

GAZLI PARÇACIK DETEKTÖRLERİNİN ÇALIŞMA VERİMİ VE KARARLILIĞININ İNCELENMESİ

Özkan ŞAHİN*

Alınma: 05.05.2018 ; düzeltme: 14.09.2018 ; kabul: 08.10.2018

Öz: Gaz kazancı, detektörden elde edilen sinyalin kalitesini belirleyen en önemli sayısal niceliklerden biridir. Sinyal oluşumu sırasında ortaya çıkan uyarılmış atomlar, Penning transferleri ve geri-besleme süreçleriyle kazançta kayda değer artışlara olanak sağlarlar. Bu süreçlerin mekanizmasını incelemek için literatürdeki argon-izobütan gaz karışımlarında ölçülen kazanç verilerinin benzetişimi yapıldı.

Anahtar Kelimeler: Parçacık detektörü, Gaz kazancı, Penning enerji transferi

Investigation of Working Performance and Stability of Gaseous Particle Detectors

Abstract: Gas gain is one of the most important numerical quantities, which determines the quality of the signal obtained from a detector. The excited atoms, created during the signal generation, may cause dramatic increases on the gas gain via Penning transfers and feedback processes. The mechanisms of these processes have been investigated by the simulations of the experimental gain data measured in argon-isobutane gas mixtures given in literature.

Keywords: Particle detector, Gas gain, Penning energy transfer

1. GİRİŞ

Yüksek enerji fiziğinde parçacık türünün belirlenmesi ve takibi için kullanılan detektörler ailesinin en önemli üyelerinden biri gazlı detektörlerdir. Bir parçacığın belli bir hacimden geçişini, bir elektrik sinyaline dönüştüren ilk detektör tipi H. Geiger ve E Rutherford (1908) tarafından tasarlanmıştır. 1928 yılında geliştirilerek “Geiger–Müller sayacı” adını alan bu detektörler, tüm modern gazlı detektörlerin atası olarak bilinirler (Geiger ve Müller, 1928). Geiger–Müller sayacından sonra, detektör ortamına giren radyasyonun veya yüklü parçacıkların izini, 100 µm'lere varan yüksek bir hassasiyetle belirleyebilen orantılı sayaçlar geliştirilmiştir (Charpak ve diğ., 1968). G. Charpak'a 1992 yılı Nobel Fizik Ödülünü getiren bu buluş (http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1992/), yüksek enerji fiziğinde büyük sayma hacmi ve gücü gerektiren detektörlerin üretilebilmesinin de önünü açmıştır. Bu önemli buluşu, çok aşamalı çığ odaları (Charpak ve Sauli, 1978) ve sürüklenme odaları (Walenta, 1979) gibi detektörler izlemiştir.

C. A. Spindt ve arkadaşları tarafından üretilen “mikro–iğneli yapılar” sayesinde yüksek vakumlu bir ortamda elektronlar, fosfor bir ekrana gönderilerek düz ekran televizyonların icadında kullanılmıştır (Spindt ve diğ., 1976). Ancak çok küçük çoğalma bölgesine sahip olduklarından, atmosferik basınçlara çıktığında, bu yapılar ile parçacıkların tespiti için gözlenebilir bir sinyal veya bir başka ifade ile kazanç elde etmek mümkün değildir.

* Uludağ Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü, Görükle Kampüsü, 16059, Bursa, Türkiye
İletişim Yazarı: Özkan Şahin (osahin@uludag.edu.tr)

1990'lı yılların ikinci yarısından itibaren, mikro desenli gaz detektörler olarak adlandırılan (MPGD, Micro Pattern Gas Detectors) yeni nesil detektörler ile ilgili çalışmalar büyük bir önem kazanmıştır. MPGD'ler arasında öne plana çıkan iki detektörden biri 1996 yılında Y. Giomataris ve arkadaşlarının keşfettiği MICROMEGAS (Micro-Mesh Gaseous Structure) olmuştur (Giomataris ve diğ., 1996). Micromegas'lar temelde paralel levhali detektörlere oldukça benzer bir yapıya sahiptirler. Ancak elektrotlar ağ biçiminde sıralandığından Micromegas'larla ölçülen sinyaldeki dalgalanmalar, klasik paralel levhali detektörlere kıyasla çok daha küçük olur. 1997 yılına gelindiğinde ise G. Charpak ve F. Sauli GEM (Gas Electron Multiplier) detektörleri önermişlerdir (Sauli, 1997). GEM'ler, yaklaşık 70 µm mertebesinde çok sayıda gözeneğe sahip olduklarından, parçacıkların konumunu istenilen hassasiyette ölçebilmektedirler.

Gazlı detektörlerin yüksek enerji ve parçacık fiziği dışındaki yaygın kullanım alanları aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- **Nükleer reaktörlerde:** Güvenlik açısından hayati önem taşıyan nötron ışımasının akı ve enerjilerinin yüksek hassasiyetli ölçümleri, gazlı detektörlerle yapılabilmektedir (Pancin ve diğ., 2004, Pacella ve diğ., 2006; Houry ve diğ., 2006).
- **Astrofizik:** Güneşte meydana gelen tepkimeleri incelemek için yapılan düşük enerjili nötrino deneylerinde gazlı detektörlerden yararlanılmaktadır (Hagmann, 2004; Rubbia, 2004, 2006). 1970 yılında fırlatılan UHURU uydusuna yerleştirilen tek telli orantısal sayaçlar sayesinde kozmik X-ışınları keşfedilmiştir (Giacconi, 2003). UHURU uydusundaki başarılı uygulamaların ardından MIR uzay istasyonundaki X-ışını teleskobunda çok telli orantısal sayaçlar kullanılmıştır (Emelyanov ve diğ., 2000) Ayrıca uzay teleskoplarına kıyasla oldukça ekonomik ve çözünürlüğü ise onlardan çok daha yüksek olan birçok balon deneyinde de mikro şeritli gaz detektörler kullanılmaktadır (Ramsey ve diğ., 2000).
- **Hiperspektral görüntüleme:** Özellikle madencilikte yer altı kaynaklarının spektral özelliklerinin belirlenmesi, uydu veya helikopter ile yapılan yeryüzü araştırmaları, havadaki renksiz ve kokusuz olan zararlı maddelerin saptanması, fabrika ve yük gemilerindeki atıkların tespiti gibi çok geniş bir uygulama alanına sahip hiperspektroskopik cihazlar, gazlı detektörler ile donatılabilmektedir (Bidault ve diğ., 2007; Rodionov ve diğ., 2005; Fonte ve diğ., 2005).
- **Sağlık fiziği:** X-ışınları ile kanserli hücrelerin tespiti, Pozitron Emisyon Tomografi (PET), Termal Nötron Tomografisi ve Mamografi gibi birçok tıbbi görüntüleme yöntemi için gazlı detektör tabanlı sistemler başarıyla uygulanabilmektedir. Gazlı detektörlerin bu tür uygulamalara getirdiği en önemli avantaj, klasik yöntemlere kıyasla hastaya on kat daha düşük bir doz verilmesine rağmen, görüntülemenin standart cihazlar ile aynı kalitede elde edilebilmesidir (Iacobaeus ve diğ., 2001, 2006; Ostling ve diğ., 2003; Fetal ve diğ., 2003; Danielsson ve diğ., 2004; Francke ve diğ., 2001). Sağlık fiziğindeki diğer uygulamalar için bkz. K. Mermigka (2008).
- **Erken uyarı sistemleri:** Gazlı detektörler yardımıyla yapılan radon miktarı ölçümleri sayesinde depremler önceden tespit edilebilmektedir (Charpak ve diğ., 2010). Ayrıca gazlı detektör sistemleriyle iyonosferdeki gaz oranlarının değişimi incelenerek, orman yangınları çok kısa bir süre içinde belirlenebilmektedir.
- **Askeri alan:** Gazlı detektörleri, kızıl ötesi görüntüleme veya nükleer silah taşıyan tehlikeli araçların taranması için hazırlanan sistemlerde de etkin bir cihaz olarak kullanmak mümkündür (Charpak ve diğ., 2008a, 2008b).

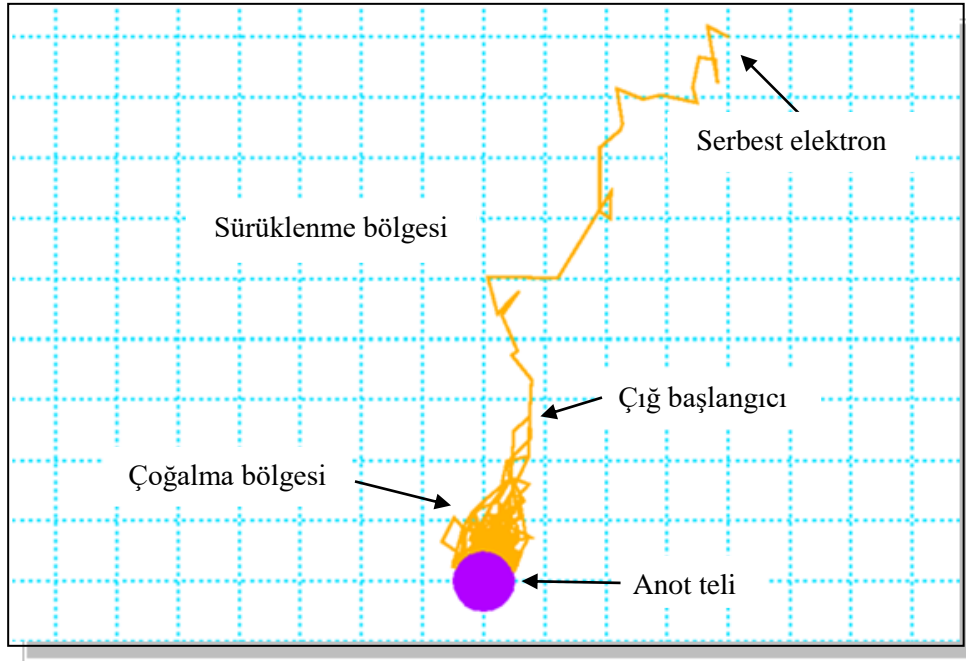
Bu çalışmada, parçacık detektörlerinin verimi ve kararlılığı ile doğrudan ilgili olan gaz kazancını etkileyen fiziksel süreçler incelenmiştir. Farklı oranlarda argon-izobütan karışımları için tek telli orantısal bir sayaç ile yapılan sistematik kazanç ölçümleri ve bu verilerin benzetişimi için türetilen çeşitli yöntemlerle, kazançta katkıda bulunan süreçlerin işleyişi hakkında önemli bilgilere ulaşılmıştır.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

2.1. Detektörde Sinyal Oluşumu

Gazlı detektörlerin çalışma ilkeleri temelde aynıdır: Detektöre gönderilen bir parçacık, sayıcı gaz içerisindeki atomlar (veya moleküller) ile esnek ya da esnek olmayan çarpışmalar yaparak ilerler. Parçacık, gaz atomunun iyonlaşma eşiğinden daha fazla enerjiye sahipse esnek olmayan çarpışmalarda atomu iyonlaştırarak, izi boyunca elektron-iyon çiftleri oluşturur. Eğer detektörün elektrotlarına bir gerilim uygulanırsa gelen parçacığın ürettiği elektronlar iyonlardan ayrıştırılır ve yeniden birleşmeleri önlenir. Üretilen serbest elektronlar, elektrik alan vasıtasıyla anoda doğru sürüklenmeye başlarlar. Sürüklenen elektronların çarpışmalar arasında elektrik alandan kazandıkları enerji, temel durumunda bulunan diğer gaz atomlarını iyonlaştırabilecek kadar yüksek olabilir. Bu durumda ortamda yeni yük çiftleri üretilir. Ardı sıra gelişen bu tür iyonlaşma süreçleri, anot civarında yoğun bir elektron çığı, bir başka ifadeyle ölçülebilir bir sinyal oluşumu ile son bulur (Knoll, 2000; Sauli, 2014). Elde edilen sinyalin kalitesini artırmak için elektron çığına katkıda bulunan fiziksel olaylara ait mekanizmaların ayrıntılı olarak incelenip, işleyişleri anlaşılmalıdır.

Şekil 1'deki örnek hesaplamada, Garfield benzetim programı (Veenhof, 1998) kullanılarak, 1 atm basınç ve 300 K sıcaklıkta tutulan % 90 Argon - % 10 CO₂ gaz karışımı ile doldurulan tek telli silindirik bir sayaç için elde edilen çığ oluşumu verilmiştir. Sayacın, katot yarıçapı $r_c = 0.1$ cm ve anot yarıçapı ise $r_a = 50$ μ m olarak alınmıştır. Benzetimde, serbest bir elektronun, detektörün merkezine yerleştirilen bir anot teline doğru $V = 1000$ Volt'luk gerilim altında çekildiği varsayılmıştır. Şekilde çoğalmanın telden sadece 5-6 anot yarıçapı kadar uzakta ($\approx 2,7 \times 10^{-3}$ cm) başladığı görülmektedir. Serbest elektron, elektrik alanının tele yakın bölgelerde şiddetlenmesi ile yeni çığlara yol açacak kadar enerjiye sahip olabilir. Elektrotlara uygulanan gerilimi artırarak, çoğalma bölgesini genişletmek mümkündür.

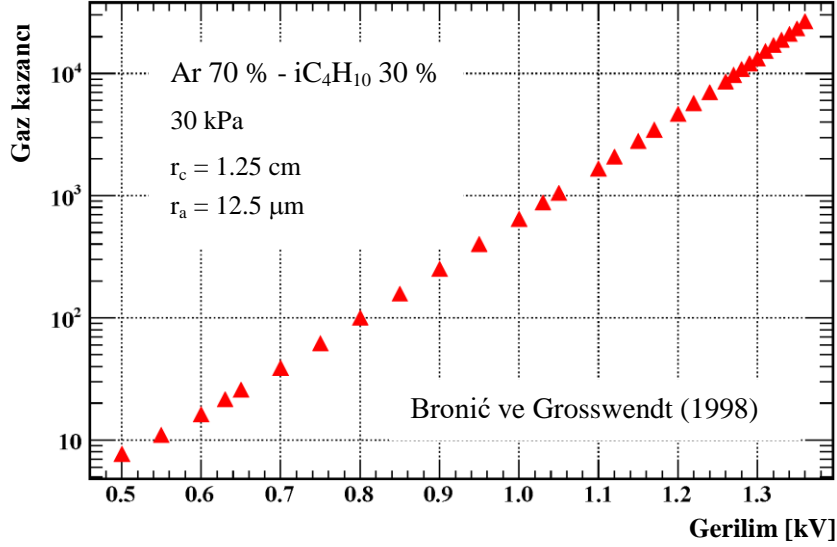


Şekil 1:

Tek telli silindirik bir detektörde elektrik alanı varlığında ilerleyen serbest bir elektron tarafından anotta oluşturulan çığ elektronları. Her bir aralık (kare) 10^{-3} cm'lik uzunluğa karşılık gelmektedir. Turuncu çizgiler elektronların izlerini temsil etmektedir.

2.2. Gaz Kazancı

Bir detektörün anot elektrotunda toplanan elektron sayısının (N), detektöre giren parçacıkların izi boyunca başlangıçta üretilen elektron sayısına (N_0) oranına, gaz çoğalma faktörü veya kısaca “gaz kazancı” (G) adı verilir. Detektörden alınan sinyalin kalitesini belirleyen en önemli niceliklerden biri olan kazancın, elektrotlara uygulanan gerilimle üstel olarak artması istenir. Dolayısıyla böyle bir artış, yarı-logaritmik çizilen gerilim-kazanç grafiklerinde doğrusal bir değişim olarak gözlenir (Şekil 2).



Şekil 2:

Tek telli orantısız bir detektörde ölçülen kazanç değerleri.

Kazançtaki üstel artış korunduğu sürece, anot telinde biriken toplam elektron sayısı ile detektöre gelen parçacığın ürettiği birincil iyonlaşmaların sayısı orantılı olur. Yüksek enerji fiziğindeki deneyler, detektörün “orantılı sayaç” olarak adlandırılan bu çalışma bölgesinde yapılır. Detektörün farklı gerilimlerdeki çalışma kararlılığının artırılması, sayıcı hacim içerisine gelen parçacıkların tek tek sayılması ve enerjilerinin ölçülmesi ya da belli enerjide olanların seçilip sayılması gibi ihtiyaçlar, orantılı bölgenin yeterince geniş olmasıyla sağlanır. Bu nedenle, deneylerde orantısallığı bozan iyon ve foton geri-besleme gibi ikincil etkilerin önüne geçilmelidir (Grupe, 2008).

2.2.1. Gaz Kazancının Hesaplanması

Detektörün sayıcı hacmi içerisinde ilerleyen serbest bir elektron tarafından, birim uzunlukta üretilen elektron-iyon çifti sayısı “Townsend katsayısı” (α) olarak bilinir. Bu katsayı, sayıcı gazın türüne, sıcaklığına, basıncına ve detektörün elektrik alanına bağlı bir büyüklüktür. Magboltz benzetişim programı (Biagi, 1999), parçacık detektörlerinde yaygın olarak kullanılan tüm gazlar için bu katsayıyı hesaplayabilir. Program, Boltzman transport eşitliklerini Monte Carlo yöntemiyle çözerek, gazların iyonlaşma, uyarılma, sürüklenme gibi özellikleri için yüksek hassasiyetli sonuçlar verir.

Bu bilgiler ışığında, silindirik tek telli orantılı bir sayaç için kazanç (G), Townsend katsayısının çoğalma bölgesindeki integrali cinsinden tanımlanabilir:

$$G := \frac{N}{N_0} = \exp \int_{r_a}^{r_b} \alpha(E(r)) dr \quad (1)$$

Burada, r_a anot telinin yarıçapı, r_b elektron çığı başlangıcının anoda uzaklığıdır ve bu integral sınırı $\alpha = 1$ elektron/cm değerine ulaşılan elektrik alan şiddeti ile belirlenebilir; r ise anot ve katot arasındaki herhangi bir uzaklıktır. Elektrotları arasında V gerilimi uygulanan ve r_c katot yarıçapına sahip silindirik bir sayaç için elektrik alan şiddeti,

$$E(r) = \frac{V}{r \ln(r_c/r_a)} \quad (2)$$

ifadesi ile verilir. Elektrik alan şiddeti, $1/r$ bağıllığından dolayı, anot teli yakınlarında oldukça yüksek değerlere ulaşır. Elektrik alanının artması ile serbest elektronların alandan kazanacağı enerji de artar; böylece gazın iyonlaşma eşiğini aşan elektronların sayısı yani Townsend katsayısı (α) da artar. Bu nedenle silindirik bir sayaçtaki yoğun çığ oluşumu özellikle α 'nın büyük değerlere ulaştığı anot teli civarında ortaya çıkar (Bkz., Şekil 1).

2.2.2. Uyarılmış Seviyelerin Gaz Kazancına Katkısı

Elektrik alanda hızlandırılan elektronlar, gaz atomları ile yaptıkları etkileşmelerde sadece iyonlaşmalara değil, çok sayıda uyarılmaya da neden olurlar. Uyarılan atomun enerjisi, karışımdaki diğer gazın iyonlaşma eşiğinden daha büyük ise uyarılan seviyelerde depolanan enerji, “Penning transferleri” olarak bilinen süreçlerle yeni elektron-iyon çiftleri oluşturmak için kullanılabilir (Penning 1928, 1934; Druyvesteyn ve Penning, 1940). Uyarılan atom A^* ve taban durumdaki atom (veya molekül) B ile temsil edilirse bu enerji transferlerinin en genel mekanizması aşağıdaki gibi verilebilir:



Penning transferleri nedeniyle gaz kazancında ortaya çıkan artış, “Penning etkisi” olarak adlandırılır. Bu etki, ölçümlerdeki dalgalanmaları azaltır ve geniş bir çalışma aralığında, sayacın orantısallığı bozulmadan, yüksek çözünürlüklü kazanç ölçümlerinin yapılabilmesine olanak sağlar. Böylece detektörün duyar bölgesinin kararlılığı artar. Ayrıca, bu etki sayesinde, detektöre gelen parçacığın, sayıcı hacim içerisinde bıraktığı enerji daha hassas ölçülebilir (Bronić ve Grosswendt 1996, 1998).

Magboltz benzetişim programı, Townsend katsayılarının hesaplanmasında sadece doğrudan iyonlaşmaları dikkate alır. Bu nedenle, Eşitlik 1 kullanılarak, Penning etkilerinin gözlenmediği gaz karışımlarında hesaplanan ve ölçülen kazanç değerleri arasında oldukça uyumlu sonuçlara ulaşılabilir. Fakat Penning gaz karışımları söz konusu olduğunda, deneysel verilerle bir uyum sağlayabilmek için Eşitlik 1’de mutlaka aşağıdaki bağıntı ile tanımlanan Penning düzeltmeli Townsend katsayıları (α_{pen}) kullanılmalıdır:

$$\alpha_{pen} := \alpha \left(1 + r_{pen} \frac{v_A^{uyr}}{v_{AB}^{ion}} \right) \quad (4)$$

Burada, v_{AB}^{ion} karışımdaki gazların toplam iyonlaşma frekansı, v_A^{uyr} ise uyarılan atomun Penning transferleri yapabilecek kadar yüksek enerjiye sahip seviyelerinin toplam üretilme frekansdır. Magboltz, herhangi bir gaz karışımı için iyonlaşmaların ve uyarılmaların üretilme frekanslarını ayrıntılı olarak hesaplayabilmektedir. Uyarılan seviyelerde depolan enerjinin doğrudan iyonlaşmalara katkıda bulunan kesri, “Penning enerji transfer olasılığı” (r_{pen}) olarak tanımlanır. Herhangi bir Penning gazı için bu olasılığın değerini önceden belirlemek mümkün değildir. Ancak, incelenen karışım için ölçülen deneysel kazanç eğrileri, Eşitlik 4’te verilen Penning düzeltmeli Townsend katsayıları ile fit edilerek, transfer olasılıkları saptanabilir.

2.2.3. Geri-Besleme Süreçlerinin Gaz Kazancına Katkısı

Uyarılan atomlar, yeterli enerjiye sahip olsalar bile çarpışmalarda Penning transferleri yapmaksızın belli bir yaşam ömrü sonunda bozunabilirler. Atom, bir veya birkaç basamakta gerçekleşen bozunumlarla, sahip olduğu enerjiyi foton salarak kaybeder ve temel durumuna döner. Özellikle temel duruma doğrudan geçişlerde yayınlanan fotonlar, spektrumun mor ötesi bölgesinde yer alır. Fotonların bu bölgedeki enerjisi, fotoelektrik olayla diğer gaz atomlarından elektron sökebilecek kadar büyük olabilir. Ara seviyelerdeki geçişlerden yayınlanan fotonların enerjisi ise genellikle gaz atomlarını iyonlaştırabilecek kadar yüksek değildir. Fakat bu fotonlardan bazıları, 3–4 eV’lik eşik enerjisine sahip katot metalinden elektron sökebilecek yeterlikte enerji sahibi olabilirler.

Gaz karışımı içerisinde veya katotta üretilen foto-elektronlar, Şekil 1’de gösterilen çoğalma bölgesinin dışındaysa, ardı sıra gelişen etkileşmeler sonucunda, anot yakınlarında ikincil elektron çığlarının ortaya çıkmasına neden olurlar. Üretilen ikincil çığların gaz kazancına etkisi “geri-besleme” olarak adlandırılır. Yarı-logaritmik kazanç eğrilerinde, özellikle yüksek kazanç değerleri için üstel artıştan sapmalar şeklinde gözlenen bu etki, detektörün orantısallığını bozar ve çalışma aralığını kısıtlar. Geri-besleme süreçlerinin de hesaba katıldığı kazanç (G_g) ifadesi aşağıdaki gibi yeniden tanımlanabilir:

$$G_g = \frac{G}{1 - \beta G} \quad (5)$$

Burada, β bir çığ elektronu başına foto-elektron üretilme olasılığıdır ve üstel artıştan sapmanın bir ölçüsüdür. Bu bağıntıya göre $\beta \cong 0$ olduğunda, foto-elektronların kazanç katkısı ihmal edilebilir düzeydedir. $\beta G \ll 1$ ise çok yüksek kazanç değerleriyle çalışılmadıkça üstel artıştan sapmalar, detektörün orantısallığını bozmaz. $\beta G \approx 1$ ise çok küçük kazanç değerlerinde bile orantısallık bozulur ve detektör sayım yapma işlevini yitirir (Gruppen, 2008).

3. ARAŞTIRMA VE BULGULAR

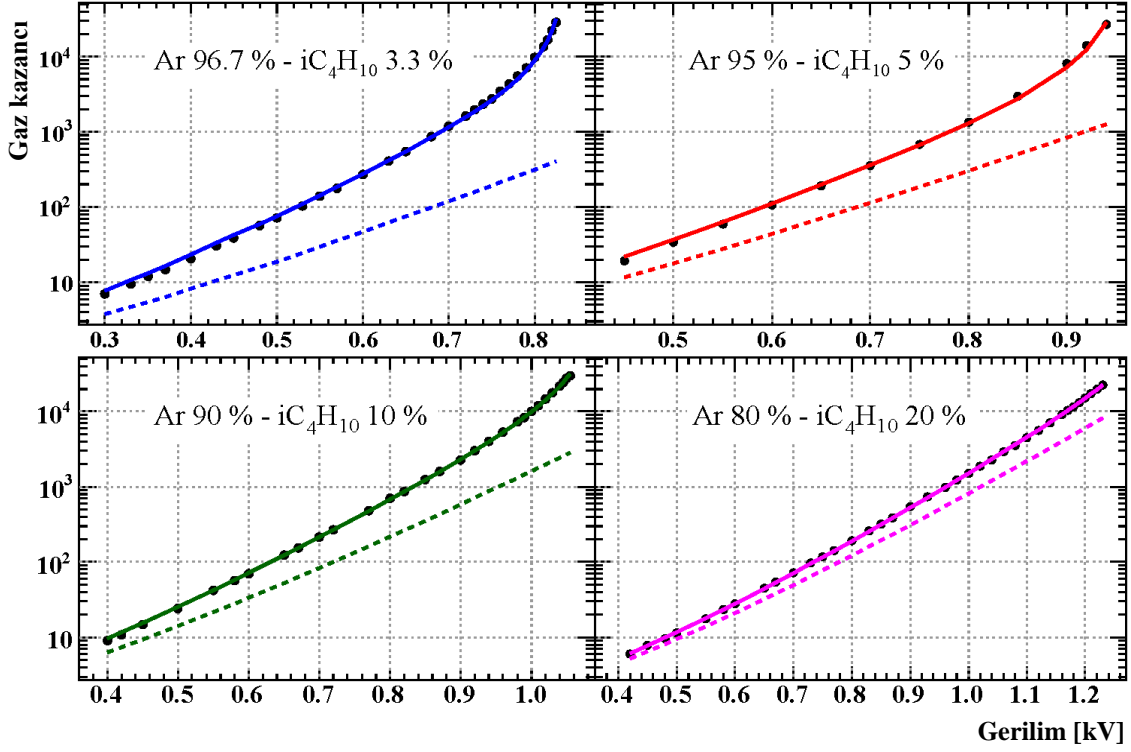
Uyarılan atomların toplam iyonlaşmadaki katkısını incelemek için Bronić ve Grosswendt (1998) tarafından silindirik bir detektörle, argon-izobütan gaz karışımlarında yapılan kazanç ölçümleri kullanılmıştır. Detektör, $r_a = 12.5 \mu\text{m}$ yarıçaplı bir anot telinin, $r_c = 2.5 \text{ cm}$ yarıçaplı alüminyum katot tüpünün merkezine yerleştirilmesiyle oluşturulmuştur. Ölçümler, 30 kPa basınç altında, 300 K sıcaklıkta tutulan, % 3.3, % 5, % 10, % 20 ve % 30 iC_4H_{10} içeren karışımlar için gerçekleştirilmiştir.

Kazanç hesaplamaları için öncelikle Magboltz benzetişim programı çalıştırılarak, her bir gaz karışımına ait fiziksel özellikler çıkış dosyalarına yazıldı. Ardından çıkış dosyalarındaki bilgileri okuyup deneysel kazanç verilerini en küçük kareler yöntemiyle fit edebilen bir program geliştirildi. Programda, Magboltz tarafından hesaplan Townsend katsayıları için Penning düzeltme terimi (r_{pen}) kullanıldı ve Eşitlik 1’in sayısal integrali alındı. İhtiyaç duyulduğunda geri-besleme terimi (β) Eşitlik 5’teki ifadeyle hesaba katıldı. Fit programının ürettiği çözüm matrislerinden bu iki fit parametresinin güçlü korelasyona sahip olmadığı anlaşılmıştır. Bu özellik r_{pen} ve β terimlerinin, hesaplamalarda birbirinden bağımsız (serbest) fit parametreleri olarak kullanılacaklarını göstermiştir.

Argonun spektrumunda en düşük uyarılma seviyesi ($3p^5 4s$) 11.55 eV enerjiye sahiptir. İzobütanın iyonlaşma eşiği ise 10.67 eV’dir. Argonun uyarılan seviyelerinin tümü izobütanı iyonlaştırabilecek kadar yüksek enerjiye sahiptir. Bu nedenle, ölçülen kazanç verilerine yapılan fitlerde, Penning düzeltmeli Townsend katsayıları kullanılırken (Eşitlik 4), argonun uyarılan seviyelerinin tamamının üretilme frekansları hesaba katılmıştır.

Uyarılan seviyelerin üretilme frekanslarının elektrik alan ile değişimi birbirine çok benzer eğilimdedir; aralarındaki korelasyon çok güçlüdür. Dolayısıyla herhangi bir enerji seviyesi için elde edilecek enerji transfer olasılığını (r_{pen}), diğerinden ayırmak mümkün değildir. Bu durumda bir enerji seviyesine ait olasılık değeri cinsinden yazılabilir. Bu nedenle kazanç eğrileri, tüm enerji seviyeleri için ortak bir transfer olasılığı kullanılarak fit edilmiştir.

Şekil 3'te siyah noktalar ölçülen kazanç değerlerini; kesikli çizgiler, sadece doğrudan iyonlaşmaların dikkate alındığı Townsend katsayıları ile hesaplanan kazanç eğrilerini temsil etmektedir. Sürekli çizgiler ise deneysel kazanç eğrilerine Penning ve geri-besleme düzeltmeleri kullanılarak yapılan fitleri göstermektedir.



Şekil 3:

Argon-izobütan gaz karışımları için ölçülen ve hesaplanan kazanç eğrileri.

Şekil 3'teki grafiklere yakından bakıldığında, özellikle 1000'den yüksek deneysel kazanç değerleri için geri-besleme etkilerinin ortaya çıkarak, orantısallığı bozduğu görülmektedir. Kazanç fitlerinde, bu etkileri de hesaba katmak için Eşitlik 5 ile verilen geri-besleme ifadesinden yararlanılmıştır. Fitlerden elde edilen Penning enerji transfer olasılıkları (r_{pen}) ve geri-besleme parametreleri (β) Tablo 2'de listelenmiştir.

Tablo 2. Gaz kazancı hesaplamalarında kullanılan fit parametreleri.

Karışımdaki iC_4H_{10} oranı (%)	Transfer olasılığı r_{pen}	Transfer olasılığındaki hata Δr_{pen}	Geri-besleme parametresi β	Geri-besleme parametresindeki hata $\Delta \beta$
3.3	0.2949	0.0046	1.687×10^{-4}	8.788×10^{-6}
5	0.1894	0.0073	1.299×10^{-4}	1.104×10^{-5}
10	0.2577	0.0041	4.201×10^{-5}	2.529×10^{-6}
20	0.1879	0.0059	1.049×10^{-5}	2.553×10^{-6}
30	0.1465	0.0088	—	—

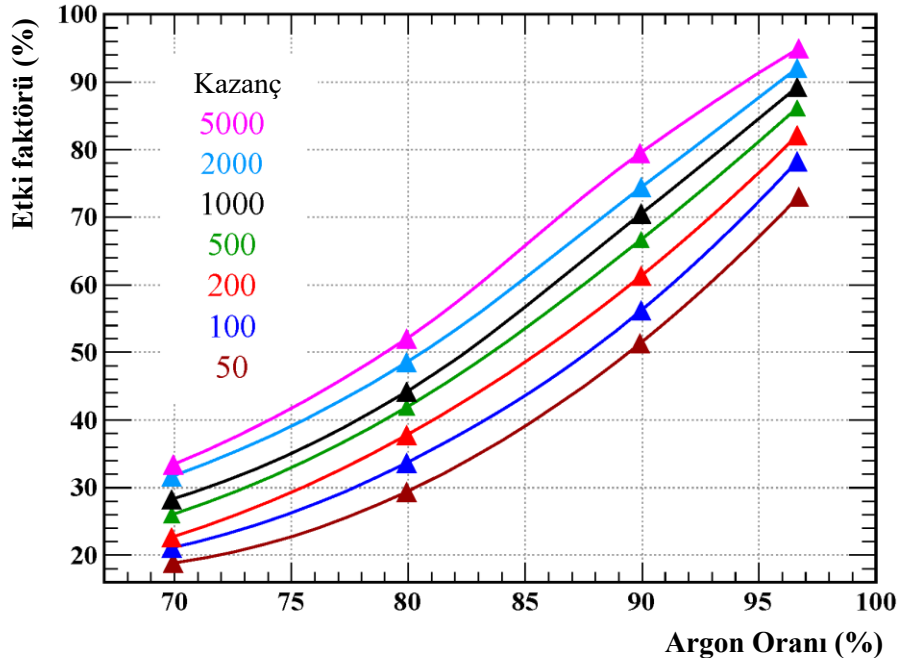
Karışımındaki izobütan oranı arttıkça, uyarılan argon atomlarının enerji aktarabileceği izobütan moleküllerinin sayısı da artar. Doğal olarak Penning enerji transfer olasılığının (r_{pen}), izobütan oranı ile artması beklenir. Ancak, Tablo 2’den görüldüğü gibi transfer olasılığı ilginç bir şekilde azalma eğilimindedir. Beklenenin tersi bir eğilimle karşılaşılması, argonun uyarılan seviyelerinde depolanan enerjinin, izobütan moleküllerine Penning dışındaki süreçlerle de aktarabileceğini işaret etmektedir. Örneğin uyarılma enerjisi, izobütanın moleküler bağlarının kırılmasında da kullanılabilir. Yeni iyonlaşmalarla sonuçlanmayan böyle bir sürecin, izobütan oranının nispeten yüksek olduğu karışımlarda belirgin hale gelmesi en olası durumdur.

Uyarılan argondan atomlarından salınan fotonlar, izobütana ait çok sayıda uyarılma, titreşimsel ve dönmesel enerji seviyelerinde soğurulabilirler. İzobütan oranı arttıkça fotonların ortalama serbest yolları azalır; fotonların katoda ulaşarak, foto-elektron üretme ihtimalleri düşer. Böylece foto-elektronların, anotta ikincil çığları oluşturup, kazançtaki orantısallığı bozmalarının önüne geçilir. Bu açıklamalarla Tablo 2’de listelenen geri-besleme parametreleri (β) uyumludur. Parametreler, % 3.3’ten % 20 izobütan oranına doğru gidildikçe sistematik olarak azalmaktadır. Ayrıca, ölçümlerdeki en yüksek izobütan oranlı karışım için (%70 Ar-% 30 iC_4H_{10}) verilen deneysel kazanç değerlerinde üstel artıştan sapmaya rastlanmadığından, bu eğri fit edilirken geri-besleme parametresine de ihtiyaç duyulmamıştır (Tablo 2).

Şekil 3’te kesikli ve sürekli çizgilerle verilen hesaplamalardan yararlanılarak, Penning ve geri-besleme süreçlerinin verilen bir kazanç değeri için yüzde etki faktörü (EF) aşağıdaki gibi tanımlanabilir:

$$EF := \frac{G_f - G_i}{G_f} \times 100 \quad (6)$$

Burada, sadece doğrudan iyonlaşmalarla hesaplanan kazançlar G_i ; r_{pen} ve β terimleri ile fit edilerek hesaplanan kazançlar ise G_f ile temsil edilmektedir. Etki faktörlerinin 50–5000 aralığındaki bazı kazanç değerleri için karışımdaki argon oranına göre değişimi Şekil 4’te verilmiştir. Kazanç değeri ve argon oranı ile etki faktörleri artış eğilimindedir.



Şekil 4: Çeşitli kazanç değerleri için etki faktörleri. Çizgiler, eğilimleri göstermektedir.

Özellikle 1000'den daha düşük kazanç değerleri için Eşitlik 5'teki βG terimi küçüktür. Bu nedenle, etki faktöründe baskın olan sürecin Penning transferi olacağı söylenebilir. Benzer bir durum % 70 Argon - % 30 iC_4H_{10} gaz karışımındaki kazanç hesaplamaları için de geçerlidir; çünkü fitler, geri-besleme parametresine (β) ihtiyaç duyulmadan yapılmıştır. İncelenen kazanç değerine göre, bu karışım için etki faktörleri % 19 ile % 33 aralığında yer almaktadır (Şekil 4). % 96.7 Argon – % 3.3 iC_4H_{10} karışımına ait sonuçlara bakıldığında ise %73'ten % 95'e uzanan daha geniş bir aralıkta değişen etki faktörleriyle karşılaşılr. Bu genişlemenin en temel nedeni, düşük izobütan oranlarında geri-besleme süreçlerinin de gaz kazancında önemli bir rol oynamasıdır.

4. SONUÇLAR

Argon-izobütan gaz karışımları için tek telli silindirik bir detektör ile ölçülen kazanç eğrileri, Magboltz benzetişim programı yardımıyla fit edilerek, uyarılan argon atomlarının doğrudan iyonlaşmalara katkısı incelendi. Yapılan hesaplamalar, Penning ve geri-besleme süreçleriyle ortaya çıkan bu yeni iyonlaşmaların, gaz kazancında çok büyük artışlara yol açabileceğini gösterdi.

Fit sonuçları, geri-besleme süreçlerinin detektörün çalışma aralığını sınırlaması gibi olumsuz etkilerinden kurtulmak için karışımındaki izobütan oranının artırılması gerektiğini ortaya koydu. Örneğin, bu çalışmadaki en yüksek izobütan oranını içeren karışım için (% 30 iC_4H_{10}) ölçülen kazanç eğrisi fit edilirken geri-besleme parametresine ihtiyaç duyulmamıştır.

İncelenen argon-izobütan gaz karışımları için enerji transfer olasılıkları % 15–% 30 aralığında yer almaktadır. Ancak transferlerin gaz kazancındaki etki faktörü, özellikle yüksek kazanç değerlerinde, % 100'lere ulaşmaktadır. Bu nedenle Penning etkisinin çok güçlü olarak gözlemlendiği argon-izobütan karışımları ile doldurulan parçacık detektörlerindeki çalışma verimi, kararlılık ve sinyal kalitesinin yüksek olması beklenir.

Argon-izobütan karışımları için incelenen süreçler, detektörün geometrik yapısından bağımsız gelişir ve sadece kullanılan sayıcı gazın özellikleriyle ilgilidirler. Dolayısıyla bu karışımlar için uygulanan analiz yöntemlerini ve elde edilen sonuçları, çok daha karmaşık yapıları MICROMEGAS ve GEM gibi mikro desenli yeni nesil detektörlerin benzetişimde de kullanmak mümkündür.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmadaki analizlerde, fikirleri ve tecrübesiyle beni yönlendiren Dr. Rob Veenhof'a teşekkür ederim. Deneysel verileri paylaşarak, daha güvenilir sonuçlara ulaşmamda yardımcı olan Dr. Ines Krajcar Bronić'e teşekkür ederim. Ayrıca, yurt dışı bilimsel ziyaretlerim için finansal destek sağlayan Türkiye Atom Enerjisi Kurumu'na teşekkür ederim.

KAYNAKLAR

1. Biagi, S. F. (1999), Monte Carlo simulation of electron drift and diffusion in counting gases under the influence of electric and magnetic fields, *Nucl. Instrum. Meth. A* 421(1–2), 234–240. doi: 10.1016/S0168-9002(98)01233-9
2. Bidault, J. -M. ve diğ. (2007), The first applications of newly developed gaseous detectors with resistive electrodes for UV imaging in daylight conditions, *Nucl. Instrum. Meth. A* 580(2–3), 1036–1041. doi: 10.1016/j.nima.2007.06.061
3. Bronić, I. J. ve Grosswendt, B. (1996), Ionization yield formation in argon-isobutane mixtures as measured by a proportional-counter method, *Nucl. Instrum. Meth. B* 117(1–2) 5–17. doi: 10.1016/0168-583X(96)00222-4

4. Bronić, I. J. ve Grosswendt, B. (1998), Gas amplification and ionization coefficients in isobutane and argon–isobutane mixtures at low gas pressures, *Nucl. Instrum. Meth. B* 142(3) 219–244. doi: 10.1016/S0168-583X(98)00286-9
5. Charpak, G. ve diğ. (2007), Development of new hole-type avalanche detectors and the first results of their applications, *IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record* MP4(6), 4649–4657. doi: 10.1109/NSSMIC.2007.4437145
6. Charpak, G. ve diğ. (2010), Performance of wire-type Rn detectors operated with gas gain in ambient air in view of its possible application to early earthquake predictions, arXiv:1002.4732, 1–25.
7. Charpak, G. ve Sauli, F. (1978), The multistep avalanche chamber: A new high-rate, high-accuracy gaseous detector, *Phys. Lett. B* 78(4), 523–528. doi: 10.1016/0370-2693(78)90502-6
8. Charpak, G., Benaben, P., Breuil, P., Peskov, V. (2008), Detectors for alpha particles and X-rays operating in ambient air in pulse counting mode or/and with gas amplification, *J. Instrum.* 3(P02006), 1–18. doi: 10.1088/1748-0221/3/02/P02006
9. Charpak, G., G., Bouclier, R., Bressani, T., Favier, J. ve Zupančič, Č. (1968) The use of multiwire proportional counters to select and localize charged particles, *Nucl. Instr. and Meth.* 62(3), 262–268. doi: 10.1016/0029-554X(68)90371-6
10. Danielsson, M. ve diğ. (2004), Novel gaseous detectors for medical imaging, *Nucl. Instrum. Meth. A* 383(1–2), 406–410. doi: 10.1016/j.nima.2003.11.038
11. Druyvesteyn, M. J. ve Penning, F. M. (1940), The Mechanism of Electrical Discharges in Gases of Low Pressure, *Rev. Mod. Phys.* 12(2) 87–124. doi: 10.1103/RevModPhys.12.87; Erratum (1941) *Rev. Mod. Phys.* 13(72). doi: 10.1103/RevModPhys.13.72
12. Emelyanov, A. N., Aleksandrovich, N. L., Sunyaev, R. A. (2000), A catalog of X-ray sources as observed by the TTM/COMIS telescope onboard the Mir-Kvant observatory in 1988–1998, *Astronomy Letters* 26(5), 297–308. doi: 10.1134/1.20394
13. Fetal, S. ve diğ. (2003), Dose imaging in radiotherapy with an Ar–CF₄ filled scintillating GEM, *Nucl. Instrum. Meth. A* 513(1–2), 42–46. doi: 10.1016/S0168-9002(03)02133-8
14. Fonte, P. ve diğ. (2005), Novel single photon detectors for UV imaging, *Nucl. Instrum. Meth. A* 553(1–2), 30–34. doi: 10.1016/j.nima.2005.08.002
15. Francke, T. ve diğ. (2001), Dose reduction in medical X-ray imaging using noise free photon counting, *Nucl. Instrum. Meth. A* 471(1–2), 85–87. doi: 10.1016/S0168-9002(01)00920-2
16. Geiger, H. ve Müller W. (1928) Das Elektronenzählrohr, *Phys. Zeits.* 29, 839–841.
17. Geiger, H. ve Rutherford, E. (1908) An electrical method of counting the number of α -particles from radio-active substances, *Proc. Royal Soc. A* 81(546), 141–161. doi: 10.1098/rspa.1908.0065
18. Giacconi, R. (2003), Nobel Lecture: The dawn of x-ray astronomy, *Rev. Mod. Phys.* 75(3), 995–1010. doi: 10.1103/RevModPhys.75.995
19. Giomataris, Y., Rebourgeard, Ph., Robert, J.P., Charpak, G. (1996), MICROMEGAS: a high-granularity position-sensitive gaseous detector for high particle-flux environments, *Nucl. Instrum. Meth. A* 376(1), 29–35. doi: 10.1016/0168-9002(96)00175-1
20. Grupen, C. (2008), *Particle Detectors*, Cambridge University Press.

21. Hagmann, C., Bernstein, A. (2004), Two-phase emission detector for measuring coherent neutrino-nucleus scattering, *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 51(5), 2151–2154. doi: 10.1109/TNS.2004.836061
22. Houry, M. ve diğ. (2006), DEMIN: A neutron spectrometer, Micromegas-type, for inertial confinement fusion experiments, *Nucl. Instrum. Meth. A* 557(2), 648–656. doi: 10.1016/j.nima.2005.11.184
23. http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1992/, erişim tarihi 26.04.2018, konu 1992 Nobel Fizik Ödülü.
24. Iacobaeus, C. ve diğ. (2001), A novel portal imaging device for advanced radiation therapy, *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 48(4), 1496–1502. doi: 10.1109/23.958386
25. Iacobaeus, C. ve diğ. (2006), A high position resolution X-ray detector: an "Edge on" illuminated capillary plate combined with a gas amplification structure, *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 53(2), 554–561. doi: 10.1109/TNS.2006.872635
26. Knoll, G. F. (2000), *Radiation detection and measurements*, John Willey and Sons, Inc., New York.
27. Mermigka, K. (2008), Simulation studies at the MICROMEAS detector and MICROPATTERN applications in medicine, Collaboration with CERN, Demokritos and N.T.U.A, Master Thesis (I.D. 1289), 256 sayfa.
28. Ostling, J. ve diğ. (2003), Study of hole-type gas multiplication structures for portal imaging and other high count rate applications, *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 50(4), 809–819. doi: 10.1109/TNS.2003.814562
29. Pacella, D., Bellazzini, R., Brez, A., Finkenthal, M. (2006), Soft X-ray 2-D imaging with time resolution of microseconds and continuous frame rate, *J. Instrum.* 1(P09001), 1–12. doi: 10.1088/1748-0221/1/09/P09001
30. Pancin, J., ve diğ. (2004), Measurement of the n_TOF beam profile with a micromegas detector, *Nucl. Instrum. Meth. A* 524(1–3), 102–114. doi: 10.1016/j.nima.2004.01.055
31. Penning, F. M. (1928), Über den Einfluß sehr geringer Beimischungen auf die Zündspannung der Edelgase, *Zeitschrift für Physik* 46(5–6), 335–348. doi: 10.1007/BF01390558
32. Penning, F. M. (1934), The starting potential of the glow discharge in neon argon mixtures between large parallel plates: II. Discussion of the ionisation and excitation by electrons and metastable atoms, *Physica* 1(7–12), 1028–1044. doi: 10.1016/S0031-8914(34)80298-4
33. Ramsey, B. D. ve diğ. (1996), A large-area microstrip-gas-counter for X-ray astronomy, *Nucl. Instrum. Meth. A* 383(2–3), 424–430. doi: 10.1016/S0168-9002(96)00853-4
34. Rodionov, I. ve diğ. (2005), Advanced gaseous photodetectors for hyperspectroscopy and other applications, *IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record J04(2)*, 3045–3049. doi: 10.1109/NSSMIC.2005.1596972
35. Rubbia, A. (2004), Experiments For CP-Violation: A Giant Liquid Argon Scintillation, Cerenkov And Charge Imaging Experiment ?, arXiv: hep-ph/0402110, 1–31.
36. Rubbia, A. (2006), ArDM: a ton-scale liquid Argon experiment for direct detection of Dark Matter in the Universe, *J. Phys. Conf. Ser.* 39, 129–132. doi: 10.1088/1742-6596/39/1/028
37. Sauli, F. (1997), GEM: A new concept for electron amplification in gas detectors, *Nucl. Instrum. Meth. A* 386(2–3), 531–534. doi: 10.1016/S0168-9002(96)01172-2

38. Sauli, F. (2014), *Gaseous Radiation Detectors: Fundamentals and Applications*, Cambridge University Press
39. Spindt, C. A., Brodie, I., Humphrey, L., Westerberg, E. R. (1976), Physical properties of thin-film field emission cathodes with molybdenum cones, *J. Appl. Phys.* 47, 5248–5263. doi: 10.1063/1.322600
40. Veenhof, R. (1998), Garfield, recent developments, *Nucl. Instrum. Meth. A* 419(2–3), 726–730. doi: 10.1016/S0168-9002(98)00851-1
41. Walenta, A. H. (1979), The Time Expansion Chamber and Single Ionization Cluster Measurement, *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 26(1), 73–80. doi: 10.1109/TNS.1979.4329616