TÜBİTAK

# PARIS (Dedektör) Kümesinin Performansının Araştırılması

**Program Kodu:** 1001

**Proje No:** 115F103


Proje Yürütücüsü:
**Prof.Dr. Sefa ERTÜRK**

Bursiyerler:
Vakkas BOZKURT
Mehmet ÖZDEMİR
Elif ŞAHİN



Mayıs 2018
NİĞDE

## ÖNSÖZ

Son yıllarda, özellikle deneysel nükleer fizik çalışmalarında ve gama ışını spektroskopisinde kullanılan dedektörlerin gelişimi konusunda birçok çalışma yapılmaktadır. Özellikle yeni nesil dedektör olarak adlandırılan $LaBr_3$, $CeBr_3$ sintilatörleri ile yapılan gama-ışını spektroskopisi bu çalışmalar arasında önemli bir yer tutmaktadır.

PARIS (**P**hoton **A**rray for the studies with **R**adioactive **I**on and **S**table beams), "Dedektör Kümesinin Performansının Araştırılması" başlıklı bu proje kapsamında yapılan çalışmalarda bu tür dedektörlerle kullanılması kaçınılmaz olan dijital elektroniğin bu dedektör sistemine adaptasyonu ve PARIS dedektör kümesinin performansının ortaya çıkarılması için Nisan, Haziran, Kasım 2016 yılında Fransa, Paris'te yer alan Orsay Nükleer Araştırma merkezinde gerçekleştirilen deneyler ve bu deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar ayrı başlıklar halinde bu sonuç raporunda sunuldu.

Temmuz 2017 yılında Fransa, GANIL'de (**G**rand **A**cceleratuer **N**ational d'**I**ons **L**ourds-National Large Heavy Ion Accelerator) iki farklı $LaBr_3$(Ce)+NaI(Tl) ve $CeBr_3$+ NaI(Tl) fosfor sandviç dedektörlerden oluşturulmuş PARIS dedektör kümeleri kullanılarak gerçekleştirilen deneyden elde edilen verilerlerden yararlanarak bu dedektörlerin enerji çözünürlüğü değerleri elde edilerek dedekörlerin performansları bu sonuç raporunda sunuldu.

Gerçekleştirilen deneyden elde edilen verinin analizi için Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Fizik Bölümü, Nükleer Veri Analizi laboratuvarında gerekli bilgisayar sistemleri kullanılarak algoritmalar ve bilgisayar yazılımları geliştirilerek bu verilerin analizlerini gerçekleştiren sistem kuruldu. Ayrıca NUMEXO2 dijital elektronik ünitenin farklı dedektörlerle kullanımını sağlayacak yazılımsal değişiklikler de bu proje döneminde tamamlanarak bu elektronik ünitenin farklı dedektörlere adapte edilebileceği gösterildi. Bunlara ek olarak Nükleer Veri Analiz Laboratuvarında NUMEXO2 dijital elektronik ünitelerde kullanılan FADC alt elektronik ünitelerin kalite kontrol ve arıza tespitini yapacak bir elektronik sistem de oluşturuldu.

Yeni nesil nükleer iz dedektör olarak adlandırılan $LaBr_3$(Ce) ve $CeBr_3$ sintilatör üzerine yapılan bu proje kapsamında gerçekleştirilen çalışmalardan elde edilen sonuçlar farklı bilimsel toplantılarda sunuldu ve elde edilen bilgi birikimi sayesinde PARIS dedektör kümesi kullanılarak nükleer fizik alanında cevap bekleyen sorular için yeni deney önerileri sunuldu. 2018-2019 döneminde bu deney önerilerinden on tanesi farklı (Fransa, GANIL, Orsay ve Polonya, Krakow) nükleer araştırma merkezlerinde gerçekleştirilecektir.

115F103 nolu proje için proje süresince aldığımız desteklerden dolayı TÜBİTAK'a teşekkür ederiz.

## İÇİNDEKİLER


**1. GİRİŞ** 1

**2. LİTERATÜR ÖZETİ** 3

**3. GEREÇ VE YÖNTEM** 9

3.1 PARIS Dedektör Kümesi için kullanılacak Elektronik Üzerine Yapılan Çalışmalar 9

3.1.1 PARIS_Pro Elekroniği 11

3.1.2 TNT Elektroniği (Strasbourg) 12

3.1.3 CAEN V1730 Elektroniği 13

3.1.4 NUMEXO2 Elektroniği 15

3.2 PARIS dedektör Kümesi Veri Formatı ve Veri Analizi 21

3.2.1 GECO Programı 22

3.2.2 VIGRU Programı 27

3.2.3 GRU Programı 29

3.2.4 Veri Formatı 30

3.2.5 EXOGAM2 Veri Formatı 31

**4. BULGULAR VE TARTIŞMA** 34

4.1 PARIS Dedektör Kümesi için Almanya, ELBE'de gerçekleştirilen deneysel çalışmalar 34

4.1.1 Dahili-ekleme süreci 36

4.1.2 Harici-Ekleme Süreci 38

4.1.3 Enerji Çözünürlüğü 39

4.2 PARIS Fosfor sandviç dedektörü için yapılan lineerlik, verimlilik, enerji çözünürlüğü ve zaman yanıtları ile ilgili çalışmalar 41

4.2.1 Deneyin Ayrıntıları 41

4.2.2 Lineerlik, Sayım Hızı Etkileri ve Enerjiye karşı zamanın lineerliliği 44

4.2.3 Sayım oranı fonksiyonu olarak Dedektör kazanç stabilitesi 46

4.2.4 Dedektörlerin cevap süresinin analizi 48

4.2.5 Enerji çözünürlüğü 48

4.2.6 Zaman Çözünürlüğü 50

4.2.7 Verim 51

4.2.8 Toplam enerji spektrumu 52
4.3 Nisan-2016 yılında gerçekleştirilen deney 55
4.4 Haziran 2016'da gerçekleştirilen deney 62
4.5 Kasım 2016'da gerçekleştirilen deneysel çalışma 67
4.5.1 Deneysel Düzenek 69
4.6 Nisan 2017'de yapılması planlanan deneysel çalışma 71
4.6.1 $CeBr_3$ Sintilatör dedektörü üzerine yapılan çalışmalar 72
4.7 Temmuz 2017 tarihinde Fransa, GANIL'de gerçekleştirilen deneysel çalışmalar 82
4.7.1 Deneyin Motivasyonu 83
4.7.2 Deneyde kullanılan hedef ve demet 93
**5. SONUÇ** 109
5.1 PARIS Dedektör Kümesi Elektronik Ünitesi Çalışmaları 109
**6. KAYNAKLAR** 123

## TABLOLAR DİZİNİ

1. Tablo 1. Bir kristal çerçevesi (EC-Frame) MFM2.2 terminolojisinde << Blod Frame>> türü sabit çerçeve uzunluğudur. Aşağıdaki tabloda kristal çerçevenin tüm alanları tanımlanmıştır 33

2. Tablo 2. PARIS demeti içinde yer alan 9 spektranın eklenmesi ile oluşan enerji çözünürlüğü değerlerini göstermektedir 40

3. Tablo 3. Ölçümlerde kullanılan radyoaktif kaynaklar ile $E_\gamma$ ve $N_s$ radyoaktivite miktarları 42

4. Tablo 4. Radyoaktif yakalama reaksiyonları ve salınan $E_\gamma$ 42

5. Tablo 5. 11.7 MeV'de $LaBr_3$(Ce) dedektörünün farklı voltaj bölücülerdeki (B1, B2, B3) lineerlikten sapma oranları (α). Ayrıca 662 keV'de $LaBr_3$(Ce) kristalindeki anot atma yüksekliği (A1) de verilmiştir 45

6. Tablo 6. 18.1 ve 22.6 MeV'de $LaBr_3$(Ce) dedektörünün B3 voltaj bölücüsüyle farklı yüksek voltajlarda (A1) lineerlikten sapma oranları (α) 46

7. Tablo 7. $CeBr_3$ kristali ile birlikte kullanılan foto-çoğaltıcı tüplerin ana özelliklerinin özeti. Hem XP20D0 hem de R9779 PMT'leri 2 girişlidir. Borosilikat cam pencere ile 8 aşamalı doğrusal odaklı fotoçoğaltıcılar. R9779 PMT değeri Corning CS 5-58 mavi filtre için mavi duyarlılık endeksi olarak verilir 74

8. Tablo 8. $^{60}$Co (1173/1332 keV'de) ve $^{22}$Na (511 keV'de) kaynakları kullanılarak HV = 1200 V'da HV = 1330 V'de $CeBr_3$-Hamamatsu dedektörü ve HV = 1200 V'de $CeBr_3$-Fotonis dedektörü için FWHM zaman çözünürlüklerinin özeti; Ayrıntılar için metne bakın. 79

9. Tablo 9. En güncel deneyden (Nudat) elde edilen $^{20,22}$O ve $^{16,18}$C için birinci ve ikinci $2^+$ durumu ve *ab initio* modelinde EFT NN ve NN+NNN etkileşimi kullanılarak elde edilen yarı ömür değerleri. Tabloda aynı zamanda $2^+_2 \rightarrow 2^+_1$ geçişi için karışım oran değerlerinin hesaplaması da verilmektedir 85

10. Tablo 10. $LaBr_3$(Ce) dedektörü kullanılarak her bir kristal için $^{60}$Co kaynağından elde edilen ~1173.2 keV ve ~1332.5 keV enerjileri için hesaplanan enerji çözünürlük değerleri 97

11. Tablo 11. $CeBr_3$ dedektörü kullanılarak her bir kristal için $^{60}$Co kaynağından elde edilen ~1173.2 keV ve ~1332.5 keV enerjileri için hesaplanan enerji çözünürlük değerleri 100

12. Tablo 12. $LaBr_3$(Ce) dedektörü kullanılarak her bir kristal için $^{137}$Cs kaynağından elde edilen ~661.7 keV enerji için hesaplanan enerji çözünürlük değerleri 102

13. Tablo 13. $CeBr_3$ dedektörü kullanılarak her bir kristal için $^{137}$Cs kaynağından elde edilen ~661.7 keV enerji için hesaplanan enerji çözünürlük değerleri 104

## ŞEKİLLER DİZİNİ

1. Şekil 1. Dokuz Fosfor sandviç dedektör topluluğu. 10

2. Şekil 2. PARIS dedektör kümeleri topluluğu 10

3. Şekil 3. NIM Modüle monte edilebilen PARIS_Pro elektronik ünitenin önden görünüşü 12

4. Şekil 4. TNT dijital elektroniği ile V1751 dijital elektroniğinin $^{22}$Na radyoaktif kaynağı kullanılarak karşılaştırılması 13

5. Şekil 5. CAEN dijital elektroniğin önden görünümü (sol), $^{60}$Co ve $^{137}$Cs radyoaktif kaynağı ile fosfor sandviç dedektörü ve fosfor sandviç topluluğunun aynı anda veri kaydını gerçekleştiren deney düzeneği 14

6. Şekil 6. Sinyal şekli diskriminatörü histogramını (sol) ve enerjinin sinyal şekli diskriminatörüne karşı grafiği (sağ) 15

7. Şekil 7. Fosfor sandviç dedektörün farklı enerji bölgeleri için çözünürlük değerleri 15

8. Şekil 8. Fosfor sandviç dedektöründeki $LaBr_3$(Ce) ve NaI(Tl) kristallerinin ayrı ayrı ve fosfor sandviçin toplam performansı 16

9. Şekil 9. NIM modülüne monte edilebilen 16 kanallı, 14 bitlik veri kaydı yapabilen 200 MHz aralığında çalışabilen NUMEXO2'nin NIM modülüne monte edilmiş görüntüsü 16

10. Şekil 10. $^{60}$Co ve $^{137}$Cs radyoaktif kaynakları kullanılarak EXOGAM dedektörü için geliştirilmiş yazılımı (firmware) kullanılarak elde edilen spektrum 17

11. Şekil 11. PARIS dedektör kümesi üzerinde enerji ve uçuş zamanı ölçümleri gerçekleştirmek için kullanılan deney düzeneği 17

12. Şekil 12. Bir dedektör için uçuş zamanının örneklemeye karşı performans grafiği gösterilmektedir, burada herhangi bir tetikleme şartı uygulanmamıştır 18

13. Şekil 13. NUMEXO2 dijital elektronik ünitenin EXOGAM ve NEDA dedektörleri için veri kaydetme aralıklarını gösterir elektronik diyagram 20

14. Şekil 14. Deney ve veri kayıt kontrol paneli 23

15. Şekil 15. NUMEXO2 tetikleme kontrol paneli 23

16. Şekil 16. Trapezoidal şekil K-parametre kontrol paneli 23

17. Şekil 17. GECO Deney ve veri kayıt kontrol paneli 24

18. Şekil 18. GECO Deney ve veri kayıt kontrol paneli 24

19. Şekil 19. Veri kayıt, tetikleme zamanlama paneli 25

20. Şekil 20. K, M ve alfa-parametreleri paneli 25

21. Şekil 21. FAD kontrol paneli 25

22. Şekil 22. Her bir FADC ince kalibrasyon ayar kontrol paneli 25

23. Şekil 23. NUMEXO2 içindeki kısımların veri kontrol kayıt paneli 26

24. Şekil 24. NUMEXO2 veri okuma değeri paneli 26

25. Şekil 25. VIGRU grafik ara yüzü kontrol paneli 27

26. Şekil 26. Kalibrasyon için kullanılan $^{60}$Co+$^{152}$Eu radyoaktif kaynaklarının enerji spektrumu (sağ) tarafta gösterilirken çalışılan terminaller ve kullanılan hesap makinası (sol) tarafta gösterilmektedir 28

27. Şekil 27. EXOGAM2 dedektörlerden bir tanesinin iç (inner) kristali için dağılım spektrumu (sol) tarafta gösterilirken çalışılan terminal ve kullanılan hesap makinası (sağ) tarafta gösterilmektedir 29

28. Şekil 28. GRU veri işleme akış şeması 29

29. Şekil 29. PARIS fosfor sandviç dedektörün şematik görünümü 32

30. Şekil 30. Nükleer Rezonans Floresans deneyi ile Bremstrahlung elde edilmesi 34

31. Şekil 31. Polarize Bremstrahlung deney düzeneği 35

32. Şekil 32. Deney sırasında dedektörlerin takibi için numaralandırılan Paris dedektör kümesi 35

33. Şekil 33. $^{60}$Co ve $^{137}$Cs kaynaklarının kullanılması ile fosfor sandviç dedektörde meydana gelen yavaş ve hızlı sinyal dağılımı. Etiketlenen çizgiler tam enerji piklerini temsil etmektedir 36

34. Şekil 34. Hızlı ve yavaş matrisin dönmesi ile oluşan görünüm. Görülen çizgiler aynı gama-ışını enerjisinin y-eksenine paralel olan olayları ifade etmektedir 37

35. Şekil 35: Hızlı ve yavaş matrislerin ortogonal olarak gösterimi. Ortagonal çizgilerin açısı, gelen gama-ışını enerjisinin 135 derece X-eksenine göre dönmesi ile meydana gelmiştir. Enerji spektrumu her iki bileşen eklenerek elde edilmiştir 37

36. Şekil 36. Paris dedektör kümesinde yer alan 5 numaralı fosfor sandviç dedektörü ve etrafında yer alan diğer dedektörlerden elde edilen gama-ışının harici-ekleme süreci uygulanarak oluşturulan spektrumu 38

37. Şekil 37. Proton yakalama reaksiyonu için kullanılan deney düzeneği 42

38. Şekil 38. V1720e (250 MS/s) sayısallaştırıcı kullanılarak D1 dedektöründe kaydedilen yüksek enerjili gama atmaları. Gösterilen sinyaller 18 ve 22 MeV arasındaki kalibre edilmemiş gamaları göstermektedir. Baseline çizgisi yaklaşık olarak 3900 civarında alınmıştır 43

39. Şekil 39. DPP-PSD donanım yazılımıyla $E_p$=160 keV de $^{11}$B(p, $\gamma$) reaksiyonu kullanılarak D2 dedektörü için elde edilen datanın iki boyutlu histogramı ($Q_{short}$ vs $Q_{long}$). $\theta_x$ ve $\theta_y$ , NaI(Tl) ve $LaBr_3$(Ce) kristallerindeki tek olayların $Q_{long}$ ve $Q_{short}$ eksenlerine göre eğim açısını vermektedir 44

40. Şekil 40. Fosfor sandviç dedektörde $LaBr_3(Ce)$ için enerji cevap lineerliği. a) 11.7 MeV'e kadar D1 dedektörünün farklı voltaj bölücülerle değişimi b) a'nın aynısı D2 dedektörü için, c) 22.6 MeV'e kadar D1 dedektörünün B3 voltaj bölücülerle değişimi d) c'nin aynısı D2 dedektörü için 45

41. Şekil 41. 835 keV gama ışınının $LaBr_3(Ce)$ D1 dedektöründeki kayma miktarı (a) ve FWHM (b) değerinin sayım oranına karşı grafiği; benzer şekilde D2 dedektörü için (c) ve (d) de verilmektedir 47

42. Şekil 42. 835 ve 662 keV gama ışınlarının $LaBr_3(Ce)$ D2 dedektöründeki kayma miktarı (a) ve FWHM (b) değerinin sayım oranına karşı grafiğinin B1 ve B3 voltaj bölücüler için karşılaştırılması, A1=90 mV 47

43. Şekil 43. 835 keV ve 4.4 MeV için deneysel ve simülasyon spektrumların karşılaştırılması 48

44. Şekil 44. Yeşil kısım ile gösterilen dağılım, (FWHM~%3.6) çözünürlük değeri ile Americium-Beryllium (Am-Be) kaynaklarından elde edilen 4.4 MeV gama ışınlarını ve kırmızı alan ile gösterilen kısım ise (FWHM~%2.7) çözünürlükte Ep=163 keV de $^{11}B(p, \gamma)$ reaksiyonu ile $LaBr_3(Ce)$ dedektörü kullanılarak elde edilen dağılımı ifade etmektedir 49

45. Şekil 45. Yeşil ile gösterilen kısım deneyden alınan veriyi ve kırmızı ile gösterilen kısım ise simülasyon verisi ile elde edilen gama ışınlarını ifade etmektedir 49

46. Şekil 46. D2 dedektörünün $LaBr_3(Ce)$ (üst) ve NaI(Tl) (alt) kristallerinin 12 MeV'e kadar ki enerji çözünürlüğü (A1=60 mV). Semboller, ölçülen çözünürlüğü ve çizgilerse fit fonksiyonunu göstermektedir 50

47. Şekil 47. D1 ve D2 dedektörlerinin $LaBr_3(Ce)$ kristallerinin $^{60}Co$ kaynağıyla V1751 ( 1GS/s) sayısallaştırıcı (soldaki panel) ve normal elektronik (sağdaki panel) kullanılarak elde edilmiş uçuş zamanı spektrumları. Kırmızı çizgi deneysel datanın Gaussian fitini göstermektedir 51

48. Şekil 48. D1 ve D2 dedektörlerinin $LaBr_3(Ce)$ kristallerinin dedektör yüzeyine 10 ve 20 cm mesafedeki ölçülen ve simüle edilen foto pik verimliliği 51

49. Şekil 49. D2 dedektörünün şekil 3'teki iki boyutlu spektrumu 52

50. Şekil 50. D2 dedektörünün $^{11}B(p,\gamma)$ reaksiyonundan salınan 163 keV enerjili gama ışını için tek $LaBr_3(Ce)$ (Mavi kesikli çizgi), tek NaI(Tl) (kırmızı kesikli çizgi) ve ikisinde beraber (Siyah çizgi) gözlenen olaylara ait enerji spektrumları 53

51. Şekil 51. Deneysel kurulumun şematik diyagramı 55

52. Şekil 52. $^{238}U$ fizyonunda salınan ortalama toplam gama-ışın enerjisinin gelişimi 58

53. Şekil 53. Hamamatsu R7223-100 foto tüpünün fosfor sandviçi oluşturan $LaBr_3$ ve NaI(Tl) kristallerine bağlı durumu ve her bir kristal ve her iki kristalin ortak sinyalleri karşılaştırıldı 59

54. Şekil 54. 33 ve 58 MeV arasında toplam kinetik enerjili farklı $^{11}B$ olayları için p($^{11}B$,$^{11}C$)n reaksiyonunda nötron yayınlanmasının kinematik kıvrımları 59

55. Şekil 55. 15 MeV enerjili Bremstrahlung gama enerjili gama ışınlarının $^{11}B$ hedefini bombardımanı sonucu elde edilen gama spektrumunu spektrumu 65

56. Şekil 56. saf Germanyum dedektörü ile elde edilen enerji spektrumu 65

57. Şekil 57. Dedektörün algıladığı tüm yükün kristal tarafından tamamının absorbe edilmesi ve dedektörün kaynakla arasında belli bir açı ile konumlandırılması durumunda algılanan yükünün bir kısmının kristal tarafından absorbe edildiği karşılaştırılmış ve bu karşılaştırma yükün yük miktarına karşı çizilen matris grafiği üzerinde gösterilmiştir. Şeklin sol kısmında burada ifade edilen mukayese gösterilirken şeklin sağında dönen yükün yük miktarına karşı matris grafiği gösterilmiştir 66

58. Şekil 58. PARIS dedektör kümesinde kullanılan fosfor sandviçlerin her birinden elde edilen bilginin diğer fosfor sandviçten elde edilen bilgi ile birleştirilmesi yani eklemeli durumda elde edilen enerji spektrumu 66

59. Şekil 59. önerilen deneyin şematik bir diyagramını göstermektedir. $^{239}Pu$ hedef iyonizasyon odası içerine yerleştirilmiştir. Oda nötron kaynağından 10cm uzaklıkta P10 sayım gazı ile doludur. 4 adet BaF2 ve $LaBr_3$(Ce) kümesi uçuş zamanı ile anlık gama ve nötron ayrımı için hedef bölgesinden 30 cm uzağa yerleştirilmiştir 69

60. Şekil 60. $CeBr_3$ kristalinin aşırı hızlı referans BaF2 dedektörüne karşı zaman yanıtını ölçmek için kullanılan zaman gecikmeli kurulumun şematiği 72

61. Şekil 61. $^{60}Co$ için zaman spektrumu, bir çift referans $BaF_2$ dedektöründe tespit edilen γ-ışınlarının tam tepe noktasını seçerek üretilir. Saat kalibrasyonu kanal başına 6,0 ps'dir 73

62. Şekil 62. $^{137}Cs$ kaynağı için Photonis XP20D0 PMT'ye bağlanan $CeBr_3$ için enerji spektrumu HV = 1200 V'da çalışmaktadır. Lineer olmayanlar için FWHM değeri düzeltildi 75

63. Şekil 63. R9779 PMT'ye (yukarıda) ve XP20D0 PMT'ye (aşağıda) bağlı $CeBr_3$ kristali için enerji doğrusallık çizimleri 76

64. Şekil 64. Tekli bir dedektör için ns'de harici gecikmenin bir fonksiyonu olarak ps cinsinden zaman çözünürlüğüne bağımlılık: Hamamatsu R9779 PMT (üst panel) ve Photonis XP20D0 (alt panel) ile birleştirilmiş $CeBr_3$. ORTEC 935 CFD'deki dahili gecikme jumperi kaldırıldı, yaklaşık -1 ns'lik bir dahili gecikmeye karşılık geldi. Sonuçlar $^{60}Co$ (1173 ve 1332 keV'lik γ-ışını enerjileri) ve $^{22}Na$ (511 keV'de) kaynaklarını kullanarak elde edildi 77

65. Şekil 65. Uygulanan yüksek voltajın bir fonksiyonu olarak Hamamatsu R9779 ve Photonis XP20D0 PMT'lerine bağlanan $CeBr_3$ kristali için elde edilen ps'de FWHM zaman çözünürlüğünün bağımlılığı tek bir dedektör için verilmiştir 78

66. Şekil 66. $CeBr_3$-Hamamatsu dedektörü için bir $^{22}Na$ kaynağı (üst panel) ile ölçülen referans dedektörüne karşı zaman spektrumu 79

67. Şekil 67: $^{16}C$ ve $^{18}C$ için bozunum şeması 84

68. Şekil 68. $^{20}O$ ve $^{22}O$ için bozunum şeması 85

69. Şekil 69. $E_{demet}$=135 MeV enerjisinde $^{18}O+^{238}U$ çoklu nükleon transfer reaksiyonunda yer alan nükleer grafik bölgesi. Kırmızı-çizgi ile ifade edilen alan gamma-spektroskopisi çalışmalarında gerçekleştirilebilir olan nötron zengini çekirdekleri ifade etmektedir. Bu çekirdekler Zagrebaev-Greiner modelinde (Zagrebaev V. and Greiner W., 2007) tesir kesit oranını 0.05 mb değerine karşılık gelmektedir 86

70. Şekil 70. $E_{demet}$=135MeV enerjsinde $^{18}O+^{238}U$ reaksiyonu için Rutherford tesir kesiti $\sigma_{Ruth}$ ve elastik tesir kesit $\sigma_{el}$ oranı. Hesaplamalar GRAZING ve FRESCO kod sistemi kullanılarak elde edilmiştir 87

71. Şekil 71. LNL' de PRISMA-CLARA deneyinde $^{208}Pb$ hedef üzerine 5.8 Mev/u enerjisinde $^{22}Ne$ demeti ile elde edilen izotop dağılımı 87

72. Şekil 72. Farklı çekirdekler için kütle dağılımları 88

73. Şekil 73. GRAZING model ile 135 MeV enerjide $^{18}O+^{238}U$ reaksiyonu için elde edilen $^{20}O$ ve $^{16}C$ çekirdekleri için diferansiyel tesir kesit dağılımı, sarı ile gösterilen alan VAMOS spektrometresinde kabul edilen alanı ifade etmektedir 88

74. Şekil 74. 135 MeV enerjisinde $^{18}O+^{238}U$ reaksiyonu için Zagrebaev-Greiner modeli kullanılarak tahmin edilen tesir kesit değerleri 89

75. Şekil 75. Deneyde kullanılacak olan AGATA+PARIS+VAMOS spektrometresi 90

76. Şekil 76. 135 MeV demet enerjisinde $^{18}O+^{238}U$ reaksiyonu ile üretilen $^{16}C$ çekirdeği için AGATA ve PARIS spektrometresinde ölçülen gamma-ışını spektrasının simülasyonu 90

77. Şekil 77. MBPT *ab initio* yaklaşımında B(E2)/B(M1) δ karışım oranı hesaplanarak, $^{20}O$ ve $^{22}O$ için $2^+_2 \rightarrow 2^+_1$ geçişlerinde açısal momentum dağılımı (Holt J.D., 2013). Nükleer etkileşmede üçlü kuvvet ve üçlü olmayan kuvet göz önüne alınarak dağılım gösterilmektedir 91

78. Şekil 78. 2217 keV enerjisinde $^{16}C$ için, τ=50, 100, 200, 300, 600, 1000 fs. yarı ömür değerleri göz önüne alınarak elde edile simülasyon dağılımını göstermektedir. Şekilde görülen iki peak yapısı, hedeften minimum 5 μm mesafe üzerine yerleştirilen bir $^{93}Nb$ bozunur madde (10 mg/cm$^2$ kalınlıkta) neden olmaktadır. Simulasyon hesaplamasında 4000 olay kullanılarak gerçekleştirilmiştir 92

79. Şekil 79. Değişken Plunger Teknik kullanılarak τ=1, 5 ve 10ps ve hedef ile indirgeyici arasında d=15, 30, 60, 75, 150, 300 ve 600 μm alarak simülasyon gerçekleştirilmiştir. Simülasyon 2600 sayım kullanılarak yapılmıştır 92

80. Şekil 80. Deney sırasında dedektörlerin takibi için numaralandırılan Paris dedektör kümesi 93

81. Şekil 81. $LaBr_3$(Ce) dedektörü kullanılarak 0,1,2,3 numaralı kristaller için $^{60}Co$ kaynağından elde edilen dağılım. Sol kısım $^{60}Co$ kaynağından elde edilen ve fit edilmiş ~1173.2 keV enerji dağılımını, sağ kısım ise ~1332.5 keV enerji için fit edilmiş dağılımı ifade etmektedir 94

82. Şekil 82. $LaBr_3(Ce)$ dedektörü kullanılarak 4,5,6,7 numaralı kristaller için $^{60}Co$ kaynağından elde edilen dağılım. Sol kısım $^{60}Co$ kaynağından elde edilen ve fit edilmiş ~1173.2 keV enerji dağılımını, sağ kısım ise ~1332.5 keV enerji için fit edilmiş dağılımı ifade etmektedir 95

83. Şekil 83. $LaBr_3(Ce)$ dedektörü kullanılarak 8 numaralı kristal için $^{60}Co$ kaynağından elde edilen dağılım. Sol kısım $^{60}Co$ kaynağından elde edilen ve fit edilmiş ~1173.2 keV enerji dağılımını, sağ kısım ise ~1332.5 keV enerji için fit edilmiş dağılımı ifade etmektedir 96

84. Şekil 84. $LaBr_3(Ce)$ dedektörü kullanılarak tüm kristaller için $^{60}Co$ kaynağından elde edilen dağılım. Sol kısım $^{60}Co$ kaynağından elde edilen ve fit edilmiş ~1173.2 keV enerji dağılımını, sağ kısım ise ~1332.5 keV enerji için fit edilmiş dağılımı ifade etmektedir 96

85. Şekil 85. $CeBr_3$ dedektörü kullanılarak 0,1,2,3 numaralı kristaller için $^{60}Co$ kaynağından elde edilen dağılım. Sol kısım $^{60}Co$ kaynağından elde edilen ve fit edilmiş ~1173.2 keV enerji dağılımını, sağ kısım ise ~1332.5 keV enerji için fit edilmiş dağılımı ifade etmektedir 98

86. Şekil 86. $CeBr_3$ dedektörü kullanılarak 4,5,6,7 numaralı kristaller için $^{60}Co$ kaynağından elde edilen dağılım. Sol kısım $^{60}Co$ kaynağından elde edilen ve fit edilmiş ~1173.2 keV enerji dağılımını, sağ kısım ise ~1332.5 keV enerji için fit edilmiş dağılımı ifade etmektedir 99

87. Şekil 87. $CeBr_3$ dedektörü kullanılarak 8 numaralı kristal için $^{60}Co$ kaynağından elde edilen dağılım. Sol kısım $^{60}Co$ kaynağından elde edilen ve fit edilmiş ~1173.2 keV enerji dağılımını, sağ kısım ise ~1332.5 keV enerji için fit edilmiş dağılımı ifade etmektedir 100

88. Şekil 88. $CeBr_3$ dedektörü kullanılarak tüm kristaller için $^{60}Co$ kaynağından elde edilen dağılım. Sol kısım $^{60}Co$ kaynağından elde edilen ve fit edilmiş ~1173.2 keV enerji dağılımını, sağ kısım ise ~1332.5 keV enerji için fit edilmiş dağılımı ifade etmektedir 100

89. Şekil 89. $LaBr_3(Ce)$ dedektörü kullanılarak 0,1,2,3,4,5,6,7,8 numaralı kristaller için $^{137}Cs$ kaynağından elde edilen ve 661.7 keV enerji için fit edilmiş dağılımlar gösterilmektedir 101

90. Şekil 90. $LaBr_3(Ce)$ dedektörü kullanılarak tüm kristaller eklenerek $^{137}Cs$ kaynağından elde edilen ve 661.7 keV enerji için fit edilmiş dağılımlar gösterilmektedir 102

91. Şekil 91. $CeBr_3$ dedektörü kullanılarak 0,1,2,3,4,5,6,7,8 numaralı kristaller için $^{137}Cs$ kaynağından elde edilen ve 661.7 keV enerji için fit edilmiş dağılımlar gösterilmektedir 103

92. Şekil 92. $CeBr_3$ dedektörü kullanılarak tüm kristaller eklenerek $^{137}Cs$ kaynağından elde edilen ve 661.7 keV enerji için fit edilmiş dağılımlar gösterilmektedir 104

93. Şekil 93. $LaBr_3(Ce)$ için deneyde kullanılan 0,1,2,3,4,5,6,7,8 numaralı kristallerde $^{60}Co$ kaynağı için elde edilen hızlı (fast-time)-y-ekseni ve yavaş (slow-time)-x-ekseni zaman spektrometresi 105

94. Şekil 94. $CeBr_3$ için deneyde kullanılan 0,1,2,3,4,5,6,7,8 numaralı kristallerde $^{60}Co$ kaynağı için elde edilen hızlı (fast-time)-y-ekseni ve yavaş (slow-time)-x-ekseni zaman spektrometresi 106

95. Şekil 95. $LaBr_3$(Ce) için deneyde kullanılan 0,1,2,3,4,5,6,7,8 numaralı kristallerde $^{137}$Cs kaynağı için elde edilen hızlı (fast-time)-y-ekseni ve yavaş (slow-time)-x-ekseni zaman spektrometresi
107

96. Şekil 96. $CeBr_3$ için deneyde kullanılan 0,1,2,3,4,5,6,7,8 numaralı kristallerde $^{137}$Cs kaynağı için elde edilen hızlı (fast-time)-y-ekseni ve yavaş (slow-time)-x-ekseni zaman spektrometresi
108

97. Şekil 97. Niğde Nükleer Veri Analiz Laboratuvarında NUMEXO2 ve NaI için yürütülen Ar-Ge çalışmalarında kullanılan deney düzeneği 110

## ÖZET

Projenin amacı iki başlık halinde verilmiştir. Birincisi yeni geliştirilen NUMEXO2 dijital elektronik sistemin PARIS dedektör kümesine adaptasyonu. İkincisi ise PARIS dedektör kümesinin performansının araştırılması.

Proje süresince, NUMEXO2 dijital elektronik ünitenin PARIS dedektör kümesine adaptasyonu için yapılması gereken yazılımsal değişiklikler ve deneysel veri formatının belirlenmesi süreci başarıyla tamamlanmıştır.

PARIS dedektör kümesinin performansının araştırılması kapsamında: daha önce Almanya Dresden ELBE'de gerçekleştirilen deneysel veri analiz edildi. Bunun için gerekli olan analiz programları ve algoritmalar geliştirildi.

PARIS dedektör kümesi performans ölçümleri için iki farklı fosfor sandviç "$LaBr_3$(Ce)+NaI(Tl) ve $CeBr_3$+NaI(Tl)" dedektörleri aynı deney düzeneğinde test edildi ve her iki dedektör kümesi için enerji çözünürlüğü değerleri elde edildi.

Elde edilen performans değerlerine göre PARIS dedektör kümesi kullanılarak nükleer fizik alanında cevap bekleyen sorulara cevap bulmayı amaçlayan deney önerileri sunuldu. Bugüne kadar sunulan bu deney önerilerinden dört tanesi gerçekleştirildi ve on tanesi de 2018-2019 döneminde farklı (Fransa, GANIL ve Orsay, Polonya, Krakow) nükleer araştırma merkezlerinde gerçekleştirilecektir. Gerçekleştirilen deneylerden elde edilen verilerin analizleri tamamlanmak üzere olup elde edilecek sonuçlar yakın gelecekte yayınlanmak üzere saygın bilimsel dergilere gönderilecektir. Gerçekleştirilecek bu deneysel çalışmalarla Türkiye'de bu alanda çalışacak nükleer fizik araştırmacıların bu alandaki çalışmalarda daha aktif rol alması sağlanacağı için çok başarılı bir proje süreci tamamlanmıştır.



.**Anahtar kelimeler:** PARIS projesi, $LaBr_3$(Ce), $CeBr_3$, dedektör, NUMEXO2 dijital elektronik

**ABSTRACT**

The main aims of this project was given in two titles. First one was to adapt newly developed NUMEXO2 digital electronics (into PARIS Cluster detectors. Second one was to investigate the performance of PARIS Cluster detectors.

During the period of this Project, necessary development on software of the NUMEXO2 digital electronic and experimental data format have been prepared successfully.

Within the investigation of PARIS Cluster detectors: previously obtained experimental data from Germany, Dresden ELBE experiment was analysed. Necessary algorithm and software for data analysis were developed.

For performance measurements of the PARIS Cluster detectors two different types of phoswich detectors $LaBr_3$(Ce)+NaI(TI) ve $CeBr_3$+NaI(TI) were tested at the same experimental setup and energy resolution values of each clusters were obtained.

According to performance, values obtained for PARIS cluster detectors experimental proposals were prepared for un-answered physics questions. Up to date for of those experimental proposals performed and then of those experimental proposals will be performed using different nuclear research centres (France, GANIL and Orsay, Poland Krakow). Data analysis for those performed experiment have been going on and the results from these experiment will be sent to respectful scientific journals in near future. By being part of this near future experimental work, scientists who are working in the field of nuclear physics will have chance to play active role in this field, therefore this Project is accomplished successfully.

**Keywords:** PARIS Project, LaBr3(Ce), $CeBr_3$ detector, NUMEXO2 digital electronic

# 1. GİRİŞ

PARIS (Dedektör) Kümesinin Performansının Araştırılması başlıklı bu proje, daha önceki raporlarda ve proje önerisinde belirtildiği üzere iki temel hedef üzerine inşa edilmiştir. Birincisi teknik (dedektör elektroniği, dedektör geometrisi ve kullanılacak olan materyaller) ikincisi ise yeni nükleer fizik alanında yeni fiziksel sonuçların elde edilmesidir. Proje süresince gerçekleştirilen çalışmaların sunulduğu bu sonuç raporunun daha iyi anlaşılması için proje önerisinde vurgulanan ve proje boyunca yapılan çalışmaların neler olduğunu özetlemek faydalı olacaktır.

Daha önce belirtildiği üzere projemizde iki temel hedef belirlenerek çalışmalar yürütülmüştür. Bu çalışmaların birincisi, teknik alanda Ar-Ge çalışmaları yürüterek bu proje kapsamında NUMEXO2 dijital elektronik ünitenin PARIS dedektör kümesindeki fosfor sandviç ($LaBr_3$(Ce)+NaI(Tl)) dedektörlerine ve dedektör kümesine adaptasyonunu sağlamak ve bu amaç doğrultusunda elektronik ünite üzerinde gerekli yazılımsal (firmware) değişikler yapmak ve PARIS dedektörleri için kullanılması muhtemel diğer elektronik ünitelerle bir karşılaştırma yapmak ve PARIS dedektörleri için uygun olan dijital elektronik üniteyi belirlemek. Diğer hedef ise PARIS fosfor sandviç dedektörü ve PARIS dedektör kümesinin karakterizasyonunu, performansını tayin edebilmek için nükleer fizik alanında yeni fiziksel sonuçlar almayı hedefleyen deneyler gerçekleştirmek ve bu deneyler hakkında (neler olduğu, nerede, ne zaman yapıldığı ve bu deneylerin amaçlarının neler olduğu) detaylı bilgi vererek elde edilen sonuçları sunmaktır.

Bu amaçlar doğrultusunda proje boyunca farklı ülkelerde bulunan nükleer araştırma merkezlerinde farklı nükleer fizik deneyleri gerçekleştirildi. Bu deneysel çalışmaların neler olduğu ve bu deneysel çalışmalardan ne gibi sonuçların elde edildiği ilerleyen bölümlerde detaylı olarak verilecektir. Fakat bu kısımda kısaca bu deneylerin neler olduğu, nerede yapıldığı ve nelerin amaçlandığını kısaca belirtmek faydalı olacaktır.

Fransa, Paris şehri Orsay nükleer araştırma merkezinde bulunan Tandem hızlandırıcı ve LICORNE nötron kaynağı kullanılarak proje kapsamında proje önerisi kabul edilen deneyleri gerçekleştirerek ve yeni deney önerilerinde bulunarak PARIS dedektör kümesinin zaman yanıtı, enerji çözünürlüğü ve nötron-gamma ayrım gücünü tayin etmek gibi çalışmalar hedeflendi. Bu hedefler doğrultusunda, PARIS dedektör kümesinin deney sırasında kullanılmasıyla, deney sırasında oluşan parçacıkların nötron-gama ayrımı, nötronların algılanması ve oluşan parçacıkların enerjilerinin ne olduğu, uçuş zamanı yöntemi kullanılarak tespit edilebilir. Dedektörler tarafından algılanan nötron ve gama ışınlarının birbirinden ayrı algılanmalarının sağlanması ve her biri üzerine istenilen şartların konulması ve birlikte

kullanılması amaçlanmıştır. Bunlara ek olarak, deney sırasında kullanılması planlanan diğer spektrometrelerle birlikte PARIS dedektörlerinin eş zamanlı kullanılarak veri alım performansının tayin edilmesi için yeni yöntem, model ve yeni algoritmaları geliştirmek projenin diğer temel hedefleri olmuştur. Elbette bu proje döneminde gerçekleştirilen fizik deneylerinin ve amaçlarının neler olduğu ve nelerin yapıldığı ilerleyen bölümlerde ve bu bölümlerin alt bölümlerinde detaylı olarak verildi. Fakat burada rapor akışı içerisinde sırasıyla hangi başlıklara değinildiğini sıralamak faydalı olacaktır.

Raporun giriş kısmında, proje konusunun ne olduğu ve rapor içerisinde değinilen konu başlıklarının neler olduğu verildi.

Literatür kısmında, yürütülen proje kapsamında gerçekleştirilen çalışmalar ile ilgili bugüne kadar gerçekleştirilmiş çalışmaların neler olduğu ve bu çalışmalardan elde edilen bilgilerin projeyle ilgilerinin neler olduğu vurgulandı.

Projenin temel iki hedeflerinden biri olan NUMEXO2 dijital elektronik ünitenin PARIS dedektör kümesine adaptasyon çalışmaları kapsamında yürütülen farklı dijital elektronik ünitelerle ilgili çalışmalar, veri formatı ve veri analizi gibi konularda gerçekleştirilen çalışmalar ve elde edilen sonuçlar “Gereç ve yöntem” bölümünde detaylı olarak verildi.

Projenin diğer hedefi olan PARIS dedektör kümesinin performans araştırmaları için gerçekleştirilen deneylerin neler olduğu, bu deneylerde kullanılan deneysel aygıtların neler olduğu, bu deneylerin hangi nükleer araştırma merkezlerinde gerçekleştirdiği ve bu deneylerde nelerin hedeflendiği “Bulgular ve tartışma” bölümünde detaylı olarak verildi.

Son olarak bu deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar, bu sonuçların projenin başarı ölçütlerine katkıları ve proje süresince elde edilen proje çıktılarının neler olduğu ve bunların proje açısından neden önemli olduğu “Sonuç” bölümünde verildi.

## 2. LİTERATÜR ÖZETİ

Öncelikli olarak PARIS projesinin kronolojik gelişimi hakkında kısa literatür bilgisi vermek faydalı olacaktır. Projenin resmi olarak kabul edilmesi 26 Ocak 2012'de Fransa, GANIL'de SPIRAL2 haftası çalıştayında PARIS projesi mutabakat metninin imzalanmasıyla 2012-2019 yılları arası çalışma dönemlerinde nelerin yapılacağı karara bağlanmıştır. Buna göre, 2"x2"x2" $LaBr_3$(Ce) kristalinin optik olarak 2"x2"x6" NaI(Tl) kristaliyle birleştirilip tek bir foto tüp (PMT) ile birlikte kullanılması ve dokuz kristal çiftlerinin bir araya getirilmesi ile oluşturulan ilk PARIS Cluster (dedektör kümesi) prototipi, Fransa, Polonya, İtalya, İngiltere, Romanya, Bulgaristan ve Türkiye tarafından sağlanan kristal çiftleriyle 2013 yılında başarıyla oluşturularak ilk testleri Fransa, Orsay nükleer araştırma merkezinde ve ikinci testi Almanya, ELBE nükleer laboratuvarlarında (Schwengner vd. 2007) gerçekleştirildi.

Buralarda test edilen PARIS dedektör kümelerinin geometrisi ve şekli, PARIS projesi bilim danışma kurulu tarafından belirlendi. Farklı merkezlerde gerçekleştirilen simülasyon çalışmaları ve dedektörlerin radyoaktif kaynaklarla gerçekleştirilen testlerinden elde edilen sonuçlar değerlendirilerek PARIS dedektör sistemi için kübik geometri şeklinde, dokuz fosfor sandviç dedektörün üç sıra üst üste küme (cluster) halinde kullanılması kararlaştırıldı. Proje kapsamında geliştirilen bu dedektör kümelerinin nükleer fizik araştırmalarında çok önem arz eden enerji çözünürlüğü ve zaman yanıtı iyi olan birer dedeksiyon aygıtı olarak kullanılmasıyla oldukça yüksek açısal momentum ve uyarılma enerjilerine sahip egzotik bileşik çekirdeklerin gözlenebilmesi sağlanacaktır. Bu tür çekirdeklerde nükleonların tek parçacık veya kolektif (birlikte) hareket içerisinde olup olmadıkları ve aynı zamanda yüksek dönme modlarında olup olmadıkları anlaşılabilir (Maj vd. 2009, Lewitowicz, 2009).

Proje kapsamında prototipi geliştirilen bu dedektör kümelerinin ilerleyen yıllarda SPIRAL2'de sabit ve radyoaktif huzme kullanılarak gerçekleştirilecek derin esnek olmayan çarpışma veya transfer reaksiyonlarıyla üretilecek nötron zengin veya proton zengin egzotik çekirdeklerin yapılarını ve özelliklerini tayin etmekte kullanılması planlanmaktadır.

Bu tür deneyler yardımıyla kararlılık vadisinden uzak bölgelerde bulunan veya yeni oluşturulan egzotik çekirdeklerin nükleer yapıları detaylı bir şekilde anlaşılabilir ve elde edilen sonuçlar yardımıyla nükleer yapı ya da nükleer madde içerisinde gerçekleşen nükleer etkileşmeler daha iyi anlaşılabilir. Böylece uyarılmış formda elde edilen egzotik çekirdeklerden yayımlanan gama ışınlarının açısal dağılım hesaplamalarını, enerjilerini ve dolayısıyla oluşturdukları nükleer yapının temelini anlama imkânı elde edilebilir.

Bu tür deneylerde çok küçük tesir kesitlerde ve çok kısa zaman dilimlerinde ürün çekirdekler oluştuğu için, zaman yanıtları hızlı ve enerji çözünürlüğü yüksek olan dedektörlere ihtiyaç duyulmaktadır. PARIS projesi kapsamında yeni novel–teknolojik ürün olan $LaBr_3$(Ce) ile NaI(Tl) kristallerinin birlikte kullanılmasıyla geliştirilen PARIS küme dedektörlerinin bu ihtiyacı karşılayabileceği proje kapsamında gerçekleştirilen deneylerle gösterilmiştir.

Elbette bu tür yeni teknolojiyle birlikte hızlı veri alma imkânı sağlayan yeni dijital elektronik düzeneklerin de geliştirilmesi gerekmektedir. Bu amaca hizmet edecek çalışmaların bir kısmının yürütüldüğü bu proje ve öncesinde başarıyla tamamlanan 210T043 numaralı TÜBİTAK projesi yardımıyla bu alanda önemli Ar-Ge çalışmaları yürütüldü.

PARIS projesince yürütülen Ar-Ge çalışmalarına ülkemizdeki üniversitelerin dahil edilmesi ve özellikle deneysel nükleer fizik alanında aktif araştırmalar yürüten Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi'nin proje çerçevesinde yüklendiği görevler ile mevcut uluslararası işbirliği daha da geliştirildi. Başta Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi'ndeki araştırmacılar olmak üzere ülkemizde özellikle alfa, beta ve gama spektroskopisinde yeni teknolojiye dayanan alfa, beta, gama ve nötron dedektörleri ile ilgili Ar-Ge çalışmaları başarıyla tamamlandı. Başlatılan bu çalışmalarla, bu alanda uluslararası projelerde yüklenilen görevler ile ülkemizin bu alandaki tanınırlığı artırılarak Türkiye'de deneysel nükleer fizik alanında bulunan boşluğun bir kısmı da dolduruldu.

Daha önce başarıyla tamamlanan TÜBİTAK projesi (210T043) ile proje ekibinde yer alan doktora öğrencisi Birgül EREN ve yüksek Lisans öğrencileri Davut ÇAKIR ve Fatma ÇELİK'in bu alanda yetkin elemanlar hale gelmesi sağlandı. Bu araştırmacılardan Davut ÇAKIR "$LaBr_3$(Ce) Kristalinin GEANT4 Simülasyon Programıyla Performansının Değerlendirilmesi: PARIS Projesi." (Çakır, 2011) başlıklı yüksek lisans tezini tamamlayarak bu novel teknolojik ürün hakkında Türkiye'de ilk yüksek lisans tezini literatüre kazandırdı.

Diğer yüksek lisans öğrencisi Fatma ÇELİK ise yine başarıyla tamamlanan önceki proje kapsamında gerçekleştirildiği çalışmalarla "Nükleer Spektroskopide Kullanılan Elektroniğin Evrimi: PARIS Projesi Elektroniği" başlıklı yüksek lisans tezi (Çelik, 2014) ile PARIS projesi ilk prototip dedektör ve elektroniği üzerine bu alanda Türkiye'de gerçekleştirilmiş ilk yüksek lisans tezini literatüre kazandırmıştır. Yine proje kapsamında gerçekleştirilen çalışmalardan elde edilen sonuçlar farklı bilimsel toplantılarda, Rutherford Contennial Conference on Nuclear Physics, Ağustos 2011'de sunuldu yayınlandı (Ertürk vd. 2012, Zeibilinski vd. 2013). Bir yıl sonra 2013 yılında İngiltere, Liverpool'da gerçekleştirilen bilimsel toplantıda "EGAN2013 Conference" "Preliminary Results of Phoswich Detector ($LaBr_3$) and PARIS Cluster" başlıklı bildiriler sunuldu.

Nükleer fizik alanında günümüze kadar hala cevaplanamayan birçok soru bulunmaktadır, bu soruların cevaplanabilmesi için radyoaktif iyon huzmesinin üretilmesi ve bu yolla elde edilecek yüksek yoğunluklu nötron zengin huzmelerle gerçekleştirilecek deneylerle egzotik çekirdeklerin üretilerek bu çekirdeklerin nükleer yapıları araştırılarak cevaplanamayan bu sorulara cevaplar bulunması amaçlanmıştır.

Bu tür çekirdeklere ulaşabilmenin temel yolu radyoaktif iyon huzmesi kullanmaktır. Bu tür çekirdek üretimlerini, Fransa, GANIL'de gerçekleştirmek mümkündür. Egzotik çekirdeklerin dev dipol rezonans yayınlaması ve hızlı rotasyonda üretilmiş olmaları ve bu yapının bozunumlarının günümüzde kullanılan konvansiyonel dedektör sistemleriyle ölçülmesi mümkün olmadığı için çok uluslu PARIS projesi geliştirilmiştir (Maj vd., 2009).

PARIS dedektör kümeleriyle oluşturulacak dedektör topluğunda kullanılacak kristallerin lineerlik, enerji-zaman ayırım testleri, darbe dijitalleme ve darbe biçim analizleri, yüksek enerjili radyoaktiftik karşısındaki performanslarının ve yanıtlarının belirlenmesi bu tür dedektör sistemleri için önemlidir (Mazumdar vd. 2010). SPIRAL2'den elde edilecek yüksek yoğunluklu nötron zengin huzmelerle gerçekleştirilecek nükleer reaksiyonlar sonucu yüksek açısal momentuma sahip bileşik çekirdekler üretilerek farklı fizik konularını incelemek mümkün olacaktır. Bu alanda incelenecek farklı fizik konuların bazıları aşağıdaki şekilde sıralanabilir;

1. Oblate şekilden triaxial şekle geçişi ifade eden Jacobi veya diğer nükleer şekil dönüşümlerinin tespit edilmesi
2. Dev dipol rezonans 'tan nötron zengin sistemlere ulaşılması ve bu sistemlerin sıcaklık-spin bağımlılığının tayin edilmesi
3. N=Z sistemlerinin izospin karışımlarının tespit edilmesi
4. Yayınlanan gama-ışınlarının toplam enerjileri dışında açısal dağılımlarının da belirlenmesi

Yukarıda sıralanan bu fiziksel çalışmalar günümüzde nükleer fizik alanında cevap bekleyen önemli konulardır. Bu konularla ilgili benzer çalışmalar yürüten araştırmacıların elde ettiği bazı sonuçlara örnek olarak; Jacobi geçişinin gözlendiği $^{45}$Sc (Pomorski, 2003), $^{46}$Ti (Dudek, 2005;), $^{143}$Eu (Ward, 2002) kaynakları sıralanabilir. İzospin konusunda ve N=Z tipi çekirdeklerde T=0 izospin durumunda E1 geçişlerinin olabileceğine dair durumların gözlendiği (Maj, 1992; Mazumdar, 2004) kaynakları da örnek olarak verilebilir.

Önümüzdeki yıllarda SPIRAL2'de kullanılacak olan radyoaktif iyon huzmesi kullanılarak üretilecek olan egzotik çekirdeklerin yapısı, şekilleri, uyarılma modları daha önce öngörülen hale (halo) modları veya muhtemel yeni modların varlığı keşfedilebilecektir. Ayrıca fizikteki

temel simetri, standart model içerisindeki temel etkileşimler ve egzotik çekirdeklere mahsus oluşabilecek yeni sihirli sayıların keşfi gibi birçok konuyu açığa kavuşturmak mümkün hale gelecektir.

Astrofizik araştırmalarında önemli yer tutan r-süreçleri (hızlı süreçler) ve s–süreçleri (yavaş süreçler) bu projenin sunduğu imkânlarla dahi iyi anlaşılabilecek ve bunların anlaşılmasıyla, oluşabilecek yeni araştırma alanlarında yeni keşiflerin gerçekleşmesi mümkün olacaktır. Nükleer çekirdeklerde yaygın gözlenen oblate ve prolate yapılar sıvı damlası modelleriyle açıklanabilmektedir, hafif ve orta ağır çekirdeklerde gözlenen Jacobi geçişleri, GDR durumlar, kullanılan Recoil Filtre Dedektörü (Nicolini vd. 2007) ile oluşturulan reaksiyon ürünlerinin ayrımını daha basit hale getirmektedir.

Gerçekleştirilen teorik hesaplamalar (Maj vd. 2009) kolektif olmayan prolate yapıda birçok çekirdeğin olabileceğini öngörmektedir. İzospin bağımlılığının gözlenebileceği bu tür yapıların ve diğer egzotik nükleer şekil ve yapıların ve mekanizmaların anlaşılması, bu yapılarda bulunan çekirdeklerin yayınladıkları gama–ışınlarının tümünün algılanması, ancak ve ancak bu gama ışınları arasındaki korelasyonun anlaşılmasıyla mümkündür. Bu yapıları anlayabilecek teknikler (Pomorski vd 2003; Dudek vd. 2005) referanslarında detaylı bir şekilde anlatılmıştır.

Proje kapsamında yürütülen simülasyon çalışmaları GEANT4 programı aracılığıyla gerçekleştirildi. GEANT ismi, "**GE**ometry **A**Nd **T**racking (Geometri ve İz sürme)" kelimeleri kullanılarak oluşturulmuştur. GEANT4 simülasyon programı, şimdiki ve gelecek nesil yüksek enerji fiziği dedektörlerinin simülasyonu için hazırlanan paket programdır (Meo, 2008).

İlk tasarım, Yüksek Enerji Fizik deneylerinde kullanılmak üzere hazırlanmıştır. Fakat bugün, bu alana ek olarak, nükleer fizik, medikal ve biyoloji bilimleri, astrofizik, hızlandırıcı fiziği gibi alanlarda da kullanılmaktadır. GEANT4 programı CERN tarafından geliştirilmiş ve halen desteklenen ve ihtiyaçlara göre güncellenen bir programdır. GEANT4, kolay konfigürasyon ve uygun ara yüzeyi ile radyasyon kaynaklarının, insan vücudunun ve dedektör sistemlerinin dikkatlice modellenmesine izin vermektedir. Aynı zamanda, farklı ortamlar içerisindeki etkileşmeleri büyük bir hassasiyetle takip etme olanağı da sağlamaktadır (Meo, 2008).

GEANT4 programı ile hazırlanan tek kristal simülasyonlarında, kristalin detaylı bir şekilde biçimlendirilmesi ve dedektörün ürettiği optik fotonların sınır ve transfer etkilerinin analiz edilmesi mümkündür (Meo, 2009). Simülasyonlar, deneysel verilerle büyük uyum göstermesine rağmen, simülasyonlarda kristal yüzeyinin optik özelliklerinin detayları hala araştırılmaktadır (Birocchi, 2009).

Simülasyon çalışmalarına paralel olarak yürütülen deneysel çalışmalarda kullanılan kristallerden olan NaI(Tl)'de görülen gecikmiş gama ışınları (Thompson 1964)'ün önceki çalışmalarından iyi bilinmektedir. 2x2x2 inç $LaBr_3$(Ce) üzerinde bir Cf kaynağı tarafından yayılan nötronlar-gamalar arasındaki etkileşimiyle ilgili çalışmalar (Oberstedt vd., 2013) rapor edilmiştir.

Bu çalışmalardan elde edilen önemli sonuçlardan birisi, $LaBr_3$(Ce) sintilatörü kullanılarak Cf kaynağının nötron enerji spektrumunun yeniden yapılandırılmasıdır. $LaBr_3$(Ce) ve CsI(Na) fosfor sandviç üzerinde yürütülen bazı çalışmalar, bir AmBe kaynağı kullanarak kristalin çekirdekleriyle hızlı ve gecikmiş gama emisyonunun belirlenmesi için gereken çalışmalar PARIS ortak işbirliği projesi kapsamında yapılmıştır (Roberts vd., 2010).

NaI(Tl) sintilatörlerin nötron yanıtları, geçmişte yoğun olarak incelenmiştir (Häusser vd., 1983). PARIS dedektöründe NaI(Tl) katmanının hangi enerjilerine kadar iyi bir nötron gama ayırımı yapabilir olmasının anlaşılması oldukça ilginçtir. PARIS dedektör kümesindeki dokuz fosfor sandviç dedektörlerin kendi arasında meydana gelen çoklu saçılmalar ve dedektörlerin bu durumdaki performanslarının ne olduğunun bilinmesi gerekmektedir.

Projenin temel hedeflerinden birisi, NUMEXO2 dijital elektronik sistemin gama ışını spektroskopisinde yeni kullanılacak olan $LaBr_3$(Ce)+NaI(Tl) fosfor sandviç dedektöründe ilk kez kullanılmasını sağlamak ve her bir $LaBr_3$+NaI(Tl) fosfor sandviç dedektörün ve PARIS dedektör kümesinin yeni NUMEXO2 dijital elektronikle çalışması durumundaki performansı araştırmaktır.

NUMEXO2 dijital elektronik sistemi, 2011-2013 yılları arasında CNRS-TUBİTAK ikili iş birliği (TÜBİTAK Proje No: 210T048) ile yürütülen proje kapsamında gama ışını spektroskopisinde kullanılan Germanyum dedektörlerinden oluşturulmuş EXOGAM2 dedektörleri için yeni geliştirdiğimiz bir ünitedir. Bu ünitenin geliştirilmesi sırasında elde edilen sonuçların yayınlandığı bilimsel çalışmalara (Egea vd. 2013) referansından ulaşılması mümkündür.

NUMEXO2 dijital elektronik ünite üzerinde “Gereç ve Yöntem” kısmında belirtilen değişiklikler gerçekleştirilip bu elektroniğin PARIS dedektörüne entegrasyonu ve adaptasyonu ilk kez bu projeyle sağlanacak ve literatürdeki önemli bir boşluk bu yolla giderilecektir. Bu dijital elektronik üzerine daha önce TÜBİTAK destekli projeler kapsamında yürütülen Ar-Ge faaliyetleri ile Türkiye’de bu alanda çalışan ilk araştırmacılar arasında yer alarak yine gama spektroskopisinde yaygın kullanılan EXOGAM2 dedektörleri için geliştirdiğimiz NUMEXO2 dijital elektroniğinin yeni geliştirilen novel dedektör $LaBr_3$(Ce)+NaI(Tl) fosfor sandviç

dedektörüne adapte ederek dijital elektroniğin farklı spektroskopik dedektörlerde kullanılabilmesi sağlanacaktır.
NUMEXO2 dijital elektroniğin nötron dedektörlerine adaptasyonuyla ilgili iki çalışmamız (Luo vd., 2014 ve Modamio vd., 2015) 2014 ve 2015 yıllarında SCI kapsamındaki Nuclear and Instrument Methods dergisinde yayınlanmıştır. Bu alandaki çalışmalarımızın bu tür saygın dergilerde yayınlanması TÜBİTAK destekli projeler yardımıyla yeni geliştirdiğimiz dijital elektroniğin başka dedektör sistemlerine entegre edileceğini göstermektedir.

Böylece dijital elektroniğin dedektör teknolojilerine adaptasyonu ile ilgili öncü araştırmacılar arasında yer alma imkânı elde edilecektir. Bu dijital elektroniğin tıbbi görüntülemede kullanma potansiyeli dikkate alındığında bu alanda Ar-Ge yapabilecek araştırmacılar arasında yer alabilme imkânı elde edilecektir. Bu proje kapsamında NUMEXO2 dijital elektronik ünitenin PARIS dedektör kümesindeki fosfor sandviç ($LaBr_3$(Ce)+NaI(Tl)) dedektörlerine ve dedektör kümesine adaptasyonu kapsamında yapılan detaylı çalışmalar ilerleyen bölümlerde izah edilecektir.

PARIS küme dedektörlerinin karakterizasyonunun ne olduğunu ortaya çıkarmak için, son zamanlarda IPN Orsay'da (Lebois M vd., 2014, Wilson J.N. vd.2013) geliştirilen LICORNE ters kinematik nötron kaynağı kullanılarak 0.5-12 MeV enerji aralığında deneyler yapılıp dedektör kümesinin zaman yanıtı, enerji çözünürlüğü ve nötron-gamma ayrım gücü belirlendi. Bu deneyde hedeflenen temel amaç, farklı nötron enerjilerini daha düşük enerji aralıklarında kullanarak PARIS dedektör kümesinin performansını en iyi derecede tayin etmektir. Böylelikle nötron-gama ayrımı, nötronların algılanması ve enerjilerinin ne olduğu uçuş zamanı yöntemi kullanılarak tespit edilecektir. Bu deney sırasında genellikle ağır iyon reaksiyonlarında karşılaşılan ve enerjileri 0.5-12 MeV arasında olan nötronların bu dedektör kümesiyle olan etkileşimleri ve dedektörlerin bu enerjilerdeki nötronları algılama ve nötron-gama ayırımı tespit performansı araştırıldı. Dedektörler tarafından algılanan nötron ve gamaların birbirinden ayrı algılamalarının sağlanması ve her biri üzerine istenilen şartların konularak daha temiz spektrum elde edebilmek için yeni yöntem, model ve yeni algoritmalar geliştirildi. Gama spektroskopisinde ilk kez kullanılacak olan yeni fosfor dedektörlerinin veri kayıtlarından elde edilen bulguların anlamlı spektrumlara dönüştürülmesi için yeni algoritmalar ilk kez bu proje ile geliştirildi.

# 3. GEREÇ VE YÖNTEM

## 3.1 PARIS Dedektör Kümesi için kullanılacak Elektronik Üzerine Yapılan Çalışmalar

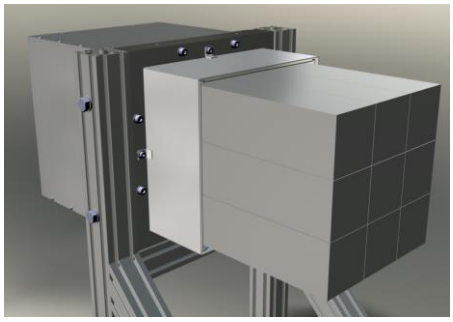
Bu proje kapsamında prototipi üretilen uluslararası ortaklı PARIS dedektör kümesinin modüler olması ve Avrupa'da farklı nükleer araştırma merkezlerinde (Fransa'da, GANIL, Orsay, Saclay, Almanya'da GSI, İtalya'da INFN, Polonya'da, Krakow IFJ PAN, Finlandiya'da Jyvaskyla vb.) kullanılabilmesini mümkün kılmıştır.

Bu nedenle proje kapsamında üretilen ilk prototip dedektör kümesi ilk önce Fransa'da Orsay ve GANIL nükleer araştırma merkezlerinde ve daha sonra Almanya, ELBE nükleer araştırma merkezinde kullanılmıştır.

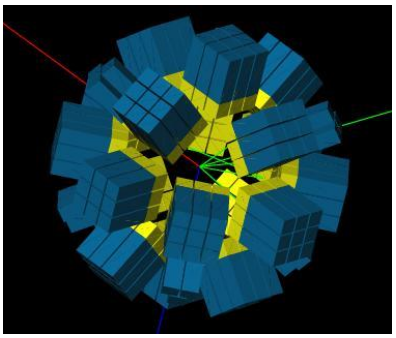
Yine yürütülen bu proje döneminde üretilen yeni PARIS dedektör kümeleri kullanılarak planlanan deney önerilerini burada zikredilen nükleer araştırma merkezleri dışında Polonya, Krakow'daki nükleer araştırma merkezinde ve Fransa, GANIL nükleer araştırma merkezlerinde diğer spektrometrelerle birlikte kullanılarak yeni nükleer fizik deneylerinin gerçekleştirilmesine karar verilmiştir.

Her biri dokuz fosfor sandviç dedektörden oluşan PARIS dedektör kümesi için süreç içerisinde farklı geometrileri içeren senaryolar (küresel yapı, kübik yapı, radyal yapı ve kümesel yapı) üzerinde yürütülen çalışmalar sonucunda, PARIS dedektör kümesinin dokuz fosfor sandviçten [$LaBr_3$(Ce)+Naı(Tl)] oluşturularak bir araya getirilmesine karar verildi (Şekil 1). Şekil 2'de gösterilen bir dedektör topluluğu şeklinde oluşturulması kararlaştırıldı. Bu karar uluslararası ortakların 2012 yılında imzaladığı mutabakat metninde kayıt altına alındı.

İlk PARIS dedektör kümesinin prototipi 2013 yılında Fransa, Paris şehrinde bulunan Orsay Nükleer araştırma merkezinde test edildi. İlk PARIS dedektör kümesinin prototipinde kullanılan fosfor sandviç dedektörlerden bir tanesi daha önce başarı ile tamamladığımız TÜBİTAK destekli 210T043 nolu proje kapsamında alınan fosfor sandviç dedektör olup bu dedektörün ilk prototipte kullanımından önce dedektör üzerinde yapılması gereken tüm testler, dedektörün karakteristik özelliklerini ortaya koyan tüm ölçümler Niğde Üniversitesi, Fizik bölümü, Nükleer Veri Analiz laboratuvarı bünyesinde kurulan test merkezinde gerçekleştirildi. Bu çalışmalar hakkında daha detaylı bilgi 210T043 nolu proje raporunda mevcuttur.



Şekil 1. Dokuz Fosfor sandviç dedektörden topluluğu.



Şekil 2. PARIS dedektör kümeleri

Oluşan PARIS dedektör kümesi.

Daha önce de belirtildiği gibi PARIS dedektör kümelerinin modüler olması farklı araştırma merkezlerinde istenilen açılarda konumlandırılabilmesi önemli bir avantaj sağlamakta ve bu özelliği nedeniyle aşağıda sıralanan yeni nükleer fizik araştırmalarını gerçekleştirme imkânı sağlayacaktır.

1- Fizyon fragmentlerinin yapısı
2- Nükleer dinamiği
3- Süper izinli geçişleri
4- $^{12}C$ çekirdeğinin alfa yapısı
5- $^{14}C$ çekirdeğinin Coulomb uyarılmasının etkileri
6- $^{40}Ca$ çekirdeğinin süper deforme yapısı
7- $^{44}Ti$ çekirdeğinin yüksek spin seviyelerinin incelenmesi
8- A~18 kütleli çekirdeklerin ömür ve yarı ömür hesaplamalarının yapılabilmesi

Yukarıda sıralan nükleer fizik araştırmalarını gerçekleştirmek için Fransa, GANIL nükleer araştırma merkezine verilen 3 (üç) proje önerisi, Fransa, Orsay nükleer araştırma merkezine verilen 4 (dört) proje önerisi ve Polonya, Krakow, IFJ PAN nükleer araştırma merkezine verilen 4 (dört) proje önerisi kabul edildi. Ayrıca İtalya, INF nükleer araştırma merkezine verilen 7 (yedi) proje önerisinin de yakın zamanda sonuçlanmasını beklemekteyiz. Kabul edilen bu deney önerilerinin bir kısmı proje sonuç raporunun yazıldığı bu döneme kadar gerçekleştirildi. Bu deneylerle ilgili detaylı bilgi ve elde edilen sonuçlara “Bulgular ve Tartışma” kısmında ulaşmak mümkündür.

Modüler PARIS dedektör kümesinin farklı nükleer araştırma merkezlerinde farklı dedektörler ile birlikte kullanılması ve bu merkezlerde bulunan farklı elektronik modüllerle kullanılması durumunda nasıl performans gösterdiği ve kullanılan elektronik ünite ile uyumlu çalışıp çalışmadığı önem arz etmektedir. Bu nedenle PARIS dedektör kümesinde kullanılan fosfor sandviç dedektörlerin farklı elektronik ünitelerle testleri gerçekleştirilerek bu dedektörlerin ve kullanılan elektroniğin, bu dedektörle çalışması durumunda performanslarının nasıl olduğu ile ilgili gerçekleştirdiğimiz çalışmalar neticesinde elde ettiğimiz sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

Bugüne kadar dört farklı elektronik ünitenin (NUMEXO2, CAEN V1730, TNT ve PARIS_Pro) PARIS fosfor sandviç dedektörü ve PARIS dedektör kümesi ile test edilmesi ile elde edilen sonuçlara geçmeden önce dijital elektronik kullanımının gerekliliğini maddeler halinde özetlemek faydalı olacaktır:

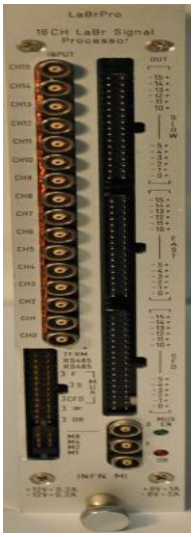
1- Radyoaktif İyon Huzmeleri ile gerçekleştirilecek deneylerde aynı anda birçok farklı reaksiyonun gerçekleştiği için küçük zaman diliminde oluşan birçok olayı içeren verilerin kaydedilebilmesi, algılanan sinyallerin hızlı işlenebilmesi için dijital elektronik kullanımı ihtiyacı doğmuştur.
2- Sistemde kullanılan tüm dedektörlerin dijital özellikli elektronik ünitelerle donatılması, sistemdeki dedektörlerin eş zamanlı çalışma, veri kaydı ve aynı anda koordine edilme imkânı tanıyacaktır.
3- Yüksek hızda veri kayıt imkânı sağlayacaktır.
4- Germanyum dedektörlerindeki etkileşimin nerede ve ne zaman gerçekleştiği konusunda bilgi sağlayacaktır.
5- Deney düzeneğinin tetikleme şartlı veya şartsız çalışmasına imkân sağlayacaktır.
6- Deney sırasında kaydedilen her olay için bir zaman etiketi edinilmesi sağlanacaktır.

Şimdi, kullanılan farklı elektronik ünitelerle gerçekleştirilen testler ve bu testler ile elde edilen bazı ön sonuçları açıklamak faydalı olacaktır.

### 3.1.1 PARIS_Pro Elektroniği

NIM Modül ile çalışabilen 16 kanallı bu elektronik ünite 2 kısmı enerji bir kısmı zaman olmak üzere 3 (üç) alt kısımdan oluşmaktadır (Şekil 3). Sinyal şeklinin toplam gama enerjisine oranı (yavaş), sinyal şeklinin yüksekliğinin hızlı eşleniğe oranı (hızlı) ve sabit fraksiyon ayırıcıdan (CFD) gelen zaman sinyali gibi özelliklere sahiptir. PARIS dedektör kümesinde kullanılan $LaBr_3$(Ce) için ve toplam fosfor sandviç $LaBr_3$(Ce)+NaI(Tl) için toplu sinyal işleme özelliğine sahiptir. Gerektiğinde istenen zaman gecikme ayarlarını yapabilme kabiliyeti mevcuttur.

Bugüne kadar 4 (dört) PARIS_Pro elektronik ünitesi farklı test deneylerde kullanıldı ve her an kullanıma hazır olarak PARIS proje elektronik havuzunda bekletilmektedir.




Hızlı Çıkış : 0.7 mikrosaniye

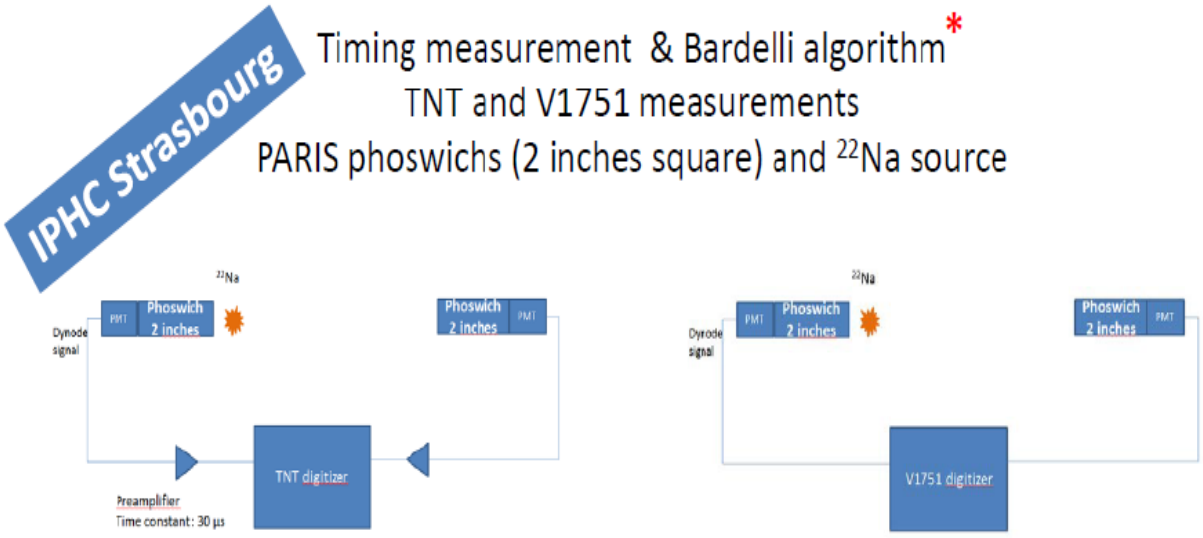
Enerji Çıkışı : 0.7 mikrosaniye

CFD çözünürlüğü, 100 ps'den küçük

Şekil 3. NIM Modüle monte edilebilen PARIS_Pro elektronik ünitenin önden görünüşü.

### 3.1.2 TNT Elektroniği (Strasbourg):

Fransa Strasbourg nükleer araştırma merkezinde geliştirilen örnekleme zamanı 10 ns ve çözünürlüğü 14 bit olan TNT dijital elektroniği (Şekil 4) ile örnekleme zamanı 1 ns çözünürlüğü 10 bit olan V1751 dijital elektroniği $^{22}$Na radyoaktif kaynağı kullanılarak test edildi ve iki dijital elektronik birbiriyle karşılaştırıldı. Bu karşılaştırma sonucu TNT dijital elektroniğinin zaman çözünürlüğünün (FWHM) 1 ns değerinden daha düşük olduğu ve V1751 dijital elektroniğinin zaman çözünürlüğünün (FWHM) 670 ps olduğu tespit edildi.



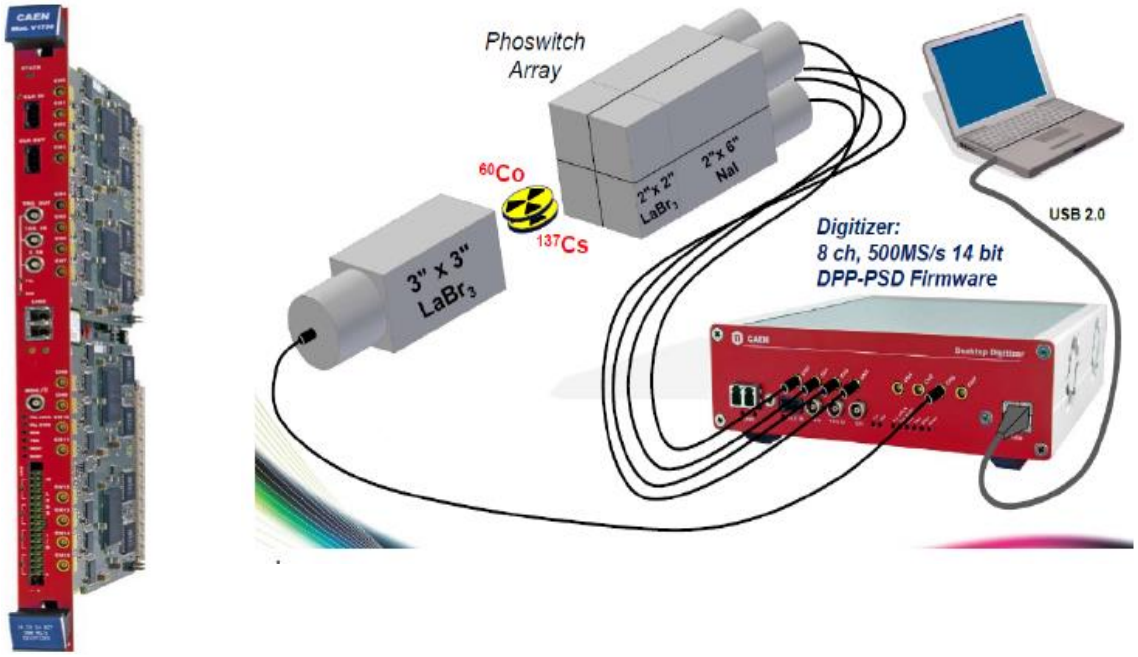

Şekil 4. TNT dijital elektroniği ile V1751 dijital elektroniğinin $^{22}$Na radyoaktif kaynağı kullanılarak karşılaştırılması.

2013 yılı baharında PARIS dedektör kümesinin ilk prototipinin Fransa, Orsay nükleer araştırma merkezinde gerçekleştirilen test deneyinde ve daha sonra 2013 yılı sonunda Almanya, ELBE nükleer araştırma merkezinde gerçekleştirilen test deneylerinde TNT dijital elektroniği PARIS dedektör kümesiyle birlikte kullanıldı. TNT dijital elektroniği ile kaydedilen verilerin analizleri için kullanılması planlanan analiz programının, kullanıcı kolaylığı sağlayan bir algoritma oluşturulmasında yaşanan sorunların giderilememesi ve dolayısıyla elde edilen deneysel verilerin analizlerinin doğru, hızlı ve istenilen özelliklerde gerçekleştirilememesi TNT dijital elektroniğinin ilerleyen zamanlarda tüm PARIS dedektör kümesinde kullanılma potansiyelini oldukça zayıflatmıştır. Fransa, Strasburg nükleer araştırma merkezinde geliştirilen bu dijital elektroniğin daha iyi performansta veri kaydı yapabilmesi ve kaydedilen verilerin uygun algoritmalar ile deney sonrası dönemde (off-line) analiz edilmesi için gereken çalışmalar Strasburg grubu tarafından hala yürütülmektedir.

### 3.1.3 CAEN V1730 Elektroniği

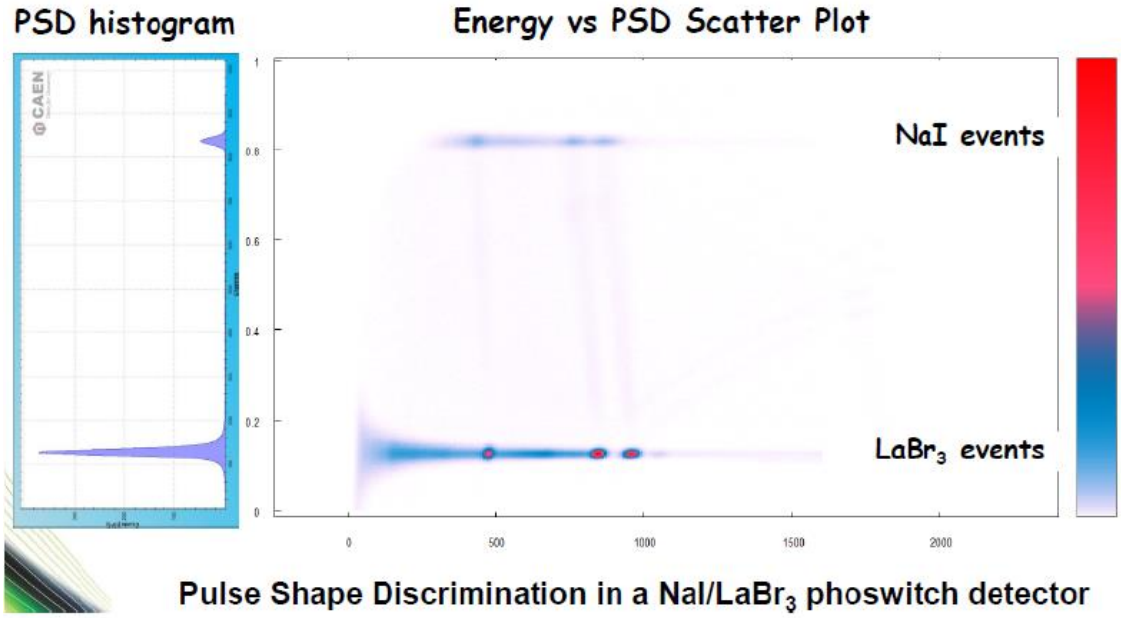
16 Kanallı, 500 MS/s (saniyede 500 milyon örnekleme kabiliyetine sahip) dijital elektronik CAEN firması tarafından genel amaçlı geliştirilmiş bir dijital elektronik ünitedir. Kullandığı yazılımlar; DPP_PSD (fosfor sandviç dedektörler için, DPP_PHA (Germanyum dedektörü için), CFD alt üniteleri dijital olarak kullanılmaktadır. 2 ns aralıklarla zaman etiketleme kabiliyeti, uzun ve kısa yük sinyalleri için 16 bit veri kayıt kabiliyetine sahiptir. Herhangi bir sabit ayrıştırıcıya (diskriminatöre) ihtiyaç duymadan istenilen şartları otomatik olarak

belirleyebilme kabiliyeti bu elektronik ünitenin en önemli özellikleridir. Sinyalin istenilen şart aralığına denk getirilmesi için herhangi bir zaman geciktiriciye de ihtiyacı yoktur. Aynı anda iki şart belirleyebilme ve bunların genişliğini değiştirebilme özelliğine sahiptir. Aşağıda Şekil 5'te gösterilen $^{60}Co$ ve $^{137}Cs$ radyoaktif kaynağı ile fosfor sandviç dedektörü ve fosfor sandviç topluluğunun aynı anda veri kaydını gerçekleştiren deney düzeneği şematik olarak gösterilmiştir. Bu deneyde her bir kanal için farklı tetikleme oranı kullanılmıştır. 15 kHz (1. Fosfor sandviç-kanal no=0), 13.9 kHz (2. kanal no=1), 15.1 kHz (3. kanal no=2), 14.5 kHz (4. kanal no=3) ve 18.9 kHz saf $LaBr_3(Ce)$ (kanal no=6) için kullanılmıştır. Kullanılan USB kablosuyla saniyede 1 MB veri kaydı yapıldı.



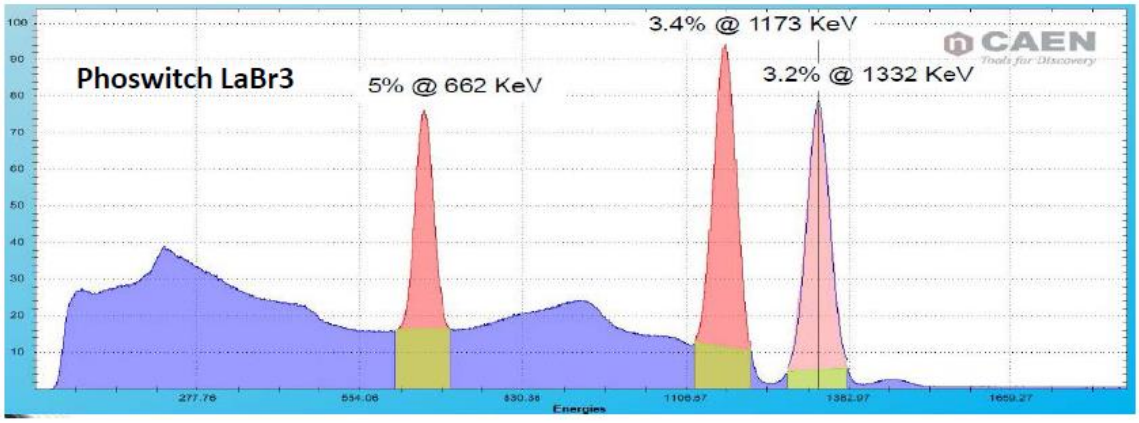

Şekil 5. CAEN dijital elektroniğin önden görünümü (sol), $^{60}Co$ ve $^{137}Cs$ radyoaktif kaynağı ile fosfor sandviç dedektörü ve fosfor sandviç topluluğunun aynı anda veri kaydını gerçekleştiren deney düzeneği.

Aşağıda gösterilen Şekil 6, sinyal şekli diskriminatörü histogramını (sol) ve Enerjinin sinyal şekli diskriminatörüne karşı grafiğinin göstermektedir. Bu ayırım ile NaI(Tl)'de kaydedilen olaylar $LaBr_3(Ce)$'te kaydedilen olaylardan tamamen ayrı bir şekilde gösterilmiştir.



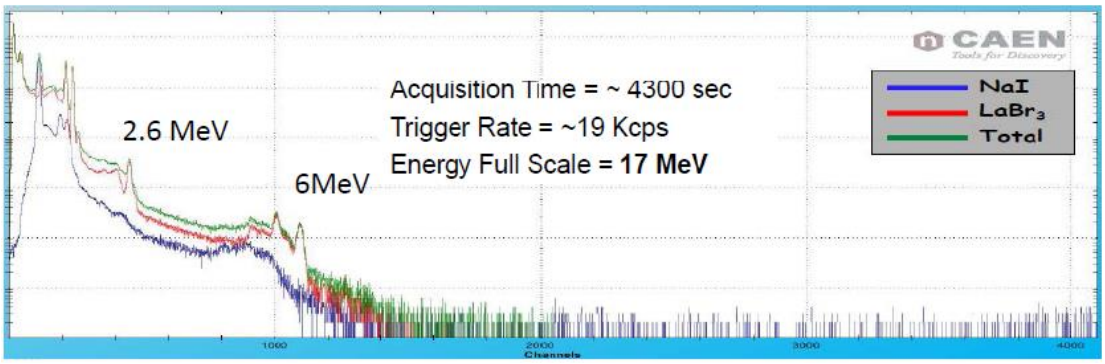

Şekil 6. Sinyal şekli diskriminatörü histogramını (sol) ve enerjinin sinyal şekli diskriminatörüne karşı grafiği (sağ).

Aşağıda gösterilen Şekil 7, Fosfor sandviç dedektörün farklı enerji bölgeleri için çözünürlük değerlerini göstermektedir.




Şekil 7. Fosfor sandviç dedektörün farklı enerji bölgeleri için çözünürlük değerleri.

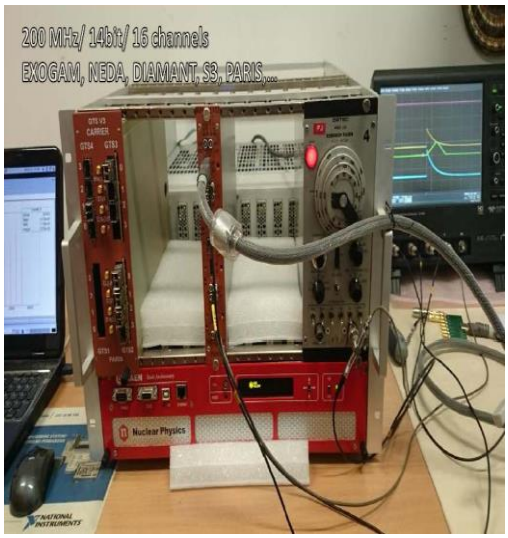
Aşağıda gösterilen Şekil 8, Fosfor sandviç dedektöründeki $LaBr_3(Ce)$ ve NaI(Tl) kristallerinin ayrı ayrı ve fosfor sandviçin toplam performansını göstermektedir.




Şekil 8. Fosfor sandviç dedektöründeki $LaBr_3$(Ce) ve NaI(Tl) kristallerinin ayrı ayrı ve fosfor sandviçin toplam performansı.

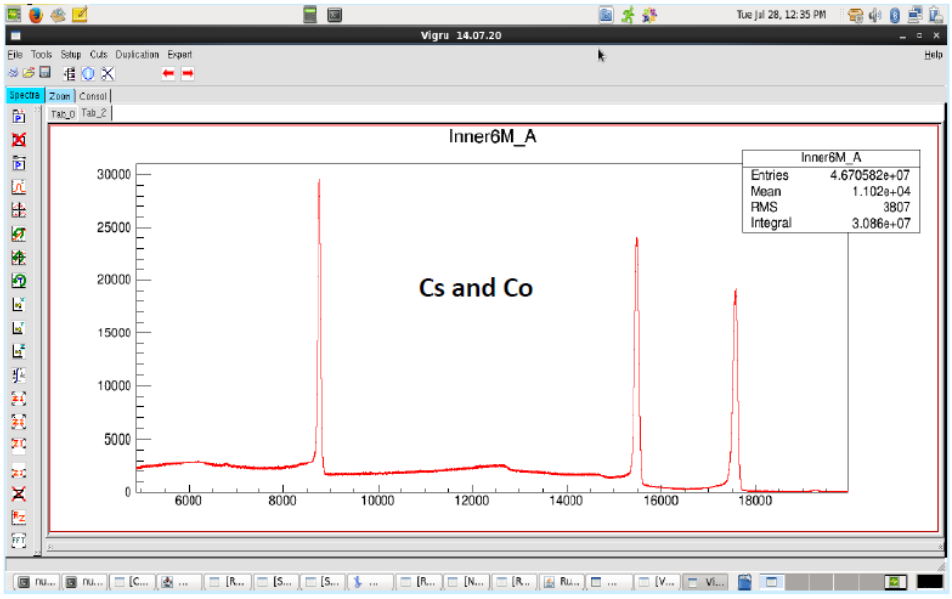
### 3.1.4 NUMEXO2 Elektroniği

NIM modülüne monte edilebilen 16 kanallı, 14 bitlik veri kaydı yapabilen 200 MHz aralığında çalışabilen bu dijital elektronik (Şekil 9) şu ana kadar EXOGAM2 (germanyum dedektörleri için) oldukça iyi bir performans sergileyerek çalıştı ve gerçek iyon huzmesi kullanılarak gerçekleştirilen test deneylerden elde edilen deneysel veriler Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Nükleer Veri Analiz Laboratuvarında başarıyla analiz edildi ve elde edilen sonuçlar bilimsel toplantılarda sunuldu.



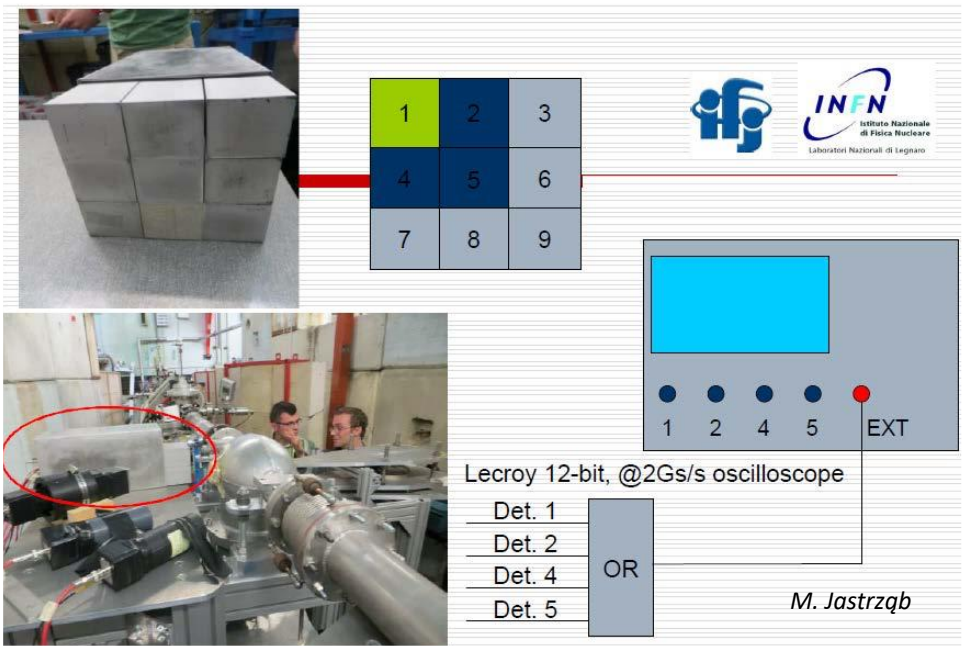

Şekil 9. NIM modülüne monte edilebilen 16 kanallı, 14 bitlik veri kaydı yapabilen 200 MHz aralığında çalışabilen NUMEXO2'nin NIM modülüne monte edilmiş görüntüsü.

Aşağıda Şekil 10 ile $^{60}Co$ ve $^{137}Cs$ radyoaktif kaynakları kullanılarak EXOGAM dedektörü için geliştirilmiş yazılım (firmware) kullanılarak elde edilen spektrum gösterilmektedir. Dijital elektroniğin hangi performansta spektrum üretebildiği bu şekilde net olarak görülebilmektedir.



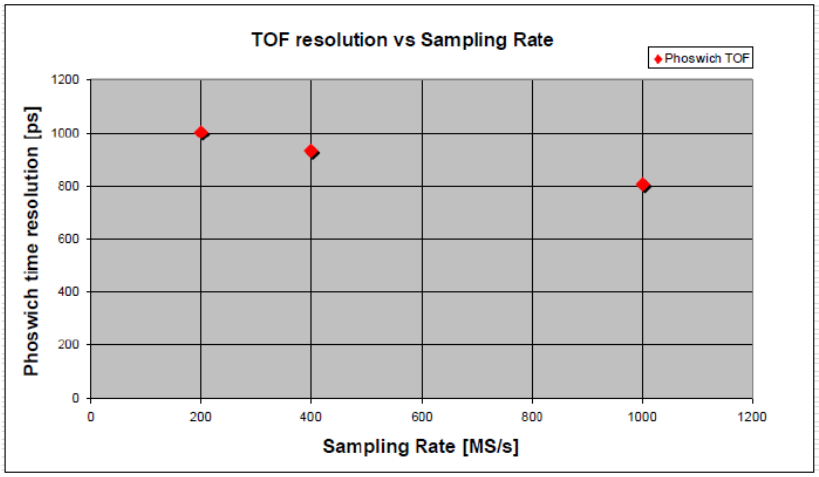

Şekil 10. $^{60}$Co ve $^{137}$Cs radyoaktif kaynakları kullanılarak EXOGAM dedektörü için geliştirilmiş yazılımı (firmware) kullanılarak elde edilen spektrum.

Aşağıda gösterilen Şekil 11'de ise PARIS dedektör kümesi üzerinde Enerji ve uçuş zamanı ölçümleri gerçekleştirmek için kullanılan deney düzeneği gösterilmektedir. Saniyede 2 Giga örnekleme (2 GS/s) kabiliyetine sahip 12 bitlik LeCroy osiloskobu ile $^{60}$Co ve $^{137}$Cs radyoaktif kaynakları kullanılarak gerçekleştirilen bu deneyde PARIS dedektör kümesi bünyesinde yer alan birinci dedektörün ikinci dedektöre göre uçuş zamanı ölçümü gerçekleştirildi.




Şekil 11. PARIS dedektör kümesi üzerinde enerji ve uçuş zamanı ölçümleri gerçekleştirmek için kullanılan deney düzeneği.

Aşağıda gösterilen Şekil 12'de bir dedektör için uçuş zamanının örneklemeye karşı performans grafiği gösterilmektedir, burada herhangi bir tetikleme şartı uygulanmamıştır.




Şekil 12. Bir dedektör için uçuş zamanının örneklemeye karşı performans grafiği gösterilmektedir, burada herhangi bir tetikleme şartı uygulanmamıştır.

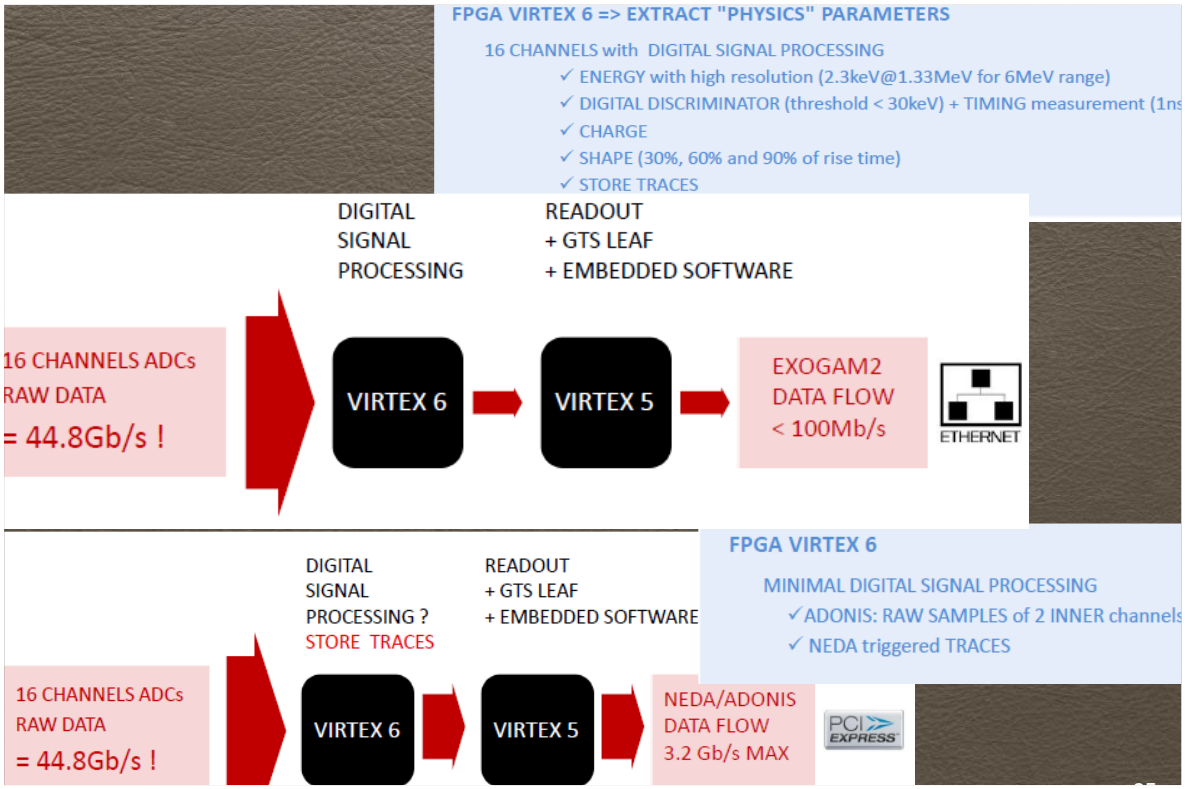
Yukarıda gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda daha önce de ifade edildiği gibi NUMEXO2 dijital elektronik ünite üzerinde EXOGAM dedektörü için geliştirilmiş yazılım kullanıldı. Bu djjital elektronik ünitenin NEDA, nötron dedektör sistemine adaptasyonu ya da DIAMANT gibi yüklü parçacık dedektörüne adaptasyonu için geliştirilen yeni bir yazılım model olarak kullanıldı. Bu yazılımın PARIS dedektör kümesinde kullanılan fosfor sandviç dedektör ve PARIS dedektör kümesini kontrol edilebilecek yeni bir yazılım dönüştürülmesi projenin temel hedeflerinden birisi olduğu için bu proje döneminde böyle bir yazılım geliştirildi. Bu yazılım NUMEXO2 dijital elektronik ünitenin kendisini ve bu üniteye bağlı bulunan birçok alt ünitenin kontrol ve koordinasyonunu sağlamaktadır. Bu proje döneminde geliştirilen ve burada sonuç projesi eki **(Ek-1)** halinde sunulan **"TOP_LEVEL_SOMME_IPs.VHD"** programında farklı dönemlerde gerçekleştirilen farklı versiyonlardaki değişiklikler programın başında yer almaktadır. Kullanılan bilgisayar dili VHDL olup bu konuda tecrübeli araştırmacılardan yardım alınarak program üzerinde gerekli değişiklikler gerçekleştirildi. Üzerinde tamamlanması gereken kullanıcı dostu ara yüze sahip kısımları üzerindeki çalışmalar hala devam etmektedir. Projenin uluslararası mutabakat metni çerçevesinde yürütülmesi nedeniyle bu aşamada proje sonuç raporu ekinde sadece üst seviye kontrol ve koordinasyon programının kodu verilmiştir. İlerleyen zamanlarda bu program ve kullandığı alt programlar konusunda gerçekleştirilecek çalışmalardan elde edilecek sonuçlar proje desteği alınan TÜBİTAK'a teşekkür edilerek bilimsel toplantılarda sunulacak ve bilimsel makale olarak yayınlanacaktır.

NEDA dedektörlerine NUMEXO2 dijital elektronik ünitenin adaptasyonu için gerekli yazılım değişikliğini yapan ve yürütülen bu proje içerisinde de bu konuda desteklerini esirgemeyen Dr. Xavi Ega'ya teşekkür ederiz. PARIS dedektörlerine NUMEXO2 dijital elektronik ünitenin adaptasyonu için ihtiyaç duyulan yazılımın adapte edilmesi için sürekli desteğini aldığımız Dr. Xavi Ega ile diğer uluslararası projelerde (NEDA projesinde) hala ortak çalışmalar yürütmekteyiz. Bu nedenle ihtiyaç duyulduğunda hemen yardım alabileceğimiz bir bilimsel ortağımızdır.

Aşağıda gösterilen Şekil 13'de üzerinde gerekli yazılımların yapıldığı NUMEXO2 dijital elektronik ünitenin neler olduğu, EXOGAM ve NEDA dedektörleri için her bir dedektörün içsel özelliklerine göre ve dedektörden istenen performansa göre hangi aralıklarda ham verinin kabul edileceği gösterilmiştir. Ayrıca hangi aralıklarda dedektör üzerinden birim zamanda veri kaydının yapılacağı sırasıyla Virtex 6 ve Virtex 5 üzerinde hangi veri türünün aktarıldığı da gösterilmiştir.

Buna göre EXOGAM için saniyede 44.8 Gb ham veri aktarımı gerçekleştirilirken üzerinde saniyede 100 Mb verinin kaydedildiği belirtilmiştir. Benzer şekilde bugüne kadar gerçekleştirilen değişikliklere göre NEDA dedektörü için bu değerler; ham veri için aynı değerlere (saniyede 44.8 Gb ) sahipken üzerinden geçen verinin saniyede 3.2 Gb olduğu belirtilmiştir. EXOGAM için geliştirilen NUMEXO2 ile iletişim Ethernet aracılığı ile sağlanmakta fakat NEDA için PCI kart aracılığı ile elektronik ve dedektör iletişim sağlanmaktadır. PARIS fosfor sandviç dedektörleri ile NUMEXO2 arasındaki iletişim yine Ethernet aracılığı ile sağlanacaktır.

Daha önce TUBİTAK tarafından desteklenen 210T048 nolu proje kapsamında alınan NUMEXO2 ünitelerinden bir tanesinin üzerinde gerçekleştirilen çalışmalarla PARIS dedektörlerine adapte edilme çalışmaları bu proje döneminde yürütüldü ve yazılımsal değişiklikler gerçekleştirildi ve proje ekinde kullanılacak yazılım hakkında detaylı bilgi sunuldu. Tüm bu çalışmalar Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Fizik bölümü bünyesinde bulunan Nükleer Veri Analiz Laboratuvarında bu çalışmalar yürütüldü. Geliştirilen yazılımın PARIS dedektörleriyle birlikte kullanılacak NUMEXO2 ile gerçek iyon huzmesi kullanılarak gerçekleştirilecek test deneyler ilerleyen zamanlarda Polonya, Krakow Nükleer araştırma merkezinin uygun olduğu dönemlerde yürütülecektir.




Şekil 13. NUMEXO2 dijital elektronik ünitenin EXOGAM ve NEDA dedektörleri için veri kaydetme aralıklarını gösterir elektronik diyagram.

Yürütülen bu proje döneminde NUMEXO2, CAEN V1730, TNT ve PARIS_Pro üzerinde hali hazırda gerçekleştirilen test deneyler ve buradan elde edilen sonuçlar sunuldu. Bu zamana kadar gerçekleştirilen test deneyler ve bu deneylerden elde edilen sonuçlar üyesi bulunduğum PARIS Projesi İzleme komitesince değerlendirildiğinde PARIS dedektör kümesi için iki dijital elektroniğin CAEN V1730 ve NUMEXO2'nin paralel kullanılmasına karar verildi. Bu karar "Minutes of the PARIS Steering Committee meeting-July 2017" (Ek-Proje İzleme Komitesi Tutanağı-Temmuz 2017) proje toplantı tutanağında yer aldı. Bir sonraki dönem için PARIS Projesi Mutabakat Metninin 2020 yılına kadar yenilenmesine karar verilen bu toplantıda Türkiye'nin de yine proje izleme komitesi statüsünde proje ortağı olarak yer almasına karar verildi. Gelecek dönemde proje konusunda gerçekleştirilecek planlama çalışmalarında aktif yer alması ve PARIS projesi koordinasyon komitesinde proje hakkında karar veren komite üyesi olarak yer almamız istenmiştir. PARIS projesinde bu zamana kadar yüklendiğimiz iş paketleri konusunda gerçekleştirdiğimiz performans doğrultusunda ilerleyen zamanlarda paralel olarak kullanılacak olan iki dijital elektronik CAEN V1730 ve NUMEXO2 üzerine yine paralel olarak kullanılacak $LaBr_3$(Ce)+NaI(Tl) ve $CeBr_3$+NaI(Tl) dedektör kümesi üzerine gerçekleştirilecek performans çalışmalarında da aktif yer almamız istenmiştir.

### 3.2 PARIS dedektör Kümesi Veri Formatı ve Veri Analizi:

PARIS dedektör kümesi performans araştırmaları için daha önce gerçekleştirilen deneylerden elde edilen veriler şu aşamada aktif proje çalışanlarının kullanabileceği kullanıcı dostu grafik ara-yüzlere sahip bilgisayar programları ile kullanılabilir hale getirildi. PARIS dedektör kümesinin farklı araştırma merkezlerinde farklı elektronik ve veri alma sistemleri kullanması, bu verilerin analizleri için sistemli çalışan bir analiz programının oluşmasını bugüne kadar engellemiştir. Fakat proje ekinde verilen "**PARIS Dedektör Kümesi Deneysel Verileri Analiz Programı" (Ek-2)** yardımıyla bu problem ortadan kaldırıldı.

PARIS dedektör kümesi deneylerinden elde edilen deneysel verilerin sistemli bir şekilde analiz edilebilmesi için her bir merkezden elde edilen verilerin veri kayıt formatını doğru anlamak ve analiz programlarının bu algoritma ışığında veriyi analiz etmesini sağlamak gerekmektedir. Hangi araştırma merkezinde hangi elektronik sistem kullanılırsa kullanılsın bu deneysel çalışmalardan elde edilen ham veriler ROOT programında kullanılabilecek formata getirilerek proje ekinde verilen C++ program dili kullanılarak yazılan programda input (giriş) dosyası olarak kullanılarak analiz etmek için gerekli olan zaman ve enerji spektrumlarını oluşturmaktadır.

NUMEXO2 dijital elektronik ünitelerinin GANIL nükleer araştırma merkezinde kullanılacak olan dedektör sistemlerinde kullanılması ve tüm dijital elektronik sistemin Global Tetikleme Sistemiyle kontrol edilmesine prensipte karar verildi. Bu nedenle PARIS dedektör kümesinin ilerleyen zamanlarda GANIL'de kullanılması durumunda NUMEXO2 dijital elektronik üniteyi kullanması kaçınılmazdır. Bu nedenle bu işin doğru yapılabilmesi için daha önce başarı ile tamamladığımız 114F473 nolu TÜBİTAK projesinde deneysel ortamda kullandığımız NUMEXO2 dijital elektroniği kullanarak elde ettiğimiz deneysel veri formatı ve veri analiz programları üzerine elde ettiğimiz deneyimler bu projede de kullanıldı.

NUMEXO2 dijital elektroniği için başarılı bir şekilde oluşturduğumuz veri formatı ve veri analiz programlarını PARIS dedektör kümesi için elde edilen veriler için de kullanılabilir hale getirilmesi gerekmektedir. Bu konuda gerçekleştirilen yazılımsal çalışmalar proje Ek-2'de detaylı olarak verilmiştir. PARIS dedektörleri için gerçekleştirilen yazılımsal değişiklere paralel olarak PARIS dedektörleri için de veri formatı algoritmasını oluşturup bu veri formatına uygun veri analiz programları oluşturma işlemini gerçekleştirmek gerekmektedir. Gerçekleştirilmesi gereken bu işlemin doğru yapılabilmesi için daha önce başarıyla EXOGAM ve NUMEXO2 dijital elektronik sisteminin birlikte kullandığı yazılım ve veri formatının doğru anlaşılması gerekmektedir.

Bu nedenle veri formatı ve bu verilerin kayıt türü ve verilerden üretilecek spektrum ve histogramların nasıl ve hangi programlar kullanılarak oluşturulduğunun iyi anlaşılması gerekmektedir. Şimdi PARIS projesi için de kullanacağımız veri kayıt ve analiz sistemi için referans olacak olan bu sistemi sırasıyla izah edelim. Bu izahtan önce sırasıyla nelerden bahsedeceğimizi sıralamakta fayda vardır. GANIL'de gerçekleştirilecek deneyler sırasında veri transferi sağlamak için kullanılan GRU (**G**ANIL **R**OOT **U**ser) programı, deneyler aktif olarak devam ederken (online) istenilen ürün çekirdeklerin doğru elde edilip edilmediğini kontrol etmek için anında tek, iki ve üç boyutlu spektrumlar üretebilen ve bunlar üzerinde ön fiziksel ölçümler yapılmasını sağlayan VIGRU (**VI**sulalize **G**ANIL **R**OOT **U**tilities) programı, görsel GANIL ROOT hizmetleri ve deney sırasında kullanılan farklı dedektör ve spektrometre sistemlerini ve bunlarla birlikte kullanılan elektronik sistemleri kontrol eden GECO programı, GANIL elektronik kontrol sistemleridir.

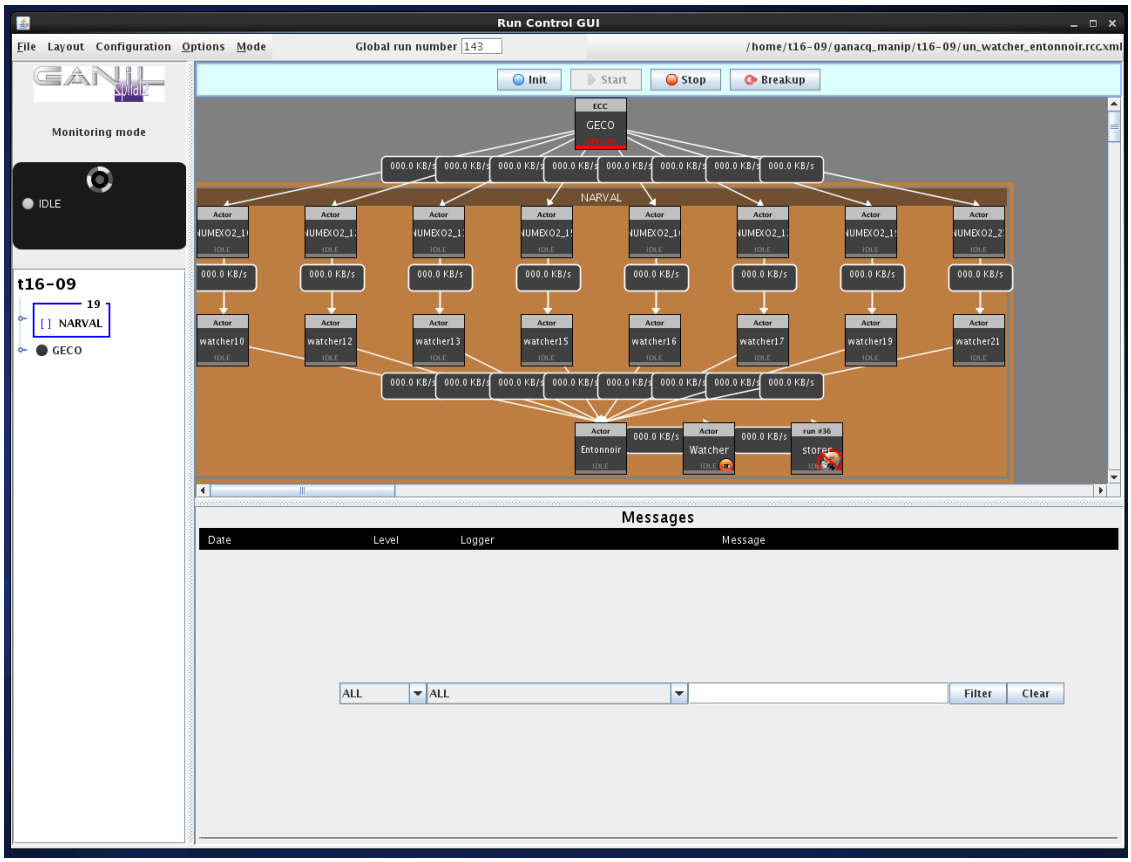
### 3.2.1 GECO Programı:

GANIL elektronik Kontrol (**G**anil **E**lectronic **Co**ntrol=GECO) Sistemi olarak kullanılacak olan bu program, deney ve veri kontrol paneli ve bu panel içerisinde GECO'nun nerede yer aldığı Şekil 14'te gösterilmektedir. Şekilden de anlaşılacağı üzere GECO ve deney sistemine bağlı tüm NUMEXO2 üniteleri ve her birini izleme ve üzerinde değişiklik yapılabilme kutucukları (watcher) gösterilmektedir. Bu kontrol panelinde (ara yüzde) deneyin başlatılması ve durdurulması işlemleri, her bir elektronik ünitenin hangi hızda veri kaydettiği ve depolama ünitesine hangi hızda veri kaydını gerçekleştiğini görmek mümkündür.

Bu grafik ara yüzden sonra akış şemasından da görüleceği gibi GECO, elektronik kontrol sistemi ara yüzü ve bu ara yüz üzerinde nelerin yapılabileceğini bilmek ve bunların nasıl yapabileceğinin gösterilmesi oldukça önemlidir. Bu nedenle şekil 14'te GECO ana kontrol ara yüzü gösterilmiştir. Bu ara yüzün iki önemli menüsü bulunmaktadır. Birincisi daha önce kayıtlı mevcut kontrol konfigrasyonlardan herhangi birini açıp yüklemek, ikincisi ise çalışılan bir önceki kaydedilmiş konfigrasyonu yüklemek. Her bir NUMEXO2 için kontrol aşamasına geçildiğinde beş farklı başlık görmekteyiz kullanıcı (user), uzman (expert), kayıt (register), parametre (paramter) ve bilgi (info).

Şimdi sırasıyla her bir menüde neleri yapabildiğimizi inceleyelim: "user" menüsü altında beş farklı alt menü görmekteyiz. Bunlar sırasıyla bağlantı sistemi (acqusition), burada her NUMEXO2'nin her bir kanalına bağlı EXOGAM2 dedektörünün iki iç kristali (inner) ve her birini çevreleyen dört dış kısmının hangi tetikleme şartlarına bağlı olarak veri kaydetmesi gerektiği veya dış (external=ext) bir sinyal yardımıyla veri kaydının gerçekleştirilip gerçekleştirilmeyeceği belirlenmektedir (şekil 15). DSP, kısmında ise EXOGAM dedektörleri

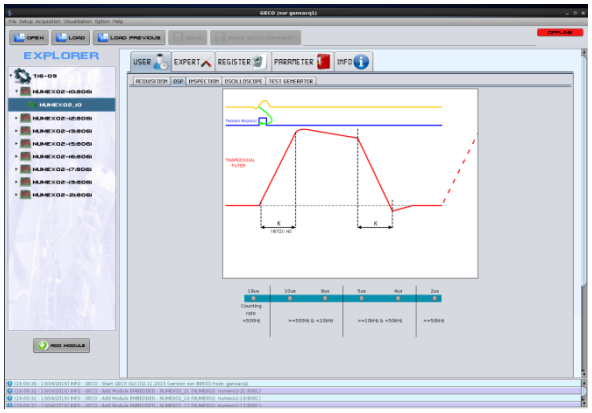
için gerçekleştirilen iki test deneyde en çok kullanılan ve sinyalin trapezoidal formda işlendiği ve bu sinyal şekli üzerinde gösterilen ve sinyalin kalitesini belirleyen K parametresinin kontrolü sağlanmaktadır (şekil 16). Bu parametre özellikle enerji spektrumunda her bir gama enerji pikinin enerji çözünürlüğünü etkilemektedir.




Şekil 14. Deney ve veri kayıt kontrol paneli.

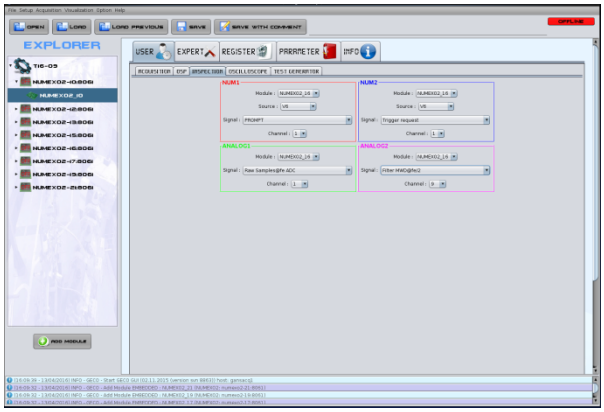



Şekil 15. NUMEXO2 tetikleme kontrol paneli. kontrol paneli.

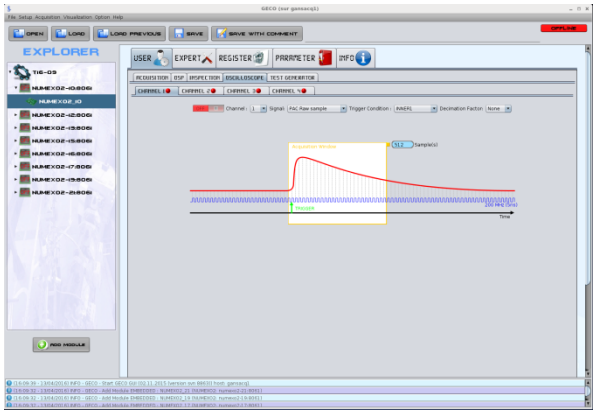



Şekil 16. Trapezoidal şekil K-parametresi.

Aşağıda gösterilen Şekil 17'de irdeleme (inspection) modunda her bir NUMEXO2'nin virtex5 ya da virtex6'da alınan sinyali işleme biçimi hem dijital (Tetikleme modlu, geçerli veri, geçersiz veri, sade veri v.b) hem de analog (ham veri, filtrelenmiş hareketli pencere v.b) modlarından hangisiyle sinyal verisinin kaydedileceği belirlenmektedir. Şekil 18'de ise osiloskop modda sinyalin ham veri, trapezoidal formda, görüntülenen tetikleme modunda ve dedektörün hangi kısmıyla (inner1, inner2, ext-tetikleme v.vb) modalarından hangisiyle verinin kaydedilmesi isteniyorsa o modta verinin kaydedilmesi sağlanmaktadır.



Şekil 17. GECO Deney ve veri kayıt kontrol paneli.

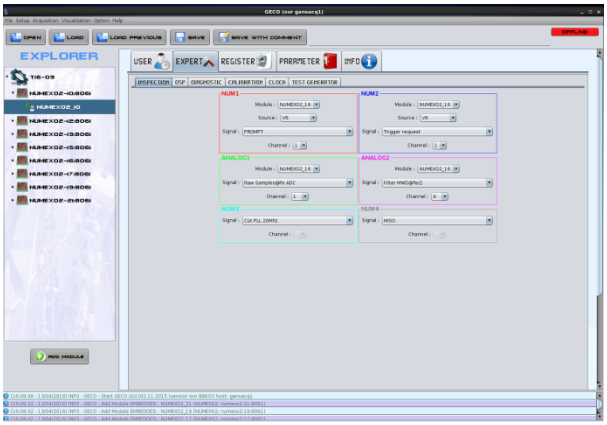


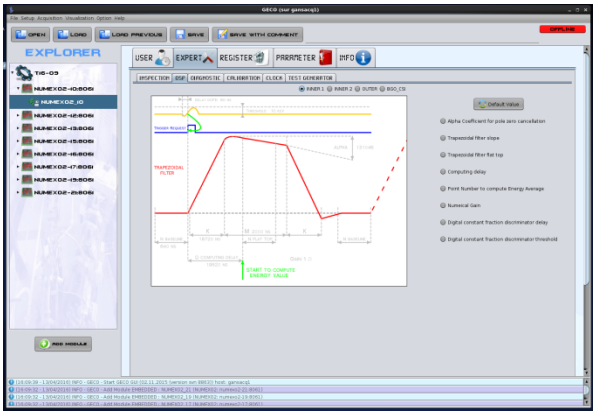
Şekil 18. GECO Deney ve veri kayıt kontrol paneli.

Aşağıda gösterilen Şekil 19'da NUMEXO2 ünitesi üzerinde "uzman" modda her bir NUMEXO2'nin virtex5 ya da virtex6'da alınan sinyali işleme biçimi belirlenmektedir. Burada hem dijital (Tetikleme modlu, geçerli veri, geçersiz veri, sade veri v.b) hem de analog (ham veri, filtrelenmiş hareketli pencere v.b) modlarından hangisiyle hangi zaman aralığında veri alınması gerektiği belirlenebilmektedir. Şekil 20'de ise sinyal verisinin trapezoidal formda işlenirken, sinyal şekli üzerinde gösterilen ve sinyalin kalitesini belirleyen sadece K parametresi değil, aynı zamanda M parametresi, alfa-parametresinin de belirlenebileceği modu görmekteyiz. Şeklin sağ tarafında hangi seçenekle birlikte hangi parametrenin nasıl değer alması gerekiyorsa o parametre değerine göre hangi dedektör biriminin (burada EXOGAM2 dedektör) bünyesinde yer alan (inner1, inner2, outer ve BGO-CsI) tetiklemesiyle sinyalin nasıl alınacağına karar verilebilmektedir.

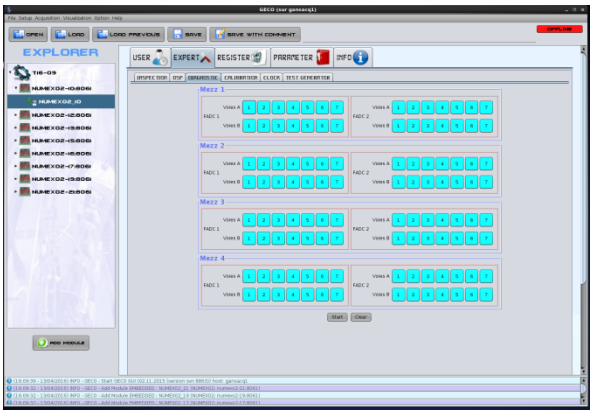
Fakat bu sistem PARIS dedektör sisteminde yer alan fosfor sandviç dedektörlerde kullanılan $LaBr_3$(Ce) ve NaI(Tl) (veya $CeBr_3$ ve NaI(Tl)) sintilatörlerine göre tetikleme ve sinyal alma koşullarına göre değiştirilecektir.

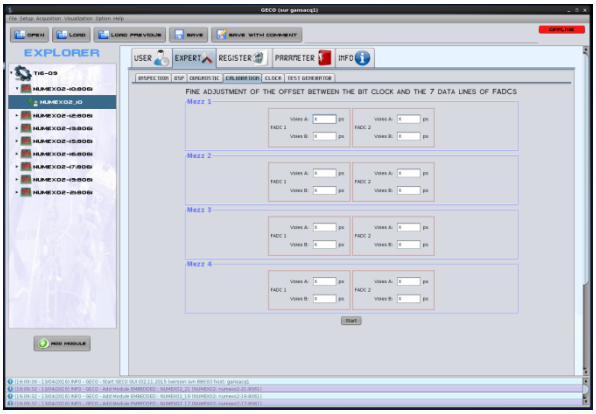
.





Şekil 19. Veri kayıt, tetikleme zamanlama paneli.  Şekil 20. K, M ve alfa-parametreleri paneli.



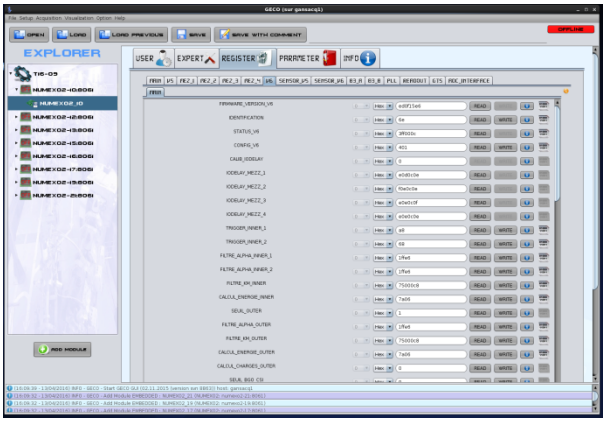


Şekil 21. FAD kontrol  paneli.

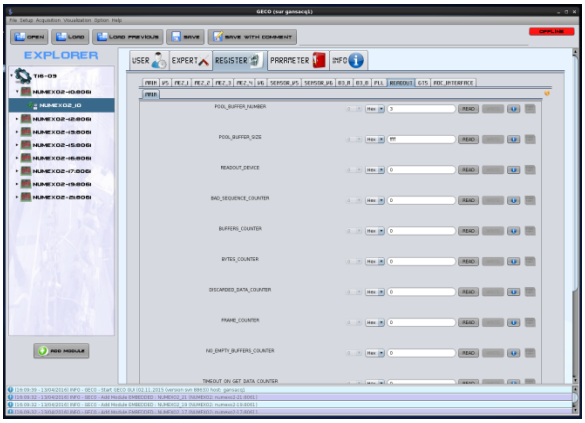
Şekil 22. Her bir FADC ince kalibrasyon ayar kontrol paneli.

Yukarıda gösterilen şekil 21'de uzman modda NUMEXO2 içerisinde bulunan elektronik kartlar FADC'lerin kontrolleri, hangilerinin çalışıp çalışmadığının kontrolü yapılırken şekil 22'de ise her bir FADC'lerin kalibrasyonu için ince ayarlar yapılabilmektedir. Uzman modda zaman ve test üreteç modu hala yapım aşamasındadır.

Şekil 23'de "kayıt" modunda, NUMEXO2'nin örneğin virtex6 (V6) hangi parametresinin hangi modda kayıt yapması gerekiyorsa o kayıt değerinin kontrolünün ve değişikliğinin yapıldığı paneli görmekteyiz. Şekil 24'de ise, NUMEXO2 bünyesindeki her bir birimin veri okuması yapılırken hangi formatta veri okunacağının belirlenmesi yapılabilmektedir



Şekil 23. NUMEXO2 içindeki kısımların veri kontrol kayıt paneli.



Şekil 24. NUMEXO2 veri okuma değeri paneli.

Şekil 15'de yer alan dördüncü menü "Parametre" (Parameter) hala yapım aşamasında olup info menüsünde ise NUMEXO2 içerisinde yer alan ünitelerin hangilerinin bir arada hangi sırayla iletişim sağladığı akış diyagramı yer almaktadır.

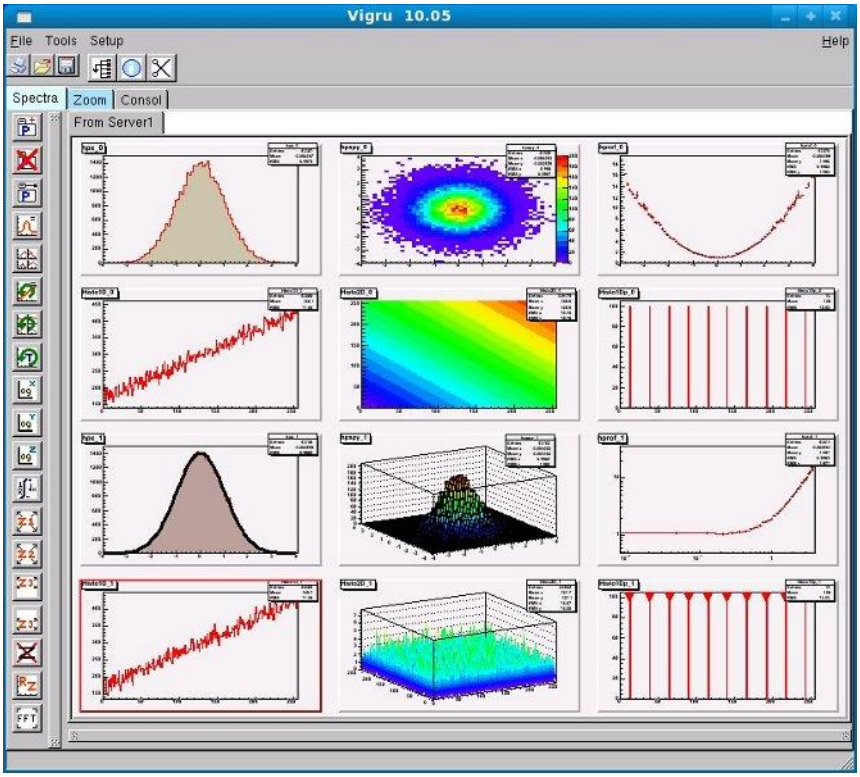
Hazırlanan bu sonuç raporunun bu kısmında yapmış olduğumuz bu kısa tanıtım ve izah önem arz etmektedir. Çünkü GANIL'de, SPIRAL2 uluslararası proje bünyesinde kullanılacak ve birlikte çalışacak olan AGATA, NEDA, PARIS, DIAMANT ve diğer tüm yardımcı dedektör sistemlerinin kontrolleri GECO programı aracılığı ile kullanılacaktır. GECO aynı zamanda osiloskop modu ile de veri alımı ve cihazların kontrollerinin yapılmasını sağlayarak deney ortamına fiziksel olarak girmeden cihazlar üzerinde gerekli ayarlamaları ve düzenlemeleri yapma imkânı da sağlayarak deney ortamındaki cihazlara fiziksel olarak erişime gerek duymadan bu cihazları kontrol etme olanağı sağlamaktadır.

Yaklaşık 30 ülkeden 2000 civarında kullanıcı potansiyeline sahip GANIL araştırma merkezinde deney gerçekleştirecek Türk araştırmacılar için hem GECO hem de VIGRU gibi iki önemli programın kullanım kılavuz kitapçığı daha önce başarı ile tamamlanan TÜBİTAK 114F473 sonuç raporunda ek olarak verildi. Bu vesile ile ileride Türkiye'den GANIL nükleer araştırma merkezinde araştırma yapacak araştırmacıların GECO ve bu sonuç raporunun ilerleyen kısmında bahsedeceğimiz VIGRU hakkında Türkçe kaynak temin etmeleri TÜBİTAK destekli 114F473 aracılığıyla sağlandı. Bu tür araştırmaya başlayan araştırmacıların bu tür programları kullanırken kendi dillerinde adım adım neleri yapabileceklerini anlatan bir kullanım kılavuzuna sahip olmaları bu araştırma merkezlerini daha efektif kullanma imkânı açısından önemlidir.

### 3.2.2 VIGRU Programı:

GECO kadar önemli olan ve deney sırası/sonrası veri analizi için kullanılacak olan VIGRU (**VI**sulalize **G**ANIL **R**OOT **U**tilities) Görsel GANIL ROOT hizmetleri de önemlidir. Şekil 25'de VIGRU'nun grafik ara yüzü ve üretilen farklı formdaki grafikler örnek olarak gösterilmiştir. VIGRU programı deney aktif olarak devam ederken online (anında) veri kalitesini, istenilen ürün çekirdeğe ait alfa, beta ve gama ışımalarına ait spektrumların kontrol edilmesi ve deney sırasında bu spektrumlar üzerinde kaba ölçümler yaparak deney verilerinin istenilen kalitede kaydedilip edilmediğini kontrol edebilme imkânı sunmaktadır.

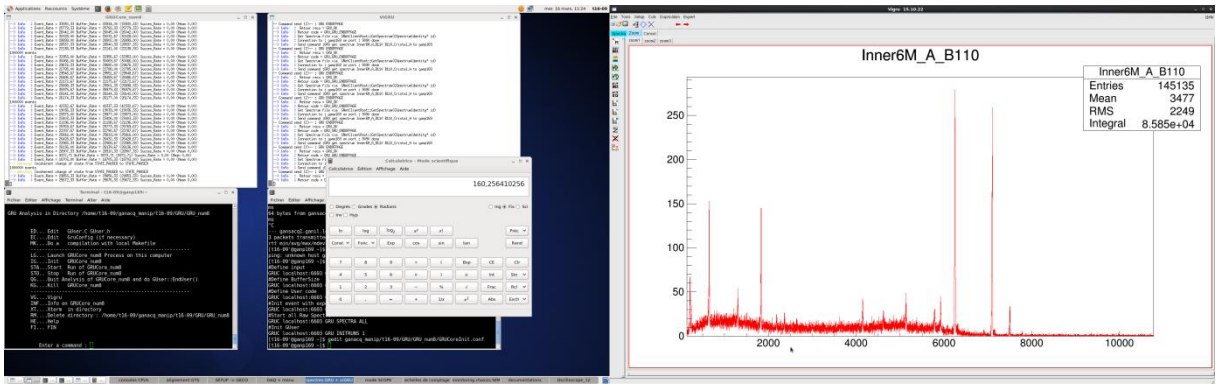
VIGRU programı GANIL'de gerçekleştirilen deneylerin veri formatına uygun olarak tek boyutlu, iki boyutlu ve üç boyutlu spektrumların, histogramların görüntülenmesi ve bunlar üzerinde istenilen ölçümleri (pik merkezinin değeri, pik alanı, yarı-ömür ölçümleri vb.) yapılabilmesine imkân sağlayan bir programdır. Temelde CERN ve vb. diğer nükleer araştırma merkezlerinde veri analizi için kullanılan ROOT programını temel alan ve ROOT programının GANIL veri akış sistemine bağlı tüm dedektörler ve ilgili elektroniklerden çıkan sinyallerin her bir dedektör ünitesinde istenilen düzeyde veri alıp almadığını anında (online) kontrol edebilen ve istenildiğinde ise deney sonrası veri analizlerinde (offline) görüntülenmesini sağlayan ve görüntülenen grafiklerin üzerinde inter-aktif ölçümler yapabilen çok güçlü bir programdır.



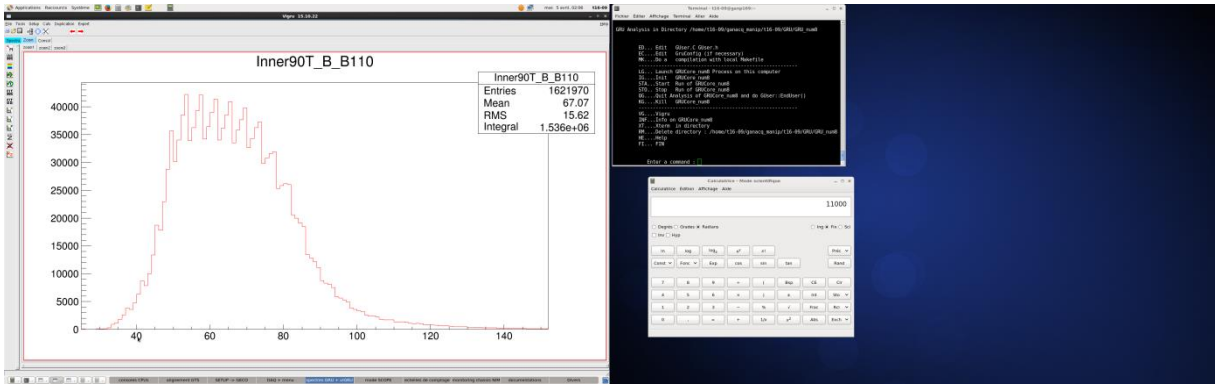

Şekil 25. VIGRU grafik ara yüzü kontrol paneli.

VIGRU programı üzerinde veri analizlerini ham veriden başlamak üzere GANIL veri kayıt formatına bağlı olarak hangi verinin nasıl okunduğu ve anlamlandırıldığı da önemli olduğu için NUMEXO2 ile alınan verilerin veri kayıt formatının nasıl yapılandırıldığını açıklamakta fayda vardır. Bu nedenle veri kayıt formatı için bir alt başlıkta **"Veri Formatı"** kısmında bu açıklamalar yapılacaktır. VIGRU programı belirtilen formata göre kaydedilen veriyi deney amaçları doğrultusunda araştırılan fizik ölçümlerini gerçekleştirebilecek uygun özelliklerde spektrum, histogram, matris vb. şekilde incelenmek üzere hazır hale getirilebilmektedir. Bu program yardımıyla her bir dedektör sisteminin her bir birimine ait spektrum, histogram, matris formundaki veriler grafiksel ara yüzler yardımıyla tek tek ya da toplu olarak görüntülenmekte ve üzerlerinde gerekli fiziksel, istatistiksel ölçümler yapılabilmektedir.

Deney sırasında kaydedilen verilerin uluslararası ortak proje yürüten ortakların kendi üniversite, enstitü ve araştırma merkezlerinde bu veriyi offline olarak analiz edebilme imkânı da VIGRU programı yardımıyla sağlanabilmektedir. Bu program, NUMEXO2 kullanılarak elde edilen verilerin analizi için 2017 yılı sonunda hazır hale getirildi ve Niğde'deki test ve ölçüm merkezindeki bilgisayara kurularak başarıyla kullanımına başlanıldı. Aşağıda Şekil 26'da GANIL'de gerçekleştirilen bir deney için verilerinin kalibrasyonu için kullanılan $^{60}$Co+$^{152}$Eu radyoaktif kaynaklarının kullanımı sırasında alınan enerji spektrumunu ve çalışılan terminal ve gerekli bazı matematiksel hesaplamalar için kullanılan hesap makinası içeren bilgisayar terminal görüntüsünü gösterirken, Şekil 27'de ise EXOGAM2 dedektörlerinden bir tanesinin iç (inner) kristali için dağılım spektrumu ve çalışılan terminal ve gerekli bazı matematiksel hesaplamaklar için kullanılan hesap makinası göstermektedir.



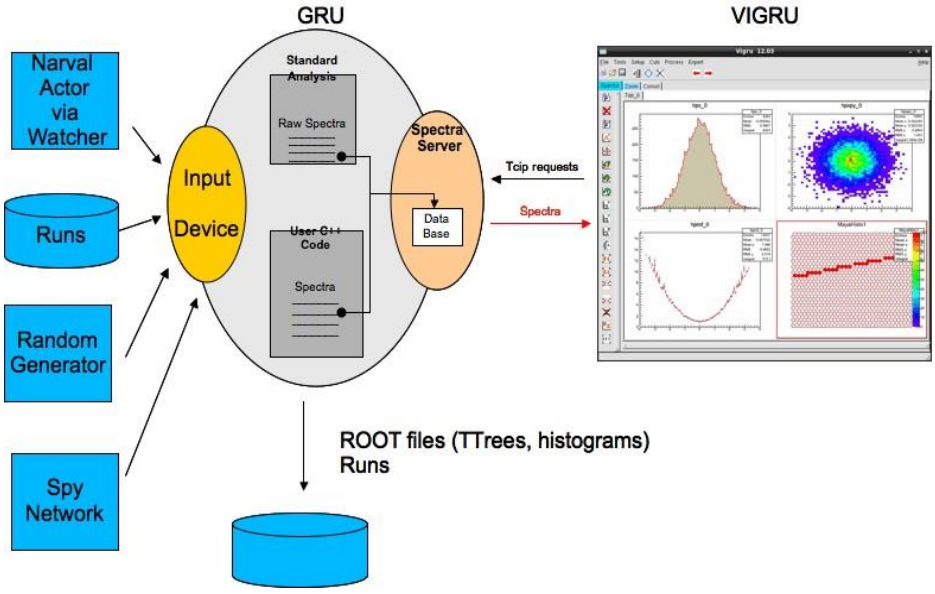

Şekil 26. Kalibrasyon için kullanılan $^{60}$Co+$^{152}$Eu radyoaktif kaynaklarının enerji spektrumu (sağ) tarafta gösterilirken çalışılan terminaller ve kullanılan hesap makinası (sol) tarafta gösterilmektedir.




Şekil 27. EXOGAM2 dedektörlerden bir tanesinin iç (inner) kristali için dağılım spektrumu (sol) tarafta gösterilirken çalışılan terminal ve kullanılan hesap makinası (sağ) tarafta gösterilmektedir.

### 3.2.3 GRU Programı

Fransa, Ganil nükleer araştırma merkezinde gerçekleştirilen deneylerde bilgisayarlarda Linux işletim sistemi ve ROOT programı kullanılmaktadır. Deney sırasında fizik verileri ana bilgisayarda depolanan dosyalar mevcut olan ağlar üzerindeki ara bellekler kullanılarak veri transferi gerçekleştirilir. Aşağıda Şekil 28'de gösterilen veri işleme akış şeması ve VIGRU programıyla olan etkileşim şekilleri gösterilmektedir.




Şekil 28. GRU veri işleme akış şeması.

Daha önceki proje gelişme raporlarında da belirtildiği gibi GRU programı CERN'de yaygın olarak kullanılan ROOT programı baz alınarak GANIL nükleer araştırma merkezindeki araştırmacılar tarafından bu merkezde kullanılan dedektör ve elektronikler dikkate alınarak

GANIL için özel olarak geliştirilmiştir. Burada gerçekleştirilen deney sırasında elde edilen verilerin veri kayıt sistemine aktarılması ve bu verilerin analizleri için kullanılmaktadır.

GRU genel bir C++ programlama dilinde yazılmış olan alt programların koordinasyonu ve işbirliğini sağlayacak şekilde tasarlanmıştır.

Uluslararası ortaklı PARIS projesi için üretilen PARIS dedektör kümesi temelde Fransa, GANIL'de kullanılmak üzere tasarlanmış olmasına rağmen, ilerleyen zamanlarda Avrupa'da farklı nükleer araştırma merkezlerinde farklı spektrometrelerle birlikte kullanılacaktır. GANIL'de kullanılacak diğer dedektör sistemleri ve spektrometreler (EXOGAM2, DIAMANT, S3, VAMOS vb.) NUMEXO2 dijital elektronik ünitelerini kullanacağı için burada kullanılacak PARIS dedektör kümelerinde de NUMEXO2 dijital elektronik ünite kullanılacaktır.

Bu nedenle PARIS dedektör kümesi için de veri formatı oluşturulması gerekecektir. Aşağıda NUMEXO2 dijital elektronik ünitenin EXOGAM dedektörleri için geliştirilen veri kayıt formatı izah edilecektir fakat bu veri formatı üzerinde gerekli değişikler yapılarak bu veri formatının PARIS dedektörleri için de kullanımının sağlanması gerekmektedir. Bu konuda GANIL nükleer araştırma merkezinde, İtalya, Milano Üniversitesindeki ve Polonya Krakow nükleer araştırma merkezinde bulunan elektronik mühendisleriyle ortak çalışmalarımız hala devam etmektedir.

### 3.2.4 Veri Formatı

Daha önce EXOGAM2 dedektörü ile birlikte kullanılan NUMEXO2 dijital elektroniği EXOGAM2 dedektör sistemini oluşturan Germanyum kristali ve Compton zırhlama amacıyla kullanılan BGO ve CsI kristallerince veri alımı için bir veri kayıt formatı oluşturuldu. EXOGAM2 dedektörü, birbirlerinden elektronik olarak ayrı dört Ge kristal (clover) şeklinde tasarlanmış ve bu kristallerin etrafları Compton saçılmalarından kaynaklanan olayları dedekte etmek için kullanılan BGO ve CsI kristallerince çevrelenmiştir.

Veri formatı daha önce GANIL nükleer araştırma merkezinde gerçekleştirilen deneylerde kullanılan deneysel veri formatına uygun olabilmesi için çoklu pencere formatına (MultiFrame Metaformat) uygun biçimde tasarlanmıştır. Aşağıda maddeler halinde her bir veri formatının neyi temsil ettiği ve bu verilerle ilgili kısaltmaları görebiliriz.

- EXOGAM2 kristal verileri fiziksel olaylardan çıkartılır (EC-frame)
- Osiloskop verileri (O-Frame)
- Ham örnek verileri (NR-Frame)
- Sıkıştırılmış veri (NC-Frame)

### 3.2.5 EXOGAM2 Veri Formatı

EXOGAM2 dedektörleri için veri formatı ve kısaltmalar ve gerekli açıklamalar aşağıda gösterildiği gibidir.

(1) NUMEXO2 tarafından üretilen fizik verileri, iki Ge kristalleri için verilir. Bir kristalin verisi Crystal-Frame de yer alacak şekilde tasarlanmıştır (EC-Frame)

(2) Veri kanalına bağlı olarak, Veriler 16 bit üzerinde kodlanır (işaretlenmiş/işaretlenmemiş)

(3) Veriler 16 giriş ve çıkış kanallarına göre üç grup şeklinde aşağıda belirtilen organizasyon çerçevesinde tasarlanmıştır. Bit[0:7] CRYSTAL NUMBER 1 (HALF CLOVER) :

(4) geçerli veri “status1” olarak işaretlenir.

(5) Taşma (Pile-up) bilgisi “status 2” olarak işaretlenir.

(6) Eğer dış veriler yansıma yüklerden kaynaklanıyorsa “status 3” olarak işaretlenir.

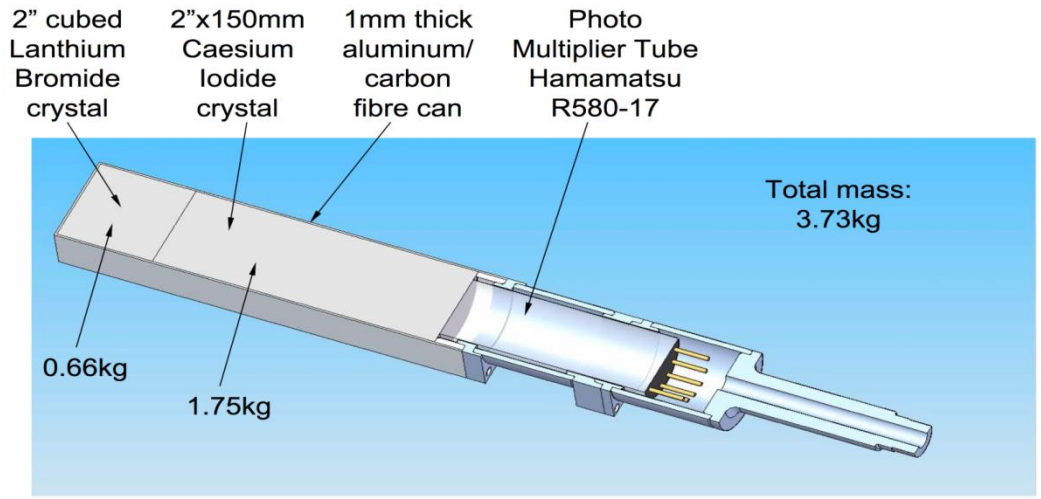
(7) NUMEXO2’nin fifo (ilk giren ilk çıkar) okuyucusu 32 bit’lik veri şeklinde olduğu için deney sırasında kaydedilen veri boyutu da 32 bit şeklinde olmalıdır

Bit[0]: iç 1_1 6MeV
Bit[1]: iç 1_1 20 MeV
Bit[2]: dış 1_1
Bit[3]: dış 2_1
Bit[4]: dış 3_1
Bit[5]: dış 4_1
Bit[6]: BGO 1_1
Bit[7]: CsI1 1_1
Bit[8:15] CRYSTAL NUMBER 2
Bit[8]: iç 1_2 6MeV
Bit [9] : iç 1_2 20MeV
Bit [10] : dış 1_2
Bit [11] : dış 1_2
Bit [12] : dış 1_2
Bit [13] : dış 1_2
Bit [14] : BGO 1_2
Bit [15] : CsI1_2

Bit [0] ve Bit [1] iki iç kristal için sırasıyla 6 MeV ve 20 MeV'lik enerji aralığında veri alımını sağlayan kanalları temsil ederken Bit [2]- Bit [5] arası kanallar birinci iç kristalin dış kısımlarını Bit [6] birinci kristalin BGO'sunu Bit [7] birinci kristalin CsI'nü temsil etmektedir. Bit[8:15] ikinci kristal için tasarlanmıştır. Bit [8] ve Bit [9] ikinci kristalin iki iç kristal için sırasıyla 6 MeV ve 20 MeV'lik enerji aralığında veri alımını sağlayan kanalları temsil ederken Bit [10]- Bit [13] arası kanallar ikinci iç kristalin dış kısımlarını Bit [14] ikinci kristalin BGO'sunu Bit [15] ikinci kristalin CsI'nü temsil etmektedir. Aşağıdaki Tablo 1'de EXOGAM2 kristalinin veri çerçeve formatını özetlemektedir.

EXOGAM2 dedektör sistemi için yukarıda sıralan her bir kısım için veri formatı oluşturulurken tanımlanması gereken bellek miktarı ve tanımlamaları da aşağıda Tablo 1'de detaylı olarak verilmiştir.

Bu tanımların bir benzeri yine GANIL'de nötron algılamaları için kullanılacak olan NEDA dedektör sistemleri için hazır hale getirildi. Bu tanımların bir benzerinin PARIS dedektör sistemlerinde kullanılan fosfor sandviç dedektörleri için de yapılacaktır. PARIS fosfor sandviç dedektörleri EXOGAM2 dedektörlerine kıyasla Şekil 29'da gösterildiği gibi daha az bileşene, ön kısımda $LaBr_3$(Ce) ve arka kısımda NaI(Tl) (veya $CeBr_3$ ve NaI(Tl)) kristallerine sahip olduğu için Tablo1'de verilen tanımlamalar kadar çok tanımlama yapmaya gerek yoktur. İki kristal için veri alımı sırasında istenen tetikleme koşulunu sağlayacak formatta veri alımı yapacak şekilde veri formatı belirlemesi yapılması planlanmaktadır.




Şekil 29. PARIS fosfor sandviç dedektörün şematik görünümü.

Tablo 1. Bir kristal çerçevesi (EC-Frame) MFM2.2 terminolojisinde << Blod Frame>> türü sabit çerçeve uzunluğudur. Aşağıdaki tabloda kristal çerçevenin tüm alanları tanımlanmıştır.

| Alan İsmi | Bytes | Tanım |
|---|---|---|
| metaType | 1 | $2^6$=32 bit büyüklüğünde birim blokları (damla çerçeve)Düşük son haneli (ikili 01000010) 0x42 durumuna ayarlar. |
| Çerçeve boyutu | 3 | 32 bitin birim bloklarında ifade edilen çerçevenin toplam boyutunu 13 e ayarlar. |
| Alt sistem sayıları | 1 | Tüm veri elde sisteminin alt sistemindeki dedektör sayısı konfigrasyonun kurulumunda ayarlanacaktır. |
| Çerçeve tipi | 2 | EC-Çerçeve ve çerçeve- tipi kodu 0x10 a ayarlar. |
| Düzeltme | 1 | 0'a ayarla çünkü EC-çerçeve'nin düzeltmesi 0'dır. |
| Olay sayısı | 4 | GTS tetikleme veren Olay numarası |
| Zaman Etiketi | 6 | Çerçevenin zaman ayarı GTS tetiklemesinin son ayar zamanına göre ayarlanır. |
| Kristal Kimliği | 2 | Kristal kimliği, Tetikleme şartı (TR) ve çerçeveden kaynaklanan sistemde kart dizininden oluşmuştur. Kristal numarası=2 icin TR=8, |
| Status1 | 2 | Her bir kanal için geçerli verinin örüntüsü |
| Status2 | 2 | Her kanalda Taşma (PILE-UP) bilgisi için örüntü |
| Status3 | 2 | Sadece dış kanalların ayna yüklerinin örüntüsü |
| İç Detlta T | 2 | İç diskriminator ve dış dur sinyali arasındaki zaman ölçümü |
| İç 6 Mev | 2 | Energy iç (6 Mev menzil) |
| İç 20 Mev | 2 | Energy iç (20 Mev menzi) |
| Dış 1 | 2 | Energy dış 1 (6 Mev) |
| Dış 2 | 2 | Energy dış 2 (6 Mev) |
| Dış 3 | 2 | Energy dış 3 (6 Mev) |
| Dış 4 | 2 | Energy dış 4 (6 Mev) |
| BGO | 2 | Enerji BGO |
| Csi | 2 | Enerji Csi |
| İç T30 | 2 | Son değerin %30 da sinyal çıkış zaman artışındaki değeri |
| İç T60 | 2 | Son değerin %60 da sinyal çıkış zaman artışındaki değeri |
| İç T90 | 2 | Son değerin %90 da sinyal çıkış zaman artışındaki değeri |
| Padding | 2 | 0 |

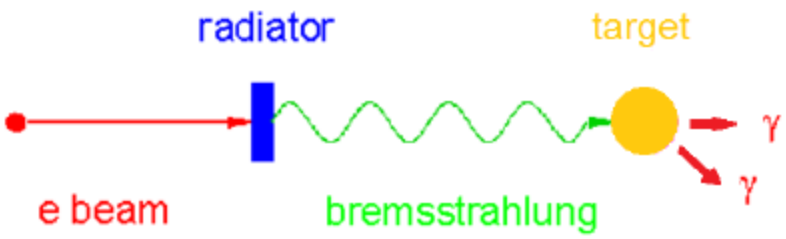
## 4. Bulgular ve Tartışma

Proje kapsamında gerçekleştirilen deneysel çalışmaları, yürütülen Ar-Ge faaliyetlerini, elde edilen bulguları ve bu bulgular üzerine yapılması gereken tartışmalar aşağıda sırasıyla verilecektir.

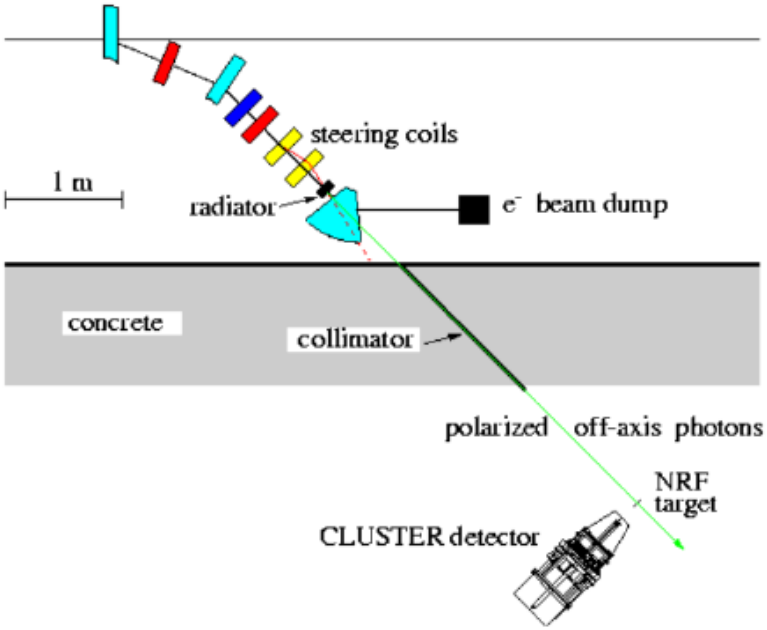
### 4.1 PARIS Dedektör Kümesi için Almanya, ELBE'de gerçekleştirilen deneysel çalışmalar

Bu deneysel çalışmanın temel amacı, daha önce de belirtildiği gibi PARIS dedektör kümesinin lineerliğini, enerji çözünürlüğünü ve zaman yanıtlarını ortaya koymaktır. $^{244}$Cm-$^{13}$C veya $^{238}$Pu-$^{13}$C radyoaktif kaynaklarıyla maksimum 6.13 MeV'li gama-ışınları elde edilebildiği için daha yüksek gama-ışını enerjilerinde dedektör performansını ortaya koyabilmek için Almanya'nın Dresden şehrinde yer alan HZDR (Helmoltz-Zentrum Dresden-Rossendorf) γ-ELBE hızlandırıcı merkezinde (Schwengner R., 2005) bu Ar-Ge faaliyetleri gerçekleştirildi.

Yapılan deneyde 20 MeV enerjiye sahip elektron demetinin aşağıda Şekil 30'da gösterilen düzenek ile Bremsstrahlung fotonlarına dönüşmesi sağlandı. Şekil 31'de gösterilen düzenekte gösterildiği gibi $^{11}$B hedefinin ışınlanması ile $^{11}$B(p, γ)$^{12}$C reaksiyonu ile $^{12}$C çekirdeğinin 15.1 MeV'lik γ-enerjili piki ve $^{11}$B çekirdeğinin 2.125, 4.445, 5.020, 7.285 ve 8.920 MeV enerjili γ-ışını piklerinin analizi için iki tam gün boyunca bu deney sürdürülmüştür.




Şekil 30. Nükleer Rezonans Floresans deneyi ile Bremstrahlung elde edilmesi.




Şekil 31. Polarize Bremstrahlung deney düzeneği.

Deneyde kullanılan PARIS dedektör kümesi, dokuz adet 2”x2”x2" büyüklüğünde yeni nesil $LaBr_3$(Ce) sintilatör kristali ile arka kısımda yer alan 2”x2”x6” geometrisine sahip standart NaI(Tl) materyalin ortak PMT ile kullanılan fosfor sandviç dedektörlerden oluşturulmuştur (Şekil 32).

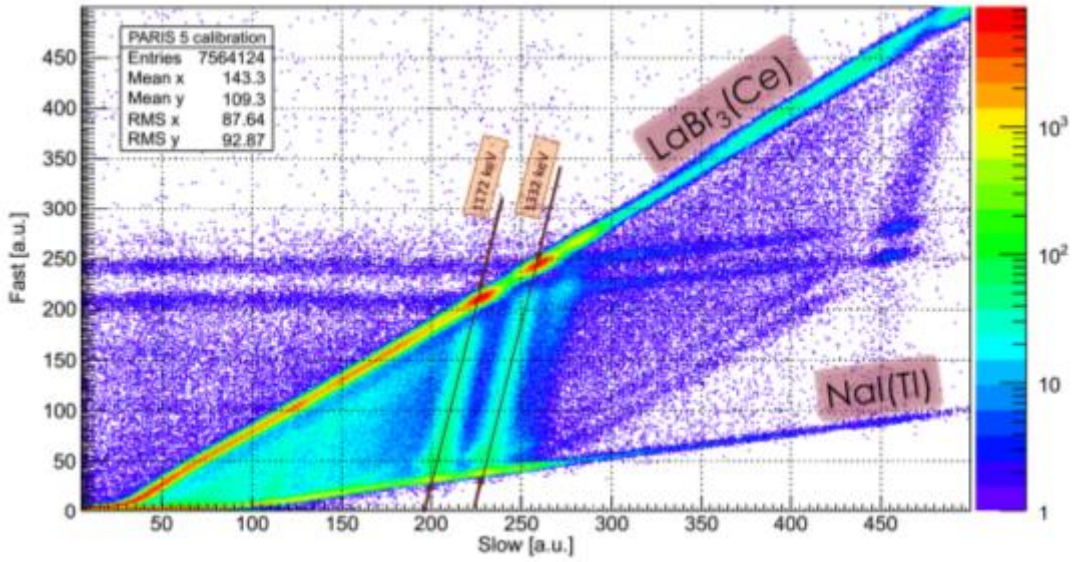



Şekil 32. Deney sırasında dedektörlerin takibi için numaralandırılan Paris dedektör kümesi.

PARIS dedektör kümesi arka kısımda 125 derecelik açı ile yerleştirilmiş ve kurşun bloklar kullanılarak zırh mekanizması sağlanmıştır. Ön kısımda ise absorblama için kurşun ve

bakırdan yapılan materyal kullanılmıştır. PARIS fosfor sandviç dedektörlerinde R7723-100 Hamamatsu foto-tüpleri birleştirilerek dedektör sistemi oluşturulmuştur.

Veri alımında PARIS proje ortaklarından İtalya, Milano Üniversitesi tarafından geliştirilen BaFPro analog elektronik modülü kullanılmıştır. Bu modüler elektronik sistem hızlı ve yavaş sinyallere karşılık gelen iki ayrı koldan veri oluşmasını sağladı. Bir tanesi gelen sinyalin genişliğini temsil eden sinyale karşılık gelirken diğeri ise artırıcı sinyale karşılık gelmektedir. Her iki sinyal bilgileri kullanılarak, 3 farklı olaydan $LaBr_3(Ce)$, NaI(Tl) ve her iki materyalde oluşan kısmi birikimi içeren foton enerji birikimlerinden elde edilen bilgiler elde edilmiştir. Bu deney sırasında $^{60}Co$ ve $^{137}Cs$ radyoaktif kaynaklar kullanılarak NaI(Tl) ve $LaBr_3(Ce)$ sistemleri için üretilen yavaş ve hızlı sinyal durumunu gösteren dağılımın iki boyutlu formu Şekil 33'de gösterilmiştir. PARIS dedektör kümesinde kullanılan toplam dokuz fosfor sandviç dedektörlerin her birinden elde edilen bilgi diğer fosfor sandviç dedektörlerden elde edilen bilgiler ile birleştirilerek toplam dedektör kümesinden elde edilen tek sinyalden oluşturulan spektrum için dahili ve harici ekleme süreci olmak üzere iki farklı süreç kullanılmıştır. Bu süreçler için gerçekleştirilen çalışmalar aşağıda detaylı olarak izah edilmiştir.



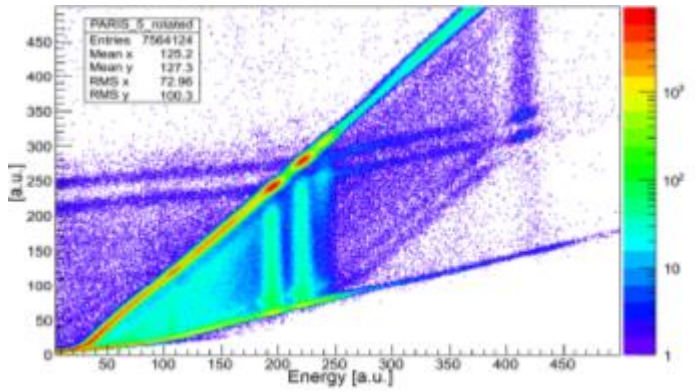

Şekil 33. $^{60}Co$ ve $^{137}Cs$ kaynaklarının kullanılması ile fosfor sandviç dedektörde meydana gelen yavaş ve hızlı sinyal dağılımı. Etiketlenen çizgiler tam enerji piklerini temsil etmektedir.

### 4.1.1 Dahili-ekleme süreci:

Her bir fosfor sandviç dedektörden elde edilen sinyalin diğer fosfor sandviçten elde edilen sinyal ile birleştirilmesi ve toplam sinyali verebilmesini sağlamak gerekir, buna dahili-ekleme süreci denilmektedir. Bunun için $LaBr_3(Ce)$ ve NaI(Tl) fosfor sandviç dedektörleri için sinyalden elde edilen çıkış-zamanları farklılık göstermektedir (($LaBr_3(Ce)$ için çıkış zamanı 23 ns ve NaI(Tl) için ise 213 ns) (Zieblinski M. 2013). Aynı gama-enerjisi için $LaBr_3(Ce)$

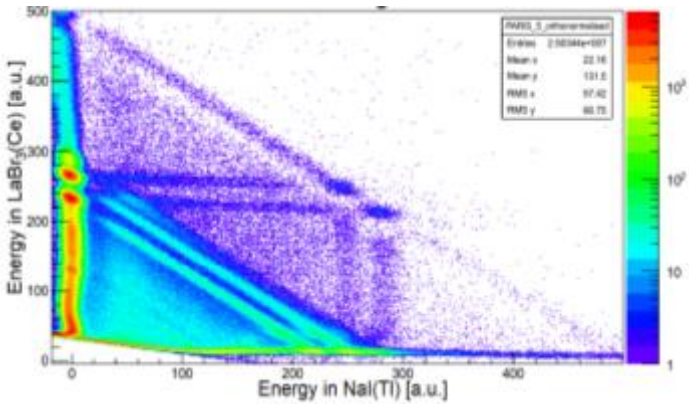
dedektörünün ışık toplama kapasitesi, verimi, NaI(Tl) dedektörüne kıyasla iki kat daha fazla olduğu için gelen aynı gama ışını enerjisi için $LaBr_3(Ce)$'da daha yüksek sinyal genliği ve daha fazla yük toplama imkânı sağlamaktadır. Aynı anda deney düzeneğinde diğer dedektörlerle birlikte kullanılan BaFPro elektroniği, veri için hızlı ve yavaş sinyaller ile ilgili bilgi alabilme imkânı da sağlamaktadır.

İlgilenilen yavaş ve hızlı sinyallerin matris durumuna göre iki ayrı ayrıştırıcının farklı kullanımı Şekil 34'te görüleceği üzere aynı gama-ışını enerjisinden birbirine paralel iki farklı olay olarak gösterilebilmektedir. Böylece, y-eksenine paralel olan çizgiler, o açıda döndürülerek Şekil 34'de gösterilen enerji dağılımı elde edilmiştir.




Şekil 34. Hızlı ve yavaş matrisin dönmesi ile oluşan görünüm. Görülen çizgiler aynı gama-ışını enerjisinin y-eksenine paralel olan olayları ifade etmektedir.

İkinci yaklaşım da ise fosfor sandviç dedektöründen sadece tek bir materyalin kullanılması ile enerji dağılımındaki olayları analiz etmede kullanılabilir. Ortogonal (dikey) süreç kullanılarak $LaBr_3(Ce)$ içerisinde meydana gelen enerji depoziti ve NaI(Tl) içerisinde oluşan enerji dağılımının değişimi mümkündür (Şekil 35).



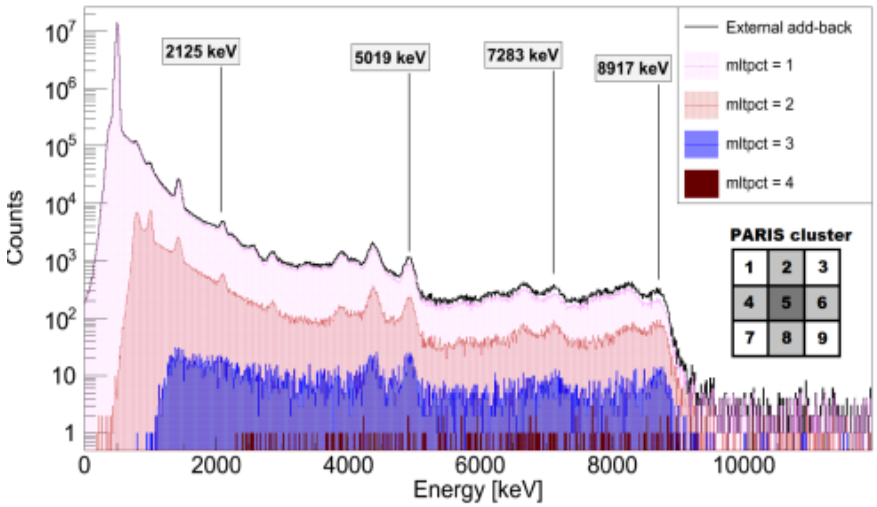

Şekil 35: Hızlı ve yavaş matrislerin ortogonal olarak gösterimi. Ortagonal çizgilerin açısı, gelen gama-ışını enerjisinin 135 derece X-eksenine göre dönmesi ile meydana gelmiştir. Enerji spekturumu her iki bileşen eklenerek elde edilmiştir.

Düşük gama enerjilerine bakıldığında veri alım sisteminde lineer olmayan durum görülmektedir. $LaBr_3(Ce)$ ile NaI(Tl) arasındaki çizgide açının keskin olduğu görülmektedir böylece Şekil 35'de görüldüğü gibi lineer olmayan bir durum ortaya çıkmaktadır. İlk yaklaşımda yani dönme dönüşümünde elde edilen dağılım ortoganal olan yaklaşıma göre daha iyi performans gösterdiği için deneyden elde edilen verinin analizi için dönme dönüşüm yöntemi seçilmiştir.

### 4.1.2 Harici-Ekleme Süreci:

Çift oluşumu yüksek enerjideki gama ışınının ilk etkileşmesi ile meydana gelmektedir. Böylece, ikinci 511 keV enerjili fotonun meydana gelmesi yaygın bir olaydır ve bunlar enerji spektrumundan oluşan dedektörün meydana getirdiği tekli ve çiftli kaçış pikleridir. Oluşturulan demet konfigürasyonunun en önemli avantajlarından birisi saçılan gama-ışınlarının birlikte eklenebilmesi ve orjinal spektrumda tüm foton enerjilerinin dedekte edilebilmesidir, bu sürece harici-ekleme süreci denilmektedir.

Dedektör üzerinde oluşan bir olay analiz edildiği zaman, dedektör etrafında yer alan diğer dedektörler üzerinde meydana gelen olaylar da kontrol edilmektedir. Dedektör üzerinde oluşan tüm enerjiler eklenerek enerji spektrumu elde edilmektedir. Analiz için harici-ekleme süreci, daha sonra uygulanmıştır. Şekil 36'da dedektör üzerinde meydana gelen farklı sayım değerlerinde enerji spektrumu gösterilmektedir. Şekil 36 üzerinden görüleceği üzere yüksek sayımlı dağılımda tekli ve çiftli kaçış piklerini içine alarak bir dağılım meydana getirdiği görülebilmektedir.




Şekil 36. Paris dedektör kümesinde yer alan 5 numaralı fosfor sandviç dedektörü ve etrafında yer alan diğer dedektörlerden elde edilen gama-ışının harici-ekleme süreci uygulanarak oluşturulan spektrumu.

### 4.1.3 Enerji Çözünürlüğü:

Deney sonucunda elde edilen verinin enerji çözünürlüğü ROOT analiz programı kullanılarak elde edilmiştir. Deney sonucunda elde edilen verinin fit işlemi iki fonksiyon kullanılarak elde edilmiştir.

Lineer arka-fon üzerinde oluşan Gauss fonksiyonu;

$$f(x) = p1 + p2x + p3\exp\left(-0.5(\frac{x-p4}{p5})^2\right)$$

Lineer arka-fon üzerinde iki gauss fonksiyonu;

$$f(x) = p1 + p2x + p3exp\left(-0.5(\frac{x-p4}{p5})^2\right) + p6exp\left(-0.5(\frac{x-p7}{p8})^2\right)$$

p1, p2 lineer arka-fon parametrelerini,
p3, p6 pik üzerinde elde edilen sayım değerini,
p4,p7 elde edilen pik dağılımının ortalama değerini,
p5,p8 ise standart sapma değerini ifade etmektedir.

Yukarıda verilen ikinci fonksiyon, yüksek enerji değerinde yer alan dağılım için kullanılmıştır ve elde edilen sonuçlar Tablo 2'de verilmiştir.

Elde edilen değerler analiz edildiği zaman, yüksek enerjili gama-ışınları için elde edilen olay sayısının düşük olduğu görülmektedir. Fosfor sandviç dedektöründe meydana gelen enerji çözünürlüğüne bakıldığı zaman, bu değerin saf $LaBr_3$(Ce) kısımdan daha kötü olduğu fakat saf NaI(TI) kısımdan daha iyi olduğu görülebilmektedir. Harici-ekleme süreci kısmında enerji çözünürlüğünün kötü olması ve bunun nedeninin de lineer olmayan veri sistemi olduğu kanaatini oluşturmuştur. Bu lineer olmayan kısmın daha iyi değerlendirilmesi için ilerleyen zamanlarda geliştirilmesi planlanan yeni algoritma ve yeni hesaplama yöntemleri planlanmaktadır. Bu yöntemlerle ilerde yapılacak olan analiz çalışmalarında daha detaylı bir yargıya varılması mümkün olacaktır.

Tablo 2. PARIS demeti içinde yer alan 9 spektranın eklenmesi ile oluşan enerji çözünürlüğü değerlerini göstermektedir.

| Enerjı(keV) | Dedektör No: 5 | | | | Tüm Ekleme |
|---|---|---|---|---|---|
| | $LaBr_3$(Ce) | NaI(Tl) | Dahili-ekleme | Harici-ekleme | |
| 2124 | 2.59(31)% | 3.40(85)% | 3.33(15)% | 3.28(19)% | 3.26(05)% |
| 5019 | 2.19(05)% | 3.80(49)% | 2.91(11)% | 3.24(09)% | 2.70(03)% |
| 7283 | 1.81(16)% | 3.17(1.0)% | 2.31(29)% | 2.64(25)% | 2.60(09)% |
| 8017 | 1.84(08)% | 2.78(49)% | 2.21(08)% | 2.36(07)% | 2.38(10)% |

ELBE'de gerçekleştirilen bu deneyden şu ana kadar elde edilen sonuçlar değerlendirilecek olursa;

- ELBE tesislerinin PARIS dedektör kümesinin performansını ortaya koyacak sonuçlarını elde edebilmek için faydalı bir araştırma merkezi olduğu,

- Kurulan deney düzeneğinin hedeflenen amaçları elde etme açısından iyi bir deney düzeneği kurulumunun gerçekleştirildiğini,

- BaFPro analog elektronik sistemiyle deney verilerinin sorunsuz bir şekilde kaydedilebildiği

- Bu elektroniğin ileride kullanılması düşünülen dijital elektronik ünitelerin geliştirilmesi için yürütülen Ar-Ge faaliyetleri tamamlanıncaya kadar rahatlıkla kullanılabileceği

- PARIS dedektör kümesi için elde edilen verilerin analizi için ilk kez bir veri analiz algoritmasının geliştirilmesine olanak sağladığını söylemek mümkündür.

### 4.2 PARIS Fosfor sandviç dedektörü için yapılan lineerlik, verimlilik, enerji çözünürlüğü ve zaman yanıtları ile ilgili çalışmalar

PARIS fosfor sandviç dedektörünün R7723-10 Hamamatsu foto tüpüyle birlikte kullanılmasına daha önce gerçekleştirilen test çalışmaları neticesinde karar verilmişti. PARIS fosfor sandviç dedektörünün R7723-10 Hamamatsu foto tüpüyle birlikte kullanıldığında $LaBr_3$(Ce) ve NaI(Tl) için sırasıyla birbirinden oldukça farklı 16 ns ve 250 ns bozunma zamanlarına sahip olduğu görülmektedir. Bugüne kadar $LaBr_3$(Ce) dedektörünün karakterizasyonu için farklı boyutta dedektör ve radyoaktif iyon kaynakları kullanılarak düşük

enerjilerde gerçekleştirilen çalışmalar ve proton-gama reaksiyonları ile gerçekleştirilen çalışmalardan elde edilen sonuçlar (Glaz A., 2013, Ciemala M., 2009, Mazumdar I., 2013) referanslarında detaylı olarak rapor edilmiştir. $LaBr_3$(Ce) kristalinin yoğun ışık toplama (63 foton/keV) kapasitesi dolayısıyla foto tüplerin bir doyuma ulaştığı bilinmekte olup bu durum dedektörde lineer olmayan enerji kalibrasyonu meydana getirmektedir. Bu problemin aktif voltaj-bölücü kullanılarak aşılabildiği ve 2" ve 2" çapındaki $LaBr_3$(Ce) dedektörün foto-pik verimliliğinin 17.6 keV enerjide %0.65 olduğu (Ciemala M., 2009, Mazumdar I., 2013) rapor edilmiştir.

Aynı fosfor sandviç dedektörün $^{11}B(p,\gamma)$ reaksiyonundan elde edilen 22.6 MeV enerjili gamalar için performansı (Zieblinski v.d 2013)) referansında rapor edilmiştir. Aynı foto-tüpü ve aynı çıkışı kullanan $LaBr_3$(Ce) ve NaI(Tl) kristallerinin lineerlik karakteristiğini daha hassas ortaya koymak gerektiği için 0.6-22.6 MeV enerji aralığında CAEN dijital elektroniği de test edildi. Bu dijital elektroniğin performansını da ortaya koymak için PARIS projesi ortaklarıyla Hindistan'daki nükleer araştırma merkezinde gerçekleştirilen deneysel çalışmanın detayları aşağıda izah edildi.

### 4.2.1 Deneyin Ayrıntıları:

Şekil 37'de D1 ve D2 şeklinde etiketlenen fosfor sandviç dedektörlerine optik sıvı kullanılarak sırasıyla PMT1 ve PMT2 ile etiketlenen foto tüpler takıldı. ORTEC marka 556 kodlu modül yardımıyla dedektörlere gereken yüksek voltaj verildi. Dedektörlerin lineerlik, verimlilik, enerji çözünürlüğü ve zaman yanıtlarını ortaya çıkarmak için dedektörler farklı radyoaktif kaynaklarla ve $^{11}B(p,\gamma)$ proton yakalama reaksiyonu sonucu oluşan gama-ışınlarıyla test edildi.

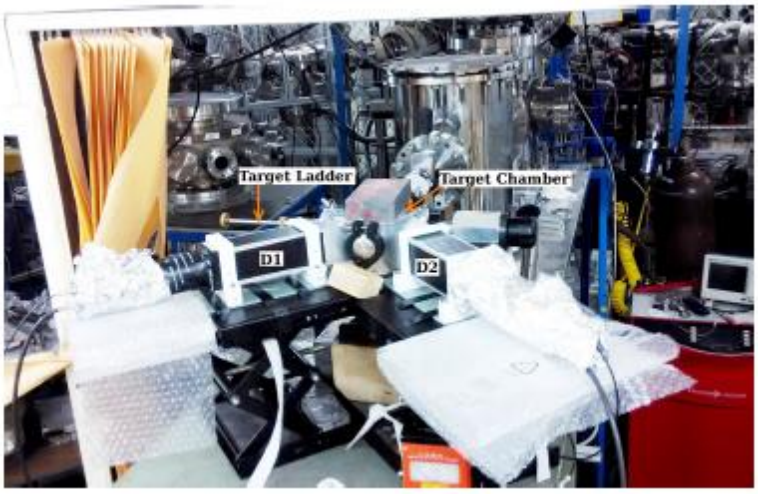
Bu gama-ışınlarının neler olduğu detaylı bir şekilde Tablo 3 ve Tablo 4'te listelendi. Yüksek enerjili gama-ışınları ise Tablo 3'de verilen reaksiyonlardan üretildi. Şekil 37, proton yakalama reaksiyonlarında kullanılan deneysel düzeneği göstermektedir. İnce bir alüminyum kapsül kullanılarak dedektörler ışın doğrultusuna göre +45° ve -45° derecelik açılarda hedeften 6 cm uzaklığa yerleştirildi. Hedefteki kalın arka tabakadan dolayı hedefe gelen proton yükü ölçülemedi ve bundan dolayı yüksek enerjili gama-ışınları için mutlak verimlilik hesaplanamadı. Tablo 3'de $E_p$=163 keV enerjili proton ~2$\mu$A akımla ve $E_p$=7.2 MeV enerjili proton ~10 nA akımlarla 127 $\mu$g kalınlıktaki Tantalum ile desteklenen 1mg/cm2 kalınlıktaki $^{11}B$ hedefi üzerine gönderilerek deney gerçekleştirildi. 3 mm'lik kurşun, X ışınlarını absorbe edebilmek için dedektörlerin ön yüzüne konuldu.

Tablo 3. Ölçümlerde kullanılan radyoaktif kaynaklar ile $E_\gamma$ ve $N_s$ radyoaktivite miktarları.

| Source | $E_\gamma$ (MeV) | $N_s$ (Bq) |
|---|---|---|
| $^{22}$Na | 0.511, 1.2 8 | - |
| $^{137}$Cs | 0.6617 | 13738 (427) |
| $^{54}$Mn | 0.8348 | 8260 (298) |
| $^{60}$Co | 1.1732, 1.3325 | 9846 (276) |
| $^{241}$Am-$^{9}$Be | 4.439 | 9625 (147) |
| $^{239}$Pu-$^{13}$C | 6.130 | - |

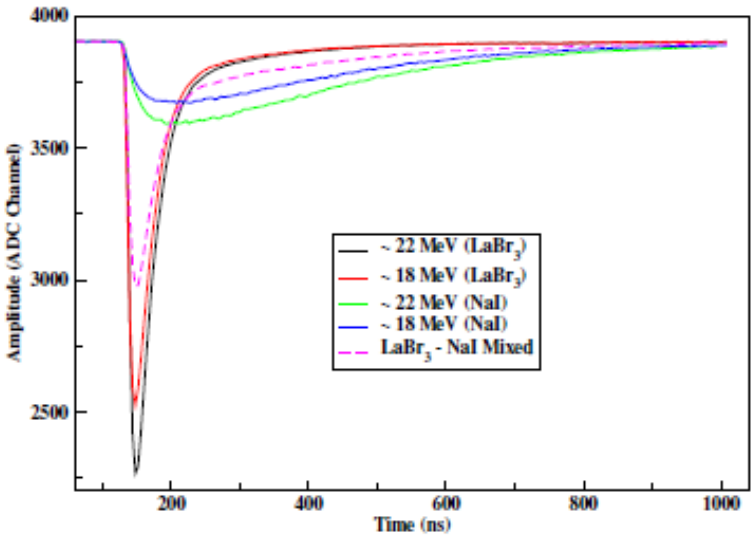
Tablo 4. Radyoaktif yakalama reaksiyonları ve salınan $E_\gamma$

| Reaction | $E_p$ (MeV) | $E_\gamma$ (MeV) |
|---|---|---|
| $^{11}$B(p, γ) | 0.163 | 4.439, 11.680 |
| $^{11}$B(p, γ) | 7.2 | 4.439, 5.020, 18.118, 22.557 |



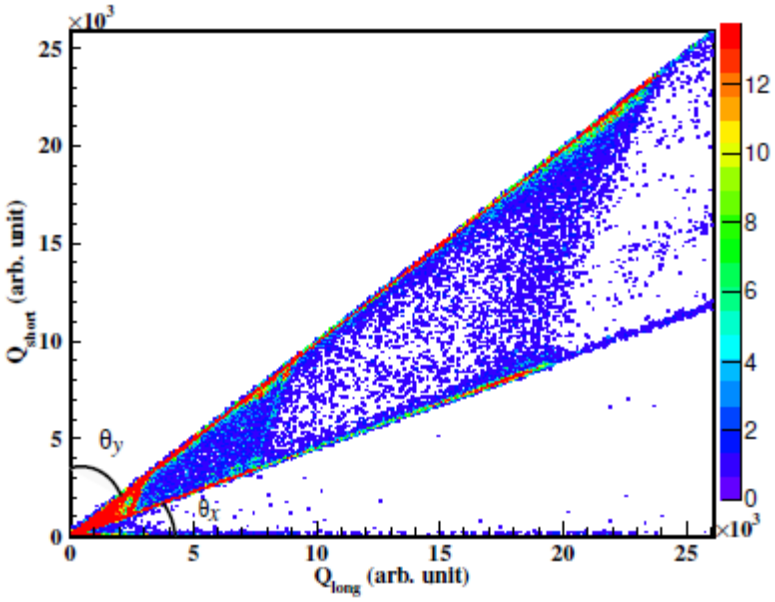

Şekil 37. Proton yakalama reaksiyonu için kullanılan deney düzeneği

Dedektör sinyallerini sayısallaştırmak ve işlemek için CAEN tarafından geliştirilen VME tabanlı V1720e ve V1751 dijital elektronik üniteler kullanıldı. WAVEDUMP programı kullanılarak sayısallaştırılan uzun sinyalin tamamının kaydedilmesi sağlanmıştır. Yüksek enerjili gama-ışınlarını temsil eden V1720e ile kaydedilen tipik sinyallerin farklı etkileşim noktaları için görüntüleri Şekil 38'de gösterilmektedir. $LaBr_3$(Ce) veya NaI(Tl) kaydedilen tam veya kısmı enerjili gamalara ait olayların ayrımı net bir şekilde görülmektedir.




Şekil 38. V1720e (250 MS/s) sayısallaştırıcı kullanılarak D1 dedektöründe kaydedilen yüksek enerjili gama atmaları. Gösterilen sinyaller 18 ve 22 MeV arasındaki kalibre edilmemiş gamaları göstermektedir. Baseline çizgisi yaklaşık olarak 3900 civarında alınmıştır.

DPP-PSD yazılımı, her bir olay için zaman damgası ile kaydedilmiş sayısallaştırılmış sinyalin iki zaman penceresi üzerinden entegre edilmesini sağlamaktadır. Kaydedilen veri diğer işlemler için ROOT (Brun v.d, 1997) formatına dönüştürüldü. Kısa ve uzun kapı genişlikleri 4.4 MeV'de en iyi enerji çözünürlüğünü vermek için optimize edilmiş neticede bu değerlerin sırasıyla 300 ns ve 900 ns olduğu bulunmuştur. Kısa (short) ve Uzun (long) zaman kapısı kullanılarak Ep=163 keV de $Q_{kısa}$ ve $Q_{uzun}$ için elde edilen 2D histogram şekil 39'da verilmiştir. $LaBr_3$(Ce) ve NaI(Tl) spektrumları bu histogramın projeksiyonundan elde edildi ve pikler LAMPS ve ROOT programları ile fit edildi.




Şekil 39. DPP-PSD donanım yazılımıyla $E_p$=160 keV de $^{11}B(p,\gamma)$ reaksiyonu kullanılarak D2 dedektörü için elde edilen verinin iki boyutlu histogramı ($Q_{short}$ vs $Q_{long}$). $\theta_x$ ve $\theta_y$ , NaI(Tl) ve $LaBr_3(Ce)$ kristallerindeki tek olayların $Q_{long}$ ve $Q_{short}$ eksenlerine göre eğim açısını vermektedir.

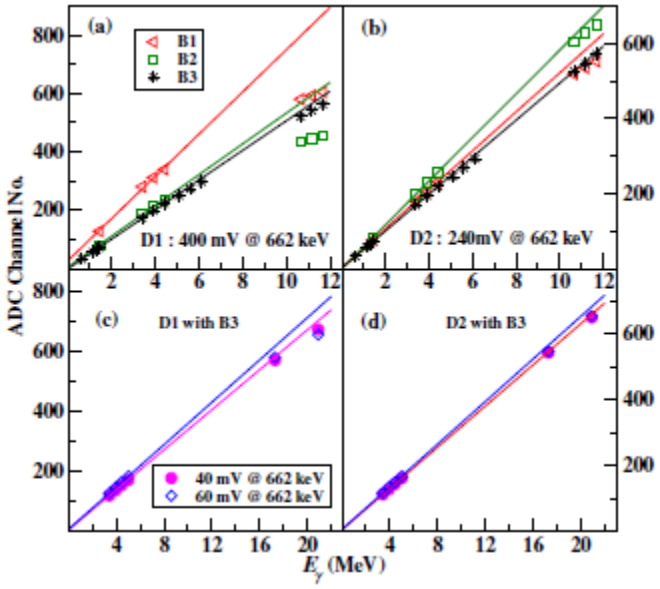
### 4.2.2 Lineerlik, Sayım Hızı Etkileri ve Enerjiye karşı zamanın lineerliği:

Önceki kısımda bahsedildiği gibi, $LaBr_3(Ce)$ dedektörlerindeki en büyük sıkıntı yüksek gama-ışını enerjilerine karşılık gelen yüksek ışığa karşı dedektörün cevap süresinin lineer olmamasıdır. Ölçümlerde 3 farklı voltaj bölücü kullanılmıştır. Bunlar B1 diye adlandırılan Hamamatsu tarafından yapılmış E5859-15, B2 diye adlandırılan B1'in iki dynodunun küçültülmüş hali ve B3 olarak adlandırılan ise Strasburg'daki IPHC grubu tarafından PARIS dedektörü için üretilmiş olan voltaj bölücüdür.

Yapılan ölçümlerde dedektörün enerji cevap süresinin bütün voltaj bölücüler için 4.4 MeV'e kadar lineer olduğu gözlenmiştir. Şekil 40 (a) ve (b) D1 ve D2 dedektörlerinin $E_\gamma$=11.7 MeV'e kadar farklı voltaj bölücülerdeki enerji cevap süresi karşılaştırılmıştır. Enerji cevap süresinin lineerlikten sapma oranı (α) 4.4 MeV'e kadar olan enerji kalibrasyonları kullanılarak tahmin edilmiştir. Tablo 5'te, aynı yüksek voltajda 662 keV gama-ışını için farklı voltaj bölücüler için ölçülen lineerlikten sapma miktarları verilmiştir. Atma yüksekliği (A1) daha yüksek olan D1 dedektörünün lineerlikten sapma miktarı da tahmin edildiği gibi daha yüksektir.

Tablo 5. 11.7 MeV'de $LaBr_3(Ce)$ dedektörünün farklı voltaj bölücülerdeki (B1, B2, B3) lineerlikten sapma oranları (α). Ayrıca 662 keV de $LaBr_3(Ce)$ kristalindeki anot atma yüksekliği (A1) de verilmiştir.

| Detector | B1 | | B2 | | B3 | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | A1(V) | α(%) | A1(V) | α(%) | A1(V) | α(%) |
| D1 | 1.5 | 31 | 1.3 | 27 | 0.4 | 5 |
| D2 | 0.68 | 9 | 0.6 | 5 | 0.24 | 1 |




Şekil 40. Fosfor sandviç dedektörde $LaBr_3(Ce)$ için enerji cevap lineerliği. a) 11.7 MeV'e kadar D1 dedektörünün farklı voltaj bölücülerle değişimi b) a'nın aynısı D2 dedektörü için, c) 22.6 MeV'e kadar D1 dedektörünün B3 voltaj bölücülerle değişimi d) c'nin aynısı D2 dedektörü için.

Açıkça görüleceği gibi B3 türü voltaj bölücü $E_\gamma$ ~ 12 MEV'de bile gözle görülür oranda daha iyidir. Bu sebeple 22.6 MeV'e kadar olan lineerlik sadece B3 türü voltaj bölücü ile A1~40 mV ve 60 mV için incelendi. Bu sonuçlar Şekil 40 (c) ve (d) de gösterilmiş ve Tablo 6'da verilmiştir.

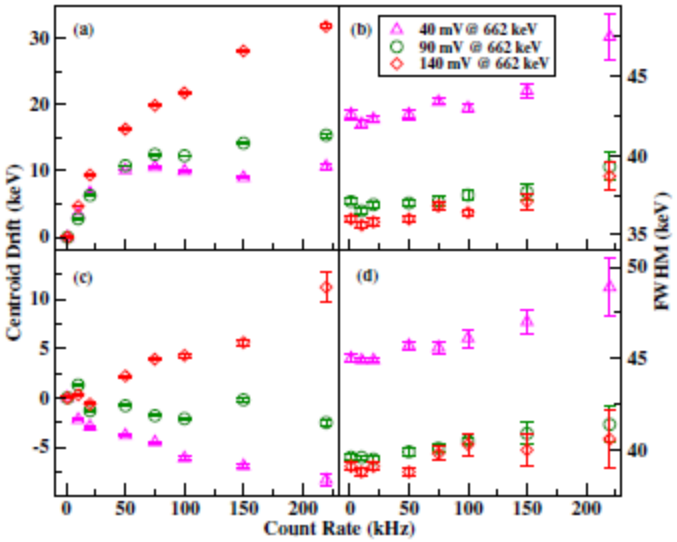
Tablo 6. 18.1 ve 22.6 MeV'de $LaBr_3(Ce)$ dedektörünün B3 voltaj bölücüsüyle farklı yüksek voltajlarda (A1) lineerlikten sapma oranları (α).

| Dedektör | **Lineer Olmayan (%)** | | | |
|---|---|---|---|---|
| | $E_\gamma$ =18.1 MeV | | $E_\gamma$ =22.6 MeV | |
| | A1=60(mV) | A1=40(mV) | A1=60(mV) | A1=40(mV) |
| D1 | 6 | 2 | 12 | 4 |
| D2 | 3 | 1 | 4 | 2 |

### 4.2.3 Sayım oranı fonksiyonu olarak Dedektör kazanç stabilitesi:

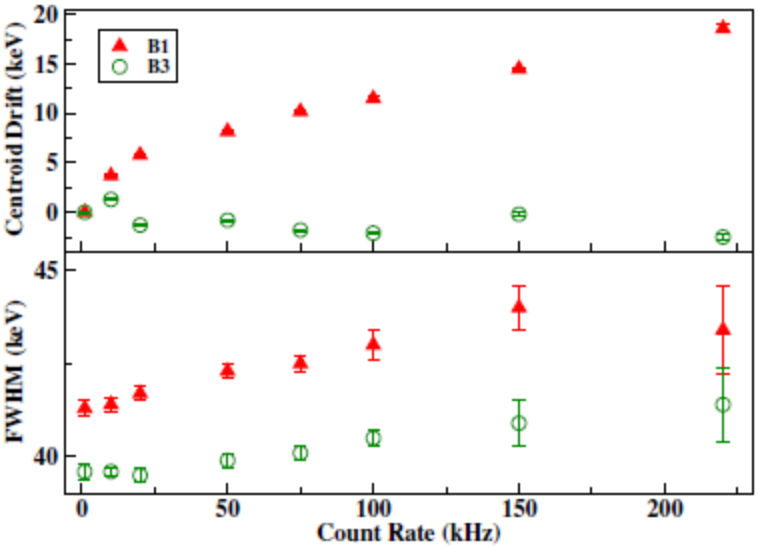
$LaBr_3(Ce)$ dedektörünün mükemmel zaman çözünürlüğü nedeniyle PARIS dedektörleri dedekte verimliliğini artırmak için yakın geometride kullanılmalıdır. Bundan dolayı, deney süresince alınacak yüksek sayım oranı ile başa çıkabilmek önemli bir hal almaktadır. Deney sırasında ışın huzmesinin yoğunluğundaki ufak bir değişiklik sayım oranının dalgalanmasına neden olmaktadır. Fosfor sandviç dedektörlerlerinin atma genişliği yaklaşık 1 μs'dir ve bu da yüksek sayım oranı ile (~MHz) çalışabilmesini sağlamaktadır. Fakat detektor+PMT+voltaj bölücü grubu sayım oranının değişimine karşı dirençli değilse, bu enerji çözünürlüğünün kötüleşmesine neden olur.

Dedektör+PMT grubunun sayım oranı değişimine karşı direnci 2-220 kHz aralığında $^{54}Mn$ kaynağından salınan 835 keV enerjili gama-ışınları kullanılarak incelendi. Bu oranın elde edilmesi için zayıf $^{54}Mn$ kaynağı (8.3 mBq) sabit bir mesafede tutularak ve güçlü bir $^{137}Cs$ kaynağı (4 MBq) farklı pozisyonlarda gezdirilerek gerçekleştirildi. Bunun neticesinde 835 keV gama ışının merkezi atmaların üst üste binmelerden dolayı çok az etkilendiği gözlendi, D1 dedektörü için (panel (a) ve (b)) ve D2 dedektörü için (panel (c) ve (d)) pik pozisyonunun değişimi ve FWHM değerleri Şekil 41'de gösterildiği gibidir.




Şekil 41. 835 keV gama ışınının $LaBr_3(Ce)$ D1 dedektöründeki kayma miktarı (a) ve FWHM (b) değerinin sayım oranına karşı grafiği; benzer şekilde D2 dedektörü için (c) ve (d) de verilmektedir.

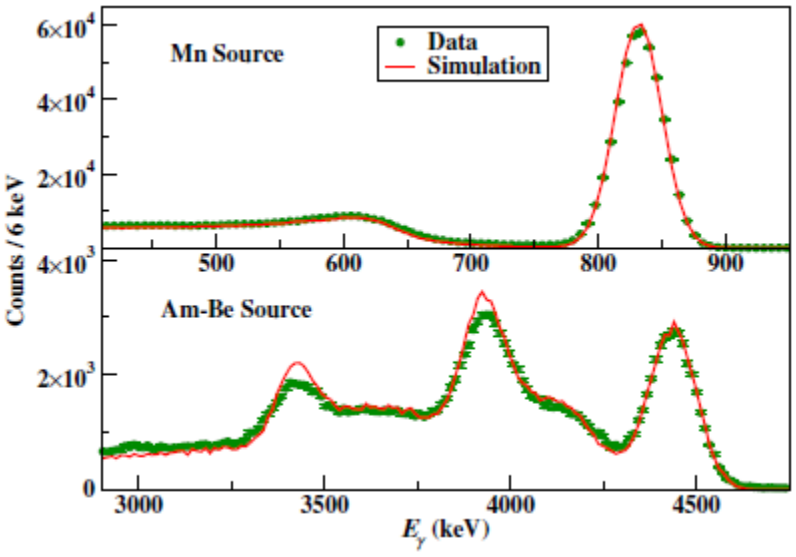
Yüksek sayım oranı ile başa çıkma kapasitesi, standart voltaj bölücü B1 ile (90 mV @662 keV) test edildi ve sonuçlar Şekil 42'de gösterildiği gibidir. 10 kHz'de bile B1 voltaj bölücüsü ile gözlenen merkezi kayma (~3.7 keV), B3 voltaj bölücüsüne göre ( ~1.3 keV) oldukça yüksektir. Benzer davranış FWHM da da gözlenmektedir.




Şekil 42. 835 ve 662 keV gama ışınlarının $LaBr_3(Ce)$ D2 dedektöründeki kayma miktarı (a) ve FWHM (b) değerinin sayım oranına karşı grafiğinin B1 ve B3 voltaj bölücüler için karşılaştırılması, A1=90 mV.

### 4.2.4 Dedektörlerin cevap süresinin analizi:

Fosfor sandviç dedektörlerinin cevap süresi GEANT4.10 benzetim kodu simüle edildi ve dedektör geometrisi oluşturulurken 1 mm incelikte Alüminyum kapsül kullanıldı. Deney düzeneğinde nokta radyoaktif kaynak kullanıldı. Her simülasyon için $10^8$ oranında olay oluşturuldu. Simülasyon ile edilen spektrumlar deneysel veriymiş gibi ROOT analiz programı yardımıyla analiz edildi. Simüle edilmiş spektrumlarla D1 dedektöründen 835 keV ve 4.4 MeV gamalar için elde edilen arka plan düzeltmesi yapıldı ve elde edilen spektrumlar Şekil 43'de karşılaştırıldı. Sonuçlar arasında mükemmel bir uyum olduğu ortaya konuldu.




Şekil 43. 835 keV ve 4.4 MeV için deneysel ve simülasyon spektrumların karşılaştırılması.

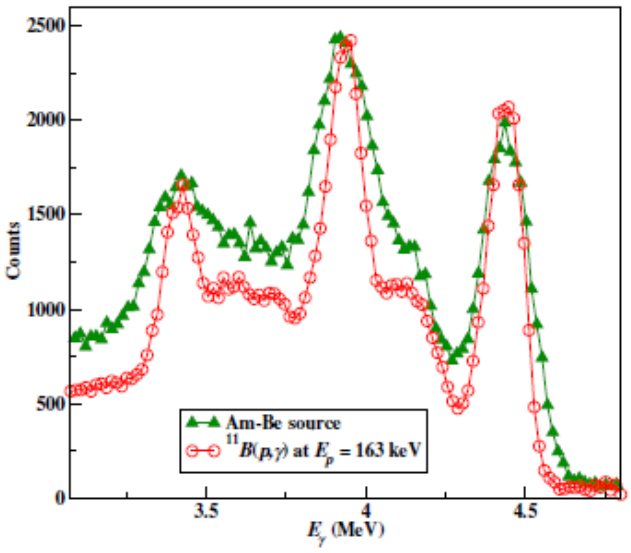
### 4.2.5 Enerji çözünürlüğü

Düşük enerjili gama ışınları (Eγ<4.4 MeV) için $LaBr_3(Ce)$ dedektörü kullanılarak elde edilen sinyallerin fit edilmesi ile enerji çözünürlüğü ifadesi aşağıdaki denklem kullanılarak elde edilmiştir.

$$\frac{FWHM}{E_\gamma(\%)} = \sqrt{a + b/E_\gamma}$$

a ve b her bir dedektör için 662 keV-22.6 MeV enerji aralığında elde edilen değişkenleri ifade etmektedir.

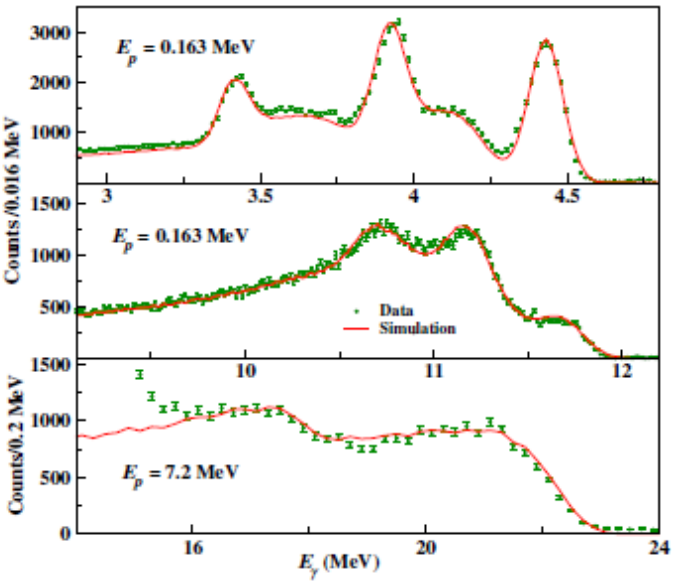
$E_p$=163 keV icin $\beta_{recoil}$ = 0.002 değerinde çok düşükken, $E_p$=7.2 MeV (relative recoil velocity, $\beta_{recoil}$ = 0.01) için Doppler etkisi, reaksiyon ile yayılan gama-ışınları simülasyon ile birleştirilmiştir. Şekil 44'de gösterilen spekturum, Ep=163 KeV de $^{11}B(p,\gamma)$ reaksiyonundan ve kaynaktan elde edilen 4.4 MeV değerindeki gama-ışınlarını göstermektedir.




Şekil 44. Yeşil kısım ile gösterilen dağılım, (FWHM~%3.6) çözünürlük değeri ile Americium-Beryllium (Am-Be) kaynaklarından elde edilen 4.4 MeV gama ışınlarını ve kırmızı ile gösterilen kısım ise (FWHM~%2.7) çözünürlükte Ep=163 keV de $^{11}$B(p, γ) reaksiyonu ile $LaBr_3$(Ce) dedektörü kullanılarak elde edilen dağılımı ifade etmektedir.

Doppler genişlemesinden kaynaklanan etki ile Am-Be kaynağı kullanılarak elde edilen dağılım açık bir şekilde görülebilmektedir. Fosfor konfigürasyonunda kullanılan $LaBr_3$(Ce) dedektörü için çok iyi bir enerji çözünürlüğü yeniden vurgulanmıştır.

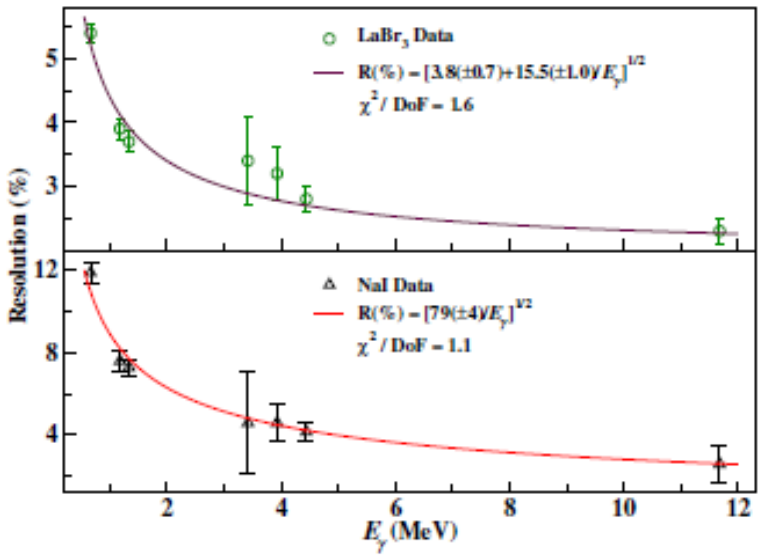
Aşağıda gösterilen Şekil 45'de, $^{11}$B(p,γ) reaksiyonu ile birlikte simülasyon ile elde edilen 4.4 MeV, 11.7 MeV, 18.1 MeV ve 22.6 MeV değerinde gama ışınlarına ait spektrum gösterilmektedir.




Şekil 45. Yeşil ile gösterilen kısım deneyden alınan veriyi, kırmızı ile gösterilen kısım ise simülasyon verisi ile elde edilen gama ışınlarını ifade etmektedir.

Şekil 45'ten de görüleceği üzere simülasyon ile deneyden alınan veri arasındaki uyum oldukça açık bir şekilde gösterilmiştir.

Aşağıda gösterilen Şekil 46'da üst kısımda yer alan grafik $LaBr_3(Ce)$ için 0.6-12 MeV aralığındaki enerji çözünürlüğünü ifade etmektedir. Yeşil semboller ile gösterilen değerler deneyden alınan veriyi ve görülen fit çizgisi ise enerji çözünürlüğü denklemindeki fonksiyonu ifade etmektedir.




Şekil 46. D2 dedektörünün $LaBr_3(Ce)$ (üst) ve NaI(Tl) (alt) kristallerinin 12 MeV'e kadar ki enerji çözünürlüğü (A1=60 mV). Semboller, ölçülen çözünürlüğü ve çizgilerse fit fonksiyonunu göstermektedir.

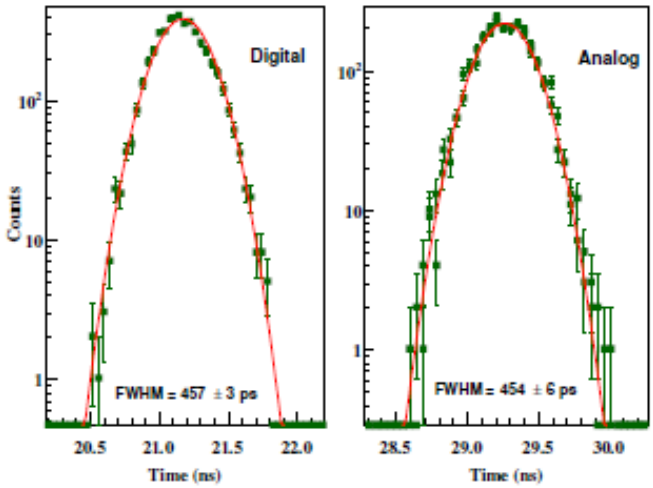
$E_{gama}$=4.4 ve 11.77 MeV de elde edilen enerji çözünürlük değerleri $LaBr_3(Ce)$ için %2.9 ve %2.5 ve NaI dedektörü %2.8 ve %2.3 olarak elde edilmiştir.

### 4.2.6 Zaman Çözünürlüğü:

Daha doğru ve hassas zaman ölçümü elde etmek için Sabit-Fraksiyon-Diskriminatörü (CFD) modülünde 6 ns (yükselme zamanının ~%67) ve %20 veri alma oranı aralığında bir gecikme sağlanacak şekilde WAVEDUMP adı verilen veri alım sisteminde değişiklikler yapıldı (Anoop v.d, 2014). $^{60}Co$ radyoaktif kaynağı ~2 cm mesafede, $LaBr_3(Ce)$-D1 ve $LaBr_3(Ce)$-D2 dedektörleri birbirine bakacak şekilde orta noktaya yerleştirildi.

$LaBr_3(Ce)$ kristali için dijital elektronik kullanılarak $^{60}Co$ radyoaktif kaynağın tipik 1173 ve 1332 keV enerji değerinde foto-pikleri kullanılarak elde edilen uçuş-zaman dağılımı Şekil 47'nin sol kısmında ve analog modül kullanılarak elde edilen uçuş-zaman dağılımı ise sağ kısımda gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlardan hem dijital hem de analog veri alımında

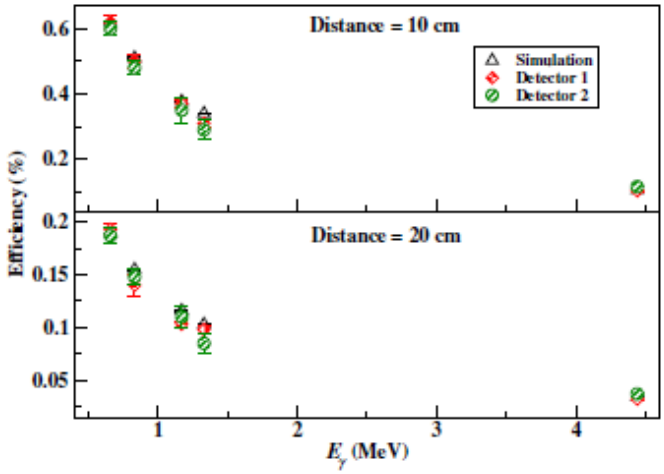
birbirine yakın değerleri verdiği görülecektir (FWHM-dijital~457±3 ps ve FWHM-analog~454±6 ps)




Şekil 47. D1 ve D2 dedektörlerinin $LaBr_3(Ce)$ kristallerinin $^{60}Co$ kaynağıyla V1751 ( 1GS/s) sayısallaştırıcı (soldaki panel) ve normal elektronik (sağdaki panel) kullanılarak elde edilmiş uçuş zamanı spektrumları. Kırmızı çizgi deneysel datanın Gaussian fitini göstermektedir.

### 4.2.7 Verim:

$LaBr_3(Ce)$ kristali için foto-pik verim ölçümü $E_{gama}$=662 keV-4.4 MeV değerlerinde dedektörlerin 10,15 ve 20 cm uzaklığa yerleştirilerek verim ölçümü yapılmıştır. 10 ve 20 cm uzaklığa yerleştirilerek elde edilen sonuçlar Şekil 48'de verilmiştir. Elde edilen sonuçların simülasyon verisi ile uyum içerisinde olduğu görülmektedir. Yüksek enerjilerde dedektörün içsel-verim ölçümü yapılamamıştır. Bununla birlikte, $E_p$=163 keV'de $^{11}B(p,\gamma)$ reaksiyonunda eş zamanlı 4.4 MeV ve 11.7 MeV gama ışınları yayınımı da gerçekleştiği için 4.4 MeV ve 11.7 değerinde relatif dedektör verim ölçümü ~%24 olarak elde edilmiştir.

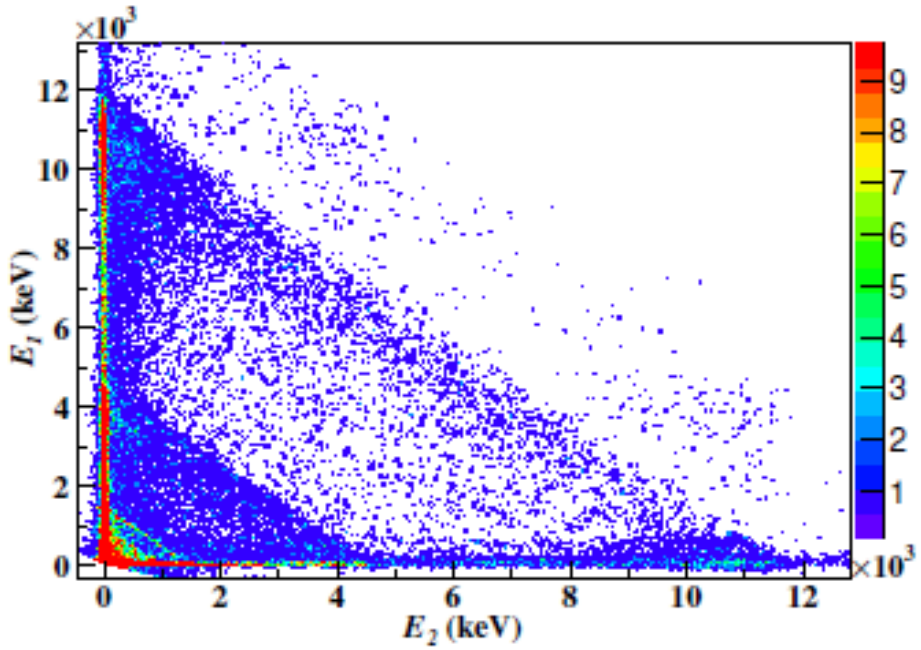



Şekil 48. D1 ve D2 dedektörlerinin $LaBr_3(Ce)$ kristallerinin dedektör yüzeyine 10 ve 20 cm mesafedeki ölçülen ve simüle edilen foto pik verimliliği.

### 4.2.8 Toplam enerji spekturumu:

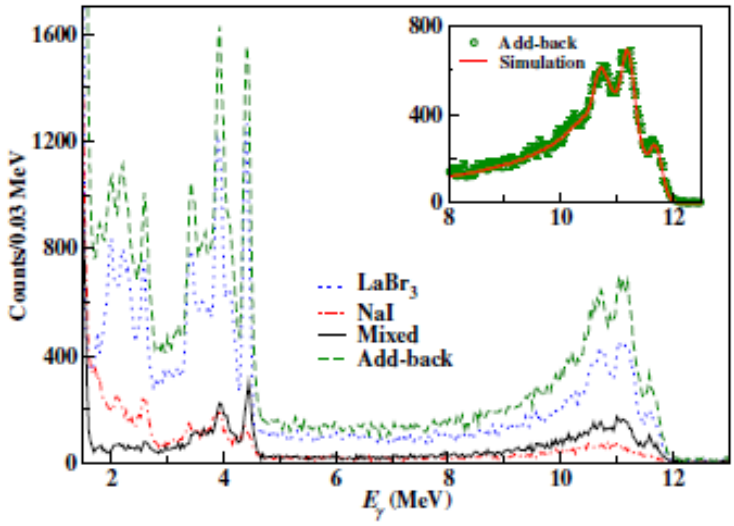
Toplam enerji ($E_{top}$) spekturumu eklemeli enerji birikiminin $LaBr_3$(Ce) ve NaI(Tl) kristallerine uygulanması ile elde edilmiştir. Şekil 49'da $E_p$=163 keV enerjide $^{11}B(p,\gamma)$ reaksiyonu ile $LaBr_3$(Ce) dedektöründe elde edilen olaylar, saf NaI(Tl) dedektöründe elde edilen olaylar ve karma olaylar olarak adlandırılan olayların enerji spektrumu verilmektedir. Spektrum üzerinde 4.4 MeV ve 11.7 MeV enerjilerde yüksek kazanç olarak adlandırılan eklemeli (yeşil çizigiler) eklenmesinden sonra da enerji dağılımında karşılaştırma yapılması sağlanmıştır.

Yükselme faktörü ($N(E_{tot})/N(E_1)$, 4.4 MeV foto-pik için 1.42 ve $E_{gama}$=10.4-12.0 MeV için ise 1.52 olarak elde edilmiştir. Şekil 49'dan da görüleceği gibi NaI(Tl) dedektörü ile elde edilen sayım oranı, $LaBr_3$(Ce) dedektörüne göre çok azdır.




Şekil 49. D2 dedektörünün şekil 37'deki iki boyutlu spektrumu.

Şekil 50, içerisinde sağ üst köşede yer alan 11.7 MeV için elde edilen eklemeli (add-back) spektrumu, deneysel veri ve simülasyon verisinin karşılaştırması görülmektedir. Simülasyon ile elde edilen eklemeli spektrumu, deney ile elde edilen veri alımı için uygulanan aynı koşullar altında üretimi sağlanmıştır. 4.4 MeV'de add-back olayının eklenmesi ile $LaBr_3$(Ce) kristalinin enerji çözünürlüğü ~%3.4, $LaBr_3$(Ce) kristalinin tek başına enerji çözünürlüğü ise ~%2.9 olarak elde edilmiştir.




Şekil 50. D2 dedektörünün $^{11}B(p,\gamma)$ reaksiyonundan salınan 163 keV enerjili gama ışını için tek $LaBr_3(Ce)$ (Mavi kesikli çizgi), tek NaI(Tl) (kırmızı kesikli çizgi) ve ikisinde beraber (Siyah çizgi) gözlenen olaylara ait enerji spektrumları.

Fosfor sandviç dedektörlerin lineerlik, verimlilik, enerji çözünürlüğü ve zaman yanıtları ile ilgili sonuç olarak bir değerlendirme yapılmak istenirse:

PARIS dedektör kümesi için kullanılan $LaBr_3(Ce)$ ve NaI(Tl) dedektörlerinin CAEN dijital elektronik ve analog elektronik kullanılarak veri alma düzeneği karşılaştırılmıştır. CAEN dijitizer ile $E_p$=163 keV ve $E_p$=7.2 MeV enerjide radyoaktif kaynak ve $^{11}B(p, \gamma)$ reaksiyonu uygulanarak dedektörlerin tepkileri hem sabit nokta radyoaktif kaynaklarla hem de hızlandırıcıdan farklı enerjilerde elde edilen protonlarla bombardıman edilen hedeflerle gerçekleştirilen reaksiyonlardan elde edilen gama-ışınları kullanılarak araştırılmıştır.

Üç farklı voltaj ayırıcısı kullanılarak $E_\gamma$=22.6 MeV enerjiye kadar fosfor sandviç dedektör içerisinde yer alan $LaBr_3(Ce)$ kristali için enerji tepkisi doğrusallığı test edilmiştir. Yüksek enerjide sayım oranı önem arz ettiği için bu konudaki performansı araştırılmıştır. Dedektör kazancının incelenmesi, IPHC (**I**nstitut **P**luridisciplinaire **H**ubert **C**urien, Strasbourg, France) Strasburg grubunun PARIS dedektörü için geliştirdiği B3 tipi voltaj bölücüsü ile 2-220 kHz aralığında sayım oranı kullanılarak çalışma performansı araştırılmıştır. Dedektör performansında sayım oranı 50~150 kHz aralığında dengede olduğu ve alınan sinyallerin 835 keV'de pik-merkezi değişimi ve FWHM değerleri %1.5 (11keV) ve %13 (5keV) ortaya çıkarılarak bunların karşılaştırmaları yapıldı.

Kullanılan B3 tipi voltaj bölücünün; sayım oranında, enerji kalibrasyonunun doğrusallığı ve çözünürlük gibi parametreleri için çok iyi sonuç verdiği gözlendi. Dedektör kazancının kararlılığının 24 saatlik periyodda +-%1 den daha iyi olduğu tespit edildi.

WAVEDUMP veri alım sisteminde CFD algoritması uygulandıktan sonra $^{60}Co$ radyoaktif kaynak kullanılması ile fosfor sandviç dedektörün zaman çözünürlüğü ölçümü yapıldı. Alınan sinyaller için FWHM-Dijital ~457$\pm$3 ps ve FWHM-Analog~454$\pm$6 ps olarak tespit edildi. Her bir dedektör için ölçülen zaman çözünürlüğü değerinin, FWHM~315 ps olduğu ve bu değerin nötron-gama ayırımında kullanılan uçuş-zamanı için çok iyi bir değer olduğu tespit edildi.

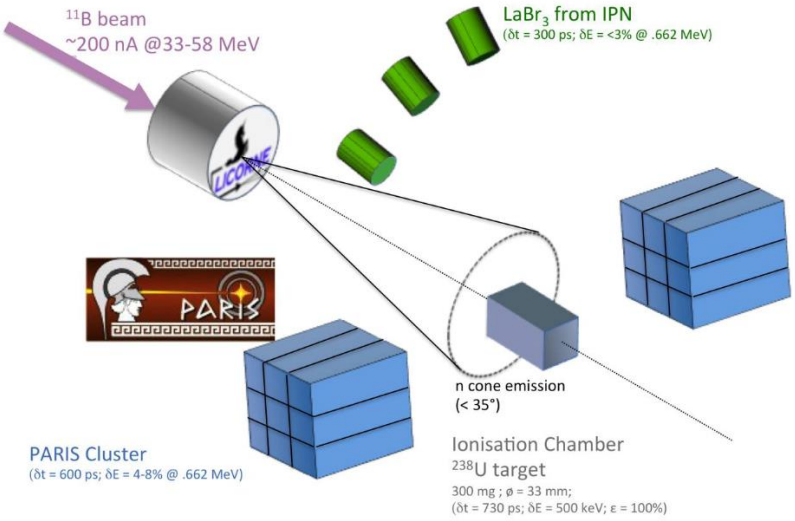
GEANT4 simülasyon programı ile elde edilen verinin radyoaktif kaynak kullanılarak elde edilen veri ile dedektör verimliliği noktasında bir kıyaslama yapıldığında sonuçların uyum içinde olduğu gösterildi. $LaBr_3$(Ce) kristali için 11.7 MeV de relatif dedektör veriminin yaklaşık olarak ~%24 olduğu tespit edildi.

Elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde, fosfor sandviç dedektörü ile alınan çeşitli sinyaller için, örnekleme oranı 0.5-1 GHz ile dijital sinyal sürecinin ve yüksek çözünürlüklü (12-14 bit) ADC'nin optimum çalışma limitleri olduğu tespit edildi.

### 4.3 Nisan-2016 yılında gerçekleştirilen deney

Proje önerisinde LICORNE nötron kaynağı kullanarak yapmayı planladığımız bazı deneysel çalışmalardan ilki Nisan 2016'da Fransa, Paris şehri Orsay nükleer araştırma merkezinde gerçekleştirildi. PARIS dedektör kümesi kullanılarak gerçekleştirilen bu deneyde LICORNE doğrusal nötron kaynağından çıkan nötronlar doğrudan iyonizasyon odası içerisinde yer alan 300 mg/cm$^2$ kalınlıktaki $^{238}$U hedefi üzerine gönderilmiştir (Şekil 51).

Gerçekleştirilen bu deney ile fizyona uğrayan $^{239}$U, fizyon fragmentlerine ayrılacaktır. Nötron enerjisinin fonksiyonu olarak $^{238}$U'un hızlı nötronlarla uyarılmış fizyonu hakkında deneysel veri pek bulunmadığı için bu deney yardımıyla elde edilecek bilgi geleceğin 4. nesil hızlı reaktör konseptlerinin temel fisil (bölünebilir) izotopu olan $^{238}$U hakkında önemli bilgilerin elde edilmesini sağlaması açısından oldukça önemlidir. Orsay nükleer araştırma merkezindeki Tandem hızlandırıcısından çıkan 33-58 MeV enerjili $^{11}$B bombardıman parçacıkları her biri 2 cm kalınlıktaki LICORNE gaz hücreleri üzerine düşürülerek tek-enerjili nötronların üretilmesini sağlamaktadır.




Şekil 51. Deneysel kurulumun şematik diyagramı. $^{238}$U hedefi nötron kaynağından 0 cm mesafede $CF_4$ gaz sayımı ile iyonize çemberin içine yerleştirilir. BaF2 ve $LaBr_3$(Ce) sintilatör dedektörlerin 4 grubu uçuş metodu tekniği ile hızlı fizyon nötronları ve hızlı fizyon gama ışınları arasındaki mükemmel ayrım için hedefin konumundan 30 cm uzaklıktaki mesafeye konumlandırılmıştır. PARIS küme dedektörleri şekilde gösterildiği gibi şematik iyonizasyon odasının her iki yanında hedeften 50 cm uzaklıkta konumlandırılması planlanmakla birlikte deney sırasında sadece bir küme kullanıldı.

Gerçekleştirilen bu deneyin arkasında yatan motivasyondan kısaca bahsetmek gerekirse; fizyon fragmentlerinin ilk ürünlerinden yayınlanan gama-ışını spektrumlarının ölçülmesi yaklaşık olarak on beş yıl önce önemli bir konu olarak gündemdeydi. Bu ölçümle elde edilebilecek parametrelerin neler olduğuna baktığımızda, bunların sırasıyla: a) toplam gama-ışını enerji salınımı, b) yayınlanan gama-ışını başına ortalama enerji miktarı ve c) fizyon sürecinde fizyona uğrayan çekirdeğin atom ve kütle numarasının fonksiyonu olarak gama yayımının ortalama gama-ışını çok katlılığı olduğu görülecektir (Valentine, 2001). O dönemlerde deneysel veriler sadece termal nötronlarla uyarılmış fizyon $^{233,235}$U,$^{239}$Pu reaksiyonlarıyla elde edilebiliyordu.

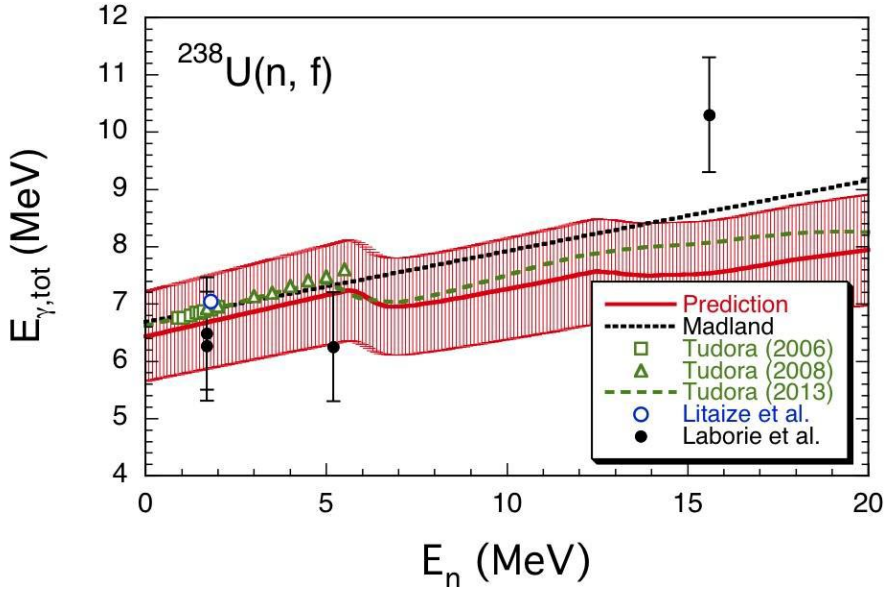
Bu tür deneylerle fizyon fragmentlerinin ilk ürünlerinden yayınlanan gama-ışınlarının ortalama özellikleri ancak tayin edilebiliyordu. Deneysel olarak bu gama-ışınlarını doğrudan ölçmek pek mümkün değildi. Son zamanlarda, fizyon başına salınan ortalama foton enerjisini ve gama ışını çok katlılığı için yeni hassas değerlerin PARIS dedektör kümesi gibi sintilatör dedektörleriyle ölçülmesi mümkün olduğu için bu deney tasarlandı ve PARIS dedektör kümesi bu amaç doğrultusunda kullanıldı. Bu tür deneylerden elde edilecek bilgilerin ilk başta nükleer reaktör simülasyonları için gerekli reaktör koru ve kor etrafındaki bölgenin ısısının hesaplanmasını mümkün kılacak bilgilerin elde edilmesine olanak sağlayacaktır. Bu tür hesaplamaların yapılması oldukça zordur, kor içerisinde farklı nükleer reaksiyonların meydana gelmesi ve bu sürecin kompleks olması burada üretilen ısının ve bu ısının taşınmasının hesabı oldukça zordur.

Reaktör gücünün çoğunluğu yakıttaki nötron aracılığıyla uyarılmış fizyon tepkimelerinden kaynaklanır ve fizyon parçacıklarının seri (hızlı) kinetik enerji kaybı vasıtasıyla fizyonun gerçekleştiği çok yakın bir yerde konumlanmıştır. Bununla birlikte korda salınan enerjinin %10'u gama-ışını biçimindedir ve başlangıç konumundan çok uzak mesafelere (cm mertebesinde) gidebilir.

Reaktörün çalışması süresince reaktör korundaki gama-ışınlarından kaynaklanan ısınma (gama ısınımı) süreci bütün bölünemez maddelere (örneğin yapısal malzemeler, korun kabuğuna, reaktör araçlarına vb.) etki etmektedir. Reaktör kapatıldığında gama ısınımı tüm kor malzemeleri için hala baskın enerji depolama nedeni olduğu için gama ısınımı reaktör güvenliği için oldukça önemlidir. İşte gama ışınımına neden olan fizyon fragmentlerinin ilk ürünlerinin yayınladığı gama enerjilerinin neler olduğununun ortaya çıkarılması gama spektrum yardımıyla tayin edebilecektir (Nuclear Data, 2006).

Günümüzde çalışır durumdaki nükleer reaktörlerin korundaki gama ısınmasına dair ölçüm için kullanılan modeller ısınma etkisini deneysel verilerle kıyaslandığında %30'dan daha iyi tahmin edememektedir (Rimpault, 2005). Bunun temel nedeni olarak yeteri kadar hassas olmayan nükleer verilerin bu model çerçevesinde kullanılması ve modelin kendi eksikliklerinden kaynaklanmaktadır (Verbinski vd. 1973, Pelle vd., 1971, TE, 1999). Nötron yakalanmasında, esnek olmayan çarpışma ve fizyon parçalarının beta bozunumundan kaynaklanan gama ışınımları oldukça iyi anlaşılmıştır. Günümüzde, birkaç grup tarafından ortaya konan fizyon süreci ve tüm gözlenebilirler kullanılarak tamamlanmış modellemeler ve ilgili teorik çalışmalar ortaya konarak, FIFRELIN kodu (Serot, 2010), Los Alamos'taki GEF kodu (http://www.khs-erzhausen.de ve http://www.cenbg.in2p3.fr/GEF, 1982 ) ve (Kawano, 2010, Tudora, 2013 ve Oberstedt, 2014) gibi kodlar geliştirilmiştir. Tüm bunlara ek olarak OECD/NEA'nın desteğiyle başlatılan CIELO (Collobrtive International Evaluated lLirary Organization) pilot proje yardımıyla ana aktinitler (U, Pu, Th) için bir sistematik oluşturma adına hızlı nötronlarla (enerjisi 20 MeV'e kadar olan nötronlar) uyarılmış fizyona kadar bu çekirdekler için hesaplanabilecek nükleer verilere genişletilmesi amaçlanmıştır.

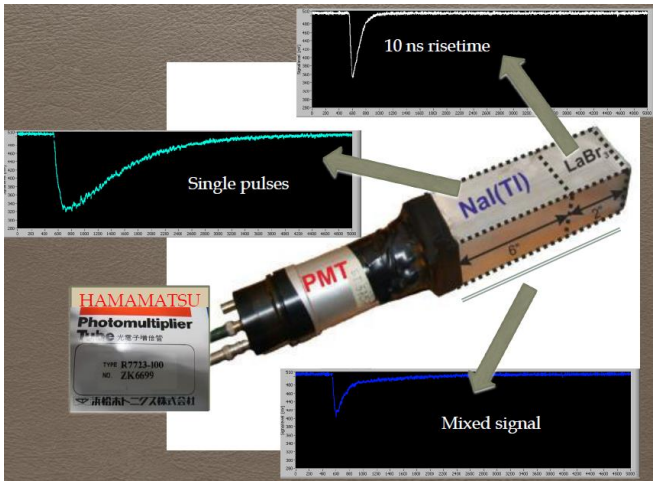
Bu uygulamaların dışında fizyon fragmentlerinin ilk ürünlerinin gama ve nötron yayınımı arasındaki rekabeti ortaya koyacak bilgiler gerçekleştirdiğimiz bu deney ile elde edilebilecek bilgiler olup bu modelin geliştirilmesine katkı sağlayacaktır. Aşağıda, Şekil 52'de $^{238}U$ fizyonunda salınan ortalama toplam gama ışını enerjisinin deneysel sonucu ile güncel teorik ve fenomolojik modellerin karşılaştırılması nötron enerjisinin fonksiyonu olarak verilmiştir. D.G. Madland'ın lineer tanımı, 1982 yılında Frehaut (Frehaut,1982) tarafından alınan veriyi içermektedir. Yeşil sembolleri ve kesikli çizgiler A. Tudora (Tudora, 2010) tarafından model tarafından adım adım tasarlanan güncel hesaplamaları ifade eder. Kırmızı çizgi (hata çizgiler ise A. Oberstedt (Oberstedt, 2013) tarafından geliştirilen bir fenomenolojik modeli ifade eder. A. Tudora ve A. Oberstedt'in ortalama enerji ile ilgili hesaplamaları birbiriyle tutarlı ve ikisi de ikinci fizyon kanalı açıldığında bir "bükülme" öngörmektedir. Fakat Madland'in tanımında böyle bir bükülme görülmüyor bu bükülme gama yayınımı ve fizyondaki nötron yayınımının ne kadar güçlü bir şekilde ilişkili olduğunu göstermektedir. Gerçekten de, ikinci ihtimal fizyon nötron yayınlama olasılığı ile gama yayınım hasarı artacaktır. Ancak son deneysel veriler sadece siyah noktalarla gösterilenlerdir ve sadece bunlarla modelin geçerliliği sonucuna varılması mümkün değildir.




Şekil 52. $^{238}U$ fizyonunda salınan ortalama toplam gama-ışın enerjisinin gelişimi. Bu şekil dört faklı hesaplamanın karşılaştırmasını içermektedir (kırmızıyla yazılı olan A. Oberstedt, siyah kesikli çizgiler D.G. Madland (Madland, 2006), yeşil renkli noktalama modeli A. Tudora, mavi olan FIFRELIN code (Serot, 2010) ve siyah noktalarla işaretli ön veriler J.M. Laborie (Laborie ve ark., 2012) ve arkadaşları tarafından elde edilmiştir.

Nükleer veri ölçümlerindeki büyük gelişmeler LICORNE (Lebois, 2014) gibi yeni geliştirilmiş nötron kaynakları ile birlikte sintilasyon malzemelerindeki ilerlemeler, örneğin yüksek verim, çözünürlük ve zamanlama özellikleri sunan lantan halejönür dedektörleri sayesinde şu anda mümkün hale gelmiştir. Hızlı fizyon gamalarının ölçümündeki temel mesele nötron ve gama ışınlarını ayırma kabiliyetidir. Çünkü hızlı fizyon gamaları da hızlı fizyon nötronlarına eşlik ettiği için bunları birbirinden ayırt etmek oldukça zordur. Lantan halejönür dedektörleri ns altı zaman çözünürlüğüne sahip olduğu için uçuş süresi metodu ile bu ayrımı kısa mesafelerde yapmak mümkün hale gelmiştir. Bu dedektörlerle hızlı fizyon gama tayfsal şekli, ortalama enerji ve çok katlılığın hassas ölçümlerini mümkün kıldığı için (n,n') ve (n,γ)'dan kaynaklı kirlenme hızlı fizyon gama ışınlarından ayırt edilebilir hale getirilebilmektedir. PARIS dedektör kümelerinde kullanılan $LaBr_3$(Ce)+NaI(Tl) fosfor sandviç dedektörlerinin bu gücü sayesinde aşağıda önerilen ölçümleri bu deney aracılığı ile gerçekleştirmek mümkün hale gelmiştir.

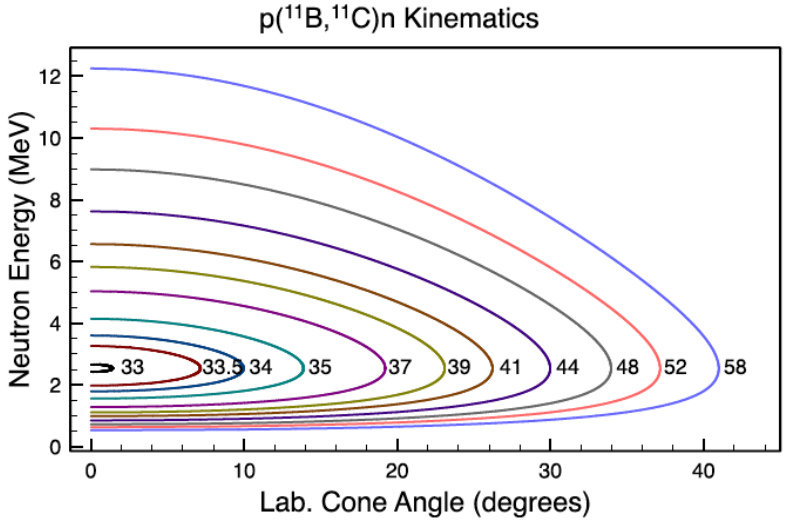
Fosfor sandviç dedektörün gücü bu deney açısından önemli olduğu için PARIS fosfor sandviçi oluşturan $LaBr_3$(Ce) ve NaI(Tl) kristallerinin her birinin ve iki kristalin birlikte ortak sinyal algılama performansını göstermek faydalı olacaktır. Bu nedenle fosfor sandviç dedektör ile birlikte kullanılan Hamamatsu R7223-100 foto tüpü ile gerçekleştirilen performans testlerinin sonuçları aşağıda gösterilmiştir (Şekil 53).




Şekil 53. Hamamatsu R7223-100 foto tüpünün fosfor sandviçi oluşturan $LaBr_3$(Ce) ve NaI(Tl) kristallerine bağlı durumu ve her bir kristal ve her iki kristalin ortak sinyalleri karşılaştırıldı.

LICORNE yönlü nötron kaynağı tarafından üretilen geliş enerjisi 5 ve 12 MeV arasında değişen nötronlara sahip hızlı nötronlar tarafından tetiklenen $^{238}$U(n,f) tepkimesi için hızlı gama ve hızlı nötron yayımını karakterize etmek mümkündür, bu deneyde bu ölçümün gerçekleştirilmesi amaçlanmıştır.

Buradaki sıra dışı özellik kinematik olarak odaklanmış kullanım ile IPN Orsay tandeminin benzersiz kabiliyeti olan yoğun $^{11}$B ışınları üreterek ters p($^{11}$B,$^{11}$C)n tepkimesi oluşturmasıdır. Bu tepkimede enerjisi 12 MeV'e kadar olan nötronlar üretilir ve 40 derecelik dar koniler biçiminde odaklanır (Şekil 54).




Şekil 54. 33 ve 58 MeV arasında toplam kinetik enerjili farklı $^{11}$B olayları için p($^{11}$B,$^{11}$C)n reaksiyonunda nötron yayınlanmasının kinematik kıvrımları.

Bu deneyler LICORNE kaynağının benzersiz yön belirleme yeteneği sayesinde, gama/nötron dedektörleri kaynaktan gelen nötronlar tarafından karartılmadığı için bu düzeneğin bu amaçlar doğrultusunda kullanımı Orsay nükleer araştırma merkezini cazip hale getirmiştir.

Bu ölçümleri uygulamak için 2015 yılının son yarısında IPN de kurulan PARIS küme dedektörünün prototipinin 2 kümesi kullanılarak uçuş zamanı ile eşzamanlı hem gama hem de nötron tayf ölçümlerini gerçekleştirmek ve bu dedektörler sayesinde yeni ölçüm teknikleri kullanılarak PARIS küme dedektörlerinin tam nötron tepkisinin ölçümü gerçekleştirildi.

300 mg/cm2 kalınlıktaki $^{238}U$ ince hedefi içeren iyonize çemberi, ışın eksenine sıfır derecede, gaz hücrelerinin hemen ardına yerleştirerek gerçekleştirilen bu deneyde aktinidlerin depolandığı elektrotlar ince titanyum folyolardan (50 μm) ve uçuş yolunda saçılmayı azaltmak için yana yatırıldı. İnce giriş ve çıkış titanyum pencereleri (100 μm) haznenin gövdesi ve gelen nötron ışınları arasındaki etkileşimi mümkün olan en aza indirmek için eklendi. Kullanımdaki gaz, üstün sürüklenme hızı özelliklerine sahip $CF_4$'tür. Fizyon ve alfa bozunumu olayları arasında eksiksiz ayrım $^{252}Cf$ kaynağı kullanılarak elde edildi. Ölçülen zaman çözünürlüğü 732 ± 15 ps mertebesindedir. LICORNE ile daha önceki yıl gerçekleştirdiğimiz deneyde $^{7}Li$ birincil ışın olmak üzere maksimum nötron akısı hedef üzerinde $10^7$ nötron/saniye mertebesinde gerçekleşti. $^{11}B$ için ~200 nA'lık birincil yoğunluk ve 0.5 barn civarında nötron üretim tesir kesiti dolayısıyla $^{11}B$ ışını ile saniyede 35 fizyon civarında bir maksimum fizyon oranına ulaşılmıştır.

Hızlı fizyondan kaynaklanan gama ışınları ve nötronlar deney sırasında kullanılan PARIS dedektör kümelerini oluşturan $LaBr_3(Ce)$/NaI(Tl) paralel yüzlü fosfor sandviç yardımıyla sağlandı. Bu fosfor sandviç dedektörleri $LaBr_3(Ce)$'ün kaliteli enerji çözünürlüğünü ve NaI(Tl)'nın yüksek içsel algılama verimini kullanarak oldukça yüksek verimliliğe ve pikten genele oranının yüksek olması dolayısıyla özellikle deney sırasında oluşan gama ışını tayfının (10 MeV'e kadar) yüksek enerji kısmını karakterize etmekte oldukça kullanışlı oldu. PARIS dedektör kümesi hedef konumundan 50 cm uzaklığa yerleştirildi ve bu yolla oluşan hızlı fizyon gama ışınları ve hızlı fizyon nötronları uçuş zamanı tekniği ile birbirinden ayırt edilebildi. Ek olarak düzenekte 5 cm uzunluğunda ve 5 cm çapında, fizyon haznesinden 30 cm uzaklıkta 3 silindir şeklinde $LaBr_3(Ce)$ kristali de kullanıldı. Bu $LaBr_3(Ce)$ kristalleri 2013 yılında gerçekleştirilen deneyde PARİS dedektör kümesinin prototipinin test edildiği deneyde de kullanıldığı için bu deneyden elde edilecek verilerin analizleri için bir referans olarak kullanılması da sağlanmış oldu. Böylece daha önce gerçekleştirilen test deneylerden elde edilen bilgilerin bu türden deneylerin tasarımında kullanılmasına da katkıda bulunmuştur.

Nisan 2016'da gerçekleştirdiğimiz bu deney düzeneği ile 2013 yılında yapılan deney düzeneği ile kıyaslandığında; 2013 yılında gerçekleştirilen deneyden elde edilen geri bildirimler sayesinde yeni deney düzeneği için aşağıda listelenen iyileştirmeler gerçekleştirilmiştir:

1) LICORNE'de daha önce kullanılan polipropilen hedef (istenmeyen nötron arka planını bastırmak ve akı-sinyal gürültü oranını iyileştirmek için) yeni geliştirilen gaz hücreleri ile değiştirilerek kullanıldı.
2) $^{11}B$ akımının, çevrimiçi nötron akısı ölçümü ile çevrimiçi ölçümü nötron ışını-enerji çözünürlüğü, akısının gerçek zamanlı gözlenmesine olanak sağlandı.
3) İyonizasyon haznesi, bütün nötron konileri kullanılarak hedef üzerinde olabildiğince büyük bir akı elde etmek için nötron kaynağına olabildiğince yakın tutuldu.
4) "saf" $LaBr_3(Ce)$ dedektörlerinden elde edilen enerji çözünürlüğü ile daha yüksek gama verimine sahip PARIS dedektör kümesi sayesinde daha iyi düzeyde elde edildi.
5) FASTER elektronik veri kaydetme sistemi yardımıyla (http://faster.in2p3.fr) zamanlama çözünürlüğü ileri düzeyde iyileştirildi. Böylece hızlı eş zamanlı veri alımı imkânı elde edildi.

### 4.4 Haziran 2016'da gerçekleştirilen deney

2016 Haziran ayında Fransa, Orsay Nükleer Araştırma merkezi, IPN-ALTO imkânları kullanılarak aşağıda listelenen temel fizik problemlerinin araştırılması amaçlanmıştır.

1- füzyon-fizyon ve yarı fizyon arasındaki rekabet
2- füzyon buharlaşma ve füzyon-fizyon arasındaki rekabet
3- Jakobi şekli nükleer geçişler
4- Nötron zengin çekirdeklerde sıcak dev dipol momentlerinin yapısı

Araştırılması amaçlanan bu fizik gözlenebilirlerinin aynı anda gözlenebilmesi ve ölçülebilmesi için özellikle çok hızlı gerçekleşen fizyon, buharlaşma ürünleri, belirgin dev dipol rezonans gama-ışınları için iyi bir algılama sistemine ihtiyaç duyulmaktadır.

Algılama sistemi içerisinde kullanılan PARIS dedektörleri dev dipol rezonanslarıyla oluşan yüksek spin seviyelerinden yayınlanan gama-ışınlarını ölçmek üzere kullanılmakla birlikte aynı zamanda hem deney sırasındaki gözlenebilirler içerisindeki tüm gama-ışınlarını algılamak hem de gama ışınlarının istenilen ölçütlerde grup halinde algılanmasını sağlayacak şekilde kullanılması sağlandı.

Deney sırasında oluşan dev dipol rezonanslardan kaynaklanan gama-ışınlarını ölçmek için PARIS dedektör kümeleri kullanıldı. ORGAM (the ORsay GAMma array) dedektörleri ise PARIS dedektör kümesinden elde edilen bilgilere ek olarak belirlenen reaksiyon kanalı ürünlerinin gama-ışınlarını algılamak için kullanıldı. İki kollu uçuş-zamanı spektrometresi olan CORSET (Rusya, Dubna nükleer araştırma merkezi, Flerov Laboratuvarında geliştirilen uçuş zamanı ölçümü yapan spektormetre) ise reaksiyon sonucunda oluşan birincil ürünlerin kütle dağılım çözünürlüğü için kullanıldı. Reaksiyon sonunda üretilen ürün kütlelerinin reaksiyon sürecindeki dinamik yapılarını ortaya çıkarmak için PARIS dedektör kümeleri ve ORGAM'ın birlikte kullanılmasıyla deney sırasında oluşan gama-ışını bilgilerinin temin edilmesi sağlandı.

Gerçekleştirilen bu deneyde PARIS dedektör kümesi, ORGAM ve CORSET ile birlikte kullanılarak ürün çekirdeklerin kabuk yapılarını karakterize eden ve aslında sadece iki cisim problemi kinematiği metodu kullanılarak elde edilebilen ve birbiriyle rekabet halinde olan füzyon-fizyon ve yarı fizyon olayları hakkında önemli bilgilerin elde edilmesi amaçlanmıştır. Bu bilgilerin elde edilmesi için farklı özellikteki spektrometreler bu deneyde ilk kez hep birlikte kullanıldı.

PARIS dedektör kümesi+ORGAM+CORSET algılayıcıların Fransa, Orsay nükleer araştırma merkezinde birlikte kullanımı sayesinde yukarıda sıralanan fiziksel araştırmaları gerçekleştirme ve istenen ölçümleri gerçekleştirebilmek için $^{32}S+^{192}Os$ reaksiyonu kullanıldı. Bu reaksiyon için Coulomb bariyeri değerine yakın 154 MeV enerjili $^{32}S$ bombardıman parçacıkları $^{192}Os$ hedef üzerine gönderildi. Bu deney sırasında oluşan ilk ürünler ile aynı andan oluşan gama-ışınlarının yukarıda bahsedilen ve deney sırasında kullanılan algılayıcılar yardımıyla ölçülmesi sağlandı. Bu yöntem (üç spektroskobik aygıtın birlikte kullanımı) bu ana kadar yukarıda sıralanan hedefler doğrultusunda gerçekleştirilen ilk deney olma özelliğine de sahiptir.

Üç spekrometrenin birlikte kullanılmasıyla gerçekleştirilen bu deney sayesinde bombardıman parçacıklarının hedefle buluşma ve reaksiyon oluşturma anını ve dedektörlerin performanslarını aynı anda kontrol edebilme özelliği ile de ilk kez gerçekleştirilen bir çalışmadır. Deney düzeneği ile ilgili detaylı bilgi ve bu deneyin sağlamış olduğu yararlar ve bu deneyden beklenen hedefler aşağıda sırasıyla şu şekilde özetlenebilir;

1- Gerçekleştirilen deney baz alınarak (bu deneyden ele edilecek bilgiler ışığında) ilerleyen zamanlarda gerçekleştirilmesi planlanan benzeri deneyler için bir optimizasyon imkânı elde edebilme ve kullanılan spektrometrelerin verimliliğini ortaya koyabilme imkânı elde edildi.
2- ORGAM, PARIS ve CORSET spektrometreleri arasında eşzamanlı ölçümleri ilk kez gerçekleştirebilme imkânı bu deney aracılığı ile test edildi ve eş zamanlı veri kaydının nasıl gerçekleştirileceği bu deney yardımıyla araştırıldı.
3- Dev dipol rezonanslardan kaynaklanan gama-ışınlarının ölçülmesi bu deney bünyesinde kullanılan farklı spektrometreler yardımıyla sağlandı.
4- Fizyon ürünlerine benzer reaksiyon ürünlerinin kütle dağılımının oluşturulması bu deneyden elde edilen verilerin analizleriyle ilk kez ortaya çıkarıldı.

Yukarıda sıralanan amaçlar doğrultusunda dizayn edilen bu deneyle farklı spektrometrelerin kullanıldığı bu deney düzeneği bir referans olarak kabul edebilirse; bu deney yardımıyla reaksiyon oranının tespiti, gözlenebilen tüm gama radyasyonlarının kullanılan spektrometreler tarafından algılanması sayesinde bu spektrometrelerin verimliliğinin belirlenebilmesine imkân sağladı. Böylece ileride gerçekleştirilecek benzer deneyler için bir veri bankası oluşturdu.

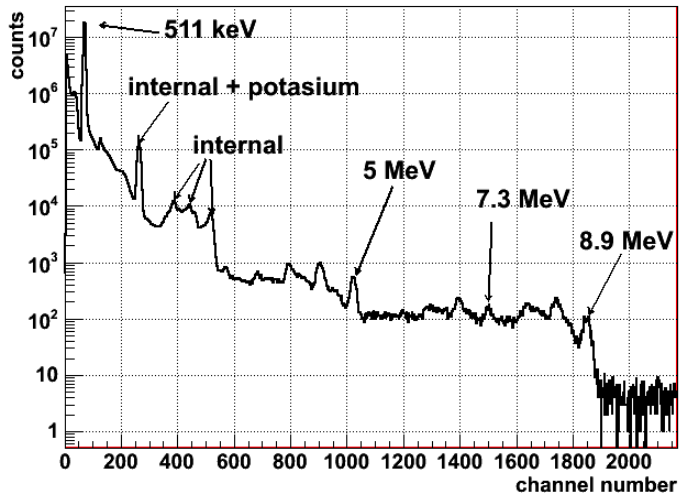
Amaçlanan tüm teknik ve fizik araştırmalarını gerçekleştirebilmek için kullanılan reaksiyon ve kullanılan sistemin özellikleri hakkındaki detaylar aşağıdaki şekilde sıralanabilir:

1- Deneyde, 250μg/cm$^2$ kalınlıkta $^{192}$Os çekirdeği hedef olarak kullanıldı.
2- Tandem hızlandırıcı ile 154 MeV enerjili bombardıman parçacığı olarak $^{32}$S 29x10$^{10}$ pps (saniyedeki parçacık sayısı) kullanıldı.
3- PARIS küme dedektörü, CORSET ve ORGAM ile birlikte spektroskopik ve eş zamanlı ölçümler yapabilecek şekilde tetikleme şartları belirlenerek ilk kez birlikte bu deneyde kullanılarak deneysel veriler kaydedildi.
4- Deney 3 tam günlük zaman diliminde 9 vardiya, her gün 3 vardiya üzerinden nöbetleşerek her gün 24 saat üzerinden bombardıman parçacıklarının hedef üzerine düşürülerek istenen reaksiyonun gerçekleşmesi ve deney sırasındaki verilerin kaydı her an kontrol edilerek gerçekleştirildi.

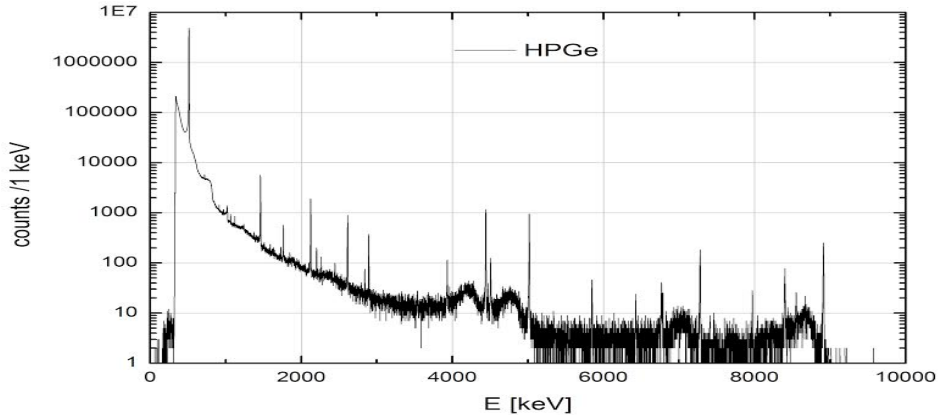
Gerçekleştirilen bu deneysel çalışmalardan elde edilen verilerin analizleri tamamlanmak üzere olup bilimsel yayınlara dönüştürüldüğünde proje çıktısı olarak sunulacaktır.

PARIS dedektör kümesinin ilk prototipinin Orsay ve ELBE nükleer araştırma merkezleri kullanılarak gerçekleştirildiği deneylerden elde edilen fiziksel sonuçlar yayınlanmak üzere hazır hale getirildi fakat PARIS dedektör kümesinin prototipinin performansı ile alakalı ilk yayın olması dolayısı ile ve PARIS Projesi mutabakat metni gereği bu sonuçların tamamının SCI kapsamındaki saygın bir dergide yayınlanmasından önce hiçbir proje ortağının bu sonuçların tamamını kullanması mümkün olmadığı için. PARIS dedektör kümesinin performansını ortaya koyan ilk ön sonuçlarından bazılarını bu sonuç raporunda paylaşarak bu konuda ne kadar mesafe alındığını göstermek faydalı olacaktır.

Aşağıda (Şekil 55) 15 MeV enerjili Bremstrahlung gama enerjili gama ışınlarının $^{11}$B hedefini bombardımanı sonucu elde edilen gama enerji spektrumunu göstermektedir. PARIS dedektör kümesinin 10 MeV'e kadarlık performansını ortaya koyan bu spektrum hedef çekirdeğin belirgin çizgilerinin gözlenmesine olanak sağlamış ve üzerinde ölçüm yapacak çözünürlükte spektrumlar elde edilmiştir (PARIS dedektör kümesindeki tek bir fosfor sandviç dedektöründen elde edilen spektrum). Şekil 56'da ise Saf Germanyum dedektörü tarafından elde edilen enerji spektrumu gösterilmektedir.



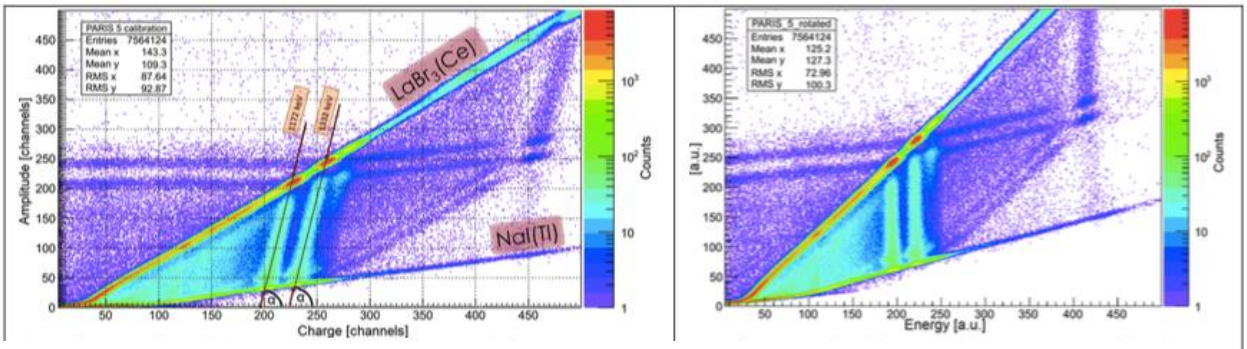

Şekil 55. 15 MeV enerjili Bremstrahlung gama enerjili gama ışınlarının $^{11}B$ hedefini bombardımanı sonucu elde edilen gama spektrumunu spektrumu




Şekil 56. Saf Germanyum dedektörü ile elde edilen enerji spektrumu

PARIS dedektör kümesinin performansını araştıran deney düzeneğindeki saf Germanyum dedektörü ile elde edilen enerji spektrumu iki farklı dedektörün performansının ve verimliliğinin mukayesesi için üretilmiştir.

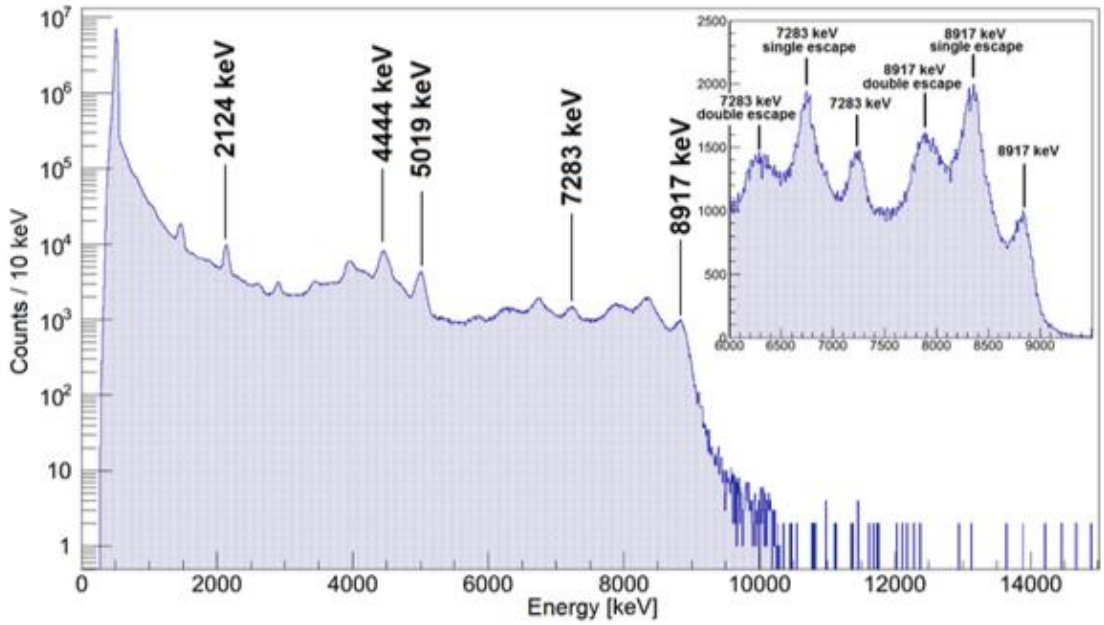
Aşağıda verilen Şekil 57'de ise Radyoaktif kaynak kullanılarak dedektörün algıladığı tüm yükün kristal tarafından tamamının absorbe edilmesi ve dedektörün kaynakla arasında belli bir açı ile konumlandırılması durumunda algılanan yükünün bir kısmının kristal tarafından absorbe edildiği karşılaştırılmış ve bu karşılaştırmada, algılanan yükün yük miktarına karşı çizilen matris grafiği üzerinde gösterilmiştir. Şeklin sol kısmında burada ifade edilen mukayese gösterilirken şeklin sağında dönen yükün yük miktarına karşı matris grafiği gösterilmiştir.




Şekil 57. Dedektörün algıladığı tüm yükün kristal tarafından tamamının absorbe edilmesi ve dedektörün kaynakla arasında belli bir açı ile konumlandırılması durumunda algılanan yükünün bir kısmının kristal tarafından absorbe edildiği karşılaştırılmış ve bu karşılaştırma yükün yük miktarına karşı çizilen matris grafiği üzerinde gösterilmiştir. Şeklin sol kısmında burada ifade edilen mukayese gösterilirken şeklin sağında dönen yükün yük miktarına karşı matris grafiği gösterilmiştir.

Aşağıda gösterilen Şekil 58, PARIS dedektör kümesinde kullanılan fosfor sandviçlerin her birinden elde edilen bilginin diğer fosfor sandviçten elde edilen bilgi ile birleştirilmesi yani eklemeli süreci örneklemek amacıyla üretilmiş enerji spektrumunu ifade etmektedir

.




Şekil 58. PARIS dedektör kümesinde kullanılan fosfor sandviçlerin her birinden elde edilen bilginin diğer fosfor sandviçten elde edilen bilgi ile birleştirilmesi yani eklemeli durumda elde edilen enerji spektrumu

### 4.5 Kasım 2016'da gerçekleştirilen deneysel çalışma:

Bu deneyde LICORNE nötron kaynağı tarafından üretilen hızlı nötronlar yardımı ile indüklenecek $^{239}$Pu(n,f) reaksiyonu sonucu açığa çıkacak gama tayfının, ortalama enerjisinin ve gama çok katlılığın ölçülmesi amaçlanmaktadır. Ek olarak, gama tayfının ayrışma ürünlerinin kütle asimetrisinin bir fonksiyonu üzerine bilgi elde edilmesi beklenmektedir.

Ayrışma reaksiyonlarında anlık gama ışınlarından gelen bilgi, reaktörde meydana gelen gama ısınması açısından önemlidir ve doğrudan reaktör güvenliği ile bağlantılıdır. Fakat $^{239}$Pu izotopu 4. nesil hızlı reaktör konsepti için anahtar rol oynasa da, $^{239}$Pu'un hızlı nötronlar tarafından indüklenmesi sonucu meydana gelen ayrışması hakkında deneysel bilgi yoktur. Dahası, bu deneyin sonuçları temel fizik açısından da önemlidir.

Bulunan sonuçların doğrudan nükleer ayrışma sürecini anlamaya çalışan teorik çalışmalar için yararlı olacağı düşünülmektedir. Nükleer ayrışma reaksiyonlarını anlamak için yakın zamanda oldukça güçlü teorik modeller ortaya konmuştur ve ayrışma sırasındaki anlık gamalar oldukça önemli bir hale gelmiştir. Ortalama enerji ve gama çok katlılık, ayrışma sonucu oluşan ürün çekirdeklerin toplam enerjisini ve açısal momentumu nasıl paylaştıkları hakkında bilgi verecektir.

Reaktör korundaki sıcaklık hesaplamalarını yapmak oldukça zor bir iştir, çünkü korda oldukça farklı reaksiyonlar meydana gelmektedir ve oluşan sıcaklığın aktarımı ve dışarıya atılması oldukça karmaşık süreçler içerir. Reaktörlerde üretilen gücün büyük yoğunluğu nötronlarca indüklenmiş ayrışma reaksiyonlarından üretilmektedir ve ayrışmanın meydana geldiği ve ayrışma ürünlerinin kinetik enerjilerini hızlıca kaybettikleri yerlerde depolanmaktadır. Ayrıca reaksiyon sonucu oluşan enerjinin 10%'u gama ışınları ile salınmaktadır ve bu gamalar başlangıç reaksiyon odasından santimetrelerce uzak mesafeye kat edebilmektedir. Reaktör çalışırken Kor içindeki gama ısınma süreci ayrışma reaksiyonu ürünü olmayan her bir bileşeni (yapı maddeleri, çekirdek zırhları, reaktör cihazları) üzerinde etki bırakmaktadır. Reaktör kapatıldığı zaman, gama ısınma süreci çekirdekte yer alan tüm materyaller için enerji depolamaya neden olur ve bu da doğrudan reaktör güvenliği ile ilgilidir.

Günümüzde, reaktör çekirdeğinde meydana gelen gama ısınması bilindik modellerde deneysel verilerle kıyaslandığında 30% derecesine kadar doğru sonuçlar vermektedir (Rimpault, 2005). Bunun nedeni temel olarak yeterli olmayan deneysel veriden (Verbinski ve arkd. 1973, Pelle ve arkd., 1971, TE, 1999) ve muhtemelen modellemedeki eksikliklerden kaynaklanmaktadır. Beta bozunumu, esnek olmayan saçılmadan ve nötron yakalama reaksiyonlarından kaynaklanan gama bozunumları oldukça iyi anlaşılmıştır. Fakat bu

enerjinin 40%'ı anlık gama ışınlarından kaynaklanmaktadır ve NEA/OECD de yer alan veriler ve ölçümler bu durumu geliştirmek için önemli bir potansiyele sahiptir. Nükleer ayrışma reaksiyonlarını anlamak için yakın zamanda oldukça güçlü teorik modeller ortaya konmuştur ve ayrışma sırasındaki anlık gamalar oldukça önemli bir hale gelmiştir. Bu teorilerin hangileri olduğu 2016 Nisan döneminde gerçekleştirilen deneysel bilgilerin verildiği kısımda detaylı olarak verilmiştir. Bununla birlikte, deneysel veriler ile teorik hesaplamaların bir araya getirilmesi ve uyuşması için deneysel veri gerekmektedir. Özellikle de hızlı nötronlarla indüklenmiş ayrışma reaksiyonlarında yayınlanan anlık gama ışınları hakkında deneysel veriye ihtiyaç vardır.

Fakat bu eksiklik gelişen teknoloji ile birlikte ışıldayıcı $LaBr_3(Ce)$ gibi maddeler ile yapılan yüksek verime, enerji çözünürlüğüne ve zamanlama özelliklerine sahip algılayıcıların ve LICORNE gibi nötron kaynaklarının üretilmesi ile nükleer veri elde etmek mümkün hale gelmiştir. Ayrışma reaksiyonlarından oluşan anlık gama ışınlarının ölçülmesindeki önemli mevzu nötron gama ayrımı yapabilme becerisidir. Çünkü anlık ayrışma gamalarına ayrışma sonucunda oluşan nötronlarda eşlik etmektedir ve bunları birbirinden ayırt etmek oldukça zordur. $LaBr_3(Ce)$ algılayıcıları nano saniye altındaki zaman çözünürlüğü ile küçük hacimlerde uçuş zamanı ayrımı yapılabilmektedir. Ayrışma anlık gamalarının tayf şeklinin, ortalama enerjisinin ve çok katlılığının doğru bir şekilde ölçülmesi ışıldayıcı algıçlar yardımı ile (n,n') ve (n, gama) reaksiyonları ile yapılabilir hale gelmiştir. Ek olarak, yayımlanan nötronların enerjileri ve çok katlılıkları prensipte uçuş zamanı ile belirlenebilmektedir, böylece nötron ve gama bozunumları arasındaki yarışı anlamak için önem arz etmektedir.

Bu deneyde LICORNE nötron kaynağı tarafından üretilen 1.5 MeV'lik hızlı nötronlar yardımı ile indüklenecek $^{239}Pu(n,f)$ reaksiyonu sonucu açığa çıkacak gama tayfının, ortalama enerjinin ve gama çok katlılığın ölçülmesi amaçlanmaktadır. Ek olarak, gama tayfının ayrışma ürünlerinin kütle asimetrisine göre fonksiyonu üzerine bilgi elde edilmesi de beklenmektedir. Bu deneyde kullanılacak enerjiler 4. Nesil hızlı reaktörler için tipiktir ve önerilen deney OECD/NEA'nın öncelikli listesinde en üst sıralarda yer almaktadır, çünkü $^{239}Pu$ izotopunun 4. nesil hızlı raktör konsepti için anahtar rol oynamaktadır.

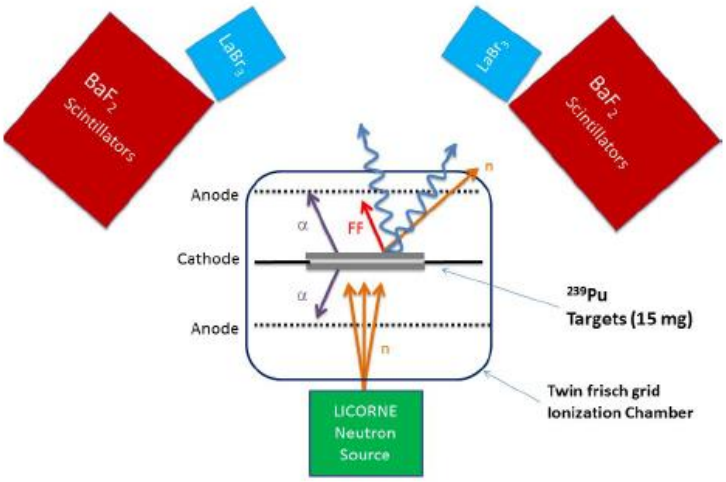
Burada önerilen deney LICORNE nötron kaynağının dizayn aşamasında kullanılan deneysel programın devamı niteliğindedir. Buradaki özellik IPN Orsay tandem ivmelendiricisi ile $p(^7Li,^7Be)n$ reaksiyonundan çıkacak nötronları üretecek $^7Li$ demetini üretecek olmasıdır. 0.5 ve 4 MeV arasında enerjiye sahip nötronlar üretilecektir ve 25 derecelik bir koni içerisine doğru odaklanacaktır.

LICORNE yönsel nötron kaynağı ile bu deneyler mümkün hale gelebilmiştir. Çünkü bu kaynaklar sayesinde gama algılayıcıları kaynaktan gelen nötronlar tarafından kör hale getirilmiyorlar. Bu durumlarda gama algılayıcıları nötronlardan korunmak için oldukça yüksek zırhlamalara sahip olmak orundadır ve bu çok uygulanabilir bir şey değildir.

Ek olarak, LICORNE klasik nötron kaynaklarına göre nötron saçılması ve arka fon radyasyonunu 100 kata kadar daha az hale gelmiştir. Geleneksel kaynaklarda nötronların çoğu hedefe varamıyor ve deneysel odanın duvarlarından saçılıyor ve odadan kaynaklanan arka fon radyasyonuna katkıda bulunuyor.

### 4.5.1 Deneysel Düzenek:

Şekil 59, önerilen deneyin şematik bir diyagramını göstermektedir. IPN Orsay tandem hızlandırıcısı 15 MeV'lik $^{7}$Li demetini sürekli olarak döner 20 um kalınlığındaki LICORNE polypropylene (PP) hedef üzerine gönderecek ve ileri yönde odaklanmış 1.5 MeV'lik nötronlar üretilecektir.




Şekil 59. önerilen deneyin şematik bir diyagramını göstermektedir. $^{239}$Pu hedef iyonizasyon odası içerine yerleştirilmiştir. Oda nötron kaynağından 10cm uzaklıkta P10 sayım gazı ile doludur. 4 adet BaF2 ve $LaBr_3$(Ce) kümesi uçuş zamanı ile anlık gama ve nötron ayrımı için hedef bölgesinden 30 cm uzağa yerleştirilmiştir.

İkiz Frisch iyonizasyon ızgarası $^{239}$Pu hedeflerine ev sahipliği yapmaktadır ve nötron kaynağından 10 cm öteye konularak, demet doğrultusuna sıfır derecede yer alıp 0.4 birimlik açıyı kapsayacaktır. [$^{239}$Pu materyali Belçika'da bulunan IRMM'dan ihraç edildi ve IPN Orsay radyoaktive hedef tesisi CACAO'da hedef üretildi]

LICORNE kullanılarak gerçekleştirilen deneylerden elde ile elde edilen deneyimlerden maksimum nötron akısının $10^7$ nötron/saniye mümkün olabilmesi ancak ve ancak her bir kaç saatte polypropylene (PP) hedefin değiştirilmesi ile sağlanmaktadır, çünkü $CH_2$ polimer oldukça çabuk radyasyon hasarına maruz kalmaktadır.

Nükleer ayrışma anlık gama ışınları için kullanılan iki adet altıgen dedektör 14 tane $BaF_2$ kristallerden oluşmaktadır ve her kristal 14 cm uzunluğundan 10 cm çapında ve toplamda 62 kg bir kütleye sahiptir. Bu algıçlar 10 MeV'e kadar yüksek enerjili gamaları tespit edebilmek için kullanılmaktadır, çünkü bu kümeler oldukça verimli ve pik-toplam oranına sahiptir. Yüksek enerjili gamalar uygulama alanı açısından oldukça önemlidir. $BaF_2$ algılayıcı hedef materyalden 30 cm uzağa yerleştirilerek anlık ayrışma gamaları ve nötronların uçuş zamanı farkı ile birbirinden ayırt edilebilmesi sağlandı. Ek olarak, 10 adet $LaBr_3$(Ce) 5 cm uzunluğundan ve 5 cm yarıçapa sahip silindirik kristaller kullanıldı. Bu algılayıcılar $BaF_2$'den daha fazla enerji verimine sahiptir ve 4 MeV'den daha düşük enerjili yapıları detaylandırmak için kullanıldı.

Eğer düzeneğin zaman çözünürlüğü hedef algılayıcı arası uzaklığı 35 cm'den 20-25 cm'ye kadar azaltabilirse, $BaF_2$ için toplam gama ışınları algılama verimi yaklaşık 7% dolaylarından olacaktır (yüksek enerji kısmı) ve muhtemelen bu değer $LaBr_3$(Ce) için 2% kadar olacaktır. Gama çok katlılığı 8 civarında beklenmektedir ve bu zamanda 10 tane ayrışma fragment gama ışınını çakışıklığı sağlamaktadır. Bu da 200 saatlik deney boyunca 106'dan fazla toplam çakışıklık sağladı. Bu reaksiyon istatistiklerinden yeterli sayıda histogram üretildi.

Burada gerçekleştirilen deney düzeneği 2013'te $^{235}U$ ve $^{238}U$'un hızlı nötronlarla indüklenmiş ayrışma deneylerinden LICORNE deneyinden beri zaman içerisinde gelişerek değişmiştir. İlk deneyden elde ettiğimiz ve bize yardımcı olan geri dönütler aşağıda sıralanmıştır:

1) Birçok polypropylene (PP) hedefi hazırlanmıştır. Yüksek nötron akısından deneyi devam ettirebilmek için değişim için birden fazla hedef kullanılması gerekmektedir.
2) Zor deneysel koşullara rağmen optimum hedef kalınlığına ulaşıldı.
3) $^7$Li çevrimiçi ölçümlerine nötronların da çevrimiçi ölçümleri eklenmiştir.
4) İyonlaşma odası nötron kaynağına daha yakın bir yere konmuştur ve böylece daha yüksek nötron akısı sağlanmıştır.
5) $LaBr_3$(Ce) ile gama algılama verimi iki katına çıkarılmıştır.
6) $LaBr_3$(Ce)'nin zaman çözünürlüğü ile hedef algıç uzaklığı 20-25 cm mertebesine düşmüştür.

Bu deney düzeneğinde kullanılan $BaF_2$ sintilatörlerinin performansı ile PARIS küme dedektörlerin benzer deneylerde kullanılması durumunda karşılaştırması yapıldı.

### 4.6 Nisan 2017'de yapılması planlanan deneysel çalışma:

Uluslararası ortaklı PARIS projesinde kullanılan $LaBr_3$(Ce)+NaI(Tl) fosfor sandviç dedektörlerini üreten Saint Gobain firmasının bu tür fosfor sandviç dedektörlerini üretim aşamasında bazı sorunlar yaşaması ve bu tür fosfor sandviç dedektör üretim fiyatlarının artması projenin gelecekte kullanacağı PARIS dedektör kümesinin meydana getirilmesinde problem oluşturmaya başlamıştır.

Bu problem dikkate alınarak, PARIS projesi İzleme Komitesi 2016 yılı sonunda bir toplantı gerçekleştirerek bir dizi kararları tutanak altına almıştır. Bu toplantı tutanağı ve kararlarını içeren "Minutes of the PARIS Steering Committee meeting" metin (Ek-Proje İzleme Komitesi Tutanağı) ekte sunulmuştur. Bu metin incelendiğinde, anlaşılacağı üzere fosfor sandviç dedektörde $LaBr_3$(Ce) yerine $CeBr_3$ sintilatör malzemesinin alternatif olarak kullanılması ve ileride oluşturulacak PARIS dedektör kümelerinde $CeBr_3$+NaI(Tl) şeklinde yeni fosfor sandviç dedektörlerin kullanımı ihtimalinin oluşması nedeniyle Scionix firmasından $CeBr_3$+NaI(Tl) fosfor sadnviç dedektörlerin alımına karar verildi. PARIS projesinin izleme komitesinin bir üyesi olarak alınan bu karar aşamasında ben de bu karar doğrultusunda olumlu görüşlerimi belirttim.

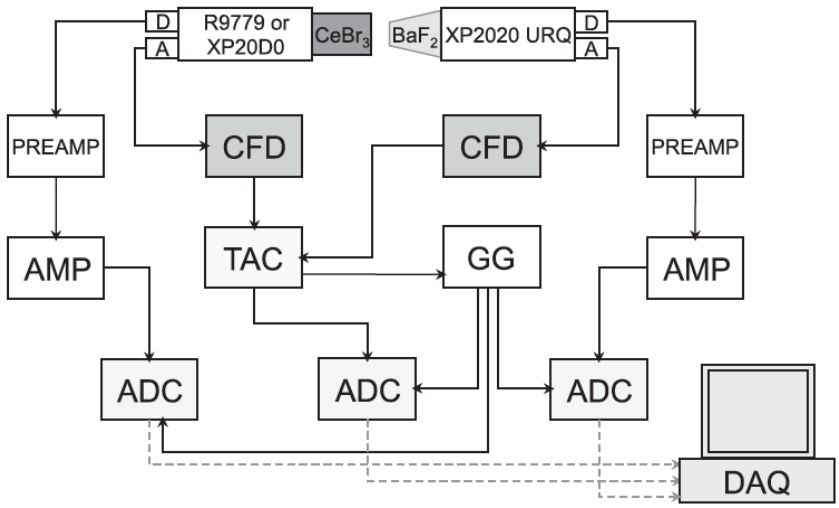
Bu toplantıda maliyet açısından mevcut $LaBr_3$ (Ce)+NaI(Tl) fosfor sandviç dedektöründen %40 daha ucuz olan $CeBr_3$NaI(Tl) fosfor sandviç dedektörü alımına karar verildi. Alınacak yeni $CeBr_3$+NaI(Tl) fosfor sandviç dedektörünün lineerlik, verimlilik, enerji çözünürlüğü ve zaman yanıtlarının ortaya konulması gerekliliği doğmuştur.

Bu amaç doğrultusunda Macaristan Debrecen, ATOMKI nükleer araştırma merkezinde 3-10 Nisan 2017 tarihleri arasında CeBr3+NaI(Tl) fosfor sandviç dedektörleri kullanılarak bazı test deneylerin gerçekleştirilmesi planlandı. Fakat deneyin gerçekleştirileceği Macaristan, Debrecen şehrindeki ATOMKİ araştırma merkezinde kullanılacak olan hızlandırıcı sistemde meydana gelen sorunlar nedeniyle bu çalışma planı gerçekleştirilemedi ve daha sonraki bir tarihe ertelendi.

Uluslararası ortaklı PARIS Projesinde yeni bir sintilatör malzeme CeBr3+NaI(Tl) kullanımı potansiyelinin doğması nedeniyle bu sintilatör malzeme üzerinde gerçekleştirilen literatür çalışmasında $CeBr_3$ sintilatör dedektörünün tek başına kullanımı durumunda bu dedektörün lineerlik, verimlilik, enerji çözünürlüğü ve zaman yanıtlarının neler olduğunu ortaya koyan çalışmalar incelendiğinde aşağıdaki kısımda yer alan bilgilere ulaşıldı.

### 4.6.1 $CeBr_3$ Sintilatör dedektörü üzerine yapılan çalışmalar:

$CeBr_3$ dedektörünün zaman çözünürlüğü ölçümleri $^{60}Co$ ve $^{22}Na$ gama-kaynakları kullanılarak gerçekleştirildi (Fraile v.d. 2013). Dedektörler kaynak aralarında yaklaşık 7 mm aralıkla konumlandırıldı. Her iki dedektör de Şekil 60'da şematik olarak gösterildiği gibi standart NIM ön uç elektroniklerine bağlanmıştır. Çıkış sinyalleri bir ORTEC 567 TAC'ye bağlanmıştır. Dedektör darbeleri arasındaki zaman farkını yansıtan TAC genlik sinyali bir ADC'ye gönderildi. Her iki dedektörden gelen dynode çıktıları enerji sinyalleriyle donatılmıştır. Her sinyal, bir ADC'ye gönderilmeden önce bir ORTEC 113 ön amplifikatörü ve Tennelec TC247 spektroskopik amplifikatörü tarafından işlendi. Her geçerli TAC olayı için üretilen bir mantık sinyali, ADC'leri açmak için kapı sinyali sağlamak için Kapı ve Gecikme Jeneratörüne (GG) gönderildi (bkz. Şekil 60).

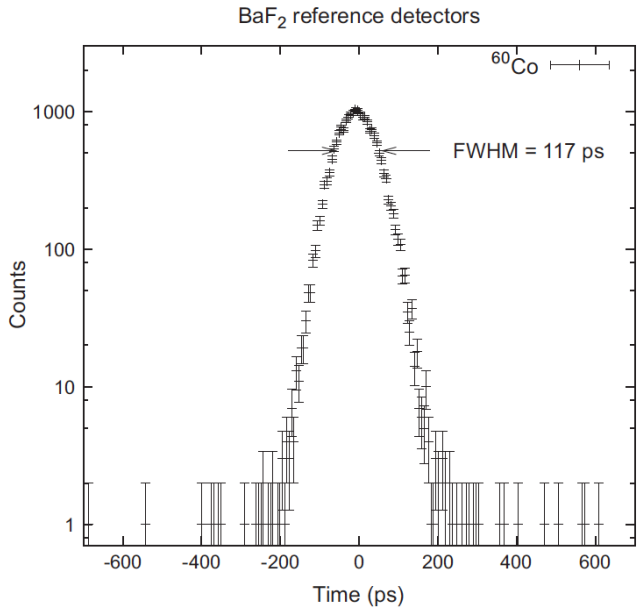



Şekil 60. $CeBr_3$ kristalinin aşırı hızlı referans $BaF_2$ dedektörüne karşı zaman yanıtını ölçmek için kullanılan zaman gecikmeli kurulumun şematiği.

Hızlı tepki veren bir referans γ-dedektörü olarak küçük konik yapıda olan bir koni $BaF_2$ kristali kullanıldı. $BaF_2$, hala küçük, yaklaşık 1-2 cm3 kristaller için $^{60}Co$ enerjilerle 80 ps FWHM'lik zaman çözünürlüğüne sahiptir. Referans dedektörün zaman tepkisini belirlemek için, XP2020-URQ foto çoğaltıcılara bağlanmış iki aynı $BaF_2$ kristalinden oluşan bir sistem kurulmuştur. TAC ve ADC elektroniğinin çözünürlük değeri 16 ps olarak ölçülmüştür.

İki özdeş $BaF_2$ dedektörü seti için $^{60}Co$ enerjisindeki Yarı Maksimum Tam Genişlik (FWHM) toplamı Şekil 61'de gösterildiği gibi 117 ± 2 ps olarak bulunmuştur. $^{22}Na$'lık bir kaynaktaki 511 keV fotonları durumunda, her dedektör için yanıt 125 ± 2 ps olarak belirlenmiştir. Bu değerler

ölçümlerimizde $CeBr_3$'ün bilinmeyen zaman çözünürlüğünü hesaplamak için kullanılmıştır. Referans dedektörünün, $CeBr_3$ için bildirilen değerlerimizden çok daha kısa bir zaman çözünürlüğü olduğu dikkat alınmalıdır.




Şekil 61. $^{60}Co$ için zaman spektrumu, bir çift referans $BaF_2$ dedektöründe tespit edilen γ-ışınlarının tam tepe noktasını seçerek üretilir. Saat kalibrasyonu kanal başına 6,0 ps'dir.

SEW840 seri numaralı $CeBr_3$ kristali Scionix tarafından üretilen dedektörün boyutlar, çapı 1 inç ve yüksekliği 1 inç olan silindirik kristal reflektör malzemeyle çevrelenmiş ve fabrikada alüminyum bir kutu içerisinde kuvartz pencere ile hava geçirmez şekilde kapatılmıştır. Kristal, Viscasil silikon yağı kullanılarak Hamamatsu veya Photonis foto-çoğaltıcı tüplerine optik olarak bağlanmıştır. Scionix'teki ön teste göre, 880 V'de çalıştırılan Hamamatsu R6231 foto-tüp ile birleştirildiğinde $^{137}Cs$ enerjide % 4.2'lik enerji çözünürlüğünü göstermiştir.

XP20D0, Photonis tarafından yaklaşık 74000 foton/MeV yüksek verimle $LaBr_3(Ce)$ kristallerine uyacak şekilde tasarlanmış hızlı yanıt 8-dynot foto-tüp kullanılmıştır. Zaman çözünürlüğünü iyileştirmek için, bu tüpler bir çift anod ile donatılmıştır. XP20D0 tipik bir yükselme süresi 1.6 ns ve 520 ± 30 ps FWHM'lik bir Geçiş Süresi Geçişi (TTS) değerine sahiptir. Bunlar, 12 kademeli XP2020-UR tüpleri için sırasıyla 1.4 ns ve 350 ps'den daha kötü parametrelerdir. Testlerde 2029 ve 2156 seri numaralı iki XP20D0 / B tüpü kullanılmıştır. Bu temel özellikler Tablo 7'de özetlenmiştir.

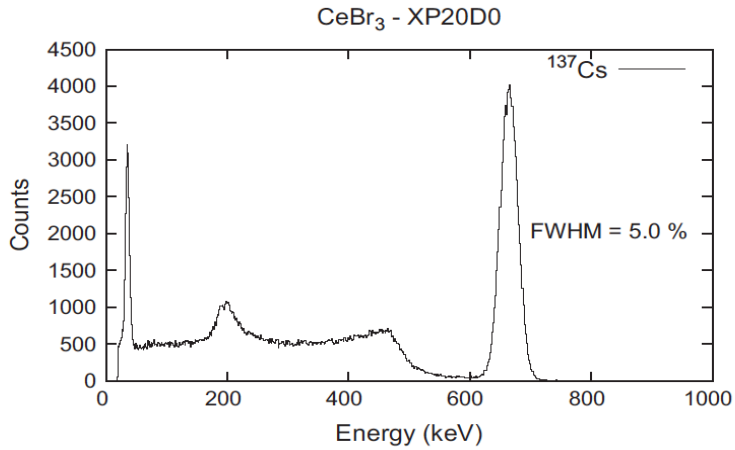
Tablo7. $CeBr_3$ kristali ile birlikte kullanılan foto-çoğaltıcı tüplerin ana özelliklerinin özeti. Hem XP20D0 hem de R9779 PMT'leri 2 girişlidir. Borosilikat cam pencere ile 8 aşamalı doğrusal odaklı fotoçoğaltıcılar. R9779 PMT değeri Corning CS 5-58 mavi filtre için mavi duyarlılık endeksi olarak verilir.

| PMT | s/n | $\tau_{rise}$ (ns) | FWHM TTS(ps) | Blue sensivity($\mu$A/ImF) | Dark current(nA) |
|---|---|---|---|---|---|
| XP20D0 | 2029 | 1.6 | 520$\pm$30 | 12.0 | 2.3 |
| XP20D0 | 2156 | 1.6 | 520$\pm$30 | 11.6 | 1.13 |
| R9779 | FA0472 | 1.8 | 250 | 9.55* | 1.40 |

Hamamatsu R9779 foto-çoğaltıcı, seri numarası FA0472 olan H10570 MOD montajına dahil edildi. Bu 52 mm'lik 8 aşamalı PMT ayrıca $LaBr_3$(Ce) için tasarlandı ve üretici tarafından 1.8 ns'lik tipik bir anot pulse yükselme süresi ve 250 ps FWHM'lik TTS bildirildi. PMT özellikleri de Tablo 7'de özetlenmiştir.

Zaman çözünürlüğü ölçümleri $^{60}$Co ve $^{22}$Na γ kaynakları ile gerçekleştirildi. $^{60}$Co durumunda, her dedektöre kaydedilen 1173 ve 1332 keV'de iki tam enerji pikleri vardır. Böylece, zaman çözünürlüğü, dedektör çiftinde seçilen piklerin olası iki kombinasyonu için ortalama bir değeri temsil eder. İlk aşamada, 1332 keV'de tam enerji piki dedektörlerden birinde ($BaF_2$) seçildi ve rastlantısal 1173 keV piki diğerinde ($CeBr_3$) seçildi. Daha sonra, iki dedektör de enerji geçitleri tersine çevrildi ve ikinci bir zaman spektrumu ($BaF_2$ [1173] -$CeBr_3$ [1332]) oluşturuldu. Her iki zaman spektrumu CFD'de aşırı parametreler ayarlandığı durumlar haricinde genellikle yaklaşık olarak Gauss simetrik bir şekle sahipti, bu durumda zaman spektrumları pikinin bir tarafında küçük bir asimetri göstermektedir. Genel olarak, (1332-1173) ve (1173-1332) zaman spektrumu için FWHM çözünürlükleri, $CeBr_3$ için zaman çözünürlüğünün referans kristallerine göre daha kötü olduğu ve zaman çözünürlüğünün enerjiye bağlı olduğu gerçeğini yansıtan şekilde farklı olduğu belirlendi. $^{22}$Na durumunda, ($BaF_2$ [511] -$CeBr_3$ [511]), 511 keV'da piklerde bulunan enerji olayları kullanıldı.

Hamamatsu ve Photonis foto-çoğaltıcılarına bağlanan $CeBr_3$ kristali için uygulanan yüksek gerilimin bir fonksiyonu olarak enerji doğrusallığı incelendi. Hamamatsu PMT için yüksek gerilim aralığı 1050 ila 1400 V, Photonis tüpü için ise 850 ila 1300 V arasında iken, γ-ışını enerji aralığı 122 ila 1408 keV idi. $CeBr_3$ kristali ile elde edilen $^{137}$Cs kaynağının bir enerji spektrumu için 1200 V (voltajında) çalıştırılan XP20D0 foto-çoğaltıcı kullanıldı. Elde edilen sonuç şekil 62'de gösterilmiştir. FWHM değeri doğrusal olmayanlar için düzeltildi. 662 keV'de ölçülen enerji çözünürlüğü % 5.0'dir. Bu değerler, imalatçı tarafından Scionix'teki teslimat öncesi testten %4.2'den daha yüksektir.

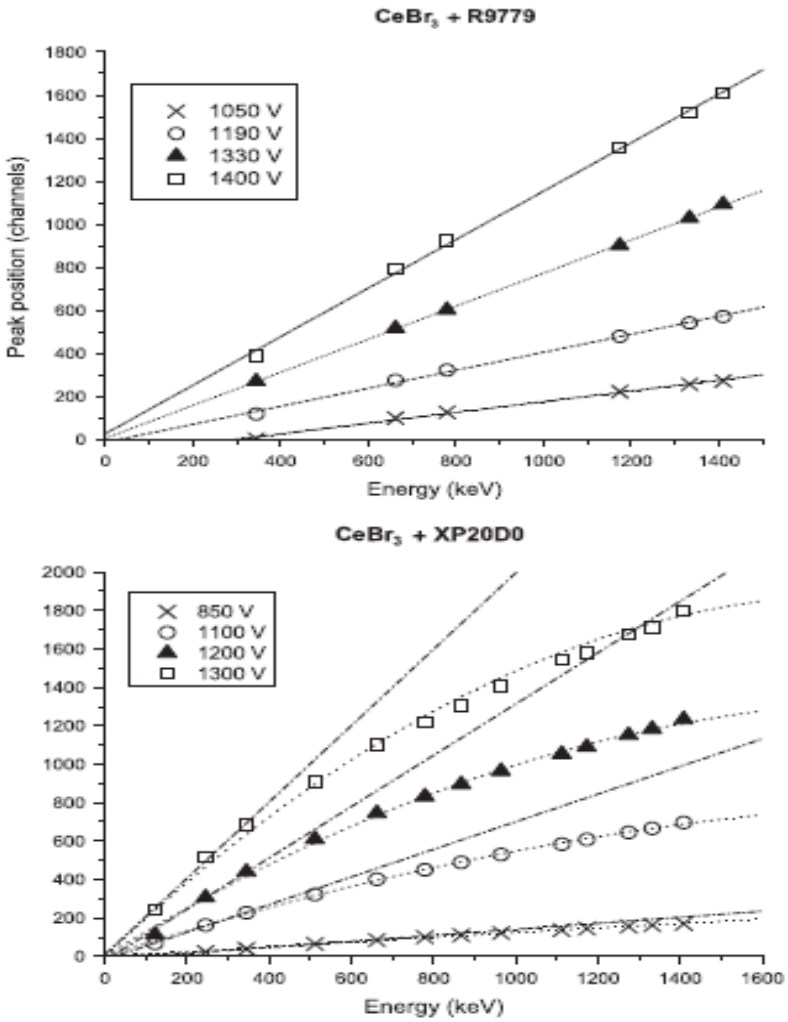



Şekil 62. $^{137}Cs$ kaynağı için Photonis XP20D0 PMT'ye bağlanan $CeBr_3$ için enerji spektrumu HV = 1200 V'da çalışmaktadır. Lineer olmayanlar için FWHM değeri düzeltildi.

$CeBr_3$ kristali ve PMT kombinasyonu için enerji doğrusallığını, foto-çoğaltıcıya uygulanan yüksek voltajın bir fonksiyonu olarak ölçüldü ve Şekil 63'te bunlar gösterildi. $CeBr_3$'ün ışık verimindeki orantısızlığın katkısı azdır. Yukarıda belirtildiği üzere, 122-1275 keV aralığında %4 olarak ölçülmüştür ve bu değer diğer sintilatörlerden daha iyidir.

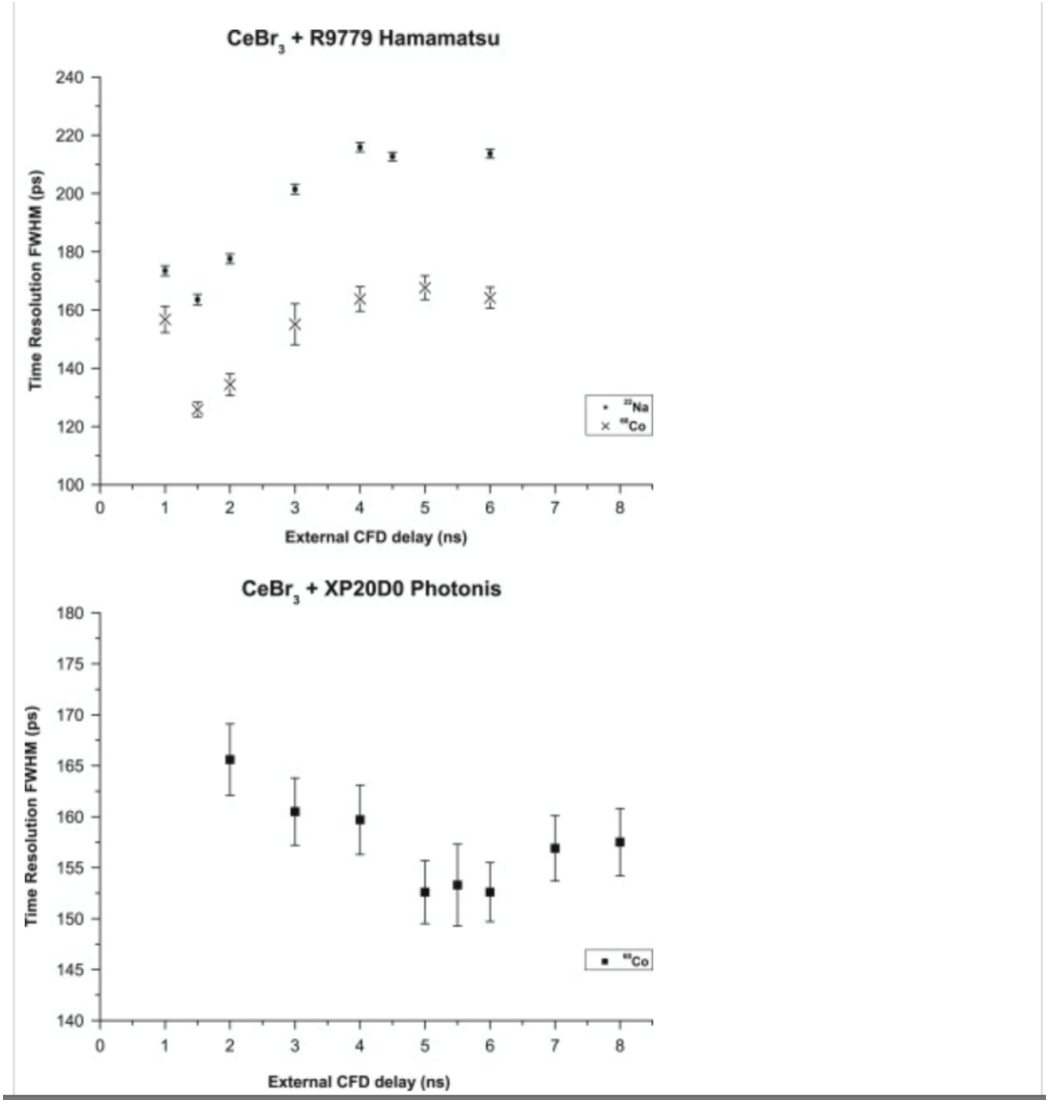
R9779 PMT, tüm enerji aralığı boyunca ve bu testlerde uygulanan tüm yüksek voltajlar için neredeyse doğrusal bir enerji ilişkisi gösterir. En iyi zaman çözünürlüğünün elde edildiği yaklaşık 1150-1350 V gerilim aralığında iyi bir doğrusallık vardır.

XP20D0 PMT'ye bağlanan $CeBr_3$ için 850 ila 1400 V arasındaki yüksek voltaj aralığı için gözlemlenen güçlü bir doğrusl olmayan enerji vardır. Doğrusallık 1200 V'lik çalışma voltajında çok güçlüdür ve uygulanan voltajla birlikte artar. Şekil 63'te XP20D0 arasındaki üç en düşük enerjiyle tanımlanan doğrusal uyumdan ayrılmak suretiyle gösterilmiştir. Ayrıca, 662 keV'de enerji çözünürlüğü sürekli olarak 1200 V'un altında% 5.0 olsa da, yüksek voltaj arttıkça bozulmaktadır. Özellikle, 1800 V'da, $^{60}Co$ için 1173 ve 1332 keV'de tam enerji pik çifti artık çözülemez hale gelmektedir.




Şekil 63. R9779 PMT'ye (yukarıda) ve XP20D0 PMT'ye (aşağıda) bağlı $CeBr_3$ kristali için enerji doğrusallık çizimleri. Dynode sinyaller doğrudan preamplifikatör (ön yükselteç) veya amplifikatör (yükselteç) olmadan birçok kanallı analizöre (MCA) gönderilir. En düşük enerjili sinyaller sıfır olmayan ofset değerleriyle sonuçlandı. Doğrusallık uyumu, deney noktaları ile birlikte gösterilir. R9779 verisi, tam veri aralığı üzerinden doğrusal olarak uyuyor. XP20D0 için uyarlar 400 keV'nin altındaki noktalar için yerine getirildi ve daha sonra daha yüksek enerjilere ekstrapole edildi. Doğrusal olmayan düzeltme için belirlenen kuadratik fonksiyonlar da bu durumda çizilir.

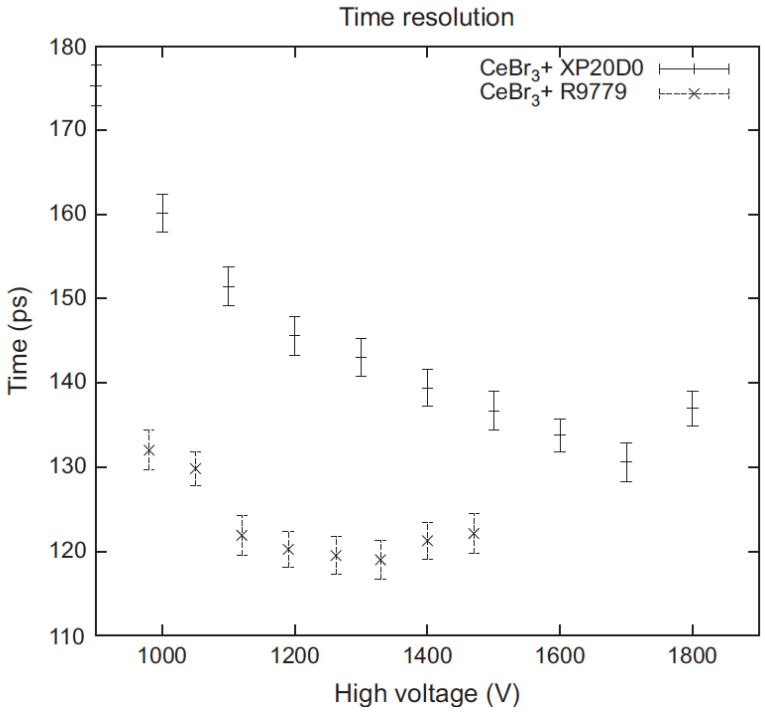
Daha sonra zaman çözünürlüğünü $CeBr_3$ CFD'ye uygulanan harici gecikmenin bir fonksiyonu olarak ölçülmüştür. Şekil 64, her iki foto-tüp için sonuçları göstermektedir. Hamamatsu tüpü durumunda minimum zaman çözünürlüğü yalnızca 1,5 ns'de bulundu. Keskin bir minimum, açıkça $^{60}Co$ enerjilerinde ve $^{22}Na$ kaynağı için 511 keV enerjisinde görülmektedir. Photonis tüpüne bağımlılık çok daha zayıf ve minimum yaklaşık 5.5-6.0 ns'de neredeyse düzdür.




Şekil 64. Tekli bir dedektör için ns'de harici gecikmenin bir fonksiyonu olarak ps cinsinden zaman çözünürlüğüne bağımlılık: Hamamatsu R9779 PMT (üst panel) ve Photonis XP20D0 (alt panel) ile birleştirilmiş $CeBr_3$. ORTEC 935 CFD'deki dahili gecikme jumperi kaldırıldı, yaklaşık -1 ns'lik bir dahili gecikmeye karşılık geldi. Sonuçlar $^{60}Co$ (1173 ve 1332 keV'lik γ-ışını enerjileri) ve $^{22}Na$ (511 keV'de) kaynaklarını kullanarak elde edildi.

Bu sonuçlara dayanarak sırasıyla Hamamatsu ve Photonis tüpleri ile yapılacak daha ileri test için 1,5 ns ve 6,0 ns'lik harici CFD gecikmeleri seçtik. Yürümeyi optimize ettikten sonra, yalnızca 2 ps'lik bir küçük gelişme kaydettik, uygulanan yüksek voltajın zaman çözünürlüğü üzerindeki etkisini inceledik. Beklentimiz artan yüksek voltajla zaman çözünürlüğünün iyileşeceğini ve kazanç çok arttığında alan-yük etkileri pulsların şeklini düşüreceğini söyledi. $CeBr_3$ kristalinin γ zamanlamasıyla uygulanması için en uygun bir foto-çoğaltıcı için minimum zaman çözünürlüğü, enerji çözünürlüğü ve doğrusallığın en azından kabul edilebilir olduğu yüksek gerilim aralığında bulunmalıdır.

Sonuçlar Şekil 65'de gösterilmektedir. Hamamatsu tüpü için zaman çözünürlüğü 1300 V'luk gerilime giderek düzelir ve daha sonra 1330 V'da 119 ps minimum değer ile oldukça kararlı kalır. Tüpün daha yüksek gerilimlerde çalıştırılması $CeBr_3$'ün performansını geliştirmez.



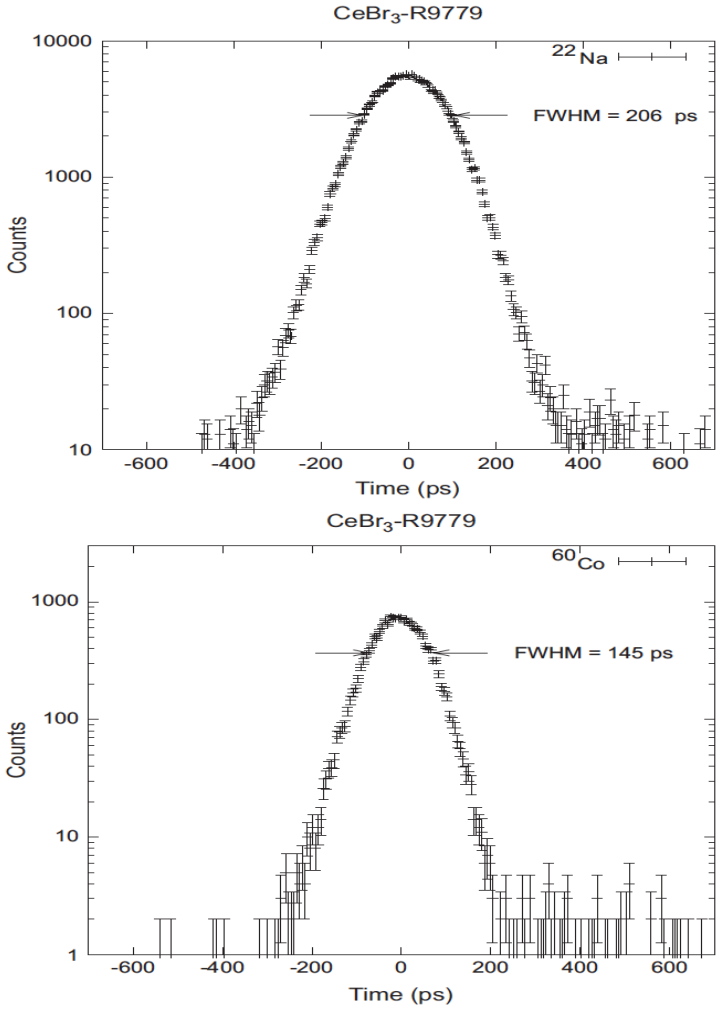

Şekil 65. Uygulanan yüksek voltajın bir fonksiyonu olarak Hamamatsu R9779 ve Photonis XP20D0 PMT'lerine bağlanan $CeBr_3$ kristali için elde edilen ps'de FWHM zaman çözünürlüğünün bağımlılığı tek bir dedektör için verilmiştir.

Her durumda, Photonis tüpü Hamamatsu tüpü tarafından sağlanan mükemmel zaman çözünürlüğüne ulaşmaz. Fotonis tüpü için 850 ila 1200 V arasındaki operasyonel bölgede, en iyi zaman çözünürlüğü sadece 146-160 ps, bu nedenle Hamamatsu için 119 ps olan en iyi değerin çok üzerindedir.

Her iki foto-çoğaltıcı ile $CeBr_3$ kristali için ölçülen FWHM zaman çözünürlükleri Tablo 8'de özetlenmiştir. $^{60}Co$'da tam enerji zirveleri için çözünürlük, $CeBr_3$ ve RVH = 1330 V'daki R9779 kombinasyonu için 119 ± 2 ps iken, sadece 146 HV = 1200 V'da XP20D0'ya bağlanan kristal için ± 2 ps (bazı uygulamalarda enerji doğrusallığının hala kabul edilebilir olduğu en yüksek ön gerilim voltajında). Son dedektör için 1700 V'de 131 ± 2 ps daha iyi bir zaman çözünürlüğü elde edilmiş olsa da, bu enerjide herhangi bir yararlı enerji çözünürlüğü veya doğrusallık sağlamaz. $^{22}Na$ kaynaktan gelen 511 keV'lik fotonlar için zaman çözünürlüğü $CeBr_3$ ve Hamamatsu tüpü için 1330 V'da 164 ± 2 ps ve CeBr3 ve XP20D0 için HV = 1200 V'da 210 ± 2 ps'dir. $CeBr_3$ ve R9779 kombinasyonu Şekil 66'da gösterilmektedir.

Tablo 8. $^{60}$Co (1173/1332 keV'da) ve $^{22}$Na (511 keV'de) kaynakları kullanılarak HV = 1200 V'da HV = 1330 V'de $CeBr_3$-Hamamatsu dedektörü ve HV = 1200 V'de $CeBr_3$-Fotonis dedektörü için FWHM zaman çözünürlüklerinin özeti; Ayrıntılar için metne bakın.

| Dedektör | $^{60}$Co (ps) | $^{22}$Na (ps) |
|---|---|---|
| $CeBr_3$-XP20D0 | 146±2 | 210±2 |
| $CeBr_3$-R9779 | 119±2 | 164±2 |




Şekil 66. $CeBr_3$-Hamamatsu dedektörü için bir $^{22}$Na kaynağı (üst panel) ile ölçülen referans dedektörüne karşı zaman spektrumu. 206 ps'lik FWHM çözünürlüğü, referans dedektörden 125 ± 2 ps ve $CeBr_3$ ünitesi 164 ± 2 ps'den bireysel katkıları içerir. Alt panel $^{60}$Co kaynağı kullanarak aynı dedektörler için ölçülen zaman spektrumunu göstermektedir. Burada 145 ps'lik zaman çözünürlüğü referans dedektöründen 83 ± 2 ps ve $CeBr_3$ birimi 119 ± 2 ps'ten bireysel katkıları içerir.

Scionix'ten ticari olarak temin edilebilen çapı 1 inç ve yüksekliği 1 inç olan bir $CeBr_3$ kristalinin iki adet 2 inç hızlı tepki veren foto-çoğaltıcı ile zaman tepkisi üzerine yapılan bu çalışmada; en iyi sonuçlar, R9779 Hamamatsu foto-tüp ile elde edildi. HV = 1330 V'de çalıştırılan $CeBr_3$-Hamamatsu dedektörü için, $^{60}Co$ enerjilerinde 119 ± 2 ps ve 164 ± 2 ps ve $^{22}Na$ kaynaktan 511 keV fotonları için çok iyi zaman çözünürlüğü elde edildi. İyi zaman çözünürlüğü için, 1100 ila 1450 V arasındaki yüksek voltaj aralığında olması gerektiği görüldü. Operasyonel voltajda $CeBr_3$-Hamamatsu dedektörünün tepkisi enerjide çok doğrusaldı ve iyi olan enerji çözünürlüğü korundu. Ölçümlere dayanarak, Hamamatsu R9779 PMT'nin bu yeni sintilatör için çok uygun olduğu sonucuna varılabilir.

Photonis XP20D0 foto-çoğaltıcı ile birleştirilmiş $CeBr_3$ kristali ölçümleri, güçlü bir enerji doğrusal olmayan ve çok daha kötü zaman çözünürlüğü ortaya koymuştur. Testlerde, benzer bir davranış sergilemiş olan iki Photonis XP20D0 tüpü kullandık. XP20D0 foto-tüplerinin $LaBr_3$(Ce) kristalleriyle çok iyi çalıştığı gösterilmiştir. Özellikle burada incelenen $CeBr_3$ ile özdeş boyutlara sahip bir $LaBr_3$(Ce) silindirik kristali için 107 ± 4 ps'lik mükemmel bir zaman çözünürlüğü bildirilmiştir ve XP20D0 foto çoğaltıcıya bağlanmıştır.

Mevcut testlerde XP20D0 ve R9779 tüpleri, $CeBr_3$ kristaline bağlandığında farklı zaman karakteristikleri gösterdi. Bu, bir foto-çoğaltıcı tipini, hızlı yüksek verimli kristallerden oluşan belirli bir sınıfa tek tek eşleştirmenin ne kadar önemli olduğunu göstermektedir. Eldeki sonuçlar, yeni $CeBr_3$ kristalinin hızlı zamanlama uygulamalarında $LaBr_3$ (Ce)'e güçlü bir rakip olduğunu da kanıtlamaktadır. $LaBr_3$ (Ce)'e benzer enerji ve zaman çözünürlüğü ile, iç etkinliğe sahip olmayan $CeBr_3$ kristali, çok düşük arka plan aktivitesinin gerekli olduğu uygulamalarda, örneğin çok egzotik bozulmaların hızlı zamanlama nükleer spektroskopik çalışmalarında olduğu gibi, $LaBr_3$ (Ce)'e kıyasla daha uygundur.

Proje kapsamında PARIS dedekör kümesi kullanılarak gerçekleştirilen deneylerin neler olduğuna geçmeden önce ilk olarak dedektör kümesinin performansını ve verimliliğini etkileyebilecek sintilatör malzemeler ile ilgili daha önce diğer bilim insanlarının gerçekleştirdiği çalışmaları anlamakta fayda olduğu için fosfor sandviçte dedektörde kullanılan Na(TI) sintilatörleri üzerine daha önce yapılmış çalışmalardan bu sintilatör malzemenin gecikmiş gama ışınları (Thompson 1964) ve ve 2x2 inç $LaBr_3$(Ce) üzerinde bir Cf radyoaktif kaynağı kullanılarak gerçekleştirilen çalışmalardan yararlanarak bu dedektörün radyoaktif kaynaktan yayınlanan nötronlar ve gamalar arasındaki etkileşimi ile ilgili (Oberstedt vd., 2013) çalışmaları detaylı olarak incelenmiştir.

Bu çalışmalardan elde edilen önemli sonuçlardan biri; $LaBr_3$ (Ce) sintilatörü kullanılarak Cf kaynağının nötron enerji spektrumunun yeniden yapılandırılmasıdır. $LaBr_3$ (Ce) ve CsI(Na)

fosfor sandviç üzerinde yürütülen bazı çalışmalar ise (Roberts vd., 2010) bir AmBe kaynağı kullanarak kristalin çekirdekleriyle hızlı ve gecikmiş gama emisyonunun belirlenmesi için çalışmalar PARIS ortak işbirliği projesi kapsamında yapılmıştır. NaI(Tl) sintilatörlerin nötron yanıtları, geçmişte yoğun olarak incelenmiştir (Häusser vd., 1983).

PARIS dedektör kümesindeki dokuz fosfor sandviç dedektörlerin kendi arasında meydana gelen çoklu saçılmalar ve dedektörlerin bu durumdaki performanslarının ne olduğunun bilinmesi de ilerleyen zamanlarda birden fazla PARIS küme dedektörünün kullanılması durumunda sistemin verimliliğinin tayini açısından önem arz etmektedir.

PARIS küme dedektörü kullanılarak araştırılacak bazı fizik araştırmaları başlığını tekrar hatırlatmak gerekirse aşağıda listelenen bazı fizik araştırmalarını listelemek mümkündür.

1. Oblate şekilden triaxial şekle geçişi ifade eden Jacobi veya diğer nükleer şekil dönüşümlerinin tespit edilmesi
2. Dev dipol rezonans'tan nötron zengin sistemlere ulaşılması ve bu sistemlerin sıcaklık-spin bağımlılığının tayin edilmesi
3. N=Z sistemlerinin izospin karışımlarının tespit edilmesi
4. Yayınlanan gama-ışınlarının toplam enerjileri dışında açısal dağılımlarının da belirlenmesi

Burada listelenen fizik konularının günümüzde nükleer fizik alanında cevap bekleyen önemli konular olup bu konularla ilgili daha önce çalışılan benzer çalışmalar için Jacobi geçişinin gözlendiği $^{45}$Sc (Pomorski, 2003), $^{46}$Ti (Dudek, 2005), $^{143}$Eu (Ward, 2002) kaynakları sıralanabilir. İzospin konusunda ve N=Z tipi çekirdeklerde T=0 izospin durumunda E1 geçişlerinin olabileceğine dair durumların gözlendiği (Maj, 1992; Mazumdar, 2004) kaynakları sıralanabilir.

Yukarıda sıralanan fizik konularından bazılarını araştırmak üzere 2016 yılı içerisinde Fransa, Paris şehrindeki Orsay Nükleer araştırma merkezinde bulunan Tandem hızlandırıcısı ve LICORNE nötron kaynağı kullanılarak Nisan ve Haziran aylarında iki deney gerçekleştirildi.

### 4.7 Temmuz 2017 tarihinde Fransa, GANIL'de gerçekleştirilen deneysel çalışmalar

PARIS projesi İzleme Komitesinin "Minutes of the PARIS Steering Committee meeting" İzleme Komitesi Tutanağında daha önce belirtilen nedenlerden dolayı fosfor sandviç dedektörler için $LaBr_3(Ce)$ yerine $CeBr_3$ sintilatör malzemesinin alternatif olarak kullanılması gerektiği vurgulanmıştı.

İkinci rapor döneminde belirtilen ve Nisan 2017'de Macaristan Debrecen, ATOMKI nükleer araştırma merkezinde 3-10 Nisan 2017 tarihleri arasında $CeBr_3$ fosfor sandviç dedektörü kullanılarak gerçekleştirilmesi planlanan bir test deneyin olacağı belirtilmişti. Fakat deneyin gerçekleştirileceği Macaristan, Debrecen şehrindeki ATOMKİ araştırma merkezinde kullanılacak olan hızlandırıcı sistemde meydana gelen sorunlar nedeniyle bu çalışma planı daha sonraki bir tarihe ertelendi. Bu ertelemenin yaşanmasından sonra, $LaBr_3(Ce)$+NaI(Tl) fosfor sandviç dedektörleriyle PARIS projesinde ileride kullanılacak olan $CeBr_3$+NaI(Tl) fosfor sandviç dedektörlerinin performanslarını karşılaştırılması amacıyla Fransa, GANIL nükleer araştırma merkezinde 11-23 Temmuz 2017 tarihleri arasında bir deney gerçekleştirildi.

Bu deneysel çalışmanın temel amacını iki başlıkta izah etmek gerekirse; birincisi nükleer yapı fiziği alanında araştırılacak izotopların nükleer yapı özelliklerini tayin etmek, ikicisi ise teknik açıdan deneysel çalışmada kullanılan iki farklı PARIS fosfor sandviç dedektörlerin performansını araştırmaktır.

Bu deneysel çalışmanın fiziksel amacı: $^{18}O$ iyon hüzmesinin $^{238}U$ hedefi üzerine düşürülmesiyle gerçekleştirilen çoklu nükleon transferi reaksiyonu ile nötron zengin B, C, N, O ve F izotoplarınının uyarılmış seviyelerini üretmek ve bu seviyelerin ortalama ömürlerini ölçmektir. Deneyin teknik amacı ise: $LaBr_3(Ce)$+NaI(Tl) fosfor sandviç dedektörleri ve $CeBr_3$+NaI(Tl) dedektörleriyle oluşturulmuş her biri dokuz dedektörden oluşmuş iki dedektör kümesinin AGATA+PARIS+VAMOS spektrometreleri ile birlikte kullanarak PARIS dedektör kümelerinin performansını ortaya çıkarmaktır.

Uluslararası PARIS projesi ortaklarıyla gerçekleştirilen bu deneysel çalışmaya Polonya, İtalya, Fransa ve Türkiye'den proje yürütücüsü Prof. Sefa ERTÜRK katılarak deneysel çalışma süresince deneyin gidişatı kontrol edildi ve deneysel çalışma sırasında elde edilen bazı veriler alınarak Türkiye'de analizleri yapıldı.

Deneyin teknik amacı doğrultusunda $LaBr_3(Ce)$+NaI(Tl) fosfor sandviç dedektörleri ve $CeBr_3$+NaI(Tl) dedektörleriyle oluşturulmuş her biri dokuz dedektörden oluşmuş iki dedektör kümesinin AGATA+PARIS+VAMOS spektrometreleri ile birlikte kullanarak PARIS dedektör kümelerinin performansı araştırıldı.

Bu deney sırasında elde edilen verilerin analizi Türkiye ve Polonya grupları arasında paylaştırıldı. Bu deneysel çalışmada iki dedektör kümesinde kullanılan her bir fosfor sandviç dedektörün deney öncesinde kalibrasyon amacıyla $^{60}$Co radyoaktif kaynağı deney sonrasında ise $^{60}$Co ve $^{137}$Cs radyoaktif kaynaklar kullanılarak elde edilen veriler analiz edilerek her bir dedektörün enerji çözünürlüğü ve dedektör kümesinin toplam enerji çözünürlüğü belirlendi.

### 4.7.1 Deneyin Motivasyonu:

Evrenin ve laboratuvar ortamında üretilen tüm çekirdeklerin tanımlanması, nükleer fiziğin temelinde yatan en temel tartışmalarından biridir. Bu tanımların anlaşılması için ***ab initio*** yaklaşımı kapsamında nükleer yapının ve reaksiyonların temel olarak anlaşılması gerektiği nükleer fizikçilerin ortak kanaatidir.

***ab initio*** yaklaşımı 2 temel bileşene bağlıdır:

1-Birçok nükleon problemi için hamiltonyen (parçacığın kuantum sistemi için bilgi veren dalga fonksiyonu) için tutarlı olması, özellikle düşük enerjili sistemde QCD'nin simetrilerine ve ilgili serbestlik derecelerine dayanan Etkili Alan Teorisi (EFT) araçlarını kullanarak inşa edilmiş olanlardır.

2-Nükleonların serbestlik derecesini kullanarak çekirdeklerin tutarlı bir mikroskobik hesaplamasını gerçekleştirmenin bir yolunu sağlayan çok kütleli metottur.

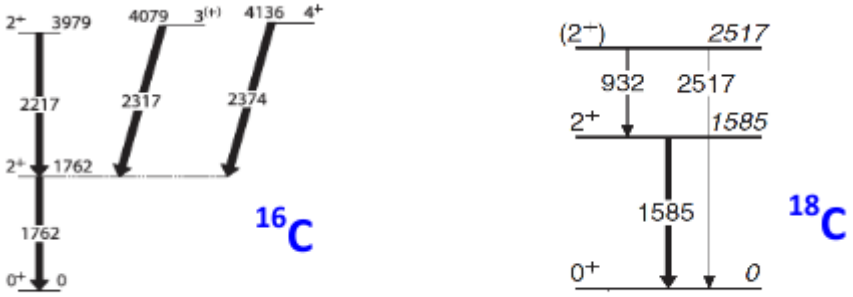
Kor olmayan Kabuk Modeli (No-Core Shell Model (NCSM)) veya Çok-Parçacıklı Perturbasyon Teorisi (Many-Body Perturbation Theory (MBPT)) hesaplamaları, iki artı üç nükleon kullanarak oksijene kadar olan çekirdeklerin temel ve uyarılmış durumlarının başarıyla kullanılması ***ab-initio*** yaklaşımı sayesinde izah edilebilir. Deneysel veri ile uyumlu olan bu sonuçlar, etkili alan teorisi (EFT) kullanılarak izah edilebilmektedir. Örnek olarak, yalnız nükleon-nükleon (NN) etkileşimindeki hesaplamalara dayanarak yapılan kıyaslamada, NNN kuvvetleri içerdiğinde, nötron zengini oksijen izotopu için bağlanma enerjisi ve spektrumda önemli bir gelişme sağlandı (Hagen G., 2012).

***ab-initio*** yaklaşımının diğer bir zorlu testi EFT etkileşimine 2 veya 3 cisim kuvvetin eklenmesidir, bu eklenme ile elektrik kuadrupol (E2) matriks elementi ortaya çıkmış olur ve bu sistem nükleer yapının araştırılması için önemli bir niceliktir. Özellikle, nükleer deformasyona, proton ve nötron serbestlik derecelerinin ayrışmasına karşı çok hassastırlar ve sıklıkla nükleer dalga fonksiyonlarının küçük bileşenleri tarafından etkilenirler.

Büyük ölçekli çekirdek kabuk modelinde, çeşitli NN ve NN artı NNN etkileşimleri kullanılmıştır, elektromagnetik B(E2; $2^+_1 \rightarrow 0^+$) geçiş oranları ve $2^+_1$ kuadrupole momenti, aynı zamanda diğer durumlar içinde elektromagnetik geçişler nötron zengini karbon izotopları için hesaplandı (Forssen C.,2013). Özellikle NN ve NN+NNN etkileşimine EFT nin uygulanması ile B(E2) $2^+_1 \rightarrow 0^+$) geçişleri yeniden üretilmiştir.

Sırasıyla, daha yüksek uyarılma durumlarında gözlemlenebilen $2^+_2$, B(M1, $2^+_2 \rightarrow 2^+_1$), B(E2, $2^+_2 \rightarrow 2^+_1$), B(E2, $2^+_2 \rightarrow 0^+$) kullanılan NN veya NN+NNN nükleer kuvveti için yüksek duyarlılık sergiler. Örnek, $^{16}$C için (Şekil 67 ve Tablo 9) NN+NNN ile hesaplanan ikinci $2^+$ durumunun ömrü 0.08 ps ve yalnızca NN kuvveti ile elde edilen 0.23 ps değerinden çok daha kısadır. $^{18}$C için de önemli bir fark görülmektedir: NN+NNN ile 1,1 ps, NN ile 2,2 ps. Buna ek olarak, $^{16}$C ve $^{18}$C'de $2^+_2 \rightarrow \delta 2^+_1$ geçiş için karışım oranı δ (E2/M1), kullanılan etkileşme kuvvetine bağlıdır: NN kuvveti için sırasıyla 0,30 ve 0,02, NN+NNN için ise etkileşim 0.08 ve 0.04'tür.

$^{16\text{-}18}$C için $2^+_2$ durumların ömrünü ve $2^+_2 \rightarrow 2^+_1$ geçiş için E2/M1 karışma oranını ölçerek, NN+NNN kuvvetine dayanan hesaplamalara göre yalnızca NN etkileşimi içeren ab initio yaklaşımının kalitesini test edebilecektir (Forssen C., 2013).




Şekil 67: $^{16}$C ve $^{18}$C için bozunum şeması.

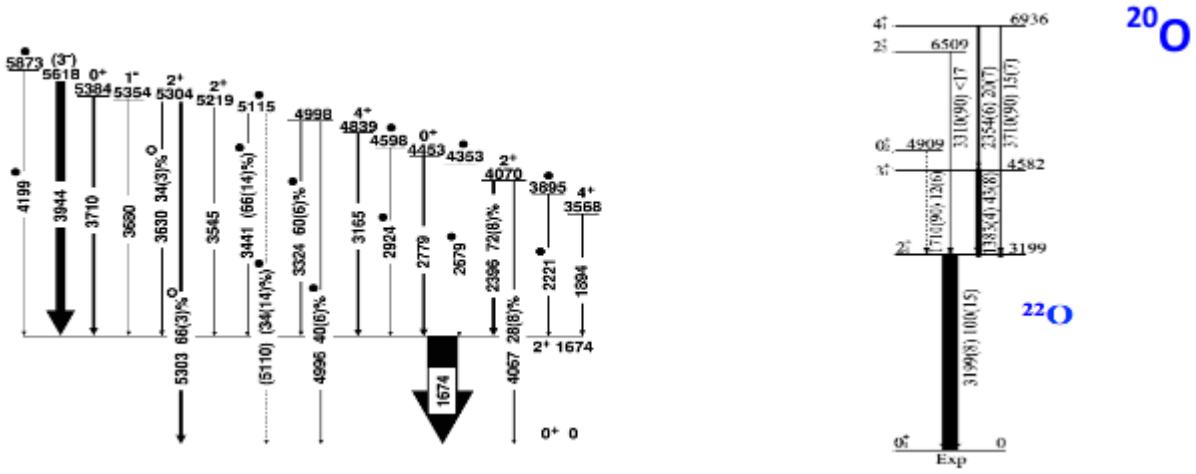
Benzer bir durum, nötron zengini oksijen izotopları için de meydana gelmektedir. EFT NN etkileşimli MBPT yöntemine dayanan ab initio yaklaşımı, NN + NNN etkileşimi ile hesaplamalara dayanan beklentilerden çok farklı bazı durumlardan geçiş olasılıklarının tahminlerini verir (Holt J.D., 2013).

Örnek, hem NN hem de NN+NNN *ab initio* yaklaşımı, $^{20}$O ve $^{22}$O için ilk uyarılma durumu $2^+$ 'dan B(E2) geçiş durumunu çok iyi tanımlanmasını sağlar (Şekil 68). Tablo 9 listesinden görüldüğü gibi ikinci $2^+_2$ durumundan geçiş ihtimallerine ilişkin sonuçlar önemli ölçüde farklıdır. Özellikle MBPT NN hesaplamaları, $^{20}$O ve $^{22}$O çekirdeklerinde $2^+_2$ durumu için yarı

ömürleri 200 fs ve 43 fs olarak öngörürken, NN + NNN etkileşimi ile yapılan hesaplamalar buna karşılık 200 fs ve 43 fs değerlerini verir.

Tablo 9. En güncel deneyden (Nudat) elde edilen $^{20,22}$O ve $^{16,18}$C için birinci ve ikinci $2^+$ durumu ve *ab initio* modelinde EFT NN ve NN+NNN etkileşimi kullanılarak elde edilen yarı ömür değerleri. Tabloda aynı zamanda $2^+_2 \rightarrow 2^+_1$ geçişi için karışım oran değerlerinin hesaplaması da verilmektedir.

| | | Interactions | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Nucleus | Excited state | lifetime τ [ps] (*ab initio* NN) | lifetime τ [ps] (*ab initio* NN+ NNN) | mixing ratio δ (E2/M1) for $2^+_2 \rightarrow 2^+_1$ (*ab initio* NN) | mixing ratio δ (E2/M1) for $2^+_2 \rightarrow 2^+_1$ (*ab initio* NN+NNN) | Experiment τ [ps] |
| $^{16}$C | $2^+_1$ | 24 | 24 | | | 11.4(10) - 18.3(50) |
| | $2^+_2$ | **0.23** | **0.08** | **0.30** | **0.08** | < 4 |
| $^{18}$C | $2^+_1$ | 19.4 | 20 | | | 22.4(3.5) |
| | $2^+_2$ | **2.2** | **1.1** | **0.02** | **0.04** | < 4.6 |
| $^{20}$O | $2^+_1$ | 10,3 | 11,7 | | | 10.70(40) |
| | $2^+_2$ | **0.32** | **0.20** | **0.24** | **0.04** | - |
| $^{22}$O | $2^+_1$ | **0.40** | **0.46** | | | 0.69(28) |
| | $2^+_2$ | **0.064** | **0.043** | **0.33** | **0.05** | - |




Şekil 68. $^{20}$O ve $^{22}$O için bozunum şeması.

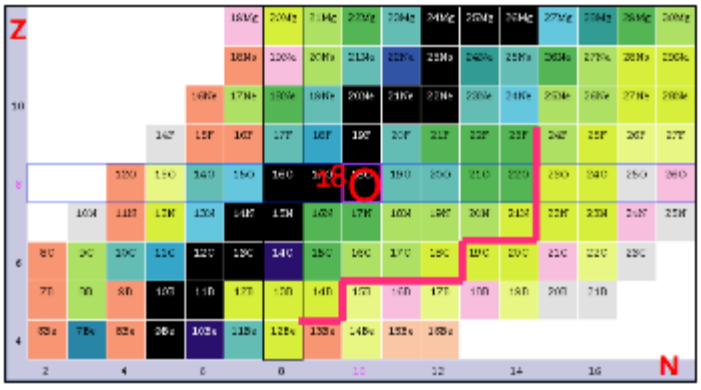
Bununla birlikte, bu durumda $2^+_2 \rightarrow 2^+_1$ geçişi için δ (E2/M1) karışım oranı değerinde büyük bir fark olduğu görülmektedir: NN+NNN etkileşim hesaplaması $^{20}$O ve $^{22}$O için δ =0.04 ve 0.05 üretirken, NN kuvveti ile yapılan hesaplamada 0.24 ve 0.33 değerlerini vermektedir.

Yine $^{20,22}O$ için $2^+_2 \rightarrow 2^+_1$ geçişi için karışım oranı ve $2^+_2$ durumu için yarı ömür hesabı oldukça kolaydır, NN ve NN+NNN etkileşiminde *ab initio* yaklaşımı kullanılarak bu değerler test edilebilir.

Yapılacak olan bu çalışmanın temel amacı $^{16}C$,$^{18}C$, $^{20}O$ ve $^{22}O$ çekirdekleri için, $2^+$ durumu ($2^+_2$) yarı ömrü, $(2^+_2 \rightarrow 0^+)/(2^+_2 \rightarrow 2^+_1)$ oranı ve M1/E2($2^+_2 \rightarrow 2^+_1$) karışım oranının hesaplanması, bu da ***ab initio*** hesaplamalarında NNN kuvvetinin dahil edilmesine karşı yüksek duyarlılık sergilemektedir.

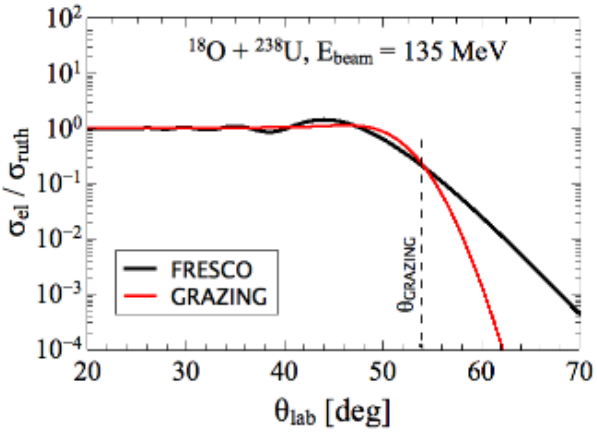
Aynı zamanda nötron zengini olan diğer uyarılmış olan B, C, N, O çekirdeklerinde yarı ömür, karışım oranı, dallanma oranı bilgileri de elde edilecektir. Bu sonuçlar, farklı etkileşimlere sahip temel *ab initio* yöntemleri de dahil olmak üzere çeşitli teorik yaklaşımlar için mükemmel bir sınama zemini oluşturacak çok kapsamlı bir veri seti sağlayacaktır.

İlgilenilen çekirdekler 141 MeV enerjisinde $^{18}O$ demet ile 10 mg/cm$^2$ kalınlığında ki $^{238}U$ hedefinin çarpıştırılması ile üretim sağlanacaktır (Şekil 69).




Şekil 69. $E_{demet}$=135 MeV enerjisinde $^{18}O+^{238}U$ çoklu nükleon transfer reaksiyonunda yer alan nükleer grafik bölgesi. Kırmızı-çizgi ile ifade edilen alan gamma-spektroskopisi çalışmalarında gerçekleştirilebilir olan nötron zengini çekirdekleri ifade etmektedir. Bu çekirdekler Zagrebaev-Greiner modelinde (Zagrebaev V. and Greiner W., 2007) tesir kesit oranını 0.05 mb değerine karşılık gelmektedir.

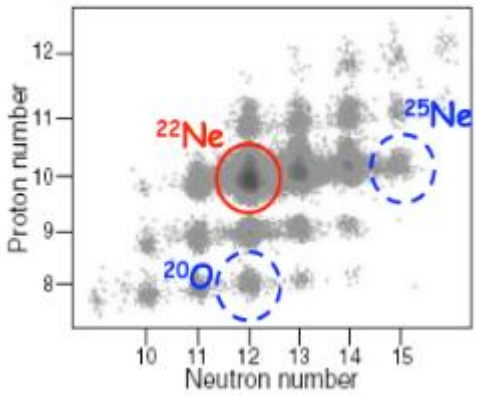
Gelen demetin enerjisi, hedef merkezinde ~135 MeV değerindedir ve %50 Coulomb bariyeri üzerindedir ve v/c oranı %13'tür. GRAZING (Winther A., 1995) ve FRESCO (I. J. Thompson I.J., 1988) çalışmalarına göre, grazing açısı ~54° derecedir (Şekil 70). Bu, maksimum 45° dönme noktasına yerleştirilen VAMOS spektrometresinin kabul edebildiği alanın hemen dışında ancak daha sonra açıklanacağı gibi, ilgili reaksiyon ürünlerinin optimal popülasyonunu temin eder.




Şekil 70. $E_{demet}$=135MeV enerjsinde $^{18}O+^{238}U$ reaksiyonu için Rutherford tesir kesiti $\sigma_{Ruth}$ ve elastik tesir kesit $\sigma_{el}$ oranı. Hesaplamalar GRAZING ve FRESCO kod sistemi kullanılarak elde edilmiştir.

Birden fazla nükleon transferi içeren reaksiyon kanallarında tesir kesit değerlendirmesi kolay değildir (özellikle bu çalışmada yer alan nötron zengini C ve O iyonları için), bu nedenle, daha önce yapılan $^{208}Pb$ hedefi üzerine $^{22,24}Ne$ gönderilerek elde edilen çoklu-nükleon transferi deneyini ve teorik model hesaplamalarını göz önüne alacağız (Coulomb bariyeri üzerinde %30) (Bottoni S.,2012, Benzoni G., 2010).

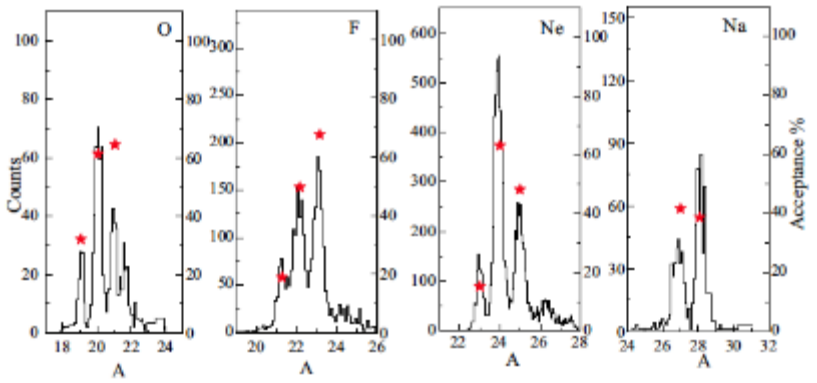
Aşağıda gösterilen Şekil 71, Legnaro National Laboratory-LNL merkezinde, $^{208}Pb$ hedef üzerine 5.8MeV/u enerjisinde $^{22}Ne$ hedefinin gönderilmesi ile gerçekleştirilen PRISMA-CLARA deneyinde elde edilen izotop dağılımını göstermektedir.




Şekil 71. LNL' de PRISMA-CLARA deneyinde $^{208}Pb$ hedef üzerine 5.8 Mev/u enerjisinde $^{22}Ne$ demeti ile elde edilen izotop dağılımı.

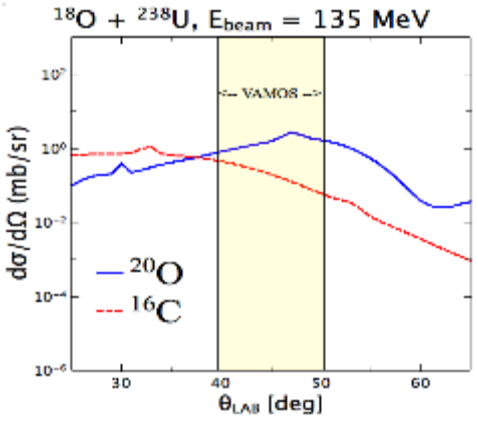
Özellikle,$^{22}Ne$ elastik olmayan saçılma kanalında %3 ve %0.5 verim seviyesinde, +2n ve -2p transfer kanalları ($^{18}O$ demeti ile $^{20}O$ ve $^{16}C$ çekirdeklerine karşılık gelen izotoplar) net bir

şekilde görülmektedir. Şekil 72'de 10 mg/cm$^2$ kalınlığında $^{208}$Pb hedef üzerine 7.9 MeV/u enerji değerinde $^{24}$Ne demeti gönderilerek SPIRAL deneyinde VAMOS-EXOGAM spektrometresinde farklı parçacıklar için elde edilen kütle dağılımları gösterilmektedir (%80 Coulomb bariyeri üzerinde) (Benzoni G.,2010).




Şekil 72. Farklı çekirdekler için kütle dağılımları.

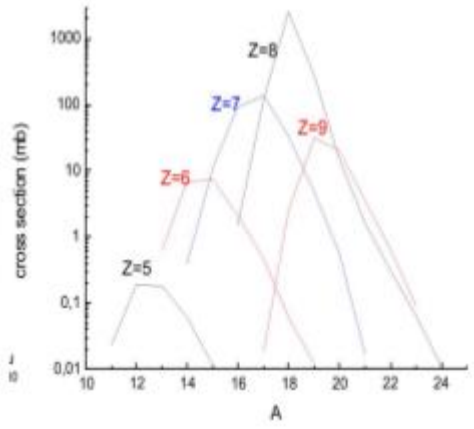
Teorik açıdan bakıldığında, çoğunlukla transfer reaksiyon çalışmalarında kullanılan yarı klasik GRAZING modelini kullanarak reaksiyon kesitlerini tahmin etmeye çalışabiliriz GRAZING modelinin reaksiyon ürünlerinin açısal dağılımlarının genel şeklini oldukça iyi ürettiği bilinir; Bu nedenle, açısal ölçüm aralığını optimize etmek için kullanılabilir. Şekil 73, 135 MeV enerjisinde $^{18}$O+$^{238}$U reaksiyonunda -2p ve +2n reaksiyonu ile üretilen $^{16}$C ve $^{20}$O için GRAZING modelinin ürettiği tesir kesit dağılımını göstermektedir.




Şekil 73. GRAZING model ile 135 MeV enerjide $^{18}$O+$^{238}$U reaksiyonu için elde edilen $^{20}$O ve $^{16}$C çekirdekleri için diferansiyel tesir kesit dağılımı, sarı ile gösterilen alan VAMOS spektrometresinde kabul edilen alanı ifade etmektedir.

Düşük enerji transfer reaksiyonları için tesir kesit tahmin etmenin alternatif yolu, başlangıçta çok ağır iyonlarla reaksiyonlarda derin elastik olmayan ve çok çekirdekli transfer işlemlerini tanımlamak için geliştirilen Zagrebaev-Greiner modelni (Zagrebaev V. and W. Greiner W., 2007) 'yi sunar.

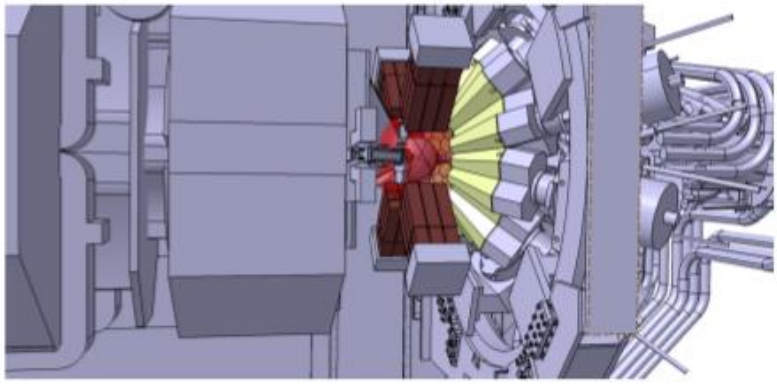
Bu model kütle numarası A değerinin 14-50 arasında olan çekirdekler için iyi tahminler verdiğini göstermektedir, bu model bizim kullandığımız 135 MeV enerjide $^{18}O+^{238}U$ reaksiyonu içinde uygulanmıştır. Şekil 74, gelen demet çevresindeki ürünler için Zagrebaev-Greiner modeliyle hesaplanan ürün verimliliği dağılımlarını, kütlenin bir fonksiyonu olarak göstermektedir.




Şekil 74. 135 MeV enerjisinde $^{18}O+^{238}U$ reaksiyonu için Zagrebaev-Greiner modeli kullanılarak tahmin edilen tesir kesit değerleri.

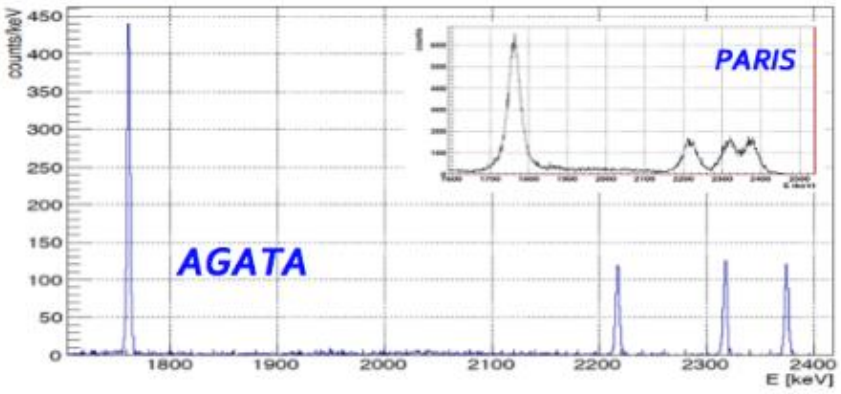
Elde edilen tesir kesit değerleri, $^{16}C$ ve $^{18}C$ için sırasıyla 2, 0.05 mb ve $^{20}O$ ve $^{22}O$ için 20, 0.3 mb olarak elde edilmiştir. Bu değerler GRAZING modeline göre çok yaklaşık 100 kat daha büyüktür, buna göre GRAZING modeli çoklu-nükleon transferi çalışmalarında eksik kaldığı öngörülmektedir.

Şekil 75'de gamma bozunumlarının üretildiği reaksiyonların gözlemlenebilmesini sağlayacak olan PARIS projesinde kullanılacak olan AGATA+PARIS+VAMOS kurulumu gösterilmektedir. Deney kurulumunun simülasyonu için SimAGATA adı verilen program kullanıldı (Labiche M.). Hesaplamalar, AGATA 8 üçlü artı 4 çift küme için hedef merkezden 23 cm uzakta, geriye doğru açılarda varsayılarak yapılmıştır. Bu, 1.8 MeV'de yaklaşık% 5.2'lik bir verimlilik sağlar. PARIS için, hedef merkezden 15 ve 23 cm uzaklıktaki iki muhtemel mesafede, 90° 'de 4 küme konfigürasyonu varsayılmıştır (her küme 9 fosfor dedektörden yapılmıştır). Bu, 1.8 MeV'de sırasıyla% 12 ve% 6 verimlilik sağlar ve bu da 4 MeV'de 2 faktörden daha az düşer



Şekil 75. Deneyde kullanılacak olan AGATA+PARIS+VAMOS spektrometresi.

Aşağıda gösterilen Şekil 76, 135 MeV demet enerjisinde $^{18}O+^{238}U$ reaksiyonu ile üretilen $^{16}C$ çekirdeği için AGATA ve PARIS spektrometresinde ölçülen gamma-ışını spektrasının simülasyonunu göstermektedir. Şekil 76'da görüldüğü üzere AGATA ile elde edilmiş olan spektra, Doppler doğrulaması yapılarak 1.7 ve 2.2 MeV için FWHM 3.7 ve 3.9 keV enerji çözünürlüğü elde edilmiştir.

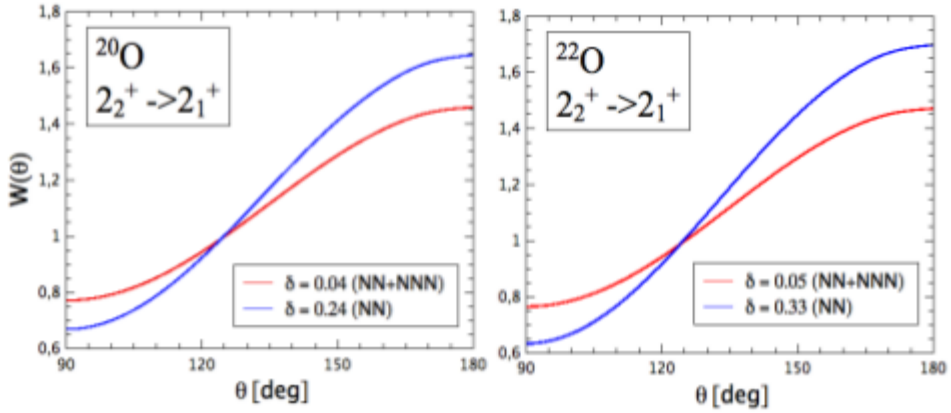



Şekil 76. 135 MeV demet enerjisinde $^{18}O+^{238}U$ reaksiyonu ile üretilen $^{16}C$ çekirdeği için AGATA ve PARIS spektrometresinde ölçülen gamma-ışını spektrasının simülasyonu.

PARIS projesinde kullanılacak olan AGATA ve VAMOS spektrometrelerinin beraber kullanılması bize çok hassas olan gamma ışınlarının gözlemlenebilmesi için çok yardımcı oldu.

Yapılan bu çalışma ile $^{18}O+^{238}U$ reaksiyonu kullanılarak nötron zengini çekirdeklerin çoklu nükleon transferinde gamma-ışını açısal momentum dağılımı ve uyarılmış seviyelerin yarı ömür hesabı olacaktır. Özellikle $^{20,22}O$ ve $^{16,18}C$ için $2^+_2 \rightarrow 2^+_1$ geçişleri ve ikincil $2^+$ uyarılmış durumlar ilgilenilecektir.

Aşağıda gösterilen Şekil 77, NN kuvveti ve NNN kuvveti ile MBPT üzerinden *ab initio* yaklaşımı kullanılarak, AGATA ile ölçülen $^{20}O$ ve $^{22}O$ için $2^{+}_{2} \rightarrow 2^{+}_{1}$ geçişlerinde açısal momentum dağılımı gösterilmektedir (Holt J.D., 2013).

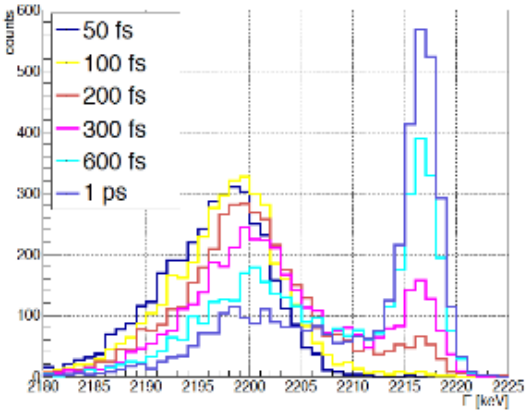



Şekil 77. MBPT *ab initio* yaklaşımında B(E2)/B(M1) δ karışım oranı hesaplanarak, $^{20}O$ ve $^{22}O$ için $2^{+}_{2} \rightarrow 2^{+}_{1}$ geçişlerinde açısal momentum dağılımı (Holt J.D., 2013). Nükleer etkileşmede üçlü kuvvet ve üçlü olmayan kuvvet göz önüne alınarak dağılım gösterilmektedir.

Açısal momentum dağılımı çok kuvvetli bir şekilde δ ile E2 M1 geçişi arasında ki karışım oranına bağlıdır, buda nükleer etkileşimde ki üçlü kuvvete karşı çok hassastır. Böyle bir hassasiyet, 140-170 ° 'lik açısal aralıkta özellikle güçlüdür ve AGATA dizisi ile bu açı iyi kaplanabilmektedir. AGATA'nın, gamma-ışını açısal dağılımını çok yüksek doğrulukla ölçme fırsatı sunduğunu vurgulamak önemlidir.

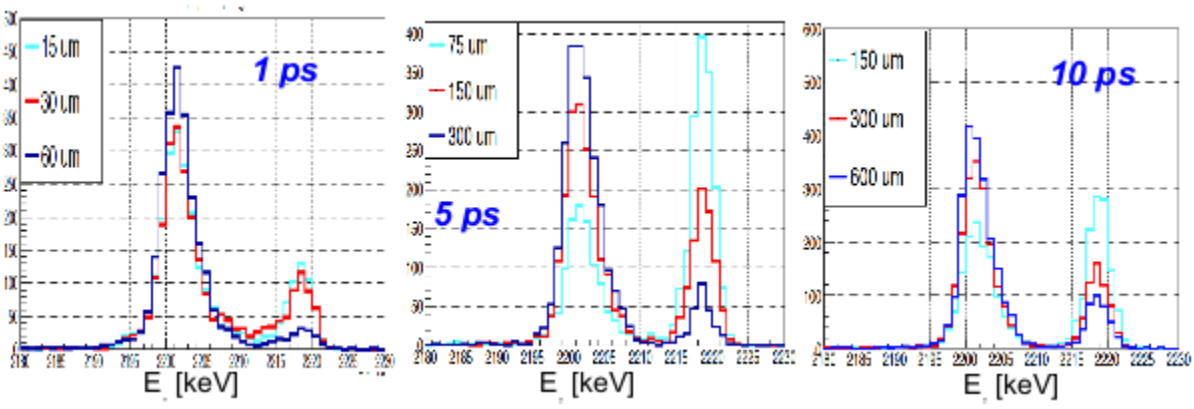
Yarı ömür ölçümleri hem çekirdeğe hem de uyarılmış duruma kuvvetli bir şekilde bağlı olduğu bilinmektedir. Yarı ömür hesaplamaları için hem **lineshape analysis method** hem de **plunger technique** adı verilen sistemler kullanılmaktadır.

10 mg/cm$^2$ kalınlığındaki $^{238}U$ hedef için simülasyon hesaplamaları ile DSAM tekniklerinin uygulanabilirliğini doğruladık. Sonuçlar Şekil 78'de 2217 keV enerjisinde $^{16}C$ için gösterilmektedir. Yapılan teoriksel (Forssen C., 2013) çalışmaya göre 1ps değerinden daha kısa olduğu görülmektedir. Şekilde görülen iki pik yapısı, hedeften minimum 5 μm mesafe üzerine yerleştirilen bir $^{93}Nb$ bozunur maddenin (10 mg/cm$^2$ kalınlıkta) varlığına bağlıdır. Düşük enerji pikinin, hedefin içindeki γ-bozunumlarıyla ilişkili çizgilerinin ~ 100 fs'den daha kısa ömürleri için duyarlılığını kaybettiği görülmektedir.




Şekil 78. 2217 keV enerjisinde $^{16}$C için, τ=50, 100, 200, 300, 600, 1000 fs. yarı ömür değerleri göz önüne alınarak elde edile simülasyon dağılımını göstermektedir. Şekilde görülen iki pik yapısı, hedeften minimum 5 μm mesafe üzerine yerleştirilen bir $^{93}$Nb bozunur madde (10 mg/cm$^2$ kalınlıkta) neden olmaktadır. Simülasyon hesaplamasında 4000 olay kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

1 ps'den daha uzun ömürler için değişken plunger tekniği kullanılması planlandı. Bu amaçla, 10 mg/cm$^2$ kalınlığında $^{93}$Nb, bir indirgeyici ile yaklaşık% 2'lik bir iyon hızında bir azalma sağlanmıştır. Bu, yaklaşık 2 MeV enerjinin bir γ geçişinin kaydırılmış ve kaydırılmamış bileşenleri arasındaki yaklaşık 15 keV'lik bir yer değiştirmeye karşılık gelmektedir. Şekil 79'da reaksiyon ile elde edilen 2217 keV deki $^{16}$C için yarı ömür değerleri sırasıyla 1, 5 ve 10 ps için plunger tekniği kullanarak yapılan simülasyon çalışmasını göstermektedir. Hedef ile indirgeyici adı verilen (degrader) arasında ki mesafeler 15~600 μm olarak alınmıştır.




Şekil 79. Değişken Plunger Teknik kullanılarak τ=1, 5 ve 10ps ve hedef ile indirgeyici arasında d=15, 30, 60, 75, 150, 300 ve 600 μm alarak simülasyon gerçekleştirilmiştir. Simülasyon 2600 sayım kullanılarak yapılmıştır.

Bu simülasyonların sonuçlarına bakarak, d = 15, 60, 150, 300, 600 ve 900 μm'lik 6 mesafeyi kullanarak 1 ila 15 ps aralığında doğru ömür tespiti yapmanın mümkün olduğu görülmektedir.

Hesaplama oranı tahminleri ile ilgili olarak, $^{16,18}C$ reaksiyon ürünlerine dayanarak hesaplama yapıldı, bu bize fizikte tesir kesit çalışmalarında en zor kısmı oluşturduğu bilinmektedir. VAMOS spektroskopisinde $^{16}C$ için 2 mb ve $^{18}C$ için 0.05 mb olarak hesaplanmıştır.

### 4.7.2 Deneyde kullanılan hedef ve demet

VAMOS spektrometresi 45° derecelik rotasyon yerleştirilerek, 10 mg/cm$^2$ kalınlığında $^{238}U$ hedef üzerine 141 MeV enerjisinde $^{18}O$ demet gönderilerek toplamda 10 günlük periyod boyunca veri alımı sağlandı. Deney süresince 10 mg/cm$^2$ kalınlığında $^{93}Nb$ indirgeyici kullanarak diferansiyel plunger teknik ve DSAM tarafından yarı ömür ölçümüne yer verildi. Aynı zamanda yapılan deneyle uyumlu olması için, simülasyon programı yazılırken de aynı şekilde kalın hedef ve indirgeyici kullanarak 100 fs den piko saniye seviyesinde yarı ömür ölçümleri yapıldı. Özellikle hedef ile indirgeyici arasında 7 farklı uzaklık ayarlanarak (d=5 (2gün), 15 (1gün), 60 (1gün), 150, 300, 600 ve 900 μm) ilgilenilen yarı ömür ölçümleri daha hassas bir şekilde ölçülmesi planlanmıştır.

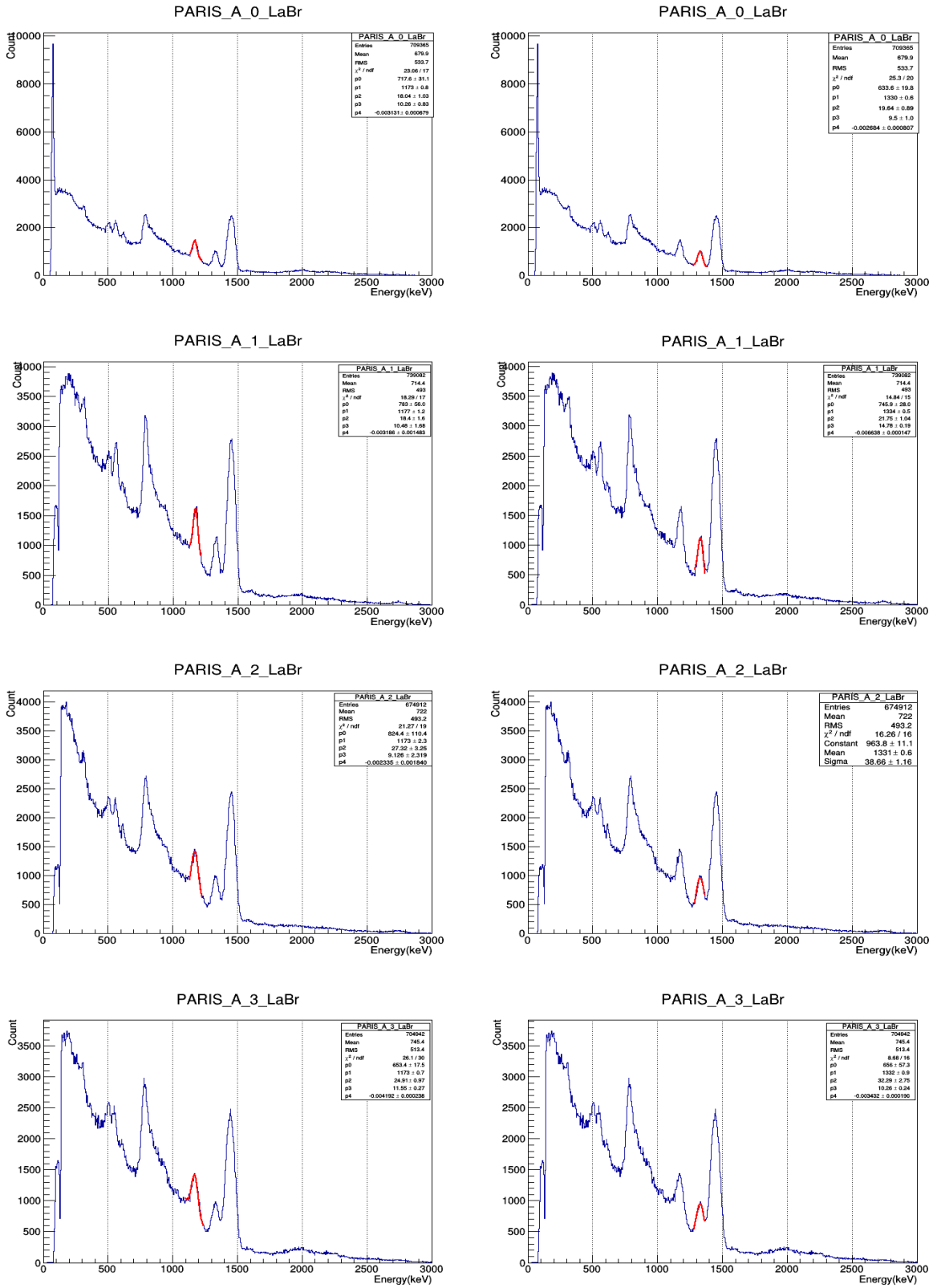
$LaBr_3$(Ce)+NaI(Tl) fosfor sandviç dedektörleri ve $CeBr_3$+NaI(Tl) dedektörleriyle oluşturulmuş her biri dokuz dedektörden oluşmuş iki dedektör kümesinin performansını ortaya çıkarmak için $^{60}Co$ $^{137}Cs$ kalibrasyon kaynakları kullanıldı. Deney öncesi gerçekleştirilen bu kalibrasyon işlemi sonucunda elde edilen verilerin analizi ve elde edilen analiz sonuçları grafikler ve tablolar halinde detaylı olarak aşağıda verilecektir.

Şekil 80'de gösterilen dedektör kümesinde gösterildiği gibi sıralanan $LaBr_3$ ve $CeBr_3$ dedektörlerinin her biri için $^{60}Co$ (1173.2 keV ve 1332.5 keV) ve $^{137}Cs$ (661.7 keV) radyoaktif kaynaklarından elde edilen enerji pikleri ayrı ayrı fit edilerek her bir kristalin belirtilen enerji pikleri için enerji çözünürlükleri ortaya çıkarıldı.



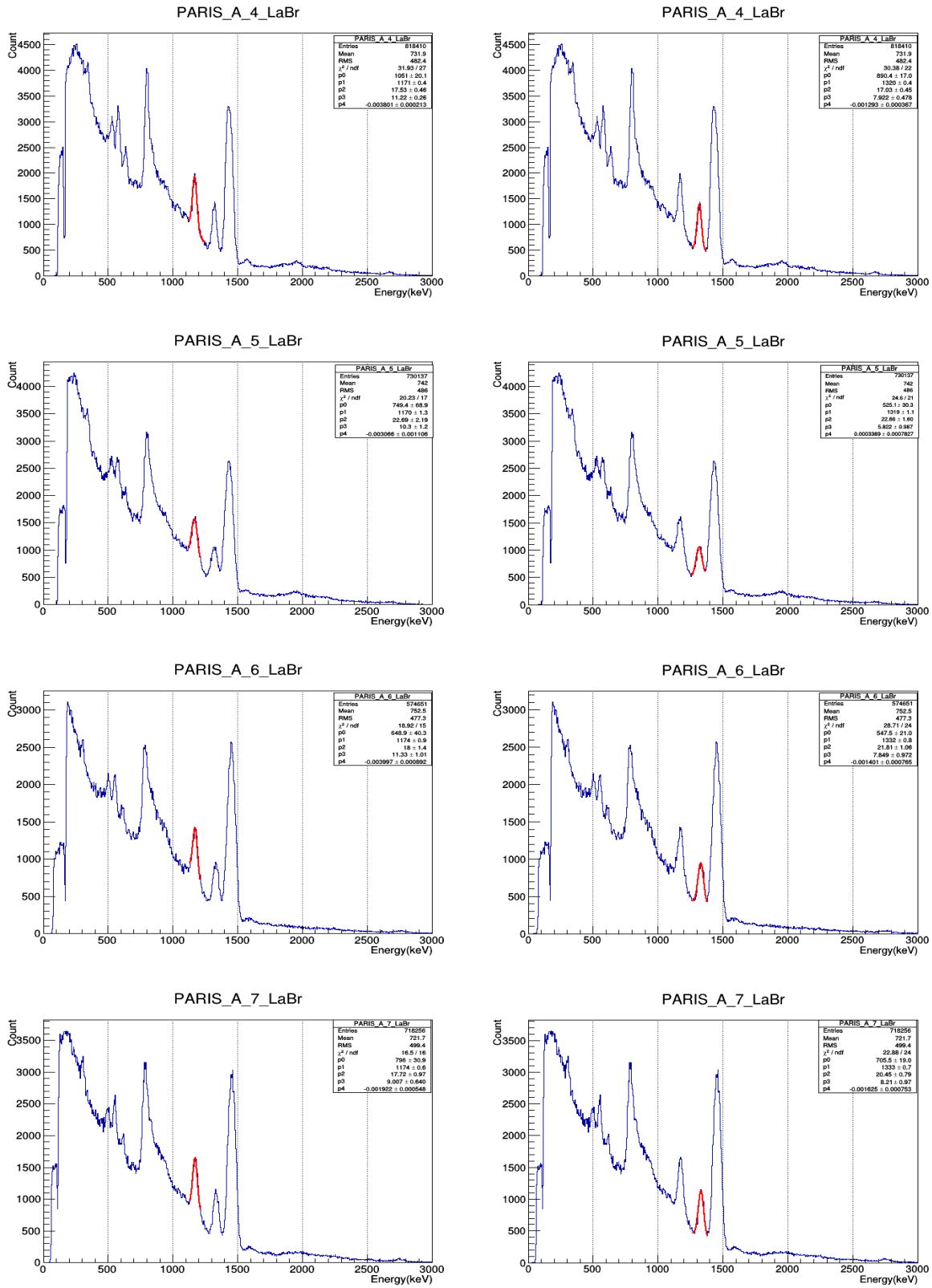

Şekil 80. Deney sırasında dedektörlerin takibi için numaralandırılan PARIS dedektör kümesi.

## $LaBr_3(Ce)$-$^{60}Co$



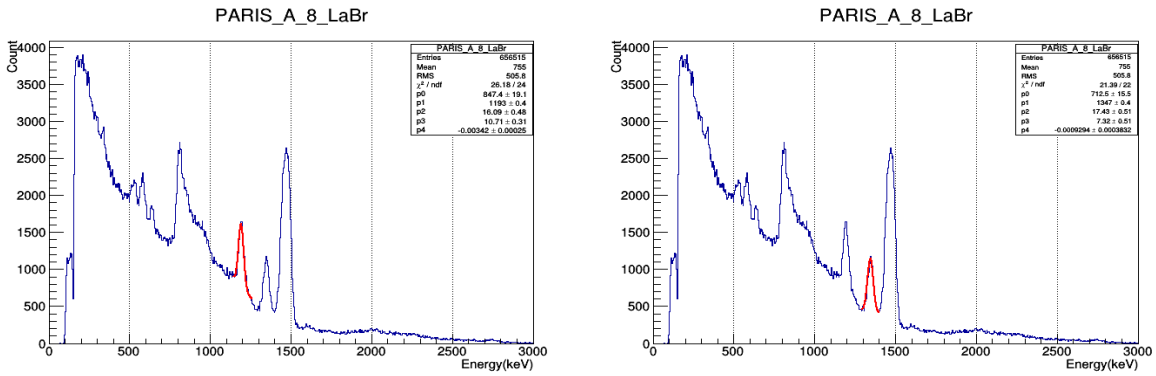

Şekil 81. $LaBr_3(Ce)$ dedektörü kullanılarak 0,1,2,3 numaralı kristaller için $^{60}Co$ kaynağından elde edilen dağılım. Sol kısım $^{60}Co$ kaynağından elde edilen ve fit edilmiş ~1173.2 keV enerji dağılımını, sağ kısım ise ~1332.5 keV enerji için fit edilmiş dağılımı ifade etmektedir.

## $LaBr_3(Ce)$-$^{60}Co$

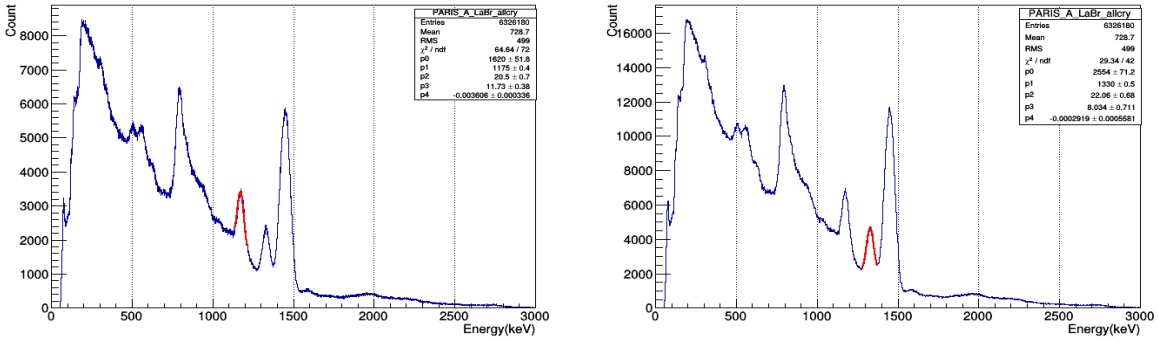



Şekil 82. $LaBr_3(Ce)$ dedektörü kullanılarak 4,5,6,7 numaralı kristaller için $^{60}Co$ kaynağından elde edilen dağılım. Sol kısım $^{60}Co$ kaynağından elde edilen ve fit edilmiş ~1173.2 keV enerji dağılımını, sağ kısım ise ~1332.5 keV enerji için fit edilmiş dağılımı ifade etmektedir.

**$LaBr_3(Ce)$-$^{60}Co$**




Şekil 83. $LaBr_3(Ce)$ dedektörü kullanılarak 8 numaralı kristal için $^{60}Co$ kaynağından elde edilen dağılım. Sol kısım $^{60}Co$ kaynağından elde edilen ve fit edilmiş ~1173.2 keV enerji dağılımını, sağ kısım ise ~1332.5 keV enerji için fit edilmiş dağılımı ifade etmektedir.



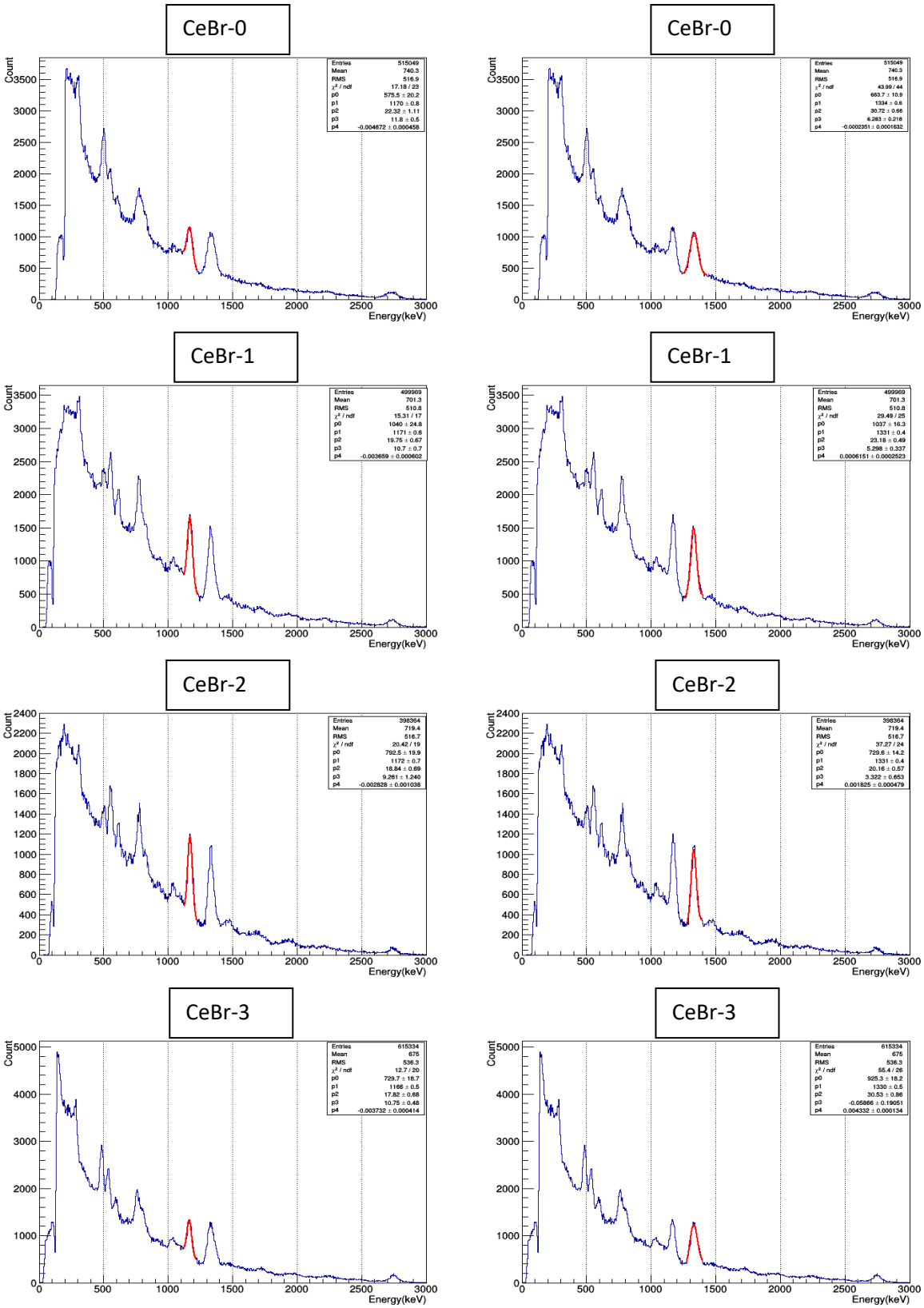

Şekil 84. $LaBr_3(Ce)$ dedektörü kullanılarak tüm kristaller için $^{60}Co$ kaynağından elde edilen dağılım. Sol kısım $^{60}Co$ kaynağından elde edilen ve fit edilmiş ~1173.2 keV enerji dağılımını, sağ kısım ise ~1332.5 keV enerji için fit edilmiş dağılımı ifade etmektedir.

$$R(\%) = \frac{FWHM}{E} \times 100$$

Tablo 10. $LaBr_3$(Ce) dedektörü kullanılarak her bir kristal için $^{60}$Co kaynağından elde edilen ~1173.2 keV ve ~1332.5 keV enerjileri için hesaplanan enerji çözünürlük değerleri.

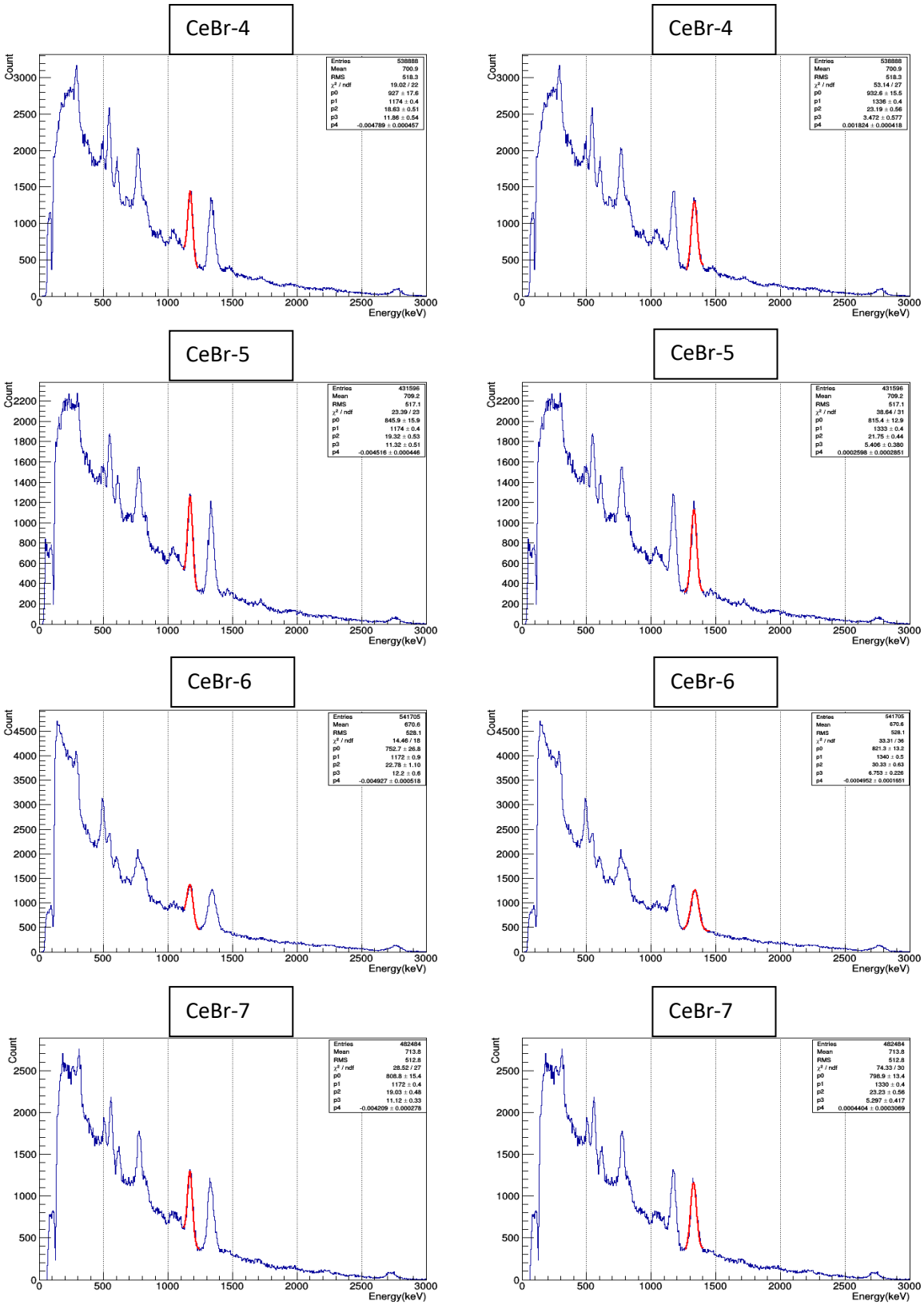
| **$LaBr_3$(Ce)** ***Dedektörü*** | ***$^{60}$Co ~1173.2 keV enerji için Çözünürlük (%)*** | ***$^{60}$Co ~1332.5 keV enerji için Çözünürlük (%)*** |
|---|---|---|
| ***Kristal-0*** | 3.61 | 3.47 |
| ***Kristal-1*** | 3.67 | 3.83 |
| ***Kristal-2*** | 5.47 | 6.83 |
| ***Kristal-3*** | 4.99 | 5.70 |
| ***Kristal-4*** | 3.52 | 3.03 |
| ***Kristal-5*** | 4.56 | 4.04 |
| ***Kristal-6*** | 3.60 | 3.85 |
| ***Kristal-7*** | 3.55 | 3.61 |
| ***Kristal-8*** | 3.17 | 3.04 |
| ***Küme*** | 4.10 | 3.90 |

**$CeBr_3$-$^{60}Co$**



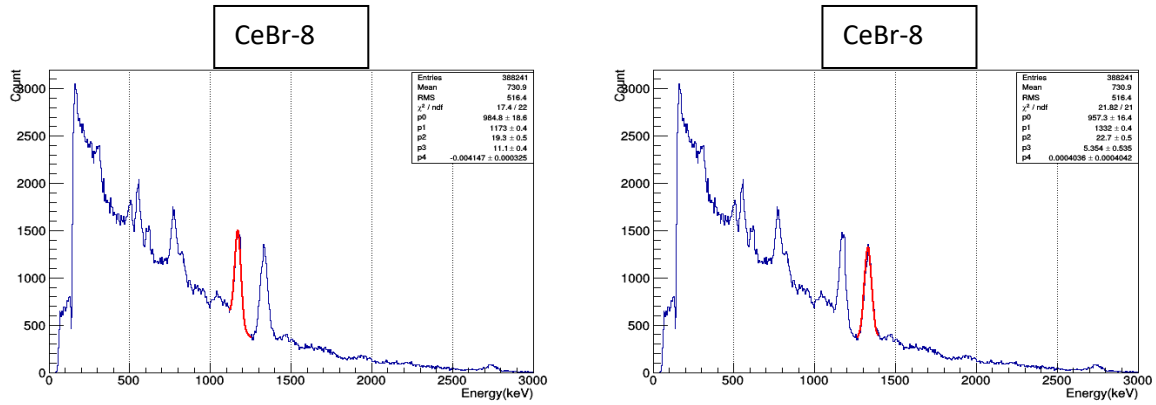

Şekil 85. $CeBr_3$ dedektörü kullanılarak 0,1,2,3 numaralı kristaller için $^{60}Co$ kaynağından elde edilen dağılım. Sol kısım $^{60}Co$ kaynağından elde edilen ve fit edilmiş ~1173.2 keV enerji dağılımını, sağ kısım ise ~1332.5 keV enerji için fit edilmiş dağılımı ifade etmektedir.

**$CeBr_3$-$^{60}Co$**

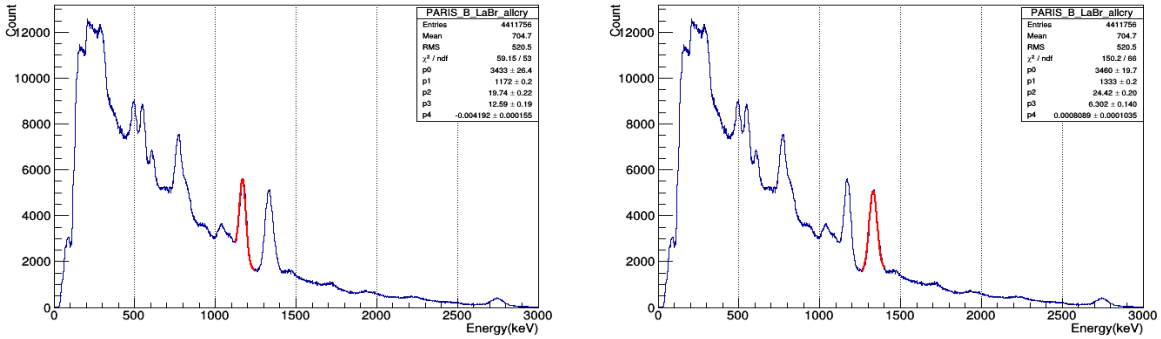



Şekil 86. $CeBr_3$ dedektörü kullanılarak 4,5,6,7 numaralı kristaller için $^{60}Co$ kaynağından elde edilen dağılım. Sol kısım $^{60}Co$ kaynağından elde edilen ve fit edilmiş ~1173.2 keV enerji dağılımını, sağ kısım ise ~1332.5 keV enerji için fit edilmiş dağılımı ifade etmektedir.

**$CeBr_3$-$^{60}Co$**




Şekil 87. $CeBr_3$ dedektörü kullanılarak 8 numaralı kristal için $^{60}Co$ kaynağından elde edilen dağılım. Sol kısım $^{60}Co$ kaynağından elde edilen ve fit edilmiş ~1173.2 keV enerji dağılımını, sağ kısım ise ~1332.5 keV enerji için fit edilmiş dağılımı ifade etmektedir.



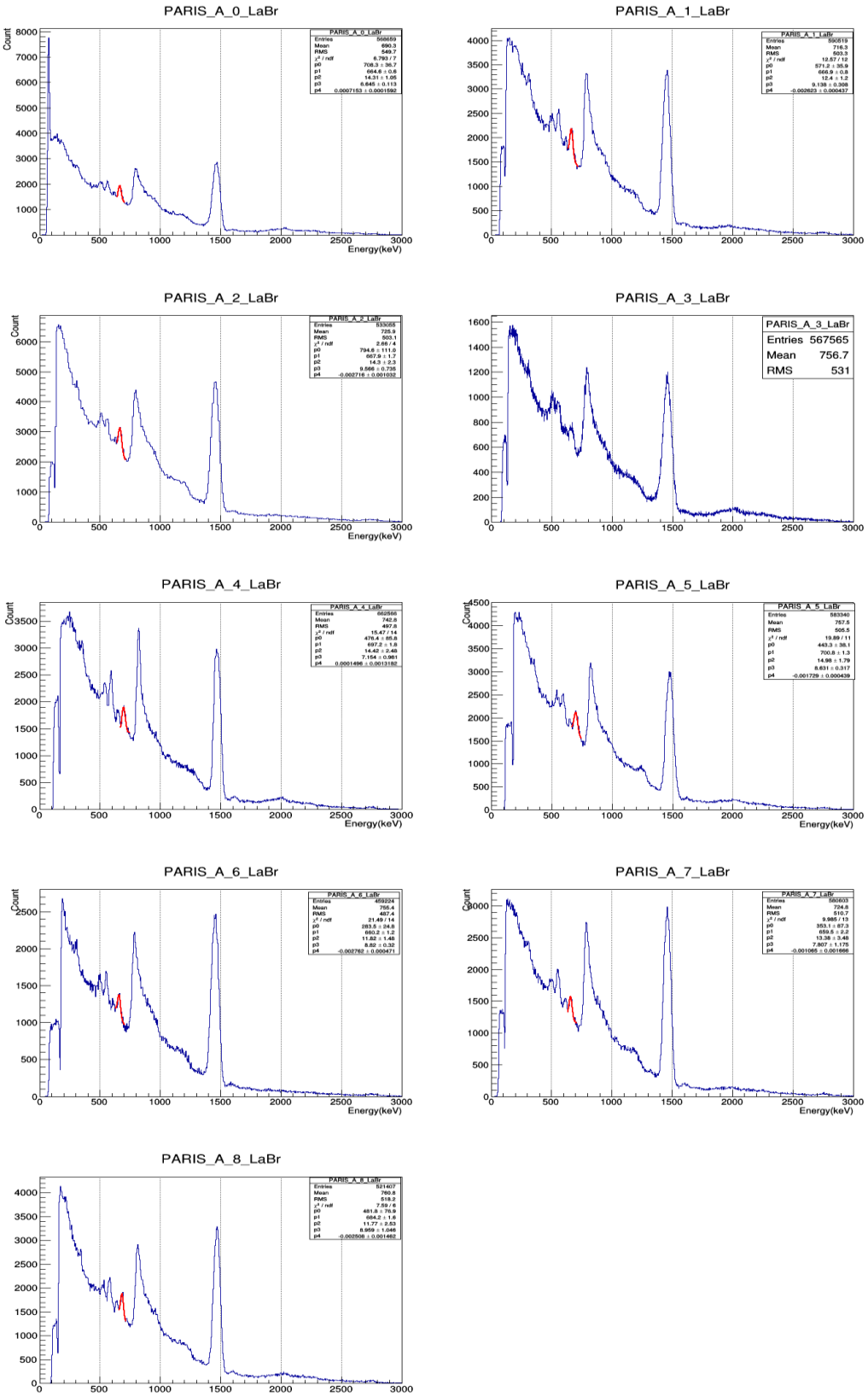

Şekil 88. $CeBr_3$ dedektörü kullanılarak tüm kristaller için $^{60}Co$ kaynağından elde edilen dağılım. Sol kısım $^{60}Co$ kaynağından elde edilen ve fit edilmiş ~1173.2 keV enerji dağılımını, sağ kısım ise ~1332.5 keV enerji için fit edilmiş dağılımı ifade etmektedir.

Tablo 11. $CeBr_3$ dedektörü kullanılarak her bir kristal için $^{60}Co$ kaynağından elde edilen ~1173.2 keV ve ~1332.5 keV enerjileri için hesaplanan enerji çözünürlük değerleri

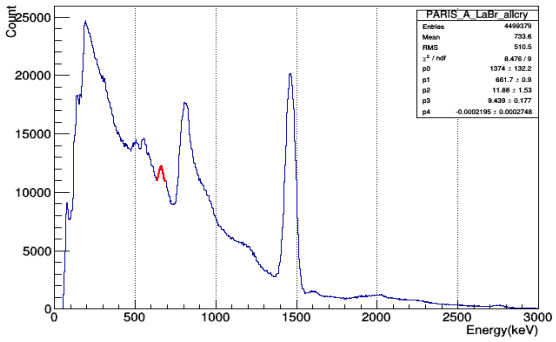
| ***$LaBr_3$(Ce) Dedektörü*** | ***$^{60}Co$ ~1173.2 keV enerji için Çözünürlük (%)*** | ***$^{60}Co$ ~1332.5 keV enerji için Çözünürlük (%)*** |
|---|---|---|
| ***Kristal-0*** | 4.48 | 5.41 |
| ***Kristal-1*** | 3.96 | 4.09 |
| ***Kristal-2*** | 3.78 | 3.56 |
| ***Kristal-3*** | 3.59 | 5.39 |
| ***Kristal-4*** | 3.73 | 4.08 |
| ***Kristal-5*** | 3.87 | 3.83 |
| ***Kristal-6*** | 4.57 | 5.32 |
| ***Kristal-7*** | 3.82 | 4.10 |
| ***Kristal-8*** | 3.87 | 4.00 |
| ***Küme*** | 3.96 | 4.31 |

.

## $LaBr_3(Ce)$-$^{137}Cs$




Şekil 89. $LaBr_3(Ce)$ dedektörü kullanılarak 0,1,2,3,4,5,6,7,8 numaralı kristaller için $^{137}Cs$ kaynağından elde edilen ve 661.7 keV enerji için fit edilmiş dağılımlar gösterilmektedir.

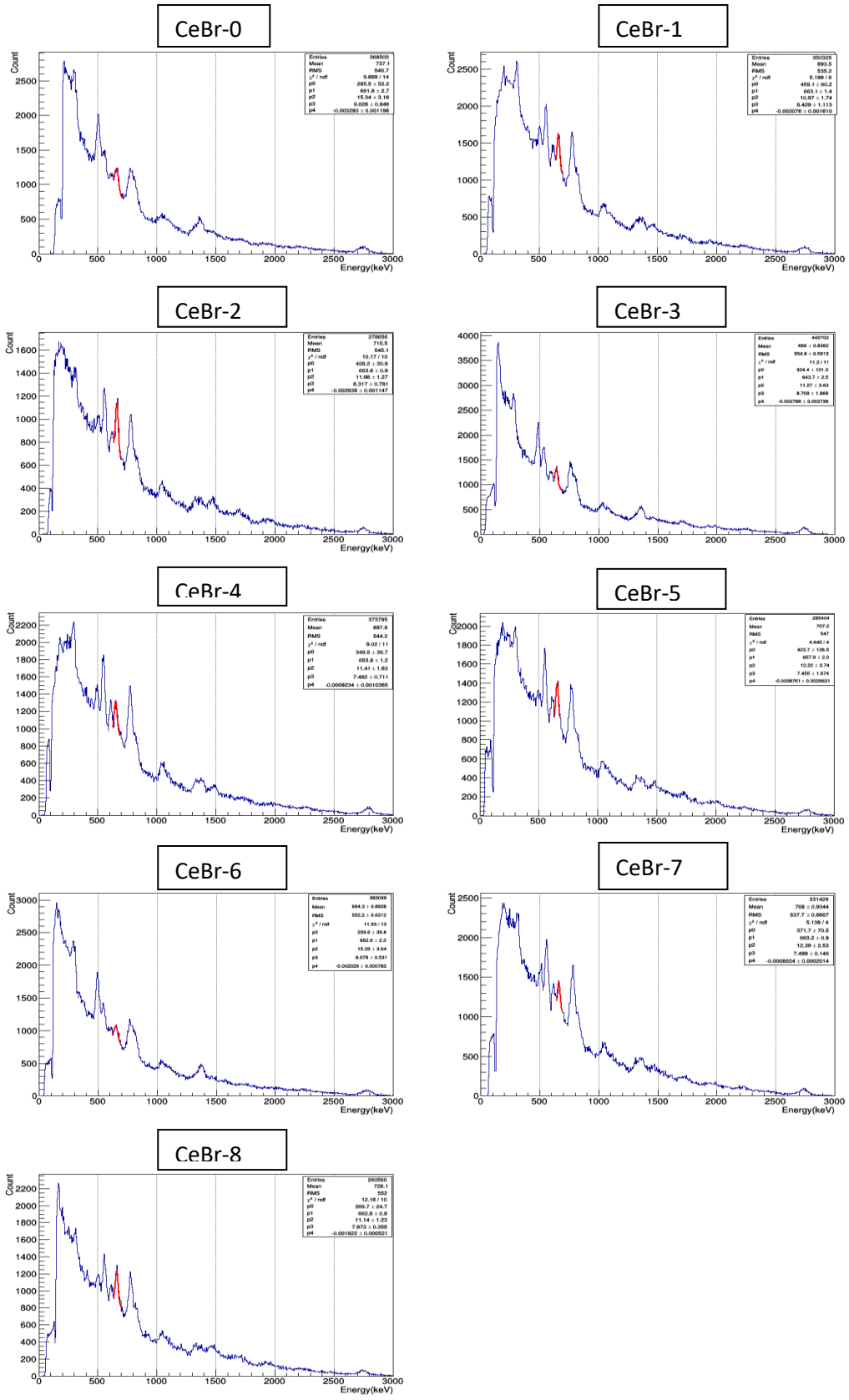



Şekil 90. $LaBr_3$(Ce) dedektörü kullanılarak tüm kristaller eklenerek $^{137}$Cs kaynağından elde edilen ve 661.7 keV enerji için fit edilmiş dağılımlar gösterilmektedir.

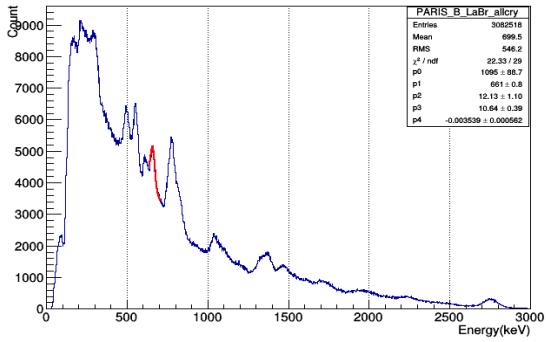
Tablo 12. $LaBr_3$ dedektörü kullanılarak her bir kristal için $^{137}$Cs kaynağından elde edilen ~661.7 keV enerji için hesaplanan enerji çözünürlük değerleri

| ***$LaBr_3$(Ce) Dedektörü*** | ***$^{137}$Cs ~661.7 keV enerji için Çözünürlük (%)*** |
|---|---|
| ***Kristal-0*** | 5.06 |
| ***Kristal-1*** | 4.37 |
| ***Kristal-2*** | 5.03 |
| ***Kristal-3*** | ------ |
| ***Kristal-4*** | 4.86 |
| ***Kristal-5*** | 5.02 |
| ***Kristal-6*** | 4.21 |
| ***Kristal-7*** | 4.77 |
| ***Kristal-8*** | 4.04 |
| ***Küme*** | 4.22 |

**$CeBr_3$-$^{137}Cs$**




Şekil 91. $CeBr_3$ dedektörü kullanılarak 0,1,2,3,4,5,6,7,8 numaralı kristaller için $^{137}Cs$ kaynağından elde edilen ve 661.7 keV enerji için fit edilmiş dağılımlar gösterilmektedir



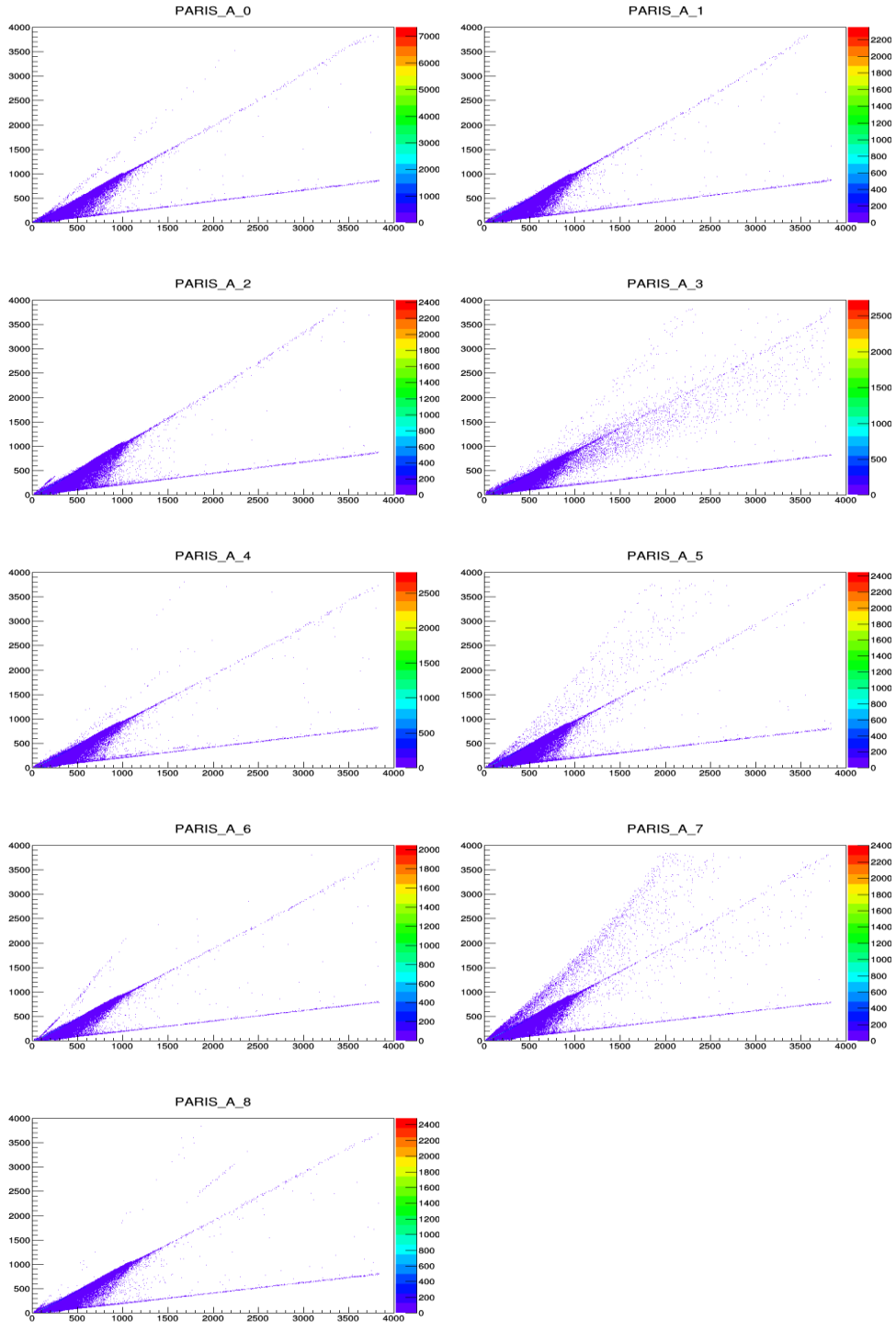

Şekil 92. $CeBr_3$ dedektörü kullanılarak tüm kristaller eklenerek $^{137}Cs$ kaynağından elde edilen ve 661.7 keV enerji için fit edilmiş dağılımlar gösterilmektedir.

Tablo 13. $CeBr_3$ dedektörü kullanılarak her bir kristal için $^{137}Cs$ kaynağından elde edilen ~661.7 keV enerji için hesaplanan enerji çözünürlük değerleri

| ***$CeBr_3$ Dedektörü*** | ***$^{137}Cs$ ~661.7 keV enerji için Çözünürlük (%)*** |
|---|---|
| ***Kristal-0*** | 5.45 |
| ***Kristal-1*** | 3.89 |
| ***Kristal-2*** | 4.24 |
| ***Kristal-3*** | 4.11 |
| ***Kristal-4*** | 4.10 |
| ***Kristal-5*** | 4.36 |
| ***Kristal-6*** | 5.50 |
| ***Kristal-7*** | 4.39 |
| ***Kristal-8*** | 3.95 |
| ***Küme*** | 4.31 |

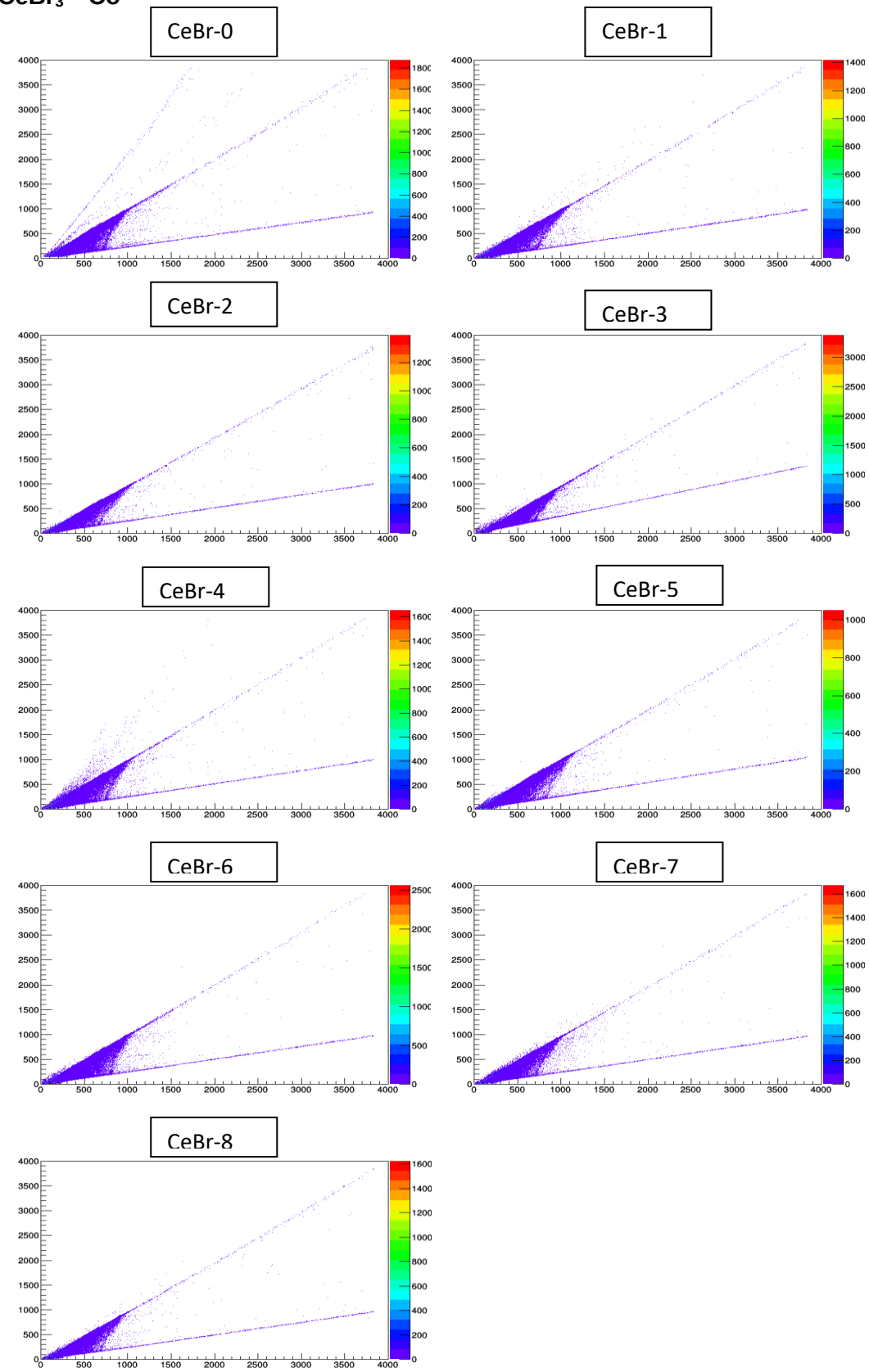
.

**$LaBr_3(Ce)$-$^{60}Co$**



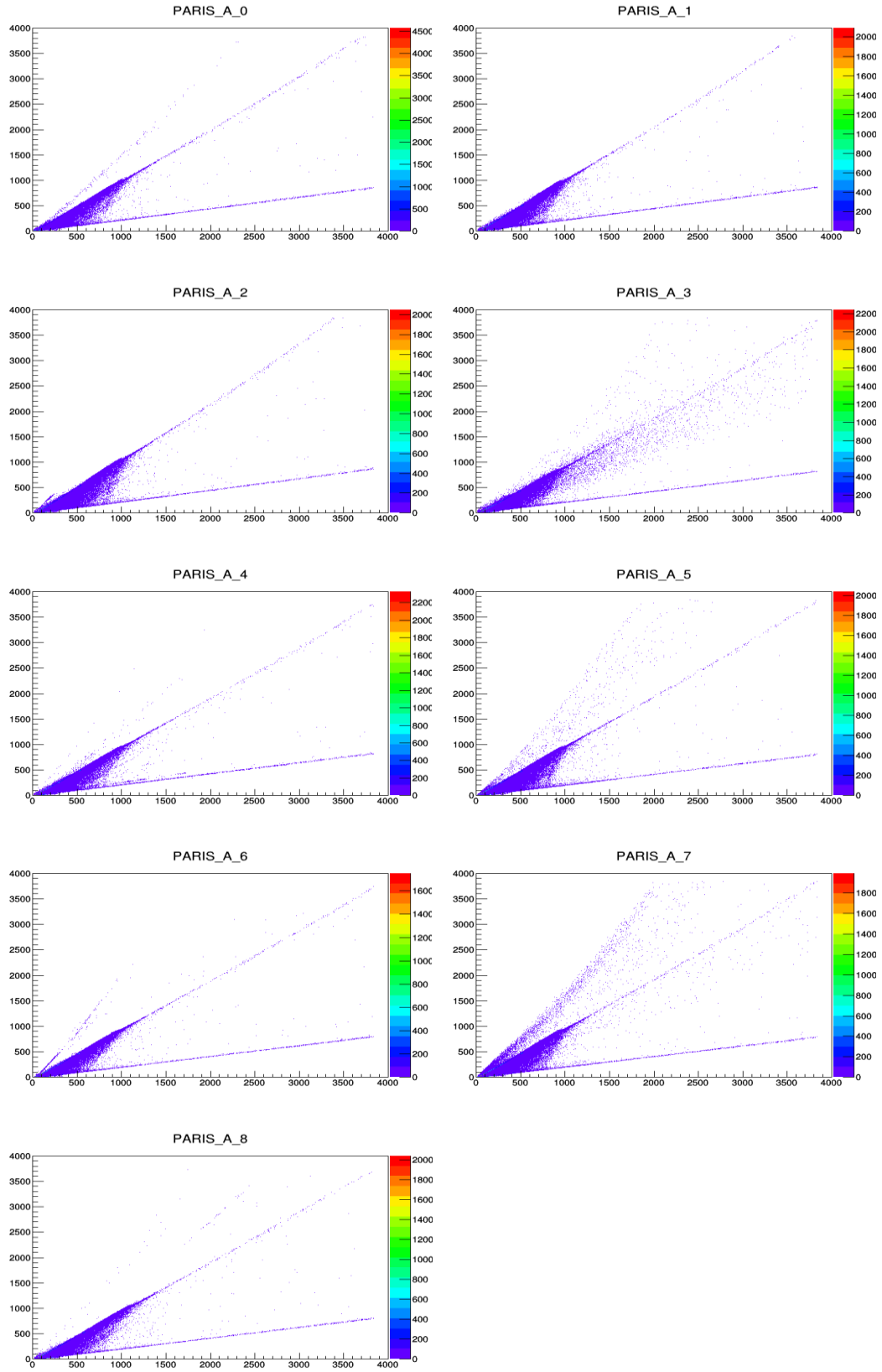

Şekil 93. $LaBr_3(Ce)$ için deneyde kullanılan 0,1,2,3,4,5,6,7,8 numaralı kristallerde $^{60}Co$ kaynağı için elde edilen hızlı (fast-time)-y-ekseni ve yavaş (slow-time)-x-ekseni zaman spektrometresi.

**$CeBr_3$-$^{60}Co$**



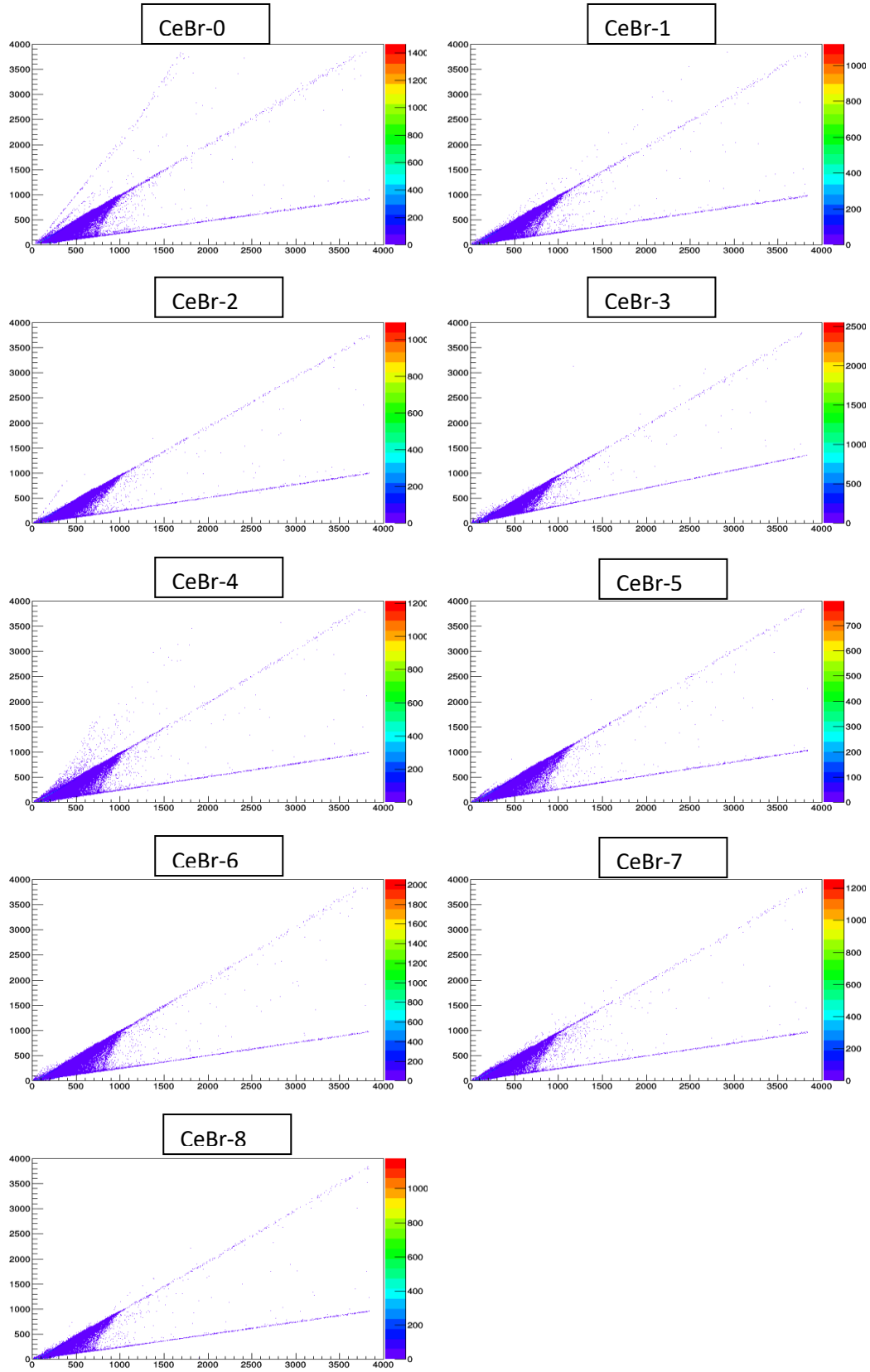

Şekil 94. $CeBr_3$ için deneyde kullanılan 0,1,2,3,4,5,6,7,8 numaralı kristallerde $^{60}Co$ kaynağı için elde edilen hızlı (fast-time)y-ekseni ve yavaş (slow-time)-x-ekseni zaman spektrometresi.

**$LaBr_3(Ce)$-$^{137}Cs$**




Şekil 95. $LaBr_3(Ce)$ için deneyde kullanılan 0,1,2,3,4,5,6,7,8 nolu kristallerde $^{137}Cs$ kaynağı için elde edilen hızlı (fast-time)y-ekseni ve yavaş (slow-time)-x-ekseni zaman spektrometresi.

**$CeBr_3$-$^{137}Cs$**




Şekil 96. $CeBr_3$ için deneyde kullanılan 0,1,2,3,4,5,6,7,8 numaralı kristallerde $^{137}Cs$ kaynağı için elde edilen hızlı (fast-time)y-ekseni ve yavaş (slow-time)-x-ekseni zaman spektrometresi.

# 5. SONUÇ

Proje kapsamında bugüne kadar gerçekleştirilen çalışmalar neticesinde elde edilen sonuçları bu sonuç raporunda sunulan sırayla vermek faydalı olacaktır. Projenin başarı ölçütleri ve risk yönetiminde izlenen metotları ve projenin yaygın etkisini de vurgulayarak bugüne kadar projeden elde edilen çıktılar ve bu çıktıların önemi vurgulanarak proje sonuç kısmı tamamlanacaktır.

Proje başvurusunda projenin amaçları ve projeyi özgün kılan iki temel unsurları aşağıda sırayla hatırlatmak faydalı olacaktır. Bu unsurlardan birincisi;

PARIS dedektör kümesinin karakteristik özelliklerinin araştırılacağı ve dedektör kümesinin nötron-gama ayrımı ve nötron enerjilerinin ilk kez bu projede kullanılacak yöntemle tayin edilecek olması ve bu kapsamda yeni nükleer fizik araştırmalarını yürüterek nükleer yapıyı ortaya koyan nükleer fizik deneylerinin gerçekleştirilmesi ve bu konular üzerine araştırmaların gerçekleştirilecek olmasıdır.

İkinci unsur olarak: bu dedektör sisteminin dijital elektronik ünitelerle veri alımını gerçekleştirmek ve NUMEXO2 dijital elektronik ünitenin PARIS dedektör kümesine adaptasyon çalışmalarını yürüterek bu dijital elektronik ünitenin farklı dedektör sistemlerine entegre edilebileceğini göstermektir.

Sonuç raporunun bu kısmında hem teknik hem de fizik araştırmaları alanında hedeflenen amaçlar doğrultusunda gerçekleştirilen çalışmalardan elde edilen sonuçlar sırasıyla verilecektir.

Farklı dijital elektronik sistemlerin PARIS dedektör kümesi ile birlikte kullanılması ve NUMEXO2 dijital elektronik ünitenin adaptasyonu üzerine gerçekleştirilen çalışmalar ve elde edilenler alt kısımda sıralanacaktır.

Dedektör karakteristiğini ortaya koyan çalışmalar ve bu çalışmalardan elde edilenler ve PARIS dedektör kümesinin ilerleyen zamanlarda özellikle radyoaktif iyon huzmeleri kullanarak üretilebilecek egzotik çekirdek üretimi ile ilgili deneysel çalışmalar ilerleyen kısımlarda sunulacaktır. Ayrıca yüksek enerjili gama ışınlarının ve yüksek enerjili nötronların algılanması konusunda gerçekleştirilen nükleer fizik deneyleri bu deneylerden elde edilen sonuçlar ayrı ayrı başlıklar halinde ilerleyen kısımlarda sunulacaktır.

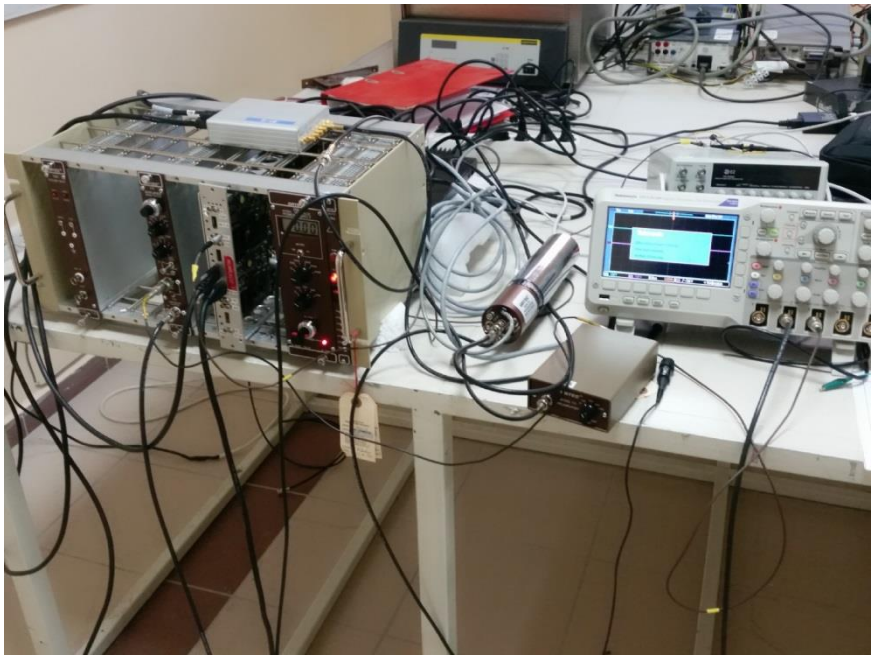
### 5.1 PARIS Dedektör Kümesi Elektronik Ünitesi Çalışmaları

Bugüne kadar gerçekleştirilen çalışmalarda NUMEXO2, CAEN V1730, TNT ve PARIS_Pro elektronik üniteleri PARIS fosfor sandviç ve PARIS dedektör kümesi ile birlikte kullanılarak bu dedektörlerin ve elektronik ünitelerin performansı üzerine Ar-Ge çalışmaları yürütüldü.

İkinci rapor döneminde Uluslararası ortaklı PARIS proje yürütücüsü Prof. Dr. Adam Maj'ın PARIS projesinde kullanılan dedektörler için bundan sonra kullanılacak elektronik ünitelerle ilgili gönderdiği yazıda, PARIS projesi için iki dijital elektronik NUMEXO2 ve CAEN V1730 üniteleri üzerinde Ar-Ge faaliyetlerinin paralel yürütüleceği belirtilmişti. Her iki dijital elektroniğin önümüzdeki dönemde daha yaygın bir şekilde test edileceği belirtilmiştir. Bu konuda proje ortağı olarak Türkiye'den, Niğde grubunun projenin bu çalışmalara yaptığı katkıların memnuniyet verici olduğu da bu yazıda belirtilmiştir.

Proje kapsamında gerçekleştirilen önemli çalışmalardan biri de NUMEXO2 ünitelerinden bir tanesinin Niğde Üniversitesi, Fizik bölümü bünyesinde bulunan Nükleer Veri Analiz Laboratuvarında oluşturulan elektronik test merkezinde aktif olarak kullanılmasıdır. Dr. Gilles de France ve elektronik mühendis Michel Tripon Niğde (Niğde Ömer Halisdemir) Üniversitesine Ocak 2017 döneminde gerçekleştirdikleri ziyaret sırasında birlikte geliştirdiğimiz bu elektronik ünitenin üniversitemizde mevcut olan NaI(Tl) kristali ile birlikte test edilmesini ve osiloskop üzerinden NaI(Tl) dedektöründen gelen sinyalin üretilmesini sağladık. Böylece NUMEXO2 elektroniğinin bir dedektör ile birlikte veri alımının gerçekleştirilmesi sağlandı. Mevcut NUMEXO2 ünitesinin EXOGAM2 dedektörü dışında farklı dedektörle birlikte kullanılmasını sağlamak için ünite üzerinde yazılımsal değişiklikler gerçekleştirildi. NUMEXO2 ünitesi üzerinde VHDL yazılım dili üzerinde yapılan değişiklikler proje sonuç raporu ekinde üst seviye kontrol ve koordinasyon programı halinde verildi.

Bu değişikliklerin gerçekleşebilmesi için FPGA ve VHDL konularında deneyimleri olan Fransız ve İspanyol elektronik mühendislerden destek alındı. Niğde Nükleer Veri Analiz laboratuvarı bünyesinde NUMEXO2 dijital elektroniği ve NaI(Tl) dedektörü üzerinde yürütülen Ar-Ge çalışmaları Şekil 97'de gösterilmiştir. Kurduğumuz bu düzenek ile NUMEXO2 dijital elektroniğin başka dedektörlere adaptasyonu için yürütülecek Ar-Ge çalışmalarına hizmet etmesi sağlandı ve NUMEXO2 içerisinde kullanılan FAD mezzanine elektronik ünitelerin kalite kontrol testleri ve arıza tespitlerinin de yapılmasını sağlayacak şekilde hizmet veren test merkezi oluşturuldu. Bu bağlamda, EXOGAM2 dedektörleri için kullanılacak 32 NUMEXO2 ünitesi, NEDA dedektörleri için ilk etapta kullanılacak 30 NUMEXO2 ünitesi ve PARIS dedektörleri için ilk etapta kullanılacak 30 NUMEXO2 ünitesinde kullanılacak olan FADC'ler için üniversitemizde bir kontrol ve arıza tespit merkezi oluşturuldu.



Şekil 97. Niğde Nükleer Veri Analiz Laboratuvarında NUMEXO2 ve NaI ve PARIS dedektörü için yürütülen Ar-Ge çalışmalarında kullanılan deney düzeneği.

Daha önce TUBİTAK tarafından desteklenen 210T048 nolu proje kapsamında alınan NUMEXO2 ünitelerinden bir tanesinin üzerinde gerçekleştirilen çalışmalarla PARIS dedektörlerine adapte edilmesi için gereken yazılımsal değişiklikler bu proje döneminde gerçekleştirildi.

Bu proje döneminde geliştirilen yazılımda **(Ek-1) "TOP_LEVEL_SOMME_IPs.VHD"** farklı dönemlerde gerçekleştirilen farklı versiyonlardaki değişiklikler programın başında yer almaktadır. Program üzerinde tamamlanması gereken kullanıcı dostu ara yüze sahip kısımlar ile ilgili çalışmalar hala devam etmektedir. Geliştirilen yazılımın PARIS dedektörleriyle birlikte kullanılacak NUMEXO2 ile gerçekleştirilmesi gereken test deneyler için gereken gerçek iyon huzmesi deneyleri ilerleyen zamanlarda Polonya, Krakow Nükleer araştırma merkezinin uygun olduğu dönemlerde sağlanarak bu merkezlerde deneyler yürütülecektir.

NUMEXO2 dijital elektronik ünitenin GANIL'de nötron algılamaları için kullanılacak olan NEDA dedektör sistemleri için veri kayıt tanımlamaları kullanılır hale getirildi. Bu veri kayıt tanımların bir benzerinin PARIS dedektör sistemlerinde kullanılan fosfor sandviç dedektörler için de yapılması gerekmektedir. PARIS dedektörleri EXOGAM2 dedektörlerine kıyasla Şekil 29'da gösterildiği gibi daha az bileşene, ön kısımda $LaBr_3$(Ce) ve arka kısımda NaI(Tl) kristallerine sahip olduğu için Tablo1'de verilen tanımlamalar kadar çok tanımlama yapmaya gerek yoktur. İki kristal için veri alımı sırasında istenen tetikleme koşulunu sağlayacak formatta veri alımı yapacak şekilde veri formatı belirlemesi yakın gelecekte yapılacaktır.

### 5.2 PARIS Dedektör Kümesi Almanya, ELBE Deneysel çalışmaları

Bu deneyde 20 MeV enerjiye sahip olan elektron demeti Şekil 30'da gösterilen düzenek ile Bremsstrahlung fotonlarına dönüştürüldü. Şekil 31'de gösterilen düzenekte gösterildiği gibi $^{11}B$ hedefinin ışınlanması ile $^{11}B(p, \gamma)^{12}C$ reaksiyonu ile $^{12}C$ çekirdeğinin 15.1 MeV'lik γ-enerjili piki ve $^{11}B$ çekirdeğinin 2.125, 4.445, 5.020, 7.285 ve 8.920 MeV enerjili γ-ışını piklerinin analizinin gerçekleşmesi deney iki tam gün boyunca sürdürüldü.

Deneyde kullanılan fosfor sandviç dedektörlerden elde edilen sinyallere dahili ve harici ekleme işlemlerinin nasıl yapıldığı 4.1.2 kısmında detaylı olarak verildi ve elde edilen sonuçlar 4.1.3 kısmında Tablo 2'de listelendi. Dahili ve harici ekleme süreçlerinin dedektörlerin enerji çözünürlüğü üzerine katkıları bu tabloda kıyaslandı. Bu merkezde gerçekleştirilen deneysel çalışmalardan elde edilen verilerin analiz edilmesiyle ortaya çıkarılan sonuçlar aşağıdaki şekilde listelenebilir;

- ELBE tesislerinin PARIS dedektör kümesinin performansını ortaya koyacak sonuçlarını elde edebilmek için faydalı bir araştırma merkezi olduğu,
- Kurulan deney düzeneğinin hedeflenen amaçları elde etme açısından iyi bir deney düzeneği kurulumunun gerçekleştirildiğini,
- BaFPro analog elektronik sistemiyle deney verilerinin sorunsuz bir şekilde elde edilebildiği
- Bu elektroniğin ileride kullanılması düşünülen dijital elektronik ünitelerin geliştirilmesi için yürütülen Ar-Ge faaliyetleri tamamlanıncaya kadar rahatlıkla kullanılabileceği
- PARIS dedektör kümesi için elde edilen verilerin analizi için ilk kez bir veri analiz algoritmasının geliştirilmesini olanak sağladığını söylemek mümkündür.

### 5.3 PARIS Fosfor sandviç dedektörü Lineerlik, Verimlilik, Enerji Çözünürlüğü ve Zaman Yanıtları Deneysel Çalışmaları

PARIS fosfor sandviç dedektörünün R7723-10 Hamamatsu foto tüpüyle birlikte kullanıldığında $LaBr_3(Ce)$ ve NaI(Tl) için sırasıyla birbirinden oldukça farklı 16 ns ve 250 ns bozunma zamanlarına sahip olduğu görülmektedir. Kullanılan foto tüpün daha yüksek enerjili gama-ışınlara maruz kalan dedektörlerle birlikte kullanılması durumunda hem dedektörün hem de foto tüpün performansının belirlenebilmesi için gerçekleştirilen deneysel çalışma için kullanılan farklı radyoaktif kaynakların listesi ve bu kaynaklardan elde edilen gama-pikleri ve her bir radyoaktif kaynağın aktifliği 4.2.1 kısmında Tablo 3 ve Tablo 4'te listelendi. Kullanılan dedektörlerde farklı dijital elektronik üniteler CAEN V1720e ve V1751 ile her bir dedektör için kaydedilen yüksek enerjili gama atmaları, dedektörün lineerliği, sayım hızı, dedektör kazancı,

dedektörün cevap süresi ve son olarak enerji çözünürlüğü ve zaman yanıtları konusunda yapılan çalışmalardan elde edilen sonuçlar 4.2 kısımlarında detaylı olarak verildi.

Bu sonuçlardan bizi en çok ilgilendiren enerji çözünürlüğü değerlendirildiğinde; $E_{gama}$=4.4 ve 11.77 MeV de elde edilen enerji çözünürlük değerleri sırasıyla $LaBr_3$(Ce) için %2.9 ve %2.5 ve NaI dedektörü %2.8 ve %2.3 olarak elde edildi. Zaman yanıtları ya da zaman çözünürlüğü açısından değerlendirme yapıldığında ise; hem dijital hem de analog veri alımında birbirine yakın değerler verdiği görülmektedir (FWHM-dijital~457±3 ps ve FWHM-analog~454±6 ps)

### 5.4 Nisan-2016 Deneysel Çalışmaları

LICORNE nötron kaynağı kullanarak gerçekleştirilen bu deneysel çalışma Nisan 2016'da Fransa, Paris şehri Orsay nükleer araştırma merkezinde gerçekleştirildi. Gerçekleştirilen bu deney ile fisyona uğrayan $^{239}$U, fizyon fragmentlerine ayrıldı. Nötron enerjisinin fonksiyonu olarak $^{238}$U'nun hızlı nötronlarla uyarılmış fizyonu hakkında deneysel veri pek bulunmadığı için bu deney yardımıyla elde edilen bilginin geleceğin 4. nesil hızlı reaktör konseptlerinin temel fisil (bölünebilir) izotopu olan $^{238}$U hakkında önemli bilgiler elde edilmesi sağlandı. Orsay nükleer araştırma merkezindeki Tandem hızlandırıcısından çıkan 33-58 MeV enerjili $^{11}$B bombardıman parçacıkları her biri 2 cm kalınlıktaki LICORNE gaz hücreleri üzerine düşürülerek tek-enerjili nötronların üretilmesi sağlanan bu deneysel çalışmada IPN Orsay tandemin benzersiz kabiliyeti olan yoğun $^{11}$B ışınları üreterek ters p($^{11}$B,$^{11}$C)n tepkimesi gerçekleştirildi. Bu deneyden elde edilen geri bildirimler sayesinde yeni deney düzenekleri için aşağıda listelenen iyileştirmeler gerçekleştirildi:

1) LICORNE'de daha önce kullanılan polipropilen hedef (istenmeyen nötron arka planını bastırmak ve akı-sinyal gürültü oranını iyileştirmek için) yeni geliştirilen gaz hücreleri ile değiştirilerek kullanıldı.
2) $^{11}$B akımının, çevrimiçi nötron akısı ölçümü ile çevrimiçi ölçümü nötron ışını-enerji çözünürlüğü, akısının gerçek zamanlı gözlenmesine olanak sağlandı.
3) İyonizasyon haznesi, bütün nötron konileri kullanılarak hedef üzerinde olabildiğince büyük bir akı elde etmek için nötron kaynağına olabildiğince yakın tutuldu.
4) "saf" $LaBr_3$(Ce) dedektörlerinden elde edilen enerji çözünürlüğü ile daha yüksek gama verimine sahip PARIS küme dedektörleri sayesinde daha iyi düzeyde elde edildi.
5) FASTER elektronik veri kaydetme sistemi yardımıyla (http://faster.in2p3.fr) zamanlama çözünürlüğünde ileri düzeyde iyileştirildi. Böylece hızlı eş zamanlı veri alımı imkânı elde edildi.

### 5.5 Haziran 2016 Deneysel Çalışmaları

Yine Fransa, Orsay Nükleer Araştırma merkezi, IPN-ALTO'da gerçekleştirilen bu çalışmada aşağıda listelenen fizik problemlerinin araştırılması amaçlanmıştır.

1- füzyon-fizyon ve yarı fizyon arasındaki rekabet
2- füzyon buharlaşma ve füzyon-fizyon arasındaki rekabet
3- Jakobi şekli nükleer geçişler
4- Nötron zengin çekirdeklerde sıcak dev dipol momentlerinin yapısı

Araştırılması amaçlanan bu fizik gözlenebilirlerinin aynı anda gözlenebilmesi ve ölçülebilmesi için özellikle çok hızlı gerçekleşen fizyon, buharlaşma ürünleri, belirgin dev dipol rezonans gama-ışınları için iyi bir algılama sistemine ihtiyaç duyulmaktadır. İhtiyaç duyulan sistem için PARIS dedektör kümesi+ORGAM+CORSET algılayıcıları birlikte kullanıldı. Birlikte kullanılan bu sistem sayesinde yukarıda sıralanan fiziksel araştırmaları gerçekleştirme imkânı elde edildi. Bunun için $^{32}S+^{192}Os$ reaksiyonu kullanıldı.

Üç spektrometrenin birlikte kullanılmasıyla gerçekleştirilen bu deney sayesinde bombardıman parçacıklarının hedefle buluşma ve reaksiyon oluşturma anını ve dedektörlerin performanslarını aynı anda kontrol edebilme özelliği ilk kez bu çalışmayla gerçekleştirildi. Deney düzeneği ile ilgili detaylı bilgi ve bu deneyin sağlamış olduğu yararlar ve bu deneyden beklenen hedefler aşağıda sırasıyla şu şekilde özetlenebilir;

1. Bu deneyden ele edilen bilgi ışığında, ilerleyen zamanlarda gerçekleştirilmesi planlanan benzer deneyler için optimizasyon sağlanarak spektrometrelerin verimliliği ortaya konuldu.
2. ORGAM, PARIS ve CORSET spektrometreleri arasında eşzamanlı ölçümleri ilk kez bu deney aracılığı ile gerçekleştirildi ve eş zamanlı veri kaydının nasıl gerçekleştirileceği bu deney yardımıyla tespit edildi.
3. Dev dipol rezonanslardan kaynaklanan gama-ışınlarının ölçülmesi bu deney bünyesinde kullanılan farklı spektrometreler yardımıyla sağlandı.
4. Fizyon ürünlerine benzer reaksiyon ürünlerinin kütle dağılımının oluşturulması bu deneyden elde edilen verilerin analizleriyle ilk kez ortaya çıkarıldı.

Bu deney yardımıyla reaksiyon oranının tespiti, gözlenebilen tüm gama radyasyonlarının kullanılan spektrometreler tarafından algılanması sayesinde bu spektrometrelerin verimliliğinin belirlenebilmesine imkân sağladı. Böylece ileride gerçekleştirilecek benzer deneyler için bir veri bankası oluşturdu. Gerçekleştirilen bu deneysel çalışmalardan elde edilen verilerin analizleri tamamlanmak üzere olup bilimsel yayınlara dönüştürüldüğünde proje çıktısı olarak sunulacaktır.

### 5.6 Kasım 2016 Deneysel Çalışmaları

Bu deneyde LICORNE nötron kaynağı tarafından üretilen hızlı nötronlar yardımı ile indüklenecek $^{239}$Pu(n,f) reaksiyonu sonucu açığa çıkacak gama tayfının, ortalama enerjisinin ve gama çok katlılığın ölçülmesi amaçlandı. Burada gerçekleştirilen deney düzeneği 2013'te $^{235}$U ve $^{238}$U'un hızlı nötronlarla indüklenmiş ayrışma deneylerinden LICORNE deneyinden bu zamana kadar elde edilen bilgi birikimi doğrultusunda değiştirilerek geliştirildi. İlk deneyden elde ettiğimiz ve bize yardımcı olan geri dönütleri tekrar sıralamak faydalı olacaktır:

1) Yüksek nötron akısından deneyi devam ettirebilmek gereken değişimleri sağlamak için birçok polypropylene (PP) hedefi hazırlanmıştır.
2) Deneysel koşullar zor olmasına rağmen optimum hedef kalınlığına ulaşıldı.
3) $^{7}$Li çevrimiçi ölçümlerine nötronların da çevrimiçi ölçümleri eklendi.
4) İyonlaşma odası nötron kaynağına daha yakın bir yere konularak daha yüksek nötron akısı sağlandı.
5) $LaBr_3$(Ce) ile gama algılama verimi iki katına çıkarılmıştır.
6) $LaBr_3$(Ce)'nin zaman çözünürlüğü ile hedef algıç uzaklığı 20-25 cm olarak belirlendi.

Bu deney düzeneğinde kullanılan $BaF_2$ sintilatörlerinin performansı ile PARIS küme dedektörlerin benzer deneylerde birlikte kullanılması durumunda her iki dedektör karşılaştırması yapılacaktır.

### 5.7 Nisan 2017 Deneysel Çalışmaları

PARIS projesinde kullanılan $LaBr_3$(Ce)+NaI(Tl) fosfor sandviç dedektörlerini üreten Saint Gobain firmasının bu tür fosfor sandviç dedektörlerini üretimi aşamasında bazı sorunlar yaşaması ve dedektör üretim maliyetinin artması nedeniyle üyesi olarak görev yaptığım PARIS projesi İzleme Komitesi 2016 yılı sonunda bir toplantı gerçekleştirerek bir dizi kararları tutanak altına aldı. Bu toplantı tutanağı ve kararlarını içeren "Minutes of the PARIS Steering Committee meeting" metin (Ek-Proje İzleme Komitesi Tutanağı) ekte sunulmuştur. Fosfor sandviç dedektör için kullanılan $LaBr_3$(Ce) kristali yerine $CeBr_3$ sintilatör malzemesinin alternatif olarak kullanılması ve ileride oluşturulacak PARIS dedektör kümelerinde $CeBr_3$+NaI(Tl) şeklinde yeni fosfor sandviç dedektörler şeklinde kullanma potansiyelinin araştırılması kararlaştırıldı. Bu doğrultuda Scionix firmasından $CeBr_3$+NaI(Tl) fosfor sandviç dedektörlerin alımına karar verildi. PARIS projesinin izleme komitesinin bir üyesi olarak alınan bu karar aşamasında ben de bu karar doğrultusunda olumlu görüşlerimi belirttim.

Bu amaç doğrultusunda proje kapsamında alınan $CeBr_3$+NaI(Tl) fosfor sandviç dedektörlerle oluşturulan PARIS dedektör kümesinin Macaristan Debrecen, ATOMKI nükleer araştırma merkezinde 3-10 Nisan 2017 tarihleri arasında performans testlerinin gerçekleştirilmesi planlandı, fakat bu tarihlerde deneyin gerçekleştirileceği Macaristan, Debrecen şehrindeki ATOMKİ araştırma merkezinde bulunan hızlandırıcı sisteminde meydana gelen arıza nedeniyle bu çalışma gerçekleştirilemedi ve daha sonraki bir tarihe ertelendi. CeBr3 kristalinin PARIS dedektör kümesinde fosfor sandviç dedektör olarak kullanılmasına karar verilmeden önce bu kristal malzemenin performansı üzerine yapılan çalışmalar ve bu çalışmalardan elde edilen sonuçlar 4.6.1 kısmında detaylı olarak verildi.

### 5.8 Temmuz 2017 Deneysel Çalışmaları

Bu deneysel çalışmanın temel amacı iki başlıkta izah edildi. Birincisi nükleer yapı fiziği alanında araştırılacak izotopların nükleer yapı özelliklerini (ortalama ömür, yarı ömür vb.) tayin etmek. İkincisi ise teknik açıdan deneysel çalışmada kullanılan PARIS fosfor sandviç dedektörlerin performansını araştırmak.

Bu deneysel çalışmanın fiziksel amacı: $^{18}O$ iyon hüzmesinin $^{238}U$ hedefi üzerine düşürülmesiyle gerçekleştirilen çoklu nükleon transferi reaksiyonu ile nötron zengin B, C, N, O ve F izotoplarının uyarılmış seviyelerinin üretmek ve bu seviyelerin ortalama ömürlerini ve yarı ömürlerini ölçmektir. Burada amaçlanan hedeflere ulaşılması için uluslararası proje ortaklarından Polonya, Krakow grubu ve İtalya, Milano grubu görevlendirildi.

Deneyin teknik amacı ise: $LaBr_3$(Ce)+NaI(Tl) fosfor sandviç dedektörleri ve $CeBr_3$+NaI(Tl) dedektörleriyle oluşturulmuş her biri dokuz dedektörden oluşmuş iki dedektör kümesinin AGATA+PARIS+VAMOS spektrometreleri şeklinde birlikte kullanarak PARIS dedektör kümelerinin performansını ortaya çıkarmaktır. Burada amaçlanan hedeflere ulaşılması için ise Türkiye, Niğde grubu ve Polonya, Krakow grubu görevlendirildi.

Deneyin teknik amacı doğrultusunda $LaBr_3$(Ce)+NaI(Tl) fosfor sandviç dedektörleri ve $CeBr_3$+NaI(Tl) dedektörleriyle oluşturulmuş her biri dokuz dedektörden oluşmuş iki dedektör kümesinin AGATA+PARIS+VAMOS spektrometreleri şeklinde birlikte kullanarak PARIS dedektör kümelerinin performansı araştırıldı. Bu deney sırasında elde edilen verilerin analizi Türkiye ve Polonya grupları arasında paylaştırıldı. Bu deneysel çalışmada iki dedektör kümesinde kullanılan her bir fosfor sandviç dedektörün deney öncesinde kalibrasyon amacıyla $^{60}Co$ radyoaktif kaynağı deney sonrasında ise $^{60}Co$ ve $^{137}Cs$ radyoaktif kaynaklar kullanılarak elde edilen veriler analiz edilerek her bir dedektörün enerji çözünürlüğü ve dedektör kümesinin toplam enerji çözünürlüğü belirlendi.

Bir önceki bölümün 4.7.2 kısmında Şekil 80'de gösterilen dedektör kümesinde gösterildiği gibi sıralanan $LaBr_3(Ce)$ ve $CeBr_3$ dedektörlerinin her biri için $^{60}Co$ (1173.2 keV ve 1332.5 keV) ve $^{137}Cs$ (661.7 keV) radyoaktif kaynaklarından elde edilen enerji pikleri ayrı ayrı fit edilerek her bir kristalin belirtilen enerji pikleri için enerji çözünürlükleri ortaya çıkarıldı.

Tablo 10'da $LaBr_3(Ce)$ dedektörlerinin $^{60}Co$ radyoaktif kaynağının 1173,2 keV ve 1332,5 keV enerjili pikleri için her bir kristalin ve dedektör kümesinin enerji çözünürlüğü değerleri listelendi. Kristal-2, Kristal-3 ve Kristal-5 için elde edilen enerji çözünürlüğü değerlerinin diğer kristal için elde edilen değerlerden biraz yüksek olduğu tespit edildi.

Tablo 11'de ise $CeBr_3$ dedektörlerinin $^{60}Co$ radyoaktif kaynağının 1173,2 keV ve 1332,5 keV enerjili pikleri için her bir kristalin ve dedektör kümesinin enerji çözünürlüğü değerleri listelendi. Bu tablo incelendiğinde; Kristal-0 ve Kristal-6 için elde edilen enerji çözünürlüğü değerlerinin diğer kristal için elde edilen değerlerden biraz yüksek olduğu tespit edildi.

Tablo 12'de $LaBr_3(Ce)$ dedektörlerinin $^{137}Cs$ radyoaktif kaynağının 661,7 keV enerjili piki için her bir kristalin ve dedektör kümesinin enerji çözünürlüğü değerleri listelendi. Kristal-0, Kristal-2, Kristal-4, Kristal-5 ve Kristal-7 için elde edilen enerji çözünürlüğü değerlerinin diğer kristal için elde edilen değerlerden biraz yüksek olduğu tespit edildi. Kristal-3 için ölçüm yapabilecek spektrum üretilemediği için bu kristal için her hangi bir değer verilemedi.

Tablo 13'de $CeBr_3$dedektörlerinin $^{137}Cs$ radyoaktif kaynağının 661,7 keV enerjili piki için her bir kristalin ve dedektör kümesinin enerji çözünürlüğü değerleri listelendi. Kristal-0 ve Kristal-6 için elde edilen enerji çözünürlüğü değerlerinin diğer kristal için elde edilen değerlerden biraz yüksek olduğu tespit edildi.

Gerçekleştirilen analiz ve ölçümlerden elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde. Elde edilen bu çözünürlük değerlerinin ortalama olarak daha önce her kristalin bağımsız olarak kullanılması durumunda elde edilen enerji çözünürlüğü değerleriyle uyumlu olduğu söylenebilir, elbette dikkat çekilen kristaller hariç. Burada dikkat çekilen kristallerde hızlı yaşlanma olarak tabir edeceğimiz problem kaynaklı bir performans düşüklüğü gözlenmiş olabileceği gibi deney düzeneğinde VAMOS'tan kaynaklanan manyetik alan etkileri de göz ardı edilmemelidir. Fakat bunun net olarak ifade edilebilmesi için bu deneyde kullanılan küme dedektör konfigürasyonun aynı tarzda korunarak başka nükleer araştırma merkezlerinde ya da aynı merkezde tekrar test edilmesi gerekmektedir. Bunu gerçekleştirmek mümkün, fakat hali hazırda önerilen ve kabul edilen deney önerilerimiz için Fransa, GANIL ve Fransa, Orsay nükleer araştırma merkezlerinin deneyi önerilen deneylerimizi gerçekleştireceğimiz zaman periyodunu netleştirmeleri gerekmektedir.

Bugüne kadar PARIS dedektör kümeleri kullanılarak gerçekleştirilmesi planlanan farklı nükleer yapı fiziği deney önerileri farklı nükleer araştırma merkezlerine sunuldu. Bu deneylerin neleri araştıracağı, hangi spektrometreleri kullanacağı ve hangilerinin kabul edildiği aşağıda listelenmiştir.

**Fransa, Orsay nükleer araştırma merkezi için sunulan ve kabul edilen deney önerileri:**

Tek PARIS Küme Dedektör Kullanılarak gerçekleştirilen deneyler(2016)

1- Prompt gamma and neutron emission for $^{238}$U fast neutron induced fission as a function of incident neutron energy – (*Nisan 2016'da gerçekleştirildi)*
2- Prompt γ-rays as a probe of nucleardynamics – (*Haziran 2016'da gerçekleştirildi)*

Dört PARIS Küme Dedektör Kullanılarak gerçekleştirilecek deneyler (2018-2019)

1- Measurement of the super-allowed branching ratio of $^{10}$C

2- A new probe of alpha-cluster structure in $^{12}$C

3- Coulomb Excitation of $^{14}$C

4- Coulomb excitation of super-deformed band in $^{40}$Ca

**Fransa, GANIL nükleer araştırma merkezi için sunulan ve kabul edilen deney önerileri:**

1- Lifetimes in A=18 region [PARIS (İki PARIS dedektör kümesi), *AGATA, VAMOS, Plunger] (Temmuz 2017'de gerçekleştirildi)*

2- Investigation of a high spin structure in $^{44}$Ti via discrete and continuumγ-spectroscopy [*AGATA+ PARIS* (Dört küme dektör) ve *DIAMAND]*-(2018-2019)

3- Gamma decay from near-threshold states in 14C: a probe of clusterization phenomena in open quantum systems", [AGATA (4 Küme) , PARIS, NEDA, DIAMAND, DSSD]-(2018-2019)

**Polonya, Krakow nükleer araştırma merkezi için sunulan ve kabul edilen deney önerileri:**

1- Studies of resonance states in nuclei using high-energy proton beam in p,p' reactions [HECTOR, PARIS, KRATTA]

2- Investigations of (p,2p) reactions in order to identify deep single-particle proton-hole states [HECTOR, PARIS, KRATTA]

3- Gamma-decay of GDR in proton induced fusion-eveporation reactions [HECTOR, PARIS, KRATTA]

4- Investigation of proton induced spallation [HECTOR, PARIS, KRATTA]

Kabul edilen bu deney önerileri dışında iki tane Fransa, GANIL ve yedi tane İtalya, SPES için verilen deney önerisi sunuldu fakat ilgili komiteler henüz toplanıp karar vermedikleri için sunulan deney önerilerinin yapılıp yapılamayacağı konusunda şu an bilgi vermek mümkün değildir.

Yukarıda listelenen PARIS dedektör kümeleri kullanılarak gerçekleştirilmesi planlanan deney önerilerinin her bir araştırma merkezinin proje danışma kurulunca kabul edilmesi ve PARIS Dedektör kümelerinin performanslarını ortaya koyacak ilk sonuçların bu proje döneminde elde edilmiş olması projenin başarı göstergelerinden en önemlisi olarak sıralanabilir.

Yukarıda sıralanan her bir deney önerisinde özellikle bugüne kadar nükleer yapı fiziğinde cevaplanamayan temel fizik problemlerine cevap bulunması hedeflenirken aynı zamanda üretilecek yeni egzotik çekirdeklerin yapıları da ilk kez bu deneyler vasıtasıyla elde edilecektir.

Bu deneysel çalışmalardan elde edilecek yeni sonuçlar proje çıktılarına önemli katkılar sağlayacaktır. Bu açıdan değerlendirildiğinde hem projenin yaygın etkisi hem de projenin uluslararası kabul gören bir proje olması dolayısıyla ülkemizin, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesinin bilim dünyasındaki saygınlığının artmasına ve tanınırlığının daha da artmasına katkıda bulunulmuştur.

Proje kapsamında geliştirilen ve performansları ortaya çıkarılan PARIS dedektör kümesinin yeni fizik sonuçları elde edeceği deney önerilerinin kabul görmesi artık meyveleri toplanacak ağaca dönüştürülmüş hal alması önemli bir başarı olarak nitelendirilebilir. Proje sonuçlandığı için bu deneysel çalışmalara katılmak ve elde edilecek yeni sonuçlarda ülkemizin de ortaklar arasında yer alması için TÜBİTAK tarafından desteklenmesini beklediğimiz yeni projeler üreteceğiz. Bugüne kadar desteklenen çalışmalarımız için TÜBİTAK'a tekrar teşekkür ederiz.

Projenin başarı ölçütlerini ve risk yönetimini de değerlendirmek faydalı olacaktır. Proje önerisindeki birinci başarı ölçütü olarak NUMEXO2 dijital elektroniğin PARIS dedektör kümesine adaptasyonu için yürütülecek Ar-Ge faaliyetleri için başarı ölçütü olarak %50 belirtilmiştir. Proje kapsamında geliştirilen yazılım ve veri formatının son aşamaya getirilmiş olması ile bu hedefin başarıyla gerçekleştirildiğini söylemek mümkündür.

Proje önerisindeki ikinci başarı ölçütü %50 şeklinde PARIS dedektör kümesin tüm karakteristik özelliklerini (dedektörün enerji çözünürlüğü, zaman yanıtları vb.) ortaya koymak ve dedektör kümesinin performansını belirlemek için Fransa, Orsay nükleer araştırma merkezinde LICORNE kullanılarak deneyin gerçekleştirilmesi olarak belirtilmiştir. Bu deney aracılığı ile dedektörün nötron-gama ayrımı için yeni bir yöntemin kullanılması planlanmış ve bu plan doğrultusunda bu deney başarıyla gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar detaylı olarak "Nisan 2016 Deneysel Çalışmaları" başlığı altında verildi. Bu başarı hedefi de istenen oranda tamamlanmıştır.

Burada hedeflenen başarı ölçütlerine ek olarak bu deneysel çalışmadan elde edilen bilgi birikimi ile PARIS dedektör kümelerinin performansını araştıran üç deney ("Haziran 2016 Deneysel Çalışmaları", "Kasım 2016 Deneysel Çalışmaları" ve "Temmuz 2017 Deneysel Çalışmaları" başarı ile tamamlandı. Bu deneysel çalışmalarda nelerin hedeflendiği, hangi deneysel düzenekle deneyin gerçekleştirildiği ve bu çalışmalardan nelerin elde edildiği detaylı olarak proje sonuç raporunun "Bulgular ve Tartışma" bölümünde her bir deney için ayrılan alt bölümde verildi.

Böylece proje önerisinde hedeflenen başarı ölçütleri başarılı bir şekilde tamamlanmış ve yeni bilgi birikimleri ile ek yeni deneyler de gerçekleştirilmiş ve daha yeni deney önerilerinin oluşmasına katkıda bulunmuştur.

Proje önerisinde risk yönetim tablosunda verilen iki husus değerlendirildiğinde;

Belirtilen birinci husus için beklenen problemler yaşanmış ve bu risk için önerilen B-planı doğrultusunda (NUMEXO2 dijital elektroniğin PARIS dedektörüne adaptasyonu için karışılacak problemlerin aşılması için Fransa, GANIL'de bulunan elektronik mühendisler ve İspanya'da bulunan elektronik mühendisten alınan destek doğrultusunda) izlenen adımlar aracılığı sorunlar giderildi ve hedeflenen sonuçlar elde edildi.

Belirtilen ikinci risk hususu konusunda herhangi bir sorun ile karşılaşılmamış aksine başarı ile gerçekleştirilen çalışmalardan elde edilen sonuçlar diğer deney önerilerinin oluşmasına ve bu deney önerilerinden bazılarının bu proje döneminde başarı ile tamamlanmasına katkıda bulunmuştur.

### 5.9 Proje Çıktıları ve Önemi

Proje kapsamında proje süresince gerçekleştirilen çalışmalardan elde edilen proje çıktılarını burada maddeler halinde sunmak faydalı olacaktır.

Nisan 2016'da Hatay'da gerçekleştirilen "TESNAT 2016 International Conference on Theoretical and Experimental Studies in Nuclear Applications and Technology" isimli konferansta sözlü bildiri olarak sunuldu ve bildiri kitapçığında yayınlandı.

1- "Adaptation of NUMEXO2 Digital Electronic into PARIS Detector Array"
2- "Study of Novel Scintillator (LaBr3:(Ce) and CeBr3) for Medical Imaging with new Digital Electronic NUMEXO2" başlıklı

Eylül 2016'da Sivas'ta gerçekleştirilen "IX. International Workshop on Nuclear Structure Properties (NSP2016)" isimli uluslararası konferansta Davetli Konuşmacı olarak sözlü bildiri sunuldu ve bildiri kitapçığında yayınlandı.

3- "The Status of PARIS Project and Performance of PARIS Cluster Detectors"

Ekim 2016'da İtalya, Legnaro'da INFN, İtalya Ulusal Nükleer Fizik Araştırma merkezinde gerçekleştirilen "Third International SPES Workshop" isimli toplantıda sözlü bildiri olarak sunuldu.

4- PARIS4SPES -A high-resolution scintillator array for medium- and high-energy gamma rays for experiments at SPES radioactive beams facility

Mayıs 2017'de Adana'da gerçekleştirilen "TESNAT 2017 International Conference on Theoretical and Experimental Studies in Nuclear Applications and Technology" isimli uluslararası konferansta sözlü bildiri olarak sunuldu ve bildiri kitapçığında yayınlandı.

5- "Performance of PARIS Cluster : ELBE Experiment"
6- Performance of PARIS Phoswich : Linearity, Efficieny, Energy Resoltuion and Time Response"

Haziran 2017'de Almanya, Darmstadt şehri GSI nükleer araştırma merkezinde gerçekleştirilen "The Second Workshop of the Nuclear Spectroscopy Instrumentation Network of ENSAR2, NUSPIN2017" isimli uluslararası toplantıda bildiri sözlü olarak sunuldu.

7 "Performance of NUMEXO2 Digital Electronic: Effect of K-Parameter on the Energy Resolution"

Eylül 2017'de Karabük'te gerçekleştirilen "X.International Conference on Nuclear Structure Properties" isimli uluslararası konferansta sözlü bildiri olarak sunuldu ve bildiri kitapçığında yayınlandı.

7- "Performance of PARIS Demanstrator Clusters $LaBr_3$ and $CeBr_3$ Using AGATA+PARIS+VAMOS Setup at GANIL"

Yukarıda sıralanan uluslararası konferanslarda sözlü bildiri şeklinde gerçekleştirilen sunumlara ek olarak proje kapsamında gerçekleştirilen çalışmalardan elde edilen sonuçlar aşağıda listelenen bir tanesi Haziran 2018'de İspanya, Valensiya'da diğeri Eylül 2018'de Polonya, Zakopane'da gerçekleştirilecek uluslararası konferanslarda sunulmak üzere iki sözlü bildiri olarak gönderildi. İspanya'da gerçekleştirilecek toplantıda gönderdiğimiz özet bildirinin sözlü sunum olarak kabul edildiği bildirildi. Kabul mektubu ek kısmında (Ek-sözlü bildiri kabul mektubu) sunulmuştur.

Haziran 2018'de İspanya, Valensiya'da IFIC düzenlenen NUSPIN2018 "3rd Workshop of the Nuclear Spectroscopy Instrumentation Network of ENSAR2 (NuSpIn), NUSPIN 2018" isimli toplantıda sözlü sunum olarak kabul edilmiştir.

8- "Energy Resolution Comparison of PARIS Phoswich Detetors LaBr3 and CeBr3

Eylül 2018'de Polonya, Zakopane'da düzenlenen "X1. International Conference on Nuclear StructureProperties" isimli toplantıda sözlü sunum yapmak üzere aşağıdaki başlıkla başvuruda bulunulmuştur. Toplantı takvimi için başvurular hala devam ettiği için sözlü olarak kabul edildiğine dair henüz bir cevap alınamamıştır.

10 "Performance of New Generation Scintillators: LaBr3 and CeBr3 for Gamma-Ray Spectroscopy"

Ayrıca yine Eylül 2018'de Trabzon'da düzenlenen "XI. International Workshop on Nuclear Structure Properties (NSP2018)" isimli uluslararası konferansta Davetli Konuşmacı olarak aşağıda belirtilen başlıklı bildiri sözlü olarak gerçekleştirilecektir.

11- "The Current Status of PARIS Project and Performance of LaBr3 and CeBr3 Crystals"

Son olarak bu proje kapsamında Yüksek Lisans öğrencisi Emine ÖCAL "$LaBr_3(Ce)_+NaI$ ve $CeBr_3$+NaI Sintilatörlerin PARIS Projesi Kapsamında Performanslarının Karşılaştırılması" başlıklı tezini tamamladı. Ayrıca diğer yüksek lisans öğrencisi Mehmet ÖZDEMİR ise "Nükleer Tıpta Görüntüleme için Kullanılan Sintilatörlerin (LaBr3:(Ce), CeBr3) GEANT4 Simülasyon Programı ile Karakter Tayini, Geometrik ve Elektronik Optimizasyonu" başlıklı tezini tamamlamak üzere olup bu yılsonunda proje çıktısı olarak bu yüksek lisans tezi de projeye çıktı olarak eklenecektir.

PARIS dedektör kümesi performansı ile ilgili elde edilen sonuçlarla bu dedektör kümesinin farklı fizik araştırmalarına hizmet edecek bir spektroskopi aracı olarak kullanılabilir hale getirilerek sadece 2018-2019 döneminde farklı (Fransa, GANIL ve Orsay, Polonya, Krakow) nükleer araştırma merkezlerinde on tane deney gerçekleştirilecektir. Böylece Türkiye'nin bu alandaki çalışmalarda daha aktif rol almasını sağlaması açısından çok başarılı bir süreci tamamlanmıştır.

## 6. KAYNAKLAR


Benzoni G. et al., Eur. Phys. J. A 45, 287 (2010).

Birocchi F. vd., Position Sensitivity of Large Volume LaBr 3 :Ce detectors, (2009) IEEE Nuclear Science Symposium Conf. Record N25-70, 1403.

Brun R ve Rademakers F., *ROOT — An object oriented data analysis framework*, *Nucl. Instrum.Meth.* **A 389** (1997) 81.

Bottoni S. et al., Phys. Rev. C 86, 064621 (2012).

Ciemala M. vd,.Measurements of high-energy γ-rays with LaBr3:Ce detectorsNuc.Inst.and Meth.A608, 76. (2009)

Çakır D. "$LaBr_3$(Ce) Kristalinin GEANT4 Simülasyon Programıyla Performansının Değerlendirilmesi: PARIS Projesi", (2011)

Çelik F. "Nükleer Spektroskopide Kullanılan Elektroniğin Evrimi: PARIS Projesi Elektroniği", ( 2014)

Dudek J. vd., Search for the Nuclear Hyper-Deformation: Motivations and New Strategies, (2005) Acta Physica Polanica B36, 975.

Ertürk S. vd., Energy Response of LaBr3, (2012) Journal of Physics: Conference Series 381, 012134

Egea F.J. *et. al*., Design and test of a high-speed flash ADC mezzanine card for high-resolution and timing performance in nuclear structure experiments, IEEE Transactions on Nuclear Science, **60**, 3526, (2013).

Forssen C. et al., J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 40, 055105 (2013).

http://www.khs-erzhausen.de and http://www.cenbg.in2p3.fr/GEF (Frehaut,1982)

Hagen G. et al., PRL 108, 242501 (2012) .

Holt J.D., Eur. Phys. J. A49, 39 (2013).

Häusser O. vd.," The prompt response of bismuth germanate and NaI(Tl) scintillation detectors to fast neutrons" » EDEN: a neutron time-of-flight multidetector for decay studies of giant states" Nucl. Instr. And Meth. 213 (1983) 301.

Laborie J.M, vd. Proceedings of GAMMA-1 Emission of prompt gamma rays in fission, Physics Procedia 31 (2012) 13-20 (http://faster.in2p3.fr)

Lewitowicz M. vd., The SPIRAL2 Project: Physics and Challenges, (2009) Acta Physica Polanica B40-3, 811.

Lebois M vd., "Development of a kinematically focused neutron source with the p($^{7}$Li,n)$^{7}$Be inverse reaction" Nucl. Instr. and Meth A735 (2014) 145.

Luo X.L v., " Test of Digital neutron-gamma discrimination with four different photomultiplier tubes fort the NEutron Detector Array (NEDA)"Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 767, 83-91 (2014)

Maj A, vd., The Paris Project, (2009) Acta Physica Polanica B40-3, 565

Maj A. vd., Phase-space selection of the GDR gamma ray emission from hot 162Yb nuclei (1992), Phys. Lett. B291, 385.

Mazumdar I. vd., Phase space selected GDR gamma rays from hot rotating194Au, (2004) Nucl. Phys. A731, 146.

Mazumdar I. vd., A LaBr3:Ce-NaI(Tl) Phoswich for X- and low energy image astronomy, (2010) Nuclear Instrument and Method A623 995.

Mazumdar I. V.d., *Studying the properties and response of a large volume (946 cm*3*) LaBr*3*:Ce detector with -rays up to 22.5 MeV*, *Nucl. Instrum. Meth.* **A 705** (2013) 85.

Madland D.G, Nucl. Phys. A 772, p. 113 (2006)

Meo S. Lo., GEANT4 simulation for modelling the optics of LaBr scintillation imagers, (2008) Nuclear Science Symp.Conf. R., NSS'08. IEEE, 4964.

Meo S. Lo vd., Optical physics of scintillation imagers by GEANT4 simulations, (2009)

Modamio V vd., "Digital pulse-timing techniques for the neutron detector array" Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 775, 71-76 (2015)

Nuclear Data High Priority Request List of the NEA (Req. ID:H.3,H.4), www.oecd-www.oecd-nea.org/dbdata/hprl/hprlview.pl?ID=422 (2006)

Nicolini R.vd., Investigation of the properties of a 1″×1″ LaBr3:Ce scintillator, (2007) Nuclear Instrument and Method A582, 554.

Oberstedt A. vd.,” Neutron measurements with lanthanum–bromide scintillation detectors—A first approach” Nucl. Instr. And Meth. 708 (2013) 7.

Pelle R.W. vd, Phys. Rev. 3, 1, 373 (1971)

Pomorski K. vd., Nuclear liquid-drop model and surface-curvature effects, (2003) Phys. Rev C67, 044316.

Rimpault G, Proceedings of the workshop on nuclear data needs for generation IV, Antwerp, Belgium, World Scientific, ISBN 981-256-830-1, p46 (2005) (Verbinski ve arkd. 1973, Pelle ve arkd., 1971, TE, 1999).

Roberts O. J. vd., « Neutron Response of LaBr3:Ce and CsI:Na Phoswich Crystal Scintillators for PARIS », PARIS collaboration internal paper.

Serot O vd., Phys. Rev. C 82,054616 (2010)

Schwengner R. *V.d.* The photon-scattering facility at the superconducting electron accelerator ELBE. N*ucl.Instrum. Meth. A*, **555**:211–19, 2005

Thompson I, J., Comp. Phys. Rep. 7, 167 (1988).

Ward D. vd., Search for the Jacobi shape transition in rapidly rotating nuclei, (2002) Phys. Rev C66, 024317.

Wilson J.N. vd., Proceedings of the international conference FISSION2013, Caen, France.

Winther A., Nucl. Phys. A 594, 203 (1995).

Zeibilinski vd., Testing of the PARIS LaBr3-NaI Phoswich Detector with High Energy Gamma-rays, (2013) Acta Physica Polonica B44, 651.

# TÜBİTAK
# PROJE ÖZET BİLGİ FORMU

| | |
|---|---|
| Proje Yürütücüsü: | Prof. Dr. SEFA ERTÜRK |
| Proje No: | 115F103 |
| Proje Başlığı: | Paris (Dedektör) Kümesinin Performansının Araştırılması |
| Proje Türü: | 1001 - Araştırma |
| Proje Süresi: | 24 |
| Araştırmacılar: | |
| Danışmanlar: | MUSTAFA NİZAMETTİN ERDURAN |
| Projenin Yürütüldüğü Kuruluş ve Adresi: | NİĞDE ÖMER HALİSDEMİR Ü. FEN EDEBİYAT F. FİZİK B. |
| Projenin Başlangıç ve Bitiş Tarihleri: | 01/10/2015 - 01/04/2018 |
| Onaylanan Bütçe: | 201980.0 |
| Harcanan Bütçe: | 178063.33 |
| Öz: | Projenin amacı iki başlık halinde verilmiştir. Birincisi yeni geliştirilen NUMEXO2 dijital elektronik sistemin PARIS dedektör kümesine adaptasyonu. İkincisi ise PARIS dedektör kümesinin performansının araştırılması.<br>Proje süresince, NUMEXO2 dijital elektronik ünitenin PARIS dedektör kümesine adaptasyonu için yapılması gereken yazılımsal değişiklikler ve deneysel veri formatının belirlenmesi süreci başarıyla tamamlanmıştır.<br>PARIS dedektör kümesinin performansının araştırılması kapsamında: daha önce Almanya Dresden ELBE?de gerçekleştirilen deneysel veri analiz edildi. Bunun için gerekli olan analiz programları ve algoritmalar geliştirildi.<br>PARIS dedektör kümesi performans ölçümleri için iki farklı fosfor sandviç ?LaBr3+NaI(Tl) ve CeBr3+NaI(Tl)? dedektörleri aynı deney düzeneğinde test edildi ve her iki dedektör kümesi için enerji çözünürlüğü değerleri elde edildi.<br>Projenin amacı iki başlık halinde verilmiştir. Birincisi yeni geliştirilen NUMEXO2 dijital elektronik sistemin PARIS dedektör kümesine adaptasyonu. İkincisi ise PARIS dedektör kümesinin performansının araştırılması.<br>Proje süresince, NUMEXO2 dijital elektronik ünitenin PARIS dedektör kümesine adaptasyonu için yapılması gereken yazılımsal değişiklikler ve deneysel veri formatının belirlenmesi süreci başarıyla tamamlanmıştır.<br>PARIS dedektör kümesinin performansının araştırılması kapsamında: daha önce Almanya Dresden ELBE?de gerçekleştirilen deneysel veri analiz edildi. Bunun için gerekli olan analiz programları ve algoritmalar geliştirildi.<br>PARIS dedektör kümesi performans ölçümleri için iki farklı fosfor sandviç ?LaBr3(Ce)+NaI(Tl) ve CeBr3+NaI(Tl)? dedektörleri aynı deney düzeneğinde test edildi ve her iki dedektör kümesi için enerji çözünürlüğü değerleri elde edildi.<br>Elde edilen performans değerlerine göre PARIS dedektör kümesi kullanılarak nükleer fizik alanında cevap bekleyen sorulara cevap bulmayı amaçlayan deney önerileri sunuldu. Bugüne kadar sunulan bu deney önerilerinden dört tanesi gerçekleştirildi ve on tanesi de 2018-2019 döneminde farklı (Fransa, GANIL ve Orsay, Polonya, Krakow) nükleer araştırma merkezlerinde gerçekleştirilecektir. Gerçekleştirilen deneylerden elde edilen verilerin analizleri tamamlanmak üzere olup elde edilecek sonuçlar yakın gelecekte yayınlanmak üzere saygın bilimsel dergilere gönderilecektir. Gerçekleştirilecek bu deneysel çalışmalarla Türkiye?de bu alanda çalışacak nükleer fizik araştırmacıların bu alandaki çalışmalarda daha aktif rol alması sağlanacağı için çok başarılı bir proje süreci tamamlanmıştır. |
| Anahtar Kelimeler: | PARIS projesi, LaBr3(Ce), CeBr3, dedektör, NUMEXO2 dijital elektronik |
| Fikri Ürün Bildirim Formu Sunuldu Mu?: | Hayır |

TÜBİTAK

| | |
|---|---|
| Projeden Yapılan Yayınlar: | 1- Adaptation of NUMEXO2 Digital Electronic intoPARIS Detector Array (Bildiri - Uluslararası Bildiri - Sözlü Sunum),<br>2- Adaptation of NUMEXO2 Digital Electronic intoPARIS Detector Array (Bildiri - Uluslararası Bildiri - Sözlü Sunum),<br>3- Study of Novel Scintillator (LaBr3:(Ce) and CeBr3) for Medical Imaging with new Digital Electronic NUMEXO2 (Bildiri - Uluslararası Bildiri - Sözlü Sunum),<br>4- Study of Novel Scintillator (LaBr3:(Ce) and CeBr3) for Medical Imaging with new Digital Electronic NUMEXO2 (Bildiri - Uluslararası Bildiri - Sözlü Sunum),<br>5- Performance Of Paris Cluster: Elbe Experiment (Bildiri - Uluslararası Bildiri - Sözlü Sunum),<br>6- Performance of PARIS Demanstrator Clusters LaBr3 and CeBr3 Using AGATA+PARIS+VAMOS Setup at GANIL (Bildiri - Uluslararası Bildiri - Sözlü Sunum),<br>7- Performance of PARIS Phoswich: Linearity, Efficieny, Energy Resoltuion and Time Response (Bildiri - Uluslararası Bildiri - Sözlü Sunum),<br>8- PARIS4SPES -A high-resolution scintillator array for medium- and high-energy gamma rays for experiments at SPES radioactive beams facility (Bildiri - Uluslararası Bildiri - Sözlü Sunum),<br>9- PARIS4SPES -A high-resolution scintillator array for medium- and high-energy gamma rays for experiments at SPES radioactive beams facility (Bildiri - Uluslararası Bildiri - Sözlü Sunum),<br>10- The Status of PARIS Project and Performance of PARIS Cluster Detectors (Bildiri - Uluslararası Konferans - Davetli Konuşmacı),<br>11- The Status of PARIS Project and Performance of PARIS Cluster Detectors (Bildiri - Uluslararası Konferans - Davetli Konuşmacı), |

TÜBİTAK