

**ARAŞTIRMA MAKALESİ /RESEARCH ARTICLE**

**SERBEST ELEKTRON LAZERİ – ÇEKİRDEK ÇARPIŞTIRICILARININ  
NÜKLEER SPEKTROSKOPİ AÇISINDAN ÖNEMİ**

**Ömer Yavaş<sup>1</sup>**

**ÖZ**

Nükleer Rezonans Floresans (NRF) yöntemlerinin nükleer spektroskopisi açısından karşılaştığı bazı deneysel sorunlara çözüm getirecek şekilde son yıllarda araştırma grubumuzca gündeme taşınan Serbest Elektron Lazeri (SEL) – Çekirdek çarpıştırıcılarının nükleer spektroskopisi açısından getireceği yenilikler ve sağlayacağı avantajlar tartışılmıştır. Son yıllarda mevcut veya inşa halinde olan hadron hızlandırıcılarının ( RHIC, HERA, LHC v.b.) iyon programlarında dikkate alınarak yapılan ve C, Pb, Th, Ce, Sm gibi çekirdeklerin uyarılmalarının spektroskopik açıdan incelenmesinde SEL-çekirdek çarpıştırıcılarının önemini irdeleyen çalışmalar yapılmıştır. Bu tür bir çarpıştırıcıda elde edilebilecek olay sayıları, kollektif uyarılmaların spektroskopisi için sağlanan avantajlar, bozunum genişliği, spin ve parite belirlenmesinde bu çarpıştırıcının araştırma potansiyeli örnek hesaplama ve incelemeler ile gösterilmiştir. Çarpıştırıcının ana parametreleri ve genel tasarımı verilmiş ayrıca hızlandırıcı, dedektör ve fizik açısından çözülmesi gereken problemlere dikkat çekilmiştir. Örnek bir SEL-Çekirdek çarpıştırıcısı olarak CLIC ve LHC'ye dayalı çarpıştırıcı ele alınmış ve kurşun çekirdeği için bazı sonuçlar verilmiştir.

**Anahtar Kelimeler** : Nükleer spektroskopisi, Serbest elektron lazeri (SEL), SEL-Çekirdek çarpıştırıcısı, Spin, Parite

**THE IMPORTANCE OF FEL-NUCLEUS COLLIDERS FROM THE POINT OF  
NUCLEAR SPECTROSCOPY**

**ABSTRACT**

In this paper, experimental problems of traditional Nuclear Resonance Floresance (NRF) methods are considered and the advantage of Free Electron Laser (FEL) – nucleus colliders to overcome of these problems are discussed. Existing hadron accelerators (RHIC, HERA, LHC etc.) are considered to accelerate fully ionised nucleus beams. In recent years, some research results are published for the physics search potential of FEL-nucleus colliders considering excitation levels of C, Pb, Th, Ce and Sm nucleus. In these studies, electron and ion beam parameters are given and event rates, luminosities and needed FEL energies are calculated. Determination of unknown decay widths, spin and parity values of different excitation levels by this type collider are discussed. General design of such a collider is given and the open problems of design in view of accelerator and and detector are listed. As an example, , CLIC-LHC based FEL-nucleus collider is considered and some results for Pb excitations are given.

**Keywords:** Nuclear spectroscopy, Free electron laser (FEL), FEL-nucleus collider, Spin, Parity

**1. GİRİŞ**

<sup>1</sup> Ankara Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Fizik Mühendisliği Bölümü, 06100, Tandoğan, Ankara.  
--e-posta: yavas@eng.ankara.edu.tr

Nükleer fizik araştırmalarında en önemli konulardan birisi çekirdek sisteminin yapısını bozmadan sistemin özelliklerini inceleyebilmektir. Bunun için çeşitli deneysel yöntemler geliştirilmiş ve kullanılmıştır. Son zamanlarda deforme çift-çift çekirdeklerin spektrumlarında çeşitli deneysel yöntemlerle gözlenen yörüngesel ve spin karakterli magnetik dipol uyarılmaların mekanizmalarının belirlenmesi çekirdek fiziğinde ayrı yeri olan önemli problemlerden biri haline gelmiştir. Bu yüzden makas mod, spin titreşimleri ve bu gibi küçük multipollu kollektif uyarılmalar çekirdek yapısının incelenmesinde nükleon-nükleon etkileşmelerin yörünge ve spin momentlerine bağılı bileşenlerinin belirlenmesinde önemli bilgiler sağladığından teorik ve deneysel araştırmalar açısından dikkate alınan güncel konulardan biridir. Buna örnek olarak magnetik dipol uyarılmalarının düşük enerjili dalına artan ilgiyi göstermek mümkündür. Bundan başka yine son yıllarda deforme çekirdekler için yapılan deneysel çalışmalarda düşük enerjilerde bir-kaç elektrik dipol uyarılma seviyesinin varlığı gözlemlendi (Zilges, 2002). Dipol uyarılmalara artmış olan bu ilginin yanında hem teorik hem de deneysel gelişmeler hızlı ilerlemektedir. Teorik olarak bu sorunun başında seçilen ortalama alan potansiyeli ve bozulan invaryantlık (değişmezlikler) gelmektedir. Deneysel olarak başlıca zorluklar seviyelerin paritelerinin ve çok kutupluluğunun tayininde çıkmaktadır ki bu da kullanılan deneysel cihazların hassaslığı ve ideal foton kaynağı problemi ile ilişkilidir (Mohr, 1999; Kneissl, 1996). Teoride ortaya çıkan bu zorluklar şu veya bu şekilde teorilerin geliştirilmesi ile ortadan kaldırılmaya çalışılmaktadır (Kuliev vd., 2000). Deneysel zorlukların ortadan kaldırılması ise ya kullanılan deney tekniklerinin veya yeni cihazların geliştirilmesine bağılıdır.

Rezonans deneyleri için enerjisi ayarlanabilen foton kaynakları için frenleme ışınları, bremsstrahlung ışınları ve sinkrotron ışınları kullanılmaktadır. Fakat bu ışınlar istenilen özellikleri (yüksek spektral şiddet ( $I = N_\gamma/eV \cdot s$ ), iyi monokromatiklik, ayarlanabilir enerji ve yüksek oranlı kutuplanabilirlik ( $P_\gamma \approx 100\%$ )) aynı anda sağlamadığından dolayı çalışmalardan istenilen verim alınamamıştır. Çekirdek seviyelerinin incelenmesinde çok önemli olan ışınım kaynaklarının bu özellikleri geleneksel yöntemler kullanılarak elde edilemediğinden çekirdek seviyeleri hakkında yapılan çalışmalar da genel olarak hep eksik bir yön kalmıştır. Elde edilen ışınların istenilen özellikleri tam olarak karşılamaması sonucu istenmeyen fon ışınları elde edilen spektrumların değerlendirilmesini etkilerken enerji seviyelerinin belirlenmesine de zarar vermektedir. Teorik olarak enerjisi hesaplanan bir seviyenin doğrulanmasının sağlanması için ise enerjisi ayarlanabilen bir ışınım kaynağı kullanamamak ta deneysel çalışmaların yapılmasını zorlayıcı bir faktördür. Ayrıca kullanılacak ışınımın istenilen düzeyde kutuplanamaması da parite tayinleri açısından olumsuz yönde etkili bir faktördür.

Nükleer fizik araştırmalarında karşılaşılan diğer sorunlar ise yeterince çözümleme gücüne sahip olan dedektörlerin mevcut olmamasıdır. Bu sorunların

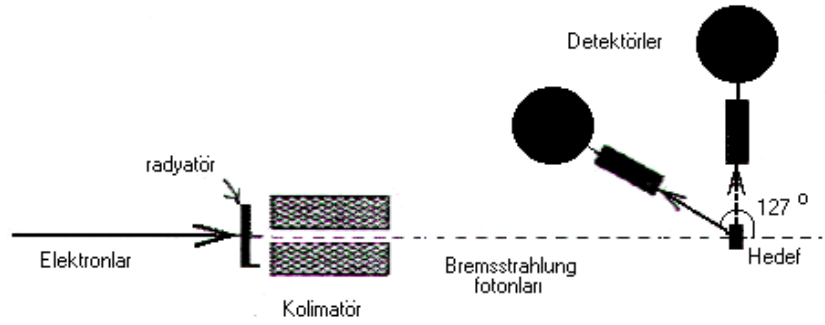
aşılması ancak teknolojik araştırma ve geliştirme (Ar-Ge) çalışmaları ile mümkün olacaktır. Işınım kaynağı konusunda son teknolojik gelişmeler Serbest Elektron Lazerlerini (SEL) gündeme getirmiş ve ihtiyaç duyulan özelliklerin tamamını taşıyan bir ışınım kaynağı olarak NRF deneyleri için ideal bir kaynak olacağı tartışılmaya ve hatta kullanılmaya başlanmıştır. Ayrıca nükleer spektroskopi çalışmaları için SEL-çekirdek çarpıştırıcılarının bir çok açıdan deneysel ortamı sağlayacağı son yıllarda yoğun tartışılan bir konu haline gelmiştir.

## 2. NÜKLEER REZONANS FLORESANS (NRF) YÖNTEMİ VE FOTON KAYNAKLARI

Çekirdeklerin elektrik dipol ve magnetik dipol uyarılma seviyeleri başta ( $e, e'$ ), ( $p, p'$ ) ve NRF deneyleri ile yapılmaktadır. Deneysel açıdan dipol uyarılmalarının kayda değer özellikleri, bunların foton saçılma reaksiyonlarında kolaylıkla uyarılmaları ve elde edilen verilerin çekirdek modellerinden bağımsız olmalarıdır. Son dönemlerde kararlı çekirdeklerin yapısının incelenmesinde NRF cihazlarının kullanılmasında büyük bir canlanma görülmektedir. NRF deney yönteminin çekirdek fiziğinde uygulanması ana fikri ve kavramları ilk defa Metzger (1959) tarafından verilmiştir ve bu deney yönteminin çekirdeğin iç yapısının incelenmesi açısından çok önemli olduğu gösterilmiştir (Metzger, 1959). Küçük çok kutuplu uyarılma seviyelerini incelemek için yaygın olarak kullanılan NRF deney düzeyekleri, foton kaynağı olarak hızlandırıcılarda elde edilmiş elektronların ışınlayıcılarda frenlenmesi sonucu ortaya çıkan Bremsstrahlung fotonlarının kolimatörlerde odaklanarak çekirdekle çarpıştırılması ilkesine dayanmaktadır (Şekil 1).

Farklı açılarda konulan detektörlerle saçılan fotonlar algılanır. NRF düzeneği ve NRF deneylerinin yapıldığı laboratuvarlar hakkında geniş bilgi (Kneissl, 1996 ve Metzger, 1959)'da bulunabilir. NRF yöntemi elektron ve proton saçılma reaksiyonlarından farklı olarak çekirdek seviyelerinin enerjisinin, spininin ve paritesinin belirlenmesinde daha hassas sonuçlar elde etme imkanı sağlamaktadır (Kneissl, 1996). Son dönemlerde bu cihazlarda kullanılmaya başlanan yüksek verime ve yüksek saflığa sahip yeni Euroball salkım detektörlerin kullanılması bu rezonans foton saçılması yöntemini düşük çok kutuplu seviyelerin incelenmesinde çok önemli bir konuma taşımıştır.

Deforme çekirdek spektrumunun 2-5 MeV enerji bölgesi seviyelerin küçük yoğunluğundan dolayı NRF spektroskopi yöntemleriyle çok detaylı bir şekilde incelenebilmiştir (Pitz vd. 1989). Fakat  $\Gamma$  radyasyon genişlikleri için algılama sınırının  $\Gamma > 0.1$  meV olması spektrumun 5 MeV den yüksek enerji bölgesinde bir çok seviyenin gözlem dışı kalmasına sebep olmaktadır. Öyleki, spektrumun 5 MeV'den yukarı bölgelerinde



Şekil 1. NRF deney düzeneği

enerji seviyelerin yüksek yoğunluğundan dolayı geleneksel deney yöntemleri uygulandığında foton kaynaklarından ve kullanılan cihazların hassaslığından dolayı ortaya bir çok problem çıkmaktadır. Ölçümleri zorlaştıran bir diğer sebep ise M1 rezonansının E1 dev (giant) rezonansa göre zayıf olması ve bu rezonansın düşük enerjili kuyruk bölgesinde ayrışmasıdır.

NRF deney düzeneklerinde yukarıda saydığımız eksikliklerden başka kullanılan foton kaynaklarının kalitesinin düşük olmasından kaynaklanan bazı dezavantajlarda mevcuttur. Düşük enerjili foton saçılma deneyleri için foton üretiminin birkaç yolu mevcuttur (Kneissl, 1996 ve Metzger, 1959). Bu düzeneklerde en yaygın kullanılan foton kaynaklarının başında Bremsstrahlung fotonları gelmektedir.

Foton saçılma ( $\gamma, \gamma'$ ) deneylerinde kullanılacak ideal foton demetleri aşağıdaki özelliklere sahip olmalıdır (Kneissl, 1996).

- Yüksek spektral şiddet ( $I=N_\gamma / eV.s$ ),
- İyi monokromatiklik
- Geniş enerji aralığında ayarlanabilirlik,
- Yüksek dereceli kutuplanma ( $P_\gamma \approx 100\%$ ).

Bu özelliklere aynı anda sahip olabilen ideal bir foton kaynağı geleneksel yöntemlerle ortaya konulamamıştır. Sonuç olarak foton kaynaklarının yetersizliği kendisini nükleer spektroskopide göstermektedir. Özellikle hassas ölçüm gerektiren kollektif çekirdek uyarılmalarının analizinde monokromatik ve ayarlanabilir foton kaynağı gerekmektedir. NRF deneylerinde kullanılan Bremsstrahlung fotonları diğer foton kaynaklarından üstün özelliklere sahip olmalarına rağmen enerjilerinin sürekli olmasından dolayı deneysel analiz açısından güçlükler içermektedir. Birinci güçlük fon ışımının olmasıdır, yani, düşük enerjileri incelediğimizde geri foton ışımından dolayı spektrum yoğunlaşır. İkinci zorluk Bremsstrahlung fotonlarının ışılayıcıda oluşumu ve kolimatörde daraltılması sırasında çıkmaktadır. Işılayıcı ve daraltıcı olarak Z atom numarası büyük metaller kullanılmaktadır bu metallerin de herbirinin nötron çıkış enerjisi 8-10 MeV bölgesinde olan izotopları mevcuttur. Şöyle ki nötron kaybetmiş element uyarılmış hale geçer ve sonra foton ışınması yaparak taban haline döner.

Bu durum 9-11 MeV enerji bölgesinin incelenmesinde çok büyük fon ışımına neden olarak seviyelerin yorumlanmasını zorlaştırmaktadır. Bir diğer zorluk seviyelerin paritesinin belirlenmesinde çıkmaktadır. Buna neden Bremsstrahlung fotonlarının iyi kutuplanamamasından kaynaklanmaktadır. Bu fotonların kutuplanma oranı %10-20 civarındadır, Bu da seviyelerin paritesinin belirlenmesinde problem yaratmaktadır. Buna göre nötron eşik enerjisi bölgesinde yerleşen elektrik ve magnetik dipol seviyelerin ince yapısının detaylı olarak incelenmesi yalnız yeni nesil deneysel cihazların ve metodların geliştirilmesi ile mümkün olabilir. Bu yüzden daha monokromatik, yüksek güç, akı ve parlaklık değerlerine sahip dalga boyu ayarlanabilir fotonlar üreten ışık kaynaklarına, fon ışımından yoksun nükleer spektroskopik cihazlarına ve hassas sistem detektörlerine büyük ihtiyaç duyulmaktadır. Bu bakımdan çekirdek uyarılma seviyelerini incelemek için fonksiyon olarak NRF düzeneginde kullanılan foton demetiyle aynı fonksiyona sahip ancak nitelikleri daha üstün olan SEL-Çekirdek çarpıştırıcıları daha üstün özellikli deneysel bir ortam sağlayacaktır (Sultan-soy, 1998; Aktaş vd., 1999).

Bir düzlemsel salındırıcıdan (çok kutuplu magnet, undulator) elde edilen SEL'in dalga boyu,

$$\lambda_{SEL} = \frac{\lambda_u}{2\gamma^2} \left( 1 + \frac{K^2}{2} \right) \quad (1)$$

şeklinde tanımlanır. Burada  $\lambda_u$  salındırıcı magnetin periyot uzunluğu,  $\gamma = E/mc^2$  elektron demetinin Lorentz faktörü ve  $K = eB_u \lambda_u / 2\pi mc$  salındırıcı parametresi,  $e$  elektronun yükü,  $m$  elektronun durgun kütlesi,  $c$  ışık hızı ve  $B_u$  salındırıcı magnetin pik magnetik alan değeri olarak tanımlanmıştır.

Son yıllarda SEL-çekirdek çarpıştırıcılarının nükleer spektroskopik açılarından avantajlarını tartışan ve C, Pb, Sm, Ce, Th çekirdeklerini konu alan araştırma sonuçları araştırma grubumuzca değişik dergilerde yayınlanmıştır (Aktaş vd., 1999, Guliyev vd., 2000; Guliyev vd., 2002; Kuru vd., 2003). Bu çalışmada ise son araştırmalarımızdan birisi olan ve CERN'deki LHC çarpıştırıcısının iyon programını dikkate alarak

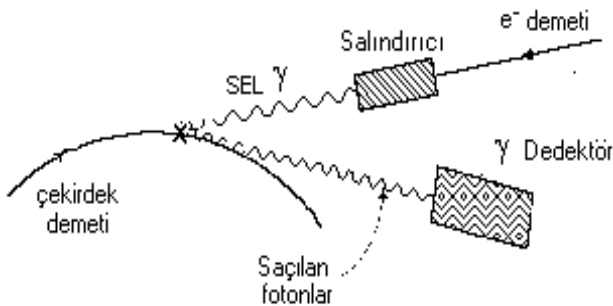
Tablo.1 SEL ve Farklı Foton Kaynaklarının Karakteristikleri

Foton Kaynakları	Spektral Şiddet [ $\gamma/s \cdot eV$ ]	$\Delta E\gamma/E\gamma$ [%]	$P\gamma$ [%]	Hedef Kütle M [g]
Compton Geri Saçılması (CB)	0.15	2.7	100	70
Bremsstrahlung (polarize)	20	Sürekli	10-30	5
Bremsstrahlung (polarize olmayan) + CB	1000	Sürekli	10-20	5
Bremsstrahlung (polarize olmayan)	1000	Sürekli	0	1-2
Serbest Elektron Lazeri (SEL)	$>10^{16}$	0.01	100	$10^{-10}$

CLIC lineer elektron-pozitron çarpıştırıcısından elde edilecek SEL demetinin LHC'de hızlandırılacak kurşun (Pb) demeti ile çarpıştırılmasının nükleer spektroskopisi açısından sağlayacağı avantajlar gösterilmiştir.

### 3. SEL –ÇEKİRDEK ÇARPIŞTIRICISI

4. nesil ışınım olarak ta bilinen serbest elektron lazerleri (SEL) monokromatik, yüksek güç, akı ve parlaklık değerlerine sahip dalga boyu ayarlanabilir özellikli foton demetlerinden oluşur (Ciocci vd., 2000, Saldin vd., 2000). Bu bakımdan SEL fotonları yukarıda tartışılan Bremsstrahlung fotonlarından ve nükleer fizikte kullanılmakta olan diğer foton kaynaklarından her bakımdan üstün özellikler sergilemektedir. Tablo 1'den de görüldüğü gibi SEL fotonları NRF deneylerinde kullanılan Compton Fotonlar (CF) ve Bremsstrahlung (BS) foton kaynaklarından daha üstün özelliklere sahipler. Fakat SEL fotonlarının NRF deneylerinde şu ana kadar kullanılmamasının başlıca nedeni enerjilerinin keV mertebesinde olması ve başka bir deyişle keV enerjili fotonlarla MeV enerjili seviyelerin incelenmesinin mümkün olmamasıdır.



Şekil 2. Çekirdek Çarpıştırıcısının Şematik Görünümü

Önerilen SEL-Çekirdek çarpıştırıcılarında yüksek yoğunluklu monokromatik fotonlar üretilir ve hızlandırılmış tam iyonize çekirdeklerle çarpıştırılır. SEL-Çekirdek çarpıştırıcısının şematik görünümü Şekil 2'de verilmiştir. Çekirdeklerin halka tipli hızlandırıcılarda büyük göreceli hızlara ulaştırılarak SEL fotonlarıyla kafa-kafaya çarpıştığını düşünürsek, fotonun enerjisi ( $\omega_{SEL}$ ) çekirdeğin kendi durgun kütle çerçevesinde  $2\gamma N\omega_{SEL}$  gibi algılanacaktır [8,9] Burada  $\gamma N$  çekirdeğin Lorentz faktörüdür. SEL fotonlarının çok iyi olan monokromatikliğe ( $\Delta E/E < 10^{-3} - 10^{-4}$ ), yüksek foton yoğunluğuna ( $10^{13} \gamma/\text{demet}$ ) ve ayarlanabilirliğe (tunable) sahip olması bu lazerler yardımıyla büyük bir enerji aralığında iç içe girmiş

veya gömülü uyarılma seviyelerini inceleme imkanı verecektir. SEL-Çekirdek çarpıştırıcılarının nükleer spektroskopisi açısından getirileri araştırma grubumuzca  $^{140}\text{Ce}$ ,  $^{154}\text{Sm}$  ve  $^{232}\text{Th}$  çekirdekleri için daha önce incelenmiştir (Aktaş vd., 1999; Guliyev vd., 2000; Guliyev vd., 2002; Koru vd., 2003). Çekirdeğin uyarılma seviyelerini incelemek için tasarlanacak SEL-çekirdek çarpıştırıcılarında kullanılan çekirdeklerin Lorentz faktörü ve fotonların  $\omega_{SEL}$  enerjisi sırasıyla,

$$\gamma_A = \frac{Z}{A} \gamma_p \quad (2)$$

$$\omega_{SEL} = \frac{E_{uy}}{2\gamma_A} = \frac{A}{Z} \frac{E_{uy}}{2\gamma_p} \quad (3)$$

şekilde ifade edilir (Sultansoy, 1998; Aktaş vd., 1999).

Burada,  $E_{uy}$ , uyarılmış seviyenin enerjisi,  $Z$  ve  $A$  sırasıyla çekirdeğin atom ve kütle numarası,  $\gamma_p$  protonun Lorentz faktörüdür.

Yüksek enerjili parçacık hızlandırıcılarında hızlandırma için zamanla değişen alanlar kullanıldığından demetler paketçikli yapıdadır.  $n_1$  ve  $n_2$  parçacık yoğunluğuna sahip iki paketçik  $f_c$  frekansıyla çarpışır. Bu durumda ışınlık (luminosity)

$$L = \frac{n_1 n_2}{4\pi\sigma_x \sigma_y} f_c \quad (4)$$

şeklinde tanımlıdır. Burada  $\sigma_x$  ve  $\sigma_y$ ,  $x$  ve  $y$  yönlerindeki enine demet yarıçapları,  $n_b$  bir atmadaki paketçik sayısı ve  $f_{tek}$  ise tekrarlanma frekansı olmak üzere çarpışma frekansı  $f_c = n_b f_{tek}$  şeklinde tanımlanır. Günümüzde ışınlık değerleri  $10^{28} - 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  arasında değişmektedir. Deneysel verilerin istatistiği açısından önemli parametrelerden biri olan olay sayısı, ışınlık ve ortalama tesir kesitine aşağıdaki şekilde bağlıdır.

$$R = L\sigma_{ort} \quad (5)$$

Burada  $\sigma_{ort}$  foton saçılma tesir kesitinin ortalama değeridir. Tesir kesitleri ve gereken istatistik dikkate alındığında SEL-çekirdek çarpıştırıcıları için  $10^{28,29} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  oranındaki ışınlık değerleri saniyede  $10^{5-6}$  dü

Tablo 2. <sup>208</sup>Pb Çekirdeğinin Uyarılmalarının Ana Karakteristikleri.

E(MeV)	Γ (eV)	J <sup>π</sup>	ω <sub>SEL</sub> (keV)	σ <sub>rez</sub> (cm <sup>2</sup> )	σ <sub>ort</sub> (cm <sup>2</sup> )	RS
4.0852	7.83·10 <sup>-1</sup>	2+	0.694	7.3·10 <sup>-22</sup>	1.39·10 <sup>-24</sup>	6.1·10 <sup>5</sup>
4.8422	99.72·10 <sup>-1</sup>	1-	0.823	5.23·10 <sup>-22</sup>	1.07·10 <sup>-23</sup>	4.7·10 <sup>6</sup>
5.2926	13.16·10 <sup>0</sup>	1-	0.899	2.62·10 <sup>-22</sup>	2.62·10 <sup>-24</sup>	2.8·10 <sup>6</sup>
5.5122	32.91·10 <sup>0</sup>	1-	0.937	2.41·10 <sup>-22</sup>	0.14·10 <sup>-22</sup>	6.1·10 <sup>7</sup>
5.8461	11.54·10 <sup>-1</sup>	1+	0.993	21.5·10 <sup>-22</sup>	4.25·10 <sup>-24</sup>	1.8·10 <sup>5</sup>
5.9480	10.12·10 <sup>-1</sup>	1-	1.011	2.07·10 <sup>-22</sup>	3.52·10 <sup>-25</sup>	1.5·10 <sup>4</sup>
6.2640	10.12·10 <sup>-1</sup>	1-	1.064	1.87·10 <sup>-22</sup>	3.02·10 <sup>-25</sup>	1.3·10 <sup>4</sup>
6.3117	36.56·10 <sup>-1</sup>	1-	1.072	1.06·10 <sup>-22</sup>	1.06·10 <sup>-24</sup>	4.6·10 <sup>5</sup>
6.3628	10.44·10 <sup>-1</sup>	1-	1.081	1.81·10 <sup>-22</sup>	2.96·10 <sup>-25</sup>	1.3·10 <sup>4</sup>
6.7205	10.97·10 <sup>0</sup>	1-	1.142	1.62·10 <sup>-22</sup>	2.64·10 <sup>-24</sup>	1.1·10 <sup>5</sup>
6.9800	50.64·10 <sup>-1</sup>	-	1.186	-	-	-
7.0635	28.61·10 <sup>0</sup>	1-	1.200	1.47·10 <sup>-22</sup>	5.95·10 <sup>-24</sup>	2.6·10 <sup>5</sup>
7.0834	14.62·10 <sup>0</sup>	1-	1.200	1.46·10 <sup>-22</sup>	3.62·10 <sup>-24</sup>	1.5·10 <sup>5</sup>
7.2430	15.67·10 <sup>-1</sup>	-	1.231	-	-	-
7.2780	15.67·10 <sup>-1</sup>	-	1.237	-	-	-
7.2789	14.00·10 <sup>-1</sup>	1+	1.237	1.38·10 <sup>-22</sup>	2.65·10 <sup>-25</sup>	1.1·10 <sup>4</sup>
7.3325	38.71·10 <sup>0</sup>	1-	1.246	1.36·10 <sup>-22</sup>	7.18·10 <sup>-24</sup>	3.1·10 <sup>5</sup>
7.6853	-	-	1.306	-	-	-
10.050	-	-	1.708	-	-	-
10.600	-	-	1.801	-	-	-
11.450	-	-	1.975	-	-	-

zeyinde olay sayısı vermektedirler. Bu değerler de-  
neysel açıdan avantajları açıkça göstermektedirler.

#### 4. CLIC VE LHC'YE DAYALI SEL-ÇEKİRDEK ÇARPIŞTIRICISI

Bu çalışmada çekirdek demetlerinin LHC'den,  
SEL demetinin ise CLIC sürücü (drive) demetinden  
elde edilmesi planlanmıştır (Yavas vd., 2004). Nük-  
leer spektroskopik açıdan uyarılma enerji düzeyleri,  
LHC çekirdek demeti enerjileri, ihtiyaç duyulan SEL  
enerji aralığı ve bunun için gerekli elektron enerji  
aralığı ise aşağıdaki şekilde tespit edilmiştir.

E1 ve M1 dipol uyarılmalarının enerji aralığı:

$$E_{uy} = 2-20 \text{ MeV}$$

LHC çekirdek demeti enerjisi:

$$E_A = \gamma_A m_A c^2, \gamma_A = \gamma_p Z/A, \gamma_p \sim 7462$$

Gerekli SEL enerjileri:

$$\omega_{SEL} = 0.34 - 3.4 \text{ keV } (\sim 4 - 0.4 \text{ nm})$$

LHC çekirdek demetleri için:

$$E_{uy} = 2 \gamma_A \omega_{SEL}$$

$\lambda_u = 2.5 \text{ cm}$  ve  $B_u = 0.43 \text{ T}$  olan CLIC sürücü de-  
meti için gerekli enerji aralığı:

$$E_{elektron} \cong 1.2 - 4 \text{ GeV}$$

Işınlık hedefleri için elektron demeti ve çekirdek  
demetlerinin paketçik ve atma (puls) yapısı mümkün  
olduğunca ayarlanmalıdır. Demet parametreleri ve

paketçik yoğunlukları da dikkate alındığında ışınlık  
değeri olarak  $10^{29} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  düzeyine ulaşabileceği  
gösterilmiştir (Yavas vd., 2004).

#### 4.1. SEL PARAMETRELERİ VE IŞINLIK HESABI

SEL parametrelerinin optimizasyonu SEL süre-  
cinin üç boyutlu simülasyonunu gerektirir ve bu da  
başlangıç elektron demet parametrelerinin ayrıntılı  
olarak bilinmesi ile mümkündür. Fakat üç boyutlu  
etkilerin yarı analitik hesabı bir boyutlu basit bir mo-  
del kullanılarak da yapılabilir.

SEL frekansı, salındırıcı magnet periyodu ve  
magnetik alanı sabit tutularak demet enerjisinin de-  
ğiştirilmesi ile ayarlanır. 4 nm'de 1.2 GeV demet  
enerjisini alırsak, salındırıcı magnet alanı ve periyodu  
sırasıyla 0.43 T ve 2.5 cm olur. Salındırıcılardaki ek  
odaklama ile elde edilen ortalama 2 m  $\beta$  fonksiyonu  
optimum değerdedir, 20 m'nin altında doyum uzun-  
luğu elde edilebilir ve fotonların toplam sayısı  $n_\gamma = 2.7$   
 $10^{13}$  'dür. Bu sonuçların kullanılması ile elde edilen  
ışınlık değeri,  $n_b = 100$  alınması durumunda 4 nm  
dalgaboyunda  $L = 2.4 \cdot 10^{29} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ . Bu ışınlık çok  
yüksek istatistik ve olay oranlarını verecektir. Tablo  
2'de CLIC\*LHC'ye dayalı SEL-Çekirdek çarpıştırı-  
cısında Pb çekirdeğinin bazı seviyeleri için olay sayı-  
ları, rezonans ve ortalama tesir kesitleri, parite değere-  
leri ve gerekli SEL enerjileri gösterilmektedir (Yavas  
vd., 2005).

## 4.2. FİZİK ARAŞTIRMA POTANSİYELİ

Uyarılma band genişlikleri, pek çok uyarılmış düzeylerin spin ve paritetleri NRF metodları ile belirlenmemektedir. SEL-Çekirdek çarpıştırıcısı bu nice-liklerin belirlenmesine olanak sağlayacaktır. Farklı deneylerle çalışılan çekirdeklerin uyarılmalarının çoğu  $\langle \gamma, \gamma' \rangle$  reaksiyonu ile belirlenememiş uyarılmalar-  
dır. Bunun nedeni düşük istatistik, sınırlı enerji çö-  
zümlemesi ve benzeri problemlerdir. Bu problemlerin  
aşılması için önerilen en etkin deneysel araç SEL-  
Çekirdek çarpıştırıcısı olarak görülmektedir.

Rezonans foton saçılmaları için tesir kesiti iyi bi-  
linen Breit- Wigner formülü ile verilir.

$$\sigma_{rez} \langle \gamma, \gamma' \rangle = \frac{\pi}{E^2} \times \frac{2J_{uy} + 1}{2 \times \langle J_0 + 1 \rangle} \times \frac{B_g B_c \Gamma^2}{\langle E - E_R \rangle^2 + \Gamma^2 / 4} \quad (6)$$

Burada  $E$  gelen fotonun kütle merkezi enerjisi,  $J_{uy}$  ve  $J_0$  sırasıyla uyarılmış ve temel seviyelerin spinleri,  $B_g$  ve  $B_c$  uyarılmış seviyenin giriş ve çıkış kanallarındaki dallanma oranları,  $E_R$  rezonanstaki enerji ve  $\Gamma$  uyarılmış seviyenin toplam genişliğidir. SEL ve çekirdek demetlerinin enerji yayılmaları hesaba katılırsa ( $\Delta E_\gamma / E_\gamma = \Delta \omega / \omega_0 = 10^{-4}$  ve  $\Delta E_A / E_A = 10^{-4}$ ), ortalama tesir kesitinin yaklaşık değeri bulunabilir

$$\sigma_{ort} \approx \sigma_{rez} \frac{\Gamma}{\Delta E_\gamma} \quad (7)$$

Burada  $\Delta E_\gamma \approx 10^{-4} \times E_{uy}$  şeklinde tanımlanır. Saniyedeki olay sayısı,

$$R / s = L \sigma_{ort} \quad (8)$$

Diğer deneylerde olay sayısı günde yüzlerle sınırlı iken, burada olay sayısı saniyede milyonlara ulaşmaktadır.

## 4.3. BİLİNMEYEN BOZUNUM GENİŞLİĞİNİN ÖLÇÜLMESİ

Çekirdeklerin bazı uyarılma durumları için bozunum genişliği bilinirken bazı seviyelerin bozunum genişlikleri  $\langle \gamma, \gamma' \rangle$  reaksiyonlarında belirlenememiştir. SEL-çekirdek çarpıştırıcıları bilinen bozunum genişlikleri kullanılarak bilinmeyen bozunum genişliklerini ölçme olanağı sağlar. Bilinmeyen genişlik aşağıdaki ifadeyi takip ederek bulunabilir.

$$\Gamma_{(1)} \equiv \frac{E_\gamma^{(1)}}{E_\gamma^{(2)}} \times \frac{N_{(1)}}{N_{(2)}} \times \frac{\sigma_{rez}^{(2)}}{\sigma_{rez}^{(1)}} \times \Gamma_{(2)} \quad (9)$$

Burada 1 indisi bozunum genişliği bilinmeyen, 2 indisi ise bozunum genişliği bilinen seviyeye aittir.

## 4.4. SPİNİN BELİRLENMESİ

Uyarılmış çekirdeklerin spinleri durgun hedef deneylerinde yayılan ışınların açılal dağılımlarının kullanılması ile belirlenebilir. SEL-Çekirdek çarpıştırıcısı durumunda laboratuvar ortamında açılal dağılımdan enerji dağılımına geçebiliriz. Spin 1 ve spin 2 durumunda açılal dağılım durgun çerçevede

$$W_1(\theta) = 3/4 (1 + \cos^2 \theta) \quad (10)$$

$$W_2(\theta) = 5/4 (1 - 3\cos^2 \theta + 4\cos^4 \theta) \quad (11)$$

ifadeleriyle verilmektedir. Laboratuvar sisteminde ( $\gamma \gg 1$ ) bu dağılımlar dedektör tarafından enerji dağılımı olarak gözlenecektir:

$$W_1(x) = 3/4 (x^2 - 2x + 2) \quad (12)$$

$$W_2(x) = 5/4 (4x^4 - 16x^3 + 21x^2 - 10x + 2) \quad (13)$$

burada  $x = E_\gamma / \gamma_A \omega$  dir ve  $x$ : 0'dan 2'ye kadar değişir ( $x=0$  için  $\theta=180^\circ$  ve  $x=2$  için  $\theta=0^\circ$  dir). Spin 1 ve spin 2 uyarılmalarından yayınlanan fotonların normalize enerji dağılımları şekil 3'te verilmiştir.

## 4.5. PARİTENİN BELİRLENMESİ

Parite ölçümü için prensipte iki yol vardır: Lineer polarize fotonlar giriş kanalında kullanılabilir veya saçılan fotonların lineer polarizasyonu ölçülebilir. SEL demetinin yüksek derecede polarizasyona sahip olmasından dolayı SEL-Çekirdek çarpıştırıcıları parite ölçümleri için ideal bir yöntem olarak değerlendirilebilir.

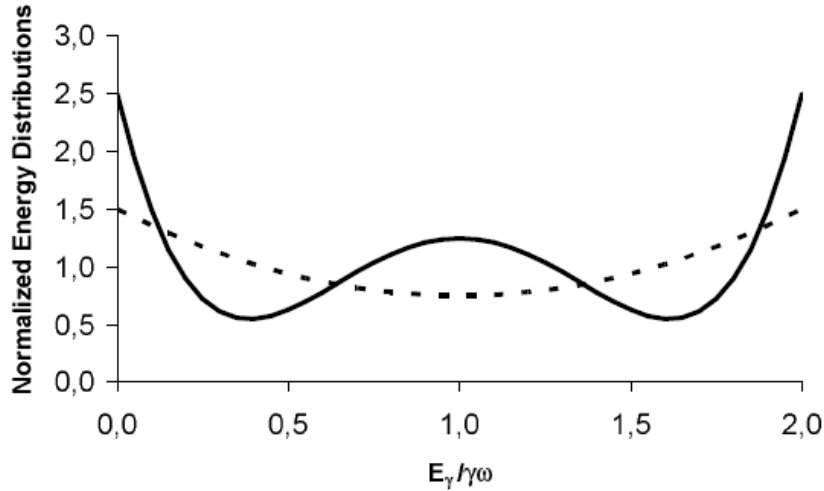
Durgun çekirdek çerçevesinde,  $0^+$  temel düzeyine sahip çekirdeklerin spini 1 olan dipol uyarılmalarının  $\pi$  paritesi, lineer polarizasyona sahip SEL demeti kullanılarak

$$\begin{aligned} \sum &= \frac{\omega \langle \gamma = 90^\circ, \varphi = 0^\circ \rangle}{\omega \langle \gamma = 90^\circ, \varphi = 0^\circ \rangle} \frac{\omega \langle \gamma = 90^\circ, \varphi = 90^\circ \rangle}{\omega \langle \gamma = 90^\circ, \varphi = 90^\circ \rangle} \\ &= \pi_1 = \begin{cases} +1 & \text{for } J^\pi = 1^+ \\ -1 & \text{for } J^\pi = 1^- \end{cases} \quad (14) \end{aligned}$$

ölçümü ile belirlenebilir. Burada,  $\omega$  çekirdeğin durgun çerçevesinde tanımlanan açılal dağılım fonksiyonudur.

## 4.6. KURŞUN (Pb) ÇEKİRDEĞİ İÇİN BAZI SONUÇLAR

Pb çekirdeğinin bozunum genişliği  $\Gamma=0.783$  eV, rezonans tesir kesiti  $\sigma_{rez} = 7.3 \cdot 10^{-22}$  ve saniyede gözlenen olay sayısı  $N(2) = 6.1 \cdot 10^5$  olay/saniye olarak belirlenen 4.085 MeV seviyesini bozunum genişliği bilinen seviye olarak alırsak bu seviyenin verilerinden hareketle bozunum genişliği belli olmayan aynı çekirdeğin rezonans tesir kesiti  $\sigma_{rez} = 0.5 \cdot 10^{-22}$  ve spini



Şekil 3. Spin 1 ve spin 2 uyarılmalarından yayımlanan fotonların normalize enerji dağılımları

$J=1$  olan 11.45 MeV uyarılma seviyesinin bozunum genişliği için bir üst limit olarak  $\Gamma = 5.24 \cdot 10^{-3}$  eV değerini belirleyebiliriz. Bu hesaplama için gözlenebilir sınır olarak saniyede 100 olayın yeterli olacağı söylenebilir. Bu sonuç 11.45 MeV seviyesinin bozunum genişliğinin  $5.24 \cdot 10^{-3}$  eV değerinden büyük olduğu durumlarda CLIC ve LHC'ye dayalı SEL-Çekirdek çarpıştırıcısında gözlenebilir bir seviye olacağı şeklinde yorumlanabilir. Tablo 2'de CLIC\*LHC'ye dayalı SEL-Çekirdek çarpıştırıcısında Pb çekirdeğinin bazı seviyeleri için olay sayıları, rezonans ve ortalama tesir kesitleri, parite değerleri ve gerekli SEL enerjileri gösterilmektedir (Yavas vd., 2005).

## 5. TARTIŞMA VE SONUÇ

4. nesil ışınım kaynağı olarak son 15 yılda gelişen serbest elektron lazerinin (SEL) dalga boyunun ayarlanabilir olması, monokromatik ve kohorent olması, %100 kutuplanabilir olması ve yüksek akı ve parlaklık değerlerine ulaşabilmesi nükleer spektroskopi açısından NRF yöntemlerinde kullanılacak ideal bir foton kaynağı olarak ortaya çıkmaktadır.

Rölativistik çekirdek demetlerinin ortalama keV enerjiye sahip bu fotonları kendi durgun çerçevesinde MeV mertebesinde algılaması çekirdek uyarılma enerji bölgesini kapsadığı için SEL-çekirdek çarpıştırıcıları özellikle deforme çekirdeklerin kolektif uyarılmalarını deneysel açıdan çalışabilmek, bilinmeyen spin ve parite değerlerini belirleyebilmek açısından çok avantajlı birer araç haline getirmektedir. Dünyada birkaç merkezde SEL demeti nükleer spektroskopide kullanılmaya başlamıştır ancak bunlar çarpıştırıcı modunda değil saçılma deneylerinde kullanılmaktadırlar. SEL-çekirdek çarpıştırıcılarının 2010'lu yıllarda deneysel nükleer fizik çalışmalarının güçlü araçları olarak ortaya çıkması beklenmelidir.

**TEŞEKKÜR:** Bu çalışma DPT2003K1201906-5 ve DPT2003K120160 No'lu projelerden desteklenmiştir.

## KAYNAKLAR

- Zilges, A. et al. (2002). Concentration of electric dipole strength below the neutron separation energy in  $N=82$  nuclei. *Phys.Lett.* 542(B), 43
- Mohr, P. (1999). Real photon scattering up to 10 MeV: the improved facility at the Darmstadt electron accelerator S-DALINAC. *Nucl. Instr. and Meth.* 423(A), 480
- Kneissl, U. et al. (1996). Investigation of nuclear structure by resonance fluorescence scattering. *Prog. Part. Nucl. Phys* 37, 349-433.
- Kuliev, A. A. et al. (2000). Rotational invariant model of the states with  $K^\pi=1^+$  and their contribution to the scissors mode. *Int. J. of Mod. Phys.* 9(E), 249-261
- Metzger, F. R. (1959). Resonance fluorescence in nuclei. *Prog. Part. Nucl. Phys.* 7, 54-88
- Pitz, H. H. et al. (1989). Systematic study of low lying dipole excitation in  $^{156,158,160}\text{Gd}$ . *Nucl. Phys.* A492, 411-425.
- Sultansoy, S. (1998). Four ways to TeV scale. *Turk J. of Phys.* 22, 575-595
- Aktaş, H., Büğet, N., Çiftçi, A. K., Meriç, N., Sultansoy, S. and Yavaş, Ö. (1999). New tool for "old" nuclear physics: FEL $\gamma$ -nucleus colliders. *Nucl. Instr. Meth.* 428(A), 271-275.
- Guliyev, E. and Yavaş, Ö. (2000). A search for the collective  $I^\pi=1^+$  excitations in  $^{140}\text{Ce}$  nucleus at FEL $\gamma$ -nucleus collider. *Bulg. J. of Physics* 27, 21-24.

- Guliyev, E., Kuliev, A. A., Sultansoy, S. and Yavaş, Ö. (2002). Collective excitations of  $^{154}\text{Sm}$  nucleus at FEL $\gamma$ -LHC collider. *Int. J. of Mod. Phys.* E11(E), 501
- Koru, H., Özcan, A., Sultansoy, S. and Yavaş, Ö. (2003). Physics Potential of the e-RHIC Based FEL-Nucleus Collider. *Int. J. of Mod. Phys.* 12(E), 533-541.
- Ciucci, F. et al. (2000). Insertion Devices For Synchrotron Radiation and Free Electron Laser. World Scientific, Singapore.
- Saldin, E. L., et al. (2000). The Physics of Free Electron Lasers. Springer, Berlin.
- Yavaş, Ö. Et al. (2004). CLIC-LHC based FEL-nucleus collider. Miniworkshop on Machine and Physics Aspects of CLIC based Future Collider Options. 30 August 2004, CERN, CLIC Note 613.
- Yavaş Ö. et al. (2005). CLIC-LHC based FEL-nucleus collider: Feasibility and physics search potential. *Nucl. Instr. & Meth.* 552(A), 440-448.



**Ömer Yavaş**, 1961 yılı Antal-yakorkuteli doğumlu. 1982'de Ankara Üniversitesi'nden Fizik Mühendisliği olarak mezun oldu. Doktora ve doçentliğini aynı üniversiteden aldı. Halen Ankara Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fizik Mühendisliği bölümünde Profesör olarak öğretim üyeliği yapmaktadır. Parçacık hızlandırıcıları ve ışınım kaynakları konusunda çalışmakta olup halen Türk Hızlandırıcı Merkezi konulu üniversitelerarası DPT projesinin yürütücülüğünü yapmaktadır.  
<http://science.ankara.edu.tr/~yavas>