



T.C.  
İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



**DOKTORA TEZİ**

**HİDROJEN BENZERİ  $^{142}\text{Pm}^{60+}$  İYONLARININ DENEYSEL  
DEPOLAMA HALKASI'NDAKİ (DDH) YÖRÜNGESEL  
ELEKTRON YAKALAMA BOZUNUMUNUN İNCELENMESİ**

**Fatma Çağla ÖZTÜRK**

**Fizik Anabilim Dalı**

**Nükleer Fizik Programı**

**DANIŞMAN**

**Doç. Dr. Rabia Burcu ÇAKIRLI MUTLU**

**II. DANIŞMAN**

**Prof. Dr. Yuri A. LITVINOV**

**Aralık, 2017**

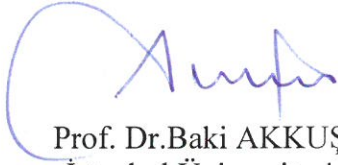
**İSTANBUL**

Bu çalışma,25.12.2017 tarihinde aşağıdaki jüri tarafındanFizik Anabilim Dalı,Nükleer Fizik Programında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

**Tez Jürisi**



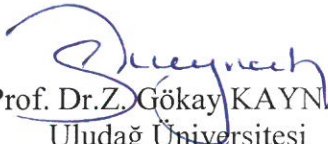
Doç. Dr.Rabia Burcu ÇAKIRLI MUTLU(Danışman)  
İstanbul Üniversitesi  
Fen Fakültesi



Prof. Dr.Baki AKKUŞ  
İstanbul Üniversitesi  
Fen Fakültesi



Prof. Dr. Yeşim ÖKTEM  
İstanbul Üniversitesi  
Fen Fakültesi



Prof. Dr.Z. Gökay KAYNAK  
Uludağ Üniversitesi  
Fen-Edebiyat Fakültesi



Doç. Dr.Kutsal BOZKURT  
Yıldız Teknik Üniversitesi  
Fen-Edebiyat Fakültesi



20.04.2016 tarihli resmi gazetede yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince; Bu Lisansüstü teze, İstanbul Üniversitesi'nin aboneli olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Fen Bilimleri Enstitüsü'nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun rapor alınmıştır.

Bu tez, İstanbul Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Yürütücü Sekreterliğinin 48110, 54135 ve 53864 numaralı projesi ile desteklenmiştir.

## ÖNSÖZ

Herşeyden önce, tez çalışmam boyunca beni bir an olsun yalnız bırakmayan, desteklerine mesafelerin dahi engel olamadığı geniş ailemin tüm bireyelerine minnettar olduğumu belirtmek isterim.

Hayatın her rengini öğrencileriyle paylaşan, yeri geldiğinde öğreten, yeri geldiğinde sahiplenen, desteğini hiçbir zaman esirgemeyen, kişinin hem işinde hem de sosyal hayatında her yönden gelişmesine katkı sağlamak için pozitif öğütler veren ve yaparım dediğini yaptığımı defalarca şahit olduğum; sözünün eri, güzel insan Prof. Dr. Baki AKKUŞ'a lisans eğitimimin ilk anından itibaren yanımda olduğu için teşekkür ederim.

Desteği ve varlığı ile geçmişte hayal edemediğim ancak bugün elde ettiğim tüm başarılarımın mimarı maddi ve manevi yoldaşım ve ailem olduğunu her an hissettiğim, en güzel, mutlu ve huzurlu anılarımın içinde hep varolan akıl hocam, çok sevdiğim Prof. Dr. Yeşim ÖKTEM'e hep yanımda olması dileklerle teşekkürü bir borç bilirim.

İnsanîyetleri, iyilikleri ve hoşgörülerini ile ne zaman istesem yardıma hazır olan, birer abla gibi gördüğüm ve birbirlerinden ayrı düşünemediğim, bilimsel anlamda bana güç veren ve desteklerini esirgemeyen, tecrübelerini benimle paylaşarak yol gösteren değerli danışman hocam Doç. Dr. R. Burcu ÇAKIRLI MUTLU'ya ve Doç. Dr. Lidya SUSAM'a üzerimdeki emeklerinden ötürü çok teşekkür ederim.

Ekim 2014 yılından beri tanıdığım, bilimsel anlamda sırtımın yere gelmemesini sağlayan, doktora tezimin Almanya'da geçen tüm aşamalarıyla birebir ilgilenen ve bilgi birikimimi güçlendiren, yabancı bir ülkede yabancı kimlikli olmaktan ötürü yaşanan tüm sıkıntıları bilen ve karşılaştığım her türlü problemimin üstesinden gelmeme maddi ve manevi yardımcı olan Prof. Dr. Yuri A. LITVINOV ve eşi Dr. Tatiana LITVINOVA'ya, çoğu bilgiyi bana usanmadan anlatan 17 Aralık 2016'da kaybettiğimiz Prof. Dr. Fritz BOSCH'a çok teşekkür ederim.

Her birinin hem yüksek lisans hem doktora tez çalışmalarım boyunca hayatımda varlığı ve yardımlarıyla yanımda olduğundan emin olduğum, varlıklarından güç aldığım, doktora tezimin tamamlanmasına kadar geçen süre zarfında her türlü yardımlarıyla yanımda olan dostlarım M. Gökçe ERDOĞAN SÜTLAŞ'a, Seda BOZKURT'a ve Doktora Öğrencisi Nurgül HAFIZOĞLU'na ayrıca; varlıklarıyla hayatıma anlam katan ofis arkadaşım Yrd. Doç. Dr. Gülfem SÜSOY DOĞAN'a, Yüksek Lisans Öğrencileri Pınar İSEL, Berna GÜNDOĞDU ve Güler AĞGEZ'e, Nükleer Fizik ve Matematiksel Fizik Anabilim Dalları'ndaki tüm hoca ve arkadaşlarıma herşey için minnettar olduğumu belirtmek isterim.

Son olarak, 2012 Aralık ayının 30. gününde acı kaybıyla yüreğimi dağlayan, 2013 yılının 1 Ocak gününde toprağa verirken yıkıldığım ama sözleriyle, eylemleriyle ve hatıralarıyla bugün hala ayakta durabildiğim, dayanma gücüm, sol yanım, arkadaşım kısacası babam, merhum Kenan ÖZTÜRK'e huylarını bana devrettiği ve bıraktığı en değerli mirası olan tertemiz hayat için binlerce kez "iyi ki!" diyor ve doktora tezimi kendisine ithaf ediyorum.

Aralık 2017

Fatma Çağla ÖZTÜRK

# İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ .....	iv
İÇİNDEKİLER.....	v
ŞEKİL LİSTESİ .....	vii
TABLO LİSTESİ.....	x
SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ .....	xi
ÖZET .....	xvi
SUMMARY .....	xvii
<b>1. GİRİŞ .....</b>	<b>1</b>
1.1. YÜKÇE ZENGİN İYONLARIN BETA BOZUNUMU .....	3
<b>2. GENEL KISIMLAR.....</b>	<b>11</b>
2.1. YÜKÇE ZENGİN RADYOAKTİF İYONLARIN ÜRETİMİ, AYRIŞTIRILMASI VE DEPOLANMASI.....	11
2.1.1. Yükçe Zengin İyonların Üretilmesinde Kullanılan Temel Reaksiyonlar.....	11
2.1.1.1. Füzyon Buharlaştırma Reaksiyonları.....	11
2.1.1.2. Fragmentasyon Reaksiyonları .....	12
2.1.1.3. Fisyon .....	13
2.1.2. Yükçe Zengin İyonların Üretilmesi, Ayırıştırılması ve Depolanması.....	14
2.1.3. Egzotik Çekirdeklerin GSI Fragment Ayırıcı ve Depolama Halkası ile Soğutulması (Yavaşlatılması).....	21
2.1.3.1. Lazer Soğutma Yöntemi .....	22
2.1.3.2. Stokastik Soğutma .....	22
2.1.3.3. Elektron Soğutma.....	23
<b>3. MALZEME VE YÖNTEM.....</b>	<b>25</b>
3.1. EGZOTİK ÇEKİRDEKLERİN GSI FRAGMENT AYIRICI VE DEPOLAMA HALKASI İLE ÜRETİLMESİ VE DEPOLANMASI .....	25
3.1.1. Egzotik Çekirdeklerin GSI Fragment Ayırıcı ve Depolama Halkası ile Üretilmesi .....	25
3.1.2. Egzotik Çekirdeklerin GSI Fragment Ayırıcı ve Depolama Halkası ile Depolanması .....	26
3.1.2.1. Isochronous Kütle Spektroskopisi (IMS) .....	30
3.1.2.2. Schottky Kütle Spektroskopisi (SMS).....	32

3.2. TEK VE İKİ ELEKTRONLU İYONLARIN YÖRÜNGESEL ELEKTRON YAKALAMA BOZUNUMLARI .....	37
<b>4. BULGULAR.....</b>	<b>42</b>
4.1. $^{142}\text{Pm}^{60+}$ İYONUNUN TEK İYON BOZUNUM SPEKTROSKOPİSİ.....	42
<b>5. TARTIŞMA VE SONUÇ .....</b>	<b>50</b>
<b>KAYNAKLAR.....</b>	<b>53</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>	<b>57</b>



## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa No

- Şekil 1.1:** Nükleer çekirdek tablosu [1].....2
- Şekil 1.2:** İki cisimli beta bozunumu. (a) Serbest elektron yakalama bozunumunu, (b) Bağlı durum beta bozunumu [1].....5
- Şekil 1.3:** GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung GmbH nükleer araştırmalar merkezinin hızlandırıcı tesisinin üç ana elemanı (SIS, FRS, ESR) ile şematik gösterimi [1].....8
- Şekil 1.4:** FAIR (Facility for Antiproton and Ion Research) antiproton ve iyon araştırmaları merkezi bünyesinde inşa edilmekte olan bilimsel araştırma laboratuvar ve hızlandırıcılarının şematik görünümü.....8
- Şekil 1.5:** Çin’de bulunan modern fizik enstitüsü bünyesinde kurulacak HIAF hızlandırıcı merkezinin şematik görünümü [5]. .....10
- Şekil 2.1:** Radyoaktif demet merkezlerinde genellikle uygulanan nükleer reaksiyon tiplerinin üç örneği. (a) füzyon buharlaşma, (b) mermi fragmentasyon ve (c) indüklenmiş fisyon reaksiyonu.....12
- Şekil 2.2:** Deneysel (semboller) ve hesaplanmış (çizgiler) üretim tesir kesitlerini gösteren grafik. Nötronca zengin izotoplar üreten  $^{238}\text{U}$  çekirdeğinin fisyonu ( $\odot$ ) ve nötron sayısı düşük çekirdekler üreten  $^{124}\text{Xe}$  ( $\Delta$ ) ve  $^{129}\text{Xe}$  ( $\nabla$ ) mermi çekirdeklerinin fragmentasyonu verilmektedir. ABRABLA [21] and EPAX [22] kodları ile hesaplanan üretim tesir kesiti değerleri ise kesikli ve düz çizgilerle gösterilmiştir. Füzyon reaksiyonu için teorik ve deneysel verilerle hesaplanan tesir kesitleri ise ( $\diamond$ ) ile gösterilmektedir.....13
- Şekil 2.3:**  $^9\text{Be}$  soyucu folyodan 400 MeV/u enerjide oluşan farklı mermi çekirdeklerin GLOBAL yazılımı ile hesaplanan denge yük durum dağılımlarını gösteren grafik [32]. .....15
- Şekil 2.4:** Uranyum iyonları için yük durum dağılımlarının Livermore Super-EBIT sistemi ile  $E_e = 198$  keV enerji,  $I_e = 200$  mA akımında (a), 360 MeV/u’luk enerjiye sahip bakır levhadan üretilerek (b) ölçülen kazanç değerlerini gösteren grafikler. En olası yük durumu kırmızı ile belirtilmiştir [29].....16
- Şekil 2.5:** Yükçe zengin egzotik iyonların üretimi, ayrıştırılması ve depolanma yöntemlerini farklı enerjiler için gösteren şemadır [5].....19
- Şekil 2.6:** Tamamen iyonize  $^{140}\text{Pr}^{59+}$  iyonları için uygulanan stokastik ve elektron soğutma işleminin Schottky gürültü spektrumu [1]. .....23

<b>Şekil 2.7:</b> ESR deneysel depolama halkasının lineer kısımlarından birine yerleştirilmiş olan elektron soğutucu sistemin görüntüsü [49].....	24
<b>Şekil 3.1:</b> GSI Nükleer Araştırmalar Merkezi bünyesinde bulunan hızlandırıcıların şematik gösterimi [47].....	25
<b>Şekil 3.2:</b> Fragment Ayırıcı (FRS) demet hattını oluşturan odaklayıcı sistemlerin şematik görünümü [50]. Mavi ile gösterilen dipol mıknatıslar ve sarı ile gösterilen kuadropol mıknatıslar iyonları saptırır ve odaklarken, fragmentlerin nükleer yüklerinin karesiyle orantılı olarak yavaşlamasına sebep olan alüminyum takoz şeklindeki ayırıcı hattın ortasında yer almaktadır. ....	26
<b>Şekil 3.3:</b> İyon-Soğutma Depolama Halkası ESR'nin genel görünümü. ....	27
<b>Şekil 3.4:</b> Nikel mermi çekirdeğinden oluşan fragmentlerin ESR deneysel depolama halkasında depolama ve soğutulması sonrası elde edilen spektrum [1]. ....	28
<b>Şekil 3.5:</b> ESR deneysel depolama halkasında depolanan iyonlara uygulanan iki farklı yöntem olan SMS (Sol kısım) ve IMS (sağ kısım)'nin temsili şeklidir [48]. ....	30
<b>Şekil 3.6:</b> Geçiş enerjisi $\gamma$ t değerinde depolanan birkaç iyonun TOF detektöründeki periyodik parmak izini gösteren grafik. Bir iyonun maksimum dönme sayısı 1560 olarak elde edilmiştir [48]. ....	31
<b>Şekil 3.7:</b> $^{52}\text{Cr}$ demetinin fragmentleri için TOF detektöründen alınan dönme frekansı spektrumu [48].....	31
<b>Şekil 3.8:</b> ESR depolama halkası içerisine yerleştirilmiş Schottky pick-up plakaları. ....	33
<b>Şekil 3.9:</b> ESR depolama halkasındaki Schottky veri toplama sisteminin şematik gösterimi [50]. ....	33
<b>Şekil 3.10:</b> $^{209}\text{Bi}$ mermi iyonlarından 30 sn'lik sürede üretilen fragmentlerin ESR depolama halkasındaki pick-up plakalar ile ölçülen Schottky frekans spektrumunun bir kısmını gösteren grafik [5].....	34
<b>Şekil 3.11:</b> Depolanmış $^{175}\text{Re}^{74+}$ iyonlarının zaman çözünürlüklü Schottky spektrometresini gösteren grafik [5].....	35
<b>Şekil 3.12:</b> Sol resim Rezonans Schottky dedektörünün şematik gösterimidir. Sağ resim ise Rezonans Schottky dedektörünün fotoğrafıdır [49].....	36
<b>Şekil 3.13:</b> $^{140}\text{Pr}$ (a) ve $^{142}\text{Pm}$ (b) iyonlarının bozunum şeması [1].....	38
<b>Şekil 3.14:</b> ESR deneysel depolama halkasında depolanan ve soğutulan $^{140}\text{Pr}^{58+}$ iyonlarının Schottky frekans spektrumu (a). (b), (c) ve (d) grafikleri logaritmik olarak sol tarafta görülen bozunumun başlangıç, orta ve son aşamalarını temsil etmektedir. (a) spektrumunun yoğunluk değişiminden $^{140}\text{Pr}^{58+}$ anne çekirdeğinin bozunarak $^{140}\text{Ce}^{58+}$ kız çekirdeğine dönüştüğü açıkça görülmektedir [1]. ....	39



<b>Şekil 3.15:</b> $^{142}\text{Pm}^{60+}$ iyonlarının ESR depolama halkasındaki elektron yakalama bozunumları sonucu $^{142}\text{Nd}^{60+}$ iyonlarına dönüşümünü gösteren grafikler [1].	40
<b>Şekil 3.16:</b> Hidrojen benzeri $^{142}\text{Pm}^{60+}$ iyonlarının elektron yakalama bozunumu ile $^{142}\text{Nd}^{60+}$ kız çekirdeğine bozunumu görülmektedir.	41
<b>Şekil 4.1:</b> $^{142}\text{Pm}^{60+}$ iyonunun izinli Gamow-Teller geçişi ile $^{142}\text{Nd}^{60+}$ kız çekirdeğinin temel seviyesine bozunumunu gösteren temsili şekil.	43
<b>Şekil 4.2:</b> Hidrojen benzeri $^{142}\text{Pm}^{60+}$ iyonlarının örnek bir Schottky frekans spektrumu. Spektrum yeni rezonatör detektörün dönme frekansının 124. harmoniğinde kaydedilen elektron yakalama spektrumudur. Spektrumda zaman ve frekans dönüşümü sırasıyla 32 ms ve 31.25 Hz olarak ifade edilmektedir [5].	43
<b>Şekil 4.3:</b> 2008 yılında ESR depolama halkasında $^{142}\text{Pm}^{60+}$ iyonları ile yapılan deneysel çalışma sonucu elde edilen verilerin analizini gösteren grafik [1].	44
<b>Şekil 4.4:</b> 2010 yılında yapılan deneysel çalışmadan elde edilen verilerin analizini gösteren grafik. ESR depolama halkasında gerçekleşen elektron yakalama bozunumlarının sayısının, iyonların enjeksiyon zamanına göre ve Ki kare (Chi square) analizi görülmektedir [1].	45
<b>Şekil 4.5:</b> $^{142}\text{Pm}^{60+}$ iyonlarının $^{142}\text{Nd}^{60+}$ iyonlarına bozunumunu gösteren ve Rezonans Schottky dedektörü ile 64 sn'lik süre sonunda elde edilen elektron yakalama bozunumu izleri.	46
<b>Şekil 4.6:</b> 2014 yılında GSI bünyesindeki ESR depolama halkasında gerçekleştirilen $^{142}\text{Pm}^{60+}$ iyonlarının elektron yakalama bozunumu sonucu elde edilen verilerin analizini gösteren grafik.	47
<b>Şekil 4.7:</b> 2014 yılında yapılan deneysel çalışmadan TIBS görsel analiz programı ile elde edilen sonuçları gösteren grafik.	48

## TABLO LİSTESİ

Sayfa No

<b>Tablo 1:</b> $^{142}\text{Pm}^{60+}$ iyonlarının elektron yakalama bozunumu sonucu elde edilen verilerin kıyaslanmasını içeren tablo. ....	49
---	----



## SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ

Simgeler	Açıklama
$A \cdot \text{cm}^{-2}$	: $\text{cm}^2$ alan başına akım
$\alpha$	: düzgün yapı sabiti $\alpha = 1/137$
$\alpha_P$	: Momentum toplama faktörü
$A$	: Atom sayısı
$B$	: Manyetik alan
$\beta$	: Rölativistik hız
$\beta_c^-$	: Sürekli beta bozunumu
$\beta_c^+$	: Sürekli beta artı bozunumu
$\beta_b$	: Bağlı durum beta bozunumu
$B_\rho - \Delta E - B_\rho$	: Elektromanyetik ayırma sistemi
$^{209}\text{Bi}$	: Bizmut elementi
$^9\text{Be}$	: Berilyum elementi
$c$	: Işık hızı
$C$	: $v$ ortalama hızına sahip parçacığın yörünge uzunluğu
$\text{cm}$	: $10^{-2}$ mertebesinde uzunluk birimi
$\text{dk}$	: Dakika cinsinden süre birimi
$\Delta(m/q)/(m/q)$	: Kütle-yük oranı
$\Delta f/f$	: Frekans oranı
$\Delta v/v$	: Hız oranı
$\Delta p$	: Momentum farkı
$e^-$	: Elektron
$e^+$	: Pozitron
$e_b^-$	: Bağlı elektron
$E_e$	: Elektron enerjisi
$E_\gamma$	: Lazer fotonun enerjisi
$f$	: Dönme frekansı
$\gamma$	: Rölativistik Lorentz faktörü
$\text{Hz}$	: Hertz cinsinden frekans birimi
$I_e$	: Elektron akımı
$I_i$	: Başlangıç açısal momentumu
$I_f$	: Son açısal momentum

<b>keV</b>	: Kilo elektron volt cinsinden enerji birimi
<b>kHz</b>	: $10^3$ Hertz frekans birimi
$\lambda$	: Radyoaktif bozunma sabiti
$\lambda_{\text{nükleer}}$	: Nükleer bozunmadan kaynaklı bozunum sabiti
$\lambda_{\text{kayıp}}$	: Artık gaz molekülleri ve soğutucu elektronların meydana getirdiği atomik etkileşmeler sonucu oluşan çarpışmalardan dolayı ortaya çıkan atomik demet kayıplarını temsil eden bozunum sabiti
$\lambda_i$	: i bozunum kanalı için nükleer bozunma sabiti
$\lambda_{\text{EC}}$	: Elektron yakalama bozunum sabiti
$\lambda_{\beta}$	: Beta bozunumu bozunum sabiti
<b>MeV</b>	: Mega elektron volt enerji birimi
<b>MeV/u</b>	: Atomik kütle birimi başına enerji
<b>mA</b>	: Mili amper
$\mu\text{m}$	: $10^{-6}$ mertebesinde uzunluk birimi
<b>MHz</b>	: $10^6$ Hertz
<b>m</b>	: Metre cinsinden uzunluk birimi
<b>MeV/c<sup>2</sup></b>	: $1.782662 \times 10^{-30}$ kg mertebesinde kütle birimi
$^{25}\text{Mn}^{25+}$	: 25 elektronlu (yükü) Mangan elementi
<b>n</b>	: Nötron
<b>n</b>	: Temel kuvantum sayısı
<b>N<sub>P</sub></b>	: Depolama halkasındaki anne iyonların sayısı
<b>N<sub>P</sub>(t<sub>0</sub>)</b>	: t=0 zamanındaki anne iyon sayısı
<b>N<sub>D</sub></b>	: Bozunum kanalına özel olarak belirlenen ve $\lambda_i$ bozunum sabitiyle hesaplanan kız çekirdek sayısı
<b>ns</b>	: nano saniye mertebesinde zaman birimi
$^{142}\text{Nd}^{60+}$	: 60 elektronlu (yükü) Neodimyum elementi
$^{142}\text{Nd}^{59+}$	: 59 elektronlu (yükü) Neodimyum elementi
<b>v<sub>e</sub></b>	: Elektron nötrinusu
$\bar{\nu}_e$	: Elektron antinötrinusu
<b>p</b>	: Proton
<b>p</b>	: Momentum
$^{140}\text{Pr}^{59+}$	: 59 elektronlu (yükü) Praseodim elementi
$^{140}\text{Pr}^{58+}$	: 58 elektronlu (yükü) Praseodim elementi
$^{142}\text{Pm}$	: Prometyum elementi
$^{142}\text{Pm}^{60+}$	: 60 elektronlu (yükü) Prometyum elementi

$^{142}\text{Pm}^{59+}$	: 59 elektronlu (yükü) Prometyum elementi
$\pi_i$	: Başlangıç parite durumu
$\pi_f$	: Son parite durumu
$\rho$	: Yörünge çapı
$^{175}\text{Re}^{73+}$	: 73 elektronlu (yükü) Renyum elementi
$^{175}\text{Re}^{74+}$	: 74 elektronlu (yükü) Renyum elementi
$\text{sn}$	: Saniye cinsinden süre birimi
$^{100}\text{Sn}$	: Kalay elementi
$^{143}\text{Sm}$	: Samaryum elementi
$q$	: Yük
$Q_{EC}$	: Elektron yakalama bozunumu Q değeri
$T_{1/2}$	: Yarı ömür
$t_0$	: Başlangıç zamanı
$T$	: Tesla cinsinden manyetik alan birimi
$u$	: Atomik kütle birimi
$U^{89+}$	: 89 elektronlu (yükü) Uranyum elementi
$V$	: Volt
$v_0$	: Klasik yörüngesel hız
$W^+$	: Zayıf etkileşme ara parçacığı
$W^-$	: Zayıf etkileşme ara parçacığı
$^{175}\text{W}^{73+}$	: 73 elektronlu (yükü) Tungsten elementi
$X_B$	: Betatron dalga boyu
$^{124}\text{Xe}$	: Ksenon elementi
$Z$	: Proton sayısı

<b>Kısaltmalar</b>	<b>Açıklama</b>
<b>BRing</b>	: Booster halkası (Booster ring)
<b>BigRIPS</b>	: Hareket Halinde Ayırma Demet Hattı (In-Flight Beam Seperator)
<b>CERN</b>	: Avrupa Nükleer Araştırmalar Merkezi (the European Organization for Nuclear Research)
<b>CSRe</b>	: Deneysel Soğutucu Depolama Halkası (Experimental Cooling Storage Ring)
<b>CR</b>	: Toplama Halkası (Collector Ring)
<b>CRYING</b>	: GSI Ağır İyon Depolama Halkası (Heavy Ion Storage Ring at GSI)
<b>ESR</b>	: Deneysel Depolama Halkası (Experimental Storage Ring)
<b>EC</b>	: Elektron Yakalama (Elektron Capture)
<b>EBIS</b>	: Electron Beam Ion Source (Elektron Demetli İyon Kaynakları)
<b>EBIT</b>	: Electron Beam Ion Trap (Elektron Demetli İyon Tuzakları)
<b>FAIR</b>	: Antiproton ve İyon Araştırmaları Merkezi (Facility for Antiproton and Ion Research)
<b>FRIB</b>	: Nadir İzotop Demetleri Merkezi, MSU (The Facility for Rare Isotope Beams, MSU)
<b>FRS</b>	: FRagment Ayırıcı (FRagment Seperator)
<b>GANIL</b>	: Grand Accélérateur National d'Ions Lourds
<b>GSI</b>	: Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung GmbH Ağır İyon Araştırmaları Merkezi, Darmstadt, Almanya
<b>HESR</b>	: Yüksek Enerjili Depolama Halkası (High-Energy Storage Ring)
<b>HIAF</b>	: Çin Yük Bakımından Zengin İyon Hızlandırma Merkezi (Highly charged Ion Accelerator Facility at China)
<b>HITRAP</b>	: GSI Yük Bakımından Zengin İyon Tuzağı (Highly charged Ion TRAP at GSI)
<b>HRBIF</b>	: Oak Ridge Ulusal Laboratuvarı Radyoaktif İyon Demeti Merkezi, Amerika (Holifield Radioactive Ion Beam Facility at Oak Ridge National Laboratory)
<b>ILIMA</b>	: İzomerik Demetler, Ömürler ve Kütleler (Isomeric Beams, Lifetimes and MAsses)
<b>iLinac</b>	: Lineer iyon hızlandırıcısı(ion Linac)
<b>IMP</b>	: Çin Bilimler Akademisi Modern Fizik Enstitüsü (Chinese Academy of Sciences Institute of Modern Physics)
<b>IMS</b>	: Eşzamanlı Kütle Spektrometresi (Isochronous Mass Spectrometry)
<b>IN-FLIGHT</b>	: Hareket Halinde Ayırma

<b>ISAC</b>	: Kanada Parçacık, Nükleer ve Hızlandırıcı Tabanlı Araştırmalar Merkezi İzotop Ayırıcı ve Hızlandırıcı Merkezi (Canada's national laboratory for particle and nuclear physics and accelerator-based science Isotope Separator and Accelerator)
<b>ISOL</b>	: Çevrimiçi İzotop Ayırıştırma (Isotope Separation On-line)
<b>ISOLDE</b>	: CERN Çevrimiçi İzotop Ayırıştırma Merkezi (on-line isotope mass separator at CERN)
<b>JINR</b>	: Nükleer Araştırmalar Enstitüsü (Joint Institute for Nuclear Research)
<b>MRing</b>	: Birleştirici halka (Merge Ring)
<b>MSU</b>	: Michigan Eyalet Üniversitesi (Michigan State University)
<b>Rare-RI RING</b>	: Nadir-Radyoaktif İyon Halkası (Rare-Radioactive Ion RING)
<b>REC</b>	: Radyatif Elektron Yakalama (Radiative Electron Capture)
<b>RIBLL2</b>	: Lanzhou Radyoaktif İyon Demet Hattı 2 (Radioactive Ion Beam Line in Lanzhou 2)
<b>RIKEN</b>	: Japonya Fizik ve Kimya Araştırmaları Enstitüsü (Japanese Institute of Physical and Chemical Research)
<b>SECR</b>	: Süperiletken Elektron Rezonans İyon Kaynağı (Super-conducting Elektron Cyclotron Resonance)
<b>SIS</b>	: Ağır İyon Depolama Halkası (Heavy Ion Storage Ring)
<b>SIS-100</b>	: Yüksek Enerjili Ağır İyon Depolama Halkası (High Energy Heavy Ion Storage Ring)
<b>SMS</b>	: Schottky Kütle Spektrometresi (Schottky Mass Spectrometry)
<b>SRing</b>	: Spektrometre Halkası (Spectrometer Ring)
<b>Super-FRS</b>	: Nadir izotop ve antiproton hedeflerinin bulunduğu fragment ayırıcı hat
<b>TIBS</b>	: Tek İyon Bozunum Spektroskopisi
<b>TITAN</b>	: Atom ve Nükleer Bilim için İyon Tuzağı (Ion Trap For Atomic and Nuclear Scinces)
<b>TOF</b>	: Uçuş Zamanı (Time Of Flight)
<b>UNILAC</b>	: Evrensel Doğrusal Hızlandırıcı (UNIversal Linear Accelerator)

## ÖZET

### DOKTORA TEZİ

#### HİDROJEN BENZERİ $^{142}\text{Pm}^{60+}$ İYONLARININ DENEYSEL DEPOLAMA HALKASI'NDAKİ (DDH) YÖRÜNGESEL ELEKTRON YAKALAMA BOZUNUMUNUN İNCELENMESİ

Fatma Çağla ÖZTÜRK

İstanbul Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Fizik Anabilim Dalı

Danışman : Doç. Dr.Rabia Burcu ÇAKIRLI MUTLU

II. Danışman :Prof. Dr.Yuri A. LITVINOV

Bu tez çalışmasında 2014 yılında Almanya'nın Darmstadt kentinde bulunan GSI Ağır İyon Araştırmaları Merkezi'nde Hidrojen-benzeri  $^{142}\text{Pm}^{60+}$  iyonlarına ait iki cisimli yörüngesel elektron yakalama bozunumunu detaylı olarak araştırılmış ve bu deney sonucu elde edilen veriler analiz edilmiştir. Ekspansiyonel bozunum fonksiyonu ile yapılan fit sonucunda bozunum sabiti olan  $\lambda$  değeri elde edilmiş, 2008 ve 2010 yıllarında aynı çekirdek üzerine yapılan çalışmalar sonucunda elde edilen  $\lambda$  değerleri ile kıyaslanmıştır. Ek olarak, modüle edilmiş ekspansiyonel fonksiyon olarak adlandırılan fit fonksiyonuyla da  $^{142}\text{Pm}^{60+}$  iyonlarının elektron yakalama bozunumlarına ait genlik ve frekans değerleri elde edilmiştir. Bu değerler gelecekte  $^{205}\text{Tl}$  atomlarının bağlı durum beta bozunumları üzerine yapılacak deneyin ışık tutmaktadır.  $^{142}\text{Pm}^{60+}$  iyonlarının iki cisimli elektron yakalama bozunumları için kullanılan hızlandırıcı, dedektör ve soğutma sistemleri ve yöntemleri ayrıntılı olarak ayrıntılı olarak tartışılmıştır. Ayrıca, radyoaktif çekirdeklerin hızlı nötron yakalama süreci olan r-süreci vasıtasıyla ağır elementlerin oluşumunun (nükleosentez) detaylı olarak incelenmesi için yapılacak çalışmalara da katkı sağlamaktadır.

Aralık 2017, 76 sayfa.

**Anahtar kelimeler:** Nükleer Fizik, Nükleer Bozunma, Beta Bozunumu, Elektron Yakalama Bozunumu, Yükçe Zengin İyonlar



## SUMMARY

### Ph.D. THESIS

#### INVESTIGATION OF THE ORBITAL ELECTRON-CAPTURE DECAY OF HYDROGEN-LIKE $^{142}\text{Pm}^{60+}$ IONS AT THE EXPERIMENTAL STORAGE RING (ESR)

Fatma Çağla ÖZTÜRK

İstanbul University

Institute of Graduate Studies in Science and Engineering

Department of Physics

Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Rabia Burcu ÇAKIRLI MUTLU

Co-Supervisor : Prof. Dr. Yuri A. LITVINOV

In this thesis, detailed investigation of an experiment performed on two-body electron capture decay of Hydrogen-like  $^{142}\text{Pm}^{60+}$  ions, at GSI heavy ion research center in Germany in 2014 and the results are discussed. The decay constant  $\lambda$  value is obtained from the fit of exponential decay function and compared with the  $\lambda$  values obtained from another 2008 and 2010 electron capture experiments. In addition, amplitude and frequency values of special fit function namely modulated exponential function, are observed for electron capture decay of  $^{142}\text{Pm}^{60+}$  ions. These values will enlighten the pathway for future experiment on the bound state beta decay of  $^{205}\text{Tl}$ . Also accelerator, detector and cooling systems and methods which have been used for the two-body electron capture decay of  $^{142}\text{Pm}^{60+}$  ions, are discussed in details. In addition, results of this thesis contributes to the studies that focused on detailed investigation of formation of heavy elements (nucleosynthesis) with rapid neutron capture process so called r-process.

December 2017, 76 pages.

**Keywords:** Nuclear Physics, Nuclear Decay, Beta Decay, Electron Capture Decay, Highly Charged Ions

## 1. GİRİŞ

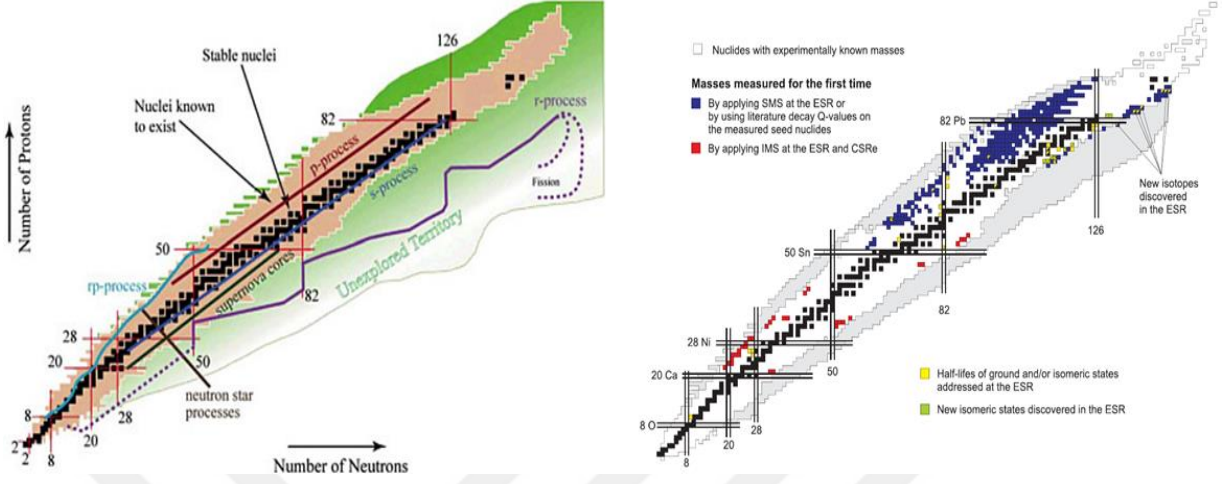
Atomik çekirdekler, proton ve nötron olarak adlandırılan iki çeşit fermiyonun oluşturduğu ve nükleonlar arasında meydana gelen güçlü, zayıf ve elektromanyetik etkileşmelerin gözlemlendiği çok cisimli sistemlerdir. Atomik çekirdeklerin kütle spektrometreleri yardımıyla bozunum mekanizmalarının incelenmesi nükleer yapının anlaşılması ve geliştirilmesini sağlayan bir yöntemdir [1].

Nükleer bozunumların çoğu atom çekirdeğini oluşturan proton ve nötronlar ile atomu çevreleyen bağlı elektronlarda meydana gelen güçlü etkileşme ya da çok zayıf olasılıkta meydana gelen etkileşimler sonucu oluşan elektrozayıf etkileşmeleri içermektedir. Elektrozayıf radyoaktif nükleer bozunum çeşidi olan elektron yakalama ve beta bozunum modları atomdaki bağlı elektronlar ile çekirdek arasındaki zayıf etkileşme sonucu meydana gelmektedir.

Elektrozayıf radyoaktif bozunum çeşitlerinin araştırılması, atomik çekirdek ve bağlı elektronu arasındaki etkileşmeyle mümkün olduğundan, bu bozunumların gerçekleşme olasılığı yalnızca çekirdeğin ilk ve son durumuna bağlı olmayıp ayrıca, atomik yüke de bağlı olabilmektedir. Doğada nadir bulunan bu izotopların kısmen ya da tamamen iyonize olabilmesi ancak sıcak ve yoğun astrofiziksel ortamlarda mümkün olmakla birlikte, belli radyoaktif bozunum modlarından arındırılacak şekilde, yapay olarak laboratuvarlarda da elde edilmektedir. Buradan da anlaşılacağı gibi, bu izotopların laboratuvar ortamında üretilmesi ve depolanması oldukça zor olmakla birlikte günümüzde ancak birkaç merkezde, belirli yöntemlerle yükçe zengin radyoaktif iyonlar uzun süreler boyunca depolanarak bu zayıf bozunum modları araştırılabilmektedir.

Elektronlarından tamamen soyulmuş ya da birkaç elektrona sahip egzotik çekirdeklerin bozunum spektroskopilerinin özellikleri, bu çekirdeklerin ya da iyonların, GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung Ağır İyon Araştırmaları Merkezi bünyesindeki Deneysel Depolama Halkası'nda (ESR) relativistik enerjilerde depolanması ve soğutulması yöntemiyle ölçülebilmektedir. Araştırılacak çekirdekler ya da iyonlar için, gerekli koşullar sağlandığı takdirde, istenen bozunum kanalları kapatılabilmekte ya da nötral atomların yeni bozunum modları açılabilir [5]. Böylelikle, nükleosentez sıcaklığı olan 100 keV ve üzeri sıcaklıklarda gerçekleşebilen astrofiziksel koşullar (yıldızların oluşumu için gerekli koşullar)

elde edilerek astrofiziksel süreçler araştırılabilmekte ve plazma halindeki iyonize atom koşulları sağlanmaktadır.



Şekil 1.1: Nükleer çekirdek tablosu [1].

Atomik çekirdekler nükleer yüklerini beta bozunumları yardımıyla ya da nötron yakalama reaksiyonu yoluyla değiştirebilmektedir. Bu da ancak bir nötronun bir protona dönüşümü ya da tersi durumda bir protonun bir nötrona dönüşmesi ile mümkün olmaktadır. Bu dönüşümler sonucunda bir serbest elektron (ya da pozitron) ve nötrino (ya da antinötrino) salınmakta veya bağlı bir elektronun oluşmakta ve monokromatik (tek renkli) bir antinötrino (ya da nötrino) açığa çıkmaktadır (Denklem 1.1). Nötron yakalama ve beta bozunumu olaylarının etkisiyle atomlar sürekli bir şekilde ağır hale gelmekte ve bu durum kararlılık limitlerine ulaşıncaya kadar devam etmektedir (Şekil 1.1). Dolayısıyla nötron yakalama ve beta bozunum modları ağır çekirdeklerin oluşmasına sebep olmakta ve aynı zamanda nükleer dönüşümün zaman skalasını belirlemektedir. Ayrıca astrofiziksel nükleosentezin yolunu çizmekte ve böylece evrende gözlemlendiğimiz atomik çekirdeğin varlığını açıklamaktadır.

$$n + \nu_e \leftrightarrow p + e \quad (1.1)$$

Herhangi bir radyoaktif çekirdeği yük bakımından zenginleştirip depolayabilmek için gerekli koşullar zor oluşturulabildiğinden yük bakımından zengin atomlar üzerine oldukça az sayıda deney yapılabilmektedir. Nükleer Fiziğin düşük enerjili alt dalı ile ilgili olarak, özellikle yüksek yük yoğunluğunun elektron yakalama üzerine etkisini Schottky kütle spektroskopisi (SMS) kullanılarak yapılan deneylere, Almanya'nın Darmstadt kentinde bulunan GSI

Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung Ağır İyon Araştırmaları Merkezi bünyesindeki Deneysel Depolama Halkası (ESR) ev sahipliği yapmaktadır. Bu deneysel çalışmaların temel fiziksel bakış açısına göre iki esas amacı bulunmaktadır:

1. Atomik durumları değiştirerek elektrozayıf etkileşmeleri incelemek.
2. Atomu bağlı elektronlarından kısmen ya da tamamen soyabilmek için yeterince sıcak olan astrofiziksel şartlar altında çekirdeklerin yapısını detaylı olarak incelemek [2].

### 1.1. YÜKÇE ZENGİN İYONLARIN BETA BOZUNUMU

Nükleer beta bozunumu, temel simetrik formu dışında, parçacık-antiparacık simetrisi göz önüne alındığında, aşağıdaki zayıf bozunum modları ile de tanımlanabilmektedir [3,4].

$p + e^- \rightarrow n + \nu_e$	Serbest elektron yakalama bozunumu (serbest EC)
$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$	Sürekli $\beta^-$ bozunumu ( $\beta_c^-$ )
$p \rightarrow n + e^+ + \nu_e$	Sürekli $\beta^+$ bozunumu ( $\beta_c^+$ )
$n \rightarrow p + e_b^- + \nu_e$	Bağlı durum $\beta^-$ bozunumu ( $\beta_b$ )
$p + e_b^- \rightarrow n + \nu_e$	Yörüngesel elektron yakalama bozunumu (EC)

Serbest elektron yakalama bozunumu ancak yoğun plazma koşullarında gerçekleşebilmektedir. Serbest elektron yakalama bozunumunda atomun zayıf bağlı elektronu çekirdek tarafından yakalanarak proton nötrona dönüşür ve elektron nötrinosu açığa çıkar.

$\beta_c^-$  bozunumunda çekirdekteki bir nötron bir protona dönüşmekte, bir elektron ve bir elektron antinötrinosu çekirdekten salınmaktadır.  $\beta_c^+$  bozunumunda ise,  $\beta^-$  bozunumunun tam tersi şekilde bir proton bir nötrona dönüşerek bir pozitron ve bir elektron nötrinosu yayınlanmaktadır.

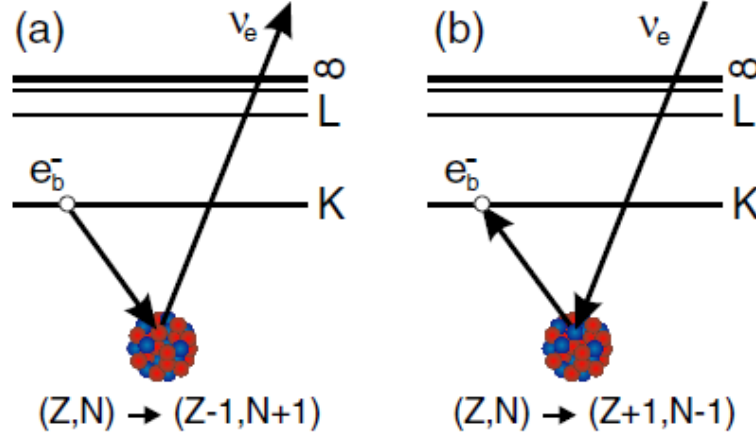
Sürekli beta bozunumlarında enerji ve momentum ortaya çıkan leptonlar (elektron, pozitron, nötrino, antinötrino vs...) arasında bölüşölmektedir. Yüklü lepton salınımı gözlenen bozunum modlarında ( $\beta^+$  ve  $\beta^-$ ) atomu çevreleyen elektron bulutuyla atomik çekirdek arasında meydana gelen etkileşme, enerjide ve parçacık yayılım momentum dağılımında değişime sebep

olmaktadır. Dolayısıyla bu bozunum modları yalnızca çekirdeğin ilk ve son durumuna değil, ayrıca atomik yükün değişmesine de bağlıdır. Sürekli beta bozunum modlarında iyonun yükü her bozunumda bir birim değişmektedir. Bu durum özellikle atomik çekirdekle uzaysal olarak kesişen elektron kabuklarına (K ve L kabukları) yakın elektronlara sahip olan iyonize atomlarda daha belirgin olmaktadır.

Bağlı durum beta bozunumunda ise sürekli  $\beta^-$  bozunumunda olduğu gibi çekirdekteki bir nötron protona dönüşmekte ve bozunum sonucu bir bağlı elektron yok olmakta (ya da oluşmakta) ve bir elektron antinötrinosu oluşmaktadır (ya da yok olmaktadır). Ancak bağlı durum beta bozunumunda oluşan elektron sürekli beta bozunumunda olduğu gibi spektrumda gözlemlenmemekte, oluşan elektron bağlı yörüngelerden birini (çoğunlukla çekirdeğe uzak olan kabuklar) doldurmaktadır. Atomun s-yörüngesinden bir elektron yakalanması (ya da s-yörüngesinin bir elektron tarafından işgal edilmesi) olasılığı temel kuvantum sayısı  $n$  ile  $1/n^3$  şeklinde orantılıdır. Nötral atomlarda iç yörüngeler Pauli ilkesine göre kapalı olduğundan, bağlı durum beta bozunumu kız çekirdeğin zayıf bağlı elektron seviyeleriyle sınırlandırılmıştır ve nötral atomların nadir görülen bir bozunum kanalıdır [5].

Nükleer zayıf etkileşme ile oluşan bağlı durum beta bozunum reaksiyonu sonucunda iki cisim elde edilmekte ve çoğunlukla bu durum iki cisimli beta bozunumu olarak adlandırılmaktadır. Bağlı durum beta bozunumu sonucu oluşan toplam bozunum enerjisini ( $Q$  değerini) reaksiyondan elde edilen elektron antinötrinosu taşımakta ve iyonun yük durumu değişmemektedir. Bağlı durum beta bozunumunun en önemli özelliği, bozunum sonucu oluşan yeni elektronun çekirdeğin çekici Coulomb potansiyelini aşamaması sebebiyle tüm bağlanma enerjisinin oluşan kız çekirdek üzerinde toplanmasıdır. Dolayısıyla anne ve kız çekirdek arasında enerji farkı yani reaksiyonun  $Q$  değeri diğer nötral atomlara kıyasla oldukça yüksektir. Bu sebeple sürekli beta bozunumları ile bağlı durum beta bozunumlarını ilk bakışta elektron bağlanma enerjisi değerine göre birbirinden ayırmak mümkün olmaktadır.

Elektron yakalama bozunumu da iki cisimli bir beta bozunum modudur ve bağlı durum beta bozunumunun tersi olarak ifade edilmektedir (Şekil 1.2). Elektron yakalama bozunumunda yörüngesel bir elektron çekirdek tarafından yakalanarak bir proton bir nötrona dönüşür ve bir elektron nötrinosu açığa çıkar.



**Şekil 1.2:** İki cisimli beta bozunumu. (a) Serbest elektron yakalama bozunumunu, (b) Bağlı durum beta bozunumunu [1].

Yukarıda bahsedilen beta bozunum modları, depolama halkaları yardımıyla uzun süreler boyunca depolanan yük bakımından zenginleştirilmiş iyonların bozunumlarının incelenmesiyle, bozunum sabiti  $\lambda$  cinsinden ifade edilmektedir. Bozunum sabiti  $\lambda = \ln(2)/T_{1/2}$  eşitliği ile hesaplanmaktadır.  $T_{1/2}$  yarı ömür olmak üzere, toplam bozunum sabiti  $\lambda = \lambda_{nükleer} + \lambda_{kayıp}$  eşitliği ile iki farklı bozunum sabitinin toplamı olarak ifade edilmektedir. İncelenen çekirdeklere bağlı olarak iki ya da daha fazla bozunum kanalını temsil edebilen  $\lambda_{nükleer}$ , nükleer bozunmadan kaynaklı bozunum sabiti iken  $\lambda_{kayıp}$  ise artık gaz molekülleri ve soğutucu elektronların meydana getirdiği atomik etkileşmelerle meydana gelen çarpışmalardan dolayı ortaya çıkan atomik demet kayıplarını temsil eden demet kayıp bozunum sabitini temsil etmektedir. Tamamen iyonize atomlarda asıl kayıp terimi, soğutucu sistemdeki elektronlardan kaynaklanan radyoaktif elektron yakalamadan (REC) kaynaklanmaktadır [6]. Yapılan çalışmalar sonucu, radyatif elektron yakalamadan kaynaklı kayıpların soğutucu sistemler içerisinde gerçekleştiği ve muhtemelen atomların  $Z^2$  değeri ile orantılı olarak değiştiği gözlemlenmiştir.

Depolama halkasındaki anne iyonların sayısı  $N_p$ ,  $N_p(0)$  t=0 zamanındaki anne iyon sayısı ve  $\lambda$  toplam bozunum sabiti, depolama zamanı ile eksponansiyel olarak azalmaktadır (Denklem 1.2).

$$N_p(t) = N_p(0) \cdot e^{-\lambda t} \quad (1.2)$$

$\lambda_i$  her bir bozunum kanalı için geçerli olan bozunum sabiti olmak üzere, bozunum kanalına özel olarak belirlenen kız çekirdek sayısı  $N_D$ , Denklem (1.3) ile belirlenmektedir.

$$N_D(t) = N_P(0) \frac{\lambda_i}{\lambda - \lambda_{kayıp}} [e^{-\lambda_{kayıp}t} - e^{-\lambda t}] + N_D(0) \cdot e^{-\lambda_{kayıp}t} \quad (1.3)$$

Yukarıdaki denklemde  $N_D(0)$ ,  $t=0$  anındaki kız çekirdek sayısı olup  $\lambda_{kayıp}$  ise hem anne hem kız çekirdekler için aynı alınmaktadır. Bozunum sonucu oluşan kız çekirdekler kararlı kabul edilmektedir ve tüm bu varsayımlar tüm bozunum türleri için geçerli olmaktadır. Eğer oluşan kız çekirdek radyoaktifse, denkleme ek bir bozunum sabiti de eklenmektedir.

Yük bakımından zengin iyonize atomların radyoaktif bozunumlarının incelenmesiyle beta bozunumu ilk defa temiz şartlarda gözlemlenebilmiştir. Tek ve iki elektronlu her atom sırasıyla hidrojen benzeri ve helyum benzeri olarak adlandırılmakta ve anne çekirdeklerin radyoaktif bozunumları, net kuantum durumunda bulunan hidrojen ya da helyum benzeri atomlar cinsinden incelenmektedir [1]. Bu sebeple, tamamen iyonize ya da birkaç elektronlu atomların iki cisimli beta bozunumları (yörüngesel elektron yakalanması (EC) ve bağlı durum beta bozunumu ( $\beta_b^-$  bozunumu)) üzerine yapılan deneyler ayrıntılı ve hassas bir şekilde özel hızlandırıcı sistemleriyle incelenmektedir (Şekil 1.2).

Beta bozunumlarının özelliklerinin incelenmesi için, kararsız çekirdekler yüksek atomik yük durumunda üretilmeli, bu yük durumu uzun zaman periyotlarında korunmalı (örneğin birkaç dakika boyunca ya da saatlerce) ve beta bozunumları zaman çözünürlüklü ve yüksek dedeksiyon verimine sahip sistemlerle dikkatlice kaydedilmelidir.

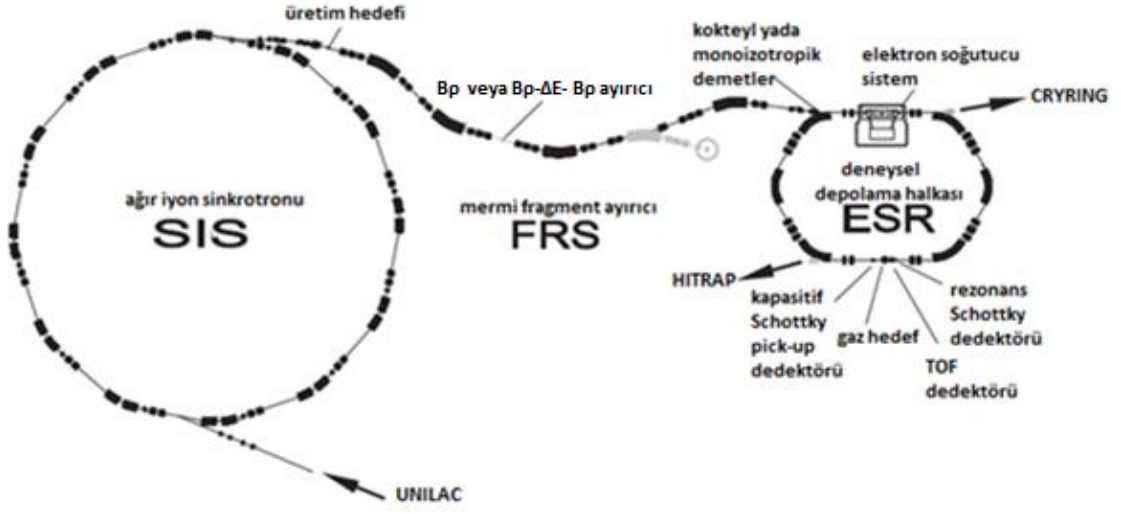
Yük bakımından zengin iyonların radyoaktif bozunumlarını çalışmanın başka bir sebebi de uzun zamandır tartışılan nükleer bozunma sabitinin ne kadar sabit bir değer olduğu üzerine yapılan çalışmalara katkı sağlamaktır. Bilim insanları nükleer bozunma oranlarını radyoaktivitenin bulunuşundan bu yana kullanmaktadır. Rutherford ve Soddy'nin [7] radyoaktif bozunma üzerine yaptıkları çalışmadan sonra nükleer bozunum sabitinin genel düşünceye göre temel bir sabit olduğu ve dışarıdan nükleer olmayan herhangi bir süreçten etkilenmeyeceğine karar verilmiştir. Ancak, çevresel parametreler olan basınç, sıcaklık ya da elektromanyetik alanlar gibi etkilerin değiştirilmesiyle atomlarda nükleer bozunma sabiti üzerine %1-2 etki gözlenmiştir [8]. Bu değişimler çekirdekteki elektron yoğunluğu modifikasyonuna ana katkıyı sağlamaktadır. Dolayısıyla, nükleer bozunum sabiti üzerine

yapılan çalışmalar yük bakımından zengin iyonların yapısının incelendiği deneysel çalışmalar için oldukça önemli olmaktadır.

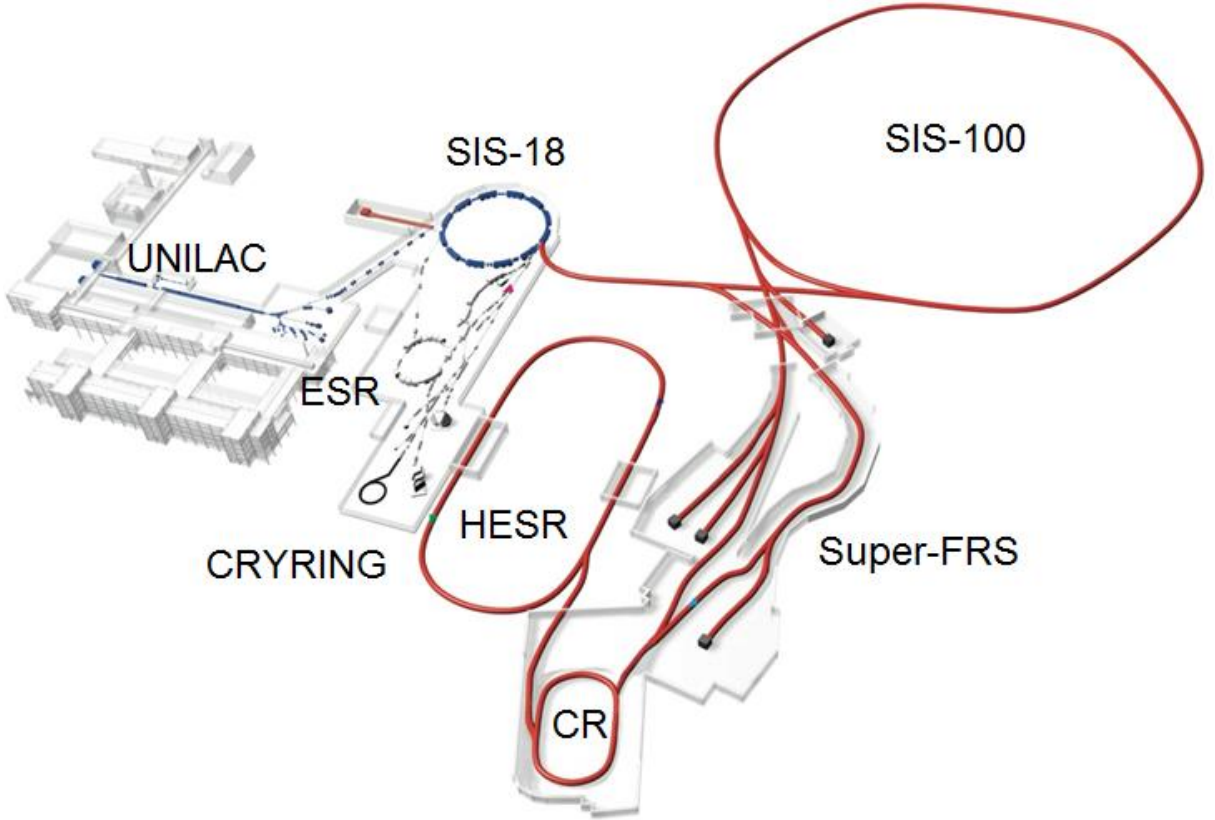
Tüm bu fizik sorularının cevapları yükçe zengin iyonların çeşitli laboratuvarlarda hassas bir şekilde incelenmesiyle cevap bulacaktır. Radyoaktif iyonların yükçe zenginleştirilerek gerekli süre zarflarında depolanıp incelendiği ilk merkez olan GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung GmbH ağır iyon araştırmaları merkezi (Şekil 1.3) ile yeni kurulacak Antiproton ve İyon Araştırmaları Merkezi (FAIR) [5] ve Çin’de kurulacak Yük Bakımından Zengin İyon Hızlandırma Merkezi (HIAF (High Intensity heavy ion Accelerator Facility)) [5] merkezleri özellikle önem arz etmektedir (Şekil 1.4 -1.5).

GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung GmbH isimli nükleer araştırmalar merkezi bünyesinde Evrensel Lineer Hızlandırıcı UNILAC, Ağır İyon Sinkrotronu SIS, FFragment Ayırıcı FRS ve Deneysel Depolama Halkası ESR bulunmaktadır [1]. Bu hızlandırıcı tesisinde yükçe zengin iyonlar hareket halindeyken (in-flight) ya fragmentasyon yoluyla ya da hızlı ilk iyonların fragment ayırıcıda fisyonu yoluyla üretilmektedir [1]. Yük bakımından zengin radyoaktif iyonların depolanması fikri ile ESR inşaa edilmiştir. Üretilen iyonlar depolama halkasına enjekte edilmekte, çok yüksek vakum altında tutulmakta ve aynı doğrultuda olan elektron demetiyle durağan etkileşmeler yoluyla yüksek uzay-zaman yoğunluğuna soğutulmaktadır. Bu soğutma iyonların istenilen yük durumunda uzun süre boyunca depolanmalarını sağlamakta ve dönme frekanslarının Schottky-gürültü analizi cinsinden ölçülebilmesine olanak sağlamaktadır. Bu ölçümlerle de depolama sırasında, herhangi bir zamanda meydana gelen beta bozunumlarının dikkatlice kaydedilip, online olarak ölçülmesini sağlanmaktadır.



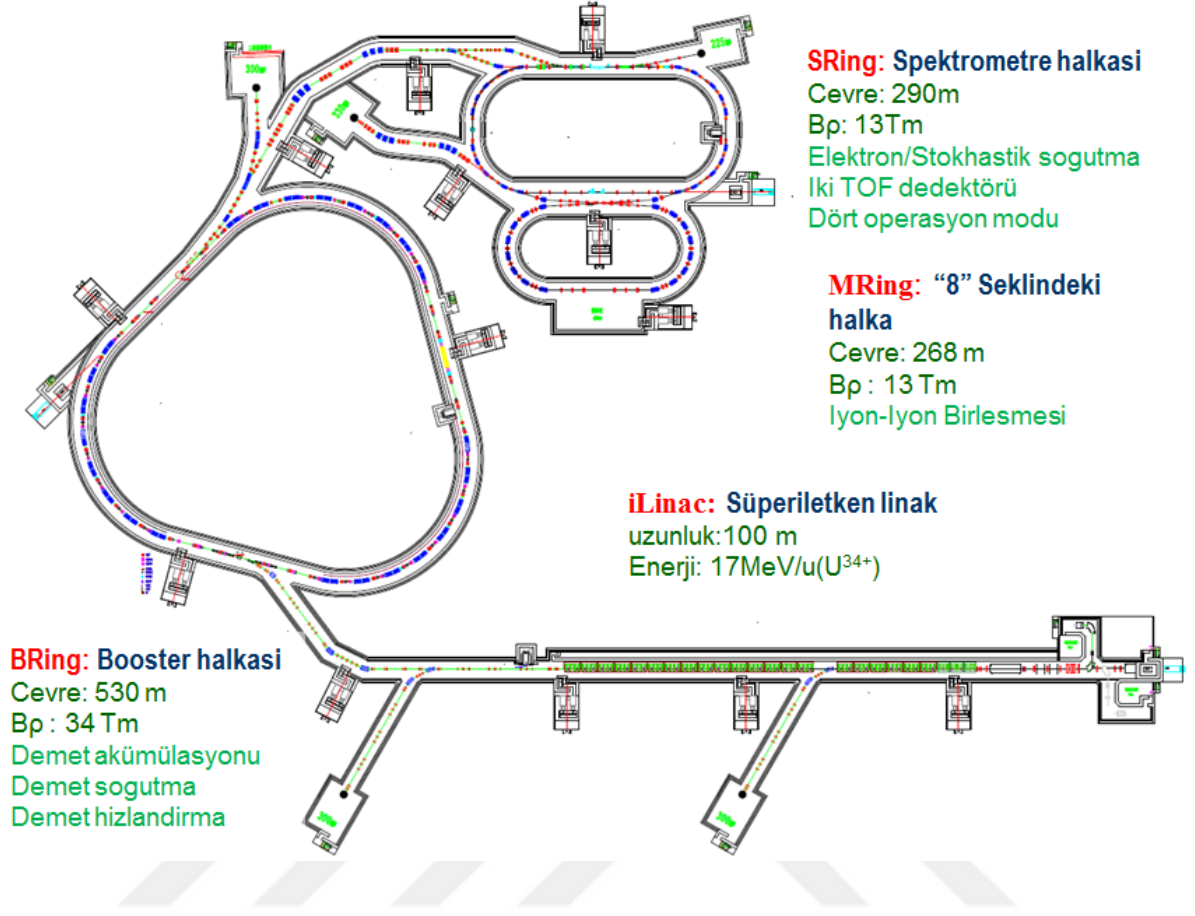


Şekil 1.3: GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung GmbH nükleer araştırmalar merkezinin hızlandırıcı tesisinin üç ana elemanı (SIS, FRS, ESR) ile şematik gösterimi [1].



Şekil 1.4: FAIR (Facility for Antiproton and Ion Research) antiproton ve iyon araştırmaları merkezi bünyesinde inşa edilmekte olan bilimsel araştırma laboratuvar ve hızlandırıcılarının şematik görünümü.

GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung ileri araştırmalar merkezi bünyesinde bulunan ve Şekil 1.3'te görölen hızlandırıcı sistemleri FAIR (Facility for Antiproton and Ion Research) isimli antiproton ve iyon araştırmaları merkezine dönüştürölerek geliştirilecek (Şekil 1.4) ve gelişen ve yenilenen hızlandırıcı sistemleri ile yük bakımından zengin iyonların beta bozunumları daha ayrıntılı olarak incelenebilecektir. Yapılacak FAIR araştırma merkezi bünyesinde, halen GSI bünyesinde mevcut olan ve protondan Uranyum'a kadar istenen çekirdek ve atomların ön hızlandırmasını sağlayan UNILAC, lineer hızlandırıcıdan sonra atomları yaklaşık 600 MeV değerine kadar hızlandırarak depolanmasını sağlayan SIS-18 ve hızlandırılan atomların depolanarak bozunumlarının incelendiği ESR hızlandırıcı sistemleri bulunacaktır. Bunlara ek olarak, İsveç'ten getirtilip FAIR projesi için test alanı oluşturması ve yavaş iyon demetleri ile çalışan birçok grup için araştırma olanağı sağlayan Ağır İyon Depolama Halkası CRYRING halkası da bulunacaktır. CRYRING halkası iyonları depolayıp, elektron soğutma sistemiyle soğutup, yaklaşık 100 keV/nükleon seviyesine kadar yavaşlatmaktadır. Ayrıca, yeni inşaa edilecek ve antiprotonları 14,5 GeV enerjilere kadar hızlandırması planlanan HESR (High-Energy Storage Ring) antiproton halkası, SIS-100 hızlandırıcı halkası, nadir izotop ve antiproton üretim hedeflerini içeren Super-FRS fragment ayırma hattı ve kısa ömürlü çekirdeklerin kütlelerinin ölçüldüğü ve ikincil iyonların ve antiprotonların stokastik soğutmaya maruz kaldığı CR (Collector Ring) halkası inşaa edilmektedir.



**Şekil 1.5:** Çin’de bulunan modern fizik enstitüsü bünyesinde kurulacak HIAF hızlandırıcı merkezinin şematik görünümü [5].

Ayrıca, Çin’de bulunan IMP (Institute of Modern Physics) modern fizik enstitüsü bünyesinde kurulacak olan ve FAIR projesi ile aynı kulvarda bilimsel araştırmalara ev sahipliği yapması planlanan ağır iyon hızlandırıcı merkezi HIAF’ın bünyesinde, SECR (Super-conducting Elektron Cyclotron Resonance) süperiletken elektron rezonans iyon kaynağı, iLinac (ion Linac) lineer iyon hızlandırıcısı, BRing (Booster ring) booster halkası, FRS (Fragment Separator) fragment ayırıcı demet hattı, SRing (Spectrometer Ring) spektrometre halkası ve MRing (Merge Ring) birleştirici halka ile yüksek ve düşük şiddetlerdeki deneylere ev sahipliği yapacak birçok deneysel düzenek yer alacaktır.

## 2. GENEL KISIMLAR

### 2.1. YÜKÇE ZENGİN RADYOAKTİF İYONLARIN ÜRETİMİ, AYRIŞTIRILMASI VE DEPOLANMASI

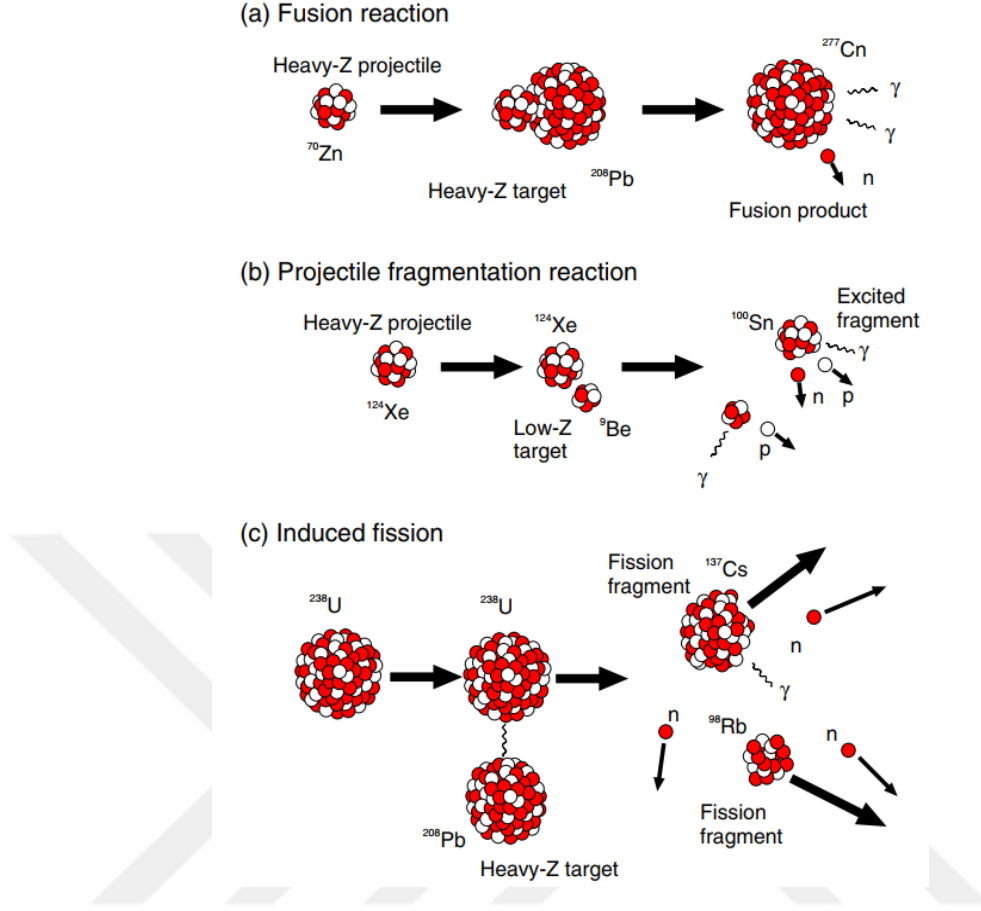
#### 2.1.1. Yükçe Zengin İyonların Üretilmesinde Kullanılan Temel Reaksiyonlar

Hedef çekirdeğe bağlı olarak radyoaktif çekirdeğin üretilmesi esnasında, değişik enerji bölgelerinde çeşitli nükleer reaksiyonlar gerçekleşmektedir. Bunlar; Filyon, Hedef spalasyon reaksiyonu, Mermi fragmentasyonu, Füzyon reaksiyonu, Derin inelastik reaksiyon, Yük-değişim reaksiyonu, Nükleer transfer reaksiyonu ve Knock-out reaksiyonları olarak sınıflandırılmaktadır [9,14].

Depolanan radyoaktif demetlere uygulanan üç ana reaksiyon tipi bulunmaktadır. Bu reaksiyon tipleri Şekil 2.1’de şematik olarak gösterilmektedir.

##### 2.1.1.1. Füzyon Buharlaşma Reaksiyonları

Ağır iyonların merkezi çarpışmaları Coulomb bariyerini aşan enerjilerde (birkaç MeV/u) gerçekleşmekte ve füzyona neden olabilmektedir. Bu reaksiyon tipinde, kararlı hedef ve mermi çekirdekleri birleşerek kararsız, ağır bir bileşik çekirdek oluşturmakta ve üretilen çekirdekler genellikle nötronca zengin olmaktadır. Şekil 2.1(a)’daki örnek süperağır  $^{277}_{112}\text{Cn}$  elementinin üretilişini göstermektedir [15,16].  $^{70}\text{Zn}$  mermi çekirdeğiyle bombardıman edilen ağır  $^{208}\text{Pb}$  hedef çekirdeğinin füzyonu sonucunda süperağır  $^{277}\text{Cn}$  çekirdeği oluşmakta ve füzyon ürünleri olarak gamma radyasyonu ve nötron elde edilmektedir. Reaksiyon kinematiklerine göre, füzyon ürünlerinin hızları anne iyonların hızlarından daha düşük olmaktadır.



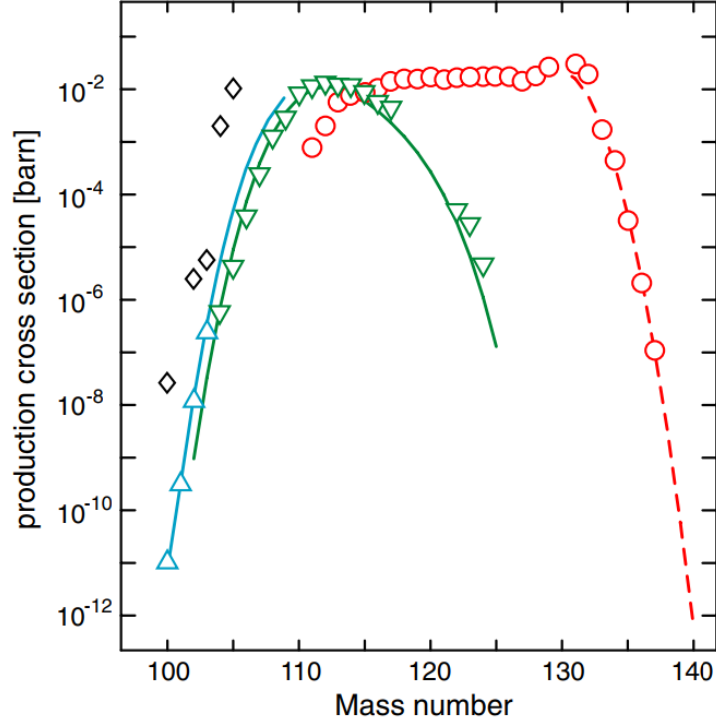
**Şekil 2.1:** Radyoaktif demet merkezlerinde genellikle uygulanan nükleer reaksiyon tiplerinin üç örneği. (a) füzyon buharlaşma, (b) mermi fragmentasyon ve (c) indüklenmiş fisyon reaksiyonu.

### 2.1.1.2. Fragmentasyon Reaksiyonları

Relativistik enerjilerde (yaklaşık birkaç 10–100 MeV/u arası) ağır mermi çekirdek parçalanabilmekte ve bu da mermi çekirdekten bazı nükleonların oluşmasına yol açmaktadır. Basitleştirilmiş bir biçimde anlatmak gerekirse, mermi çekirdeğin hedef çekirdekle üst üste binen kısmı kesilerek, mermi çekirdek ile hemen hemen aynı hızla ve hemen hemen aynı doğrultuda hareket eden oldukça uyarılmış bir ürün oluşmaktadır. Birçok farklı çekirdek mermi çekirdekten nükleon ayrıştırılması yoluyla üretilmektedir. Şekil 2.1(b)'de  $^{124}\text{Xe}$  mermi çekirdeğinin ayrıştırılması örneği görülmektedir. Proton sayısı fazla olan ağır hedef çekirdekler ve düşük proton sayılı hafif mermi çekirdekler kullanılmaktadır. Yüksek enerjili, düşük proton sayısına sahip hafif  $^9\text{Be}$  mermi çekirdeği ile (tipik olarak 1 GeV/u enerjili protonlar) proton sayısı yüksek olan ağır hedef  $^{124}\text{Xe}$  çekirdeği kombinasyonundan bir hedef spallasyonu (ayrıştırılması) meydana gelmekte ve  $^{100}\text{Sn}$  çekirdeği oluşmaktadır. Üretilen  $^{100}\text{Sn}$  çekirdeği sayısız reaksiyon kanallarından biridir [17,18].

### 2.1.1.3. Filyon

Uranyum benzeri ağır çekirdekler çoğunlukla iki ürün (fragment) oluşturacak şekilde filyona uğramaktadırlar. Genel olarak, kararlı ağır çekirdeklerin nötron sayısı proton sayısından çok daha fazla olmaktadır. Filyonda, nötron-proton oranı neredeyse aynı kalmaktadır. Bu sebeple, filyon nötron bakımından zengin orta kütleli çekirdek üretimi kaynağı görevi görmektedir [19,20]. Radyoaktif iyon demetlerinin oluşturulması için, filyon nötronlarla, enerjik protonlarla ya da ağır iyonlarla etkileşimle indüklenmektedir. Ağır hedef çekirdeğin elektromanyetik etkileşme ile indüklediği bir Uranyum filyon örneği Şekil 2.1(c)'de görülmektedir. Kütle merkezi sisteminde, filyon ürünlerinin kinematikleri Coulomb itmesiyle hesaplanmaktadır. Uranyum filyonu durumunda, fragmentlerin toplam kinetik enerjileri 170 MeV civarındadır.



**Şekil 2.2:** Deneysel (semboller) ve hesaplanmış (çizgiler) üretim tesir kesitlerini gösteren grafik. Nötronca zengin izotoplar üreten  $^{238}\text{U}$  çekirdeğinin filyonu ( $\circ$ ) ve nötron sayısı düşük çekirdekler üreten  $^{124}\text{Xe}$  ( $\Delta$ ) ve  $^{129}\text{Xe}$  ( $\nabla$ ) mermi çekirdeklerinin fragmentasyonu verilmektedir. ABRABLA [21] and EPAX [22] kodları ile hesaplanan üretim tesir kesiti değerleri ise kesikli ve düz çizgilerle gösterilmiştir. Füzyon reaksiyonu için teorik ve deneysel verilerle hesaplanan tesir kesitleri ise ( $\diamond$ ) ile gösterilmektedir.

Son zamanlarda, yukarıda bahsedilen reaksiyonlarla egzotik çekirdeklerin üretim oranları tahmin edilebilmektedir. Varolan modeller uyarılmış bir çekirdeğin ve uyarılmış çekirdeğin süregelen uyarılmalarının oluşum oranını hesaplayabilmektedir. Birleşik çekirdeğin üretimi için gerekli buharlaşma kanalları dahil tüm açık kanallar dikkate alınmaktadır. Örneğin, izotopik bir zincirin ölçülen ve hesaplanan tesir kesitlerinin kıyaslaması Şekil 2.2'de gösterilmektedir [23].

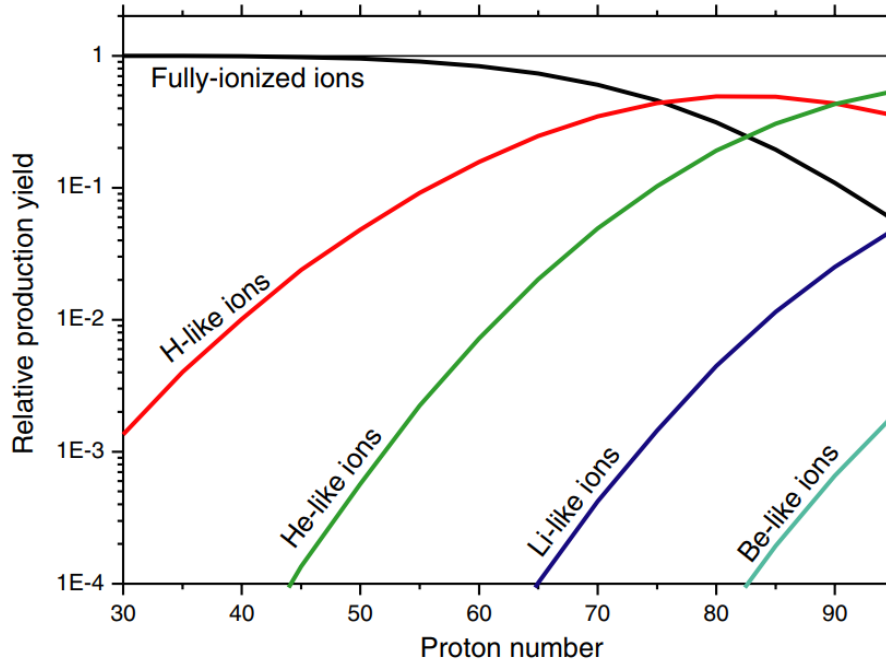
### 2.1.2. Yükçe Zengin İyonların Üretilmesi, Ayrıştırılması ve Depolanması

Yükçe zengin iyonları elde etmenin iki temel yöntemi bulunmaktadır. Bunlar:

- 1) Elektron Demetli İyon Kaynakları (EBIS) [24,25] ya da Elektron Demetli İyon Tuzakları (EBIT) [26,27],
- 2) Enerjik parçacıklar madde içerisinde geçerken elektronların soyulmasıdır.

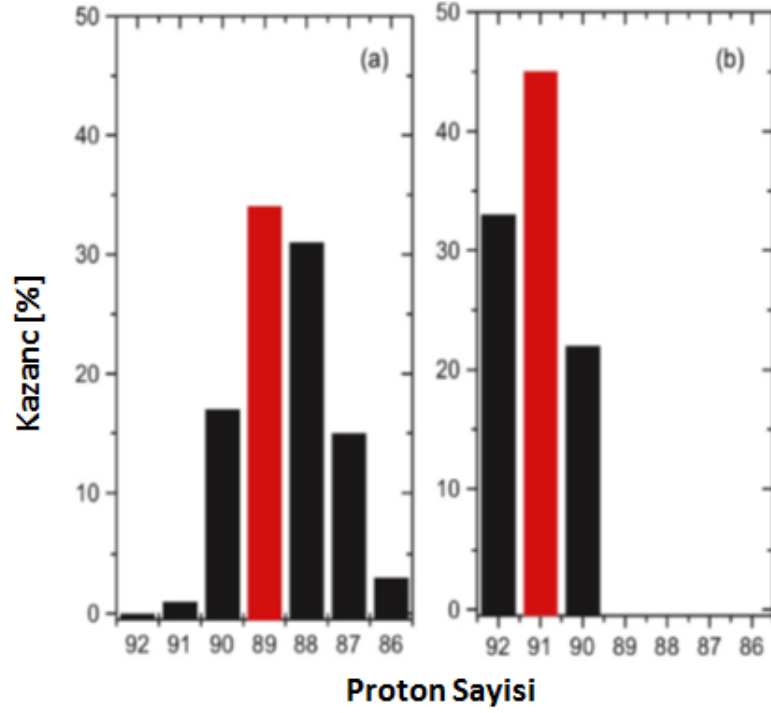
EBIS ya da EBIT yöntemleri etkili iyonizasyon süreci üzerine kurulmuştur [24,25]. İlk olarak Livermore'da (yaklaşık 20 yıl önce) EBIT yöntemi ile yük bakımından zengin iyon deneyleri gerçekleştirilmiştir [26,27]. O günden beri, dünya çapında onlarca EBIT tesisi kurulmuş olup bunlar orta kütleli yükçe zengin kararlı iyonlar üretmektedirler. Şu ana kadar tamamen iyonize olmuş Uranyum sağlayabilen tek EBIT tesisi Livermore'daki Super-EBIT tesisidir [28]. Super-EBIT tesisinde drift tüp linaklardan geçen 200 keV'lik elektron enerjileri ile 200 mA'lik elektron akımlarına ulaşılabilir. Düşük enerjili tek ya da çift yüklenmiş iyonlar (Hidrojen benzeri (H-like) ya da Helyum benzeri (He-like)) ayrı birer iyon kaynağından iyon tuzağına enjekte edilmektedirler [29]. Bu iyonlar, elektronların 10 V civarındaki uzay-zaman potansiyeliyle radyal doğrultuda tuzaklanmaktadır. Eksensel doğrultuda, drift tüpler arasında uygulanan (10 – 100 V) potansiyelle iyonlar tuzaklanmaktadır. İyonların hapsedildiği tuzak, elektron demetinin 5000 A.cm<sup>-2</sup> civarındaki yüksek yoğunluğa sıkıştırılmasını sağlayan 3 T'lık manyetik alana sahip süperiletken bobinlerin içerisine yerleştirilmiştir. Tuzağına hapsedilen iyon demetinin çapı 35 µm'lik bir elektron demet çapına denk düşmekte, bu yoğunluk elektron demeti ile sık çarpışmalar elde etmek ve dolayısıyla daha yüksek iyonizasyon olasılığına ulaşmak için gerekmektedir. Yukarıda bahsedilen durumlarla ( $E_e = 200$  keV,  $I_e = 200$  mA), Uranyumun en fazla yüke sahip hali olan U<sup>89+</sup> elde edilebilmektedir [28].

İkinci yöntem ise, madde içerisinde geçen enerjik parçacıklardan elektronların soyulması üzerine kurulmuştur [30,31]. Yüksek enerjili iyonlar, yük sayısı az olan iyonların lineer hızlandırıcılarda, siklotronlarda ve/veya sinkrotronlarda hızlandırılmasıyla elde edilebilmektedir. Hızın (kinetik enerjinin) hesaplanabilmesi için gerekli yük durumuna ulaşmak gerekmektedir ve buna Bohr kriteri adı verilir [30,31]. Bohr kriteri; iyonların hızları klasik yörüngesel hızlara,  $v_0/c = Z \cdot \alpha/n$  ( $Z$  proton sayısı,  $\alpha$  düzgün yapı sabiti  $\alpha = 1/137$  ve  $n$  ise temel kuantum sayısıdır) eşitse, bağlı elektronların madde içerisinde geçerken en etkili bir biçimde soyulmasını öngörmektedir. Örneğin, Uranyumun ( $v_0/c \approx 0.67$ ) K-kabuğundaki boşlukların belirli sayıda üretilmesi için mermi çekirdeklerin en azından 325 MeV/u enerjiye denk düşen  $v_0/c = 0.67$  değerine hızlandırılması gerekmektedir. Yük durum dağılımlarının daha düzgün hesaplanabilmesi için CHARGE ve GLOBAL kodları geliştirilmiştir [32]. Denge yük durum dağılımları veya  ${}^9\text{Be}$  folyodan tam olarak 400 MeV/u enerjide geçen farklı iyonlar için GLOBAL hesaplamaları Şekil 2.3'de sunulmaktadır. 360 MeV/u enerjide bakır bir soyucu folyodan geçen Uranyum iyonlarının hesaplanmış denge yük dağılımı Şekil 2.4 (b)'de gösterilmektedir [29].



**Şekil 2.3:**  ${}^9\text{Be}$  soyucu folyodan 400 MeV/u enerjide oluşan farklı mermi çekirdeklerin GLOBAL yazılımı ile hesaplanan denge yük durum dağılımlarını gösteren grafik [32].





**Şekil 2.4:** Uranyum iyonları için yük durum dağılımlarının Livermore Super-EBIT sistemi ile  $E_e = 198$  keV enerji,  $I_e = 200$  mA akımında (a), 360 MeV/u'luk enerjiye sahip bakır levhadan üretilerek (b) ölçülen kazanç değerlerini gösteren grafikler. En olası yük durumu kırmızı ile belirtilmiştir [29].

Prensipite, yukarıda tartışılan tüm nükleer reaksiyonlarda çok sayıda çekirdek üretilmektedir. Bu sebeple, istenilen çekirdekleri kontaminasyonlardan ayırmak için iyi bir ayırıştırma işlemi uygulanmalıdır. Günümüzde kullanılan iki ana ayırıştırma yöntemi bulunmaktadır [33,34]:

1. Çevrimiçi İzotop Ayırıştırma (Isotope Separation On-line, ISOL) yönteminde, egzotik çekirdekler kalın bir hedef (birkaç  $100 \text{ g.cm}^{-2}$  kalınlığına kadar olan), yüksek enerjili (100 – 1500 MeV/u) protonlar ya da hafif iyonlarla bombardıman edilerek üretilmektedir. Meydana gelen reaksiyonlar sonucu oluşan parçalanma veya fisyon ürünleri, hedef-iyon-kaynak sisteminde durdurulmaktadır. Hedef malzemedeki fisyon ürünlerinin salınım süreci üretilen çekirdeğin kimyasal özelliklerine bağlı olmaktadır. Yük bakımından nötr olarak elde edilen fisyon ürünlerinin elektronlarından arındırılarak iyonize hale getirilmesi işlemi sonrasında (iyonizasyondan sonra), düşük yüklü iyonlar sistemden alınmakta ve birkaç keV mertebesine hızlandırılarak elektromanyetik alanlar içerisinde ayırıştırılmaktadır. Bu yöntemde ek bir ayırıştırma kriteri de farklı elementlerin seçilmesini sağlayan rezonant lazer iyonizasyon

kaynağı uygulanmasıdır [35]. ISOL tekniği birçok element için (Örneğin Lityum, Sodyum, Potasyum vb... alkali metaller çok verimli bir biçimde elde edilmiştir) demet yoğunluğu ve uzay-zaman yoğunluğu cinsinden oldukça önemlidir [36]. ISOL yönteminin dezavantajı ise tüm kimyasal elementlerin elde edilememesi ve hedeften çıkarılma işleminin birkaç milisaniye gecikmeli olmasıdır. Bu durum, kısa ömürlü çekirdeklerin ayrıştırılamamasına yol açmaktadır. ISOL demetlerinin uzay-zaman dağılımı (emittans) düşüktür. ISOL demetleri, EBIS ya da EBIT sistemi kullanılarak iyonların tuzaklanması yoluyla yük üretilmesini sağlamaktadır.

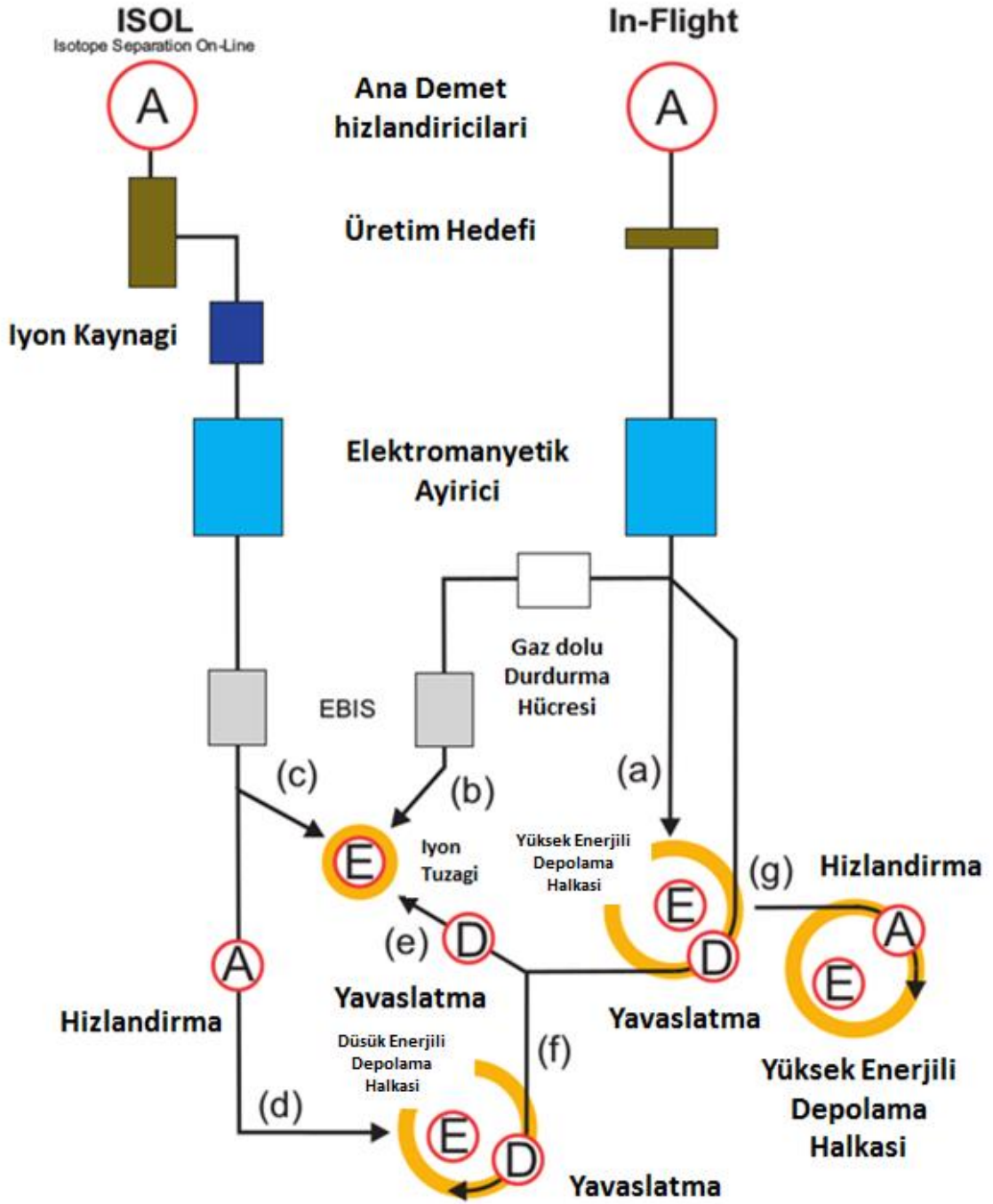
2. Tamamlayıcı bir diğer ayrıştırma yöntemi ise uçuş halinde (in-flight) ayrıştırma yöntemidir. Bu yöntemde, reaksiyon sonucu elde edilmek istenen ürün çekirdekler hedef malzemede yüksek kinetik enerjilerde istenilen yük durumlarında üretilmektedir. Hareket halinde ayrıştırma yönteminin en önemli avantajı, hedefte üretilmesi ile manyetik ya da elektromanyetik ayırıcı sistemin çıkışı arasındaki kısa uçuş zamanıdır ki bu süre mikrosaniye seviyesinde ya da daha düşük olduğundan kısa yarı ömürlü çoğu egzotik çekirdeğin çalışmasına olanak sağlamaktadır. Yük üretim süreci birkaç milisaniye gerektirdiğinden, hareket halinde ayrıştırma kısa ömürlü çekirdekler için ISOL yönteminden daha uygun olmaktadır. Ayrıca, hareket halinde ayrıştırma, iyonların kinematik özelliklerine bağlı olduğundan herhangi bir kimyasal kısıtlama söz konusu olmamakta ve istenilen çekirdekler üretilmektedir. Bu yöntemin dezavantajı ise, nükleer reaksiyonların parçacık demetinde emittans büyümesine (faz-uzay dağılımı genişlemesine) yol açmasıdır.

Uçuş halinde egzotik çekirdek ayırma yöntemi Coulomb bariyerinden başlayarak birkaç GeV enerji aralığına kadar geniş bir spektrumda enerjiye sahip olabilen mermi çekirdekler için geçerli bir yöntemdir. Mermi çekirdekler uçuş halindeyken ince hedeflere çarptırılarak, reaksiyon ürünlerinin yüksek kinetik enerjilerde üretilmesi sağlanmaktadır. Reaksiyon ürünleri, enerji aralığına bağlı olarak farklı yük durumu dağılımına sahip olmaktadır. Yüksek enerjili demetlerin sağladığı en büyük avantaj; fragmentlerin hedeften birkaç elektronla ya da tamamen iyonize olarak oluşmasıdır ki bu da uçuş halindeyken verimli bir elektromanyetik ayrıştırma uygulanmasına olanak sağlamaktadır.

Hareket halinde ayrıştırma işlemi esnasında oluşan izobarik atık iyonlar, reaksiyon ürünleri ile aynı yük durumunda oluşmaktadır ve elektromanyetik ayrıştırma yöntemi bunları ayırt etmeye yetmemektedir. Dolayısıyla elektromanyetik ayrıştırma yanında bağımsız ayırma yöntemleri de uygulanması gerekmektedir. Bu amaçla, yüksek enerjilerde (30-200 MeV/u) enerji ayırıcı

sistemler uygulanmaktadır. Madde ile etkileşen iyonların atomik enerji kayıpları  $\Delta E$ , proton sayılarının karesiyle  $Z^2$  orantılı olduğundan, enerji ayırma işleminden önce ve sonra, manyetik değişmezlik  $B\rho$  analizi uygulanmaktadır. Bu ayırma işlemine,  $B\rho-\Delta E-B\rho$  yöntemi adı verilmektedir [37,38].

Şekil 2.5'den de anlaşılacağı üzere, çekirdeklerin yüksek atomik yüke sahip olacak şekilde depolanmaları ancak ISOL ve hareket halinde (in-flight) ayırıştırma yöntemleri ile mümkün olmaktadır. Her iki yöntem de radyoaktif yükçe zengin iyon üretiminde ve depolanmasında kullanılan yöntemlerdir. Şekilde deneysel alanlar "E" ile belirtilmiş ve sarı renkli daireler içine alınmış alanlardır. Şeklin sağ kısmında, çekirdekler istenilen atomik yük durumunda üretilerek doğrudan depolama halkasına iletilmektedir (a). Ayrıca iyonlar gaz dolu hücrelerde yavaşlatılarak, bir EBIS te yük üretimi sağlanarak radyoaktif yükçe zengin iyonlar belirlenen yöntemle tuzaklanabilmektedir (b). ISOL demetleri ise bir EBIS te yükçe zenginleştirilip bir iyon tuzagında, düşük enerjilerde depolanabilmektedir (c). Başka bir yöntem de EBIS'te elde edilen yükçe zengin radyoaktif iyonların tekrardan hızlandırılarak düşük enerjili depolama halkasında depolanmasıdır (d). Aynı sonuca birkaç depolama halkası kullanılarak iyonların istenilen enerjilere getirilmesiyle ulaşılabilmektedir (f). Yükçe zengin iyonlar (e) seçeneğinde gösterildiği gibi bir depolama halkasına iletilip, yavaşlatılarak bir iyon tuzagında depolanabilmektedir. (g) seçeneğinde ise iyon demeti ilk hızlandırıcıda hazırlanıp ikinci bir depolama halkasında deney yapılmak üzere depolanabilmektedir.



**Şekil 2.5:** Yükçe zengin egzotik iyonların üretimi, ayrıştırılması ve depolanma yöntemlerini farklı enerjiler için gösteren şemadır [5].

Dünya genelinde birçok radyoaktif demet üretim merkezi bulunmaktadır. ISOL tipi ayırma ve depolama yöntemiyle çalışan merkezlere örnek olarak CERN'de bulunan ISOLDE (Cenevre, İsviçre) [39], ORNL'de bulunan HRBIF (Oak Ridge, ABD) [40] ve TRIUMF'da bulunan ISAC

(Vancouver, Kanada) [41] gösterilmektedir. Mermi fragmentasyonu ile ayrıştırma ve depolama yöntemine sahip hareket halinde (in-flight) ayrıştırma yöntemi kullanılan merkezlere örnek olarak ise GANIL (Caen, Fransa), GSI (Darmstadt, Almanya), JINR (Dubna, Rusya), MSU (East Lansing, ABD), IMP (Lanzhou, Çin) ve RIKEN (Wako, Japonya) gösterilmektedir [42].

Şekil 2.5 (a) seçeneğinde görülen Darmstadt'da bulunan GSI ağır iyon araştırmaları merkezindeki fragment ayırıcı FRS demet hattı ile birleşik ESR deneysel depolama halkası ile kütle ölçüm ve yükçe zengin iyonların bozunum mekanizmalarının incelenmesi deneyleri yapılmakta ve Lanzhou'da bulunan IMP (Institute of Modern Physics) Modern Fizik Enstitüsü'nde bulunan Lanzhou radyoaktif iyon demet hattı RIBLL2 ile birleşik CSRe deneysel soğutucu depolama halkası kullanılarak da aynı amaçla deneyler gerçekleştirilmektedir. Ayrıca Şekil 2.5 (a) Japonya'da bulunan BigRIPS hareket halinde ayırma demet hattıyla birleşik yeni Rare-RI RING depolama halkasının bulunduğu RIKEN nükleer araştırmalar merkezinde de kullanılacaktır [36]. Şekil 2.5 (c) ayrıştırma ve depolama yöntemi ise Kanada'da bulunan kütle ölçümleri yapmakta olan TRIUMF nükleer araştırmalar bünyesindeki TITAN penning tuzaklama merkezinde kullanılmakta olup [2],  $^{124}\text{In}$  ve  $^{124}\text{Cs}$  ölçümleri yapılmıştır [37]. Şekil 2.5 (c) seçeneği GSI'da bulunan HITRAP projesi tarafından kullanılmaktadır [38]. Şekil 2.5 (b) ve (c) seçenekleri East Lansing'de bulunan FRIB merkezinde kullanılan yöntemlerdir [43]. Şekil 2.5 (d) seçeneği ise CERN'de bulunan ISOLDE için önerilmiş bir ayrıştırma ve depolama yöntemidir [44]. GSI'da bulunan ESR halkasının arkasında yeniden yapılandırılacak olan İsveç CRYRING depolama halkasıyla Şekil 2.5 (f) seçeneği de birkaç keV/u enerjili deneysel çalışmalar için kullanılabilir hale gelecektir [39,40,41]. Ayrıca, Şekil 2.5 (g) seçeneğinde gösterilen ve iki adet yüksek enerjili hızlandırıcıdan oluşan sistemler yeni jenerasyon radyoaktif iyon demeti merkezleri olacak olan FAIR [42] ve HIAF [45] bünyesinde kullanılabilir hale getirilecektir.

Ağır iyonların depolanması amacıyla çalışmakta olan ve Şekil 2.7 (a) gösterilen yöntemle iyonları hareket halinde ayrıştıran ve depolayan iki adet merkez bulunmaktadır. Bunlardan GSI bünyesinde yer alan SIS dairesel hızlandırıcısı ve hareket halinde fragment ayıran FRS demet hattıyla birlikte çalışan ESR deneysel depolama halkasıyla protonlardan uranyuma kadar olan geniş bir skalada iyonlar SIS dairesel hızlandırıcısında hızlandırılarak FRS demet hattında radyoaktif yükçe zengin iyonların  $1 - 8 \text{ gr/cm}^2$  arasında değişken kalınlıklara sahip berilyum hedeflerde üretilmesi ve ESR deneysel depolama halkasında depolanması sağlanmaktadır [46].

İkinci merkez ise Lanzhou'da bulunan IMP merkezindeki RIBLL2 demet hattıyla bütünleşik olarak çalışan CSRe depolama halkasıdır ve yüksek enerjili kısmının çalışma prensibi GSI ile aynı olup bazı teknik değerler açısından farklılıklar göstermektedir [47].

### **2.1.3.Egzotik Çekirdeklerin GSI Fragment Ayırıcı ve Depolama Halkası ile Soğutulması (Yavaşlatılması)**

Depolama halkasına enjekte edilen iyonların belli bir enine ve boyuna demet faz-uzay dağılımı (emittans) değeri bulunmakta ve bu değer enerji değeri sabitken, korunumlu kuvvetler etkisinde sabit olmaktadır. Örneğin, iyon demeti odaklanmak istenirse uygulanan kuvvetle demetin enine büyüklüğü azalırken, boyuna emmittans değerinde bir artış olacaktır. Ancak emmittans değeri yani faz uzayının elipsinin alanı sabit olacağından hem demet büyüklüğünü hem de momentum dağılımını azaltmanın tek yöntemi korunumlu olmayan kuvvetler kullanarak iyon demetini dışarıdan bazı aletler ya da parçacıklar ile etkileştirmektir ki bu işleme de “demet soğutma” adı verilmektedir. Demet soğutma işlemi sadece en iyi faz-uzay yoğunluğuna sahip demetler elde etmeye yaramaz aynı zamanda sıcak demetlerin uzun süreler boyunca depolanmalarını da sağlar. Demet soğutma işlemi olmazsa, parçacık demetleri artık (residual) gaz atomları ile etkileşerek depolama halkasının limitlerinden çıkmaktadır.

Günümüzde 3 farklı demet soğutma yöntemi bulunmaktadır. Bunlar;

- 1.Lazer soğutma
2. Stokhastik soğutma
3. Elektron soğutma

yöntemleridir.

Demet soğutma işlemiyle, iyon demetlerinin düşük momentum yayılımına sahip olacak şekilde ve küçük demet faz-uzay yayılım (emmittans) değerleriyle üretimi gerçekleştirilmekte, demet-hedef ya da artık gaz etkileşmeleri sonucu meydana gelebilecek olan demet faz-uzay yayılım (emmittans) büyümeleri önlenmekte ve nadir egzotik iyonların birikme olasılıkları azaltılmaktadır. GSI bünyesinde bulunan ESR deneysel depolama halkasında bulunan demet soğutma sistemleri bir sonraki bölümde tartışılacaktır.

### 2.1.3.1. Lazer Soğutma Yöntemi

Lazer soğutmanın temel prensibi, atoma  $\Delta p = E_\gamma/c$  değerinde bir momentum transfer ederek atomun bağlı elektronunu lazer fotonuyla uyarıp, izotropik fotonun atomdan salınmasını sağlamak üzerine kurulmuştur. Momentum dengesine bağlı olarak, atomun sahip olduğu net momentum transferi lazerin sahip olduğu momentum doğrultusunda olacaktır. Lazer soğutma işleminin tek dezavantajı atomik seviyede bağlı elektronlara uygulanabilir olmasıdır ki bu da bu yöntemin yalnızca atomik sistemler için kullanılmasını sağlamaktadır. Dolayısıyla beta bozunum deneylerinde ön soğutma olarak stokastik soğutma ve elektron soğutma kullanılabilir. kullanılabilmektedir.

### 2.1.3.2. Stokastik Soğutma

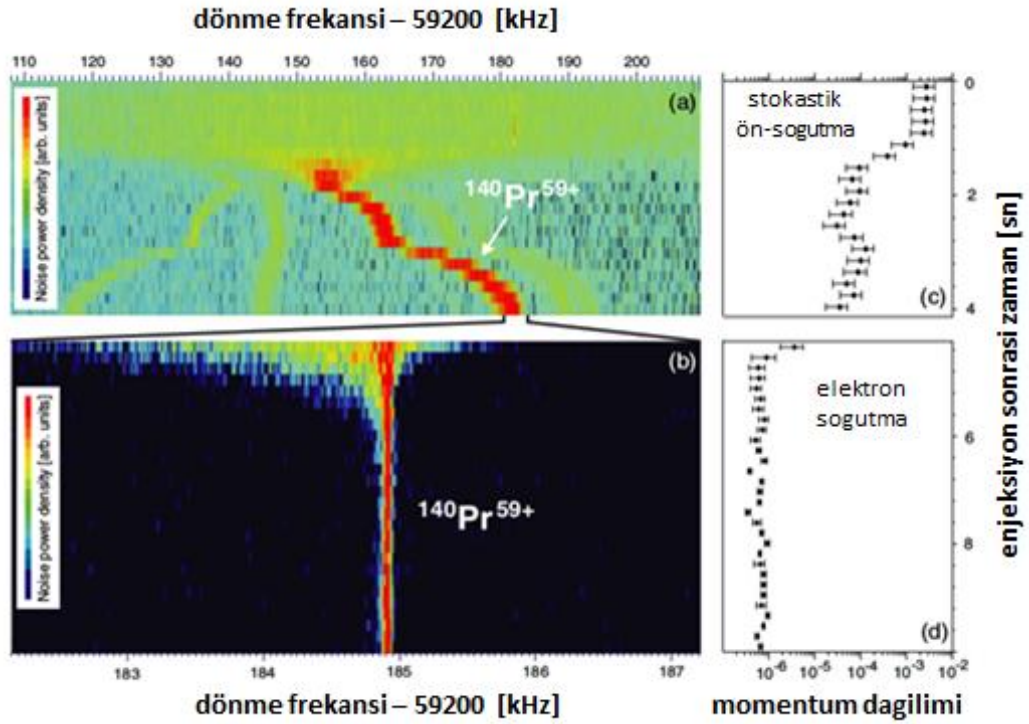
Stokastik soğutmada demet hattının iki yanına konulan plakalardan oluşan kapasitif pick-up plakalar, iyonların referans yörüngeden uzaysal olarak ne kadar saptıklarını ölçmektedir. Bu ölçüm, tekmeleyici (kicker) magnetler ile demet hattına itilen daha sonrasında yine tekmeleyici (kicker) magnetler tarafından demet hattından çıkartılan ve yavaşlatılmak istenen iyonun momentumuna etki eden parçacıklar tarafından üretilen sinyaller vasıtasıyla gerçekleştirilmektedir. Alınan bu sinyaller yükseltilerek,  $n$  tam sayı ve  $X_B$  betatron dalga boyu olmak üzere,  $(n + 1/4)X_B$  mesafesinde konumlanmış olan itici (kicker) mıknatısa iletilmekte ve uzaysal sapma itici mıknatısta açısız sapmaya çevrilerek (faz-uzay elipsi 90 derece döndürülmektedir) elektrostatik bir puls olarak düzeltilmektedir. Bu yöntem yalnızca belli bir iyon hızı için geçerli olup çok hızlı bir yükseltme gerçekleştirebilmektedir.

Stokastik soğutma çoğunlukla momentum dağılımı  $10^{-3} \dots 10^{-2}$  den büyük ya da eşit olan sıcak iyonların kısa sürede soğutulması için (yaklaşık 1-4 sn arası) geçerli bir yöntem olduğundan ön soğutma sistemi olarak elektron soğutması ile birlikte depolama halkalarında kullanılmaktadır.

Stokastik soğutma van der Meer tarafından CERN'de geliştirilmiş bir yöntemdir [48]. 1970'lerde stokastik soğutma, sıcak antiprotonların soğutulması için proton-antiproton çarpıştırıcısına enjeksiyonunda kullanılan tek yöntem olmakla birlikte zayıf etkileşmenin ara parçacıkları olan  $W^+$  ve  $W^-$  vektör bozonlarının dedeksiyonunda önemli rol oynamıştır.

### 2.1.3.3. Elektron Soğutma

Elektron soğutma yöntemi keşfedildiği 1960'lardan bu yana hemen hemen tüm depolama halkalarında yaygın olarak kullanılan bir soğutma yöntemidir. Sıcak olarak nitelendirilen iyonlarla, soğuk olarak nitelendirilen elektron demetleri arasında gerçekleşen Coulomb etkileşmesine dayalı momentum alışverişi üzerine kurulu bir temeli vardır. İyonlar depolama halkasındaki her dönüşlerinde elektron soğutucudan geçerek düşük enerjili elektronlarla Coulomb etkileşmesine maruz kalırlar ve bu esnada iyonlarla elektronlar arasında kinetik enerji alışverişi gerçekleşir. Elektron demeti sürekli yeniden üretilerek depolama halkasına enjekte edildiğinden elektronlar iyonların ısısında azalmaya sebep olmaktadır. İyonların laboratuvar sisteminde enerji ve açısal momentumlarında meydana gelen azalma depolanan iyonların enine ve boyuna sıcaklıklarıyla belirlenmektedir.

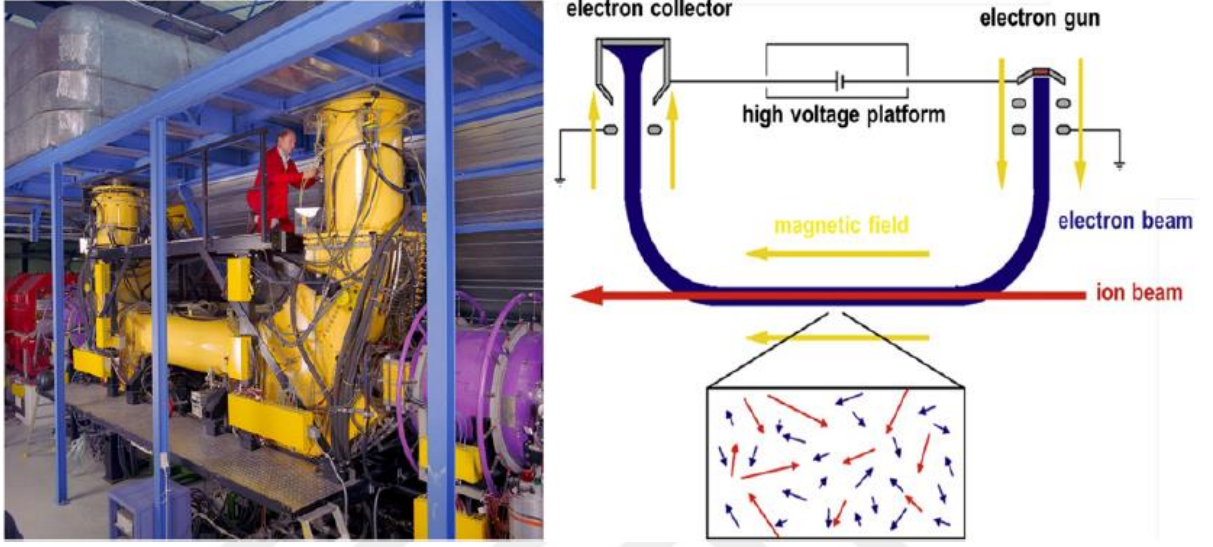


**Şekil 2.6:** Tamamen iyonize  $^{140}\text{Pr}^{59+}$  iyonları için uygulanan stokastik ve elektron soğutma işleminin Schottky gürültü spektrumu [1].

Tamamen iyonize  $^{140}\text{Pr}^{59+}$  iyonları için uygulanan stokastik ve elektron soğutma işleminin Schottky gürültü spektrumu Şekil 2.6'da görülmektedir. Şekil 2.6 (a) ve (b) yukarıdan aşağıya doğru iyonların yoğunluğunu, dönme frekanslarının fonksiyonu olarak sırasıyla stokastik ön soğutma ve elektron soğutması esnasındaki Schottky gürültü güç yoğunluk spektrumu halinde



göstermektedir. ESR deneysel depolama halkasında iyonların tek bir dolanımı yaklaşık 500 ns'lik bir sürede gerçekleşmekte ve iyon demetleri ESR deneysel depolama halkasındaki her bir turlarında 2-3 cm çapındaki elektron demetleriyle elektron soğutucuda yaklaşık 2.5 m'lik bir mesafe boyunca etkileşmektedir (Şekil 2.7).



**Şekil 2.7:** ESR deneysel depolama halkasının lineer kısımlarından birine yerleştirilmiş olan elektron soğutucu sistemin görüntüsü [49].

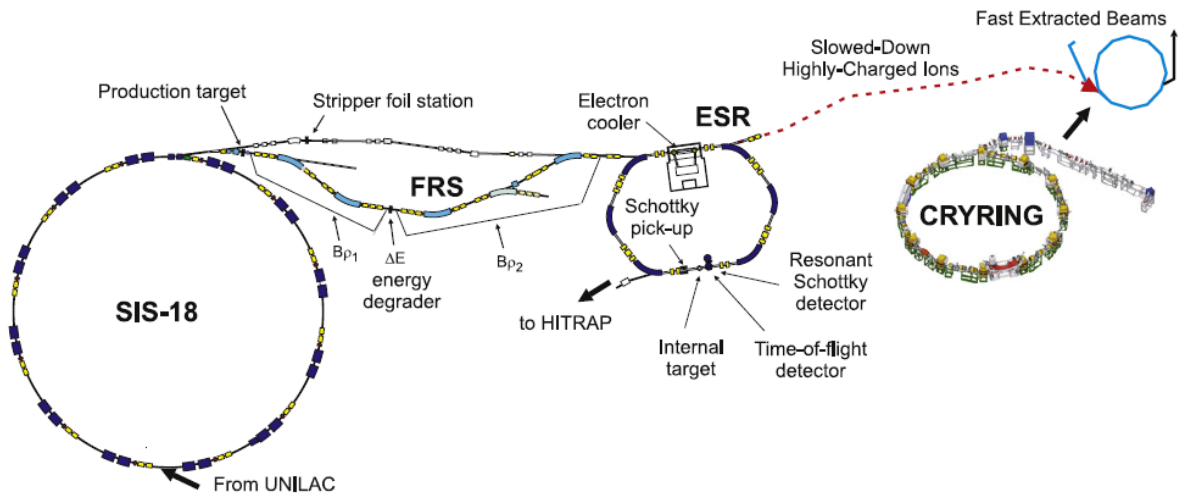
Deneysel depolama halkası ESR'de stokastik ve elektron soğutmaya maruz kalarak soğutulan iyonların bozunum mekanizmaları, istenilen süreler boyunca halka içerisinde depolanmalarıyla mümkün olmaktadır.

### 3. MALZEME VE YÖNTEM

#### 3.1. EGZOTİK ÇEKİRDEKLERİN GSI FRAGMENT AYIRICI VE DEPOLAMA HALKASI İLE ÜRETİLMESİ VE DEPOLANMASI

##### 3.1.1. Egzotik Çekirdeklerin GSI Fragment Ayırıcı ve Depolama Halkası ile Üretilmesi

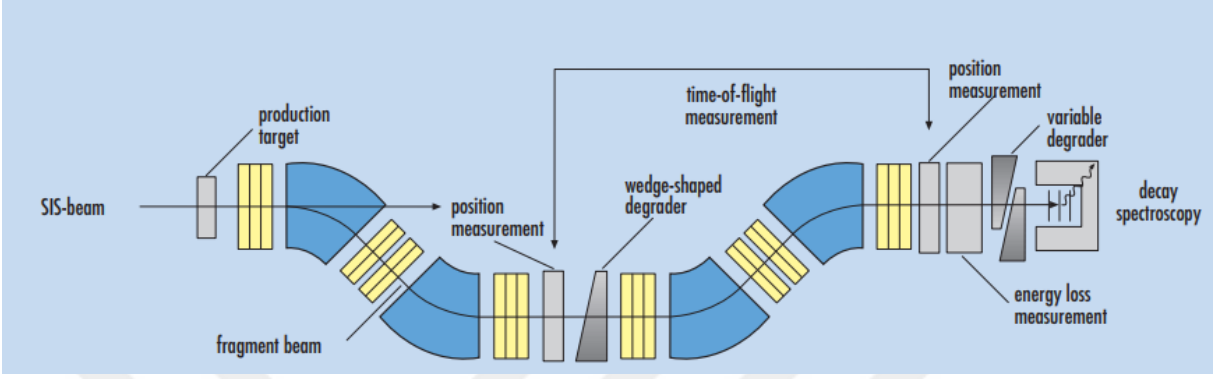
Ağır iyonlar üzerine yüksek enerjilerde araştırmalar yapabilmek amacıyla Almanya'nın Darmstadt şehrinde kurulan GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung GmbH isimli ağır iyon araştırmaları merkezi bünyesinde bulunan ve lineer hızlandırıcı UNILAC, ağır iyon sinkrotronu SIS, fragment ayırıcı FRS ve deneysel depolama halkası ESR'den oluşan hızlandırıcı tesisinde (bakınız Şekil 3.1) kararlı iyonlar ve bunların izotopları birkaç yüz MeV/u enerjilere hızlandırılıp, fragment ayırıcı FRS demet hattının girişinde bulunan üretim hedefine çarptırılarak egzotik çekirdekler uçuş halinde elde edilmekte, manyetik seçici olarak çalışan ayırıcıda fragmentler seçilerek deneysel depolama halkası ESR'ye aktarılmaktadır.



**Şekil 3.1:** GSI Nükleer Araştırmalar Merkezi bünyesinde bulunan hızlandırıcıların şematik gösterimi [47].

Şekil 3.2'de görülen FRS demet hattının girişinde bulunan ve egzotik çekirdeklerin üretilmesini sağlayan  ${}^9\text{Be}$  üretim hedefinden sonra fragmentlerin seçimini manyetik olarak sağlayan ve Bp (manyetik değişmezlik) olarak adlandırılan ayırıcı sistem yardımıyla aynı manyetik değişmezlik (Bp) değerinde bulunan egzotik iyonlar seçilerek ESR'ye enjekte edilmektedir. Bu sisteme ek olarak (ikinci bir ayırma yöntemi olarak) Bp-ΔE-Bp elektromanyetik ayırma

sistemi ile FRS demet hattının ortasına özel ayırıcı (alüminyum takoz şeklindeki degreder) nükleer yüke bağlı  $\Delta E$  enerji kaybı göz önünde bulundurularak tek bir iyon çeşidi de, tek iyon bozunumu incelenmek üzere depolama halkasına enjekte edilebilmektedir [48].



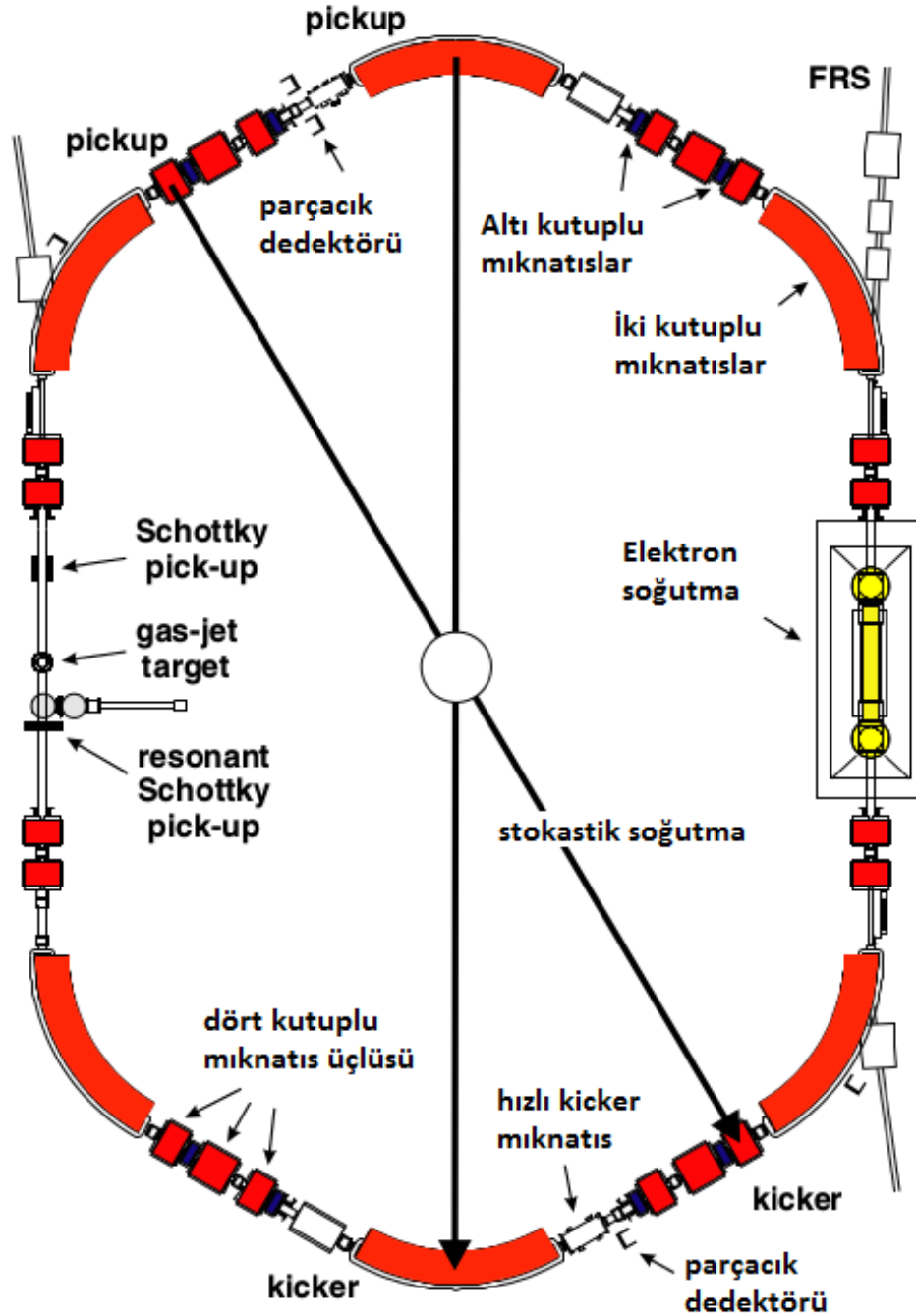
**Şekil 3.2:** Fragment Ayırıcı (FRS) demet hattını oluşturan odaklayıcı sistemlerin şematik görünümü [50]. Mavi ile gösterilen dipol mıknatıslar ve sarı ile gösterilen kuadrupol mıknatıslar iyonları saptırır ve odaklarken, fragmentlerin nükleer yüklerinin karesiyle orantılı olarak yavaşlamasına sebep olan alüminyum takoz şeklindeki ayırıcı hattın ortasında yer almaktadır.

### 3.1.2. Egzotik Çekirdeklerin GSI Fragment Ayırıcı ve Depolama Halkası ile Depolanması

FRS demet hattında üretilen iyon çeşitlerinin depolanması Şekil 3.3’de ayrıntılı olarak görülen ESR depolama halkasında gerçekleşmekte ve gözlemlenmek istenen bozunum koşulları uygulanan özel yöntemlerle burada elde edilmektedir. ESR depolama halkası iki yay ve iki düz kısım olmak üzere toplamda 108,36 m’lik bir çevreye sahip olup, parçacık demetleri halka içerisinde saat yönünde dönmektedir. ESR deneysel depolama halkası altı adet iki kutuplu eğici mıknatıstan (60 derecelik eğme açısına sahip) ve 5 adet dört kutuplu odaklayıcı ve dağıtıcı mıknatıs grubundan (toplamda 20 adet dört kutuplu odaklayıcı mıknatıs) oluşmaktadır. İkinci mertebeden iyon optik düzeltmeleri için gerekli iki adet altı kutuplu mıknatıs (toplamda 8 adet altı kutuplu mıknatıs) ailesi de ESR depolama halkasının yay kısımlarında bulunmaktadır. ESR depolama halkası maksimum 10 Tm’lik bir manyetik değişmezlik değeri ile çalışabilmektedir.

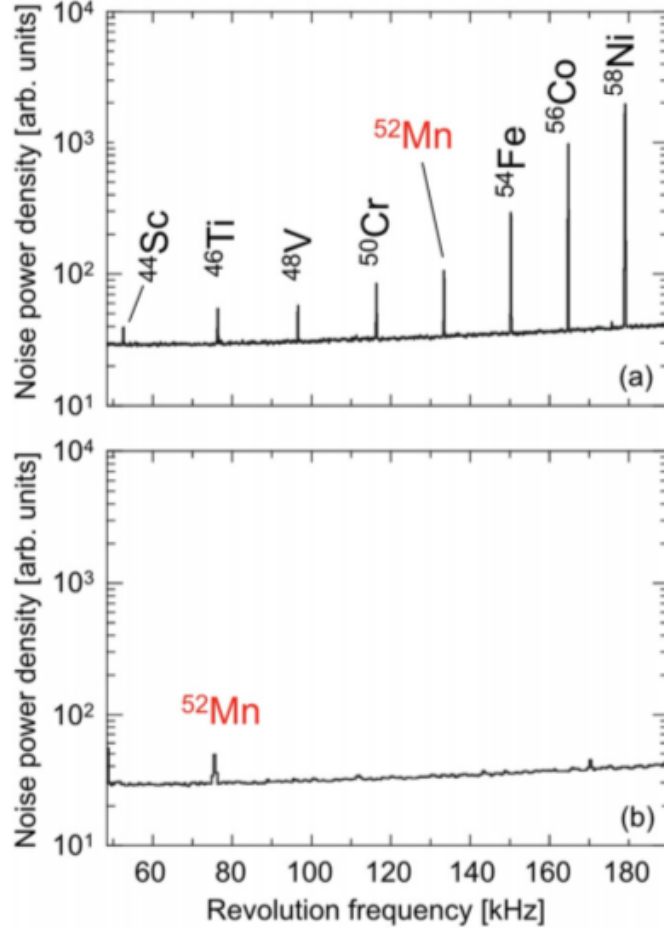
Özel deneysel gereksinimlere göre kokteyl ya da tek izotoplular demetler FRS ayırma sistemiyle ESR deneysel depolama halkasına enjekte edilmektedir. Kokteyl demetler, depolama halkasında gerçekleştirilen kütle ölçümlerinde kullanılırken, tek izotoplular demetler beta-

bozunumu gibi yarı ömür ölçümleri, reaksiyon çalışmaları, astrofiziksel proton yakalama ölçümleri ya da egzotik çekirdek üzerine yapılan çeşitli çalışmalar için tercih edilmektedir.



Şekil 3.3: İyon-Soğutma Depolama Halkası ESR'nin genel görünümü.

Şekil 3.4'te ESR deneysel depolama halkasında depolanan ve soğutulan kokteyl ve tek izotopun spektrumu görülmektedir. Şekil 3.4 (a) da birçok iyon depolanmışken, Şekil 3.4 (b) de sadece  $^{25}\text{Mn}^{25+}$  izotopu depolanmıştır.



**Şekil 3.4:** Nikel mermi çekirdeğinden oluşan fragmentlerin ESR deneysel depolama halkasında depolama ve soğutulması sonrası elde edilen spektrum [1].

Dairesel ya da doğrusal hızlandırıcılar ve depolama halkalarında relativistik hızlardaki parçacık demetlerinin yönlendirilmesi ve odaklanması Lorentz kuvveti dolayısıyla sadece manyetik alana bağlı olmaktadır. Düzgün bir manyetik alan altında, hız vektörü alan vektörüne dik olan parçacıklar yarıçapı  $\rho$  olan bir dairesel yörüngede hareket ederler. Dairesel hareket yörüngesinin yarıçapı olan  $\rho$ , momentum  $p$ , parçacığın yükü  $q$  ve manyetik alanın gücü  $B$  değerlerine  $B\rho = p/q$  formülü ile bağlıdır. Burada  $B\rho$  değeri manyetik alan değişmezliği olarak adlandırılırken, parçacığın momentum  $p = \beta\gamma m_0 c$  ile belirlenmektedir.  $m_0$  parçacığın

durgun hal kütlesi, gama relativistik Lorentz faktörü  $\gamma = 1/\sqrt{1-\beta}$  ve  $\beta = v/c$  dir. Eğici mknatıslarda uygulanan kuvvetler neticesinde dairesel yörüngelerde dolanan parçacıklar düz çizgiler halinde hareket edemezler. Betatron dalga boyu ile tarif edilen bir osilasyon benzeri harekete sahiptirler ki buna betatron osilasyonu denmektedir.

Dairesel yörüngede depolanan yükçe zengin radyoaktif iyonların, depolama halkasındaki ortalama dönme frekansı,

$$f = v/C = \beta \cdot c/C \quad (3.1)$$

ile verilmektedir. Burada C,  $v$  ortalama hızına sahip parçacığın yörünge uzunluğudur. Denklem (3.1)'in diferansiyel halini yazmak istersek,

$$\frac{df}{f} = \frac{dv}{v} - \frac{dC}{C} = \frac{d\beta}{\beta} - \frac{dC}{C} \quad (3.2)$$

olacaktır. Burada ikinci terim olan yörünge uzunluğunun diferansiyel halini,

$$\frac{dC}{C} = \alpha_P \frac{dp/q}{p/q} = \alpha_P \frac{dB_p}{B_p} \quad (3.3)$$

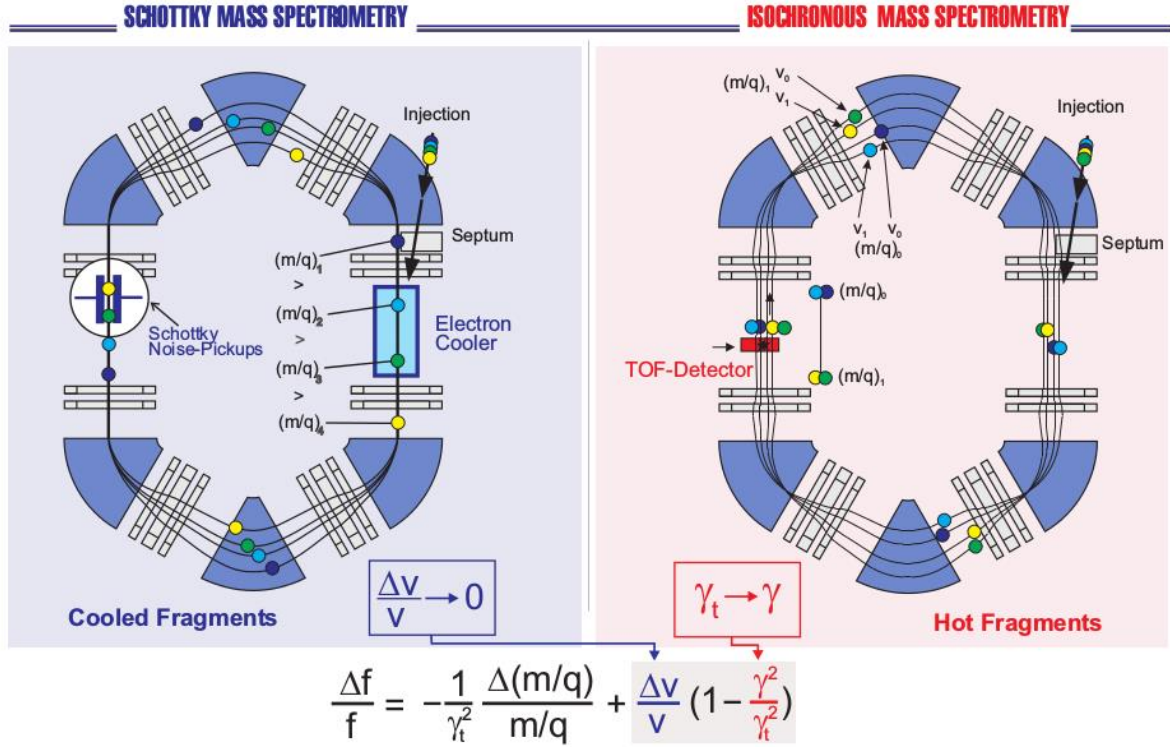
şeklinde yazabilmektedir. Burada  $\alpha_P$  momentum toplama faktörü olarak adlandırılmaktadır [48].  $\alpha_P$  değeri neredeyse tüm depolama halkası boyunca sabittir. Denklem 3.2 ile Denklem 3.3 bir arada yazılıp, düzenlenirse, depolama halkaları için kullanılan ana formül aşağıdaki haliyle elde edilmiş olunur.

$$\frac{\Delta f}{f} = -\alpha_P \frac{\Delta(m/q)}{(m/q)} + \gamma^2 \left( \frac{1}{\gamma^2} - \alpha_P \right) \frac{\Delta v}{v} \quad (3.4)$$

Yukarıdaki formülde,  $\Delta(m/q)/(m/q)$  oranı depolanan iyon çeşitlerinin kütle-yük değişimini,  $\Delta f/f$  depolanan iyon çeşitlerinin dönme frekans değişimini ve  $\Delta v/v$  ise hız yayılımını göstermektedir. Bu eşitlikten anlaşılacağı gibi, eğer denklemin sağ tarafında hız değişimini içeren terim sıfırlanır ya da ihmal edilirse depolanan iyon türlerinin kütle-yük değişimleri depolama halkasındaki dolanma frekanslarının değişimiyle orantılı olacaktır. Ancak ikincil demetlerin hız dağılımlarının depolanan iyon türleri üzerinde belli oranlarda etkisi olmaktadır. İkincil demetlerin hız dağılımları, birincil demetlerin faz-uzay yayılımını arttırmakta ve dolayısıyla deneysel ölçümün hatasını arttırmaktadır. Bu durumu ortadan kaldırmanın iki yolu bulunmaktadır (Şekil 3.5):

1. Isochronous Kütle Spektroskopisi (IMS)

2. Schottky Kütle Spektroskopisi (SMS)



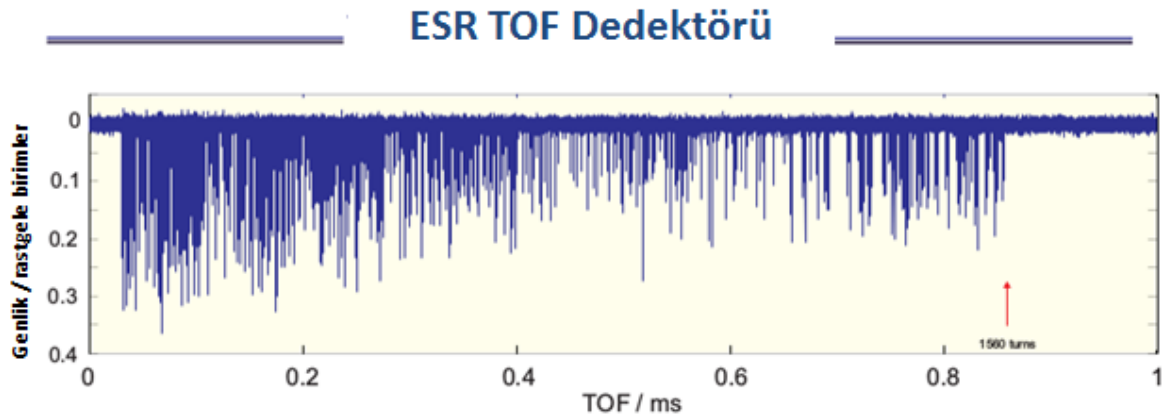
Şekil 3.5: ESR deneysel depolama halkasında depolanan iyonlara uygulanan iki farklı yöntem olan SMS (Sol kısım) ve IMS (sağ kısım)'nin temsili şeklidir [48].

### 3.1.2.1. Isochronous Kütle Spektroskopisi (IMS)

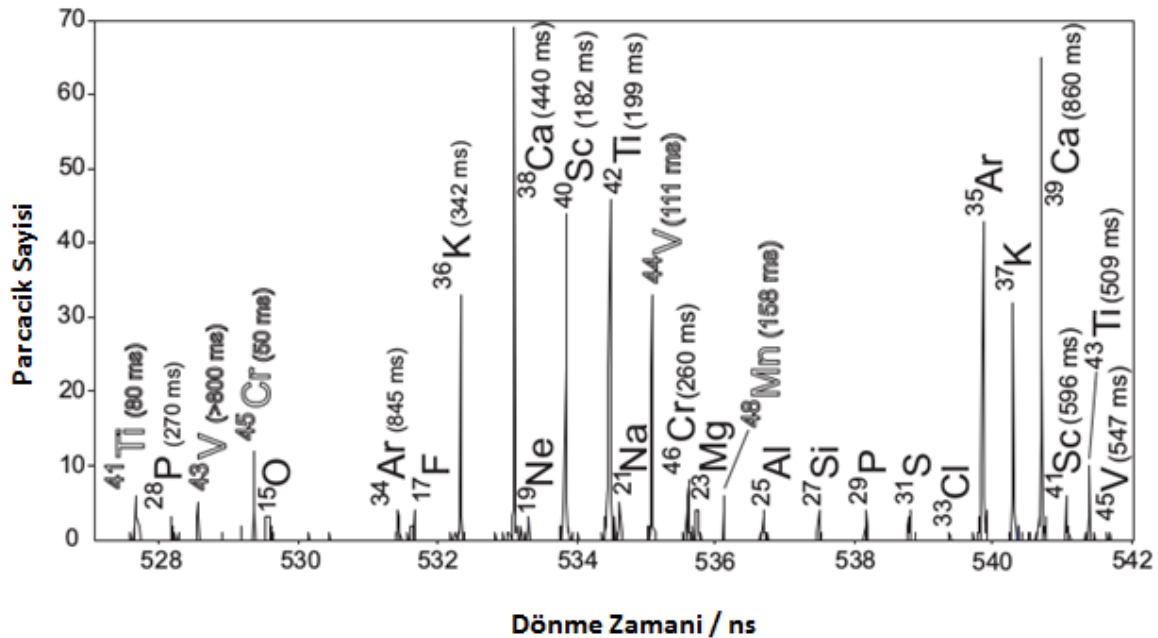
Isochronous Kütle Spektroskopisi (IMS) yöntemi ESR deneysel depolama halkasında araştırılmak üzere depolanan soğutulmamış (yavaşlatılmamış), kararsız, kısa-ömlü çekirdekler için uygulanan bir yöntemdir. IMS tekniği geçiş enerjisinde gerçekleştiğinden, bu enerjide verilen  $m/q$  oranına göre dönme frekansı  $f$  sabit olmaktadır. Burada depolanan her bir iyonun dönme zamanı, uçuş-zamanı (time-of-flight, TOF) yöntemi ile belirlenmektedir. IMS tekniğinde iyonlar, depolama halkası içine yerleştirilmiş çok ince, metalize bir karbon folyodan geçirilmekte ve her geçişlerinde elektronları kopartılmaktadır. İyonlardan kopartılarak elde edilen bu elektronların elektrik ve manyetik alanlar yardımıyla detektöre yönlendirilmesiyle elde edilen sinyaller toplanmakta ve böylelikle iyonların uçuş zamanları ölçülmektedir. Çok kısa sürede dedekte edilen bu sinyaller yardımıyla tüm iyonların zaman işaretleri toplamı,



periyodik olarak her geçiş sonunda kaydedilmektedir. Bu yöntemle, bilgisayar yazılımları kullanılarak her bir iyon için parmak izi niteliğinde olan TOF spektrumları (bakınız Şekil 3.6) elde edilmekte ve bu sonuçlardan faydalanılarak da tüm iyonlar için Şekil 3.7’de görülen frekans spektrumları oluşturulmaktadır.



**Şekil 3.6:** Geçiş enerjisi  $\gamma$ t değerinde depolanan birkaç iyonun TOF detektöründeki periyodik parmak izini gösteren grafik. Bir iyonun maksimum dönme sayısı 1560 olarak elde edilmiştir [48].



**Şekil 3.7:** <sup>52</sup>Cr demetinin fragmentleri için TOF detektöründen alınan dönme frekansı spektrumu [48].

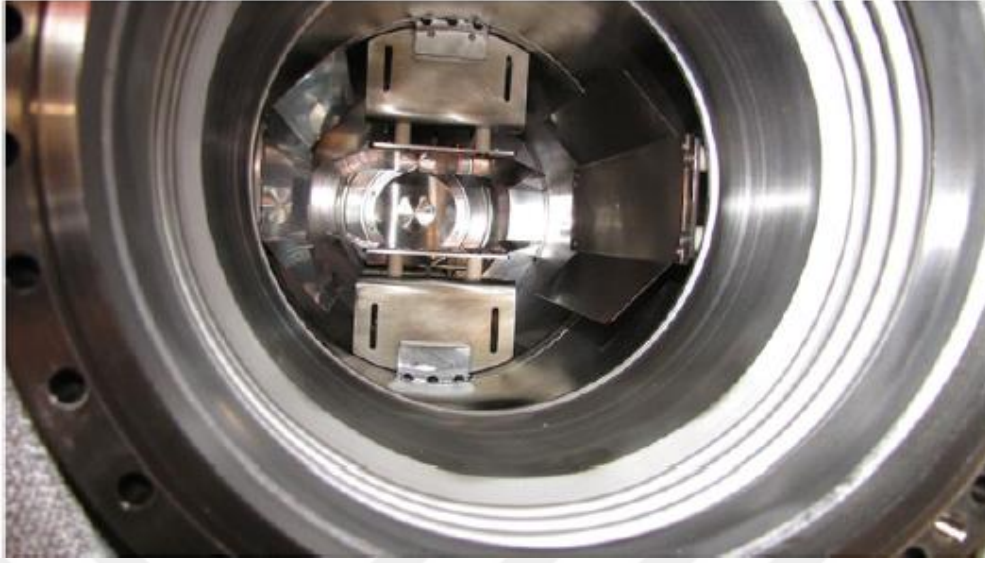


IMS tekniği, küçük üretim tesir kesitleriyle (mikrobarn ile nanobarn skalası arasında kalan tesir kesidi değerlerinde) üretilen kararsız kısa ömürlü çekirdeklerin mermi fragmentasyonu ya da fisyonunda kullanılmaktadır. Yapılan ilk deneyde orta ağırlıktaki çekirdekler için birkaç 100 keV'lik bir netliğe tekabül eden yaklaşık  $10^5$  kütle çözünürlük gücüne ulaşılmıştır. IMS tekniği ile depolanan tek bir iyonun yükünden bağımsız olarak detekte edilmesi sağlanmaktadır. Bu teknikle ancak yarı ömürleri birkaç mikrosaniye olan çekirdekler ölçülebilmektedir.

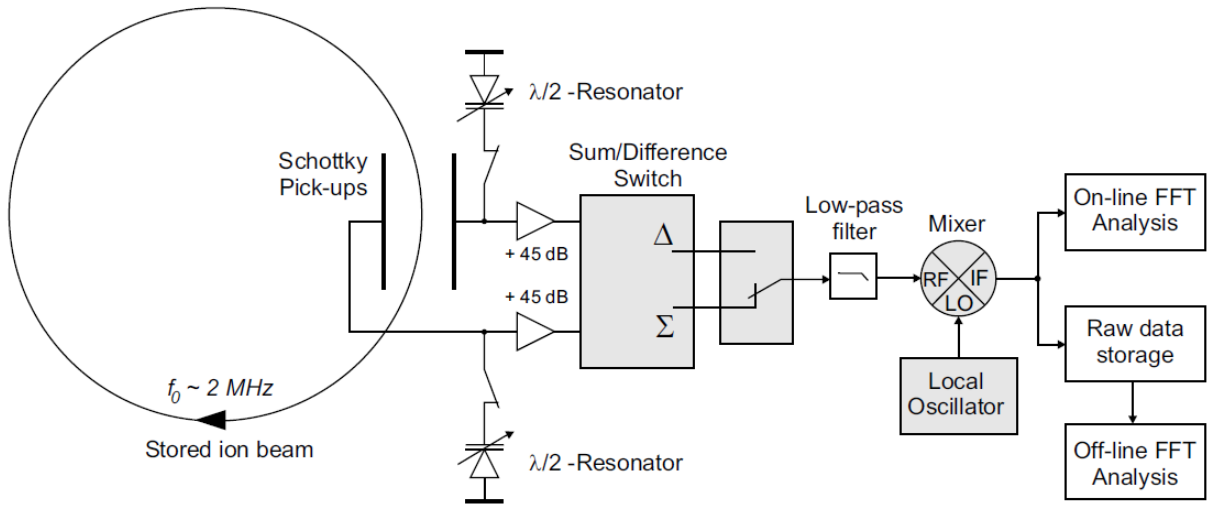
### 3.1.2.2. Schottky Kütle Spektroskopisi (SMS)

Deneysel depolama halkası ESR'de depolanan, elektronlar ile soğutulmuş (yavaşlatılmış) iyonların tümü soğutucu elektronlar tarafından aktarılan ortak bir sürate sahip olduğu için sürat dağılımları  $\Delta v$  ihmal edilecek kadar küçüktür. Dolayısıyla depolanan her bir iyon türü için dönme frekansı ile  $m/q$  oranı birbiriyle orantılı olmaktadır. Denklem 3.4'ün sağ tarafındaki ikinci terimi yok etmenin en etkili yolu demet soğutma işleminin uygulanmasıdır. Bu da ancak ismini Schottky pick-up dedektöründen alan Schottky Kütle Spektroskopisi yöntemi ile mümkün olmaktadır.

Depolama halkası içinde dönen iyonlar, Şekil 3.8'de görülen, halka içerisine yerleştirilmiş, 25 cm uzunluğunda bakırdan yapılmış ve boyuna Schottky gürültü analizi için dik ve enine Schottky analizi için yatay yerleştirilmiş bir çift plakaya (Schottky Gürültü pick-up), her dönüşü esnasında sahip olduğu  $q$  yükünün karesi olan  $q^2$  kadar yük indükler, bu sinyaller toplanır, Fourier dönüşümü ile düzeltilir ve yerel bir osilatör yardımıyla dönme frekansından birkaç yüz kHz'lük frekans aralığına çevrilir (Şekil 3.8). Temelde, ana dönme frekansının tüm harmonikleri (2 MHz) bu amaçla kullanılabilir. Zaman ayarlı bir data toplama sistemi tüm iyonların frekanslarını kaydedecek kadar geniş olan bant aralığını, birkaç Hz'lik yüksek çözünürlükle birleştirebilmektedir.



**Şekil 3.8:** ESR depolama halkası içerisine yerleştirilmiş Schottky pick-up plakaları.

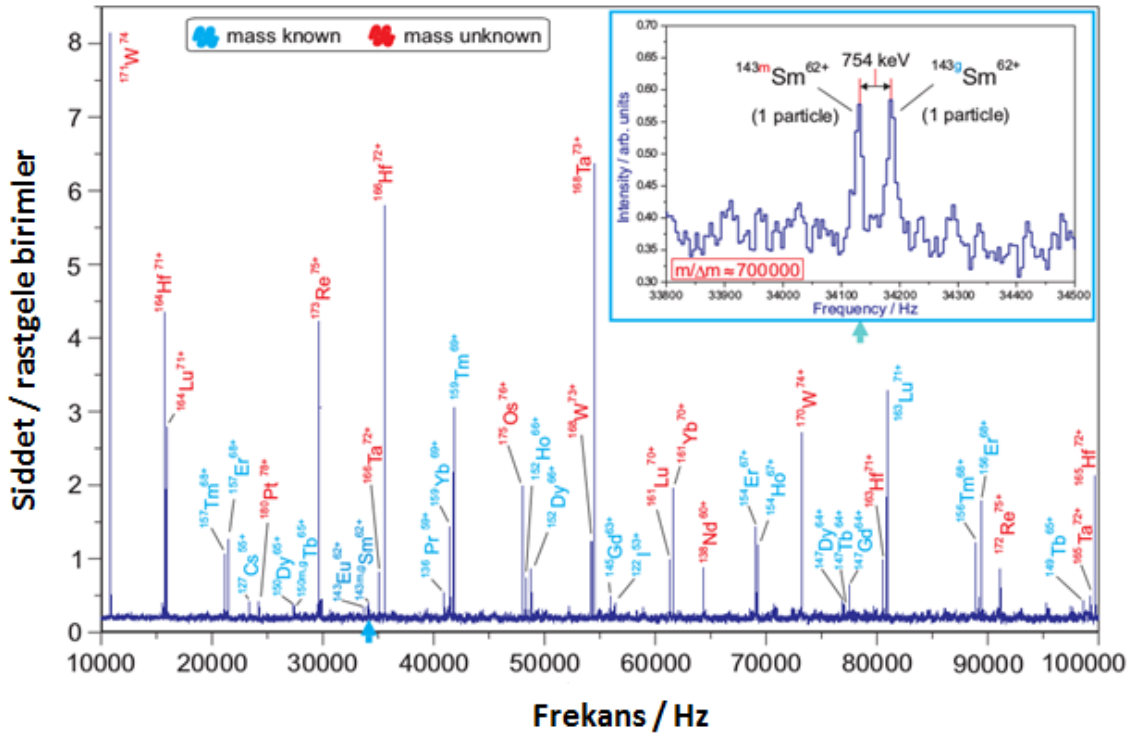


**Şekil 3.9:** ESR depolama halkasındaki Schottky veri toplama sisteminin şematik gösterimi [50].

Çevresi yaklaşık 108.4 m olan ESR depolama halkası içerisinde depolanan iyonların dönme frekansları 2 MHz'dir ve kinetik enerjileri yaklaşık 350 MeV/u'dur ki bu da 530 ns'ye denk düşmektedir. 60 MHz'lik sinyal frekansına tekabül eden ve plakalar tarafından algılanan sinyalin 30-34. harmoniği düşük gürültü yükselteçleri ile yükseltilecek toplanır. Bu şartlar sağlanırken ESR depolama halkasının frekans bant aralığı 300 kHz'dir. Şekil 3.9'da da görülen mikser yardımıyla sinyal frekansı 0-300 kHz aralığına çevrilir. Düşük-geçiş filtresi, miksere

yüksek frekansların geçişini engellerken, düşük frekans-çıkışı (IF) sinyali ikiye bölerek online ve offline analizi mümkün kılmaktadır. Online analizler deney esnasında sonuçların gözlemlenmesi için alınırken offline analizler deney sonrası analizler için kaydedilmektedir.

Şekil 3.10'daki kütlesi bilinen iyonlara denk düşen frekanslar yardımıyla,  $f \propto m/q$  oranından faydalanılarak, bilinmeyen kütleler hesaplanabilmektedir. Kıyaslama yapabilmek için, benzer sinyal-gürültü parametrelerine rezonans pick-up detektörlerle de 30 ms'lik sürelerde ve azaltılmış bant genişliklerinde ulaşılabilir. SMS tekniğinin tek dezavantajı, soğutma sürecinin ve spektrum oluşumunun birkaç saniye sürmesinden kaynaklı zaman kaybıdır. Dolayısıyla, SMS tekniği ile yarı ömrü 1 sn den fazla olan iyonlar için ölçüm alınabilmektedir [5]. Şekil 3.10'un içerisinde ayrıca görülen spektrumda tamamen iyonize  $^{143}\text{Sm}$  iyonunun temel ve izomerik seviyesi tek depolanmış iyon cinsinden görülmektedir.

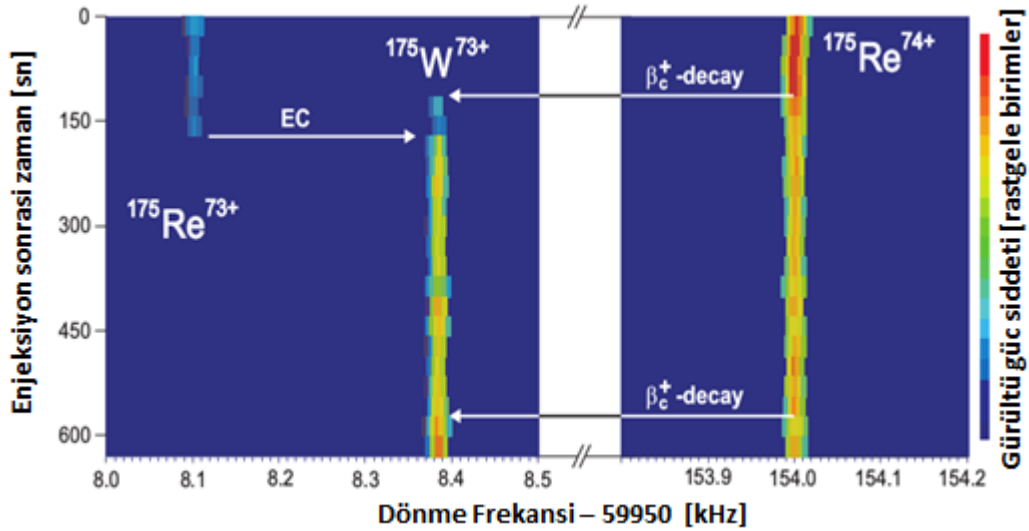


Şekil 3.10:  $^{209}\text{Bi}$  mermi iyonlarından 30 sn'lik sürede üretilen fragmentlerin ESR depolama halkasındaki pick-up plakalar ile ölçülen Schottky frekans spektrumunun bir kısmını gösteren grafik [5].

Ayrıca, spektrumdaki herhangi bir frekans pikinin alanı, iyonun yükünün karesi ile değişmekte ve piklerin alanı ise depolanan iyon sayısını göstermektedir. Dolayısıyla, pik alanlarında

zamanla meydana gelen değişimleri ölçmekle depolama halkasında gerçekleşen bozunumlar ölçülmüş olmaktadır. Buna, zaman çözünürlüklü Schottky spektrometresi denmekte ve bu yöntem, depolama halkası bozunum ölçümlerinin temelini oluşturmaktadır [5]. Zaman çözünürlüklü SMS spektrometresi, anne çekirdeklerin bozunumlarını ve kız çekirdeklerin oluşumlarını eş zamanlı olarak gösterebildiğinden (Şekil 3.11), yarı ömür ölçümleri için gerekli bilgileri sağlamakta önemli bir yer tutmaktadır.

Şekil 3.11’de, ESR depolama halkasında radyoaktif bozunumlar sonucu meydana gelen üç adet Hidrojen benzeri  $^{175}\text{W}^{73+}$  iyonunun bir tanesi, Helyum benzeri  $^{175}\text{Re}^{73+}$  tek iyonunun ESR depolama halkasına girmesini takiben 3 dk’lık süre zarfında gerçekleşen elektron yakalama bozunumu sonucu, diğer iki tanesi ise Hidrojen benzeri  $^{175}\text{Re}^{74+}$  iyonunun ESR depolama halkasına girmesini takiben sırasıyla 2 ve 10 dk’lık süre zarfında gerçekleşen üç cisimli beta bozunumu sonucu üretilmesi sürecini göstermektedir. Elektron yakalama bozunumu sonucu yük durumu değişmediğinden dönme frekansında 300 Hz’lik küçük bir değişim gözlenirken, üç cisimli beta bozunumunda yük bir birim değiştiğinden dönme frekansında 140 kHz’lik belirgin bir değişim meydana geldiği görülmektedir.

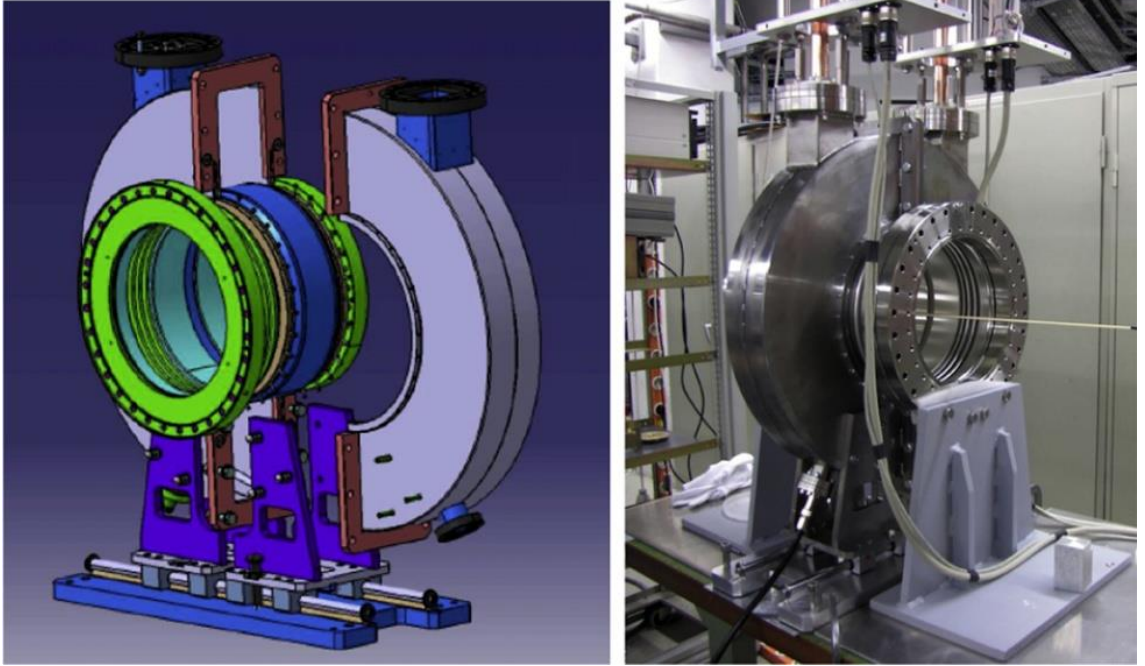


Şekil 3.11: Depolanmış  $^{175}\text{Re}^{74+}$  iyonlarının zaman çözünürlüklü Schottky spektrometresini gösteren grafik [5].

ESR depolama halkasında depolanan tek iyonların iki cisimli beta bozunumunun incelenmesi için pick-up dedektörüne ek olarak yeni Schottky dedektörü geliştirilmiştir [49]. Rezonans

kavite şeklinde tasarlanan yeni dedektör hızlandırıcı kavitelerinde benzer şekilde seramik bir boşluğa sahip olup, ESR depolama halkası vakum tüpüne yerleştirilmiştir. Dielektrik malzemeden üretilen bu seramik boşluk, depolama halkasında dönmekte olan iyonların elektromanyetik çiftlenimine müsaade etmekte olup, vakum tüpünün dış çevresine yerleştirilen, elektriksel olarak vakum tüpüne bağlanan pillbox tipi, dış çapı 60 cm ve uzunluğu yaklaşık 10 cm olan rezonans kavite sayesinde, kaviteyi rezonans modunda geçen her bir parçacığın sadece pillbox üzerindeki akım bileşenine sahip ilk öz modunun radyal ve düşey doğrultularını ölçmektedir. Dolayısıyla, kavite Şekil 3.12 (sol)'de görüldüğü gibi iki an parça halinde üretilmiştir.

Kavite tasarımıyla 245 MHz'lik bir rezonans frekansı elde edilmiş olup bu frekans değeri dönme frekansının 120. harmoniğine denk düşmektedir. Rezonans Schottky dedektörünün frekans analizi birkaç milisaniye mertebesinde olduğundan pick-up dedektörlerinden 1000 kat daha hızlı sonuç vermektedir. Soğutucu parametrelerinin değişmesine ayak uydurabilmesini sağlamak için dedektörün üst kısmında yer alan portlarda bulunan özel bakır bloklar ile kavite hacmi ayarlanabilmektedir. Rezonans kavite dedektörü ile ilgili ayrıntılı bilgiler Ref.[49] içerisinde bulunabilir.



**Şekil 3.12:** Sol resim Rezonans Schottky dedektörünün şematik gösterimidir. Sağ resim ise Rezonans Schottky dedektörünün fotoğrafıdır [49].

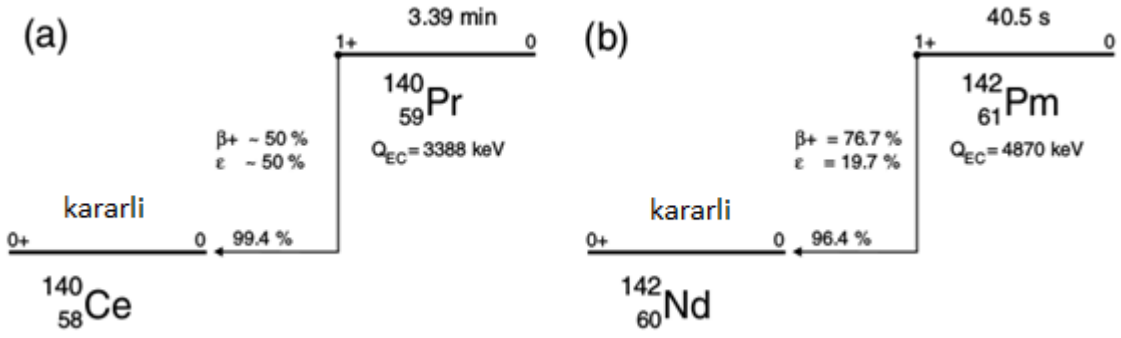
Rezonans Schottky kavitesinin veri toplama ve analiz sistemi Şekil 3.9'da da görülen pick-up dedektörünün veri toplama, depolama ve analizi ile aynı mekanizmada olup anne ve kız çekirdeklerin bozunum mekanizmaları görsel olarak spektrum analizörleri ile deney esnasında gözlemlenebilmektedir ve sonrasında yapılacak ileri analizler için kaydedilebilmektedir.

### 3.2. TEK VE İKİ ELEKTRONLU İYONLARIN YÖRÜNGESEL ELEKTRON YAKALAMA BOZUNUMLARI

Birkaç elektronlu sistemlerin elektron yakalama bozunumlarının incelenmesi ve analizi ancak depolanmış ve soğutulmuş (yavaşlatılmış) iyonların zaman çözünürlüklü Schottky spektrometreleriyle mümkün olmaktadır. Dolayısıyla, depolama halkasına her dönüşte birkaç iyon enjekte edilmeli ve bu iyonların elektron yakalama bozunum zamanları en iyi şekilde tespit edilmelidir. Hidrojen benzeri ve Helyum benzeri iyonların elektron yakalama bozunumu üzerine şimdiye kadar iki çekirdek üzerinde çalışılmıştır. İncelenen  $^{140}_{59}Pr$  ve  $^{142}_{61}Pm$  iyonlarının bozunum diyagramları Şekil 3.13'de gösterilmiştir. Her iki iyon çeşidi de tek izinli Gamow-Teller geçişi olan  $1+ \rightarrow 0+$  geçişi ile ( $\Delta I = I_i - I_f = 1$ ) ve parite değişimine uğramadan ( $\pi_i \cdot \pi_f = +1$ ) kız çekirdeklerinin temel seviyelerine bozunmaktadır. Bu iki iyon, saf Gamow-Teller geçişi ile neredeyse %100 oranla  $\beta^+$  veya EC bozunumu yaparak temel seviye kız çekirdeklerine bozdukları için seçilmiş olup, son durumda, enerji ve momentum korunumu ile ilişkili olarak tek renkli bir nötrino ve saçılan bir kız çekirdek meydana getirmektedirler. Ek olarak, bozunum esnasında başka herhangi bir parçacık (X ışını ya da  $\gamma$  ışınları) oluşmamaktadır ki bu sebeple bu reaksiyonlara temiz kuvantum şartları altında gerçekleşebilen reaksiyonlar da denmektedir.

Depolama halkasında dönen iyonların elektron yakalama bozunumu yaptıkları, dönme frekansı  $f$ 'deki küçük bir  $\Delta f$  artışından anlaşılmaktadır ve bu fark bozunumun  $Q_{EC}$  değerine tekabül etmektedir. Bu değerlerin tespiti için kütlesi önceden bilinen iyonlar yardımıyla kalibrasyon yapılarak  $f \sim m/q$  oranı hesaplanmaktadır.

Hidrojen ve Helyum benzeri  $^{140}Pr$  ve  $^{142}Pm$  iyonları FRS demet hattında  $B\rho - \Delta E - B\rho$  ayırıştırma yöntemiyle üretilerek, ESR deneysel depolama halkasında 400 MeV/u enerjide depolanmakta ve ESR'deki her bir turlarında stokastik ön soğutma ve elektron soğutmasına maruz kalarak sürekli beta ve elektron yakalama bozunumu yapmaktadırlar.

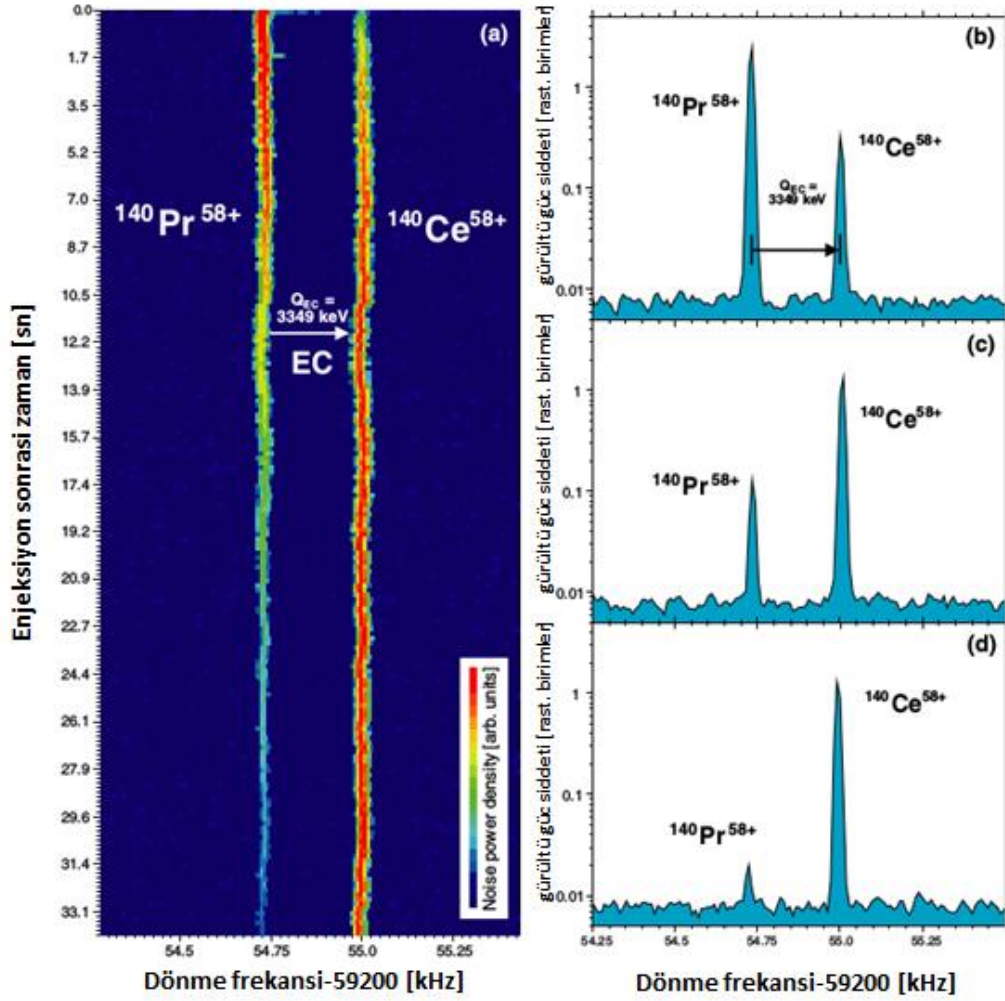


Şekil 3.13:  $^{140}\text{Pr}$  (a) ve  $^{142}\text{Pm}$  (b) iyonlarının bozunum şeması [1].

ESR deneysel depolama halkasında depolanan ve soğutulan  $^{140}\text{Pr}^{58+}$  iyonlarına ait Schottky spektrumları Şekil 3.14'te verilmiştir. Atomik yük değişim ve nükleer beta ve elektron yakalama bozunumlarının bir arada görülebildiği spektrumda anne çekirdekten kız çekirdeğin hangi bozunumla, depolama halkasına enjeksiyonundan sonra hangi zaman ve frekans aralıklarında oluştuğu gözlenebilmektedir.

$^{140}\text{Pr}^{58+}$  iyonlarının elektron yakalama bozunumunda, kütle  $Q_{EC}/c^2$  değeri yaklaşık olarak 3.35  $\text{MeV}/c^2$  kadar değişmektedir. Kütledeki bu değişim dönme frekansında da küçük bir farka (yaklaşık 270 Hz) yol açmaktadır. Dolayısıyla elektron yakalama bozunumu sonucunda anne ve kız çekirdekler Schottky frekans spektrumunda birbirlerinden ayrı olarak gözlemlenmektedir.

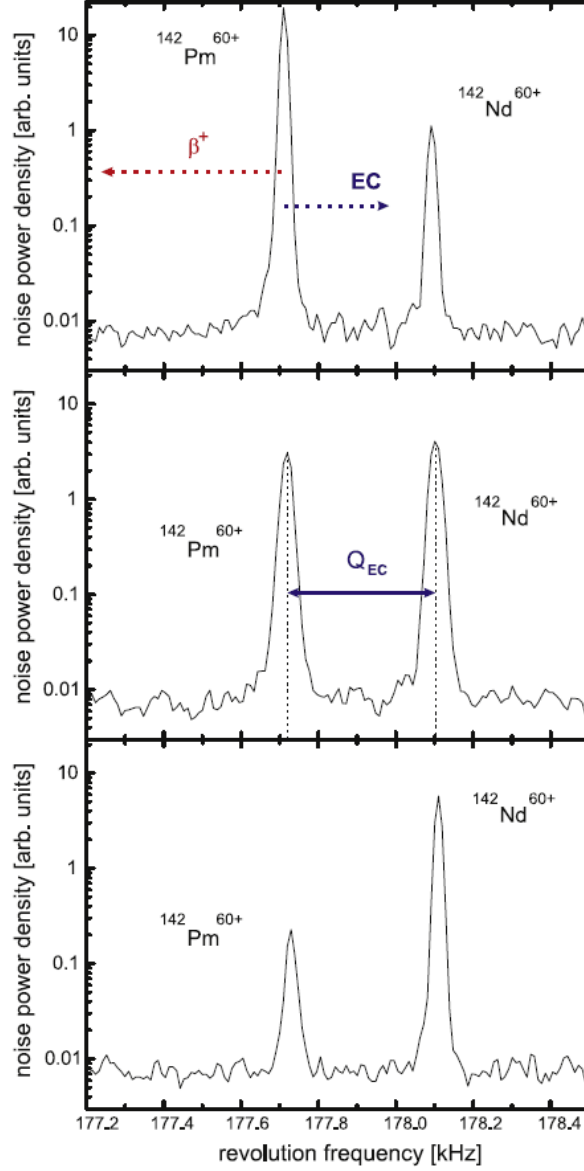




**Şekil 3.14:** ESR deneysel depolama halkasında depolanan ve soğutulan  $^{140}\text{Pr}^{58+}$  iyonlarının Schottky frekans spektrumu (a). (b), (c) ve (d) grafikleri logaritmik olarak sol tarafta görülen bozunumun başlangıç, orta ve son aşamalarını temsil etmektedir. (a) spektrumunun yoğunluk değişiminden  $^{140}\text{Pr}^{58+}$  anne çekirdeğinin bozunarak  $^{140}\text{Ce}^{58+}$  kız çekirdeğine dönüştüğü açıkça görülmektedir [1].

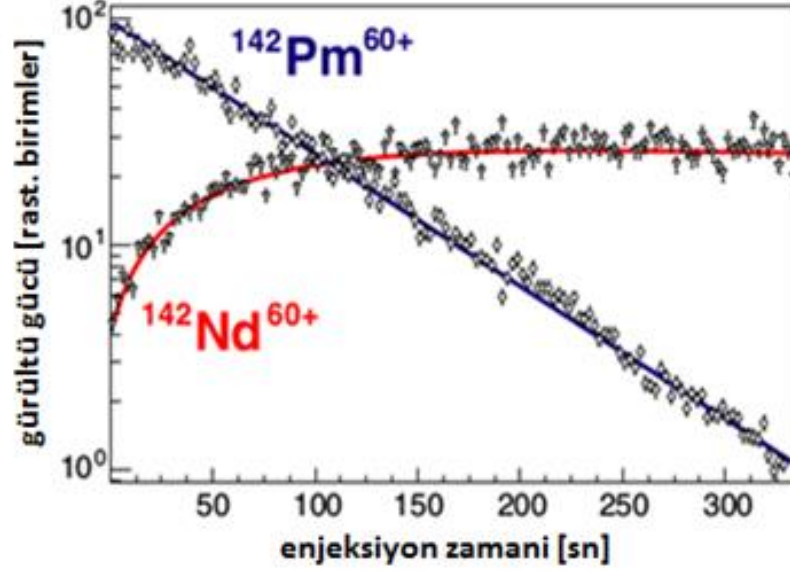
ESR depolama halkasında depolanan ve soğutulan  $^{142}\text{Pm}^{60+}$  iyonlarının elektron yakalama bozunumları 2010 yılında yapılan deneyle gözlemlenmiş ve bu deneye ait bozunum ve oluşum eğrileri zaman çözünürlüklü Schottky kütle spektroskopisi ile ölçülmüştür (Şekil 3.15).





**Şekil 3.15:**  $^{142}\text{Pm}^{60+}$  iyonlarının ESR depolama halkasındaki elektron yakalama bozunumları sonucu  $^{142}\text{Nd}^{60+}$  iyonlarına dönüşümünü gösteren grafikler [1].

Hidrojen benzeri  $^{142}\text{Pm}^{60+}$  iyonlarına ait fit edilmiş bozunum eğrileri Şekil 3.16'de gösterilmektedir. Anne iyonların bozunumu,  $N_p(t) = N_p(t_0)e^{-\lambda t}$  denklemindeki toplam bozunum sabiti  $\lambda = \lambda_{\beta_c} + \lambda_{EC} + \lambda_{kayıp}$  cinsinden tanımlanmakta ve kız çekirdeğin oluşumu ise  $\lambda = \sum_i \lambda_i$  ile verilmektedir ve burada  $i$ , her bir bozunum için ayrı ayrı bozunum sabitleri ile kayıplardan gelen bozunum sabitlerini ( $\beta_{EC}$ , EC, REC vs... gibi) ifade etmektedir.



**Şekil 3.16:** Hidrojen benzeri  $^{142}\text{Pm}^{60+}$  iyonlarının elektron yakalama bozunumu ile  $^{142}\text{Nd}^{60+}$  kız çekirdeğine bozunumu görülmektedir.

Hidrojen benzeri iyonlar için yapılan deneysel çalışmalarda, bu atomlardaki bağlı elektron sayısı ikiden bire düşürülmüş olsa da elektron yakalama bozunumunun gerçekleşme olasılığı bu iyonlar için %50 oranında artış göstermiştir. Hidrojen benzeri  $^{142}\text{Pm}$  iyonunun nötral atomlardan daha hızlı bir şekilde elektron yakalama bozunumu yaptığını düşünürsek, tek bir elektronun bağlı 61 elektrondan daha baskın olduğunu da gözlemlemek mümkün olmaktadır.  $^{142}\text{Pm}$  iyonlarının deneysel elektron yakalama bozunum sabitlerinin, Helyum benzeri ve Hidrojen benzeri iyonik durumları için kıyaslaması yapıldığında  $\lambda_{\text{H-benzeri,EC}} / \lambda_{\text{He-benzeri,EC}} = 1.44(8)$  olarak elde edilmiştir. Deneysel sonuçlar göstermektedir ki, Hidrojen benzeri iyonların elektron yakalama bozunum oranları diğer iyonlara göre %50 daha hızlıdır.

Bozunumun leptonik ve nükleer sistemlerinin, elektron yakalama bozunumundan önce ve sonraki ilk ve son toplam açısal momentum korunumu göz önüne alındığında bu sonucun doğal olduğu anlaşılmaktadır.

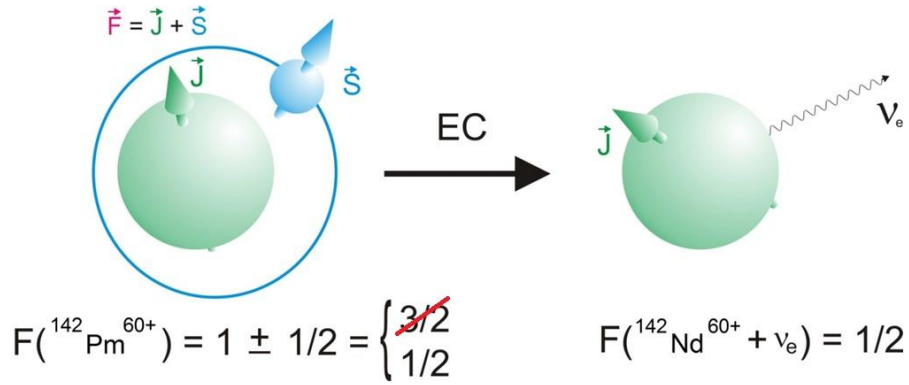
## 4. BULGULAR

### 4.1. $^{142}\text{Pm}^{60+}$ İYONUNUN TEK İYON BOZUNUM SPEKTROSKOPİSİ

Şimdiye kadar bahsedilen tüm temel bilgiler Hidrojen ve Helyum benzeri Pr ve Pm iyonlarının bir ya da iki elektronlu bozunum mekanizmalarının anlaşılması üzerine kurulmuştur. 2014 yılında GSI ağır iyon araştırmaları merkezi bünyesindeki ESR depolama halkası ile yapılan çalışma,  $^{142}\text{Pm}^{60+}$  iyonlarının tek elektronlu bozunum spektroskopisi üzerinedir. 2010 yılında, Rezonans Schottky detektörünün geliştirilmesiyle Shottky frekans spektrumun sinyal-gürültü karakteristiklerinin artırılması, ölçülen spektrumların daha verimli analizine yol açmış olup, bu dedektörle  $^{142}\text{Pm}^{60+}$  iyonlarının elektron yakalama bozunumları 2014 yılında ayrıntılı olarak incelenmiştir[5].

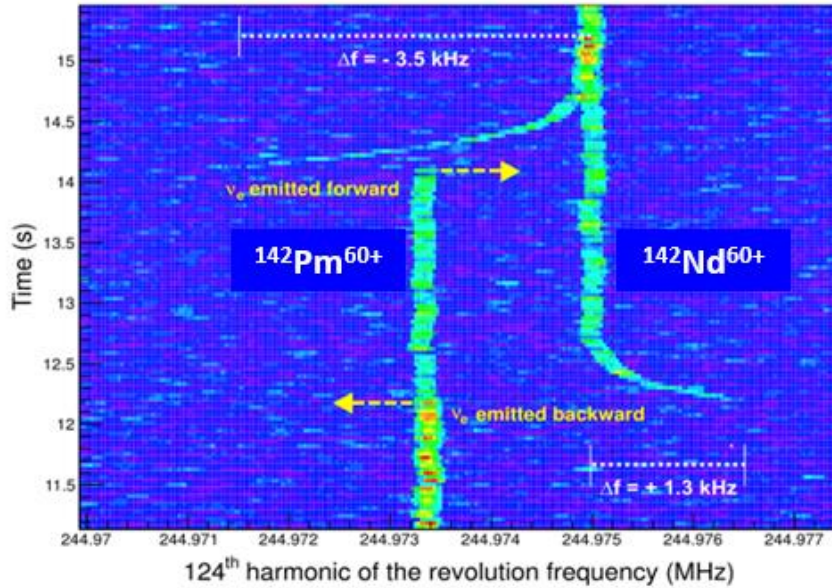
Hidrojen benzeri  $^{142}\text{Pm}^{60+}$  iyonunun ilk durumu  $I_i$  ile temsil edilmekte olup  $I_i = 1$ 'dir ve bağlı elektron atomik s-yörüngesinin 1s durumunu işgal etmektedir (elektronun spinini  $S_e = 1/2$ 'dir). Nükleer spinin sıfırdan farklı olduğunu düşünürsek, toplam açısal momentumları  $F_i = I_i + S_e = 3/2$  ve  $F_i = I_i - S_e = 1/2$  olan ve aralarındaki enerji farkı 1 eV olan aşırı ince (hyperfine) iki seviye oluşmaktadır.  $^{142}\text{Pm}$  iyonunun manyetik moment değeri  $+2.5\mu_N$  olarak hesaplanmıştır [1]. Bu Pozitif manyetik moment değeri  $^{142}\text{Pm}$  iyonunun ancak  $F_i = 1/2$  durumunda bulunabileceğini göstermektedir. Bozunum sonrası son durum  $I_f$  ile gösterilmiş olup, nükleer ve nötrino spinleri sırasıyla  $I_f = 0$  ve  $S_v = 1/2$  olmaktadır. İzinli durumda nötrino, sıfır açısal momentumla çekirdekte yayımlanmaktadır. Dolayısıyla sistemin toplam açısal momentumu son durum için  $F_f = 1/2$  ile sınırlandırılmaktadır.

Şekil 4.1'de,  $^{142}\text{Pm}^{60+}$  iyonunun saf Gamow-Teller geçişi olan  $1+ \rightarrow 0+$  geçişi ile ( $\Delta I = I_i - I_f = 1$  ve parite değişimi yok  $\pi_i \cdot \pi_f = +1$ )  $^{142}\text{Nd}^{60+}$  kız çekirdeğinin temel seviyesine bozunumu temsili olarak gösterilmektedir. Şekil 3.12'de gösterilen bozunum kanalına toplam açısal momentumun korunum yasası gereğince Şekil 4.1'deki mekanizma yardımıyla ulaşılarak anne çekirdeğin temel seviyesinden kız çekirdeğin temel seviyesine ulaşılmaktadır.



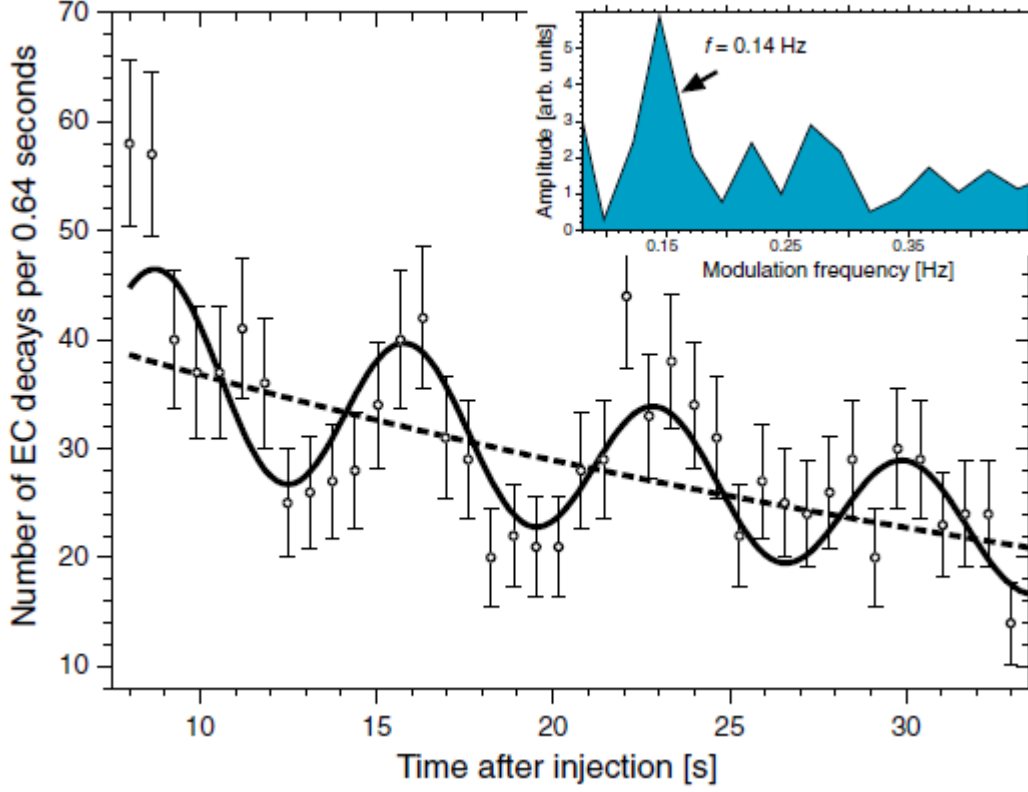
**Şekil 4.1:**  $^{142}\text{Pm}^{60+}$  iyonunun izinli Gamow-Teller geçişi ile  $^{142}\text{Nd}^{60+}$  kız çekirdeğinin temel seviyesine bozunumunu gösteren temsili şekil.

Elektron yakalama sonucu oluşan kız çekirdeğin hız bileşenlerinin uyumsuzluğu ardısıra uygulanan stokastik ve elektron soğutma (yavaşlatma) işlemi ile hızlı bir şekilde giderilmiş ve Şekil 4.2'deki Schottky frekans spektrumu elde edilmiştir. Bu spektrumda kız çekirdeğin soğuma kuyruğu (frekans izi) net bir şekilde görülmektedir. Anne çekirdekler ise birkaç mili saniyelik sürelerde doğru hızlara soğutularak depolanmış ve 64 sn'lik süre sonunda kicker (tekmeleyici) magnetler ile halka dışına alınmıştır.



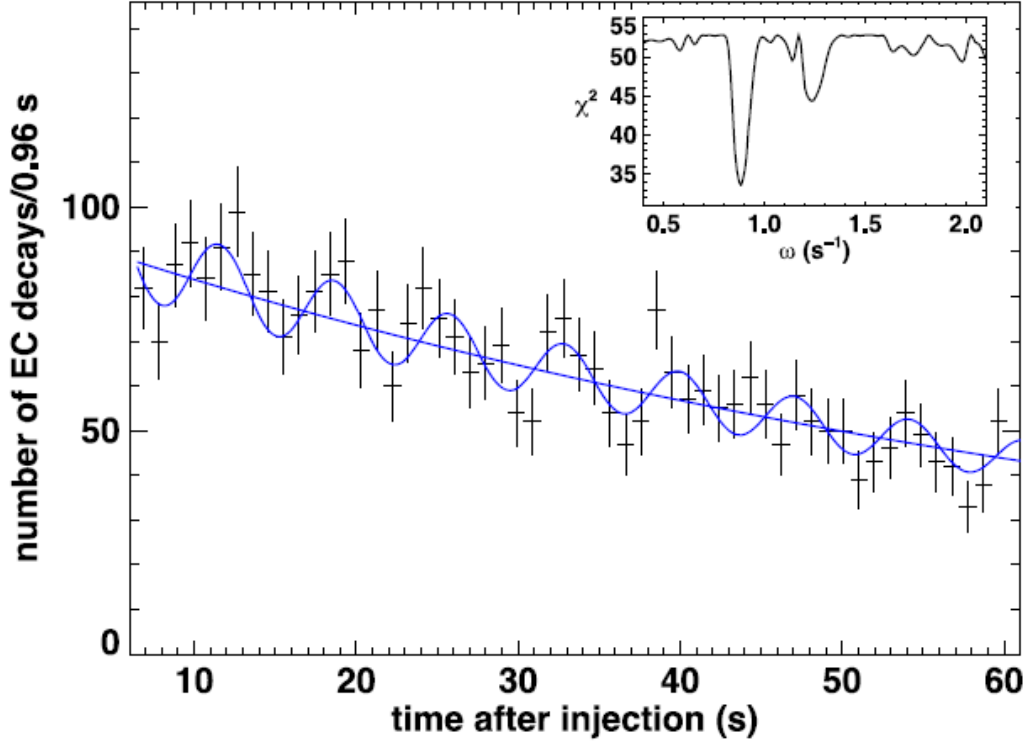
**Şekil 4.2:** Hidrojen benzeri  $^{142}\text{Pm}^{60+}$  iyonlarının örnek bir Schottky frekans spektrumu. Spektrum yeni rezonatör detektörün dönme frekansının 124. harmoniğinde kaydedilen elektron yakalama spektrumdur. Spektrumda zaman ve frekans dönüşümü sırasıyla 32 ms ve 31.25 Hz olarak ifade edilmektedir [5].

2008 yılında yapılan deneysel çalışma ile 7011 Hidrojen benzeri  $^{142}\text{Pm}^{60+}$  iyonu ESR depolama halkasına enjekte edilmiş olup, 2740 adet elektron yakalama bozunumu seçilerek analiz edilmiştir (Şekil 4.3).



Şekil 4.3: 2008 yılında ESR depolama halkasında  $^{142}\text{Pm}^{60+}$  iyonları ile yapılan deneysel çalışma sonucu elde edilen verilerin analizini gösteren grafik [1].

2010 yılında tekrar yapılan deneysel çalışma ile toplam 17460 adet iyonun enjeksiyonundan 8665 adet elektron yakalama bozunumu gözlemlenmiş ve bu bozunumlardan elde edilen sonuçlarda belirgin bir modülasyon benzeri yapıya rastlanmamış olup, depolama halkasına birbiri ardına enjekte edilmiş 7125 adet iyondan elde edilen 3594 adet elektron yakalama bozunumu ayıklanarak analiz edilmiştir. Ayıklanan verilerin analizi sonucu modülasyon benzeri yapı elde edilmiştir (Şekil 4.4).



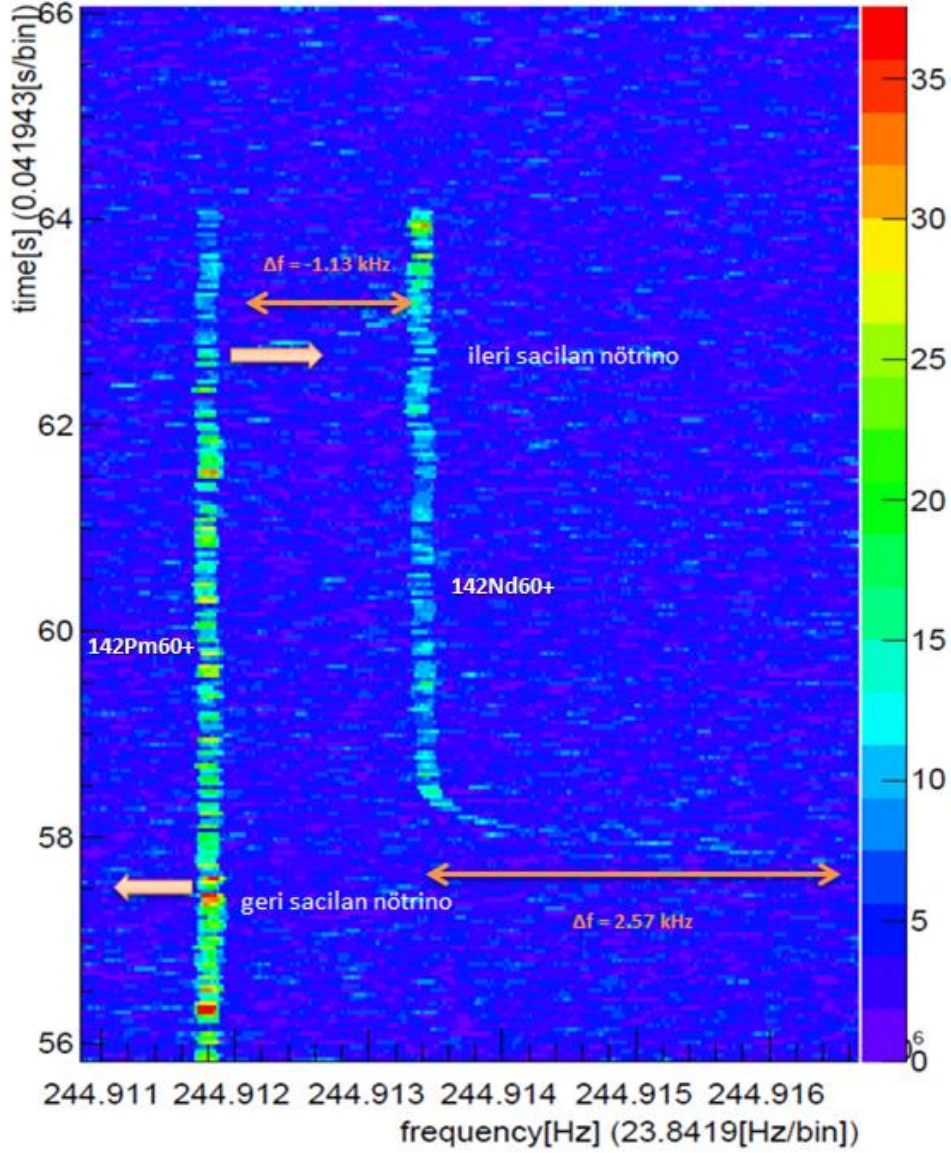
**Şekil 4.4:** 2010 yılında yapılan deneysel çalışmadan elde edilen verilerin analizini gösteren grafikdir. ESR depolama halkasında gerçekleşen elektron yakalama bozunumlarının sayısının, iyonların enjeksiyon zamanına göre ve Ki kare (Chi square) analizi görülmektedir [1].

Hızlandırıcı kaynaklı arıza ve hatalar sonucu analiz edilen elektron yakalama bozunumları toplamda 3594 adetle sınırlı kalmış olup, bu durum veri analizinin düşük istatistikle yapılmasına yol açmıştır. Bu sebeple 2014 yılında  $^{142}\text{Pm}^{60+}$  iyonları için deneysel çalışma tekrarlanmıştır.

2014 yılında yapılan deneysel çalışmayla ESR depolama halkasında 400 MeV enerjide depolanan tek elektronlu Hidrojen benzeri  $^{142}\text{Pm}^{60+}$  iyonlarının kız çekirdeği olan  $^{142}\text{Nd}^{60+}$ 'nin temel seviyesine yörüngesel elektron yakalama bozunumu ile bozunması incelenmiştir. ESR depolama halkasında depolanan iyonların yaklaşık 7 sn'lik bir süre boyunca stokastik ve elektron soğutmaya maruz kalmaları ve toplamda 64 sn'lik süre boyunca ESR halkası içerisinde depolanmaları esnasındaki bozunumlarının 245 MHz'lik Rezonans Schottky dedektörü ile görsel analiz verileri toplanmış ve ROOT tabanlı Tek İyonlu Bozunum Spektroskopisi (TIBS) Ref.[1] ile görsel analiz yapılmıştır (Şekil 4.5). Şekil 4.5'de de görülen görsel analiz spektrumu Rezonans Schottky dedektörü ile dedekte edilen ve  $^{142}\text{Pm}^{60+}$  iyonlarının elektron yakalama

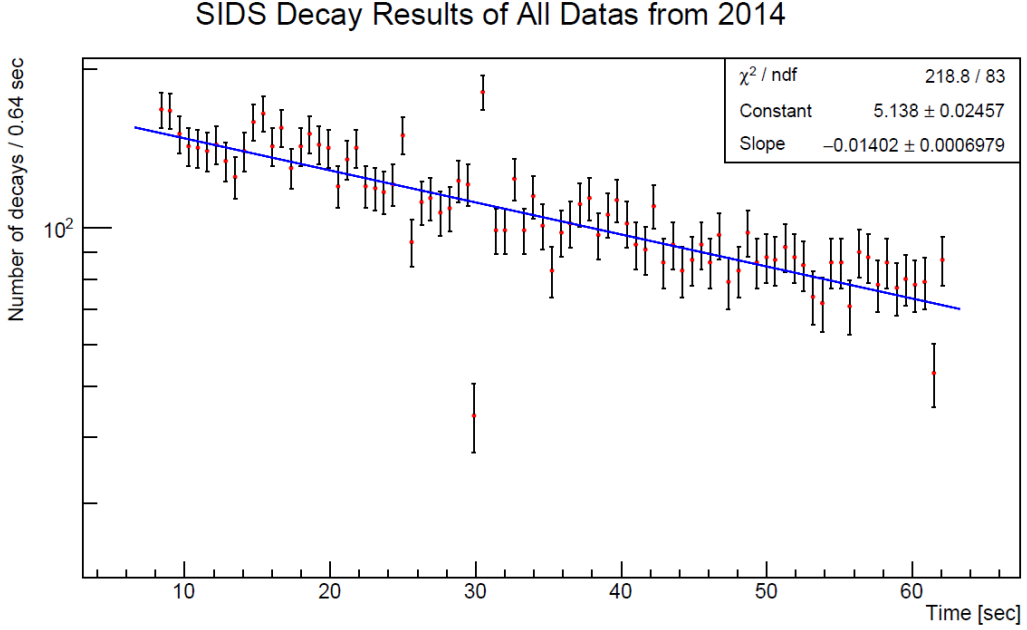


bozunumu sonucunda yok oluşunun ve  $^{142}\text{Nd}^{60+}$  iyonunun oluşumunun frekans izlerini demet doğrultusuna göre projeksiyonu şeklinde göstermektedir.



**Şekil 4.5:**  $^{142}\text{Pm}^{60+}$  iyonlarının  $^{142}\text{Nd}^{60+}$  iyonlarına bozunumunu gösteren ve Rezonans Schottky dedektörü ile 64 sn'lik süre sonunda elde edilen elektron yakalama bozunumu izleri.

Rezonans Schottky dedektörü ile dedekte edilen bozunumlar Şekil 3.8'deki veri toplama sistemleri aracılığı ile toplanarak osiloskoplar ve spektrum analizörler kontrolünde bilgisayara aktarılmıştır. Bilgisayara aktarılan veriler GSI sistemine ait HERA isimli diskde depolanmış olup, deney esnasında ve sonrasında görsel ve otomatik analiz için kullanılmıştır.

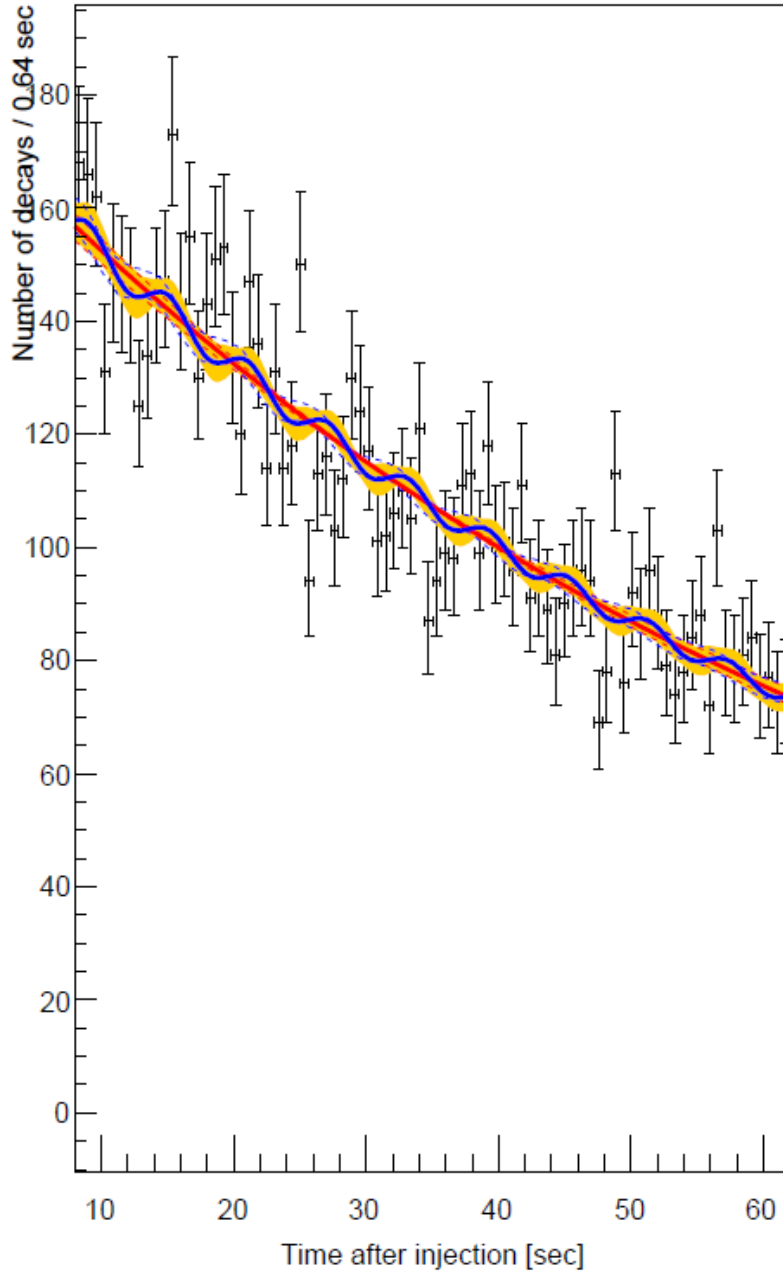


**Şekil 4.6:** 2014 yılında GSI bünyesindeki ESR depolama halkasında gerçekleştirilen  $^{142}\text{Pm}^{60+}$  iyonlarının elektron yakalama bozunumu sonucu elde edilen verilerin analizini gösteren grafik.

2014 deneysel çalışması sonucunda, 10000'in üzerinde iyonun ESR depolama halkasına enjeksiyonu sonucunda 9849 adet ROOT dosyası analize hazır halde kaydedilmiş olup, görsel analiz sonucunda 11241 adet elektron yakalama bozunumu tespit edilmiş, fit edilmiş ve aynı zamanda TIBS Ref.[1] görsel analiz programı ile 9232 adet elektron yakalama bozunumu analiz ve fit edilmiştir (Şekil 4.6).

$^{142}\text{Pm}^{60+}$  iyonlarının bozunumlarının incelendiği deneylerden elde edilen analiz sonuçları 2008 ve 2010 yıllarında iki farklı fonksiyonla fit edilerek elektron yakalamaya ait bozunum sabitleri elde edilmiş (Şekil 4.3 ve Şekil 4.4) ve 2014 yılında ise sonuçlar yalnızca eksponansiyel dağılım fonksiyonu ile fit edilmiştir (Şekil 4.6). Tüm sonuçlar Tablo 4.1'de ayrıntılı olarak verilmiştir. 2014 yılında yapılan deneysel çalışmanın analiz sonuçları ise TIBS görsel analiz programı ile 4.1 ve 4.2 fonksiyonları cinsinden fit edilmiştir (Şekil 4.6).





**Şekil 4.7:** 2014 yılında yapılan deneysel çalışmadan TIBS görsel analiz programı ile elde edilen sonuçları gösteren grafik.

Eksponansiyel dağılım fonksiyonu,

$$\frac{dN_d(t)}{dt} = \lambda_{EC} N_m(0) e^{-\lambda t} \quad (4.1)$$

ile verilmektedir. Burada  $N_m(0)$  enjeksiyon zamanı  $t=0$ 'daki Hidrojen benzeri anne iyonların sayısı,  $t$  enjeksiyon zamanı,  $\lambda_{EC}$  elektron yakalama bozunumunun bozunum sabiti,  $dN_d(t) dt$  zaman aralığında oluşan kız iyonların sayısı ve  $\lambda$  ise  $\lambda = \lambda_{\beta^+} + \lambda_{EC} + \lambda_{kayıp}$  ile verilen toplam bozunum sabiti olup; beta bozunumundan elde edilen bozunum sabiti, elektron yakalama bozunumundan elde edilen bozunum sabiti ve halka içerisinde olabilecek başka iyonlardan kaynaklı kayıpları temsil eden küçük kayıplar için bozunum sabitidir. Modüle edilmiş eksponansiyel fonksiyon ise,

$$\frac{dN_d(t)}{dt} = \lambda_{EC} + a \cdot \cos(\omega t + \varphi) \quad (4.2)$$

ile verilmektedir. Burada  $\lambda_{EC}$  elektron yakalama bozunumunun bozunum sabiti,  $a$  zamandan bağımsız genlik,  $\omega = 2\pi/T$  ile verilen açısal frekans ve  $\varphi$  ise periyodu  $T$  olan modülasyonun fazıdır.

**Tablo 1:**  $^{142}\text{Pm}^{60+}$  iyonlarının elektron yakalama bozunumu sonucu elde edilen verilerin kıyaslanmasını içeren tablo.

<b>Deneyler</b>	<b><math>\Lambda(\Delta\lambda)</math> [<math>s^{-1}</math>]</b>	<b><math>a(\Delta a)</math></b>	<b><math>\omega(\Delta\omega)</math> [<math>s^{-1}</math>]</b>	<b><math>\varphi(\Delta\varphi)</math></b>
<b>2008</b>	0.0170(9)	-	-	-
	0.0224(42)	0.23(4)	0.885(31)	-1.6(5)
<b>2010</b>	0.0130(8)	-	-	-
	0.0130(8)	0.107(24)	0.884(14)	+2.35(48)
<b>2014</b>	0.0140(6)	-	-	-
	0.0140(6)	0.019(15)	1.04(26)	-3.13(23)

## 5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu tez çalışması, GSI ağır iyon araştırmaları merkezinde son on yıllık süreçte Hidrojen benzeri ve Helyum benzeri atomların elektron yakalama bozunumları üzerine yapılan çalışmaları sonuçlandırmış olup gelecekte planlanmış diğer çalışmalara da önemli katkılar sağlayacaktır. Bu tez çalışmasının yapılabilmesi için geliştirilen teknolojiler ve analiz yöntemleri  $^{205}\text{Tl}$  atomlarının bağlı durum beta bozunumlarını konu edinen deneysel çalışmada da kullanılacaktır. H-benzeri ve He-benzeri atomların radyoaktif bozunumları üzerine yapılacak benzeri çalışmalar oldukça önemlidir dolayısıyla Hidrojen benzeri  $^{142}\text{Pm}^{60+}$  iyonlarının elektron yakalama bozunumu üzerine yapılan bu çalışmanın sonucu yapılacak diğer Hidrojen benzeri ve Helyum benzeri atomların elektron yakalama bozunumları üzerine yapılan çalışmalar açısından da önem arz etmektedir.

2014 Ekim ayında  $^{142}\text{Pm}^{60+}$  iyonunun elektron yakalama bozunumu deneysel sistem ve yöntemler ile analizini içeren ve Bölüm 4'te ayrıntılı olarak incelenen çalışmasında 10000'in üzerinde  $^{142}\text{Pm}^{60+}$  iyonunun ESR depolama halkasına enjeksiyonu gözlenmiştir. Sonrasında 9849 adet ROOT dosyası analize hazır halde kaydedilmiş olup, görsel analiz sonucunda 11241 adet elektron yakalama bozunumu tespit edilmiştir. 2008 yılında yapılan deneysel çalışma esnasında yaşanan hızlandırıcı tabanlı aksaklıklar ve pick-up dedektörünün düşük çözünürlükte olmasından dolayı veri analizinin zorlaşması sebebiyle veriler ayıklanmış, dolayısıyla veri analizi düşük istatistikle yapılmıştır. Ayıklanan verilerden elde edilen elektron yakalama bozunumları sonucu üretilen eğrinin fit edilmesiyle bozunum sabiti  $\lambda=0.017(9)$  [ $\text{s}^{-1}$ ] hesaplanmıştır [1]. Deneysel çalışma sonucunda, 2010 yılında elde edilen verilerin modülasyon benzeri yapısı gözlemlenmemiştir [5]. 2010 yılında istatistiği arttırmak için yeni 245 MHz Rezonans Schottky dedektörü ile yapılan deneysel çalışmadan hızlandırıcı tabanlı problemler yüzünden elde edilen veriler tekrar seçilmiş ve veri istatistiği yine istenilen seviyede olamamıştır. 2010 yılında yapılan deneysel çalışma ile bozunum sabiti  $\lambda=0.013(8)$  [ $\text{s}^{-1}$ ] bulunmuştur [1]. 2014 yılında yapılan deneysel çalışma esnasında 245 MHz Rezonans Schottky dedektörü ile ayrıca yeni spektrum analizörler kullanılmış ve veri analizinin daha sağlıklı bir şekilde yapılması sağlanmıştır. 2014 deneyi esnasında yaklaşık 5-6 adet ROOT dosyasında hızlandırıcı magnetlerinden kaynaklı problemleri belirten kicker hataları ve buna ek olarak vakum sorunları yüzünden bazı veri dosyaları incelenememiştir. Ancak, 2008 ve 2010 yılı

verilerinden daha fazla veri ile analiz işlemi başarılı bir şekilde tamamlanmış olup, bozunum sabiti  $\lambda=0.014(6)$  [ $s^{-1}$ ] olarak bulunmuştur.

Her üç deneysel çalışmanın da sonucunda toplam bozunum sabitleri için birbirlerine yakın değerler elde edilmiştir. Bu sonuçlar ışığında,  $^{142}\text{Pm}^{60+}$  iyonlarının elektron yakalama bozunumu ayrıntılı olarak incelenmiş olup, çalışmanın devamı olarak nadir gözlenen, GSI'da keşfedilen ve elektron yakalama bozunumunun zamana göre tersi olan iki cisimli bağlı durum beta bozunumu üzerinde de çalışılmasına karar verilmiştir. Bu sebeple,  $^{205}\text{Tl}^{81+}$  iyonlarının GSI ileri iyon araştırma merkezi bünyesindeki ESR depolama halkasındaki bağlı durum beta bozunumlarının incelenmesi için 2018 yılında deneysel çalışma yapılacaktır.

Yapılan üç deney sonucunda modüle edilmiş eksponansiyel fonksiyon fitinden elde edilen genlik değeri 2014 deneyi için çok düşük olduğundan, bozunumda herhangi bir modülasyon benzeri yapıya rastlanmamıştır.

Yük bakımından zengin iyonların radyoaktif bozunumlarının anlaşılması diğer alanlarda olduğu kadar nükleer astrofizik açısından da oldukça önemlidir.  $^{205}\text{Tl}^{81+}$  iyonlarının ESR depolama halkasındaki bağlı durum beta bozunumunun incelenmesi ile iki önemli araştırma konusu açıklığa kavuşturulacaktır:

1.  $^{205}\text{Tl}$  atomları ile  $^{205}\text{Pb}$  atomları arasındaki geçiş enerjisi yaklaşık 52 keV dir. Bu enerji değeri güneşten gelen nötrinolar üzerine çalışmalar yapılmasına olanak sağlayacak kadar düşük bir seviyededir.  $^{205}\text{Tl}$  atomlarının  $^{205}\text{Pb}$  atomlarına bağlı durum beta bozunumunu ile bozunmasını ölçülerek, geçiş matris elemanı hesaplanabilecek ve böylece nötrinonun çekirdek tarafından yakalanma tesir kesiti bulunabilecektir.
2. Tamamen iyonize olmuş  $^{205}\text{Tl}$  atomlarının bozunumu,  $^{205}\text{Pb}$  atomlarının beta bozunumunun ( $T_{1/2}=17$  My)  $^{205}\text{Tl}$  atomlarının bağlı durum beta bozunumuna denk olduğu yıldızlar arası (stellar) nükleosentezin yavaş-nötron yakalama sürecinin (s-process) sonunu belirleyebilecektir.

İzomerik Demetler, Ömürler ve Kütleler üzerine çalışan uluslararası iş birliği grubu olan ve kısa ömürlü nötron zengini çekirdeklerin CR halkasında zaman çözünürlüklü Schottky kütle spektrometresi ile radyoaktif çekirdeklerin kütle ve ömür ölçümlerini gerçekleştiren ILIMA (Isomeric Beams, Lifetimes and MAsses) grubu da GSI'nin gelecek projesi olan ve inşaatı devam eden FAIR projesi üyesidir. ILIMA grubunun çalışma konuları arasında bu tezde

sunulan çalışmalar da yer almakta ve SMS tekniği ile yapılacak diğer yarı ömür ölçümleri de ilerleyen yıllarda FAIR projesi kapsamında gerçekleştirilecektir.

Çekirdeklerin kütle ve ömür ölçümleri, yıldızlarda gerçekleşen nükleosentezin astrofiziksel olarak modellenmesi açısından oldukça önemli nükleer fizik girdileri olarak kabul edilmektedir. Çoğu çekirdek için önceden ölçülmüş olan kütle ve ömür değerleri nükleer çekirdek tablosunun gidişatının belirlenmesine katkı sağlarken, yeni ölçülmekte olan ve ölçülecek kütle ve ömür değerleri ile de birikmiş bolluklar hesaplanmaktadır.

İki nötron yıldızının birleşmesiyle meydana gelen ve daha büyük bir nötron yıldızının oluşmasına sebep olan ya da kara delik oluşumunu sağlayan yıldızlar arası süreçten yayılan gravitasyonel dalgaların keşfi ile birlikte radyoaktif çekirdeklerin hızlı nötron yakalama süreci olan r-sürecinin (r-process) önemi anlaşılmaktadır [52]. Bundan sonraki süreçte yapılacak çalışmalarla modern fiziğin bu alanının aydınlığa kavuşturulması için gerekli mikroskopik fizik parametreleri sağlanacak ve ağır elementlerin yıldızların neresinde ve nasıl üretildiğine dair sorular cevaplanacaktır.

## KAYNAKLAR

- [1]. Litvinov Y. A. and Bosch F., 2010, Beta decay of highly charged ions, *IOP Publishing Report of Progress in Physics*, **74**(2011)
- [2]. Leach G. K. et. al., 2017, Electroweak decay Studies of Highly Charged Radioactive Ions with TITAN at TRIUMF, *MDPI Atom*, **5**(1)
- [3]. Bachall J. N., 1962, Electron Capture and Nuclear Matrix Elements of  ${}^7\text{Be}$ , *Physical Review*, **128** 1297-1301
- [4]. Bachall J. N. and Moeller C. P., 1969, *Astrophysical Science*, **155** 511-4
- [5]. Atasanov D. et. al., 2015, Between atomic and nuclear physics: Radioactive decays of highly-charged ions, *IOP Publishing Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*, **48** 144024
- [6]. Bosch F., 1992, First experiments at the Darmstadt storage-cooler ring ESR, *Nuclear Instrumentation Methods*, **314** 269-76
- [7]. Rutherford E. and Soddy F., 1902, The radioactivity of thorium compounds: II. The cause and nature of radioactivity, *Journal of Chemistry and Socisal Transcripts*, **81** 837-60
- [8]. Emery G.T., 1972, Perturbation of nuclear decay rates, *Annual Nuclear Sciences*, **22** 165-202
- [9]. Geissel H., Münzenberg G. and Riisager K., 1995, Secondary exotic nuclear beams, *Annual Review of Nuclear and Partical Sciences*, **45** 163–203
- [10]. Mittag W., Lépine-Szilý A. and Orr N. A., 1997, Mass measurement far from stability, *Annual Review of Nuclear and Partical Sciences*, **47** 27–66
- [11]. Emling H., 1998, Fragmentation of secondary beams leading to unbound nuclear subsystems of exotic nuclei, *Journal of Physics G: Nuclear and Partical Physics*, **24** 1561–7
- [12]. Hansen P. G. and Tostevin J. A., 2003, Direct reactions with exotic nuclei, *Annual Review of Nuclear and Partical Sciences*, **53** 219–61
- [13]. Kelic A. et. al., 2004, Isotopic and velocity distributions of Bi produced in charge-pickup reactions of  ${}^{208}\text{Pb}$  at 1AGeV, *Physical Review C*, **70** 064608
- [14]. Bertulani C. A. and Gade A., 2010, Nuclear astrophysics with radioactive beams, *Physics Reports*, **485** 195–259
- [15]. Hofmann S. et. al., 1996, The new element 112, *Zeitschrift für Physik A*, **354** 229–30
- [16]. Hofmann S. et. al., 2002, New results on elements 111 and 112, *European Physics Journals A*, **14** 147–57

- [17]. Schneider R. et. al., 1995, Identification and halflife measurement of  $^{100}\text{Sn}$  and neighbouring nuclei, *Physical Scripts T*, **56** 67–70
- [18]. Schneider R. et. al., 1995, Identification of  $^{100}\text{Sn}$ , *Nucl. Phys. A*, **583** 853–6
- [19]. Bernas M. et. al., 1994, Projectile fission at relativistic velocities: a novel and powerful source of neutron-rich isotopes well suited for in-flight isotopic separation, *Physics Letters B*, **331** 19–24
- [20]. Enqvist T. et. al., 1999, Systematic experimental survey on projectile fragmentation and fission induced in collision of  $^{238}\text{U}$  at 1 A.GeV with lead, *Nuclear Physics A*, **658** 47–66
- [21]. Gaimard J-J. and Schmidt K-H., 1991, A re-examination of the abrasion-ablation model for the description of the nuclear fragmentation reaction, *Nuclear Physics A*, **531** 709–45
- [22]. Summerer K. and Blank B., 2000, Modified empirical parameterization of fragmentation cross sections, *Physical Review C*, **61** 034607
- [21]. Franzke B., Geissel H. and Münzenberg G., 2008, Mass and lifetime measurements of exotic nuclei in storage rings, *Mass Spectrometry Review*, **27** 428–69
- [23]. Wolf B., (ed) 1995, *Handbook of Ion Sources*, Boca Raton, FL: CRC Press, ISBN 9780849325021
- [24]. Gillaspay J., (ed) 2001, *Trapping Highly Charged Ions: Fundamentals and Applications*, New York: Nova Science Publishing, ISBN 1-56072-725-X
- [25]. Marrs R. E., Levine M. A., Knapp D. A. and Henderson J. R., 1988, Measurement of electron-impact excitation cross sections for very highly charged ions, *Physics Review Letters*, **60** 1715–8
- [26]. Levine M. A. et. al., 1989, The use of an electron beam ion trap in the study of highly charged ions, *Nuclear Instrumentation Methods B*, **43** 431–40
- [27]. Marrs R. E., Elliott S. R. and Knapp D. A., 1994, Production and trapping of hydrogenlike and bare uranium ions in an electron beam ion trap, *Physics Review Letter*, **72** 4082–5
- [28]. Currell F. J., 2003, *The Physics of Multiply and Highly Charged Ions vol 1 Sources, Applications and Fundamental Processes*, Springer, ISBN 978-94-017-0542-4
- [29]. Leo W. R., 1987, *Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments*, Berlin: Springer, ISBN 978-3-540-57280-0
- [30]. Sigmund P., 2004, *Stopping of Heavy Ions*, Berlin: Springer, ISBN 978-3-540-22273-6
- [31]. Scheidenberger C., Stöhlker Th., Meyerhof W. E., Geissel H., Mokler P. H. and Blank B., 1998, Charge states of relativistic heavy ions in matter, *Nuclear Instrumentation Methods B*, **142** 441–62
- [32]. Bennett R. et. al., 2000, *Radioactive nuclear beam facilities*, NuPECC Report (NuPECC), <http://www.nupecc.org>

- [33]. Blaum K., Litvinov Yu. A. and Schweikhard L., 2008, Masses of short-lived nuclides: precision measurement techniques and applications, *Nuclear Physics News*, **18** 29–34
- [34]. Mishin V. I., Fedoseyev V. N., Kluge H.-J., Letokhov V. S., Ravn H. L., Scheerer F., Shirakabe Y., Sundell S. and Tengblad O., 1993, Chemically selective laser ion-source for the CERN-ISOLDE on-line mass separator facility, *Nuclear Instrumentation Methods B*, **73** 550–60
- [35]. Lettry J., Catherall R., Drumm P., Van Duppen P., Evensen A. H. M., Focker G. J., Jokinen A., Jonsson O. C., Kugler E. and Ravn H., 1997, Pulse shape of the ISOLDE radioactive ion beams, *Nuclear Instrumentation Methods B*, **126** 130–4
- [36]. Geissel H., Weick H., Scheidenberger C., Bimbot R. and Gardes R., 2002, Experimental studies of heavy-ion slowing down in matter, *Nuclear Instrumentation Methods B*, **195** 3–54
- [37]. Geissel H., Schwab Th., Armbruster P., Dufour J. P., Hanelt E., Schmidt K.-H., Sherrill B. and Münzenberg G., 1989, Ions penetrating through ion-optical systems and matter–non Liouvillian phase-space modelling, *Nuclear Instrumentation Methods A*, **282** 247–60
- [38]. Kugler E., 2000, The ISOLDE facility, *Hyperfine Interactions*, **129** 23–42
- [39]. Alton G. D., and Beene J. R., 1998, The Holifield radioactive ion beam facility at the Oak Ridge national laboratory: present status and future plans, *Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics*, **24** 1347–59
- [40]. Bricault P., Baartman R., Dombisky M., Hurst A., Mark C., Stanford G. and Schmor P., 2002, TRIUMF-ISAC target station and mass separator commissioning, *Nuclear Physics A*, **701** 49–53
- [41]. Lion M., Mittag W., Naviliat-Cuncic O., Roussel-Chomaz P. and Villari A. C., (eds) 2008, Proc. XVth Int. Conf. on Electromagnetic Isotope Separators and Techniques Related to their Applications (Deauville), *Nuclear Instrumentation Methods B*, **266** 4067–726
- [42]. Goldhaber A. S., 1974, Statistical models of fragmentation processes, *Physics Letters B*, **53** 306–8
- [43]. Morrissey D. J., 1989, Systematics of momentum distributions from reactions with relativistic ions, *Physical Review C*, **39** 460–70
- [44]. Geissel H., Münzenberg G. and Weick H., 2002, In-flight spectrometers status and new developments, *Nuclear Physics A*, **701** 259c–264c
- [45]. Savard G. et. al., 2001, The Canadian Penning trap spectrometer at Argonne, *Hyperfine Interactions*, **132** 221–8
- [46]. Kolhinen V. S., Bussmann M., Habs D., Neumayr J. B., Schramm U., Schürmann C., Sewtz M., Szerypo J. and Thierolf P. G., 2008, MLLTRAP: a Penning trap facility for high-accuracy mass measurements, *Nuclear Instrumentation Methods B*, **266** 4547–50



- [47]. Bosch F., 2004, Measurement of Mass and Beta-Lifetime of Stored Exotic Nuclei, *Lecture Notes Physics*, **651** 137–168
- [48]. Bosch F., Litvinov Yu. A. and Stöhlker T., 2013, Nuclear physics with unstable ions at storage rings, *Progress in Particle and Nuclear Physics*, **73** 84–140
- [49]. Wiedemann H., 1999, *Particle Accelerator Physics: I. Basic Principles and Linear Beam Dynamics*, Berlin: Springer, ISBN 978-3-662-02903-9
- [50]. Litvinov Yu. A., 2003, *Basic Nuclear Properties of Neutron-Deficient Nuclei investigated via High Precision Mass Measurements in the Element Range of  $36 < Z < 92$* , Thesis (PhD), Justus-Liebig Universität Gießen
- [52]. Freiburghaus C., Rosswog S. and Thielemann F.-K., 1999, r-Process in Neutron Star Mergers, *The Astrophysical Journal*, **525** 121-124



## ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı	Fatma Çağla ÖZTÜRK
Doğum Yeri	Üsküdar/İstanbul
Doğum Tarihi	05.01.1986
Uyruğu	<input checked="" type="checkbox"/> T.C. <input type="checkbox"/> Diğer:
Telefon	00902124555700/15433
E-Posta Adresi	fcaglaozturk@gmail.com
Web Adresi	<a href="http://aves.istanbul.edu.tr/fcozturk/cv">http://aves.istanbul.edu.tr/fcozturk/cv</a>



Eğitim Bilgileri	
Lisans	
Üniversite	İstanbul Üniversitesi
Fakülte	Fen Fakültesi
Bölümü	Fizik Bölümü
Mezuniyet Yılı	2009

Yüksek Lisans	
Üniversite	İstanbul Üniversitesi
Enstitü Adı	Fen Bilimleri
Anabilim Dalı	Fizik
Programı	Nükleer Fizik
Mezuniyet Tarihi	2013

Doktora	
Üniversite	İstanbul Üniversitesi
Enstitü Adı	Fen Bilimleri Enstitüsü
Anabilim Dalı	Fizik Anabilim Dalı
Programı	Fizik Programı
Mezuniyet Tarihi	2017

Makale ve Bildiriler	
<b>Makaleler</b>	
[1]. Atasanov D. et. al., 2015, Between atomic and nuclear physics: Radioactive decays of highly-charged ions, <i>IOP Publishing Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics</i> , <b>48</b> 144024	
[2]. Leibrock H., Rottlaender P., Muehle C., Öztürk F.Ç., 2014, "Solenoid Development for an Emittance Transfer Experiment with a Design Environment System", <i>IEEE Transactions On Applied Superconductivity</i> , <b>24</b>	

**Bildiriler**

- [1]. Öztürk F. C. et. al., 'Renewable Energy Sources' ISCBPU4 - Fourth International Student Conference of the Balkan Physical Union, 29 August – 1 September 2006, Bodrum / Turkey.
- [2]. Öztürk F. C. et. al., 'Global Warming', ISCBPU5 - Fifth International Student Conference of the Balkan Physical Union, 21-24 August 2007, Bodrum / Turkey.
- [3]. Öztürk F. C. et. al., 'Superconducting Magnets', ISCBPU7 - 7<sup>th</sup> International Student Conference of the Balkan Physical Union, 4-7 September 2009, Bodrum/Turkey.
- [4]. Öztürk F. C. et. al., 'ADS (Accelerator Driven Systems)', 2<sup>nd</sup> Workshop of TAC PAF, 8 - 9 May 2010, Istanbul/Turkey.
- [5]. Öztürk F. C. et. al., 'Magnet Design for Low Energy Accelerators', 9<sup>th</sup> Turkish Accelerator Center Project's Workshop, 03 – 05 December, 2010, Ankara University, Ankara/Turkey.
- [6]. Öztürk F. C. et. al., 'Magnet Design and Design Requirements for Turkish Accelerator Center Project (TAC) Proton Accelerator Facility (PAF)', 3<sup>rd</sup> Workshop of TAC PAF, 08 – 09 April 2011, Eskisehir Osmangazi University, Eskisehir/TURKEY.
- [7]. Öztürk F. C. et. al., 'Magnet Design studies for Linear Proton Accelerator Facility of TAC Project', 10<sup>th</sup> Workshop of TAC, 09 – 11 December 2011, Enstitute of Accelerator Technology, Ankara University, Ankara/TURKEY.
- [8]. Öztürk F. C. et. al., 'A Design Environment for A Solenoid Magnet with Opera 2D', Summer Student Programme at GSI, 05/08/2012 - 26/09/2012, Darmstadt, Hessen – GERMANY.
- [9]. Öztürk F. C. et. al., 'Quadrupole and Solneoid Magnet Design Studies using OPERA and FEMM simulation programmes', 11<sup>th</sup> Workshop of TAC, 30 November – 02 December 2012, Enstitute of Accelerator Technology, Ankara University, Ankara/TURKEY.
- [10]. Öztürk F. C. et. al., 'Design of The Magnets Used In Linear Proton Accelerators', Turkish Physical Society 31<sup>th</sup> Physics Congress, 2 – 5 September 2013, Istanbul – Turkey.
- [11]. Öztürk F. C. et. al., 'Iron – Dominated Electromagnets in Linear Accelerators', Balkan Physical Union 10<sup>th</sup> International Student Conference, 3 – 5 September 2013, Istanbul – Turkey.
- [12]. Öztürk F. C. et. al., 'Hızlandırıcılarda Kullanılan Magnetler ve Tasarımları', 10<sup>th</sup> International Accelerator School on Particle Accelerators and Detectors, 14 – 19 July 2014, Bodrum – Turkey
- [13]. Öztürk F. C. et. al., 'Fermilab Mu2e Project and alignment processes', Turkish Physical Society 31<sup>th</sup> Physics Congress, 21 – 24 July 2014, Bodrum – Turkey.
- [14]. Öztürk F. C. et. al., 'Investigation of the Orbital Electron-Capture Decay of Hydrogen-like  $^{142}\text{Pm}^{60+}$  Ions at the Experimental Storage Ring (ESR)',

9<sup>th</sup>International Conference of the Balkan Physical Union, 24/08/2015 – 27/08/2015, Istanbul, TURKEY.

- [15]. Öztürk F. C. et. al., 'Investigation of the Orbital Electron-Capture Decay of Hydrogen-like  $^{142}\text{Pm}^{60+}$  Ions at the Experimental Storage Ring (ESR)', 3<sup>rd</sup> European Nuclear Physics Conference 2015, 30/08/2015 – 04/09/2015, Groningen, NETHERLANDS.
- [16]. Öztürk F. C. et. al., 'Orbital Electron-Capture Decay of Hydrogen-like  $^{142}\text{Pm}^{60+}$  Ions at the Experimental Storage Ring (ESR)', Turkish Physical Society 33<sup>th</sup> Physics Congress, September 06-09, 2017, Bodrum – Turkey.

