarda çalışabilen özel tasarımları da yapılmıştır. Ancak, sıcaklık artırılınca puls genliği azaldığı gibi puls yüksekliği ayırma gücü, oda sıcaklığının üstüne çıkılınca da keskin bir azalım gösterir. Puls genliğindeki azalma ve ayırma gücündeki düşmeler, sayaç tüpünün duvarındaki safsızlıkların neden olduğu salıverme (desorption) ile ilişkili olduğu ve yüksek sıcaklıklara çıkıldığında sayaç yapımındaki diğer bileşenlerden de bu etkinin olabileceği mümkündür.
- Daha yüksek çalışma gerilimlerinde  $\text{BF}_3$  tüpleri çalıştırıldığında, diğer tip orantılı gaz sayaçlarıyla kıyaslandığında, çevresel etkilerden (örneğin nem) daha fazla etkilenirler. Örneğin, aynı boyuttaki yalancı (spurious) pulslar, aynı genlikteki sinyal pulsları gibi yalıtkan malzemeler içinden alınarak, kaçak akımdaki dalgalanmalara yol açabilir. Bu durum özellikle çok yüksek nem koşullarında meydana gelebilir. Kaçak akımlar, sayaç, aynı zamanda yüksek titreşimli alanlarda kullanıldığında yalancı sayımlar nedeniyle de oluşabilir. Bu etkiler, dedektör mikrosonik (sese/ çarpmaya/ titreşime bağlı) olarak ve küçük parçacıkların neden olduğu ve kir – pasın sayaçtaki etkileri olarak adlandırılır.

- $\text{BF}_3$  sayaçlarında, yaşlanma etkileri önemli derecededir. Bazı durumlarda doldurulurlar  $\text{BF}_3$  gazıyla  $10^{10} - 10^{11}$  sayım kaydedildikten sonra dedektör performansında önemli kötüleşme meydana gelir. Bunun nedeni anot telinde ve katot malzemesinde tüp duvarındaki katkı maddeleridir. Bunlar, gaz çığında (avalanche) üretilen moleküler disosiasyon ürünleridir.

### $\text{BF}_3$ Sayaçlarında Gama – Işının Ayırt Edilmesi

- $\text{BF}_3$  tüpleri, genelde  $\gamma+n$  birlikte bulunan alanlarda kullanıldıklarından, bu sayacın  $\gamma$ -ışınlarını ayırt etme yeteneği (gamma-ray discrimination) çok önemlidir.
- Gama ışınları esas olarak sayacın tüp duvarında (katot malzemesinde) etkileşirler ve ikincil elektronlar meydana getirirler ve bu gama ışınlarının neden olduğu ikincil elektronlar sayaç içindeki  $\text{BF}_3$  gazında “iyonlaşma” üretebilirler.
- İkincil elektronların gaz içindeki durdurulma gücü (stopping power for electrons) oldukça düşük olduğundan, tipik bir elektron enerjisinde; elektron, sayaç tüp duvarına (karşı taraftaki) ulaşmadan önce, sahip olduğu ilk kinetik enerjisinin sadece küçük bir kesrini gaz içine aktarır ve karşı duvara erişir.

- Bu yüzden  $\text{BF}_3$  orantılı gaz sayaçlarında, gama ışınlarının neden olduğu etkileşmelerin düşük genlikli olmasını ve yandaki şekilde A harfi ile gösterilen noktanın altında kalmasını bekleriz. Bu nedenle basit genlik ayırma tekniği uygulanarak, sayacın nötron dedeksiyon veriminde kayıba yol açmadan bu gama ışınlarının etkisi elimine edilebilir.



- Ancak,  $\text{BF}_3$  sayacının kullanılacağı yerde,  $\gamma$ -akısı çok yüksek ise, yine de genlik ayırma etkinliğinde bazı yetersizlikler meydana gelebilir. Yüksek sayım hızlarında, puls yığılma (pulse - pile-up) etkisiyle gama ışınlarının gözlenen pik genlikleri her bir ayırık pulsun genliğinden daha yüksek bir değer olabilir. Bu durumda, dedektör elektroniğinde, optimum puls-şekillenim sabiti (pulse shaping time constant) seçmek gerekecektir. Kısa pulse şekillenim sabitleri, gama ışınlarının puls-yığılma etkisini azaltacağından tercih edilir. Ancak bu kısa puls şekillenim sabitleri tam toplanamayan yük (incomplete charge integration) nedeniyle nötron pulslarında bir azalmaya yol açabilir.

- Çok çok yüksek  $\gamma$  sayım hızlarında  $\text{BF}_3$  gazında moleküler disosiasyon olayları nedeniyle kimyasal değişiklikler de olduğu kanıtlanmıştır. Bu kimyasal değişmeler, nötron etkisiyle oluşan tepkimeleri temsil eden puls yüksekliği spektrumlarında kötüleşmelere de yol açmaktadır. Bu kötüleşme çok şiddetli ise artık  $\gamma/n$  ayırımı etkin değildir ve radyasyon etkisiyle meydana gelen kimyasal değişiklikler, radyasyon hasarı olarak sayaç tüpünde kalıcı etki yapar. Geleneksel olarak kullanılagelen bir  $\text{BF}_3$  tüpü, 12R/h'luk gama ışınlanmasına maruz bırakıldığında, gama ışınlarının nötron etkisiyle oluşan pulslardan başarıyla ayrılabildeği rapor edilmiştir. Radyoaktif kirleticiler için soğurucu bir madde olarak görev yapan aktif karbon içine bu  $\text{BF}_3$  tüpleri konularak kullanıldığında,  $\gamma$  – ışınlama hızı 1000R/h kadar olan radyasyon akılarında bile iyi bir çalışma karakteristikleri gösterdeği kanıtlanmıştır.