

**HIZLANDIRICILARDA MÜON BÖLGESİ
VE UYGULAMA ALANLARI**

Abdulkadir TEZCAN

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
FİZİK**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**EKİM 2006
ANKARA**

Abdulkadir TEZCAN tarafından hazırlanan HIZLANDIRICI MÜON BÖLGESİ
VE UYGULAMA ALANLARI adlı bu tezin yüksek lisans tezi olarak uygun
olduğunu onaylarım.

Prof.Dr.Saleh SULTANSOY
Tez Yöneticisi

B u çalışma jürimiz tarafından oy birliği ile Fizik Anabilim Dalında Yüksek
Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan :Prof.Dr. Pervin ARIKAN

Jüri :Prof.Dr. Saleh SULTANSOY

Jüri :Prof.Dr. Ergün KASAP

Jüri :Prof.Dr. Ömer YAVAŞ

Jüri :Prof.Dr.Abbas Kenan ÇİFTİ

Tarih : 28/09/2006

Bu tez, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına
uygundur.

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada orijinal olmayan her türlü kaynağa eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Abdulkadir TEZCAN

**HIZLANDIRICILARDA MÜON BÖLGESİ VE
UYGULAMA ALANLARI
(Yüksek Lisans Tezi)**

Abdulkadir TEZCAN

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Ekim 2006**

ÖZET

Bu çalışmada, TRIUMF laboratuvarının genel yapısı, deney istasyonları ve burada gerçekleştirilen araştırmalar incelenmiştir. En dikkati çeken uygulamalar arasında radyoizotop üretimi , proton ve pion terapi yöntemiyle göz tedavisi gösterilebilir. Özellikle müon demetine dayalı müon bölgesi uygulamalarına değinilmiştir. Bu uygulamalar arasından da μ SR tekniği incelenmiştir. Bu laboratuvarında yapılan bazı μ SR deneyleri ayrıntılı olarak ele alınmıştır.

**Bilim Kodu : 202. 1. 108
Anahtar Kelimeler : TRIUMF, ISAC, Siklotron, Proton demeti, μ SR
Sayfa Adedi : 62
Tez Yöneticisi : Prof. Dr. Saleh SULTANSOY**

**MUON REGION IN ACCELERATORS AND
APPLICATION FIELDS (TRIUMF LABORATORY)
(M.Sc.Thesis)**

Abdulkadir TEZCAN

**GAZI UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY
October 2006**

ABSTRACT

In this work, general design of TRIUMF laboratory, it's experiment stations and researchs made in there, were studied. Most important applications are radioisotope production and eye treatment with proton and pion therapy. Particularly, muon region applications were studied. From these applications μ SR technique was chosen. Some μ SR experiments made in this laboratory were considered in details.

Science Code : 202. 1. 108

Key Words : TRIUMF, ISAC, Syclotron, Proton beam, μ SR

Page Number : 62

Adviser : Prof. Dr. Saleh SULTANSOY

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca yardımlarını esirgemeyen değerli hocam Prof. Dr. Saleh SULTANSOY, Prof.Dr. Pervin ARIKAN, Prof.Dr. Ömer YAVAŞ, Yrd.Doc.Dr. Metin YILMAZ'a ve tez çalışmalarım boyunca beni yalnız bırakmayan değerli arkadaşım Abdullatif ÇALIŞKAN'a teşekkürü bir borç bilirim.

Bu tez DPT2002K120250 nolu “Türk Hızlandırıcı Kompleksi Genel Tasarımı” isimli DPT projesi tarafından desteklenmiştir.

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 3.1. TRIUMF laboratuvarının uzaktan görünümü	17
Resim 3.2. TRIUMF laboratuvarının siklotron hızlandırıcısı.....	19
Resim 3.3. TRINAT sisteminde kullanılan lazer masası.....	24
Resim 3.4. RFQ hızlandırıcısı	31
Resim 3.5. ISAC-I deney alanındaki DTL hızlandırıcısı.....	33
Resim 3.6. ISAC-II’de kullanılan süperiletken linakın bir bölümü	36
Resim 3.7. Bir hastanın proton terapisi ile göz tedavisi.....	43

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. ABD Enerji Bakanlığına bağlı ulusal araştırma laboratuvarları.....	4
Şekil 2.2. ABD Enerji Bakanlığının 2020 yılına kadar gerçekleştirmeyi planladığı ulusal projeler	5
Şekil 2.3. Alvarez'in önerdiği rf-alanlı linac'ın şematik görünümü.....	10
Şekil 2.4. J-PARC linac projesinin blok diyagramı	11
Şekil 2.5. Siklotron hızlandırıcısında parçacıkların spiral olarak hızlanması	12
Şekil 2.6. İsviçre'deki PSI laboratuvarının genel görünümü	13
Şekil 3.1. TRIUMF laboratuvarının uzaktan görünümü	17
Şekil 3.2. TISOL ve TRINAT deney istasyonlarının planı.....	22
Şekil 3.3. TRINAT sisteminin çalışma prensibi.....	23
Şekil 3.4. Ana siklotron hızlandırıcısı ve ISAC deney istasyonunun genel planı.....	28
Şekil 3.5. ISAC deney istasyonundaki kütle ayırma sistemi.....	30
Şekil 3.6. ISAC-I bölgesine ait hızlandırma sistemi.....	32
Şekil 3.7. ISAC-II projesinin planı ve aşama bitiş tarihleri.....	35
Şekil 3.8. Mezon odasını besleyen proton demet kanalları.....	41
Şekil 3.9. Proton terapisi için gerekli ekipman.....	42
Şekil 4.1. Enine alanlı μ SR yönteminin şematik görünümü.....	47
Şekil 4.2. Sr_2RuO_4 kristalinin farklı sıcaklıklardaki sıfır alanlı μ SR spektrumu...	53
Şekil 4.3. Saf NaV_2O_5 numunesinin a) statik relaksasyon hızının b) dinamik relaksasyon hızının sıcaklığa göre değişimini gösteren sıfır-alanlı μ SR spektrumu.....	54
Şekil 4.4. 227 K sıcaklıktaki $\text{Mu}+\text{NO}$ reaksiyonunun elde edilen hız sabiti grafiği.....	55

Şekil	Sayfa
Şekil 4.5. 180 K sıcaklıkta $\text{Mu}+\text{CO}+\text{N}_2$ reaksiyonunun hız sabiti grafiği.....	56
Şekil 4.6. Si içindeki müonyum aşırı ince yapı frekansının sıcaklığa bağlı grafiği.....	57

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
rf	Radyo frekans
μ	Müon
ac	Alternatif akım
μA	Mikro amper

Kısaltmalar	Açıklama
RFQ	Radyo frekans dört kutuplu magnet
DTL	Doğrusal sürüklenme tüpü
LINAC	Lineer Hızlandırıcı
μSR	Müon Spin Rezonans
ISOL	Isotope Separator On-Line
TISOL	Test Isotope Separator On-Line
ISAC	Isotope Separator and Accelerator

1. GİRİŞ

Yüksek teknolojinin üretimine dayanan gelişmiş bir ekonomi, günümüzde devletleri güçlü kılan en önemli faktörlerden birisidir (aslında tarih boyunca böyle olmuştur fakat bu gerçek 20. yüzyılda net bir şekilde anlaşılmıştır). Yüksek teknolojilerin geliştirilmesi ve üretilmesi hiç kuşkusuz temel bilimsel araştırmalara dayanmaktadır. Hızlı ve sürekli gelişmenin temelinde, ülke özellikleri göz önünde tutularak hazırlanan, etkin bir bilim ve teknoloji stratejisinin uygulanması yatmaktadır.

Gelişmiş ülkelerin AR-GE sistemleri incelenirse 3 model öne çıkmaktadır:

- Anglosakson modeli (en etkin örneği ABD)
- Kıta Avrupası modeli (en etkin örnek Almanya)
- Uzak Doğu modeli (ilk ve en etkin örnek Japonya).

Gelişmiş ülkelerdeki tüm modellerin ortak özelliği:

- stratejik teknolojiler ve temel araştırma alanlarının hepsinde binlerce bilim insanının çalıştığı en azından birer ulusal araştırma merkezi (enstitüsü, kurumu)
- alt-alanların bir çoğunda orta çaplı (yüzlerce çalışanı olan) araştırma merkezi kurulmuştur. Gelişme azminde olan ülkeler de benzer sistemi oluşturma gayretindedir.

21.Yüzyılın stratejik teknolojilerinden biri olan parçacık hızlandırıcıları, temel parçacık fiziğinden moleküler biyolojiye, nükleer fizikten tıpa, izotop üretiminden gıda sterilizasyonuna, enerji üretiminden anjiyografiye, malzeme biliminden savunma sanayine, polimer kimyasından arkeolojiye kadar bilim ve teknolojinin yüzlerce alanında kullanılmaktadır [1]. Tüm gelişmiş ve gelişme azminde olan ülkelerin ulusal hızlandırıcı merkezleri vardır.

Bu merkezlerin oluşması ve etkin çalışması için temelinde en azından bir mega-proje yatması gerekiyor. Türk Hızlandırıcı Kompleksi (TAC), Türkiye ve Türk

Dünyasında Yüksek Enerji Fiziğinin ve Hızlandırıcı Teknolojisinin gelişmesi için önerilen bir mega-projedir [2]. Türk Hızlandırıcı Merkezi kurulmadan Türkiye'nin gelişmiş ülkeler arasına girmesi mümkün değildir!

1993 yılında yayınlanan makalede [2] önerilen proje ile TAC projesinin bugün ulaştığı noktadaki farkları:

- Lineer elektron hızlandırıcısı bazında Serbest Elektron Lazeri ve deney istasyonları eklenmiştir
- Sinkrotron Işınımı özel halka yerine Ana Halkadan elde edilecek (bu imkan yalnız linak-halka tipli fabrikalar için geçerlidir)
- Parçacık fiziği açısından Charm fabrikasının kurulması öngörülmektedir (1993 yılında charm-tau fabrikası, 2000 yılında phi fabrikası seçenekleri üzerinde duruluyordu)
- Bağımsız bir GeV enerjili ve yüksek akıllı proton hızlandırıcısının kurulması da öngörülmektedir (özellikle hızlandırıcı sürümlü nükleer santraller açısından önemlidir).

2006 yılından itibaren TAC projesinin üçüncü aşaması DPT desteği ile YUUP (Yaygınlaştırılmış Ulusal ve Uluslararası Proje) şeklinde yürütülmektedir [3]. Bu aşamanın sonucunda 2010 yılında Türk Hızlandırıcı Kompleksinin Teknik Tasarım Raporunun hazırlanması ve IR-FEL laboratuvarının kurulması öngörülmektedir. Teknik Tasarım Raporu hazırlanırken, ileri hızlandırıcı laboratuvarlarının yapısı ve deneyimi göz önünde tutulmalıdır.

Bu çalışmada Kanada'daki TRIUMF laboratuvarı incelenmiştir. 500 MeV'lik büyük bir siklotrona sahip olan TRIUMF laboratuvarı, dünya çapında bir atom-altı araştırma ve uygulama merkezidir. Ana siklotron hızlandırıcısından çıkan proton demetinin kullanıldığı tüm deney istasyonları ve burada gerçekleştirilen deneyler incelenmiş, yapılan araştırmalara kısaca değinilmiştir. Proton terapi ve pion terapi tıp alanındaki en göze çarpan uygulamaları olup çeşitli deney istasyonlarında bir çok radyoizotop üretimi yapılmaktadır.

2. PARÇACIK HIZLANDIRICILARI

25-26 Ekim 2001 tarihinde yapılan I.Ulusal Parçacık Hızlandırıcıları ve Uygulamaları Kongresinde sunulan “*Parçacık Hızlandırıcıları: Dün, Bugün, Yarın*” isimli çağrılı konuşmadan [2] bir alıntı:

“21.Yüzyılın ~10 jenerik teknolojisinden biri olan Parçacık Hızlandırıcıları, temel parçacık fiziğinden moleküler biyolojiye, nükleer fizikten tıpa, izotop üretiminden gıda sterilizasyonuna, enerji üretiminden anjiyografiye, malzeme biliminden savunma sanayiye, polimer kimyasından arkeolojiye kadar bilim ve teknolojinin yüzlerce alanında kullanılmaktadır. Son yıllarda geliştirilen hızlandırıcıya dayalı yeni tip nükleer reaktörler hem güvenlik (Çernobil türlü kazalar prensip olarak imkansızdır), hem de çok düşük radyasyon kirlilik (birim enerji üretiminde çevreye aktarılan radyasyon kömür santrallerinin altındadır) bakımından büyük öneme sahiptir. Ülkemiz açısından en önemli özellik ise nükleer yakıt olarak Toryumun kullanılabilirliğidir”.

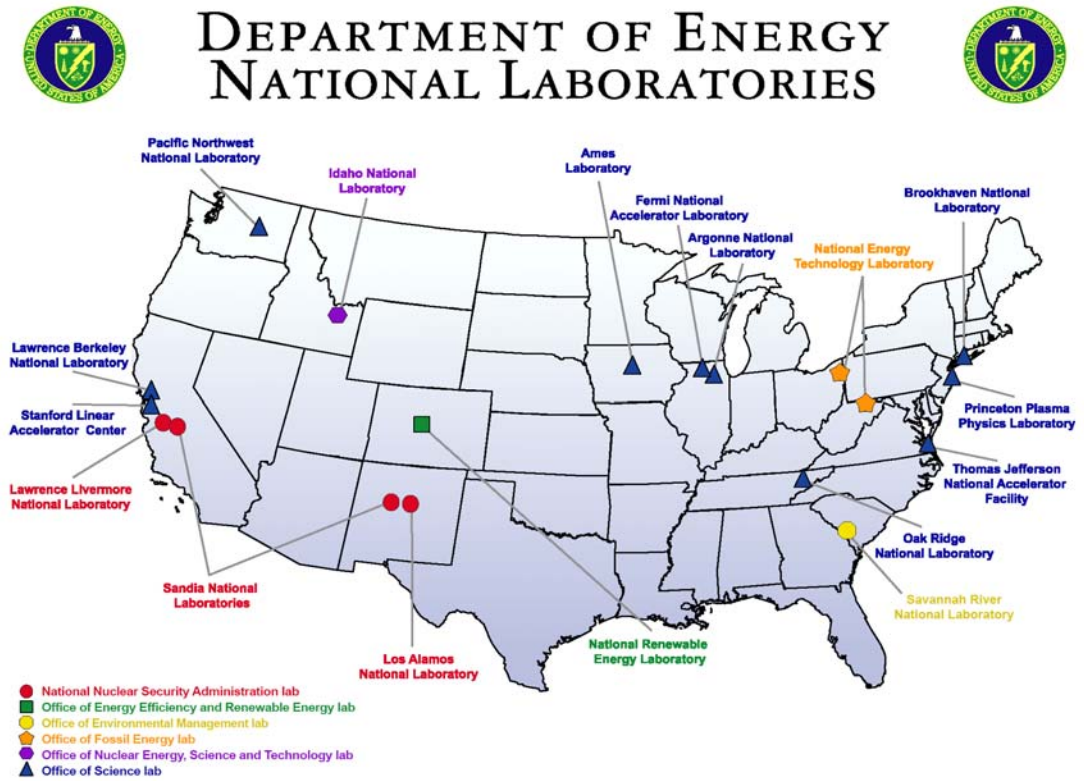
ABD’nin AR-GE alanında en önemli kaynak dağıtıcısı olan Enerji Bakanlığı Bilim Ofisinin 2003 yılında yayınlanan “*Accelerator Technology for the Nation*” isimli resmi görüşünden bir alıntı:

“Accelerators underpin every activity of the Office of Science and, increasingly, of the entire scientific enterprise. From biology to medicine, from materials to metallurgy, from elementary particles to the cosmos, accelerators provide the microscopic information that forms the basis for scientific understanding and applications”.

Avrupa Birliğinin AR-GE altyapısında parçacık hızlandırıcıları müstesna bir öneme sahiptir. CERN, DESY, ESRF başta olmakla bir çok uluslararası ve ulusal merkez bunun net bir göstergesidir. Bugün AB 6. Çerçeve Programının dahilinde CARE (Avrupa için Hızlandırıcı Araştırmalarının Koordinasyonu) gibi projeler yürütülmektedir ve Avrupa’da Parçacık Fiziği Stratejik Planı hazırlanmaktadır 7.Çerçeve Programı dahilinde parçacık hızlandırıcıları daha da geniş yer kapsayacaktır. Türk Dünyası bu sürece kişisel bazda katılacak düzeyde bilim adamlarına sahiptir! Ancak, maalesef, gerekli AR-GE altyapısına sahip olmadığımız için kurumsal bazda katılım sağlanamamaktadır.

Türk Hızlandırıcı Merkezi (TAC) projesinin amacı parçacık fiziği ve hızlandırıcı teknolojileri alanlarında ülkemiz ile Avrupa Birliği ve diğer gelişmiş ülkeler arasında mevcut olan uçurumu kapatmaktır. Böylece, ABD Enerji Bakanlığı Bilim Ofisinin tabiriyle “bilim anlayışı ve uygulamaları için temel oluşturan mikroskopik bilgiyi temin eden hızlandırıcıların” Türkiye’de kurulması ve Türk bilim camiasının ve sanayisinin kullanımına açılması sağlanacaktır.

ABD Enerji Bakanlığına bağlı olan 17 Ulusal Laboratuvardan 7’si doğrudan hızlandırıcı laboratuvarıdır.



Şekil 2.1. ABD Enerji Bakanlığına bağlı ulusal araştırma laboratuvarları

Sonraki sayfada ABD Enerji Bakanlığının ulusal AR-GE projelerinin 2020 yılı projeksiyonu verilmiştir. 28 projeden 14 tanesi hızlandırıcı projesidir. Şekil 2.2.’de bu projeler verilmektedir. Bakan Spencer Abraham’ın sözleri konunun önemi açısından dikkat çekicidir.

The Future of Science



The health and vitality of U.S. science and technology depends on the availability of the most advanced research facilities. The U.S. Department of Energy's Office of Science leads the world in the conception, design, construction, and operation of these large-scale devices. *Facilities for the Future of Science: A Twenty-Year Outlook* lists 28 new large scientific facilities and upgrades of current facilities that will define scientific opportunities across all fields of science supported by DOE over the next 20 years.

Priority	Program	Facility
1	FES	ITER
2	ASCR	UltraScale Scientific Computing Capability
Near-Term	Tie for	HEP
		BES
		BER
		NP
		BER
Tie for	Tie for	NP
		ASCR
		ASCR
Mid-Term	Tie for	BES
		HEP
		BER
		NP
		BER
Far-Term	Tie for	NP
		FES
		BES
		HEP
		BES
		BES
		NP
		FES
		BES
		FES



Facilities for the Future of Science
A Twenty-Year Outlook

“These facilities and upgrades will revolutionize science—and society. They are needed to extend the frontiers of science, to pursue opportunities of enormous importance, and to maintain U.S. science primacy in the world. Investment in these facilities will yield extraordinary scientific breakthroughs—and vital societal and economic benefits.”

Secretary of Energy Spencer Abraham

Legend:

- Near-term (Pink)
- Mid-term (Blue)
- Far-term (Green)

Programs:

- ASCR = Advanced Scientific Computing Research
- BES = Basic Energy Sciences
- BER = Biological and Environmental Research
- FES = Fusion Energy Sciences
- HEP = High Energy Physics
- NP = Nuclear Physics

Contact
Dr. Raymond L. Orbach, Director
Office of Science
U.S. Department of Energy
SC-1, Forrestal Building
1000 Independence Avenue, SW
Washington, DC 20585-1290
202-586-5430
ray.orbach@science.doe.gov
www.science.doe.gov





Şekil 2.2. ABD Enerji Bakanlığının 2020 yılına kadar gerçekleştirmeyi planladığı ulusal projeler

2.1. Stratejik Teknoloji Olarak Parçacık Hızlandırıcıları

Hızlandırıcı teknolojisi 1930’lu yıllarda gelişen bir teknolojidir. Son 20-30 yıl içinde de çok büyük aşama kaydetmiştir. Başlangıçta daha çok parçacık fiziği ve nükleer fizik alanlarında temel araştırmalara yönelik bir teknoloji iken bugün ileri araştırmalar yapılmaktadır. Proton gibi, elektron gibi elektrik yüklü parçacıklar büyük enerjiler oluşuncaya kadar hızlandırır ve durgun hedef ile veya birbirlerine çarpıtılarak doğa hakkında en temel bilgilerin elde edilmesinde kullanılmaktadırlar. Ne kadar yüksek enerji olursa o kadar küçük mesafeleri görmemizi sağlamaktadır.

21. yüzyılın stratejik teknolojilerinden biri olan hızlandırıcıların 300’den fazla kullanım alanları vardır [1]. Örneğin, İnsan Geni Haritalanması (GENOM) Projesi’nde DNA’ların yüzde 90’ı hızlandırıcılar kullanılarak çözülmüştür. Yani hızlandırıcılar olmasaydı genlerin çözülmesi mümkün olmazdı. Diğer taraftan, iyon hızlandırıcıları olmasaydı çağdaş mikro elektronik olmazdı. Bu liste uzatılabilir. Dünyada 15 binden fazla orta ve büyük çaplı hızlandırıcı vardır. Bunlardan sadece 110’u parçacık ve nükleer fizikte temel araştırmalar için kurulmuştur, kalanlar ise tıp ve sanayi başta olmak üzere diğer alanlarda kullanılmaktadır.

Çizelge 2.1. Dünya’daki Parçacık Hızlandırıcıları. EPAC2000’de sunulan rakamlar

Çeşit	Sayı
İyon implantasyonu ve yüzey modifikasyonu	7000
Sanayide hızlandırıcılar	1500
Radyoterapi	5000
Tıbbi izotop üretimi	200
Hadronterapi	20
Sinkrotron ışınımı kaynakları	70
Nükleer ve parçacık fiziği	110
Diğer	1000
Toplam	15000

Bunlarla ilgili iki Ulusal Parçacık Hızlandırıcıları ve Uygulamaları Kongresi düzenlendi. İlki Ekim 2001’de TAEK’le birlikte, ikincisi ise Sayın Sinan Aygün’ün desteğiyle Haziran 2004’de ATO’da yapıldı [5].

Bu kongrelerde genel olarak hızlandırıcı teknolojisinin uygulamaları ve özellikle yeni nesil hızlandırıcı sürümlü nükleer sistemlerle ilgili somut bilgiler sunulmuştur. Enerji üretimi, parçacık hızlandırıcılarının 300 kadar kullanım alanından sadece bir tanesidir. Aslında 1950’li yıllarda hızlandırıcı sürümlü sistemler fikri ortaya atılmış ve ancak o yıllarda hızlandırıcı teknolojisi bu sürecin yapılabilmesine imkan vermemiştir. 1990’lı yılların hızlandırıcı teknolojisi artık yeni nesil reaktör sistemlerin kurulmasına imkan vermiştir. Hızlandırıcı sürümlü sistemler toryumu yakıt olarak kullanma imkanı vermektedir. Ülkemizdeki toryum kaynakları dikkate alındığında bizim açımızdan en önemli konu da budur. Aslında bu insanlığın gelecek yüzyıllar için enerji sorununu çözüyor ama yüksek enerji fiziğinden önümüzdeki yıllarda çok daha etkili enerji kaynakları ortaya çıkacaktır. Bütün dünyada hızlandırıcılara milyarlarca dolar yatırım yapılmaktadır. OECD ülkelerinin yanı sıra, komşularımızdan Rusya’da çok büyük hızlandırıcı merkezleri bulunmaktadır. 3 milyon nüfuslu Ermenistan 1960’larda kurduğu 6 GeV’lik hızlandırıcıya sahip olmasına rağmen 2010’a kadar yeni bir çok daha ileri hızlandırıcı merkezi kurmayı planlıyor. Bütün alanlarda kullanıldığı için elde edilen bilgiler teknolojik ve toplumsal gelişime ivme kazandıracaktır. Ama ne Türkiye’de, ne de Türk Cumhuriyetlerinde benzer bir çalışma yapılmamaktadır.

2.2. Yirmi Birinci Yüzyılın Nükleer Fiziği

Parçacık Fiziği (diğer adı ile Yüksek Enerji Fiziği-YEF) 21.Yüzyılın ~15 öncelikli AR-GE alanından biridir. Kısaca Parçacık Fiziği 21.Yüzyılda, Nükleer Fiziğin 20.Yüzyılda oynadığı role taliptir [6, 7, 8, 9].

Birinci sanayi devrimi alt-süreç düzeyinde biyolojik enerjiden kimyasal enerjiye geçiş ile birim süreçte enerji açısından 10-100 kat kazanım sağladı. İkinci sanayi devriminde ise kimyasal enerjiden nükleer enerjiye geçiş ile bu kazanım 100000 kat oldu. Bugün parçacık fiziğinde ulaşılan enerji skalası nükleerin çok çok üzerindedir. Bu nedenle bu alana günümüzde 10 milyarlarca \$ harcanmaktadır.

YEF alanındaki gelişmeler başka alanlarda da atılım sağlamaktadır. Örneğin, hepimizin kullandığı World Wide Web CERN’de geliştirildi. Yarının bilişiminin belkemiğini oluşturacak GRID YEF alanının bir ürünüdür. YEF için geliştirilen parçacık detektörleri tıp başta olmak üzere bilim ve teknolojinin bir çok alanında etkin bir şekilde kullanılmaktadır.

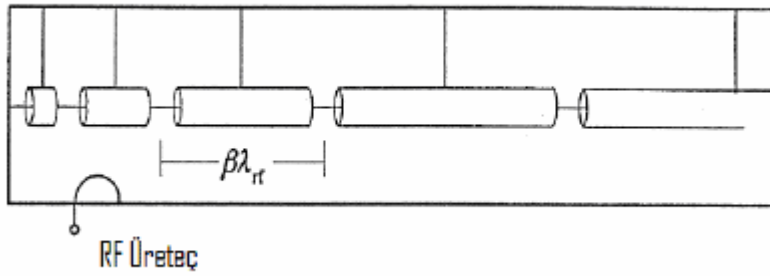
20. yüzyılın gelişmesi Rutherford’un meşhur deneyine bağlıdır. Bilindiği gibi 2005 yılı dünyada Fizik Yılı ilan edilmiştir. 1905 yılında Einstein’ın yayınladığı üç çalışma çağdaş bilimin oluşmasına çok büyük katkıda bulundu. Bununla birlikte, 1911 yılında meşhur Rutherford deneyi yapıldı ve bu deney 20. yüzyılın bilim ve teknolojisinin temelini oluşturdu. Bugün deneyler çok daha yüksek enerjilerde ve çok daha küçük mesafeleri inceleme imkanı sağlamaktadır. Hızlandırıcı teknolojisi kullanılarak özellikle temel araştırmalar sonucunda elde edilecek bilgiler 21. yüzyılda bir çok buluşa neden olacaktır.

İbret almak için bir örnek verecek olursak, Rutherford’a 1936’da soruyorlar “hocam bu müthiş nükleer enerji ne zaman insanlığın kullanımına sunulabilecek” ve çok samimi bir şekilde cevap geliyor “Belki önümüzdeki yüzyılda olabilir”. Bunu söyleyen bu alanda çalışmaları başlatan kişidir. Rutherford bile geleceği tam görememiştir. 1945’de insanlık nükleer enerjiyi uygulamaya koymayı başarıyor ve

nükleer santraller, 1946 yılında çalışmaya başlatılıyor. Bugün nükleer teknoloji sadece enerji üretimde veya bomba yapımında değil, bilim ve teknolojinin birçok alanında kullanılmaktadır.

2.3. Doğrusal (Lineer) Hızlandırıcı (LINAC)

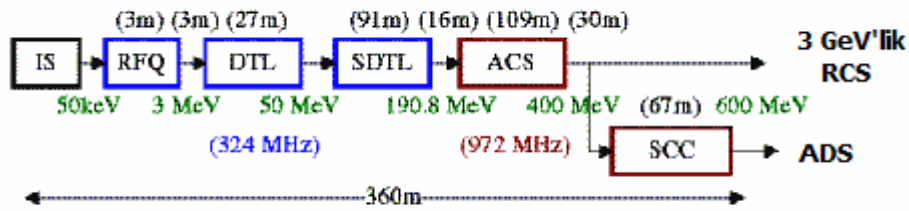
Hızlandırıcıların en temel görevi parçacıkların ivmelenmesini sağlamaktır. Parçacıkların ivmelendirilmesi ise ya yüksek bir DC gerilim farkı ile veya salınımlı radyofrekans alanlarla sağlanır. Güçlü kaynakların varlığından dolayı günümüzde en başarılı parçacık hızlandırma işlemleri rf alanlarla yapılmaktadır. Rf rezonans boşlukları içinde, aynı boyutlardaki elektrostatik hızlandırıcılarla elde edilen gerilimden oldukça yüksek hızlandırma gerilimlerine ulaşılabilir. Lineer hızlandırıcıların çalışma prensibi, salınımlı alanlara ve sürüklenme tüplerine dayanır. Radyo frekansı kullanılarak çalışan lineer hızlandırıcılarda iyonların küçük potansiyel farkları kullanılarak tekrar hızlandırılması gerekliliği problemi yoktur. Lineer hızlandırıcılarda, lineer bir tüp içerisine belli sayıda elektrot yerleştirilmiş bir düzeneğe iyonlar enjekte edilir. Elektrotların her iki tarafına uygulanan alternatif voltaj uygun şekilde belli aralıklarla sıralanmış elektrotların fazları değiştirilerek hareketli iyonların hızlanmaları sağlanır. Rf lineer hızlandırıcıların gelişimindeki ilerleme, II.Dünya savaşı sırasında radar tekniklerindeki gelişme ile bağlantılı olarak, yüksek frekanslı rf donanımının gelişiminden önemli ölçüde etkilenmiştir. 1937'de Stanford'da Hansen ve Varian kardeşlerin klistron'u icadıyla yaklaşık 100 MHz'den 10 GHz'in üstlerine kadar geniş bir yüksek frekans aralığı elde edilebilir olmuştur. 1928 yılında R. Wideroe tarafından tasarlanan lineer hızlandırıcı ile 50 keV'lik pozitif iyonlar hızlandırılmış ve ikinci dünya savaşından sonra hem elektron hem de proton hızlandırmak için kullanılmıştır. Daha yüksek frekanslarda Wideroe yapısının kapasitif doğası, elektromagnetik ışıınımdan dolayı oldukça kayıplı olmaktadır. Bunu ortadan kaldırmak için Şekil 2.2.'de de görüldüğü gibi, Alvarez tüpler arasındaki boşlukları metal kavitelerle çevrelemeyi önerdi [10].



Şekil 2.3. Alvarez'in önerdiği rf-alanlı Linac'ın şematik görünümü

Günümüzde kullanılacak doğrusal hızlandırıcılara bir örnek olarak, 2007 yılında tamamlanması öngörülen J-PARC projesinin [11] lineer hızlandırıcısı gösterilebilir. Bu hızlandırıcıda RFQ ve DTL gibi sürüklenme tüplerinin içerisinde, demetin hem hızlandırılması hem de odaklanması sağlanmaktadır. Tüm hızlandırıcılarda hızlandırma işlemi elektrik alanlarla, odaklama ve yönlendirme ise manyetik alanlarla yapılır. Demetin odaklanması önemli bir işlem olup, demet dinamiğinin konusudur. Japonya'daki bu linac projesi yapısal olarak; iyon kaynağı (IS), radyo-frekans dörtkutuplu magnet (RFQ), doğrusal sürüklenme tüpü (DTL), ayrılmış tipli doğrusal sürüklenme tüpü (SDTL), birleştirilmiş halkalı yapı (ACS) ve süperiletken linac kısımlarından oluşacaktır. Her aşamada demet enerjisinin yükseltildiği Linac projesinde 400 MeV'e kadar normal iletken, 400 MeV'den 600 MeV'e kadar ise süperiletken kaviterler kullanılması planlanmaktadır. Başlangıçta iyon kaynağından elde edilen 50 keV enerjili H^- iyonları, radyo-frekans kuadropol lineer hızlandırıcısından geçerek 3 MeV'e kadar hızlandırılır. Daha sonra ise içerisinde yine elektromanyetik kuadropol magnetlerin bulunduğu doğrusal sürüklenme tüpünden geçen proton demeti, enerjisini yaklaşık 50 MeV'e kadar çıkaracaktır. Bir sonraki aşamada, demet enerjisini 200 MeV'e ulaşmasını ise bölünmüş tipli doğrusal sürüklenme tüpü sağlayacaktır. Son olarak, birleştirilmiş halkalı yapı (ACS), demet enerjisini 200 MeV'den 400 MeV'e çıkaracaktır. Normal iletken kaviterlerin kullanılmasıyla elde edilen 400 MeV'lik demet, enjekte edilmek üzere 3 GeV'lik proton sinkrotronuna gönderilir. Ayrıca hızlandırıcı sürümlü sistemlere (ADS) dayanan nükleer yakıt dönüşümü projesi için, proton demetinin bir kısmı 600 MeV'lik deneysel bölgeye yönlendirilir. Demet enerjisini 400 MeV'den 600 MeV'e çıkarmak için ise süperiletken kaviterler (SCC) kullanılacaktır.

Toplam uzunluğu 360 m olması planlanan Lineer hızlandırıcının düşük ve orta enerjili hızlandırma bölgeleri olan IS, RFQ, DTL ve SDTL kısımları için 324 MHz'lik radyo-frekans değeri ve yüksek enerjili diğer kısımları için ise 972 MHz'lik radyo-frekans değeri öngörülmektedir. Aşağıdaki şekil, linak'ın yapısını özetlemektedir.

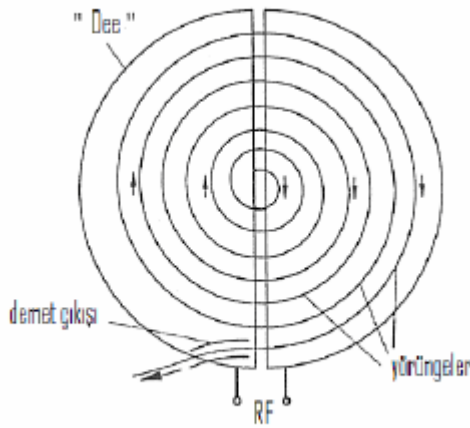


Şekil 2.4. J-PARC Linac projesinin blok diyagramı

2.4. Siklotron Hızlandırıcısı

Dairesel hızlandırıcılar, yüklü parçacıkları RF kaviteler yardımıyla hızlandıran ve manyetik alanlar aracılığı ile daireseel yörüngelerde tutan hızlandırıcılardır. En yaygın olanları ise siklotron ve sinkrotronlardır. Dairesel hızlandırıcılarda parçacıklar için aynı RF'ten tekrar tekrar geçmek mümkün olduğundan, lineer hızlandırıcılardaki gibi çok sayıda enerji kaynağı ve hızlandırma bölgesine gerek yoktur. En eski daireseel hızlandırıcı Lawrence tarafından bulunan ve ilk olarak 1932 yılında Lawrence ve Livingston tarafından kullanılan siklotron idi. Siklotronunda, parçacıklar siklotronun merkezine enjekte edilir ve dışa doğru spiral şeklinde hızlandırılır (Şekil 2.5). Zamanla bağımsız düzgün magnetik alan bükülme ile, bu spirallerin oluşmasını sağlar. Hızlandırma kaviteleri temel olarak iki adet D şeklinde magnetten oluşur. Hızlandırma alanı bu magnetler arasında üretilir. Bu yarım D şekilli kavitelere şekillerinden dolayı "Dee" denir. Yüksek enerjili parçacık, yörüngeler boyunca hızlı hareket eder fakat, yarıktan geçişler arasındaki uzaklık büyüktür. Yarıktan geçişlerin frekansı ve bundan dolayı hızlandırma siklotronunda sabittir ve bu hızlandırılmış parçacık paketçikleri sürekli demet halinde getirir. Hareket kanunlarına göre, parçacığın hızı ışık hızına yaklaştığında, parçacığın kütlesi arttıkça enerjisi de artar, yüksek enerjili parçacığın hızı fazla artmaz, bundan dolayı yarıktan geçişlerin

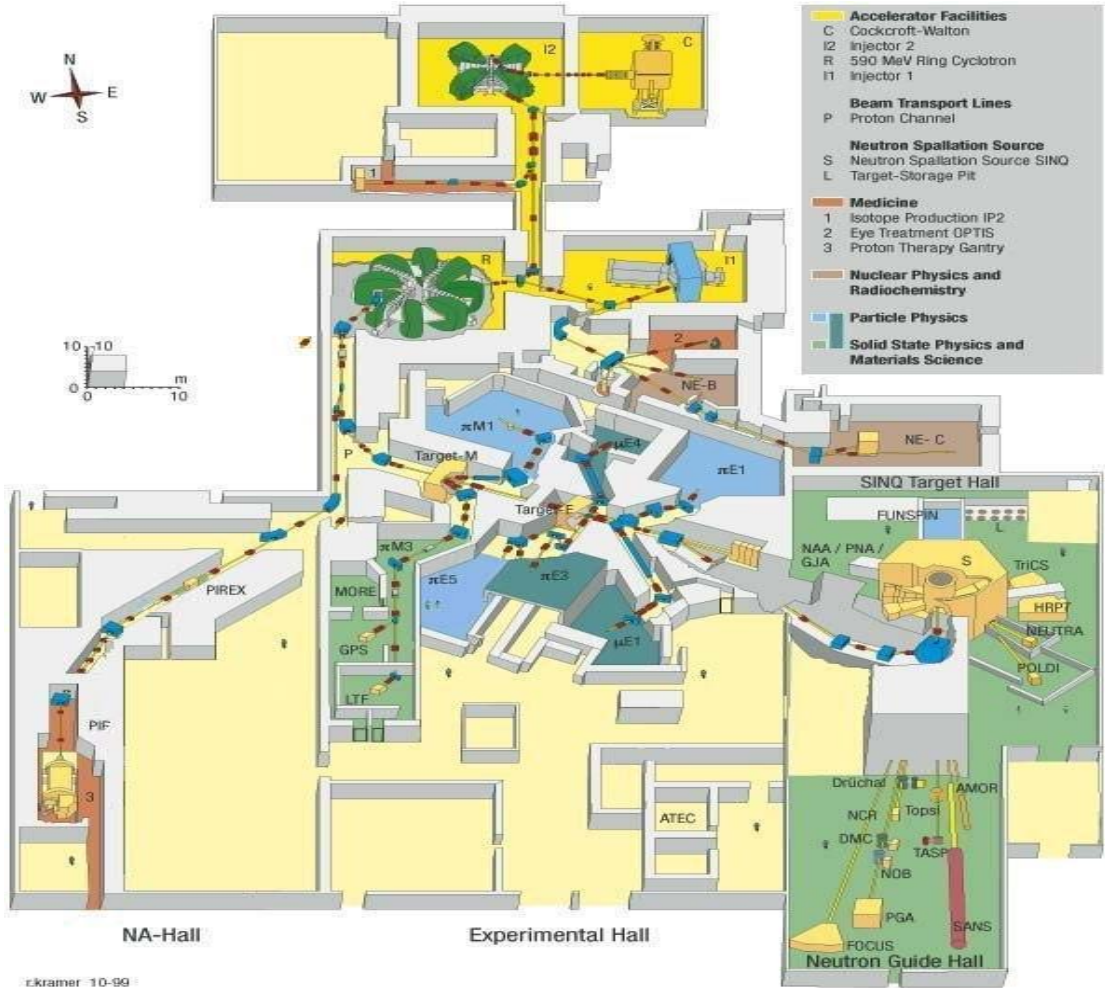
frekansı azalır ve parçacıklar yoldan çıkar. Bu sonuç 15 MeV' de protonlar için önemli bir fark ortaya çıkarır. Bu enerji Lawrence siklotronundaki en yüksek enerjidir. Bu problemi çözmek için çeşitli sistemler bulundu. Bunlardan birisi sinkro-siklotronudur. Bu hızlandırıcıda gerilim frekansı hızlandırılmış parçacık paketçiklerini yörüngede tutmak için zorlar. Sinkrosiklotron hızlandırılmış parçacık paketçiklerini anında oluşturur. Sinkrosiklotron protonları 750 MeV enerjiye kadar hızlandırabilir. Bunlar büyük ölçüde bölge-odaklama siklotronları denilen AVF (Azimuthally Varying Field) siklotronlardır. Burada magnetik alan yarıktan geçiş frekansını sabit tutacak şekilde periyodik olarak değişir. Siklotronlara benzer şekilde, AVF siklotronları da sürekli paketçik demetleri oluşturur.



Şekil 2.5. Siklotron hızlandırıcısında parçacıkların spiral olarak hızlanması

Günümüzde çalışır durumda olan büyük siklotron hızlandırıcılarına baktığımızda, İsviçre'deki PSI ile Kanada'daki TRIUMF laboratuvarları, dünyadaki en güçlü siklotron-tipli hızlandırıcılardır. Kanada'daki TRIUMF laboratuvarı bu çalışmanın konusunu oluşturmaktadır. İsviçre'deki PSI laboratuvarındaki siklotron hızlandırıcısı 590 MeV enerjilidir. PSI, tabii bilimler ve teknoloji alanlarında faaliyet gösteren birçok bilim dalında araştırmaların yapıldığı bir merkezdir [12]. Katıhal fiziği, malzeme bilimleri, temel parçacık fiziği, sağlık fiziği, nükleer ve nükleer olmayan enerji ve ekoloji araştırmaları gibi bir çok alanda araştırmaların yapıldığı PSI laboratuvarı, yaklaşık 1200 çalışanı ile İsviçre'nin en büyük ulusal enstitüsüdür. Bu laboratuvarda, ana siklotron hızlandırıcısından elde edilen 590 MeV enerjili proton

demeti, çeşitli sabit hedeflerle çarpıştırılarak nötron, müon ve pion gibi ikincil demetler üretilmektedir. Her bir demet için tahsis edilmiş farklı deney istasyonlarında, bir çok deney ve araştırma yapılmaktadır [13]. Bu deney istasyonları ve laboratuvarın genel yapısı şekil 2.6.'da görülmektedir [12].



Şekil 2.6. İsviçre'deki PSI laboratuvarının genel görünümü

2.5. Sinkrotron Hızlandırıcısı

Siklotron tipli dairesel hızlandırıcılarda, magnet ağırlıkları ve maliyetleri büyük olacağından maksimum parçacık enerjisi birkaç yüz MeV mertebesinde kalmıştır. Daha yüksek enerjilere yörünge yarıçapı sabit tutularak ulaşılabilir. Siklotron durumunda, yarıçap değişken olup manyetik alan sabit tutulurken sinkrotron hızlandırıcısında ise tam tersi olup yarıçap sabit tutulup manyetik alan değişken

olmaktadır. Daha yüksek enerjilere sinkrotron tipli dairesel hızlandırıcılarda ulaşılmaktadır. Sinkrotronlarda genel olarak üç kısım bulunur. Bunlardan birincisi hızlandırma bölgesidir. Burada bulunan az sayıdaki rf kavitelerinde parçacıklara elektromanyetik alan uygulanmaktadır. Parçacıklar sadece bu bölgede ivmelenir. Sinkrotronun ikinci kısmı enjeksiyon bölgesidir. Burada ön hızlandırıcıdan gelen iyon demeti ana sinkrotron halkasına enjekte edilir. Ön hızlandırıcı genellikle bir linak olmaktadır. Bazı hızlandırıcı komplekslerinde ise küçük bir sinkrotron ön hızlandırıcı olarak kullanılmaktadır. Bu küçük sinkrotrona, “booster” denilmektedir. Diğer hızlandırıcı tiplerinde olduğu gibi sinkrotronlarda da demeti odaklamak için kuadrupol magnetler kullanılır. Çoğu sinkrotronlar FODO örgü yapısına sahiptir. Odaklayıcı ve dağıtıcı kuadrupol magnetlerin ard arda dizilmesiyle oluşan FODO yapısında; F: odaklayıcı (focusing), D: dağıtıcı (defocusing) ve O: uzay boşluğu anlamlarına gelmektedir. Bunların dışında yine manyetik alan temelli, eğici magnet ve sextupol magnet gibi çeşitli magnetler, demet monitörleri vb. ekipmanlar kullanılır. Sinkrotronun üçüncü kısmı ise çıkarma bölgesidir. Bu bölgede, halka içerisinde belki yüzlerce dönüş yaptıktan sonra istenilen enerjilere ulaşan demet, yönlendirici magnetler kullanılarak halkadan çıkarılır ve deneysel çalışma laboratuvarlarına yönlendirilir.

2.6. TAC Proton Hızlandırıcısı

TAC projesi için önerilen proton hızlandırıcısı, enerjisi 1-5 GeV olan yoğun akımlı bir proton demeti üretmeyi amaçlamaktadır. Dünyadaki önde gelen hızlandırıcı merkezleri temel alınarak planlanan bu komplekste, proton hızlandırıcısının farklı noktalarından alınan proton demetleriyle oluşturulacak müon ve nötron bölgesi laboratuvarlarında, sırasıyla müon ve nötron ikincil demetleri kullanılarak çok sayıda araştırma yapılabilecektir. Bu araştırmalar, başta fizik ve diğer temel bilimler olduğu gibi birçok uygulamalı araştırmaları da içine alan oldukça geniş bir yelpazeyi oluşturmaktadır. Başlangıçta TAC projesi için Proton Sinkrotronu planlanmakta iken [3], son yıllarda dünyada özellikle Hızlandırıcı Sürümlü Sisteme (ADS) yönelik Süper Proton Linak’a yönelim artmıştır, dolayısıyla o yönde de çalışmalarımız sürmektedir [14].

Son yıllarda Hızlandırıcı Sürümlü Sistemler ile ilgili çalışmalar hızlanarak devam etmektedir. OECD/NEA 2002 raporuna göre bu çalışmalar Belçika, Fransa, Almanya, İtalya, Japonya, Güney Kore, İspanya, İsveç, İsviçre, Rusya ve ABD’de sürdürülmektedir (son dönemde bu konudaki çalışmalar Çin, Hindistan gibi ülkelerde de başlatılmıştır). Uluslararası düzeyde bu çalışmalar Avrupa Komisyonu (EURATOM, TWG), IAEA ve OECD/NEA tarafından koordine edilmektedir. Gelişmiş ülkelerde başlıca amaç zararlı nükleer atıkların zararsızlaştırılması olmakla birlikte, ülkemiz açısından ADS teknolojisinin en önemli özelliği nükleer yakıt olarak Toryumun kullanılmasına imkan sağlamasıdır.

3. TRIUMF LABORATUVARI

TRIUMF, Vancouver'a 20 dakikalık mesafede olan British Columbia Üniversitesi kampüsünde kurulu, dünya çapında atom-altı fizik araştırmalarının yapıldığı bir laboratuvarıdır. 1968-1974 yılları arasında kurulan TRIUMF, başlangıçtan beri Kanada'daki üç üniversite tarafından çalıştırıldı. Bunlar; British Columbia üniversitesi, Simon Fraser üniversitesi ve Victoria üniversiteleridir. Bu üç üniversiteye izafeten TRI-University Mezon Kurulumu (TRI-University Meson Facility) anlamında TRIUMF denilmiştir.

TRIUMF, son derece şiddetli parçacık demetleri üreten dünyadaki üç önemli atom-altı araştırma laboratuvarından biridir. Laboratuvarın kalbi olan 500 MeV'lik siklotron hızlandırıcısı, saniyede 1000 trilyon parçacık hızlandırmaktadır. Sürekli demet modunda çalışan siklotron hızlandırıcısından alınan yüksek enerjili proton demeti, manyetik alanlarla yönlendirilerek deneysel çalışma alanlarına ulaştırılır. Proton demetinin farklı tür hedeflere çarptırılmasıyla; nötron, pion ve müon ikincil parçacık demetleri üretilir. Proton, nötron, pion ve müon demetleri kullanılarak pek çok alanda uygulama ve araştırma yapılmaktadır. Bunlardan özellikle, pion ve proton demetleri kanser tedavisinde kullanılmaktadır. TRIUMF, proton terapi yöntemiyle göz kanseri tedavisinin yapıldığı Kanada'daki tek merkezdir. Ayrıca pion demeti kullanılarak beyin kanseri tedavisinin yapıldığı dünyadaki sayılı merkezlerden biridir. Laboratuvarın çeşitli deney istasyonlarında, radyoizotop üretimi yapılmaktadır. Müon demeti kullanılarak yapılan çalışmalarda, μ SR (Müon Spin Rezonans) tekniği büyük rol oynamaktadır. Bu merkezde tıp ve yaşam bilimlerine ilave olarak; malzeme bilimi, endüstriyel uygulamalar, atom fiziği, yüksek enerji fiziği ve nükleer yapı gibi pek çok alanda araştırmalar yapılmaktadır. Resim 3.1, TRIUMF laboratuvarının genel bir görünümünü vermektedir.



Resim 3.1. TRIUMF laboratuvarının uzaktan görünümü

3.1. Ana Hızlandırıcı ve Deneyel Çalışma Bölümleri

Dünyadaki en büyük siklotronlardan biri olan TRIUMF siklotronu, 1974 yılında inşası bitmiş ve tam enerjili proton üretimi ilk kez 15 Aralık 1974 tarihinde yapılmıştır. İyon kaynağından gelen yaklaşık 300 keV'lik enerjiye sahip H^+ iyonları, siklotron hızlandırıcısında maksimum 520 MeV'lik enerjiye kadar hızlandırılır. Parçacık hızlandırıcılarının özel bir tipi olan siklotron hızlandırıcıları, parçacıkları spiral bir yörünge boyunca hızlandırır. Belirli bir hıza sahip olan yüklü parçacıklar bir manyetik alan içerisine girdiği zaman dairesel hareket yapmaya başlar. TRIUMF siklotronunda kullanılan magnet altı bölüm halinde bir rüzgar gülünü andırmaktadır (Resim 3.2.) Bu magnetin toplam ağırlığı, yaklaşık 4000 ton kadardır. Siklotron içerisindeki iyonlar yaklaşık 1500 tur attığında 520 MeV'lik maksimum enerjiye ulaşabilmektedir. 520 MeV'lik enerjiye sahip iyonlar, ışık hızının %75'ine ulaşmaktadır. Çizelge 3.1, TRIUMF siklotronunun bazı önemli parametrelerini göstermektedir.

Çizelge 3.1. TRIUMF siklotronuna ait bazı parametreler

Maksimum Enerjisi (MeV)	520
Hızlandırılan Parçacık	H ⁺
Saniyede hızlanan parçacık sayısı (trilyon)	1000
Toplam Magnet Ağırlığı (ton)	4000
Magnet çapı (m)	18
Magnet için gerekli akım (A)	18.500
Elektrik alan frekansı (MHz)	23
Hızlandırma için gerekli zaman (μs)	326
Maksimum spiral tur	1500
Maksimum enerjideki ışık hızı (km/s)	225.000

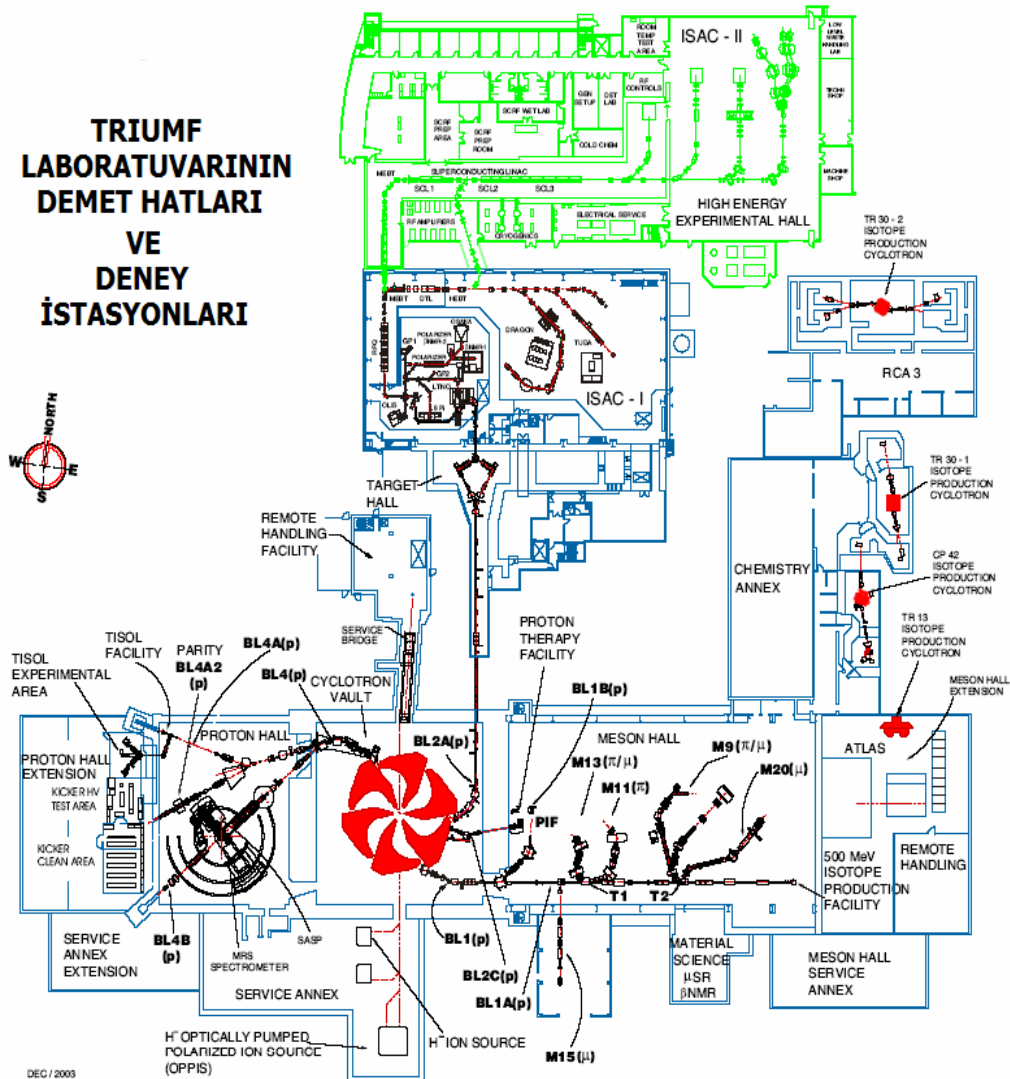
İyon kaynağı, siklotron hızlandırıcısının güney kısmındaki odada bulunur. Burada dört farklı iyon kaynağı vardır. Bunlar deney için gerekli proton demetinin tipine bağlı olarak kullanılır. Hidrojen iyonları, hidrojen atomunun bir elektron almış halidir. Bilindiği gibi hidrojen atomu doğadaki en basit atom olup, pozitif yüklü bir proton ve onun etrafında hareket eden negatif yüklü bir elektrondan oluşur. Hidrojen atomu nötrdür. Hidrojen iyonu ise elektrik yükü taşıdığından elektrik ve manyetik alan kullanılarak yönlendirilebilir. İyon kaynağındaki kaynak-1 ve kaynak-3, polarize olmamış hidrojen iyonlarını üretirken, kaynak-2 ve kaynak-4 polarize olmuş hidrojen iyonları üretir. Yönlendirici magnetlerle 35 metrelik mesafeyi geçerek siklotrona ulaşan iyon demetlerini odaklamak için ise elektrostatik kuadrupol magnetler kullanılır. Yaklaşık 300 keV’lik enerjiye ulaşan iyon demeti siklotrona enjekte edilir.



Resim 3.2. TRIUMF laboratuvarının siklotron hızlandırıcısı

Proton siklotronundan çıkarılan protonların enerjisi 180 MeV'den 520 MeV'e kadar sürekli olarak değişkendir. Yani bu enerji aralığında istenen enerji değeri elde edilebilir. Siklotrona H^+ iyonlarının hızlandırılması, değişken enerjilerde pek çok proton demetinin çıkarılmasını mümkün kılar. Nitekim TRIUMF'daki siklotrona, birbirinden bağımsız olarak değişken enerji ve yoğunluk değerlerine sahip dört demet çıkarılır. Dört ana demet kanalı deneysel çalışma odalarına ulaşarak, başka demet kanallarına ayrılır. TRIUMF laboratuvarının ana hızlandırıcı binasında, deneysel çalışmalar için iki temel bölge veya çalışma alanı (odası) vardır. Bunlardan siklotronun batısında kalan odaya Proton odası (Proton Hall), doğusunda kalan odaya ise Mezon odası (Meson Hall) denir. Şekil 3.1'den de görülebileceği gibi proton odasına, BL4 isimli demet hattı (BL: Beam line), mezon odasına ise BL1 ve BL2C demet hatları proton demeti taşımaktadır. Proton odasında; radyoizotop üretilen TISOL deneysel bölgesi yer almaktadır. Burada ayrıca deneysel amaçlı bazı spektrometrelerde bulunmaktadır. Mezon odasında proton terapi, pion terapi, izotop

üretimi ve μ SR gibi çeşitli deneylerin yanı sıra nötron demetinin kullanıldığı uygulamalarda yapılmaktadır. Dördüncü temel demet hattı ise BL2A demet kanalı olup ISAC deneysel bölgesine gitmektedir. ISAC-I ve ISAC-II deneysel çalışma bölgelerindeki radyoizotop üretiminde, TISOL bölgesindeki farklı olarak bir lineer hızlandırıcı kullanılmaktadır. TRIUMF laboratuvarında bunlardan başka, dört tane küçük siklotron hızlandırıcısı yer almaktadır. Bu küçük hızlandırıcılar, izotop üretiminde kullanılmaktadır.



Şekil 3.1. TRIUMF laboratuvarının genel planı

3.2. Proton Odası

Siklotron hızlandırıcısının batısında yer alan proton odasını, BL4 demet hattı beslemektedir. İki oda arasındaki sınırda, BL4 demet hattı BL4A ve BL4B olarak adlandırılan iki demet koluna ayrılır. BL4A demet kanalı da iki kola ayrılır. BL4A2 ve BL4A3 isimli bu demet kanalları ise farklı uygulamalar için kullanılır.

3.2.1. BL4A2 numaralı demet hattı

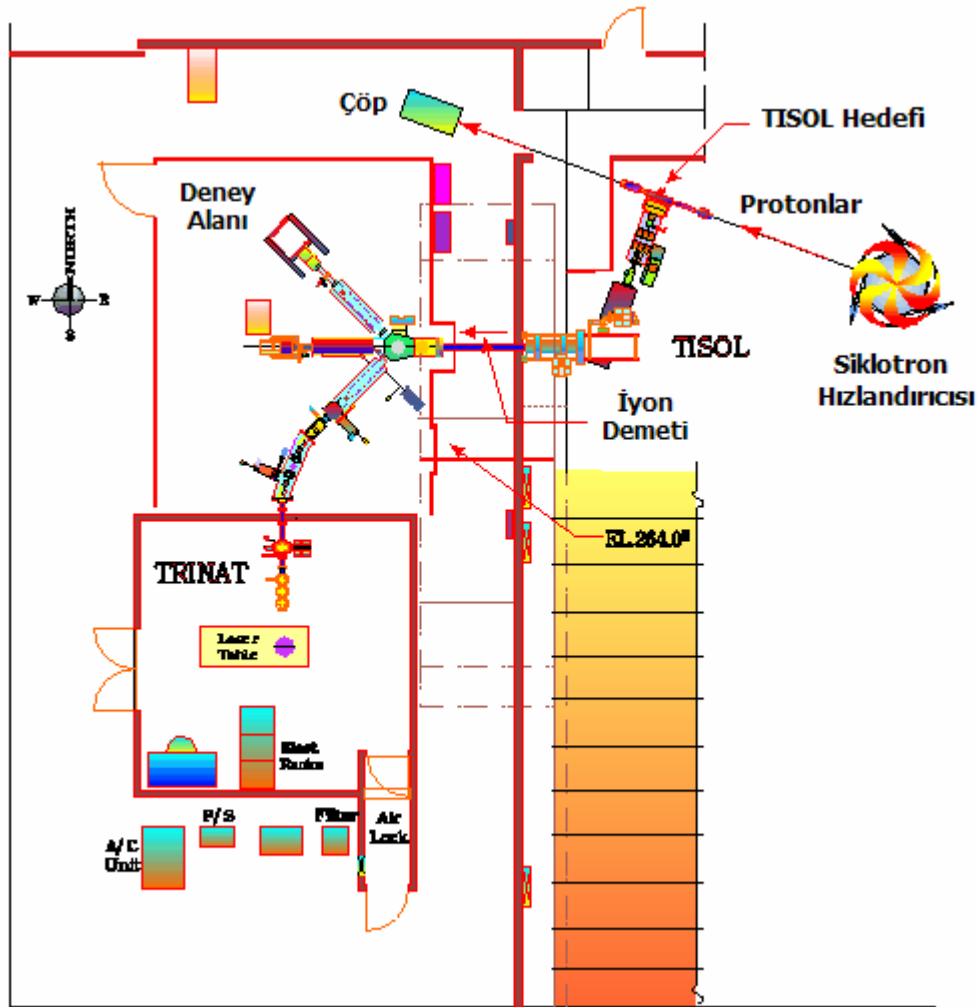
Bu demet kanalı tek bir deney için kullanılmaktadır. Proton-proton saçılmalarındaki parite ihlali ölçümlerinin yapıldığı bu deneyler için, yoğunluğu küçük olan polarize olmuş demet kullanılır. Bu demet kanalının proton akımı ise 0.5 μA ile sınırlıdır.

3.2.2. TISOL ve TRINAT deneysel bölgeleri

TISOL, ISOL-tipli izotop üretiminin yapıldığı küçük bir test deney istasyonu olup “Test Isotope Separator On-line” ifadesinin baş harflerinden oluşur. Bu bölgeyi BL4A3 demet kanalı beslemektedir. TISOL’un temel görevi Li ve Na gibi radyo izotop iyon demeti üretmektir. Özellikle de atom sayısı küçük olan izotoplar tercih edilmektedir. TISOL istasyonunun kurulmasının amacı, ISAC projesi için deneyim kazanmaktır. Burada yapılan deneylerle, izotop üretimini maksimum seviyeye çıkarmak için, hedefte kullanılacak çeşitli malzemeler denenmiş ve yeni hedef malzemeler geliştirilmiştir. TISOL, yapısal olarak dört temel bileşenden oluşur. Bunlar; istasyonun ön ucunda yer alan hedef veya iyon kaynağı, izotop seçiminin yapıldığı yer olan magnetik analizör, elektrostatik elemanlara sahip demet kanalı ve son olarak iyonları toplayan collection istasyonudur. Bu istasyonun işleyişi şöyle sıralanabilir. Siklotron hızlandırıcısından gelen yaklaşık 520 MeV enerjiye sahip proton demeti, üretim hedefine çarparak alkali izotopları üretir. Hedef olarak ise kalsiyum oksit kullanılmaktadır. Hedef 1200 $^{\circ}\text{C}$ ’ye kadar ısıtılır ve alkali atomlar materyalden hızlı bir şekilde yayılır. Yüksek çalışma fonksiyonu için hedef ayrıca sert bir metal silindire kaplanmıştır. Metal silindirden dolayı alkaliler iyonize olur ve bir iyon demeti elde edilir. Oluşan iyon demetinden arzu ettiğimiz kütleye sahip

izotopları seçmek için magnetik analizör kullanılır. Kütle seçimi yapıldıktan sonra elektrostatik optikler kullanılarak seçilmiş iyon demet deney için kullanılır.

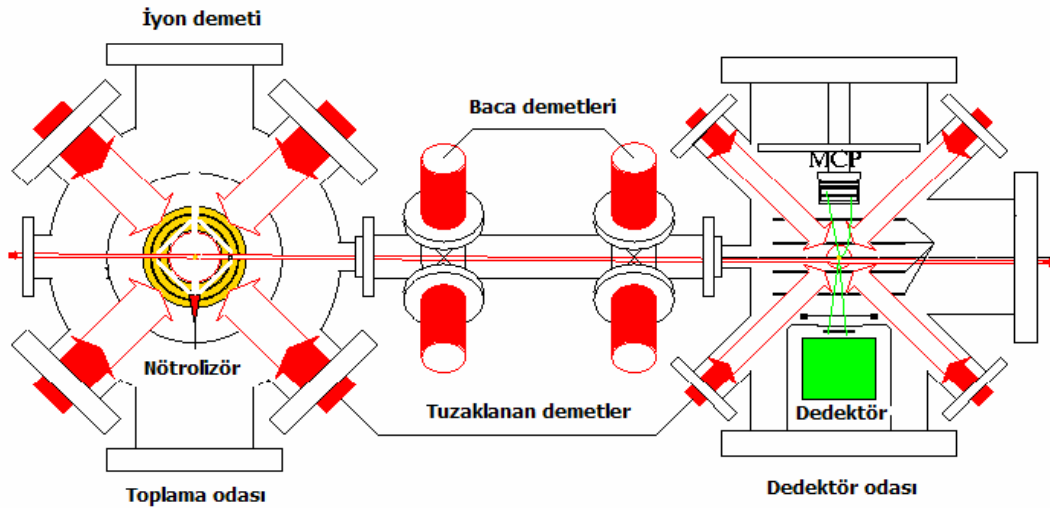
TISOL deney istasyonunun devamında ise TRINAT deney istasyonu yer alır. TISOL’da elde edilen seçilmiş iyon demeti optik düzeneklerle TRINAT bölgesine yönlendirilir. TRINAT, “TRIUMF’s Neutral Atom Trap” ifadesini simgelemektedir. İçerisinde LASER sisteminde kullanıldığı TRINAT ve TISOL deney istasyonlarının planı, şekil 3.2.’de görülmektedir.



Şekil 3.2. TISOL ve TRINAT deney istasyonlarının planı

TRINAT deney istasyonunda Lazer kullanılarak, izotopların tuzaklanması ve bu sayede izotopun yarı ömrünün artırılması sağlanmaktadır. TISOL bölgesinde üretilen

izotopların ömrü kısa olup, deneylerde hemen kullanılmazlarsa başka çekirdeklere dönüşürler. Bir ölçüt olarak ifade edilirse, tuzaklanmış izotopların ömrü, tuzaklanmamış izotopların ömrüne göre 10 kat daha fazladır. Lazer kullanarak, fizikçiler radyoaktif nötral atomları daha düşük enerjilere soğutabilmekte ve onları tuzaklayabilmektedirler. Bu yeni teknolojiyi geliştiren iki amerikan bilim adamı, 1997 yılında Nobel Fizik ödülünü kazanmıştır. Tuzak içerisinde ki soğuk ve tuzaklanmış atomlar lazer spektroskopisi deneyleri için çok kullanışlıdır. Magneto-optik tuzaklama (MOT), TRINAT'ın temelidir. Radyoaktif atomlar, lazer ışık basıncıyla 1 mm'lik bir bulut içinde tuzaklanır. Buradaki atomik çekirdekler bir pozitron ve bir nötrino yayarak bozunur. 1996 yılının sonlarında gerçekleştirilen ilk beta bozunumu ölçümü, bu yöntemle bir aşama daha ilerlemiştir. Çalışma prensibi şekil 3.3.'de görülen TRINAT tekniğinde, beta bozunumu deneylerinin başlamasına yetecek kadarlık bir zaman içinde, mesela bir Potasyum-38'in 3000 atomu veya Potasyum-37'nin 1000 atomu tuzaklanabilir.



Şekil 3.3. TRINAT sisteminin çalışma prensibi

Radyoaktif iyon demeti sıcak bir yaprak içinde durdurulur. Atomlar yayılır ve tuzaklama bölgesine enjekte edilir. Atomlar tuzaklandıktan sonra beta bozunumu gerçekleşir. Bu bozunum buradaki dedektörle ölçülür. TRIUMF'daki bu TRINAT programı, radyoaktif atomları tuzaklayarak standart model ötesindeki yeni fizik olaylarını araştırmak için düşük enerjili deneyler yapmaktadır. Yüksek enerji

fiziğinde önemli bir teori olan standart model, bilinen temel parçacıklar ve kuvvetler arasındaki ilişkileri tanımlamakta ve hâlâ geçerliliğini korumaktadır. Bu modelinde sınırları vardır. Parçacıklar arasındaki zayıf etkileşim, çok ağır bozonların değiş-tokuşu ile gerçekleşir. Mesela, standart model tarafından tanımlanmayan yeni bozonların değiş-tokuşu halen araştırma konusudur. Bu ve bunun gibi bir çok konu, standart model ötesindeki yeni fizik kapsamında araştırılmaktadır.

Egzotik izotopların incelenmesi, astrofizik araştırmaları için de büyük ilgi çekmektedir. Evrendeki karbon ve oksijen oranı gibi çeşitli astrofizik araştırmaları hem TISOL hem de TRINAT deney istasyonlarında yapılmaktadır. Öncelikle nükleer fizik olmak üzere, yüksek enerji fiziği ve astrofizik gibi araştırma alanların başını çektiği bir çok alanda, radyoaktif bozunumlara ilgi duyulmaktadır. Burada incelenen izotoplar, Li gibi atom numarası küçük çekirdeklerdir. TRIUMF laboratuvarının yeni radyoaktif demet istasyonu olan ISAC, buranın devamı veya yükseltilmiş halidir. İlave olarak bir doğrusal hızlandırıcının kullanıldığı ISAC istasyonunda, enerjisi artırılmış K gibi izotoplar incelenerek daha detaylı inceleme ve araştırmalar yapılmaktadır. Resim 3.3, TRINAT sisteminin önemli bir parçası olan lazer masasını göstermektedir.



Resim 3.3. TRINAT sisteminde kullanılan Lazer masası

3.2.3. BL4B numaralı demet hattı

Bu demet kanalındaki proton demetinin enerjisi, 185 MeV ile 516 MeV arasında tutulmaktadır. Bu kanal spektrometre deneyleri için kullanılmaktadır. Bu amaçla, nükleer reaksiyondan gelen yüklü parçacıkların spektrumunu ölçen, bir magnetik spektrometre çifti bulunmaktadır. Spektrometreler büyük dipol magnetler içerir. (n, p) reaksiyonundan gelen nötron veya proton spektrumunun ölçümü, artakalan protonların dedekte edilmesi şeklinde, bu spektrometrelerin kullanılmasıyla gerçekleştirilir. Böyle ölçümler için normal saçılma odası kaldırılır ve bir eğici magnet yerleştirilir. Bu magnet, hedeften geçtikten sonra proton demetini BL4B3 demet kanalına saptırır. Bu demet kanalı da BL4B2 ve BL4B3 şeklinde dallanmıştır [15].

3.3. ISAC Deneyisel Çalışma Alanı

Siklotron hızlandırıcısının kuzey kısmında yeralan ISAC deney istasyonunu, dört temel demet kanalından biri olan BL2A demet hattı beslemektedir. Bu demet kanalındaki 500 MeV’lik protonların maksimum akımı 100 μ A’dır. İzotop ayırımı ve hızlandırılması anlamına gelen ISAC, “Isotope Separator and Accelerator” ifadesinin baş harflerinden oluşur. Radyoaktif iyon demetinin üretilmesi için iki teknik vardır. Bunlardan ilki, parçalama (fragmentation) metodudur. Bu teknikte, yüksek enerjili ağır çekirdekler ince bir hedef üzerine bombardıman edilir. Çıkan yüksek enerjili parçacıklar bir demet taşıma kanalı tarafından yakalanır ve bir magnet sistemi kullanılarak kütle ayırımı yapılır. Oluşan radyoaktif iyon demeti, ilgili deney istasyonuna yönlendirilir. İzotop üretim tekniklerinden ikincisi ise ISOL tekniğidir. “Isotope Separator On-Line” anlamına gelen ISOL tekniğinde, diğerinden farklı olarak iyonların hızlandırılarak enerjisinin artırılması sağlanmaktadır. ISOL tekniği yaklaşık 30 yıldır kullanılmaktadır. Kısa ömürlü nükleer izotopların üretilmesi, üretilen izotopların kütle ayırımının yapılması ve bu seçilmiş iyon demetinin enerjisinin artırılması gibi aşamaları olan ISOL tekniği birçok laboratuvar da kullanılmaktadır. Bu tekniği kullanan laboratuvara örnek olarak CERN’deki

ISOLDE deney istasyonu verilebilir. Burada radyoçekirdekler, 1 GeV'lik proton demetiyle gerçekleştirilen nükleer spallasyon reaksiyonları aracılığı ile üretilmektedir. 1 GeV'lik proton demeti, CERN'deki yüksek enerji hızlandırıcı zincirinin bir parçası olan Booster sinkrotronundan gelmektedir.

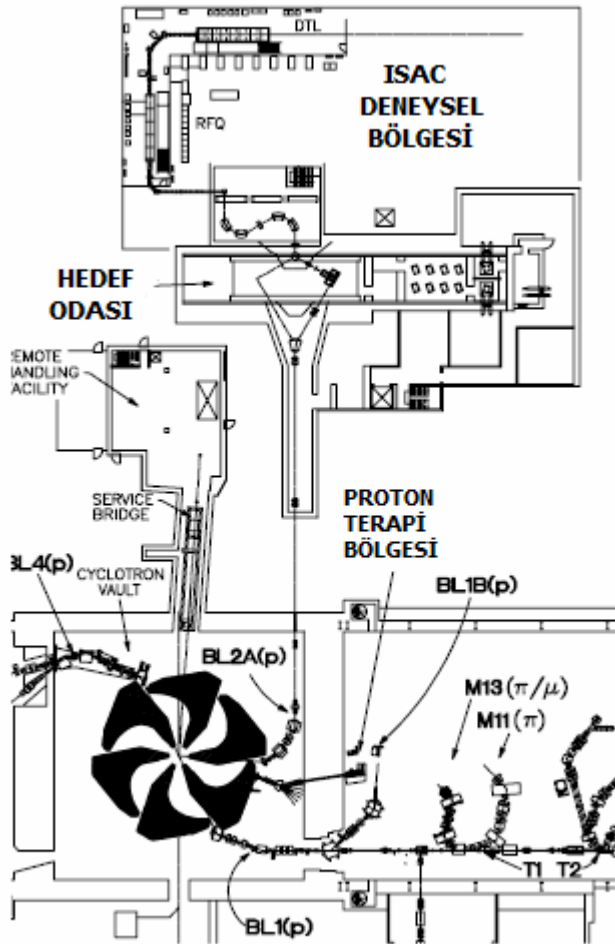
Dünyadaki diğer araştırma merkezlerine baktığımızda, ISOL tekniği genel olarak, araştırma reaktörlerinde ve U-235'in termal nötron fisyonunda bir radyo-çekirdek üretim mekanizması olarak kullanılmaktadır. Ayrıca büyük bir sinkrotron veya siklotron hızlandırıcısına ait bir demet kanalı sadece bu araştırmalar için tahsis edilmektedir. İsveç-Studsvik reaktöründeki OSIRIS deney istasyonu buna örnek olarak gösterilebilir. ISOL-tipli hızlandırılmış demet istasyonlarının temel bileşenleri şunlardır: radyoçekirdekleri üretmek için temel demet hızlandırıcısı veya reaktör, hedef/iyon kaynağı kompleksi, yüksek çözünürlüklü kütle ayırıcısı, ikincil demet hızlandırıcısı ve araştırma programları için deneysel cihazlar. ISOL-tipli izotop üretimi yapan, dünyadaki bazı merkezlerin listesi aşağıdaki tabloda verilmiştir.

Çizelge 3.2. ISOL-tipli radyoaktif izotop üretiminin yapıldığı bazı merkezler

Proje/Laboratuvar	Yer	Temel demet hızlandırıcısı	İkincil demet Hızlandırıcısı
HRIBF	Oak Ridge	Siklotron, k=100MeV	Tandem, 25MV
		Siklotron, k= 200-250 MeV, p	Tandem+SC Booster, 50MV
INS	Tokyo	Siklotron, k=67MeV	RFQ+IH Linac, 14 MV
	Tsukuba	Sinkrotron, 3GeV, p	RFQ+IH Linac
ARENAS	Louvain-la-Neuve	Siklotron, k=110MeV	Siklotron, k=44MeV
SPIRAL/GANIL	Caen	Siklotron, k=400 (H ⁺)	Siklotron, k=265MeV
REX-ISOLDE	CERN	Sinkrotron, 1GeV, p	RFQ+IH Linac, 16MV
ISAC/TRIUMF	Vancouver	Siklotron, k=500 (H ⁺)	RFQ+IH Linac, 13MV
PIAFE	Grenoble	Reaktör, termal n	Siklotronlar, k=88, 160MeV
ATLAS	Argonne	Linac, 245 MeV	RFQ+SCLinac, 70MV

TRIUMF'daki ISOL-tipli izotop üretiminin yapıldığı ISAC deneysel istasyonunun kurulması, ilk kez 1984 ve 1985 yıllarında yapılan workshop'larda önerildi. Ve ilk aşama olarak, deneysel bilgi elde etmek amaçlı, küçük bir test istasyonu olan TISOL (Test Isotope Separator On-Line) deneysel bölgesi kuruldu. Siklotron hızlandırıcısının batısındaki proton odasında kurulu olan TISOL istasyonunu, BL4A demet kanalı beslemektedir. 1995 yılının haziran ayında, önerilen ISAC deneysel bölgesinin inşası için gerekli destek sağlandı ve beş yıllık (1 Nisan 1995 - 31 Mart 2000) proje hayata geçmiş oldu. Bu projenin inşası sırasında TISOL test istasyonu, deneyim ve deneysel sonuçlar elde etmek için sürekli çalıştı. Başlangıçta, ISAC

deney istasyonunun proton odasındaki TISOL test merkezinin devamına kurulması önerildi. Fakat bu bölgeye gelen BL4A demet kanalındaki proton akımının sınırlı olması ve buradaki diğer deneyleri etkilemesi gibi sebeplerden dolayı, istasyonun BL2A demet kanalının devamındaki bölgeye kurulmasına karar verildi. TRIUMF laboratuvarının bu yeni ISAC opsiyonu, diğerlerine göre daha çok maliyetli olmasına rağmen diğer deneysel çalışma alanlarından bağımsız ayrı bir deneysel istasyon olmuştur.



Şekil 3.4. Ana siklotron hızlandırıcısı ve ISAC deney istasyonunun genel planı

Yukarıdaki şekilde de görüldüğü gibi siklotron hızlandırıcısının kuzeyinde yer alan ISAC deneysel alanını, BL2A demet kanalı beslemektedir. Siklotrondan çıkan maksimum 100 μA akıma sahip proton demetinin enerjisi 480-500 MeV aralığında değişmektedir. ISAC bölgesine gelen BL2A demet kanalı ilk önce, içerisinde iki

farklı hedef istasyonunun bulunduğu hedef odasına uğrar. Hedef üzerinde oluşturulan Li-8 ve Al-32 gibi radyoaktif izotoplar, bitişikteki iyon kaynağına transfer edilir. İyon kaynağında iyonize olan izotoplar, bir iyon demeti olarak çıkarılır. Oluşan iyon demeti, bir kütle ayırıcısından geçirilerek istenilen nitelikteki izotopların seçimi yapılır. Seçilen izotoplar, düşük enerjili taşıma kanalından (LEBT) geçerek RFQ ve DTL aşamalarından oluşan bir lineer hızlandırıcı sayesinde yüksek enerjilere ulaşır. Tüm bu işlemlerden sonra elde edilen özel nitelikli iyon demeti, kullanılmak üzere yüksek enerjili demet taşıma kanalı (HEBT) ile deney istasyonlarına taşınır. Bu deneysel bölgede kullanılacak izotoplar, yüksek enerjili olacaktır. Dolayısıyla buraya yüksek enerjili deney bölgesi denilir. İyon demeti hızlandırılmadan önce, LEBT kanalına bağlı olarak bir düşük enerjili deneysel bölge yer almaktadır. Burada da enerjisi küçük olan iyon demeti gerektiren deneyler yapılmaktadır.

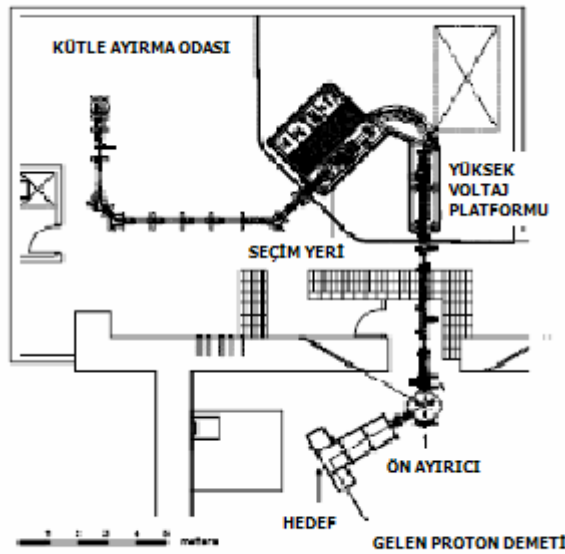
3.3.1. Hedefler ve iyon üretimi

Hedef odasında; üretim hedefleri, demet çöpü, iyon kaynakları ve ilk elektrostatik demet odaklanmasının yapıldığı cihazlar yer alır. Oda, çelik ve beton koruyucularla çevrelenmiştir. İki farklı hedef istasyonu bulunmaktadır. İzotop üretiminin yapıldığı hedef malzeme, çapı 2 cm ve uzunluğu 20 cm olan bir tüp içerisine yerleştirilir. Üretilmek istenen izotopa bağlı olarak hedef malzeme değişkenlik gösterebilir. Malzeme yaprak şeklinde, toz veya sıvı formunda olabilir. Malzeme seçimi, üretilmek istenen özel radyoaktif izotop türünün eldesini maksimum yapacak şekilde gerçekleştirilir. İyon kaynağında, üretilen radyoizotopların iyonlaştırılması yapılır ve bir iyon demeti elde edilir. İyon demetinin elektrostatik odaklama cihazları kullanılarak odaklanması, ilk kez burada gerçekleştirilir. Hedef odasından çıkan iyon demeti, kütle ayırıcısına gider.

3.3.2. Kütle ayırıcısı

Kütle ayırıcısının ön ucu, ön ayırımının yapıldığı yer olup bir dizi elektrostatik üçlü ve ikili magnetlerden oluşur. Yaklaşık 300'lük bir çözme gücüne sahip olan buradaki magnetler, 60°'lik bir saptırma açısıyla istenen kütleye sahip iyonları seçer. Asıl

kütle ayırımının yapıldığı magnetler, yüksek voltaj bölümüne yerleştirilmiştir. Kütle ayırma işlemi, 6 ile 238 akb arasında kütleyle sahip olan iyonları kapsamaktadır. Buradaki ana kütle ayırıcısının iyon saptırma açısı 135^0 olup 1000 mm'lik bir yarıçap oluşturmaktadır. Kütle ayırıcısından çıkan iyon demeti ya RFQ hızlandırıcısına ya da düşük enerjili deneysel çalışma alanına yönlendirilir. RFQ hızlandırıcısına giden iyon demeti, yüksek enerjili iyon gerektiren deneyler için kullanılacaktır. Bu bölgede yapılan demet taşıma işlemleri, düşük enerjili demet taşıma kanalları (LEBT) ile yapılır. Şekil 3.5. kütle ayırma sisteminin aşamalarını göstermektedir. LEBT kanalındaki tüm optikler elektrostatiktir. Kuadropoller 50 mm uzunluğunda ve 25 mm yarıçapa sahiptir. Demet taşıma kanallarında demetin hızlandırılması gerçekleşmez. Sadece demetin odaklanması ve taşınması sağlanır.

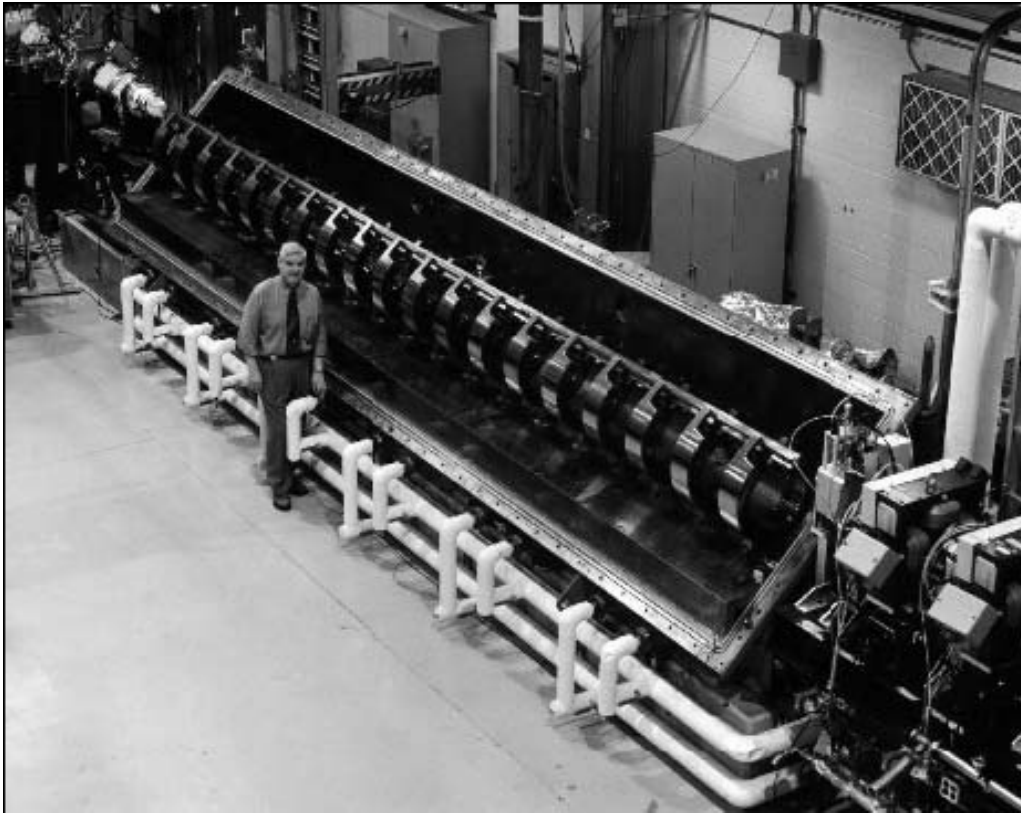


Şekil 3.5. ISAC deney istasyonundaki kütle ayırma sistemi

3.3.3. RFQ hızlandırıcısı

Lineer hızlandırıcının ilk aşaması olan RFQ, iyon demetinin enerjisi 2 keV/nükleon'dan 150 keV/nükleon'a çıkarmaktadır. RFQ hızlandırıcısı 8 m uzunluğunda olup 35 MHz'de çalışmaktadır. Yapısal olarak, dört tane modüle edilmiş elektrotlarla desteklenen 19 tane benzer bölünmüş halkalı yapılardan oluşur. Elektrot ve halkalı yapıların ikisi de su soğutmalıdır. Elektrotlardaki voltaj 74 kV,

odaklama şiddeti $B = 3.5 \text{ T}$ ve karakteristik empedans $313 \text{ k}\Omega\text{m}$ olarak hesaplanmıştır. RFQ yapısının içerisinde, demetin hızlandırılması ve odaklanması gerçekleştirilir. Kuadrupol magnetler, odaklamayı sağlamaktadır. RFQ'dan çıkan ve 150 keV/nükleon 'luk enerjiye ulaşmış iyon demeti, hızlandırma sisteminin son kısmı olan DTL yapısına, orta enerjili demet taşıma kanalı (MEBT) ile ulaşır. Resim 3.4.'de RFQ hızlandırıcısının bir resmi görülmektedir.

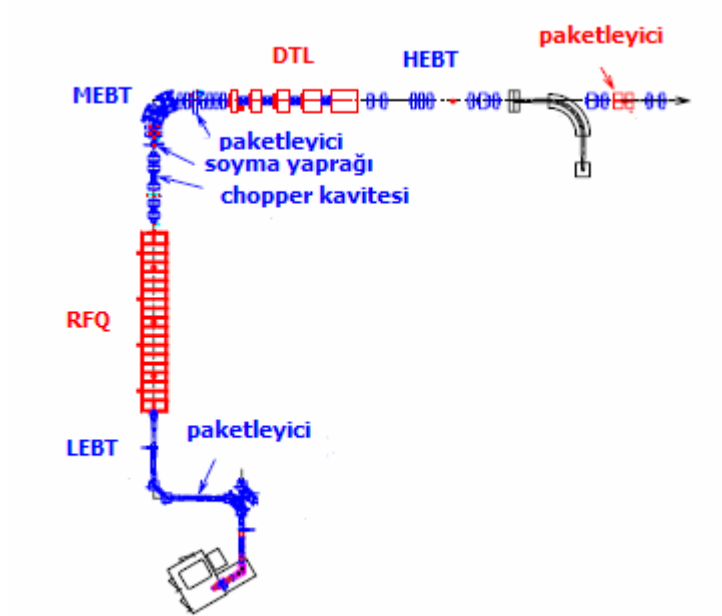


Resim 3.4. RFQ hızlandırıcısı

3.3.4. Orta enerjili demet taşıma kanalı (MEBT)

Demet taşıma kanallarında, parçacıkların hızlandırılması sağlanmaz. Bu taşıma kanallarının farklı amaçları vardır. MEBT taşıma kanalı üç bölümden oluşur. Birinci bölümde, RFQ'dan gelen demet, emittansı minimize etmek için soyma yaprağının üzerinde üç boyutta odaklanır. Beş kuadrupol magnet, enine odaklamayı sağlar. Taşıma kanalının ikinci kısmında, demeti 90° saptıracak eğici magnetler

bulunmaktadır. Şekil 3.6.'da bu sapma ve bu istasyondaki tüm hızlandırma bölümleri görülmektedir. Demeti paketcikler haline getiren paketleyiciler ise, taşıma kanalının üçüncü kısmını oluşturur. Taşıma kanalının bu son kısmında, 35 MHz'de çalışan dört katlı bir paketleyici bulunur. Demetin odaklanması, chopper kaviteleri ile bölünmesi ve sonrasında paketlenmesi, demet dinamiği açısından önemlidir. Taşıma kanalları genel olarak bu üç görevi yerine getirmektedir. Başka bir görevi de, taşıma kanallarındaki demet monitörleri sayesinde demetin hangi özelliklerde olduğu ölçülerek takibi sağlanmaktadır. Orta enerjili demet taşıma kanalından geçen iyon demeti DTL hızlandırıcı kısmına ulaşır.



Şekil 3.6. ISAC-I bölgesine ait hızlandırma sistemi

3.3.5. DTL hızlandırıcısı ve HEBT taşıma kanalı

Hızlandırma işleminin son olarak yapıldığı yer olan doğrusal sürüklenme tüpü (DTL), iyonların enerjisini 0.15 MeV'den 1.5 MeV'e çıkarmaktadır. Yapısal olarak, 105 MHz'de çalışan 5 tane bağımsız inter dijital H-mode (IH) kaviteleri hızlandırmayı sağlamaktadır. Ayrıca, 3 tane paketleyici ve 4 tane magnetik kuadrupol üçlüsü ise bu IH tankları arasındaki enine ve boyuna odaklamayı gerçekleştirir. Burada kullanılan tank, 0.25 mm kalınlığında hafif çelik ve bakır

plakadan yapılmıştır. DTL hızlandırıcısından geçen demet, yüksek enerjili demet taşıma kanalı (HEBT) aracılığı ile deneysel bölgeye taşınır. Bu taşıma kanalı, enerjisi yaklaşık 1.5 MeV'e ulaşan demeti taşıdığı için yüksek enerjili olarak adlandırılmaktadır. Bundan önceki taşıma kanalında olduğu gibi HEBT kanalında da üç bölüm vardır. Birinci bölümde, DTL'den gelen demeti yakalanır. 5 adet kuadrupol magnet ile demetin odaklanması sağlanır. 35 MHz'de çalışan paketleyiciler ise kanalın son kısmını oluşturur. Ayrıca deneysel bölgeye ulaşmak için burada da yaklaşık 90°'lik bir kıvrılma söz konusudur. Demetin burada bükülmesi, yine manyetik alan temelli eğici magnetlerle sağlanır. Yüksek enerjili demet taşıma kanalı, buradaki deneyler için izotop kaynağıdır. Hızlandırılmış ve dolayısıyla enerjisi artırılmış olan radyoaktif izotoplar kullanılarak, astrofizik, nükleer fizik, yüksek enerji fiziği ve tıp gibi bir çok alanda araştırmalar yapılmaktadır. TISOL istasyonunun bir üst opsiyonu olan ISAC deney istasyonu, ISAC-II adı altında genişletilmektedir.



Resim 3.5. ISAC-I deney alanındaki DTL hızlandırıcısı

3.3.6. ISAC-II Projesi

ISAC-I bölgesi, kütlesi 30'dan küçük olan mesela Li-8 veya Na-20 gibi radyoaktif iyonları 1.8 MeV'e kadar hızlandırmaktadır. Daha büyük kütleli iyonlar hedefte üretilse de iyon kaynaklarının yakınındaki yüksek basınç koşulları, iyonların sadece orta dereceli bir yoğunlukta elde edilmesine izin vermektedir. Eğer yük durumları artırılırsa, daha büyük kütleli iyonlar bu izotoplar hızlandırılabilir. Deneyciler açısından, kütlesi 150 civarında olan çekirdekler için yaklaşık 6.5 MeV olan coulomb engeline ulaşmak için mevcut ISAC-I'e ait hızlandırma sistemi geliştirilmeli ve izotop kütlesinin maksimum değeri artırılmalıdır. RFQ tarafından hızlandırılan iyonların kütlesini artırmak için bir yük-durum booster'ı (CSB) gereklidir. ISAC-II projesi üç fazda tamamlanacaktır. Birinci faz 2005 yılında tamamlandı. CSB aygıtının ve beta-süperiletken kaviterlerin bir kısmının inşasını kapsayan birinci faz ve diğer fazlar şekil 3.7'de görülmektedir. CSB aygıtının inşası ile tüm kütleli iyonların 0.15 MeV'e kadar hızlandırılması sağlandı. ISAC-II projesinin ikinci aşaması, beta-süperiletken kaviterlerin kalan kısmının tamamlanması şeklinde olacaktır.

DTL hızlandırıcısına enjekte edilmeden önce 0.15 MeV enerjiye sahip iyonların bir soyma yaprağında daha fazla soyulması gerekiyorsa kütlesi 70'in üzerinde olan iyonların yoğunlukları çok düşük olmaktadır. ISAC-I kısmındaki soyma yaprağı 0.15 MeV enerjideki MEBT taşıma kanalına yerleştirilmiştir. Elektronlardan soyunması gereken kütlesi 70'den daha büyük olan bu iyonların yoğunluğu, burada orta dereceli bir yoğunluğa bile ulaşamamaktadır. Kütlesi 30 ile 150 arasında olan çekirdekler için soyma işleminin yapılabileceği en uygun enerji değeri yaklaşık 0.4 MeV kadardır. Bu sebepten iyonların enerjisini 0.15 MeV'den 0.4 MeV'e ulaştırmak için ikinci bir hızlandırıcı (DTL2) gerekir. Bu amaçla DTL2 ve MEBT2 kısımları, üçüncü faz kısmını kapsamakta ve 2009 yılında tamamlanması öngörülmektedir.



Resim 3.6. ISAC-II’de kullanılan süperiletken linakın bir bölümü

3.3.7. ISAC deney bölgesinde yapılan bazı araştırma ve uygulamalar

TRIUMF laboratuvarının TISOL ve ISAC bölgelerinde çeşitli enerjilere sahip çok sayıda radyoizotop üretimi yapılmaktadır. Ayrıca laboratuvarın doğu kısmında farklı yerlerde olmak üzere dört adet küçük siklotron bulunmaktadır. Genellikle izotop üretimi için kullanılan bu siklotronlar; CP42, TR30-1, TR30-2 ve TR13 olarak adlandırılmaktadırlar.

Deney alanına gelen proton demetinin akım, enerji gibi özellikleri ile hedef malzemenin seçimi, izotoplardaki çeşitliliği sağlamaktadır. Radyoizotopların birçok uygulama ve araştırma alanı vardır. Tıp, biyomedikal, nükleer fizik, yüksek enerji fiziği ve astrofizik bunların başlıcaları olup birçok alt dallara ayrılmaktadır. Malzeme bilimi,

1. Beta-nükleer Magnetik Rezonans Spektroskopisi
2. Pertürbe edilmiş açısal korelasyonlar
3. Mössbauer spektroskopisi
4. Emisyon kanallaması

5. Katılardaki doğak mobilitenin zamana bağlı incelemeleri
6. Zamana bağlı derin seviye geçiş spektroskopisi
7. Pozitron yok olma (annihilation) çalışmaları
8. Sınıflandırılmış bio-konjuge bileşikler
9. Biyolojik sistemlerdeki iz elementlerinin özellikleri
10. Reaktör ve atık depolama bileşenlerindeki kimyasal özellikler
11. Atık dönüşümü
12. Nötron radyografisi

biyoloji ve tıp alanında kullanılan radyoizotop teknikler, her yıl 100 milyon üzerinde tıbbî laboratuvar testlerinde geniş ölçüde kullanılmaktadır. Önemli uygulamaların bazıları şöyle sıralanabilir:

ISAC deney bölgesinde üretilen Li-8, Na-26 ve K-37 gibi radyoaktif izotoplar ve hedef malzemelerin özellikleri Çizelge 3.3.'de verilmiştir.

Çizelge 3.3. ISAC'da üretilen radyoaktif izotoplar

İzotop	Hedef	Hedef kalınlığı (g/cm²)	Proton akımı (μA)	Verim (/s)
Li-8	Ta	43.6	10	2.0E+07
Li-8	Ta	43.6	40	8.3E+08
Li-8	ZrC	37.6	45	1.9E+08
Li-8	SiC	20.4	45	8.1E+07
Li-8	Nb	22	40	8.1E+07
Li-8	Ta	21.8	40	4.8E+07
Li-11	Ta	21.8	39	1.6E+04
Li-11	Ta	43.6	40	2.2E+04
Na-20	SiC	20.4	45	1.1E+08
Na-21	SiC	20.4	45	9.1E+09
Na-26	ZrC	37.6	45	4.3E+06
Na-26	SiC	20.4	45	3.2E+07
Na-26	Ta	21.8	40	9.0E+06
Na-29	TiC	37.1	40	1.6E+03
Al-32	TiC	37.1	40	5.6E+01
K-35	TiC	37.1	40	3.5E+03
K-37	TiC	37.1	10	6.1E+05
K-37	TiC	37.1	41	6.4E+07
K-38m	CaZrO	42.3	2.6	2.9E+08
K-38g	CaZrO	42.3	2.6	2.9E+08
Ga-62	ZrC	37.6	45	2.9E+02
Ga-63	Nb	22	40	3.8E+03
Ga-63	Nb	11.5	20	1.3E+04
Ga-75	Ta	43.6	40	1.0E+06
Rb-74	Ta	22	25	9.2E+03
Rb-74	Ta	11.5	20	6.1E+03

Radyoizotoplar ve Astrofizik

Evren çoğunlukla hidrojen ve helyum bileşimlerinden oluşmasına rağmen aynı zamanda daha ağır elementleri de içerir. Bunlar ise yıldızlarda meydana gelir. Özellikle ağır elementlerin üretimi gibi bu tip çeşitli etkileşimler, astrofizikçiler için oldukça önemlidir. Yıldızlarda üretilen çekirdeklerin incelenmesi ise, hızlandırıcılar yardımıyla o ortamın oluşturulması şeklinde olmaktadır. ISAC deney istasyonunda araştırma yapılan temel konulardan biri, yıldızlar içerisinde meydana gelen atom-altı reaksiyonların incelenmesidir. Günümüzde, kararlı çekirdek demetlerini kullanan reaksiyonlar, güçlü ve elektrozayıf etkileşimlerin dahil olduğu çok çeşitli olayları ortaya koydu ve bilim adamlarının pek çok yeni çekirdeği üretmesine imkan sağladı. ISAC'da üretilen hızlandırılmış radyoaktif kararsız çekirdek demetleri, elementlerin oluşumunu incelemek için güçlü bir kaynak olacaktır. Doğada, lityumdan daha ağır çekirdeklere sahip elementler, yoğun ısı ve basınç koşullarında oluşur ve bu yüzden süpernovadaki gibi patlama olayları ile uzaya fırlatılır.

Bir yıldızın yaşam süresi içindeki temel enerji kaynağı, iç kısımlarında meydana gelen hidrojen füzyonudur. Hidrojen zamanla tükendiği için yıldızın iç kısmını üretilen helyum doldurur. Fakat helyum füzyonunun meydana gelmesi için sıcaklık yeterli değildir. Bu yüzden kordaki enerji üretimi, yavaşlar. Korun dış kısmına doğru basınç olur ve gravitasyonel kuvvetler korun daralmasına sebep olur. Kor daraldığı için, birbirine yakın olan atom grupları yoğunluk ve sıcaklıkta bir artışa sebep olur. Kor sıcaklığı yeteri kadar yüksek olduğunda helyum füzyonu başlar. Aynı zamanda, helyum koru daralmakta olduğundan ve ısının yükselmekte olduğundan en dıştaki bir hidrojen kabuğu genişler ve daha çok helyum oluşturmak için füzyona başlar. Güneşimiz gibi kütlesi küçük olan yıldızlarda, helyum bir karbon koru oluşturmak üzere füzyon yapar. Fakat, bu koru daraltmak için yeteri kadar gravitasyonel kuvvet yoktur. Dolayısıyla bir karbon füzyon reaksiyonu başlamaz. Güneşimiz ölmeden önce (yaklaşık 5 milyar yıl) kırmızı bir dev olacak fakat bir süpernova durumu görülmeyecektir.

Kütlesi güneşimizinkinden en az 8 kat daha fazla olan büyük kütleli yıldızlar, yeteri kadar gravitasyonel basınca sahiptir. Öyle ki bir karbon korunun ötesinde yoğun bir demir koru bile oluşmaktadır. Bu esnada dış yüzeyi birkaç kez genişler ve bu durumdaki yıldız süper dev olarak sınıflandırılır. Kor, demir olduğunda yıldız şiddetli gravitasyonel kuvvetlere karşı koyabilecek kadar yeterli enerji ve basınç sağlayabilir. Bu esnada, destelenmemiş bir kabuk bırakan kor çok hızlı olarak çöker. Bu kabuk ta, çökmüş kora çarparak şiddetli bir şok dalgası üretir ve çöker. Aşırı şok dalgası kuvveti, yıldızın patlamasına ve bir süpernovanın meydana gelmesine sebep olur. Çökmüş korun kütlesi güneşinkinden en az 3 kez büyük ise bir karadelik oluşur. Aksi takdirde bir nötron yıldızı doğar. Demir koru çöktüğü zaman, gravitasyon elektronlarla protonları şiddetli ve sıkı paketlenmiş bir nötron koru oluşturmak için sıkıştırarak kadar şiddetlidir. Bu ise nötron yıldızının oluşumu demektir.

Süpernova patlamasında, yıldızın yaşam süresi boyunca üretilen malzeme, korkunç bir hızda uzaya fırlatılır. Bunlar da yeni yıldız ve gezegenlerin oluşumunu sağlar. Patlamanın gerçekleştiği sıcaklıklarda, çekirdek senteziyle sonuçlar pek çok farklı tip kararsız çekirdek oluşur. Bu reaksiyonları incelemek için benzer olayları simule etmek esastır. Yeni ISAC deney istasyonu, sıcak astrofiziksel ortamı oluşturan bu enerji ve sıcaklık değerlerinde şiddetli ve kararsız çekirdek demetleri üretecektir.

Radyoizotoplar ve nükleer tıp

1895’de x-ışınlarının Röntgen tarafından keşfedilmesi, tıbbî teşhis uygulamalarını da hızla beraberinde getirdi. Çünkü x-ışınları, yumuşak vücut dokusu boyunca kolayca yol alır, fakat kemikler tarafından keskin bir şekilde azaltılır. X-ışını fotoğrafları insanın iskelet yapısını ayrıntılı bir şekilde ortaya koyabilir. Deneysel nükleer fizikteki teknik gelişmeler, tıbbî görüntüleme alanında da paralel gelişmelere izin vermiştir: γ -ışını kameraları, tıbbî radyoizotopların üretimi için kullanılan özel hızlandırıcılar ve vücutta belirli derinliklerdeki görüntüleri elde etmek için kullanılan olağan üstü teknikler gibi. Bu araştırma alanı nükleer tıp olarak adlandırılır ve uzmanları, tekniklerin geliştirilmesi ve uygulanmasında tıp doktorlarıyla yakın işbirliği içinde olan nükleer fizikçilerdir.

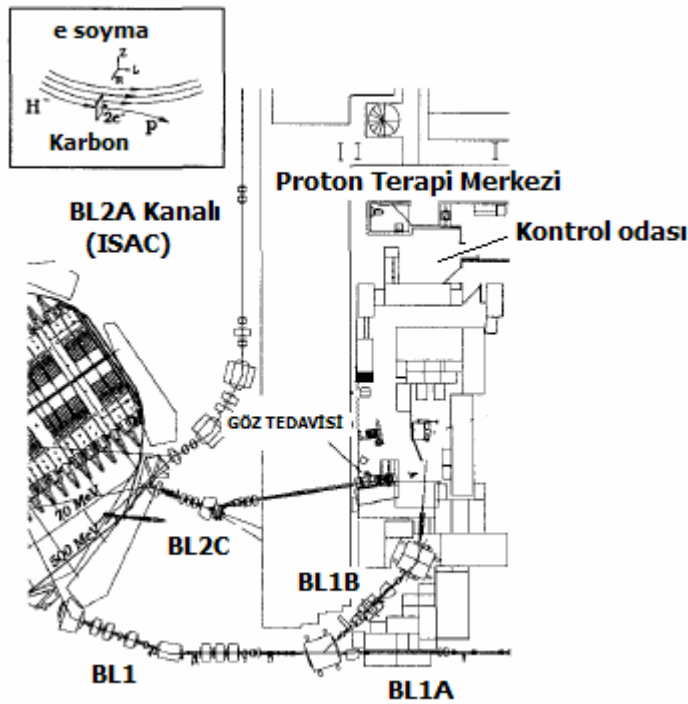
Radyoizotopların vücut içerisindeki kullanımı, onların radyoaktiflik özelliği olan gama ışını yayınlamasına bağlıdır. γ -yayınlayan radyoizotoplar vücut içine gönderilerek, vücudun belirli alanlarının görüntüleri oluşturulmaktadır. Görüntüleri elde etmek için sintilasyon sayaçları gibi radyasyon ölçen dedektörler kullanılır. Bu tekniğin basit ve eski bir uygulaması, tiroid bezinde biriken iyotun ölçülmesidir. Radyoaktif iyot ağız yoluyla alınır ve boyun yakınına yerleştirilen bir gama ışını sayacı, tiroide yoğunluğu giderek artan iyot aktifliğindeki artış miktarını ölçer. Bunun için 8 günlük yarı-ömre sahip bir fisyon ürünü olan ^{131}I kullanılır. Aynı izotop damar yoluyla vücuda verilerek böbrek fonksiyonlarının incelenmesinde de kullanılır. Gama dedektörü her iki böbreği de izler ve her ikisinin de her iki böbrek tarafından iyot alım oranları ölçülerek varsa hastalıkları ortaya çıkarır.

Radyoizotoplara bağlı bu tarama tekniğinin en yaygın kullanımlarından birisi de beynin bir görüntüsünün elde edilmesidir. Beyin taraması, “kan-beyin” engeli nedeniyle mümkündür. Normal koşullar altında kandaki kirlilik için çok az bir absorpsiyona sahipmiş gibi görünür. Bununla birlikte, eğer bir hastalık ya da tümör varsa, gönderilen $^{99\text{m}}\text{Tc}$ izotopu etkilenen bölgede toplanabilir ve dedektörle taranan bölgede kendini gösterebilir. Nükleer tıptaki bazı kullanımları anlatılan radyoizotopların teşhis ve tedavi kategorilerinde daha bir çok uygulaması bulunmaktadır [16].

3.4. Mezon Odası

Mezon odası, siklotron hızlandırıcısının doğusunda yer almaktadır. Bu deney istasyonunu, siklotrondan gelen 500 MeV enerjili BL2C ve BL1 demet kanalları beslemektedir. BL2C demet kanalından alınan proton demeti ile göz tedavisi yapılmaktadır. Uygulanan proton terapisi ile göz kanseri gibi hastalıklar tedavi edilmektedir. BL2C demet hattı nötron ve radyoizotop üretimi için de kullanılmaktadır. Mezon odasına gelen BL1 demet hattı, Şekil 3.8’de de görüldüğü gibi odanın girişinde iki kola ayrılır. Bu kanallar, BL1A ve BL1B olarak adlandırılır. BL1A proton kanalı üzerinde iki adet mezon üretim hedefi bulunmaktadır. Proton

demetinin hedefe çarpmasıyla π - mezonları ve müonlar üretilir. Bu kanalın son kısmında ise arta kalan proton demetiyle nötron demeti üretilmektedir. Nötron demetine bağlı deneyler burada yapılmaktadır. Mezon odası deney çeşitliliği açısından zengin bir deney istasyonudur. Çünkü burada; proton, nötron, π -mezonu ve müon demetlerinin dördü de bulunmaktadır. Her bir demet kanalı kullanılarak, bir çok araştırma ve uygulama yapılmaktadır.

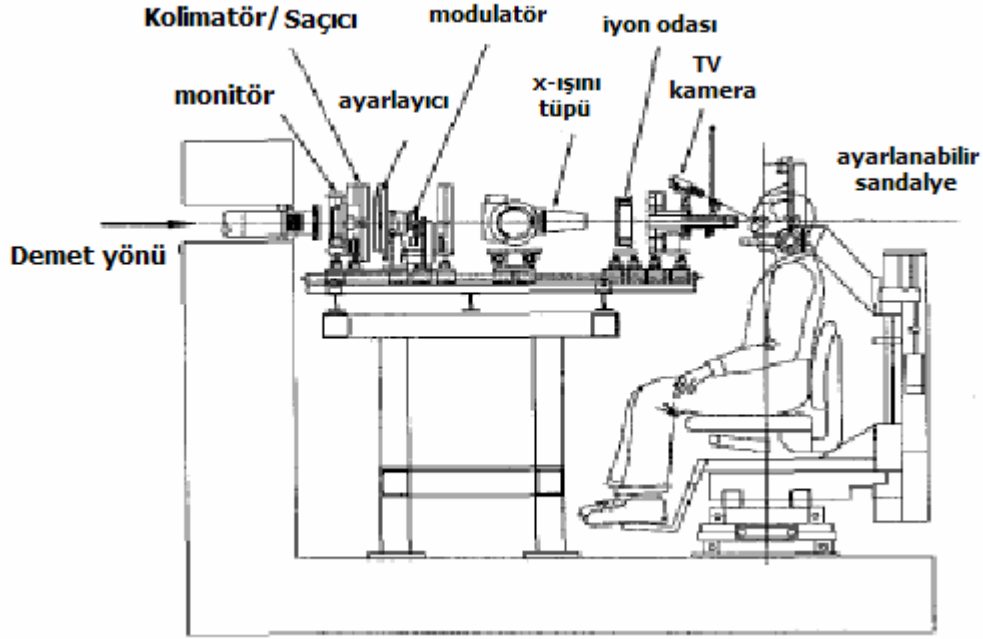


Şekil 3.8. Mezon odasını besleyen proton demet kanalları

3.4.1. Proton terapi merkezi

Proton terapi merkezi, British Columbia kanser ajansı ile British Columbia Üniversitesi Oftalmoloji (gözbilim) bölümünün birlikte çalıştığı TRIUMF'daki ortak bir projedir. 1995 yılının Ağustos ayından beri, 500 MeV'lik siklotrondan çıkarılan 70 MeV enerjili protonlar kullanılarak hastalar tedavi edilmektedir. Göz tedavisi için gerekli düzenek, mezon odasına gelen BL2C demet kanalı üzerine kurulmuştur. Bu demet kanalı, 65 ile 120 MeV arasında değişebilen enerjilerde proton demetine sahiptir. Gerekli olan demet enerjisi, ayarlanabilmektedir. Şekil 3.8, proton terapi merkezini ve siklotrondan çıkan 2C demet kanalını göstermektedir. Siklotrondan

alınan H^- iyonlarının protona dönüşmesi için ince bir karbon yaprağı kullanılmaktadır. İstenilen karakterdeki demetin hazırlanması ve hastanın sabitlenmesi için gerekli düzenek Şekil 3.9.'da gösterilmiştir.



Şekil 3.9. Proton terapisi için gerekli ekipman

Arzu edilen proton doz dağılımı, sabit bir saçılma sistemi ve dönen bir modölatör ile sağlanır. Demet ilk olarak kollimatör/saçıcı sistemiyle tanımlanır. Burada, 0.8 g/cm^2 kalınlığındaki 12 mm'lik açıklık saçılmaya yol açmaktadır. İkinci bir kollimatör, saçılan demetin önemli bir kısmını durdurur ve toplar. Tedavinin derinliği, dönen bir degrader ile veya birinci ve ikinci kollimatör arasına yerleştirilmiş ayarlayıcı ile sağlanabilir. Demet ekipmanının önemli bir parçası da ikincil emisyon monitörüdür. Proton demetinin akım değerini ölçen bu monitör, demete ait diğer karakteristik özellikleri de ortaya koymaktadır. Hasta, ayarlanabilir bir tedavi koltuğuna oturtulur. Resim 3.7'de de görüldüğü gibi hastanın özellikle baş kısmı sabitlenir ve yüzü maskelidir [17].



Resim 3.7. Bir hastanın proton terapisi ile göz tedavisi

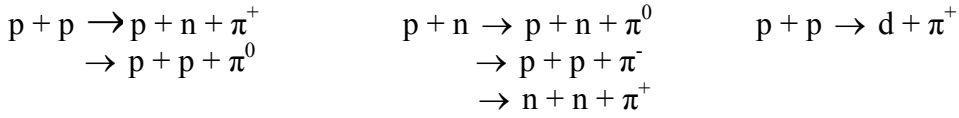
Radyoterapi, çeşitli hastalıkların tedavisi için iyonlayıcı radyasyonu kullanan radyolojinin bir alanıdır. Radyasyon terapisinin temel amacı; hastalıklı hücrenin (tümör) maksimum seviyede yok edilmesi, fakat bu işlem sırasında ise dokulara, organlara ve organizmanın fonksiyonlarına mümkün olduğu kadar az hasar verilmesidir. Radyoterapi tarihinde ilk radyasyon kaynağı olarak x-ışınları kullanılmıştır. Radyoterapide proton demetini kullanmanın avantajları ise ilk kez 1946 yılında Wilson tarafından gösterilmiştir. Proton demeti, karşılaştığı doku ve biyolojik yapılar içerisinde atomik boyutta gama ışınlarınkinden daha küçük saçılmalar gerçekleştirir. Böyle bir iyon demeti ise hastalıklı hücre veya dokunun dışındaki yapılara zarar vermeyecektir. Proton demetinin radyoterapide deneysel olarak ilk kullanımı 1954 yılında Amerika'daki Lawrence Berkeley laboratuvarında gerçekleştirildi. Bu tarihten itibaren ise bir çok proton terapi merkezi kuruldu. Kaliforniya Loma Linda'daki ilk hastane temelli merkezin dışında kalan diğer tüm merkezler, bir fizik araştırma hızlandırıcısından gelen ve bu iş için tahsis edilen proton demetini kullanmaktadır [18].

3.4.2. Mezon ve Nötron üretimi

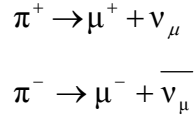
Mezon odasına gelen BL1A demet kanalı, mezon ve nötron üretiminden sorumludur. 200 μ A akım değerine sahip olan 500 MeV'lik BL1A proton demet kanalı üzerinde, farklı noktalara yerleştirilmiş 1AT1 ve 1AT2 hedef istasyonları kullanılarak pion (π -

mezonu) ve müon demeti üretilmektedir. Hedef olarak ise, 12 mm kalınlığında Berilyum veya 10 mm kalınlığında grafit kullanılmaktadır.

Yüksek enerji fiziğindeki standart model teorisine göre, etkileşim mesafesi 10^{-15} m olan nükleer kuvvetin baryonlar (proton vb.) arasındaki taşıyıcı alan parçacığı π -mezonudur (veya pion). Bu yüzden proton demeti hedefe çarptığında, hedef üzerinde meydana gelen yüksek enerjili proton-proton veya proton-nötron çarpışmaları ile pionlar ortaya çıkar. Hızlandırılan protonların enerjisi 500 MeV-1 GeV aralığında olduğu zaman gerçekleşen ve eşik enerjisi 280 MeV olan tek pion üretim reaksiyon süreçleri aşağıda verilmiştir [21].



Oluşan pionlar kararsız olup 2.6 μ s içerisinde aşağıdaki bozunumlardan birini gerçekleştirir.



Bu bozunumlar aslında müonların üretim mekanizmasıdır. TRIUMF laboratuvarının mezon odasında, proton demetinin T1 hedefine çarpmasıyla üretilen yeni demetler için üç tane ikincil demet taşıma kanalı bulunmaktadır. Bunlardan ilki, M15 yüzey müon kanalıdır. Sadece pozitif yüklü müon demetinin üretildiği bu kanal kullanılarak, hacimli μ SR deneyleri yapılmaktadır. İkincisi, M13 pion/müon kanalıdır. Bu kanal ile düşük enerjili pion ve müon demetleri üretilmektedir. Üçüncü demet kanalı ise M11 pion kanalıdır. Burada enerjisi 80-300 MeV olan pionlar üretilmektedir.

T2 hedef istasyonunda da üç tane ikincil demet kanalı bulunmaktadır. Bunlar; M20 müon kanalı, M9 pion/müon kanalı ve M8 pion kanalıdır. M8 pion kanalı pion terapi

uygulaması için tasarlanmıştır. Buraya kadar olan kısımda toplam 6 adet ikincil demet kanalı ile müon ve pion demetleri üretilmektedir. Özellikle müon demetinin malzeme biliminden enerji üretimine kadar pek çok uygulama alanı vardır. μ SR ve μ CF, en dikkati çeken uygulamalar olup μ SR yöntemi bir sonraki kesimde daha detaylı olarak anlatılacaktır. T2 hedef istasyonundan sonra geriye kalan proton demeti ise nötron üretimi için kullanılmaktadır. Yani BL1A demet kanalının son kısmı nötron üretimi ve nötron demetine dayalı deneyler için ayrılmıştır.

4. MÜON BÖLGESİ VE μ SR UYGULAMASI

TRIUMF laboratuvarının mezon odasında üretilen ikincil müon demetleri pek çok uygulamalar için kullanılır. Müon üretim kanalları çeşitli enerjilere göre müon demetini sınıflandırmaktadır. Müon bölgesinde en çok deney, müon spin rezonans (μ SR) yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Müonların enerjisi fazla olursa hacimli numuneler, düşük olursa daha ince numuneler incelenmektedir. Enerji üretiminde ise müon katalizörlü füzyon yöntemi, nükleer füzyon reaksiyonunun oda sıcaklığında gerçekleştirileceğini öngörmektedir. Bu konuda çalışmalar hızla ilerlemektedir fakat günümüzde bu yöntem kullanılarak sürekli bir enerji üretimi henüz sağlanamamıştır.

Müonların bir başka uygulaması da müonyum atomu üzerinde olmaktadır. Pozitif yüklü müon numuneden bir elektron yakalayarak müonyum atomu oluşur. Bu egzotik atom üzerinde atom fiziği alanında yapılan deneyler ile ince yapı sabiti, lamb kayması vb. ölçümler ile daha duyarlı sonuçlara ulaşılmaktadır. Bu deneyler yüksek enerji fiziğinde standart model ötesindeki yeni fizik araştırmalarına da ışık tutacaktır.

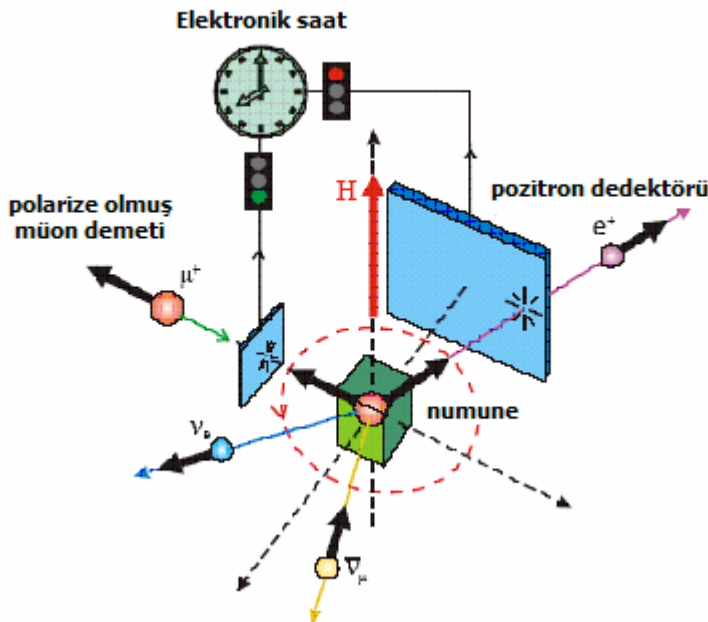
4.1. Müon Spin Rezonans (μ SR) Tekniği

Müon fiziğinin en geniş uygulama alanını oluşturan μ SR yöntemi, maddenin mikroskopik özelliklerini araştırmak amacıyla kullanılan bir manyetik rezonans tekniğidir. μ SR tekniği genel olarak, numune içerisine gönderilen müon parçacıklarının spin hareketine bağlı olarak relaksasyon, rotasyon veya rezonansının gözlenmesiyle, maddenin mikroskopik yapısı hakkında bilgi edinilmesi şeklinde tanımlanabilir.

μ SR tekniğinde maddenin mikroskopik yapısı hakkında bize ulaşan bilgiler, müon bozunum ürünü olan yüksek enerjili pozitronların gözlenmesiyle elde edilir. Numuneye sonda edilen polarize olmuş müonlar bozunuma uğramadan önce bu bölgedeki yerel manyetik alandan etkilenir. Müonlara ait spin vektörleri, yerel manyetik alan doğrultusunda yönelerek yeniden polarize olur. Alan etrafında larmor

frekansında presesyon hareketi yapmaya başlayan müonlar, o bölgedeki mikroskobik bilgiyi polarizasyon yoluyla almış durumdadır. Müonlar bozunuma uğradıktan sonra oluşan pozitronlar sinyal şeklinde dedekte edilir. Pozitron ve müonlar aynı polarizasyona sahip olduğundan numunenin mikroskobik yapısı incelenmiş olur.

μ SR tekniğinin deneysel aşamasında, uygulanan dış manyetik alana bağlı olarak deneysel geometriler geliştirilmiştir. Müon spin polarizasyonunun ilk yönüne uygulanan manyetik alan dikey yönde ise Enine Alanlı μ SR tekniği (Şekil 4.1), paralel ise Boyuna Alanlı μ SR tekniği olarak isimlendirilir. Enine alanlı μ SR tekniği özellikle, II.Tip süperiletkenlerde girdap örgüdeki yerel manyetik alan dağılımını ve metalik sistemlerdeki Knight kaymasını ölçmek için kullanılır. Boyuna Alanlı μ SR tekniğine alternatif olarak bazı ölçümler, dış manyetik alanın yokluğunda gerçekleştirilmektedir. Bu tip μ SR yöntemine ise sıfır alanlı μ SR tekniği denir. Sıfır alanlı μ SR tekniği özellikle zayıf yerel manyetik alanların incelenmesinde çok hassastır.



Şekil 4.1. Enine alanlı μ SR yönteminin şematik görünümü

μ SR tekniğinin diğer rezonans tekniklerine göre avantajları şöyle sıralanabilir:

1. μ SR yönteminin zayıf iç manyetik alanlara ($\sim 0,1\text{G}$) olan duyarlılığı, diğer yöntemlerle kıyaslanamayacak düzeydedir.
2. SR yöntemi, manyetik alanın büyüklüğüne bağlı olarak $10^4 - 10^{12}$ Hz gibi geniş bir frekans aralığındaki manyetik dalgalanma oranlarını ölçebilir.
3. Katı, sıvı ve gaz halindeki her türlü maddeye sonda edilebilir.
4. NMR ve ESR teknikleri yeterli polarizasyona ancak düşük sıcaklıklarda ve güçlü manyetik alanlarda ulaşabilmekteyken μ SR yönteminde ortamın koşulları ne olursa olsun, Pion bozunumu sonrası oluşan müon demeti zaten %100'lük bir polarizasyona sahiptir.
5. Dış manyetik alandan etkilenen bazı malzemeler için sadece μ SR tekniği kullanılabilir. μ SR tekniğinin dış manyetik alan kullanılmadan gerçekleştirilebilmesi (Sıfır-alanlı μ SR) diğer manyetik rezonans tekniklerine üstünlük sağlayan başka bir özelliğidir.

Pek çok kullanım yeri olan μ SR tekniğinin bilim ve teknolojiye uygulama alanları başlıklar halinde şöyle sıralanabilir [19]:

Manyetik Sistemler

Küçük yerel manyetik alanlara duyarlı olan μ SR tekniği, statik ve dinamik yerel manyetik alan dağılımlarını kolaylıkla araştırabilir. Manyetizma, μ SR uygulamalarının büyük bir bölümünü oluşturur. Maddenin manyetik düzeninin araştırılması, manyetik faz geçişlerinin incelenmesi ve manyetik faz geçiş diyagramının çıkarılması μ SR ile araştırma yapılan başlıca konulardır. Ayrıca mikroskobik olarak farklı manyetik yapıya sahip çeşitli malzemeler de μ SR yöntemi ile incelenebilir. Araştırma yapılan çeşitli sistemler şöyle sıralanabilir:

- Manyetik düzen ve spin cam sistemleri
- Manyetik olarak engellenmiş spin sistemleri
- Manyetoresistant özelliği gösteren malzemeler
- Düşük boyutlu sistemler
- Ağır fermiyon sistemleri

- Kuasikristaller
- Moleküler magnetler ve kümeler

Süperiletkenler

Belirli bir T_c kritik sıcaklığın altında soğutulan malzemelerin dirençlerinin hızla sıfıra gittiği gözlenir. Direnci sıfır olan bu tür malzemelere süperiletken malzeme denir. 1908 yılında, kaynama veya yoğunlaşma noktası 4.2^0K olan helyumun sıvılaştırılmasıyla çok düşük sıcaklıklarda çalışma olanağı oluştu. Çeşitli elementlerin düşük sıcaklıklardaki direnç değişiminin ölçülmesiyle yapılan çalışmalar sonucu 1911 yılında maddenin dirençsiz halini ifade eden süperiletkenlik keşfedildi. Yerel manyetik alanlara duyarlı olan μSR yöntemi kullanılarak, süperiletken malzemelerin adeta mikroskobik haritası çıkarılır. Nüfuz derinliği, girdap dağılımı ve koherens uzunluğu gibi en temel parametreler ve birçok özellik, başka yöntemlerle ulaşılamayacak bir hassaslıkta μSR tekniği ile incelenebilir. Süperiletkenliğin aşağıdaki özellikleri en çok dikkati çeken konuları olmuştur.

- Manyetik fazlar ve faz farkı
- Zayıf manyetizma
- Akı girdap çizgileri
- Manyetik nüfuz derinliği
- Cooper çiftleri ve μ^+ -knight kayması

Taşıyım süreçleri

Maddedeki nötral veya yüklü parçacıkların taşıyımını, çeşitli fiziksel, kimyasal ve biyolojik olaylar için önemli bir mekanizmadır.

- Kuantum difüzyon olayı
- Metal olmayan sistemlerde elektron taşıyımını
- İletken polimerler
- İyon değişimi

Yarıiletkenlerde kirlilik

Yarıiletken malzeme içerisindeki bir Hidrojen atomu, bir takım reaksiyonlar gerçekleştirerek, malzemenin elektronik özelliklerini etkileyebilmektedir. Coulomb etkileşiminden dolayı, kristal bir yarıiletkendeki donör ve akseptörlerin yük durumlarını etkileyen bu durum, onların elektriksel aktivitelerini pasif hale getirmektedir. Bir kirlilik izi olarak karşımıza çıkan bu olay, yarıiletkenlerde kirlilik problemi olarak bilinmektedir. Yarıiletken malzemelerin üretim sürecinde önemli olan bu tür mikroskobik olayların incelenmesi için rezonans teknikleri kullanılmaktadır. Standart manyetik rezonans teknikleri, düşük hidrojen konsantrasyonları için mikroskobik detaylara ulaşamamaktadır. Yarıiletkenlerdeki izole edilmiş Hidrojen hakkındaki deneysel verilerin çoğu, müonyum atomu üzerindeki μSR ölçümlerinden elde edilmiştir. Hidrojen atomunun bir izotopu olarak düşünülebilen müonyum atomu, μSR ölçümleri için numuneye sonda edilen pozitif müonların elektron yakalamasıyla oluşur. Müonyum atomunun nasıl yayıldığı ve yük taşıyıcılarıyla nasıl etkileştiği konusunda mikroskobik bilgi sağlayan μSR yöntemi, müon etrafındaki taşıyıcılardan kaynaklanan göçler ve yük durumlarının dinamiği hakkındaki detaylı araştırmalarda önemli bir paya sahiptir.

Kimyadaki Uygulamalar

En hafif atom olan Hidrojen atomu, kimyanın en önemli yapıtaşlarından biridir. Hidrojen atomunun bir izotopu olan müonyum atomunun incelenmesi, Hidrojen atomu ve reaksiyonlarının rolünün anlaşılması noktasında önem kazanmaktadır. Müonyum davranışının incelenmesi, geçiş durumu ve kuantum tünellemesinde sıfır-nokta enerji kaymalarındaki reaksiyon teorisinin test edilmesini sağlar. Mesela, $\mu + \text{H}_2 \rightarrow \mu\text{H} + \text{H}$ reaksiyon oranı, kimyasal reaksiyon dinamiklerinin teorik çalışmaları için temel bir ölçüttür. Reaksiyonun doğasına bağlı olarak, bir Müonyum reaksiyonu için oran sabiti, Hidrojen reaksiyonunkinden birkaç derece büyük veya küçük değer alabilir. Saf ve süperkritik sudaki müonyum araştırmaları, çeşitli sıcaklık ve basınç değerleri için suda çözünen H atomu hakkında bilgi sağlayabilir. Bu koşullardaki müonyum reaksiyon kinetiklerinin incelenmesinden elde edilen sonuçlar, basınçlı su

nükleer reaktörlerin soğutma çevriminde oluşan radyasyon kimyasi ile ilgilidir ve toksit atıklarının yok edilmesi için süperkritik su reaktörlerinin geliştirilmesi gerekliliğini ortaya koyar.

Biyoloji ve yaşam bilimlerindeki uygulamalar

Makro moleküllerdeki elektron transferi; enerjinin depolanması, enerjinin harcanması, fotosentez ve beyin fonksiyonu gibi çeşitli biyolojik olaylar için önemli bir mekanizmadır. Protein ve ilgili kimyasal bileşiklerde elektron transferi olayını incelemek için pek çok deneysel araştırma yapıldı. Elektron transferi hakkında varolan bilgilerin hemen hemen tamamı makroskobik metotlarla elde edildi. Detaylı bilgi elde etmek için, daha mikroskobik seviyede bilgi sağlayan metotları kullanmak gerekir. Yerel manyetik alan ve zayıf manyetizmaya duyarlı olan μ SR tekniği, biyolojik sistemlerde mikroskobik bilgi elde etmede güçlü bir yöntemdir. μ SR yönteminde numuneye sonda edilen müonlar elektron yakalayarak müonyum atomunu oluşturur. Oluşan müonyum atomu madde içerisinde oluşturduğu kimyasal bağlarla termalize olur. Madde içerisinde müon tarafından yakalanan elektron, molekülün yapısına bağlı olarak; radikal yapı oluşturma ve moleküler zincir boyunca olan lineer hareket gibi bazı karakteristik davranışlar sergileyebilir. Elde edilen müon spin relaksasyon ölçümlerinden faydalanılarak elektron hareketi rahatlıkla incelenebilir.

4.2. TRIUMF'daki Bazı μ SR Deneyleri

Manyetizma, μ SR uygulamalarının büyük bir bölümünü oluşturur. Maddenin manyetik düzeninin araştırılması, manyetik faz geçişlerinin incelenmesi ve manyetik faz geçiş diyagramının çıkarılması μ SR ile araştırma yapılan başlıca konulardır. Bir çok araştırmanın yapıldığı TRIUMF laboratuvarında, μ SR yöntemi kullanılarak yapılan deneylerin bazıları şöyle sıralanabilir [20];

1. Gaz fazındaki küçük moleküllerin μ SR spin relaksasyon çalışmaları
2. Ağır çekirdeklerdeki müonik aşırı ince geçiş hızları

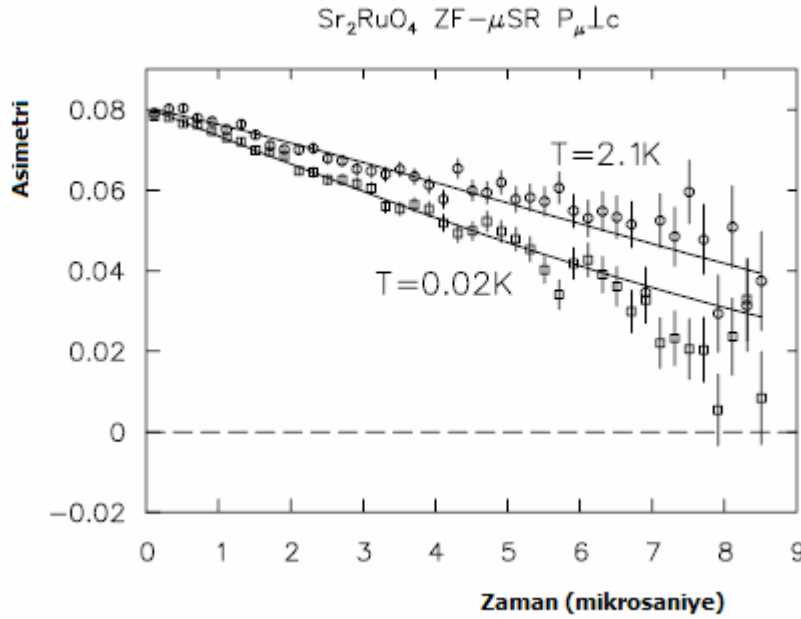
3. Ağır bir hidrojen izotopu olarak müonyum
4. Si içindeki Müonyum
5. Anizotropik süperiletkenlerdeki iç manyetik alanların μ SR ölçümleri
6. GaAs yarıiletkenindeki müonyum dinamiği
7. Düzensiz spin yapıya sahip olan nadir-toprak malzemeleri
8. Süperiletkenlerin girdap durumu
9. Oksitlerdeki tekli spin durumlarının incelenmesi
10. Yarıiletkenlerde yüklü müonyum merkezlerinin elektronik yapısı ve dinamiği
11. III-V yarıiletkenlerindeki müonyum
12. Galyum nitrit'teki müonyum
13. Katı metanlarda müonyum yerleşmesi
14. Sr_2RuO_4 bileşimindeki süperiletkenliğin μ SR tekniğiyle incelenmesi
15. $\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ bileşiminin manyetik özellikleri

4.2.1. Sr_2RuO_4 bileşimindeki süperiletkenliğin μ SR tekniğiyle incelenmesi

Sr_2RuO_4 bileşimi ilk kez 1950 yılında sentezlense de, süperiletken özellik göstermesi 1994 yılında bulundu. Yapılan ilk çalışmalarda T_c kritik sıcaklığı 0.7 K değerindeydi fakat son zamanlarda yüksek kalitedeki kristaller sayesinde kritik sıcaklık 1.5 K değerine çıkmıştır. Düşük geçiş sıcaklığına rağmen, Sr_2RuO_4 sentezi oldukça ilgi çekmektedir. Bu sistemde, güçlü korelasyon etkileri quantum osilasyonunda ve Pauli spin süseptibilite ölçümlerinde görülen etkin kütleyi artırır. Bu özellik Sr_2RuO_4 'ün ferromagnetik spin dalgalanması özelliği ile birleştirildiğinde Sr_2RuO_4 'deki çiftlerin tuhaf bir pariteye (spin üçlüsü) sahip olabileceği gibi bir sonuç ortaya çıkmaktadır. Buradan hareketle, çiftlenim simetrisine bağlı olarak TRS tersinir zaman simetrisinin kırılması da doğrudan incelenebilir. Süperiletken durum eğer dejenere bir gösterime sahip ise TRS simetrisi kırılır. TRS simetrisi kırılmış durumlar için T_c kritik sıcaklığın altında, spin veya orbital momentlerden kaynaklanan bir iç manyetik alan görülebilir.

Kyoto üniversitesinde gerçekleştirilen bir deneyde, iki adet Sr_2RuO_4 kristali üzerinde μ SR ölçümü yapıldı. Kristale gönderilen müonların bozunumu sonrası pozitronlar

dedektörlerle gözlemlendi. Sıfır alanlı μ SR deneyinde kullanılan bu süperiletken kristallerin T_c kritik sıcaklık değerleri 1.478 K ve 1.453 K'dir. $T = 2.1$ K ve $T = 0.02$ K sıcaklık değerinde yapılan deneyin elde edilen spektrumu Şekil 4.2.'de gösterilmiştir.

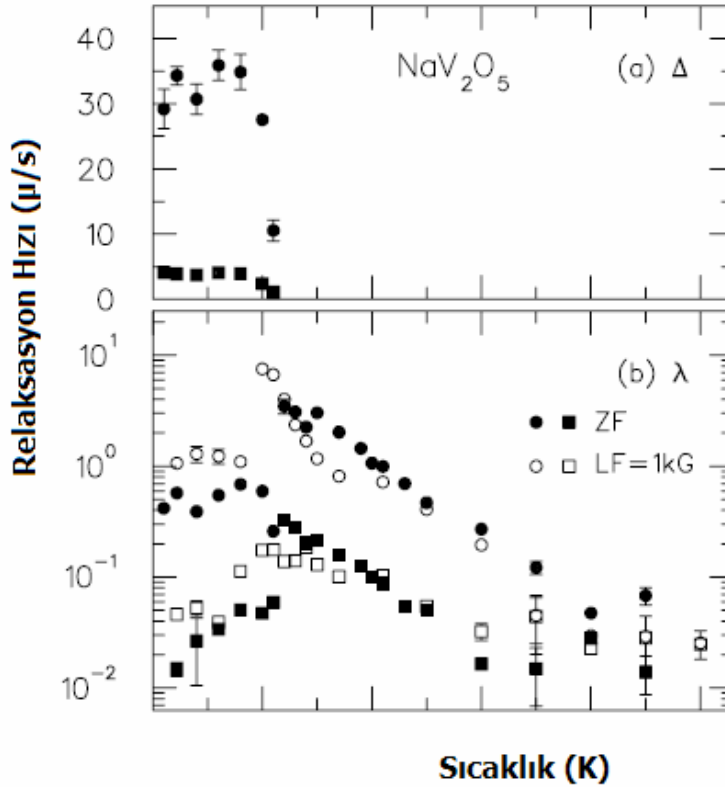


Şekil 4.2. Sr_2RuO_4 kristalinin farklı sıcaklıklardaki sıfır alanlı μ SR spektrumu

Deneyin $T = 2.1$ K ve $T = 0.02$ K sıcaklıklarında yapılmasının amacı, süperiletken kristalin T_c kritik sıcaklığının alt ve üst değerlerinde nasıl davrandığını gözlemektir. Elde edilen bu grafik analiz edildiğinde, kritik sıcaklığın altında ve üstünde relaksasyon hızı oldukça küçüktür. Fakat bir kıyas yapmak gerekirse, $T = 0.02$ K değerinde yani kritik sıcaklıktan daha düşük sıcaklıklarda relaksasyon hızı artmaktadır. Relaksasyon hızının artması ise numunedeki statik veya dalgalanan manyetik alanlardan kaynaklanmaktadır. Relaksasyon, exponansiyel karakterdedir. Numune içinde müon grubunun bulunduğu bölgedeki yerel manyetik alan eğer düzenli ise presesyon sinyali gözleriz. Buradaki manyetik alan gelişigüzel bir dağılıma sahip ise o zaman Kubo-Toyabe relaksasyon fonksiyonunu elde ederiz.

4.2.2. $\text{Na}_x\text{V}_2\text{O}_5$ Oksit sistemlerindeki spin durumlarının incelenmesi

$\text{Na}_x\text{V}_2\text{O}_5$, spin-peierls geçişlerini ($T_{sp}=35\text{K}$) gözlemek için incelenen CuGeO_3 bileşiminden sonra ele alınan ikinci inorganik bileşimdir. Bu deneyde, saf ($x=1$) ve hol-katkılı ($x=0.99$ ve 0.9) $\text{Na}_x\text{V}_2\text{O}_5$ bileşimin müon spin relaksasyon ölçümleri yapılmıştır. Deney sonucunda, katılanmamış yani saf NaV_2O_5 numunesi için $T=11\text{ K}$ sıcaklık değerinde statik bir manyetik donma (freezing) bulunmuştur. Şekil 4.3'de de görülebileceği gibi $T=11\text{ K}$ 'nin altında sıfır alanlı μSR spektrumu hızlı bir azalma göstermektedir.

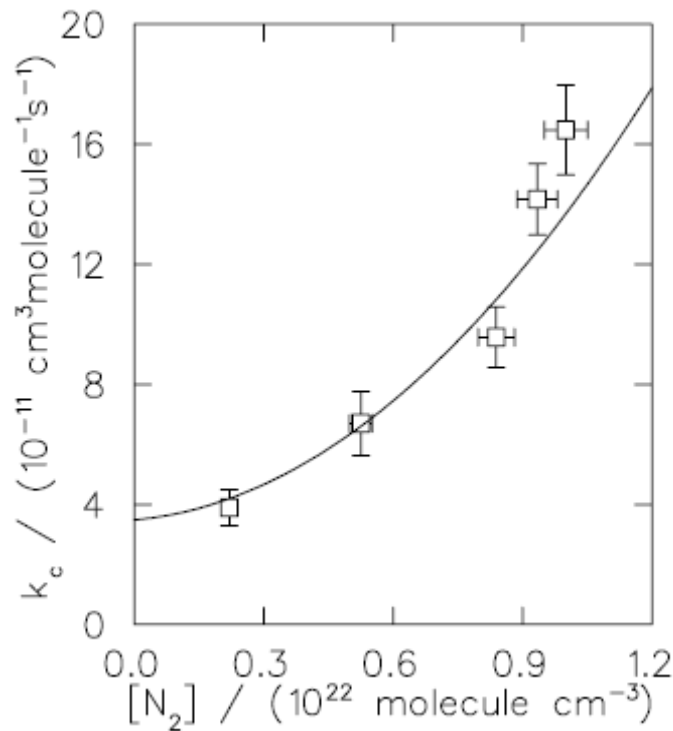


Şekil 4.3. Saf NaV_2O_5 numunesinin a) statik relaksasyon hızının b) dinamik relaksasyon hızının sıcaklığa göre değişimini gösteren sıfır-alanlı μSR spektrumu

4.2.3. Gaz fazındaki küçük moleküllerin μSR spin relaksasyon çalışmaları

Bu deney, bazı temel gaz fazı sistemlerin kimyasal reaksiyon hızlarını ölçmek amaçlı bir müon spin relaksasyon çalışmasıdır. Bu sistemler arasında, $\text{Mu}+\text{CO}$ ve $\text{Mu}+\text{NO}$

reaksiyonları dikkati çekmektedir. He ve N₂ gibi iki farklı moderatöre sahip olan bu sistemler, düşük sıcaklıklarda ve hem enine hem de boyuna olan manyetik alanlarda incelenmektedir. 1998 yılında M9 bölümünde gerçekleştirilen yaklaşık beş haftalık bir deney sürecinde basınç 60 bar'dan 500 bar'a ve sıcaklık ise 140 K'dan 300 K'a kadar değişti. Mu + NO + N₂ reaksiyonu için moderatör bağımlılığı oda sıcaklığında gözlenenden açıkça farklıdır. 227 K sıcaklıkta, Mu+NO reaksiyonunun hız sabitleri boyuna manyetik alanda ölçüldü. Ölçülen sonuç aşağıda verilmiştir.

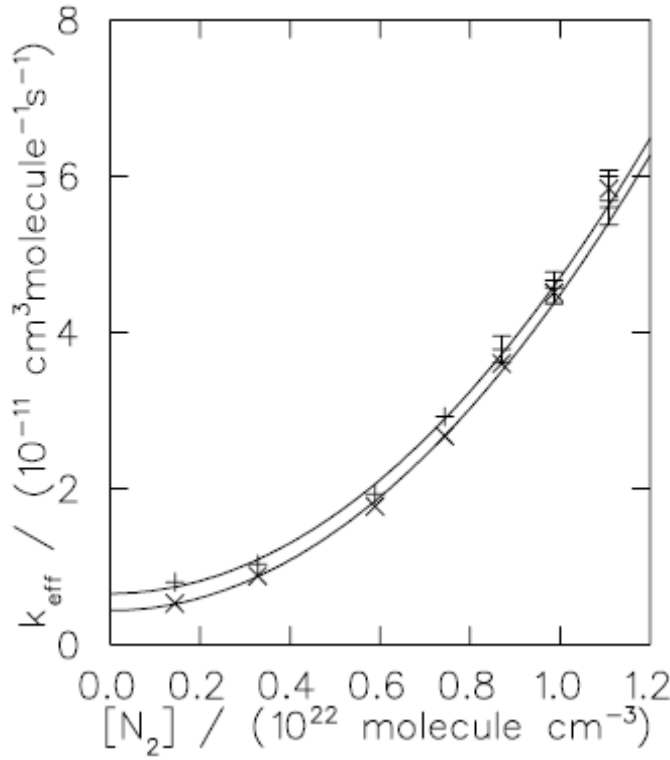


Şekil 4.4. 227 K sıcaklıktaki Mu+NO reaksiyonunun elde edilen hız sabiti grafiği

Kuadratik moderatör bağımlılığı, baskın olan reaksiyon mekanizmasının oda sıcaklığındakinden farklı olduğunu göstermektedir. Spin değişim hız sabitinin de toplam basınca şiddetle bağlı olduğu görülmektedir.

Mu+CO reaksiyonu ise 5-60 G'lık manyetik alan aralığında ve He ile N₂ moderatörlerinin her ikisinde de incelendi. Tüm sıcaklıklarda kimyasal reaksiyon hız sabitlerinin moderatöre bağımlılığı N₂ için kuadrattır. Aşağıdaki şekil, kimyasal ve

spin relaksasyon katkılarının her ikisini de içeren reaksiyon hızlarının karakteristik durumlarını göstermektedir.



Şekil 4.5. 180 K sıcaklıkta $\text{Mu} + \text{CO} + \text{N}_2$ reaksiyonunun hız sabiti grafiği

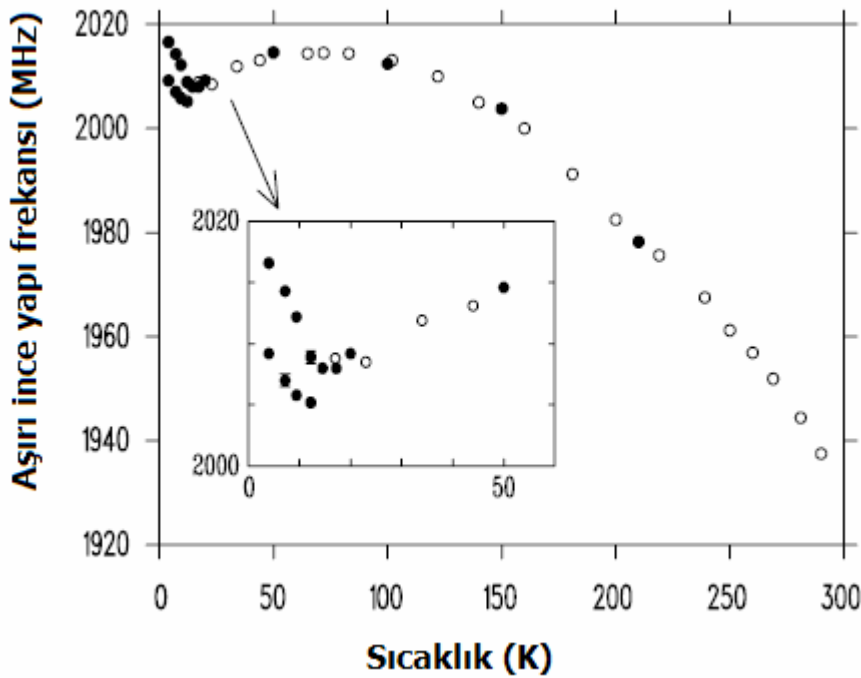
4.2.4. Silisyum içindeki Müonyum

Yarıiletkenlerdeki müonyumun, ($\text{Mu} = \mu^+e^-$), yapısı ve dinamiği uzun süredir Hidrojen atomundaki bilinmeyenleri anlamak için tanımlandı. Silisyumdaki müonyum durumları arasındaki geçişlerin dinamiklerini incelemek için TRIUMF'daki μSR spektrometreleri kullanıldı.

Radyo frekans (rf- μSR) spektrometresi (10-200 MHz) genel olarak p-tipi ve n-tipi numunelerdeki diamagnetik genliğin sıcaklığa bağlılığını ölçmek için kullanıldı. Rf verileri, müonun ömrü boyunca olan bir dizi karmaşık geçişleri ve dört farklı müonyum durumunu göstermektedir. Nötral müonyum merkezlerinin iki tanesi

düşük sıcaklıkta Silisyumda gözlemlendi. Nötral durumlara ilave olarak yüklü müonyum merkezleri meydana gelir. P-tipi silisyumda yük merkezi pozitifdir.

Mikrodalga (μw - μSR) spektrometresi (0.8-2 GHz) rf spektrometresinden daha yüksek frekanslarda çalışır. μw spektrometresi, silisyum içindeki nötral müonyum durumunun genliğini düşük sıcaklıklarda ölçmek için kullanıldı. 14 K'den daha düşük sıcaklıkta, aşırı ince yapının iki farklı değeriyle alakalı ilk kez iki sinyal gözlemlendi. Ölçülen bu değer ile 1983 yılında Holzschuh tarafından ölçülerek rapor edilen aşırı ince yapı değeri, uyumlu olduğu görülmektedir. Aşağıdaki şekilde bu iki deney sonucunun karşılaştırılması yapılmıştır. Burada siyah olanlar, μw -spektrometresinden elde edilen değerleri göstermektedir.



Şekil 4.6. Si içindeki müonyum aşırı ince yapı frekansının sıcaklığa bağlı grafiği

4.2.5. Müonyum yerelleşmesi

Elektron ve müon gibi hafif parçacıklar sık sık kuantum tünelleme yolu ile katılardan yayımlanır. Klasik olmayan bu tür geçişler için sorulabilecek anahtar soru; kuantum tünellemenin koherent veya inkoherent olup olmadığıdır. Dalga karakterli veya

parçacık karakterli tanımlaması da dikkate alındığında bu parçacıkların çevreyle olan etkileşimine bağlıdır. Bir parçacığın yerelleşmesi için olası kanalların biri, parçacığın örgü uyarmaları (fononlar, libronlar ve magnonlar gibi) ile olan etkileşim sürecidir. Düşük sıcaklıklarda böyle uyarmalar donar. İyi bilinen bir örnek düzensiz metalik bir sistemde fermi seviyesi yakınındaki elektron durumlarının uzaysal yerelleşmesidir. Yalıtılmış kristal molekül bileşiklerinde hafif nötral müonyum atomunun kuantum difüzyonu incelenmektedir. Basit bir kristal yalıtkandaki nötral parçacığın taşınım özellikleri sadece kristal örgüsünün fonon moduna bağlıdır. TRIUMF'daki bu konuyla ilgili deney M13 demet kanalında gerçekleştirildi. Zayıf bir enine manyetik alandaki karakteristik müonyum frekansında presesyon frekansının gözlenmesiyle atomik müonyum dedekte edildi. Müonyum atomu kristal boyunca yayıldığı için müonyum atomunun relaksasyonu çekirdek yakınındaki aşırı ince etkileşmelerinin modülasyonuna sebep olur.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada Kanada'daki TRIUMF laboratuvarı incelenmiştir. 500 MeV'lik büyük bir siklotrona sahip olan TRIUMF laboratuvarı, dünya çapında bir atom-altı araştırma ve uygulama merkezidir. Ana siklotron hızlandırıcısından çıkan proton demetinin kullanıldığı tüm deney istasyonları ve burada gerçekleştirilen deneyler incelenmiş, yapılan araştırmalara kısaca değinilmiştir.

Proton terapi ve pion terapi tıp alanındaki en göze çarpan uygulamaları olup çeşitli deney istasyonlarında bir çok radyoizotop üretimi yapılmaktadır. İzotoplar üretildikten sonra hızlandırılarak enerjisi artırılır. Laboratuvarın kuzey kısmında yer alan ISAC-I ve ISAC-II deney istasyonları bu amaçla kurulmuştur. 2009 yılında ISAC-II projesi tamamlandığında kütle numarası 150'den küçük olan tüm çekirdeklerin 6,5 MeV'lik enerjiye ulaşması planlanmaktadır. Başta astrofizik olmak üzere, tıp, nükleer fizik ve diğer alanlarda radyoizotopların pek çok uygulama alanı vardır.

Müon demeti kullanılarak gerçekleştirilen μ SR tekniği, NMR ve ESR yöntemlerine alternatif bir teknik olarak karşımıza çıkmaktadır. μ SR tekniğinin çalışma prensibi ve uygulama alanlarından bahsedilmiştir. Özellikle TRIUMF laboratuvarında gerçekleştirilen μ SR deneylerinden bazıları detaylı olarak incelenmiştir.

TAC proton hızlandırıcısının tasarım çalışmalarında TRIUMF laboratuvarının deneyimini göz önünde tutulmalıdır. 2006 yılından itibaren TAC projesinin üçüncü aşaması DPT desteği ile YUUP (Yaygınlaştırılmış Ulusal ve Uluslararası Proje) şeklinde yürütülmektedir. Bu aşamanın sonucunda 2010 yılında Türk Hızlandırıcı Kompleksinin Teknik Tasarım Raporunun hazırlanması ve IR-FEL laboratuvarının kurulması öngörülmektedir. Teknik Tasarım Raporu hazırlanırken, ileri hızlandırıcı laboratuvarlarının yapısı ve deneyimi göz önünde tutulmalıdır. TRIUMF laboratuvarının yapısı ve burada gerçekleştirilen araştırmalar, teknoloji ve uygulama alanı noktasında TAC projesinin proton hızlandırıcısı kısmına katkıda bulunacağını düşünüyoruz.

KAYNAKLAR

1. Amaldi, U., “The Importance of Particle Accelerators”, *Proc. of 2000 European Particle Accelerator Conference*, Vienna, Austria, 26-30 June 2000, 3-7 (2000).
2. Sultansoy, S., “Regional Project for Elementary Particle Physics: Linac-Ring Type c- τ -Factory”, *Doğa – Turkish J. of Phys* 17, 591-597 (1993).
3. Sultansoy, S., Yavaş, Ö., Çiftçi, A.K., Yılmaz, M., Recepoğlu, E., “Parçacık Hızlandırıcıları: Türkiye’de Neler Yapılmalı (1997-2000)”, *DPT-97K-120420 Proje Sonuç Raporu*, Aralık 2000, Ankara, 1-125 (2000).
4. Sultansoy, S., “Parçacık Hızlandırıcıları: Dün, Bugün, Yarın”, *UPHUK 1*, TAEK, Ankara, 1-9 (2001).
5. Aygün, S., “Kalkınmayı Hızlandıran Teknoloji”, *İkinci Ulusal Parçacık Hızlandırıcıları ve Uygulamaları Kongresi*, Ankara; 7-9 Haziran (2004).
6. Sultansoy, S., “Maalesef, Türkiye Nükleer Teknolojinin dışında kalmıştır”, *PetroGaz dergisi* 53, 24-27 (2005).
7. Arık, E., “Bilim ve Teknolojileri geliştirmeyen ülkeler geri kalmaya mahkumdur”, *PetroGaz dergisi* 53: 50-53 (2005).
8. Şahin, S., “Türkiye’de nükleer santraller kurulması konusunda yeterli siyasi irade mevcut değildir”, *PetroGaz dergisi* 53: 56-59 (2005).
9. Özemre, A.Y., “Nükleer yakıt rezervleri tükeninceye kadar dünya nükleer enerjiden asla vazgeçmeyecektir”, *PetroGaz dergisi* 53, 20-23 (2005).
10. Yavaş, Ö., “Parçacık Hızlandırıcılarının Tipleri ve Fiziği”, *1.Ulusal Parçacık Hızlandırıcıları Yaz Okulu*, Ankara Üniversitesi, 4-9 (2005).
11. Çalışkan, A., “Proton Sinkrotronu ve Müon Bölgesi Uygulamaları”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 15-17 (2005).
12. Bilgin, P.S., “Paul Scherrer Enstitüsü ve MEGAPIE (ADS) Uygulaması”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 7-42 (2006).
13. Mariani, E., Olivo, M., Rossetti, D., “ An Electrostatic Beam Splitter for the PSI 590 MeV-1MW Proton Beam Line”, *Proceedings of the EPAC*, France, 2129-2131 (1998).

14. Sultansoy, S. ve diğ erleri (21 kişi), “Türk Hızlandırıcı Kompleksinin Genel Tasarımı (2002-2005)”, **DPT-2002K-120250 Proje Sonuç Raporu**, Temmuz 2006, Ankara, 1-155 (2006).
15. Baartman, R., Bricault, P., Bylinsky, I., Dombsky, M., Dutto, G., Laxdal, R., Poirier, R., Rao, Y., Root, L., Ruegg, R., Schmor, P., Stenning, M. and Stinson, G. “The TRIUMF 500 MeV Cyclotron: Present Operation and Intensity Upgrade”, *Proceedings of the PAC*, Canada, 1584-1586 (2003).
16. Krane, K., “Nükleer Fizik 2”, Ş arer, B., **Palme yayıncılık**, Ankara, 800-813 (2002).
17. Blackmore, E. W., Evans, B., Mouat, M., Duzenli, C., Ma, R., Pickles, T., Paton, K., “Operation of the TRIUMF Proton Therapy Facility”, *PAC97 Meeting of the American Physical Society*, Washington, 6-8, 10 Ocak (1997).
18. Khoroshkov, V.S. and Minakova, E.L., “Radiation for Health : Proton Beams in Radiotherapy”, *Eur.J.Phys.*, U.S., New York, 19: 523-536 (1998).
19. Eaton, G. H., Kilcoyne, S.H., “Muon Production: Past, Present and Future”, Muon Science, Lee, S. L., Kilcoyne, S.H. and Cywinski R., *Fifty First Scottish Universities Summer School in Physics, NATO Advanced Study Institute*, London, 13-35 (1998).
20. Simon Fraser, “Annual Report Scientific Activities”, *TRIUMF Laboratory*, Vancouver, 11-13 (1999).

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : TEZCAN, Abdulkadir
 Uyuğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 22.05.1979 Ankara
 Medeni hali : Evli
 Telefon : 0 (312) 317 77 45
 Faks : 0 (312) 317 04 89
 e-mail : abdulcadirtezcan@mynet.com

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi /Fizik Bölümü	2006
Lisans	Ankara Üniversitesi/ Fizik Müh. Bölümü	2002
Lise	Ö.Muradiye Erkek Fen Lisesi	1996

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2003-2006	Anfa Altınpark İşl.Ltd.Şti.	Özel Kalem Müdürü

Yabancı Dil

İngilizce

Hobiler

Futbol, Masa Tenisi, Organizasyon