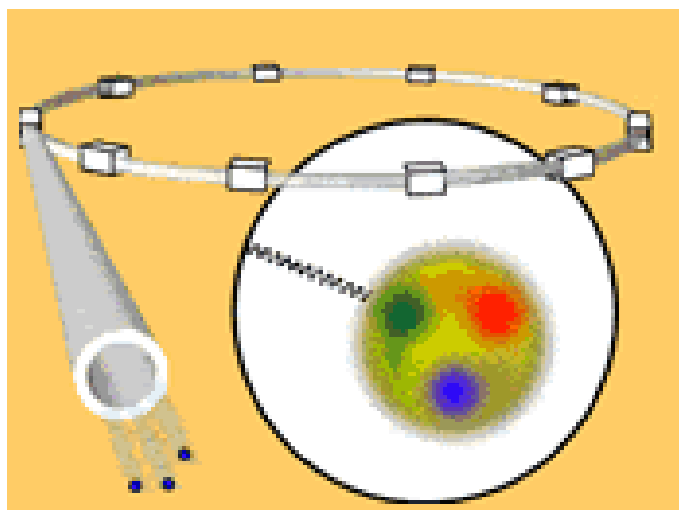






Д. ДИНЕВ
УСКОРИТЕЛИ НА ЧАСТИЦИ

Приложение 2

**ГОЛЕМИТЕ УСКОРИТЕЛНИ
ЦЕНТРОВЕ**



Академично издателство "Марин Дринов"
2006

-  **CERN – Европейската организация за ядрени изследвания**
-  **FNAL – Националната ускорителна лаборатория на САЩ “Е. Ферми”**
-  **DESY – Германският център за физика на високите енергии**
-  **Развитие на физиката и техниката на ускорителите на заредени частици в Русия**

П2. 1. ЕВРОПЕЙСКАТА ОРГАНИЗАЦИЯ ЗА ЯДРЕНИ ИЗСЛЕДВАНИЯ CERN

П2. 1. 1. Какво представлява CERN ?

CERN е Европейската организация за ядрени изследвания.

За първи път идеята за създаването на европейски научен център е изказана през 1949 г. от Луи дьо Бройл на Европейската културна конференция в Лозана. През 1952 г. единадесет европейски страни създават Conseil Européen pour la Recherche Nucleaire – CERN. На срещата на CERN в Амстердам за място на бъдещата лаборатория е избрана площадка близо до Женева.

На 29. IX. 1954 г. дванадесет европейски страни подписват договор за създаването на CERN.

Днес в CERN членуват 20 страни. Последната страна, приета за член на CERN, засега е България. Сред страните членки са всички водещи европейски страни. САЩ, Япония и Русия също активно сътрудничат с CERN. Те имат статут на страни – наблюдателки.

Лабораториите на CERN са разположени край Женева и днес се разпростират върху територии, принадлежащи на две държави – Швейцария и Франция.

Историята на CERN е до голяма степен история на създаването и развитието на уникален комплекс от ускорители на частици - инструментите, които позволиха успешното проникване в тайните на микросвета.

П2. 1. 2. Ускорителният комплекс на CERN

A. Синхроциклотрон

Когато през 1950 г. започва да се дискутира идеята за създаването на обща европейска лаборатория за изследвания в областите на ядрената физика и на физиката на частиците, се възприема американският модел на физическа лаборатория, изградена около един голям ускорител. По това време в Европа липсват знания и опит в създаването на големи ускорители. Изключение прави само Великобритания благодарение на своето участие в създаването на ядреното оръжие.

По предложение на Н. Бор и Х. Крамерс с цел натрупването на опит е решено да се започне с една по-скромна машина. На първото заседание на съвета на CERN в Париж през 1952 г. е решено това да бъде синхроциклотрон, ускоряващ протони до енергия 600 MeV. За лидер е назначен К. Бакер.

Тъй като новата лаборатория още не съществувала върху картата, първите проектни и конструкторски разработки по новия синхроциклотрон се извършват в отделните страни-членки. Вакуумната камера на ускорителя се изработва във Великобритания, електромагнита - в Швеция, високочестотната система - в Холандия и електронното управление - във Франция.

През 1954 г. е избрано мястото на новата обединена европейска лаборатория, наречена CERN, в селището Мейрин (Meurin) край Женева.

Започва монтирането на новия ускорител.

Първият сноп протони е ускорен на 1. VIII. 1957 г. Това става точно в предварително планирания срок и тази традиция на стриктно спазване на проектните обещания се запазва в практиката на CERN.

Синхроциклотронът работи до 1990 г., когато е демонтиран.

На него са извършени множество първокласни изследвания – откриване на разпадането на заредените пиони, прецизно измерване на магнитния момент на мюона и др.

От 1964 г. синхроциклотронът работи главно съвместно с on-line изотропния сепаратор ISOLDE. От 1980 г. на синхроциклотрона се ускоряват йони (He, C, N) до енергия 100 MeV/A. Изучават се ядрените реакции с йони при средни енергии.

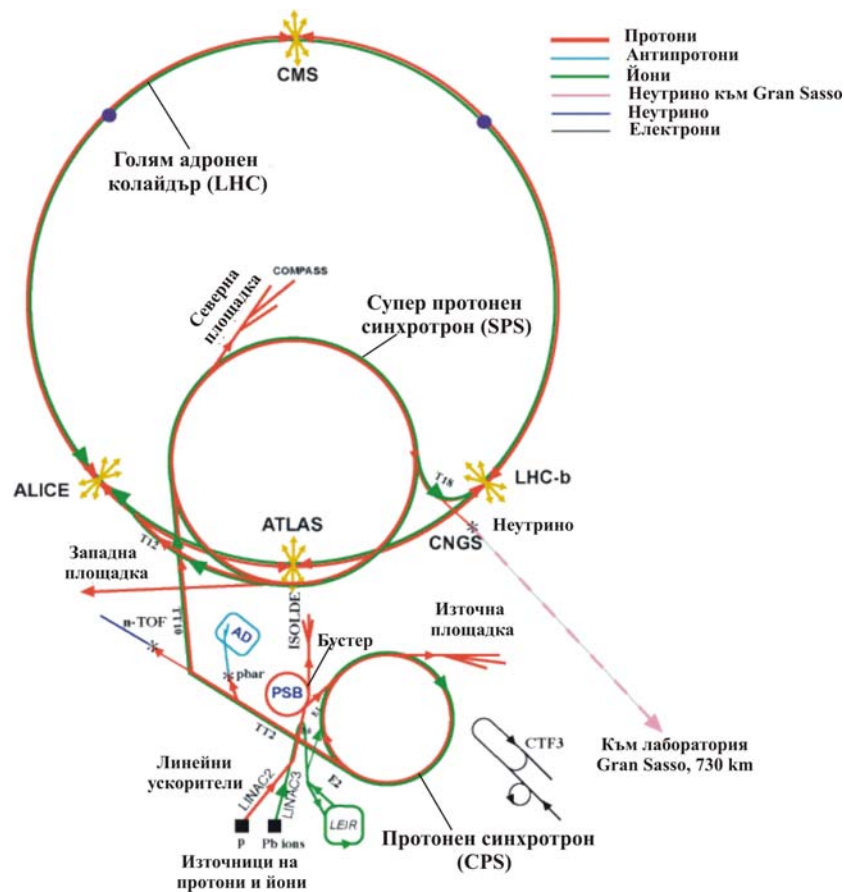
След затварянето на синхроциклотрона, ISOLDE започва да се захранва със снопове протони, ускорени в бустера на протонния синхротрон - PSB.

B. CPS

През 1952 г. Съветът на CERN излиза със смелото предложение да се построи протонен синхротрон с енергия 10 – 20 GeV, въпреки липсата на какъвто и да е опит в строителството на големи ускорители. Първоначално се смята това да е мащабно копие на току-що влезлия в действие протонен синхротрон за 3 GeV Cosmotron в Брукхайвън, САЩ. Ускорителят в Брукхайвън е една слабо фокусираща машина. Той използва за удържане на протоните върху кръгова орбита електромагнити със С – образен магнитопровод и слаб градиент на магнитното поле. Такива електромагнити имат фокусиращо действие върху протоните, необходимо за формирането на сноп ускорени частици. Фокусиращата сила обаче е малка и сечението на снопа е относително голямо – 20 x 60 cm в Cosmotron. Необходими са следователно големи и скъпи електромагнити. През същата 1952 г. един от пионерите на ускорителната техника, С. Ливингстън , предлага да се разгледа възможността в синхротроните да се използват С – образни електромагнити с редуваща се полярност на градиента. При тази конфигурация, ако единият електромагнит има фокусиращо действие, то следващият ще има дефокусиращо действие, но общият ефект ще бъде фокусиране на частиците около равновесната орбита.

Теоретичен анализ на това предложение е направен от Е. Курант и Х. Снайдер, които показват, че такъв тип ускорител, наречен силно фокусиращ, може да свие ускорявания сноп частици до няколко сантиметра. С това значително се намаляват размерите на вакуумната камера и размерите и цената на електромагнитите на ускорителя.

В CERN за ръководител на строителството на протонния синхротрон е назначен Ф. Гоуърд. Той е човекът, построил първия в света синхротрон за електрони с енергия 14 MeV. Това става в Харуел, Великобритания през 1946 г. Гоуърд бързо оценява достоинства на новия тип силно фокусиращи ускорители и излиза с предложение протонният синхротрон в CERN да бъде построен по тази нова технология. Неговата настойчивост води в крайна сметка до едно от най-важните решения на Съвета на CERN – да се построи силно фокусиращ протонен синхротрон с максимална енергия 28 GeV. Началото на строителството е през 1955 г. Ускорителят има диаметър 200 m и е разположен в подземен тунел с размери 6 x 6 m. На 24. X. 1959 г. е получен първият сноп от 10^{10} протона за импулс с енергия 24 GeV.



Фиг. П2. 1. Ускорителният комплекс на CERN – [2, 3]

Новият ускорител е наречен Cern Proton Synchrotron (CPS). През 1963 г. CPS е оборудван със система за извеждане на снопа чрез възбуждане на резонанс в движението на протоните, т. нар. бавно извеждане. Това значително разширява възможностите на машината за провеждането на експерименти.

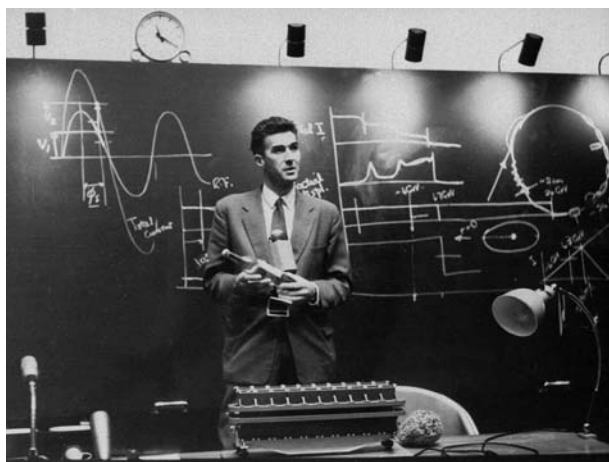
Създаването на високоефективното резонансно извеждане на протоните позволява развитието на неутринни експерименти на CPS. През 1963 г. с мехурчеста камера са регистрирани първите неутринни взаимодействия.

През 1973 г. е направено едно от важните открития във физиката на високите енергии – това на неутралните токове. Това откритие се явява силна подкрепа за новосъздаващата се единна теория на електромагнитните и слабите взаимодействия.



Фиг. П2. 2. Панорама на CERN и неговите ускорители – [2, 3]

Сериозно ограничение обаче остава относително ниската интензивност на сноповете. За нейното увеличаване пречат силите на кулоново отблъскване между протоните, които при голяма интензивност водят до разрушаването на снопа.



Фиг. П2. 3. Историческа фотография на Джон Адамс, обявяващ ускоряването на първия снап в протонния синхротрон на CERN през ноември 1959 г. В едната си ръка Адамс държи празна бутилка от водка, а в другата фотография от един 24 GeV импулс. Водката е била изпратена в CERN от физиците и инженерите на ОИЯИ – Дубна, за да се отвори, когато в CERN успят да “счупят” световния рекорд за енергия на ускорените протони от 10 GeV, принадлежащ дотогава на дубненския Синхрофазотрон. След малко Адамс ще постави фотографията в празната бутилка, за да я изпрати обратно в Дубна – [1]

Този ефект е от значение при инжектирането на частиците в ускорителя, когато техните скорости са малки. Необходимо е да се повиши енергията на инжектиране. За тази цел през 1968-1972 г. в CERN се създава малък синхротрон-инжектор, т. нар. бустерен ускорител. Той е наречен Proton Synchrotron Booster (PSB). PSB има диаметър 50 m и се състои от четири еднакви пръстена, разположени един над друг.

Всеки пръстен има периметър равен на $\frac{1}{4}$ от дължината на орбитата на CPS. В PSB протони с енергия 50 MeV идващи от линеен ускорител се доускоряват до 800 MeV, след което се инжектират в CPS.

С влизането в действие на PSB интензивността на протонния сноп в CPS е увеличена и днес тя достига $3 \cdot 10^{13}$ протона за импулс.

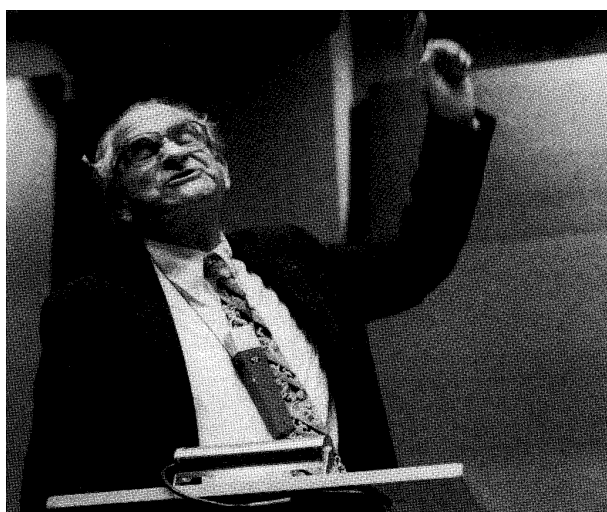
V. ISR

През 60-те години на XX в. след пионерските работи на научното обединение на американските университети от средния запад (MURA), вниманието на физиците се насочва към натрупването на интензивни снопове електрони в т. нар. натрупващи пръстени (storage rings). Натрупващите пръстени откриват нови хоризонти пред експериментаторите и в частност възможността за осъществяването на достатъчен брой сблъсквания на насрещно движещи се снопове, при което енергията на взаимодействие нараства многократно.

Отначало и CERN проявява интерес към натрупването на електрони. Построени са електронен синхротрон за 100 MeV и натрупващият пръстен CESAR.

И тук идва историческото предложение на В. Вайскопф, тогава генерален директор на CERN, да се построи 25 x 25 GeV протон – протонен колайдър.

По това време натрупването и сблъскването на високоинтензивни адронни снопове е напълно неизучена територия. Предложението получава решаваща подкрепа на Европейската комисия за бъдещи ускорители (ECFA) и на тогавашния и председател Е. Амалди.

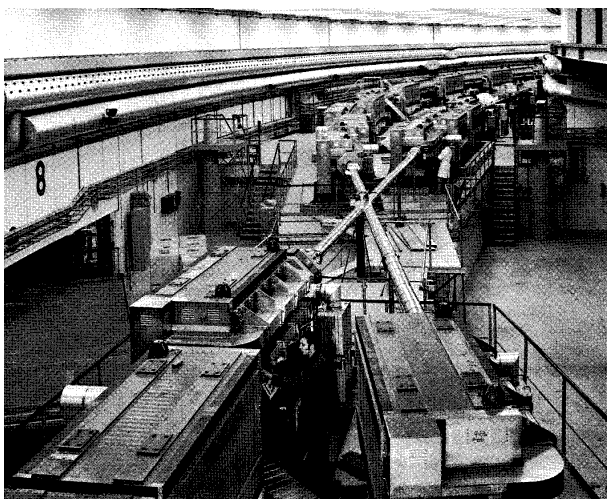


Фиг. П2. 4. В. Вайскопф – [1]

Трябва да се преодолеят редица технически предизвикателства - поддържането на висок вакуум в ускорителя ($< 10^{-12}$ Torr), преодоляването на многобройните нестабилности в движението на частиците, които се проявяват при голяма интензивност на снопа, и фокусирането на двата насрещни снопа в зоната на удара до изключително малки размери (2 mm) с помощта на много силни свръхпроводящи магнитни лещи (т. нар. *low β секции*), за да се получат достатъчно голям брой събития (голяма светимост).

Строителството на Intersecting Storage Rings (ISR) започва през 1968 г., а първият сноп е ускорен през 1971 г. ISR е протон – протонен колайдър с енергия 31,4 GeV на сноп. Състои се от два пръстена с диаметър 700 m. В ISR са натрупани 52 A на сноп и е постигната светимост $L = 0,85 \cdot 10^{31} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$. Натрупаният при експлоатацията на ISR опит е безценен за бъдещото развитие на CERN.

В ISR за първи път са наблюдавани ефекти, свързани с кварковата структура на протона. За първи път е наблюдавано раждането на частици с голям напречен импулс – първо доказателство за съществуването на точкови силно взаимодействащи частици (кварки и глюони), от които е съставен протона. През 1978 г. за първи път е наблюдавано раждането на фотони при големи ъгли – индикация за кварк – глюонни процеси във взаимодействащите протони.



Фиг. П2. 5. Протон – протонният колайдър ISR – една от точките на насрещни удари на частиците – [7]

Може да се каже, че с ISR започва ерата на колайдърите, които разшириха неимоверно възможностите на ускорителите с неподвижна мишена.

През 1984 г. ISR е затворен поради започването на строителството на гигантския ускорител LEP.

G. SPS

През 1963 г. Европейската комисия за бъдещи ускорители (ЕСФА) препоръчва в Европа да се построи протонен ускорител за много висока енергия, а през следващата година в CERN е подготвен идейният проект на протонен синхротрон за 300 GeV.

Първоначално се предвижда създаването на нова лаборатория на съвсем ново място и са предложени 22 подходящи площадки. Тук започват трудности от финансов и политически характер. Германия подлага първоначалния проект, който всъщност е едно мащабно копие на CPS, на унищожителна критика. Предлага се да се възприеме наскоро създаденият от Р. Уилсън синхротрон с разделени функции. В този тип ускорител удържането на частиците върху кръгова орбита се осъществява от магнити с еднородно поле, а фокусирането им към равновесната орбита от магнитни квадруполни лещи. Това позволява работа при по-висока индукция на магнитното поле, т. е. ще са необходими по-малки размери на ускорителя. Освен това самите магнити имат по-проста конструкция и са по-евтини.



Фиг. П2. 6. Протонният синхротрон SPS – [8]

Последва втори удар – Великобритания се отказва от поддръжка на проекта. В опит да се изгладят противоречията Съветът на CERN назначава англичанина Дж. Адамс за ръководител на проекта.

Адамс е една от ключовите фигури в историята на CERN. Любопитно е, че няма завършено висше образование. Учил е в Елдом колеж, но не успява да го завърши поради липса на средства. По-късно работи в Харуел върху построяването на 18 MeV синхроциклотрон. През 1953 г. се премества в CERN, където скоро проявява своята изключителна квалификация и способност да обединява големи научни колективи за постигането на една цел. За тези си качества е определен за ръководител на строителството на CPS.

Най-голямото препятствие пред новия ускорител възниква, когато Германия заявява, че ще подкрепи проекта само ако новата лаборатория е разположена на нейна територия.

Изход от тази заплетена ситуация намира Дж. Адамс. През 1970 г. той предлага новият ускорител да се построи на вече съществуващата площадка на CERN, като максимално се използват наличното експериментално оборудване и инфраструктурата и CPS като инжектор. С изключително дипломатично умение Адамс успява да убеди различните страни в перспективността на предложението и през 1971 г. Съветът на CERN одобрява предложението за новия Super Proton Synchrotron (SPS).

Тъй като по онова време технологията за производство на свръхпроводящи магнити още не е добре развита, се решава в новия ускорител да се използват стандартни електромагнити с индукция 1,8 Т. Това определя и размера на ускорителя – диаметър 2,2 km. Първият сноп е получен на 17. VI. 1976 г. SPS е протонен ускорител за енергия 450 GeV. Получена е интензивност $2,5 \cdot 10^{13}$ протона за импулс.

Големият урок на SPS е, че новите ускорители трябва да се строят близо до вече съществуващи лаборатории, за да се използват максимално съществуващите инфраструктура и съоръжения. Това значително поевтинява проекта. Може би съдбата на 20 TeV-ния суперколайдър SSC в САЩ нямаше да бъде толкова нещастна, ако вместо на съвършено ново място в Тексас беше взето решение този ускорител да се построи във Fermilab.

Д. Протон – антипротонния колайдър

В началото на 70-те години на XX на в. в CERN е направено едно от важните открития във физиката на ускорителите – това на стохастичното охлаждане. Методът на стохастичното охлаждане е предложен от С. Ван дер Меер и през 1975 г. неговата работоспособност е демонстрирана в ISR. Построен е малък експериментален ускорител Initial Cooling Experiment (ICE) за изучаване и оптимизиране на този метод.

Целта на стохастичното охлаждане е да се създадат снопове частици с много висока плътност и с много тясно разпределение по енергия. Това е от изключителна важност за ускорителите с насрещни снопове – колайдърите, в които броят на регистрираните събития е право пропорционален на броя частици във всеки сноп, на честотата, с която частиците се въртят в ускорителя, и е обратно пропорционален на сечението на сноповете.

В метода на стохастичното охлаждане с помощта на специални детектори, т. нар. *пикапи на Шотки* (*Schottky pickup*), се измерват случайните флукуации в положението на центъра на тежестта на тънък резен (slice) от снопа. След това този сигнал се изпраща напречно на пръстена към коригиращи положението на снопа устройства, т. нар. кикери (kicker). В тях с помощта на електрично поле с подходяща сила се коригира до нула отклонението на центъра на тежестта на същата част от снопа. Този процес се повтаря милиони пъти и води до формирането на много тънък сноп с висока монохроматичност.

Разработването на стохастичното охлаждане е онази решаваща стъпка, която позволява създаването на адронни колайдъри. Тази техника позволява натрупването на интензивни снопове от адрони с висока плътност и с висока енергетична еднородност.

За създаването на стохастичното охлаждане С. Ван дер Меер получава Нобелова награда по физика за 1964 г.

През 1976 г. К. Рубиа излиза със своето знаменито революционно предложение да се превърне протонният ускорител с неподвижна мишена SPS в протон – протонен колайдър. Предложението се базира върху постигнатите успехи със стохастичното охлаждане. Именно охлаждането позволява натрупването на достатъчно интензивни снопове от антипротони.



Фиг. П2. 7. К. Рубиа – [9]

Антипротони се раждат при облъчването на метална мишена с високоенергетични протони. За съжаление добивът на антипротоните е много нисък – един антипротон се ражда средно на $2 \cdot 10^6$ протона. Антипротоните се раждат в много широк диапазон от енергии и ъгли и не са пригодни за по-нататъшно ускоряване. Тук помага стохастичното охлаждане, което позволява енергията на антипротоните да се концентрира около зададена стойност и силно да се намали ъгловата разходимост. След охлаждане антипротоните могат вече успешно да се натрупват и ускоряват.

Рубиа предлага да се създаде нов натрупващ пръстен, т. нар. Antiproton Accumulator (AA), в който антипротоните да се натрупват и охлаждат. За около половин ден (30 000 импулса на CPS) в AA могат да се натрупат $6 \cdot 10^{11}$ антипротона.

След това антипротоните се доускоряват в CPS до 26 GeV и се инжектират в SPS. В SPS протоните и антипротоните се движат в противоположни посоки и се ускоряват до 270 GeV.

Рубиа предлага да се изградят две точки на насрещни удари на протоните и антипротоните.

Енергията на взаимодействие в SCM е 540 GeV.

Тази енергия не е избрана случайно. Тя е необходима за раждането на носителите на слабото взаимодействие W и Z бозоните. Основната цел на предложението на Рубиа е потвърждаването на единната теория на електромагнитното и слабото взаимодействие.

По-това време CERN драматично се е нуждаел от значително (историческо) научно откритие, за да се оправдаят многогодишните усилия и големите финансови разходи.

Рубиа с изключителна настойчивост успява да убеди ръководството на CERN в осъществимостта на проекта. Рубиа е и движещата сила на проекта, и на последвалото откриване на W и Z бозоните.

На 6. XII. 1982 г. в експеримента UA1 са регистрирани първите $p - \bar{p}$ удари, а на 12. I. 1983 г. са получени първите доказателства за раждането на W бозони с маса 81 GeV. По-късно на 1. VI. 1983 г. е открит и Z бозона с маса 95,5 GeV.

За реализирането на протон – антипротонния проект и за откриването на W и Z бозоните К. Рубиа е удостоен с Нобелова награда по физика за 1984 г.

E. LEP

През 1981 г. Съветът на CERN одобрява строителството на нов гигантски по своите размери ускорител – Large Electron Positron collider (LEP).

Предложението за строителство в CERN на електрон-позитронен колайдър се заражда в края на 70-те години, а през 1980 г. е готов и идейният проект на 22 – 130 GeV $e^- - e^+$ колайдър.

Адронните колайдъри могат да дадат важна информация за поведението на кварките и глюоните. Получените от тях данни обаче са по-трудни за интерпретиране поради трикварковата структура на адроните. Освен това да се отговори на въпросите на електрослабата теория пречи доминиращото влияние на силното взаимодействие.

Електрон–позитронните колайдъри предлагат по-чисти условия за раждане и прецизно изучаване на W и Z бозоните. В допълнение LEP може да хвърли светлина върху съществуването на Хигс (Higgs) бозоните.



Фиг. П2. 8. Електрон – позитронният колайдър LEP – [11]

Основна пречка при цикличните електрон–позитронни колайдъри е много мощното синхротронно лъчение. За намаляване на загубите на енергия за синхротронно лъчение радиусът на LEP е избран много голям – 4,2 km, а магнитното поле в завъртащите електромагнити е необичайно слабо – 0,123 Т. И въпреки това мощността на синхротронното лъчение в LEP достига 25 MW при 86 GeV.

Началото на строителството на LEP е през 1983 г., а първи $e^- - e^+$ стълкновения са регистрирани през 1989 г. Ускорителят е разположен в подземен тунел с дължина 27 km.

Работата на LEP изисква сериозна модификация на вече съществуващите ускорители. Построен е нов линейен ускорител за 200 MeV електрони. Позитроните се получават при облъчването с електрони на метална мишена. Електроните и позитроните се натрупват в Electron Positron Accumulator (EPA), където се доускоряват до 600 MeV. След това те се ускоряват последователно в CPS и SPS до 20 GeV и се инжектират в LEP. В LEP електроните и позитроните

се движат в противоположни посоки и се сблъскват в четири точки, в които са разположени детекторите.

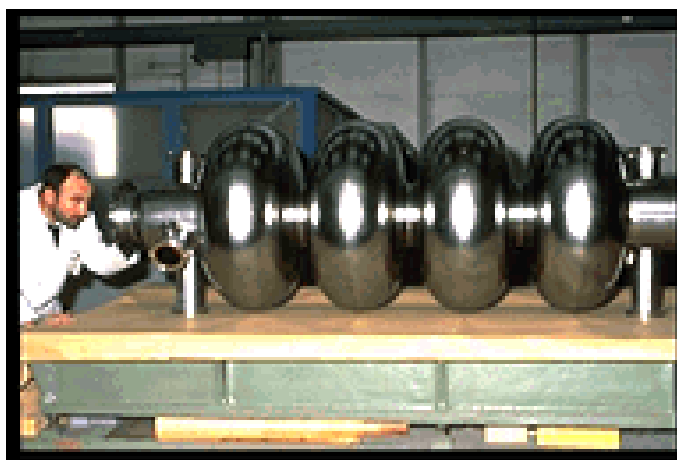
Във вакуумната камера на колайдъра се поддържа вакуум $8 \cdot 10^{-12}$ Torr. Светимостта на колайдъра е $L=5,6 \cdot 10^{31} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, а размерът на снопа е $200 \times 3,5 \text{ }\mu\text{m}$.

LEP има два етапа. LEP1 работи при 50 GeV на снопа. За ускоряването на електроните и позитроните и покриването на загубите за синхротронно лъчение се използват медни обемни резонатори.

Енергия 100 GeV в SCM е достатъчна за раждането на Z бозони.

За W бозони, които се раждат в двойка с противоположен електричен заряд е необходима енергия 200 GeV в SCM.

Още през 1981 г. Дж. Адамс, с легендарната си способност за предвиждане на правилното решение, предлага резонаторите на LEP да се заменят със свръхпроводящи резонатори.



Фиг. П2. 9. Свръхпроводящият резонатор на LEP – [12]

Свръхпроводящите резонатори имат 10^5 пъти по-ниски загуби и много по-висок ускоряващ градиент от медните резонатори. В CERN е разработен сферичен резонатор от ниобий, работещ при температура 4,5 K. Честотата на ускоряващото електрично поле в резонатора е 352 MHz, а ускоряващият градиент е 6 MV/m.

След инсталирането на 288 свръхпроводящи резонатори енергията на електроните и позитроните в LEP е повдигната до 100 GeV на снопа.

Ускорителят LEP е демонтиран през 2002 г. В неговия тунел в момента се монтира адронният колайдър LHC.

Ж. LEAR

През 1983 г. в CERN е построен малък натрупващ пръстен за антипротони, т. нар. Low Energy Antiproton Ring (LEAR).

Схемата, по която работи ускорителят е следната: първоначално антипротоните, които се раждат при облъчването метална мишена с протони и които имат енергия 3,5 GeV, се инжектират обратно в CPS, където се забавят до 600 MeV. Така забавените антипротони се натрупват в LEAR, където се охлаждат.

LEAR внася цяла поредица от важни нововъведения в областта на ускорителната физика. Сред тях може би най-важното е създаването на т. нар. свръхбавно извеждане – метод за резонансно извеждане на частиците от ускорителя, при който частиците се подвеждат към резонанс от генератор на високочестотен случаен шум. Извеждането на снопа е разтеглено до много минути и дори часове. Реализирано е дори извеждане на само един антипротон за оборот.

През 1966 г. в LEAR за първи път е получен *антиводород*. Синтезирането на екзотични атоми, в които един орбитален електрон е заместен с антипротон, става една от приоритетните задачи на LEAR. Друга важна задача е изучаването на механизма на нарушаване на комбинираната четност (CP).

През 1996 г. LEAR е затворен за преоборудване в Low Energy Ion Ring (LEIR). LEIR е важна част от комплекса на CERN за ускоряване на тежки йони.

3. AD

След затварянето на LEAR за изучаването на екзотични атоми е създаден нов малък ускорител Antiproton Decelerator (AD).

AD има диаметър 54 m и започва работа през 1998 г.

В него антипротоните се забавят до много ниска енергия – 5,31 MeV.

В AD ще се изучават т. нар. *антипротонни атоми* – атоми, в които един орбитален електрон е заменен с антипротон и на т. нар. *протониум* – система от един “ ядрен “ протон и един “ орбитален “ антипротон. Протониумът е най-простата двучастична система от силновзаимодействащи частици. Такива системи имат достатъчно дълго време на живот (\sim ms), за да могат да се изучават с помощта на методите на лазерната спектроскопия.

II. ISOLDE

ISOLDE е on-line изотопен сепаратор, който вече 30 г. работи в CERN, първоначално със синхроциклотрона, а от 1992 г. с бустерния ускорител PSB. Той позволява произвеждането на над 600 изотопа на 70 елемента.

Сърцето на ISOLDE е мишенната станция, в която 1,4 GeV протони от PSB произвеждат изотопи. Тези изотопи, които представляват интерес, след това се извличат, йонизират, сепарират и доускоряват за използване в различни експерименти.

В процес на реализация е Radioactive beam EXperiment at ISOLDE, т. нар. REX – ISOLDE.



Фиг. П2. 10. On-line изотопния сепаратор ISOLDE (рисунка CERN)

В REX – ISOLDE първоначално изотопите в мишената, които представляват интерес се йонизират изборително от лазерен йонен източник и се захващат от магнитното поле на т. нар. Penning trap. В този магнитен капан се формира плътен банч от йони. Банчираният сноп след това попада в т. нар. EBIS йонен източник, където първоначално еднoзарядните йони се дойонизират до многозарядни йони.

Създаването на импулсен сноп от многозарядни йони е важно, за да могат след това йоните да се ускоряват без големи загуби, например от линейен ускорител. В REX – ISOLDE се очаква ефективност 10%.

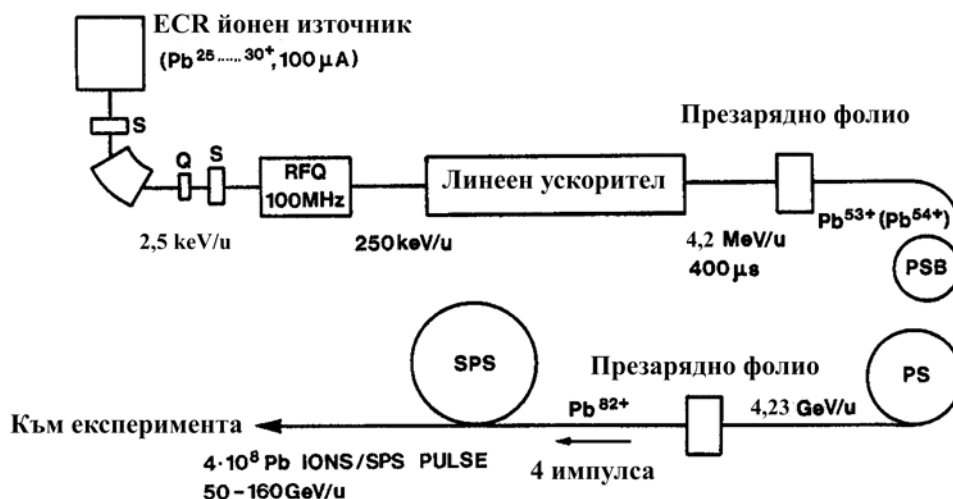
Снопове от изотопи с необичайно отношение неутрони/протони могат да помогнат много в решаването на редица фундаментални въпроси на ядрената физика. Освен за изследване на ядрената структура радиоактивните снопове намират интересни приложения и във физиката на твърдото тяло, физиката на полупроводниците и за биомедицински изследвания.

Й. Тежки йони

В CERN освен адрони и лептони се ускоряват и тежки йони.

Кислородни ядра се ускоряват за първи път в SPS през 1986 г. От 1994 г. в SPS се ускоряват и оловни йони.

Схемата е следната. Оловни йони със зарядност $30+$ и ток $100 \mu\text{A}$ се получават от ECR йонен източник. След това те се сепарират и ускоряват последователно в два линейни ускорителя до енергия $4,2 \text{ MeV/A}$. Тази енергия е достатъчна за откъсването (“одирането”) на част от орбиталните електрони при преминаването на йонния сноп през тънко въглеродно фолио (stripper). Зарядността на йоните след фолиото се повишава до $53+$ и това прави следващото им ускоряване в PSB и CPS по-ефективно. След преминаване през ново фолио при енергия $4,23 \text{ GeV/A}$ йоните добиват зарядност $82+$, т. е. имаме “голи” оловни ядра. Те се инжектират в SPS, където се доускоряват до 158 GeV/A . Получена е интензивност $7 \cdot 10^8$ Pb йона за импулс.



Фиг. П2. 11. Ускоряване на тежки йони в ускорителния комплекс на CERN

Основна цел на експериментите с тежки йони в CERN е създаването на кварк–глюонна плазма – състояние, в което се е намирала Вселената няколко ms след Големия взрив.

K. LHC

При проектирането на LEP подземният тунел е направен с достатъчно голямо сечение, за да може в бъдеще да се построи още един ускорител.

През 1984 г. е изказана идеята в тунела на LEP да бъде построен нов протон – протонен колайдър.

От физична гледна точка взаимодействието между кварки и глюони или между електрони и позитрони с енергия 1 TeV би позволило да се изследва т. нар. механизъм на Хигс, който управлява разрушаването на електрослабата симетрия. Лептоните, които са точкови частици, дават по-чисти взаимодействия. Но построяването на 1 TeV цикличен $e^- - e^+$ колайдър е практически невъзможно поради огромните загуби на енергия за синхротронно лъчение. Алтернатива са линейните $e^- - e^+$ колайдъри, но засега в тях не може да се ускоряват достатъчно интензивни снопове и тези снопове не могат да се фокусират до изключително малките размери в зоната на удара на двата снопа ($\sim \text{nm}$) необходими, за да се постигне висока светимост. От друга страна, един $p - p$ колайдър е напълно осъществим от техническа гледна точка.

За да се осигури 1 TeV енергия на взаимодействие между кварките и глюоните протонният колайдър трябва да е с енергия около 10 TeV.

През 1984 г. Съветът на CERN създава Long Range Planning Committee оглавяван от К. Рубиа за изучаването на възможностите за бъдещо развитие на лабораторията.



Фиг. П2. 12. Изпитание на свръхпроводящите магнити на LHC – [17]

Комитетът препоръчва в CERN да се разгърнат изследователски работи за линейни електрон – позитронни колайдъри, но признава като технически осъществима в момента само идеята за протон – протонен колайдър във вече съществуващия тунел на LEP.

Ускорителят е наречен Large Hadron Collider (LHC). Той ще има два пръстена, в които ще се ускоряват протони до енергия 7 TeV. Двата пръстена ще се запълват с протони, идващи от съществуващия ускорителен комплекс PSB → CPS → SPS.

Очаква се да се натрупва 850 mA протонен ток и да се достигне светимост $L = 2,5 \cdot 10^{34} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$. Необходими са магнити с рекордна сила – 8,33 T. Това могат да бъдат само свръхпроводящи магнити. За свръхпроводящия кабел е избрана ниобий – титанова сплав. За достигане до висока магнитна индукция е необходимо да се работи със свръхфлуиден хелий при температура 1,9 K.

Ускорителят ще има 1232 диполни магнита и 392 квадруполни лещи.

След продължителни дискусии и предварителни разработки на 16. XII. 1994 г. Съветът на CERN взема историческото решение за започване на строителството на новия ускорител.

Един от важните уроци в историята на CERN е, че едновременно с проектирането и строителството на един голям ускорител трябва да се подготвя физическата му програма и да се създават детекторите.

В LHC ще има четири точки на пресичане на протонните снопове. В тях ще бъдат разположени експериментите: ATLAS и CMS за изучаване на Хигс бозоните, ALICE за йонно – йонни удари и изучаване на кварк – глюонната плазма и LHC – B за физика на B – частиците.

Разработването на LHC е във фокуса на усилията на цялата световна научна общност. След анулирането на проекта за 20 TeV p – p колайдър SSC в Тексас, САЩ, всички погледи са обърнати към CERN. Учреден е статутът на

страните – наблюдателки: САЩ, Япония, Канада, Русия. Те имат право да присъствуват на заседанията на Съвета на CERN. Тези страни дават и значителен технически и финансов принос за построяването на ускорителя.

Литература

1. A Brief History of CERN - CERN Courier, 1979, № 6, 228 - 232.
2. CERN Courier, V. 26, 1985, № 3.
3. И. Н. Арутюнян. Физическият Вавилон в центру Европы - Природа, 1992, № 6, 48-63
4. CERN Physics, Past and Future. Ibid, 239 – 241.
5. 25 Years and Still Going Strong - CERN Courier, 1984, № 10, 421 – 424.
6. John Adams – Project Director - CERN Courier, 1968, № 12, 310
7. K. Johnsen. CERN Intersecting Storage Rings - CERN Courier, 1968, № 11, 263 – 291.
8. CERN 400 GeV Proton Synchrotron - Technical Notebook, 1977, № 1.
9. The Discovery of ‘Heavy Light’ - CERN Courier, 1983, № 9, 355 – 361.
10. From AA to Z. ibid, 365 – 370.
11. E. Picasso, G. Plass. The Machine Design - Europhysics News, V. 20, 1989, № 6, 80-91.
12. LEP Takes to the Hills - CERN Courier, 1981, № 6, 240 – 242.
13. LEP Commissioning - CERN Courier, 1989, № 7, 1 – 10.
14. Low Energy Antiprotons - CERN Courier, 1979, № 4, 148 – 149.
15. LEAR Looks Ahead - CERN Courier, 1985, № 5, 188 – 189.
16. Large Hadron Collider - CERN Courier, 1984, № 5, 185 – 187.
17. J. Gillies. Energy and Intensity at the Particle Accelerators Conference - CERN Courier, V. 37, 1997, № 7, 2-10.
18. G. Brianti, K. M. Potter. The Large Hadron Collider - Europhysics News, V. 23, 1992, № 6, 103-106
19. G. Brianti, K. Hubner. The Large Hadron Collider in the LEP Tunnel - CERN 87-05, Geneva, 1987
20. The LHC Study Group. Design Dstudy of the Large Hadron Collider (LHC) - CERN 91-03, Geneva, 1991



П2. 2. НАЦИОНАЛНАТА УСКОРТЕЛНА ЛАБОРАТОРИЯ НА САЩ “Е. ФЕРМИ”

П2. 2. 1. FERMILAB и MAIN RING

Обсъждане, състояло се през 1963 г., препоръчва на Комисията по атомна енергия на САЩ в страната да се построи ускорител на протони с енергия 200 GeV. Това би разкрило нови хоризонти пред физиката на високите енергии. Първоначално ускорителят се проектира от Калифорнийския университет в Бъркли (UCB–University of California, Berkeley).

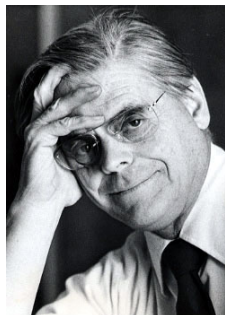
След четиригодишни обсъждания на различни нива е учреден нов научен център – Националната ускорителна лаборатория. За неин пръв директор е назначен Р. Уилсън.

Р. Уилсън започва своя път в науката в лабораториите в Бъркли и Принстън. По-късно той е лидер на циклотронната група в Лос Аламос. Израства до ръководител на Отдела за експериментална ядрена физика. За известно време дори е кмет на града. Качествата на Уилсън на първокласен експериментатор във физиката на частиците и на създател на нови ускорители се проявяват в пълна степен по време на работата му в Корнел. Тук той ръководи създаването на електронни синхротрони в Лабораторията за ядрени изследвания.

За място на новата лаборатория се избира Батавия, край Чикаго. Подписан е договор с Комисията по атомна енергия за финансиране на строителството на новия ускорител. Общата стойност на съоръжението достига 240 млн. USD. Новият ускорител е наречен Main ring (Главен пръстен), визирайки обстоятелството, че при синхротрони ускорителят се разполага в подземен тунел с тороидална (пръстеновидна) форма. При Main ring диаметърът на пръстена е равен точно на 2 km, а подземния тунел има напречни размери 3 x 2,5 m.

Уилсън решава, че проектната енергия от 200 GeV е твърде малка за нуждите на една нова физика и за големите размери на експерименталните площадки. Той решава максималната енергия на новия ускорител да се повиши на 500 GeV.

Под ръководството на Р. Уилсън новият ускорител е построен само за четири години. Първият сноп протони са ускорени до енергия 200 GeV на 1. III. 1972 г.



Main ring е синхротрон със силно фокусиране на ускоряваните протони, което позволява формирането на снопове с малко напречно сечение. Съответно вакуумната камера на ускорителя има малки размери – 10 x 5 cm. Малко е и разстоянието между полюсите на електромагнитните блокове. Завъртащото и фокусиращото протоните магнитно поле се създава в по-малък обем, а това означава необходимост от по-малко ампер-витки, т. е. по – малко

Фиг. П2. 13. Р. Уилсън

мед в намотките на електромагнитите и по-малка захранваща мощност. Това трябва да се разбира в относителен смисъл. В такъв гигантски ускорител, какъвто е Main ring, максималната електрическа мощност, захранваща

електромагнитните блокове на ускорителя, достига $P_{\text{peak}} = 96 \text{ MW}$, а средната мощност е $P_{\text{mean}} = 39,6 \text{ MW}$!

Main ring е първият синхротрон с разделяне на завъртането на протоните от тяхното фокусиране към равновесната орбита. Предложението е било направено от Г. Данли и подкрепено от Р. Уилсън. До Main ring завъртането и фокусирането се осъществявало от едни и същи секторни електромагнити. Магнитното поле в тези секторни магнити е нееднородно, то или силно спада, или силно расте с радиуса. В подобни магнити средната индукция, която може да се използва, без да настъпи насищане на магнитопровода, е относително ниска $\sim 1,3 \text{ T}$. Уилсън предлага завъртането на протоните да се извършва от магнити с еднородно магнитно поле. Използването на пространствено еднородно магнитно поле позволява да се работи при по-висока магнитна индукция без насищане на магнитопровода. В Main ring се използват 774 такива магнита, с дължина 6,1 m. Във всеки блок магнитното поле расте от $B_{\text{inj}} = 0,0396 \text{ T}$ при началната енергия на протоните 8 GeV и достига до 2,22 T при максималната енергия 500 GeV.

За фокусирането на протоните към равновесната орбита в Main ring се използват 240 магнитни квадруполни лещи с дължина 2,1 m. В един квадруполен магнит полето върху оста е равно на нула, т. е. той не завърта протоните. В същото време квадруполното магнитно поле има силен напречен градиент и действа фокусиращо върху частиците. За целта квадруполите се групират по двойки, т. нар. квадруполни дублети. В един квадруполен дублет лещите са завъртяни една спрямо друга на 90° около надлъжната ос.

Съвременните ускорители за висока енергия представляват всъщност сложен комплекс от свързани един с друг ускорители.

Във Fermilab всичко започва от източника на йони. Той е от магнетронен тип и “произвежда” не протони, а отрицателни водородни йони (H^-). Това са атоми на водорода с един допълнителен електрон. На изхода на източника йоните имат енергия 18 keV и ток 50 mA.



След това снопът от H^- йони попада в първия ускорител на комплекса. Това е ускорител с пряко действие от типа на Кокрофт – Уолтън и в него те повишават своята енергия до 750 keV, преминавайки еднократно през постоянно електрично поле.

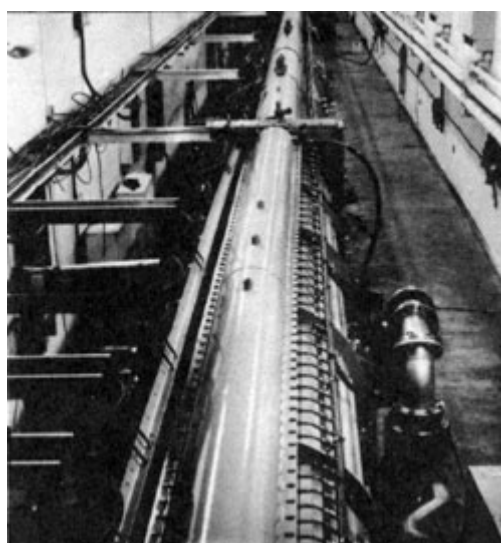
След като напуснат ускорителя на Кокрофт – Уолтън, H^- йоните навлизат в линеен резонансен ускорител. Тук те са под действието на високочестотното електромагнитно поле на девет големи цилиндрични резонатора. Всеки резонатор има

Фиг. П2. 14. Фор – инжекторният ускорител

диаметър 0,94 m и дължина 16 m. В резонаторите от външен генератор се възбуждат E_{010} стоящи електромагнитни вълни с честота $f_{\text{rf}} = 201,25 \text{ MHz}$. Вълните от тип E_{010} имат голяма компонента на електричното поле, насочена по оста на резонатора. Именно тази компонента доускорява йоните до енергия 201 MeV. Йонният ток на изхода на линейния ускорител е 35 mA.

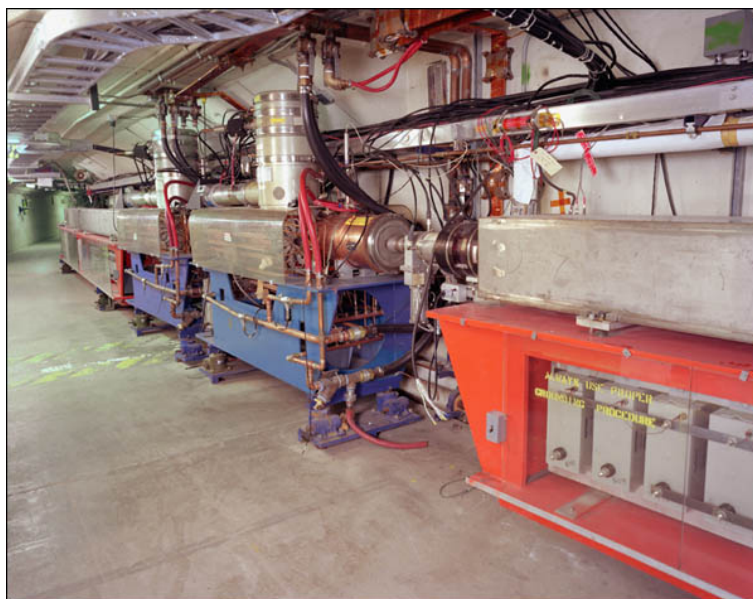
След линейния ускорител частиците попадат в първия циклически ускорител на комплекса. Това е циклически инжектор или бустер. Бустерът е малък (диаметър на пръстена 151 m) и бърз (15 импулса за 1 s) синхротрон.

Той има само 96 магнита. Първата стъпка е отрицателните водородни йони да се пропуснат през много тънко (200 μm) въглеродно фолио. Преминавайки през фолиото, ускорените до 201 MeV H⁻ йони лесно губят своите два електрона и се превръщат в протони. Протоните, които притежават положителен електричен заряд, се отклоняват от магнитите на бустера в посока, противоположна на тази, на която се отклоняват отрицателно заредените H⁻ йони. Това позволява да се раздели пространствено траекторията на инжектираните H⁻ йони от кръговата траектория на въртящите се в бустера протони. Процесът се нарича инжектиране на йоните с презареждане (charge exchange injection) и позволява натрупването на нови и нови частици в ускорителя, докато вече натрупаните протони продължават своето движение по затворената равновесна орбита.



Фиг. П2. 15. Линейният ускорител на Fermilab (фотография FNAL)

В бустера на Fermilab инжектирането продължава в течение на 20 оборота на протоните като се натрупват $3 \cdot 10^{12}$ протона. След като в бустера се натрупа достатъчно количество протони, започва тяхното ускоряване. Това става при преминаването на протоните през ускоряващото електрично поле на 18 обемни резонатора. При едно завъртане в бустера протоните увеличават своята енергия с 800 keV, за да достигнат след 1,6 μs до максималната енергия 8 GeV. За това време протоните извършват 9750 оборота и изминават 4,6 хил. km. Енергия 8 GeV е значителна енергия, осем пъти по-голяма от енергията на покой на протона. При тази енергия снопът има малко напречно сечение, тъй като трептенията, които протоните извършват около равновесната орбита, адиабатично затихват с нарастването на енергията. Освен това при висока енергия на протоните се намаляват нежелателните ефекти, свързани с кулоновото отблъскване на едноименно заредените частици на снопа. Използуването на цикличния инжектор-бустер позволява значително да се повиши интензивността на ускоряваните снопове частици.



Фиг. П2. 16. 8 GeV бустер (фотография FNAL)

В Main ring тази интензивност достига до $2 \cdot 10^{13}$ протона за импулс. Максималната енергия, до която могат да се ускоряват протоните в Main ring, достига до 500 GeV. Обикновено се работи при по-ниска енергия – 400 GeV.



Фиг. П2. 17. Main ring – [4]



Фиг. П2. 18. Тунелът на Main ring (фотография FNAL)

На 11. V. 1974 г. лабораторията приема името на видния физик Е. Ферми. Днес тя е по – известна със съкратеното си име Fermilab. Fermilab, освен една от водещите научни лаборатории в света, е и място на превъзходна архитектура и на стремеж да се съхрани природната среда в нейния първоначален вид.



Фиг. П2. 19. Символът на Fermilab – главният корпус на лабораторията (фотография FNAL)

П2. 2. 2. TEVATRON

През 1975 г. Р. Уилсън предлага във Fermilab да се построи нов ускорител, използващ последните постижения в конструирането на свърхпроводящи магнити. В новия ускорител протоните, ускорени в Main ring до енергия 120 GeV, се доускоряват до изглеждащата фантастична енергия 1000 GeV или 1 TeV.

Поради съществуващите в момента обществени настроения ускорителят е наречен Energy Saver (Съхранител на енергия), наблюдайки на обстоятелството, че свръхпроводящите магнити консумират много по-малко енергия от конвенционалните – предимно за охлаждане на свръхпроводника.

Проектът за новия ускорител е одобрен през 1977 г. от Департамента по енергия на САЩ (DOE). За неговото строителство са отпуснати 136 млн. USD. Предвид малките размери на свръхпроводящите магнити, се решава новият пръстен да се разположи точно под вече съществуващия Main ring и така да се спестят разходите за ново здание и радиационна защита.

През 1977 г. Уилсън подава оставка и за директор на Fermilab е назначен Л. Ледерман – нобелов лауреат за 1988 г. (заедно с Дж. Стайнбергер и М. Шмарц).



Строителството на новия ускорител започва през 1979 г. През август 1983 г. той подобрява световния рекорд по енергия, принадлежащ дотогава на неговия инжектор Main ring , като успява да ускори сноп протони до 512 GeV. На 11. II. 1984 г. протоните са ускорени до 800 GeV. По това време свръхпроводящият ускорител вече се нарича Energy Doubler (Удвоител на енергия), имайки предвид че максималната енергия достигната в него (1000 GeV) е точно два пъти по-голяма от максималната енергия, достигната в Main ring (500 GeV).

Фиг. П2. 20. Л. Ледерман

В наши дни се е утвърдило трето име на ускорителя – Tevatron, отразяващо обстоятелството, че това е първият ускорител, дръзнал да навлезе в една нова област на енергията – TeV-ната (10^{12} eV).

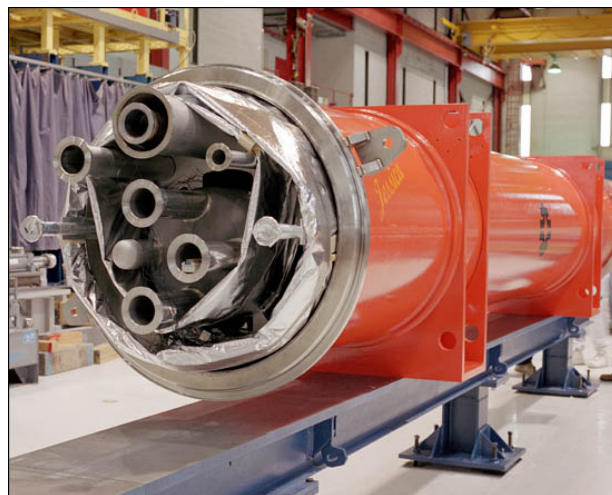
Максималната сила на магнитното поле в свръхпроводящите магнити на Tevatron е 4,4 Т, т. е. два пъти по-голяма отколкото в Main ring – пряко следствие от това, че двата ускорителя имат еднакви размери, а енергията в Tevatron е два пъти по – голяма.

Поради особеностите на свръхпроводящите магнити енергията на частиците в Tevatron и съответстващата и сила на магнитното поле нарастват много по-бавно отколкото в Main ring. Докато в Main ring енергията и магнитното поле нарастват до своята максимална стойност за 2,5 s, то в Tevatron това става за 13 s. За едно завъртане в ускорителя протоните увеличават своята енергия само с 1 MeV срещу 3,7 MeV в Main ring. Циклите на ускорителя следват през 1 min.



Фиг. П2. 21. Tevatron (фотография FNAL)

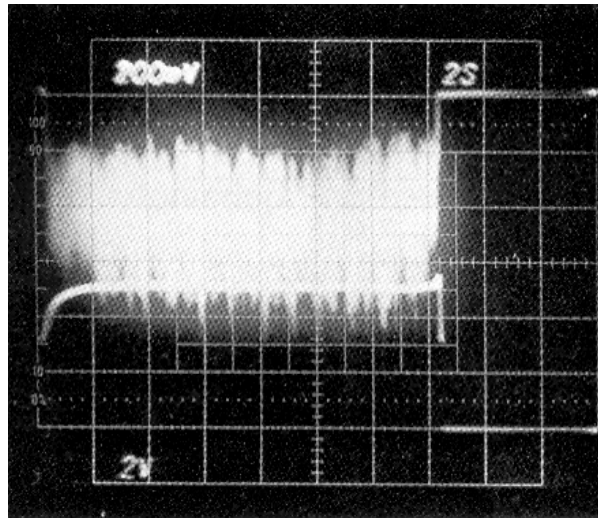
В Tevatron извеждането на протоните е разтегнато до 23 s с голяма степен на равномерност – нещо много важно за работата на експерименталното оборудване. За целта в Tevatron се възбужда резонанс в движението на частиците ($\frac{1}{2}$ резонанс). Амплитудата на техните трептения около равновесната орбита започва бавно да нараства. Онези частици, които имат достатъчно голямо отклонение от орбитата, попадат в областта на действие на извеждащите частиците електростатични и магнитни устройства и се отклоняват навън от пръстена на ускорителя. Това е т. нар. бавно резонансно извеждане на протоните. Разтегнатото до 23 s извеждане на протоните е ключово предимство на експерименталната програма на Tevatron.



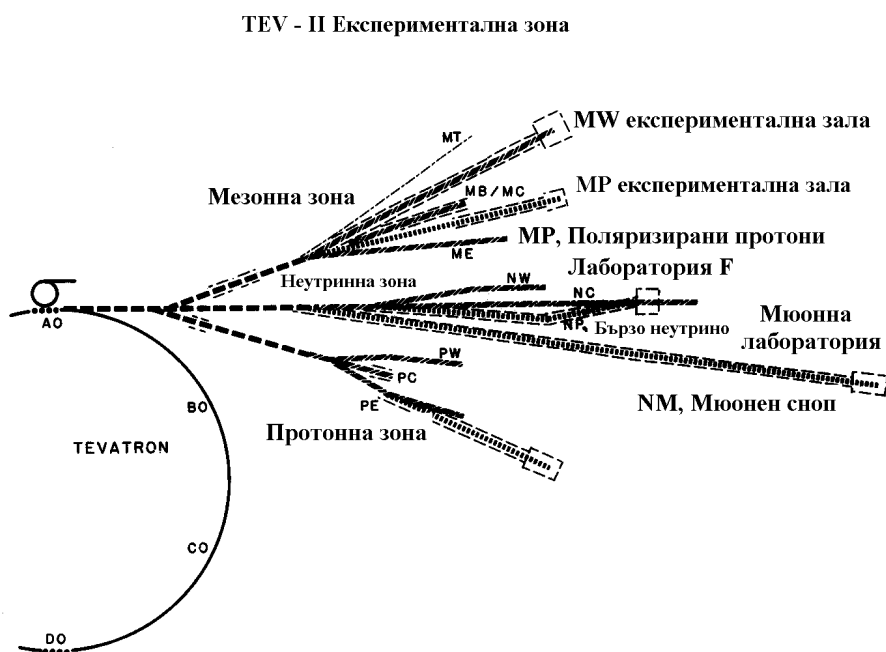
Фиг. П2. 22. Свръхпроводящият магнит на Tevatron (фотография FNAL)

На Tevatron е реализирана мощна програма от експерименти върху неподвижна мишена. Ускорителят има няколко експериментални зони –

протонна зона, мезонна зона, неутринна зона, фотонна зона. Има разгърната програма за изследвания с вторични снопове от К, п, e^- , ν , μ , γ , и др.



Фиг. П2. 23. Сигнал от бавното (23 s) извеждане на протоните от ускорителя Tevatron (фотография FNAL)



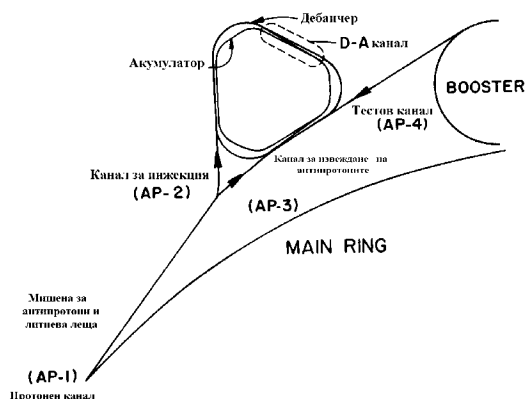
Фиг. П2. 24. Експерименталните зони на Tevatron за работа с фиксирана мишена (fixed target)

П2. 2. 3. Протон – антипротонният колайдър

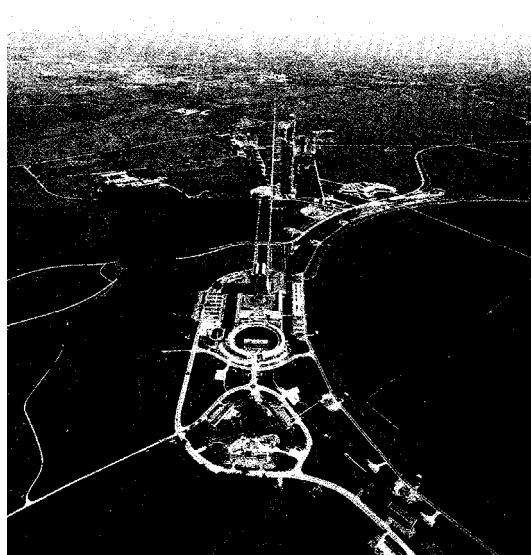
След като през 1981 г. в CERN успешно заработва първият $p\bar{p}$ колайдър ($Spp\bar{S}$) във Fermilab насочват вниманието си към възможностите на Tevatron за осъществяването на насрещни удари на високоенергетични протони и антипротони. През 1983 г. в CERN при експерименти с насрещни $p\bar{p}$ снопове с енергия 2×270 GeV са открити частиците, пренасящи слабото взаимодействие – W и Z бозоните. Това е сериозен удар върху амбициите на Fermilab за лидерство във физиката на високите енергии.

През 1983 г. започва създаването на източника на антипротони – ключов елемент на всеки протон – антипротонен колайдър. Първите насрещни удари на протонни и антипротонни снопове, ускорени в Tevatron, всеки до енергия 800 GeV, са регистрирани от детектора CDF през 1985 г.

Антипротонният източник се състои от мишенна станция и два малки ускорителни пръстена – Дебанчер и Акумулатор.

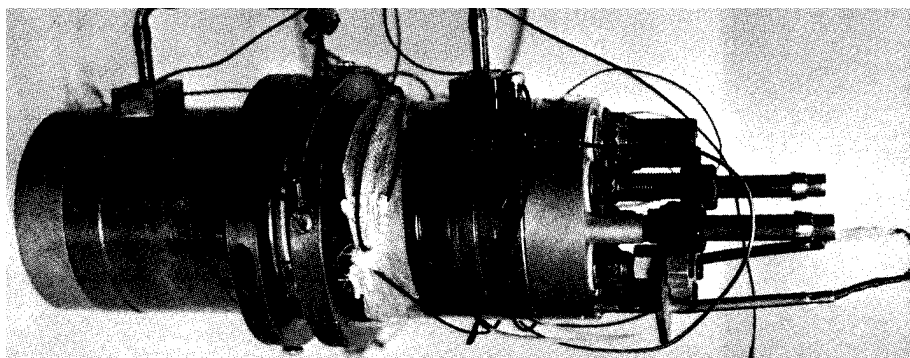


Фиг. П2. 25. Схема на източника на антипротони – [5]



Фиг. П2. 26. Фотография на източника на антипротони във Fermilab – [5]

Антипротоните се получават при облъчването на волфрамова мишена с протони, ускорени до 120 GeV в Main ring. Върху мишената протоните се фокусират в петно с диаметър 0,4 mm. Предварително протонният импулс в Main ring се свива по време до по-малко от 1 ns чрез техника на завъртане на протонните банчове. Антипротони се раждат с малка вероятност – 1 антипротон на 30 хиляди налитащи протони. Те имат голяма нееднородност по енергия с максимум около 8,9 GeV и се разлитат под различни ъгли. Онези от тях, които попадат в конус с ъгъл при върха 60 mrad, се събират и натрупват за по-нататъшно ускоряване. Това става с помощта на специално устройство – импулсна литиева леща. Литиевата леща е създадена в Новосибирския институт за ядрена физика. Това е електромагнитна леща от литиев цилиндър с диаметър 2 cm и дължина 15 cm, през който се пропуска импулсен ток със сила 600 kA! Генерира се много силно аксиално магнитно поле, което фокусира разлитащите се в широк диапазон от ъгли антипротони. Около $7 \cdot 10^7$ антипротона се събират по този начин и натрупват в първия малък ускорителен пръстен – Дебанчера.



Фиг. П2. 27. Литиева магнитна леща – [5]

Целта на Дебанчера е да се намали голямата нееднородност на антипротоните по енергия, като чрез техниката на завъртането на банchoвете $\Delta E/E$ се сведе до 0,2 %.

След това антипротоните се охлаждат, т. е. намалява се тяхното случайно (хаотично) движение и се компресират в малък обем. Напречният емитанс на антипротоните, който е равен на произведението на напречния размер x ъгловата разходимост, се намалява от $20 \pi \text{ mm.mrad}$ до $7 \pi \text{ mm.mrad}$. За целта във Fermilab се прилага разработеният в CERN метод на стохастично охлаждане на снопове частици.

Антипротоните се натрупват във втория малък ускорител – Акумулатора в течение на няколко часа. По време на натрупването те допълнително се охлаждат. На всеки 2 s в Акумулатора постъпват $8 \cdot 10^7$ антипротона с малък емитанс и с $\Delta E/E = 0,2 \%$. След 4 часа в него се натрупват $4 \cdot 10^{11}$ антипротона. За да се намалят загубите на антипротони, с помощта на йонно – гетерни вакуумни помпи в камерата на Акумулатора се поддържа свръхвисок вакуум $3 \cdot 10^{-10}$ Torr.

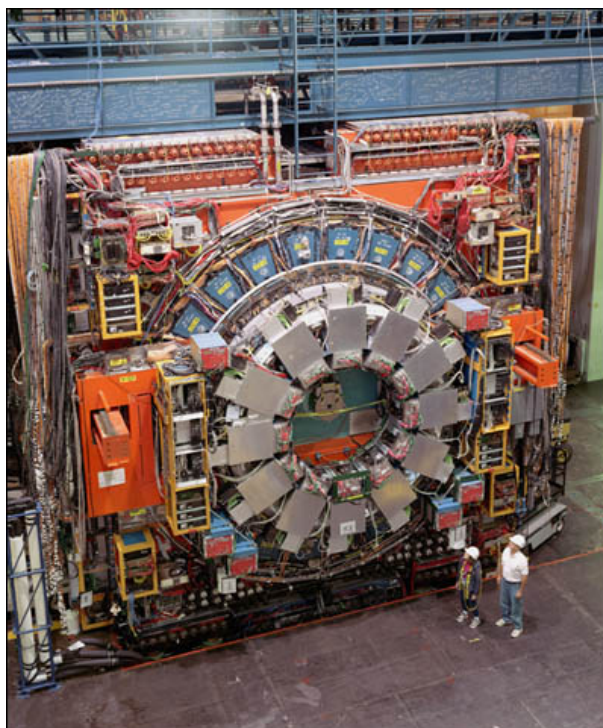
След като са “произведени” достатъчно антипротони, започва тяхното ускоряване – първо в Main ring, където те се движат в посока, обратна на протоните и се ускоряват до 120 GeV, а след това в Tevatron. В Tevatron енергията на антипротоните достига до 800 GeV. Протоните и антипротоните, които имат равни по големина, но противоположни по знак електрични заряди,

се движат в едно и също магнитно поле, но в противоположни посоки. В Tevatron се инжектират 3 протонни и 3 антипротонни банча.

Насрещните удари между протоните и антипротоните стават в 6 точки от орбитата на ускорителя. Предварително с помощта на силни квадруполни лещи сноповете се свиват до 43 μm . При всяко пресичане на сноповете има 50% вероятност един антипротон да удари един протон, т. е. имаме 50 хил. удари всяка секунда.

Достигната е светимост е $L = 10^{30} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$.

Основният детектор, регистриращ протон-антипротонните взаимодействия е CDF (Collider Detector at Fermilab). През 1967 г. в CDF са регистрирани първите W бозони (открити преди това през 1983 г. в CERN).



Фиг. П2. 28. Детекторът CDF – [6]

Fermilab играе централна роля в продължилата 17 години сага по търсенето на шестия t – кварк. Този шести кварк има електричен заряд $+2/3$ и е партньор на открития през 1977 г. от екипа на Л. Ледерман отново във Fermilab b – кварк. Причина за толкова продължителния период на търсене на t - кварка е в неговата много голяма маса – 174 GeV, т. е. почти колкото е масата на ядрото на златото.

В търсенето на шестия кварк участвуват електрон – позитронните колайдъри PETRA (2 x 19 GeV), PEP (2 x 18 GeV), TRISTAN(2 x 30 GeV), SLC (2 x 50 GeV) и LEP (2 x 50 GeV) и протон – антипротонния колайдър $Spp\bar{S}$ (2 x 270 GeV).

На 22. IV. 1984 г. колаборацията CDF във Fermilab представя в списание “Physical Review” статия от 150 страници, съдържаща доказателствата за съществуването на t – кварк. След анализ на 10^{12} p - \bar{p} удара са открити 12 събития, съдържащи t – кварк.

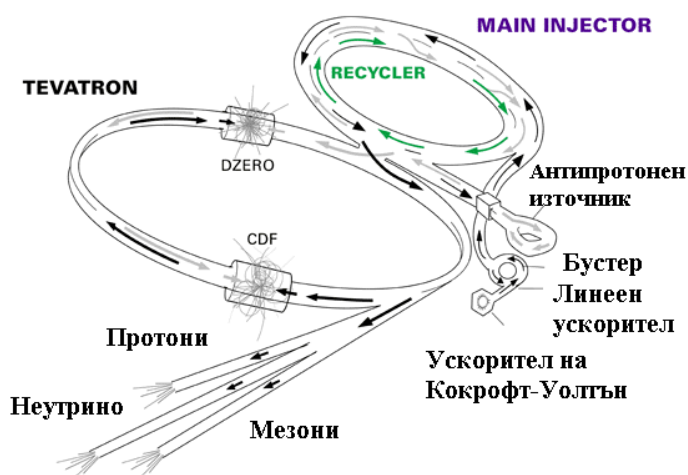
П2. 2. 4. FERMILAB-3 и MAIN INJECTOR

През 1988 г. ръководството на Fermilab решава да модернизира основно ускорителния комплекс на лабораторията. Цел на модернизацията е повишаването на светимостта на $p\bar{p}$ колайдъра от 10^{30} на повече от $5 \cdot 10^{31} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$.

Увеличаването на светимостта изисква:

- снопове с по – малко напречно сечение, т. е. намаляване на емитанса
- увеличаването на броя на протонните и антипротонните банчове, от 3 банча се преминава към 144 банча
- значително увеличаване на броя на натрупаните антипротони до $6 \cdot 10^{10}$
- усъвършенствуване на системата за охлаждане на свръхпроводящите магнити, което ще позволи да се оптимизира работата на колайдъра
- повишаване на енергията на линейния ускорител на ускорителния комплекс от 200 GeV на 400 GeV чрез подмяна на част от секциите, което позволява да се повиши интензивността.

Взема се радикалното решение Main ring да се демонтира и вместо този ускорител да се построи нов синхротрон-инжектор на протони и антипротони в Tevatron. Този нов ускорител е наречен Main injector (Главен инжектор). Решава се той да е разположен в отделен подземен тунел, разположен тангенциално на тунела на Tevatron. В него протоните и антипротоните се ускоряват до енергия 150 GeV.



Фиг. П2. 29. Новата схема на функциониране на ускорителния комплекс на Fermilab (рисунка FNAL)



Фиг. П2. 30. Новият синхротрон - инжектор на ускорителния комплекс, наречен Main injector (фотография FNAL)

Строителството на новия синхротрон-инжектор започва през 1992 г., а първият протонен сноп е ускорен през 1998 г. Новата конфигурация на ускорителния комплекс на Fermilab е наречена Fermilab-3.

В Main injector се използват електромагнити с усъвършенствувана конструкция и захранване, позволяващи на ускорителя да работи много по-бързо, т. е. с по-голяма честота на следване на импулсите – докато в старият инжектор тя е била 0,1 импулса в секунда в новият честотата на следване е 0,68 импулса в секунда.



Фиг. П2. 31. Fermilab в момента – [7]

Два импулса на Main injector се инжектират и натрупват в Tevatron за понататъшно ускоряване до 800 GeV. Интензивността се повишава 5 пъти и достига $6-8 \cdot 10^{13}$ протона за импулс.

Литература

1. R. Wilson. Starting Fermilab: Some Personal Viewpoints of a Laboratory Director. 1987 Fermilab Annual Report.
2. L. Hoddeson. The Beginning of Fermilab: Viewpoint of an Historian. 1987 Fermilab Annual Report.
3. Fermilab – 20 years on - CERN Courier, 1989, No 2, 15 – 19.
4. J.-F. Grivaz. The Run II of the Tevatron. Europhysics News, V. 34, 2004, №1, 9-11.
5. Fermilab – Going for Antiprotons - CERN Courier, 1981, № 9, 380 – 383
6. Ch. Sutton. The Long Road to the Top - CERN Courier, V. 34, 1994, № 9.
7. New Fermilab Machine Dedicated - CERN Courier, V. 39, 1999, № 6, 5.
8. Fermilab Opens New Horizons - CERN Courier, 1985, № 10, 419 – 422.



П2. 3. DESY – ГЕРМАНСКИЯТ ЦЕНТЪР ЗА ФИЗИКА НА ВИСОКИТЕ ЕНЕРГИИ

П2. 3. 1. DESY – 1

Германия, особено западната и част, бързо се възстановява след ужасната катастрофа, постигнала я след краха на нацистката диктатура и разрухата на Втората световна война. Това е страна с богати традиции в научните изследвания и в частност в изследването на атомното ядро.

Федерална Република Германия (западната част на страната) е сред страните–основателки на Европейския център за ядрени изследвания CERN край Женева. Но с постепенното възстановяване на германската индустрия и възраждането на научния живот все повече германски изследователи започват да повдигат въпроса за създаването на собствена експериментална база за изследвания в ядрената физика и във физиката на високите енергии.

През 1954 г. В. Паул пуска в действие в Бон малък електронен синхротрон. Оформя се идеята за специфично германски път в експерименталната физика на високите енергии – ускоряването на електрони до висока енергия. Доколкото CERN през първите си години се насочва към ускоряването на протони, това би дало ценно допълнение към експерименталните данни.

На първата международна конференция по ускорители в Женева през 1956 г. група германски физици се събират в дома на В. Гентнер, тогава работещ в CERN, и след продължително обсъждане достигат до идеята в Германия да се построи електронен синхротрон за енергия около 6 GeV. По щастливо стечение на обстоятелствата точно в този момент австриецът В. Йенчке се завръща от работа в САЩ, за да оглави Института по физика в Хамбург. Той е определен за лидер на новия ускорителен проект.

След преговори с кметството на Хамбург и с Федералното министерство на изследванията и технологиите на 18. XII. 1959 г. е подписан договор за строителството край Хамбург на нова научна лаборатория с електронен ускорител. Новият ускорител и новият изследователски център са наречени Deutsches Elektronen Synchrotron (DESY) и това име се е запазило и до днес, независимо че в наши дни лабораторията силно се отличава и по размери, и по качество от онова, което е била в началото.

Електронният синхротрон е построен за около четири години и на 25 . II. 1964 г. първият сноп електрони са ускорени до енергия 6 GeV – най–високата за онова време енергия на ускорени електрони. Строителството струва 110 млн. DM. DESY-1 (едно, защото по–късно ускорителят претърпява съществена модернизация и модификация) може да ускорява електрони до максимална енергия 7,5 GeV при интензивност $2,5 \cdot 10^9$ електрона за импулс. Ускорителят има диаметър на пръстена 100,84 m и е разположен в тунел с напречни размери 8,8 x 3,7 m. В синхротрона траекториите на електроните се закривяват така, че да описват затворена крива и в същото време се фокусират към тази равновесна крива от 48 магнитни блока, всеки с дължина 4,15 m. Ускоряването им става, когато преминават през електромагнитното поле на 15 обемни резонатора.



Характерна особеност на електронните синхротрони е обстоятелството, че електроните като леки заредени частици ($m_0 = 511 \text{ keV}$) при движението си в магнитното поле на ускорителя излъчват интензивно синхротронно лъчение.

В DESY-1 при максималната енергия от 7,5 GeV електроните губят при всяко завъртане в ускорителя 8,86 MeV от своята енергия за синхротронно лъчение.

Фиг. П2. 32. В. Йенчке

За да се компенсира тази загуба на енергия, в ускоряващите обемни резонатори трябва да се подава много голяма високочестотна мощност – средната мощност е 700 kW, а пиковата достига до 1 MW!

В DESY-1 импулсите ускорени електрони следват с честота 50 Hz един след друг.

Основна цел на провежданите в DESY-1 изследвания е било изучаването на структурата на нуклона. По онова време вече е било ясно, че нуклоните не са точкови частици, а имат вътрешна структура. За съжаление енергията на DESY-1 е твърде малка, за да се направи нещо съществено в тази посока. Пробивът е направен по-късно в Станфордския изследователски център SLAC, когато там започва работа линеен ускорител на електрони с енергия 20 GeV (по-късно тази енергия е повишена на 50 GeV).

DESY и SLAC се оформят като два световни научни центъра, в които се провеждат изследвания с ускорени до много висока енергия електрони. Съревнованието между тези два забележителни научно-изследователски центъра става важен стимул в развитието на физиката на частиците и дава множество първокласни научни резултати.

П2. 3. 2. DORIS

За увеличаване на “полезната” енергия на ускорителя през 1967 г. в DESY започва проектирането на електрон-позитронен колайдър. Той е наречен Doppel Ring Speicheranlage (DORIS). Строителството на колайдъра започва през 1970 г. и завършва през 1973 г.

DORIS е ускорител с насрещни снопове – колайдър. В него по затворена крива с дължина 288 m се движат един срещу друг електронни и позитронни банчове. Един банч е дълъг 60 mm, широк 6 mm и висок 2 mm. Електроните и позитроните се ускоряват предварително до 4,5 GeV в синхротрона DESY и след това в течение на 30 s се натрупват в DORIS. Натрупаният ток достига до 50 mA на сноп.

В две точки от орбитата електроните и позитроните се удрят челно. За увеличаване на вероятността за такива удари с помощта на силни фокусиращи магнити сноповете в точката на взаимодействие се свиват до 0,8 x 0,1 mm.

Колойдърът има светимост $L = 3 \cdot 10^{30} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$.



Фиг П2. 33. Електрон – позитронният колайдър DORIS – [4]

За съжаление DORIS започва работа твърде късно. През 1974 г. С. Тинг, работейки с протони, ускорени в протонния синхротрон AGS, в Брукхайвън, и Б. Рихтер в електрон – позитронния колайдър SPEAR в SLAC, откриват една нова и много важна частица – J/ψ . SPEAR е построен в SLAC малко преди DORIS и в него електрони и позитрони си взаимодействуват при енергия $4,2 \times 4,2 \text{ GeV}$. J/ψ бозона ($m_0 = 3,097 \text{ GeV}$) е векторна частица със “скрито” очарование и се състои от четвъртия s -кварк и неговия антикварк - \bar{c} в свързано 3S_1 състояние. С това ръководените от двамата учени изследователски екипи всъщност откриват четвъртия s -кварк (charm quark).

Експериментът DASP в DORIS допълва данните по J/ψ и по s -кварка.

И отново SLAC излиза напред – при експерименти в SPEAR е открита друга фундаментална частица - τ – лептонът. Изследвания, проведени в DORIS, допълват получените данни, показвайки, че τ лептонът има свойства подобни на свойствата на електрона, но е 3487 пъти по – тежък от него.

През 1977 г. във Fermilab е открита частицата Y (ипсилон). Y – бозонът ($m_0 = 4,8 \text{ GeV}$) е свързано 3S_1 състояние на петия b -кварк и съответния антикварк \bar{b} . За да може да се изследва новата частица, енергията на електрон – позитронните удари в DORIS се увеличава на повече от 11 GeV . През 1982 г. от SLAC в DORIS е преместен детектора Crystall Ball. С негова помощ в DORIS са проведени многобройни изследвания на Y и на b – кварка.

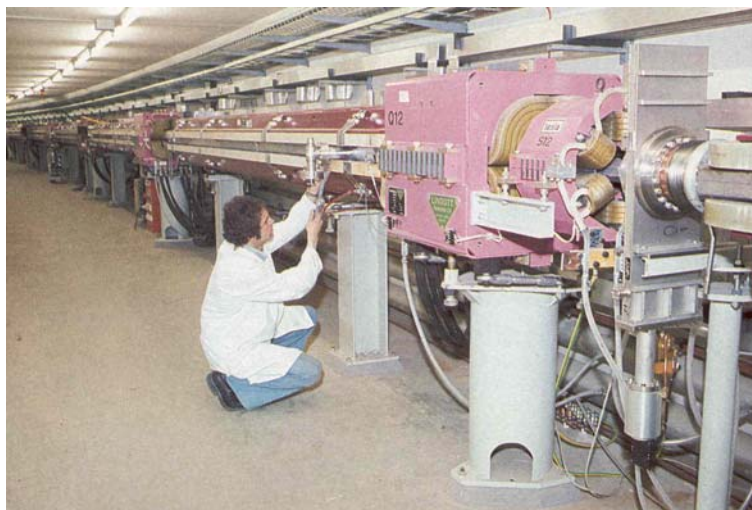
Към DORIS е изградена специализирана лаборатория за провеждането на изследвания с помощта на синхротронно лъчение, наречена HASYLAB. Стоотици екипи от различни страни и от различни области на науката и техниката идват всяка година в HASYLAB за своите изследвания.

П2. 3. 3. PETRA

През 1974 г. специалистите от DESY предлагат да се построи нов, по – голям електрон – позитронен колайдър. Той е наречен Positron Electron Tandem Ring Anlage (PETRA).

PETRA започва работа през 1978 г. Ускорителният пръстен има дължина 2,3 km и в него електроните и позитроните се ускоряват до 19 GeV.

Този път DESY успява да изпревари с цели 9 месеца своя основен конкурент в областта на електронните ускорители – SLAC. Новият електрон – позитронен колайдър PEP на SLAC започва работа по – късно от PETRA и има с 1 GeV по-ниска енергия.



Фиг. П2. 34. Електрон – позитронният колайдър PETRA – [4]

При PETRA е приложен нов подход в създаването на големи научни съоръжения. Докато построяването на ускорителя се финансира изцяло от Германия, то експерименталното оборудване, което е не по – малко сложно, мащабно и скъпо, се финансира от голям брой страни. Така изследователски колективи от тези страни получават достъп до едно наистина уникално научно съоръжение.

В PETRA електроните и позитроните се удрят насрещно в четири точки от орбитата на колайдъра. В тези точки са разположени детекторите PLUTO, JADE, MARK-J и TASSO.

Не закъсняват и резултатите. През 1979 г. експериментите TASSO и MARK-J регистрират образуването при аниhilацията на електрони и позитрони на *струи от частици (jets)*. Регистрирани са три струи – две от тях се свързват със създаването при аниhilацията на двойки кварк – антикварк, а третата струя се свързва с глюоните – частиците пренасящи междукварковите взаимодействия.

Въпреки че чрез непрекъснатата модернизация на оборудването енергията на колайдъра се повишава от 38 GeV до 47 GeV, тя все пак остава недостатъчна за регистриране на шестия t – кварк ($m_0 = 174$ GeV).

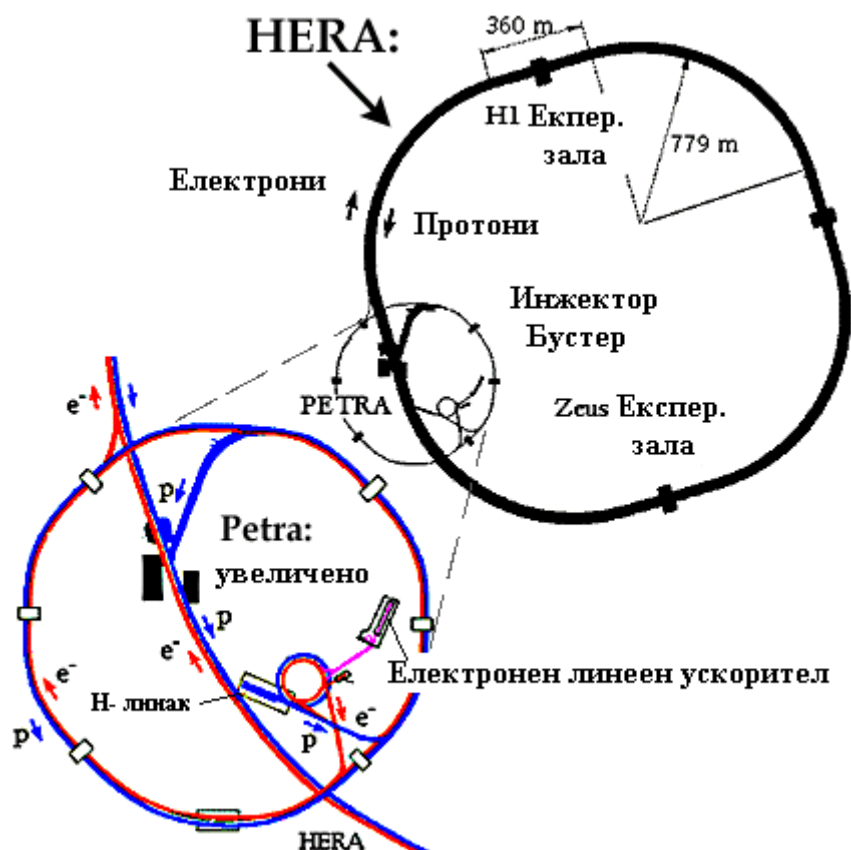
П2. 3. 4. HERA

С течение на годините възможностите на PETRA са надминати от тези на електрон – позитронните колайдъри: TRISTAN (2 x 30 GeV) в KEK, Япония ; SLC (2 x 50 GeV) в SLAC, Станфорд, САЩ; LEP - 2 (2 x 100 GeV) в CERN.

Обсъждайки бъдещето развитие на изследователския център, специалистите от DESY излизат със смело предложение – да се построи електрон – протонен,

т. е. лептон – адронен колайдър. Новата машина е наречена Hadron Electron Ring Anlage (HERA). В нея се сблъскват протони, ускорени до енергия 820 GeV, с електрони, ускорени до енергия 30 GeV. Това е първият и единствен засега колайдър от този тип.

Насрещните удари на протони и електрони, притежаващи висока енергия, позволяват изучаването на кварковата структура на нуклоните с голяма разделителна способност, както и изследването на свойствата на слабото взаимодействие.



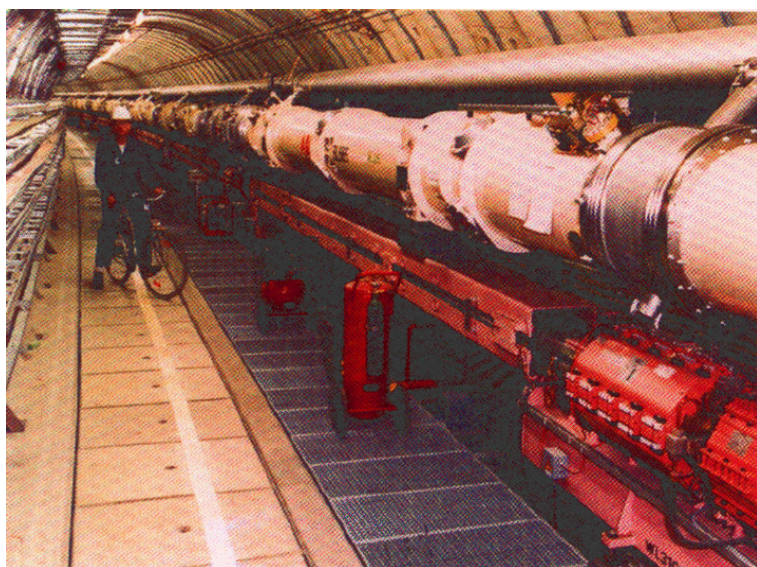
Фиг. П2. 35. Електрон – протонният колайдър HERA и веригата от свързани ускорители – [4]

HERA се състои от два ускорителни пръстена – единият за ускоряване на протоните и другият за ускоряване на електроните. Периметърът на тези пръстени е 6336 m. Те са разположени един над друг в общ подземен тунел.

Електронните банчове с дължина 17 mm, ширина 2 mm и височина 0,5 mm се сблъскват челно с протонните банчове с дължина 170 mm, ширина 1mm и височина 1 mm в четири точки от орбитата. Около тези точки на дълбочина 20 m под земята са разположени експерименталните зони с детекторите.

Протонният пръстен е изграден от свръхпроводящи магнити. Общо има 416 диполни и 280 квадруполни магнита. Свръхпроводящите магнити създават много по-силно магнитно поле при много по-ниски експлоатационни разходи. Максималната сила на магнитното поле на HERA е 4,7 T. Целият магнит - намотките от свръхпроводник NbTi и железният магнитопровод - са поместени в криостат, който се охлажда с течен хелий до температура 4,5 K. В DESY са

построени три завода (рефрижератора) за втечняването на хелий. Течният хелий се подава по две вакуумно изолирани линии с дължина 3,5 km по дължината на ускорителния пръстен. Общата мощност на рефрижераторите е 6 MW. Тя все пак е много по-малка от мощността, която консумират електромагнитите, работещи при нормална температура. Поради големите загуби на енергия за загряване на намотките (топлинни загуби), консумираната мощност в тези електромагнити е многократно по-голяма – 52 MW в p - p̄ колайдъра Sp̄pS в CERN.



Фиг. П2. 36. Електронният и протонният пръстени на HERA – [4]

Електроните от своя страна са трудни за ускоряване до висока енергия в циклични ускорители. При преминаването си през завъртащите (отклоняващите) магнити на цикличния ускорител те губят много енергия за синхротронно лъчение. По тази причина енергията на електронния пръстен на HERA е ограничена до 30 GeV. За покриване на загубите за синхротронно лъчение в ускоряващите резонатори на електронния пръстен на HERA се подава 13 MW ! електрическа мощност. При 30 GeV енергия максимумът на излъчената електромагнитна енергия попада в областта на твърдото рентгеново лъчение. Това проникващо лъчение е сериозен проблем за работата на електрониката и всички електронни блокове са надеждно защитени с бетонна защита.

Загубата на енергия от електроните за синхротронно лъчение има и положителна страна. Тя води до бързото затихване на напречните и надлъжните трептения на електроните около равновесната траектория. Електронните банчове стават по-тесни и по-къси, и това улеснява натрупването на голям брой електрони. В електронния пръстен се ускоряват 210 електронни банча с дължина 17 mm. Електронният ток достига 58 mA.

Електронният пръстен на HERA е изграден с конвенционални магнити. Електроните са 1840 пъти по-леки от протоните и много по-лесно се отклоняват и фокусират. Максималната сила на магнитното поле в електронния пръстен на HERA е 0,278 T.

Строителството на HERA започва на 6. IV. 1984 г. Извършва се основна реконструкция и модернизация на всички съществуващи ускорители на DESY и се строят нови ускорители.

Нека проследим дългия път, който изминават протоните и електроните от момента на тяхното създаване до момента, в който те се сблъскват с максималните си енергии 820 GeV и 30 GeV респективно.

А. Път на протоните

В началото на пътя на протоните стои йонен източник генериращ отрицателни водородни йони (H^-). Това са водородни атоми с един допълнителен електрон. И двата орбитални електрона са слабо свързани с ядрото, т. е. с протона. H^- йоните се раждат във водородната плазма на йонния източник. Ако в тази плазма се добавят малко Cs атоми, то се образуват отрицателни водородни йони в достатъчно количество. Тези йони се извличат от плазмата, фокусират се в сноп и се ускоряват до енергия 18 keV. Така че енергията, от която започва пътят на протоните, е само 18 keV, за да достигне тя, след преминаването през цяла поредица от ускорители, до заветните 820 GeV.

Първият ускорител от веригата ускорители е линеен RFQ ускорител. Той има дължина само 1,2 m. В него протоните се ускоряват до следващото стъпало на енергията – 750 keV.

Линейният RFQ ускорител е ускорител от нов тип, т. нар. линеен ускорител с пространствено еднородно квадруполно фокусиране. Той е известен още като RFQ линеен ускорител. Съкращението RFQ означава Radio Frequency Quadrupole. Предложен е през 1969 г. от Капчинский, Владимирский и Тепляков в Русия, но е реализиран едва през 80-те години на миналия век.

Подобно на линейния ускорител на Алварец, RFQ използва един цилиндричен резонатор, в който се възбуждат електромагнитни вълни с висока честота ($f_{rf} \sim 200$ MHz). В резонатора обаче са разположени през 90° четири надлъжно ориентирани метални електрода. Профилът на тези електроди не е права линия, а синусоида. Линейният RFQ ускорител групира ускоряваните йони в банчове, които са синхронизирани с ускоряващото електромагнитно поле на резонатора. Едновременно той ускорява тези банчове и ги фокусира към оста. Това е ускорител за ниска енергия на частиците – до около 1 MeV. Основното достоинство на линейния RFQ ускорител е, че ефективно ускорява и фокусира йонни снопове с много висока интензивност (~ 100 mA). В същото време е много компактен (дължина ~ 1 m) и относително евтин.

След линейния RFQ ускорител отрицателните водородни йони попадат в един “класически” линеен ускорител от типа на ускорителя на Алварец. Той е наречен LINAC-3. Съставен е от три цилиндрични ускоряващи резонатора с обща дължина 34 m и с диаметър 1 m. В LINAC-3 протоните се изкачват на следващото стъпало по енергия – 50 MeV.

Идва ред на първия цикличен протонен ускорител – DESY-3. За да се инжектират в него, отрицателните водородни йони се пропускат през тънко 200 μ m въглеродно фолио. Поради голямата скорост, с която преминават през фолиото, йоните губят и двата си орбитални електрона и се редуцират до положително заредени водородни ядра – протони.



Фиг. П2. 37. Протонният синхротрон DESY – 3 – [4]

Протоните се отклоняват от магнитите на DESY-3 по посока на равновесната кръгова орбита на ускорителя. Този тип инжектиране е известно като инжектиране на йоните с презареждане (charge exchange injection). То позволява към вече циркулиращите в ускорителя частици да се добавят нови частици и този процес да продължава достатъчно дълго време, така че да се натрупа интензивен сноп. В DORIS-3 инжектирането продължава 30 ms, за което време протоните се завъртат 10 пъти около ускорителя.

DESY-3 има диаметър на пръстена 100,84 m и е изграден от магнитите на стария синхротрон DESY-1. В този ускорител енергията на протоните достига до 7,5 GeV.

От DESY-3 протоните попадат в следващия цикличен ускорител PETRA-2. Тук енергията на протоните достига до 40 GeV. При тази енергия протоните се инжектират в главния ускорител на комплекса, електрон-протонния колайдър HERA.

Б. Път на електроните

Електроните започват своя път в електронната пушка. Следва линеен ускорител на електрони, наречен LINAC-1. В LINAC-1 електроните се ускоряват от бягаща електромагнитна вълна до енергия 450 MeV.

Следва първият цикличен ускорител на електрони – DESY-2. В него електроните се доускоряват до 7 GeV. Този ускорител е изграден от 48 завъртащи (отклоняващи) и 48 квадруполни (фокусиращи) магнита. Това са конвенционални магнити с максимална сила на полето 0,984 T. DESY-2 има диаметър на пръстена 93,2 m и е разположен от вътрешна страна на пръстена на ускорителя DESY-3, във същия тунел.

От DESY-2 електроните попадат в следващия цикличен ускорител на комплекса – PETRA-2. Тук те се ускоряват до енергия 12 GeV.



Фиг. П2. 38. Електронният синхротрон DESY – 2 – [4]

При тази енергия електроните се инжектират в основния пръстен HERA.
Електрон – протонният колайдър HERA започва работа през 1990 г.
Светимостта на колайдъра е $L = 1,6 \cdot 10^{31} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$.

Литература

1. A Quarter Century of DESY - CERN Courier, 1984, № 10, 425 – 429.
2. The Changing Face of DESY - CERN Courier, 1983, № 7, 254 – 257.
3. DESY Journal – Special Issue “HERA”, 1990, № 3
4. DESY in Pictures. DESY, Hamburg, 1988.
5. A. Warner. DESY Looks to the Future - CERN Courier, V. 43, 2003, № 9, 21-22.



П2. 4. РАЗВИТИЕ НА ФИЗИКАТА И ТЕХНИКАТА НА УСКОРТЕЛИТЕ НА ЗАРЕДЕНИ ЧАСТИЦИ В РУСИЯ

П2. 4. 1. Първи разработки – 30-те години на ХХ в.

През 20-те години на ХХ в. център на физическите изследвания в бившия СССР е Ленинградският физико-технически институт (ЛФТИ), създаден през 1918 г. от А. Ф. Йоффе. В ЛФТИ се работи по редица от най-перспективните направления във физиката за онова време. Научният колектив, макар и твърде млад (повечето сътрудници били на възраст под 30 г.), включва имена, които по-късно получават едно наистина световно признание: Н. Н. Семьонов, И. К. Кикоин, Я. Г. Дорфман, А. И. Лейпунски, К. Д. Синелников, А. К. Валтер, Л. А. Арцимович, А. П. Александров, А. И. Алиханов, Ю. Б. Харитон, Д. А. Рожански, Г. М. Франк, Я. И. Френкел, Л. Д. Ландау, М. И. Бронщайн и мн. др. Под ръководството на Йоффе в ЛФТИ е създаден уникален климат на доброжелателност, колегиалност и безгранична любов към физиката.

Научни групи от ЛФТИ стават ядрата на възникналите по-късно физически институти в Свердловск (сега Екатеринбург), Харков (сега в Украйна) и Томск.

Именно в Харковския физико-технически институт през 1932 г. е създаден първият ускорител на заредени частици в СССР - високоволтов ускорител на протони до енергия 500 keV. С негова помощ К. Д. Синелников, А. К. Валтер и А. И. Лейпунски успяват да повторят разцепването на ядрата на лития (${}^7\text{Li} (p, \alpha) {}^4\text{He}$), само два месеца след Кокрофт и Уолтън в Кавендишката лаборатория.

По-късно А. К. Валтер се насочва към разработването на електростатичен ускорител с генератор на Ван де Грааф, като източник на високо напрежение. През 1938 г. в Харков е пуснат в действие електростатичен ускорител, ускоряващ протони до енергия 3,6 MeV.

Първият малък експериментален циклотрон е построен в Радиевия институт в Ленинград през 1933 г. (две години след Лоурънс в Бъркли). Той ускорява протони само до 530 keV. В Радиевия институт започва строителството и на по-голям циклотрон с диаметър на полюсите на магнита 1 m. Но тази разработка се сблъсква с разнообразни трудности, свързани със създаването на магнитното поле и поддържането на висок вакуум в камерата на циклотрона.

И тук на сцената се появява И. В. Курчатов.

По това време Курчатов работи в ЛФТИ. Отначало той се занимава с експериментални изследвания във физиката на диелектриците. В началото на 30-те години на миналия век обаче, вдъхновен от резултатите на Ф. Жолио-Кюри и Е. Ферми, Курчатов се обръща към ядрената физика. При облъчване на ядрата на бром с неутрони той открива през 1935 г. явлението *ядрена изомерия*. Теоретичното обяснение на това явление е дадено една година по-късно от Вайцекер и се състои в наличието на възбудени нетастибилни състояния в ядрата. Първоначално като източник на неутрони Курчатов използва радиоактивен радиево - берилиев източник. Но интензивността на неутроните от радиоактивните източници е ниска. По това време Л. Алварец започва да използва за източник на неутрони в Бъркли циклотрон и така успява да получи на три порядъка по-големи неутронни потоци.



Научавайки за резултатите на Алварец, Курчатов решава да опита новата методика и се обръща към колегите си в Радиевия институт. Но строящият се там циклотрон още не работи. И тук се проявяват вродените качества на Курчатов на ръководител. Без съмнение той е физик - експериментатор от висока класа. Получените от него резултати по сегнетоелектриците и по ядрената изомерия са важни научни приноси. Но истинската стихия

Фиг. П2. 39. И. В. Курчатов

на Курчатов е организацията на научните изследвания. Веднъж захванал се за някаква задача, той задължително я довежда до успешен край. Не случайно още в онези години колегите му го наричат “генерала”. При решаването на някакъв научен проблем Курчатов има качеството не само да се запалва сам, но и да ентузиазира и своите сътрудници.

Курчатов, заедно със своя аспирант М. Г. Мещеряков, с току-що завърналият се от военна служба В. П. Джелепов и няколко други сътрудници се захваща с пускането в действие на циклотрона. След преодоляването на всевъзможни технически препятствия през 1936 г. циклотронът заработва. Той ускорява протони до енергия 6 MeV и бил първият работещ циклотрон в Европа.

По-късно И. В. Курчатов, А. И. Алиханов, Л. М. Неменов, В. П. Джелепов, Д. В. Ефремов започват строителството в ЛФТИ на нов още по-голям циклотрон. Началото на войната осуетява това начинание и този циклотрон заработва едва след нейното завършване.

П2. 4. 2. Ускорителите и създаването на атомната бомба

Огромният интерес, който предизвиква откриването на делението на ядрата на урана, и перспективата за осъществяването на верижна ядрена реакция не отминава и физиците в СССР. През 1939 г. Ю. Б. Харитон и Я. Б. Зелдович оценяват теоретично възможността за осъществяването на верижна реакция в уран с използването на бързи и на топлинни неутрони. През 1940 г. Г. Н. Фльоров и К. А. Петржак откриват спонтанното деление на урана.

Скоро, подобно на САЩ, Великобритания и Германия, и СССР засекретява (от края на 1940 г.) всички изследвания, свързани с делението на урана, предвид на очертаващото се военно приложение.

Историята на създаването на съветското атомно оръжие е добре известна и многократно описвана. Известна е и ролята на разузнаването в тази сага.

Тук само ще споменем, че през 1943 г. Курчатов бива назначен за ръководител на научната програма по създаването на атомна, или както тогава се е наричала – уранова бомба. Изследванията първоначално се провеждат в новосъздадения в Москва научен институт, т. нар. Лаборатория №2 на Академията на науките (сега Руски научен център “И. В. Курчатов”).

Една от първите стъпки на Курчатов е създаването на малък циклотрон, с диаметър на полюсите 73 cm. Той ускорява деутрони до енергия 4 MeV и се използва като интензивен източник на неутрони. Този циклотрон е създаден в рекордно кратки срокове под ръководството на Л. М. Неменов и започва работа

през 1944 г. На него с неутрони се облъчват уранови образци за получаването на плутоний. Макар че с помощта на циклотрон се получават малки количества плутоний, този плутоний е изключително ценен за измерването на ядрените сечения и на химическите му свойства.

След освобождаването на Харков от немците по “атомния проблем” започват да работят и Ван де Грааф ускорителите на Украинския физико – технически институт. Създава се Лаборатория №1 на АН СССР под ръководството на К. Д. Синелников.

Както е известно, първият ядрен реактор в СССР е пуснат в действие в края на 1946 г., а на 29. VIII. 1949 г. се провежда и изпитанието на първата съветска атомна бомба.

По това време всички налични сили на съветската наука – от най-възрастното поколение до най-младите, а до голяма степен и целият промишлен потенциал на страната, са мобилизирани за създаването на атомното оръжие и за догонването на постиженията на САЩ в тази област.

П2. 4. 3. Принципът на автофазирането и първите синхротрони и синхроциклотрони – В. И. Векслер

Един от центровете на съветската физика през 40-те години на миналия век става Физическият институт на Академията на науките (ФИАН) в Москва. Негов директор е С. И. Вавилов. Вавилов ръководи и лабораторията по физика на атомното ядро. През 1940 г. той създава т. нар. “циклотронна бригада” със задачата да се построи във ФИАН голям циклотрон с диаметър на полюсите от няколко метра.

Наред с другите сътрудници в циклотронната бригада е включен и В. И. Векслер. По това време той се занимава с изследване на космичните лъчи и вече е получил ред важни резултати по време на експедициите в Памир. Навлизайки в техниката на ускоряването на заредени частици, Векслер бързо осъзнава големите технически трудности стоящи пред построяването на циклотрони за висока енергия. Това го подтиква да започне търсения на по-ефективни методи за ускоряване на заредени частици. В резултат на тези си търсения Векслер достига през февруари 1944 г. до формулирането на своя знаменит “принцип на автофазирането”. Всички резонансни ускорители за висока енергия – синхроциклотрони, синхротрони и линейни ускорители, работят в съответствие с този принцип.

Поради особеностите на военното време статиите на Векслер върху принципа на автофазирането остават незабелязани в чужбина и през 1945 г. принципът на автофазирането е преоткрит независимо от американеца Е. Мак-Милън.

В СССР работите на Векслер първоначално са посрещнати скептично. За да потвърди експериментално теоретичните изводи, той започва строителството във ФИАН на малък електронен синхротрон. Първоначално колективът включва само експериментатора Б. Л. Белоусов и теоретика М. С. Рабинович (впоследствие с важен принос за създаването на теорията на цикличните ускорители). По-късно се създава и специална синхротронна лаборатория с щат от около тридесет човека.

Пред строителството на синхротрона изникват разнообразни технически препятствия. В допълнение, в следвоенна Русия често липсват дори най-необходимите прибори и съоръжения.

През 1946 г. се получава съобщение от Англия, че Гоуърд и Барнес са успели за първи път в света да ускорят електрони до енергия 8 MeV, използвайки синхротронния принцип на ускорение. За целта те преоборудват един съществуващ малък бетатрон в електронен синхротрон.



От една страна, принципът на автофазираето получава своето експериментално потвърждение, от друга обаче, възможността в СССР да бъде създаден първият работещ синхротрон е пропусната.

Знае се колко държала социалистическата пропаганда на тези “първенства” във времената на студената война. Векслер обаче далеч не бил конюнктурен учен. Ентузиазизиран изследовател, Векслер създава около себе си спокойна и делова обстановка. На всеки сътрудник

Фиг. П2. 40. В. И. Векслер

се предоставяла максимална самостоятелност и възможност за инициатива. Той проявявал интерес към ежедневните резултати, получени буквално от всеки сътрудник. Скоро Векслер става един от центровете на научния живот във ФИАН.

Първите опити “да се оживи” строящият се синхротрон започват в края на 1946 г. За съжаление те претърпяват неуспех. Електроните правели един оборот в машината, но така и не се ускорявали до висока енергия. Тогава Векслер взема радикалното решение, напълно да се откаже от малката машина, и без да губи време, да пристъпи към строителството на нов електронен синхротрон, но с големи размери. При това всички системи на новия ускорител били създадени в съответствие с натрупания “горчив” опит.

Новият синхротрон е построен в кратки срокове. На 28. XII. 1947 г. още при първото му включване на него е получен сноп ускорени до енергия 30 MeV електрони. Най-последен успех!

Първото физическо изследване, проведено на новия ускорител, е по измерването на формата на спектъра на спирачното лъчение. За целта ускорените електрони се насочват към мишена от тежки елементи. Тези изследвания потвърждават теоретичната крива на Бете и Хайтлер.

По-късно електронният синхротрон започва да се използва за изучаването на фотоядрените реакции.

През 1949 г. във ФИАН е построен и електронен синхротрон за 280 MeV. Важен принос за създаването на електронните синхротрони на ФИАН има и П. А. Черенков.

Откриването от В. И. Векслер на принципа на автофазираето и създаването в чужбина и в СССР на първите ускорители от новия тип не убягва от вниманието на И. В. Курчатов и на ръководителите на атомните изследвания (Л. П. Берия, Б. Л. Ванников и други). Но за нуждите на създаването на атомно оръжие били необходими ускорители на по-тежки частици (протони) до високи енергии. Създаването на протонен синхротрон за висока енергия обаче е свързано със сериозни технически предизвикателства. В този тип ускорители честотата на ускоряващото напрежение не е постоянна величина, както в

електронните синхротрони, а трябва да нараства синхронно с енергията на протоните, като диапазонът на изменение е много голям.

От друга страна, принципът на автофазирането показва и друг път за ускоряването на протони до относително висока енергия (500 – 1000 MeV) – създаването на циклотрон, в който честотата на напрежението между дуантите не е постоянна, а се променя в процеса на ускоряване.

Както е известно, в класическия циклотрон максималната енергия е ограничена до 15 – 20 MeV поради релативисткото нарастване на масата на ускоряваните частици с енергията. С нарастването на енергията на ускоряваните частици намалява честотата на въртене на ускоряваните частици и синхронът между орбиталното движение и промените в напрежението между дуантите се нарушава. Ако обаче честотата на ускоряващото напрежение между дуантите намалява в съответствие с енергията, то този синхрон може да се поддържа и при относително високи енергии на частиците. Циклотронът, работещ по този принцип, е наречен синхроциклотрон.

Цената, която трябва да се заплати, е драстичното намаляване на интензивността на ускоряваните снопове частици. В един циклотрон частиците се захващат в режим на ускоряване при всеки полупериод на ускоряващото напрежение ($f_{\text{гг}} \sim 20 \text{ MHz}$) така, че цялата спирална траектория е запълнена от групи ускорявани частици. В синхроциклотроните променящата се с времето честота на ускоряващото напрежение остава в резонанс само с една неголяма група частици. Резултатът е значително намаляване на интензивността.

В края на 40-те и началото на 50-те години на миналия век в Европа и САЩ започва бурен процес на преоборудването на вече съществуващи циклотрони и превръщането им в синхроциклотрони с цел да се повиши максималната енергия на частиците.

В СССР, в рамките на разработките по създаването на атомно оръжие се взема решение за построяването на голям синхроциклотрон за ускоряването на протони до енергия 680 MeV т.нар. установка “М”.

Създава се т. нар. Хидротехническа лаборатория на АН СССР, преименувана по-късно в Институт за ядрени проблеми. “Компетентните органи” избират за място на новия ускорител село Ново-Иванково, намиращо се на 150 km северно от Москва, на брега на Волга и в близост до прочутия канал, носещ името на Й. В. Сталин и свързващ Москва река с Волга.

През 1947 г. в гъстата борова гора започва строителството на новия научен център. Едновременно в близост до площадката на ускорителя се създава и напълно нов научен град – знаменитият град Дубна – фиг. П2. 41.

За първи директор на института е назначен М. Г. Мещеряков, един от създателите на първите съветски циклотрони. Голям принос в построяването на синхроциклотрона имат В. П. Джелепов и В. П. Дмитриевски.



Фиг. П2. 41. Дубна – дирекцията на Обединеният институт за ядрени изследвания – [7]



Фиг. П2. 42. В. П. Джелепов и В. П. Дмитриевски – едни от създателите на първите руски циклотрони и на синхроциклотрона в Дубна.

Първият сноп ускорени до 680 MeV протони е получен през 1949 г. – фиг. П2. 43. Дубненският синхроциклотрон има сила на магнитното поле 1,66 Т и амплитуда на ускоряващото напрежение между дуантите 15 kV. Получен е вътрешен ток на снопа 4 μ A.

По това време в СССР се оформя определена специализация в създаването на ускорително оборудване. Така например в Москва под ръководството на А. Л. Минц е създаден Радиотехническият институт, разработващ радиотехническите и електронните системи на ускорителите.



Фиг. П2. 43. Синхроциклотронът за 680 MeV в Лабораторията за ядрени проблеми в Дубна – [7]

В Ленинград е създаден гигантският по своите технологични възможности НИИ за електрофизическа апаратура, в който са проектирани и създадени магнитните системи на всички съветски ускорители. Негови ръководители са Д. В. Ефремов и Е. Г. Комар.

По-късно в Гатчина, близо да Ленинград, е създаден и най-големият в света синхроциклотрон – фиг. П2. 44. Той ускорява протони до енергия 1 GeV. Синхроциклотронът в Гатчина има диаметър на полюсите 6,85 m. Електромагнитът със своите гигантски цилиндрични полюси тежи 7800 t и в него се получава максимална сила на магнитното поле 1,9 T. Честотата на напрежението между дуантите намалява в процеса на ускоряване от 29,88 MHz до 13,18 MHz.



Фиг. П2. 44. Синхроциклотронът за 1 GeV в Института за ядрени изследвания в Гатчина, край Санкт – Петербург (фотография ИЯФ, Гатчина)

П2. 4. 4. В надпревара за световното лидерство

Повечето от нас помнят мирното (да не говорим за военното) съревнование между двете политически системи, характеризиращи света в годините след Втората световна война – “социалистическият лагер” и “капиталистическият свят”. Една от сферите на това съревнование стават физиката на атомното ядро и физиката на елементарните частици. Доколкото основните инструменти за провеждането на изследванията в тези две научни области са ускорителите, започва надпревара кой ще построи ускорител за по-висока енергия. В тази надпревара с годините се оформят и други линии на съперничество: Европа – САЩ и Япония – САЩ.

С напредването на разработването в САЩ на първите два големи протонни синхротрона : Космотрона в Брукхайвън за 3 GeV и Беватрона в Бъркли за 6 GeV, в СССР, се взема решение за построяването на още по-голям протонен синхротрон, с енергия на протоните 10 GeV.

Проектирането на новия ускорител се разгръща във ФИАН. Основни фигури в това проектиране са М. С. Рабинович, А. А. Коломенски, В. А. Петухов и др.

За проверка на работата на различните системи на бъдещия ускорител във ФИАН е построен действащ модел, който ускорява протони до 180 MeV (т. нар. установка МКМ). Установката МКМ е пусната в действие през 1953 г. По-късно този модел на големия ускорител е преобразуван в електронен синхротрон за 680 MeV. Тази машина работи успешно и в наши дни.

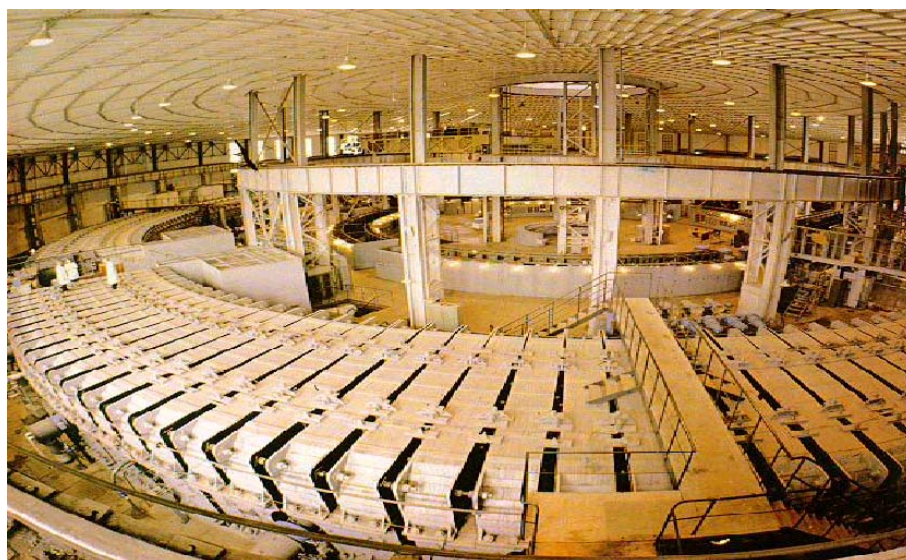
Решава се новият ускорител да се построи отново в Дубна, но на нова площадка. За ръководител на строителството и на пускането в действие на ускорителя е назначен В. И. Векслер. Около него се събира колектив от млади и ентузиазирани физици и инженери.

Векслер с голямо внимание се отнасял към младите учени. При обсъжданията с тях той се държи като с равни. Известно е, че Векслер е роден генератор на идеи. Да си припомним само създадените от него нови типове ускорители: синхроциклотрон, синхротрон, микротрон, колективни ускорители. Векслер притежава огромна работоспособност – работата по новия ускорител продължава до късно през нощта.

Тук трябва да се напомни, че буквално всичко се създава за първи път, при това в една напълно съсипана от войната страна.

Един ускорител е сложно съоръжение, обхващащо множество системи: вакуумна система, мощни електротехнически и радиотехнически системи, разнообразни електронни системи за диагностика и управление, геодезия и мн. др. Необходим бил и немалък кураж; съветският учен нямал право на грешки и винаги трябвало да бъде пред другите учени. От друга страна за метода на “проби и грешки” просто нямало нито ресурси, нито време.

Дори на чертежи ускорителят изглеждал внушително, но действителността направо поразява със своите мащаби и сложност – фиг. П2. 45.



Фиг. П2. 45. Синхрофазотронът за 10 GeV в Дубна – [8]

Ето някои основни параметри на ускорителя:

Енергия	10 GeV
диаметър на полюсите	72 m
сечение на вакуумната камера	200 x 40 cm
Тегло на магнита	36 000 t
сила на магнитното поле	0,023 – 1,26 T
честота на ускоряващото напрежение	0,3 – 2,88 MHz
ток в намотките на магнита	12 800 A
продължителност на ускорителния цикъл	9 s
Интензивност	$4 \cdot 10^{12}$ протона за импулс

В Синхрофазотрона честотата на ускоряващото напрежение трябва да се изменя 10 – 12 пъти в строг синхрон с нарастването на магнитното поле.

В магнитното поле се натрупва огромна енергия.

За хранването на електромагнита се използват четири синхронни машини, всяка с гигантски маховик с тегло от 55 t. През управляващи игнитрони те са свързани с намотките на електромагнита. При ускоряването на протоните магнитното поле нараства във времето и синхронните машини работят като генератори. В спадащата част на магнитното поле синхронните машини се превключват чрез инвертиране на игнитроните в режим на електромотори и преобразуват натрупаната в магнитното поле енергия в механична енергия на въртене на маховиците. Този начин на хранване на електромагнита икономисва огромна енергия и предотвратява срив на електрическата мрежа от огромната импулсна мощност. Средната мощност на хранването на електромагнита е 6 MW.

Новият ускорител е наречен Синхрофазотрон. Първият сноп ускорени до 10 GeV протони е получен през 1957 г. При пускането на ускорителя в действие

важен принос имат: Л. П. Зиновиев, В. П. Саранцев, С. И. Есин, К. П. Мизников, Н. Н. Рубин, В. И. Котов, О. И. Ярковой и др.

Една година преди това (1956) на базата на научните съоръжения на Дубна е създаден Обединеният институт за ядрени изследвания (ОИЯИ) – социалистическият отговор на създадения през 1954 г. край Женева Европейски център за ядрени изследвания (CERN).

В продължение на две години Синхрофазотронът в Дубна запазва позиции на най-големия протонен ускорител в света. На него са проведени разнообразни изследвания в областта на физиката на частиците. Сред по-значимите постижения са: изследване на еластичното разсейване на протони и пиони при високи енергии върху протони и α -частици; изучаването на странните частици и откриването на анти-сигма - минус хиперона. На Синхрофазотрона е открит нов тип разпад на К-мезоните, изследвани са свойствата на K^0 -мезоните и процеса на регенерация на К-мезоните.

От 1971 г. Синхрофазотронът е преоборудван в ускорител на релятивистки ядра с енергия 4,5 GeV/A. Като инжектор на високозарядни йони се използва разработеният в Дубна от Е. Д. Донец електронно - лъчев йонен източник. След 1971 г. на Синхрофазотрона се ускоряват и поляризирани деутрони ($5 \cdot 10^9$ деутрона за импулс, при 45% поляризация).

Синхрофазотронът в Дубна е ускорител със слабо фокусиране. При слабо фокусиращите ускорители фокусиращата сила на магнитното поле е малка, а амплитудата на трептенията на частиците е голяма. Съответно големи са и напречните размери на вакуумната камера на синхротрона – 2 m x 40 cm в Синхрофазотрона! Необходим е огромен, тежък и скъп електромагнит (36 000 t !).

През 1952 г. Ливингстън, Курант и Снайдер предлагат нов, по-ефективен метод за фокусирането на ускоряваните частици към равновесната орбита – т.нар. силно фокусиране. За съжаление Векслер не вярвал във възможността на практика да се построи ускорител със силно фокусиране. Той предпочел да заложи на вече изпитаните решения. Така Синхрофазотронът в Дубна става един от последните построени слабо фокусиращи ускорители.

За сравнение, когато в CERN се взема решение за строителството на голям ускорител, първоначално се предлага просто да се повтори в по-голям мащаб протонният синхротрон Космотрон за 3 GeV работещ в Брукхайвън. Научавайки за новия метод за фокусиране на частиците – силното фокусиране - Дж. Адамс, О. Дахл, Ф. Гоурд, Р. Видерое и К. Йохнсън бързо оценяват достоинства на новия тип ускорители и, проявявайки завидна научна смелост и умения да убеждават администраторите в науката, успяват да наложат строителството на силно фокусиращ протонен синхротрон. Новият ускорител започва работа в CERN през 1959 г., т. е. само две години след ускорителя в Дубна. Но този синхротрон, известен като CPS, ускорява протоните до почти три пъти по-висока енергия – 28 GeV при много висока интензивност – 10^{12} протона за импулс.

На следващата година (1960) силно фокусиращ ускорител е построен и в Брукхайвън. Това е AGS, който ускорява протоните до 33 GeV.

Следвайки логиката на съревнованието, ръководителите на съветската наука вземат решение в СССР също да се построи голям протонен ускорител с прилагане на новия метод на силно фокусиране на частиците. Първото предложение за създаването в СССР на силно фокусиращ ускорител датира от 1956 г. и е направено от колектив от московския Институт за теоретична и

експериментална физика (ИТЕФ) с ръководители В. В. Владимирски и Д. Г. Кошкарев. За енергия на новия ускорител са избрани рекордните 76 GeV, т. е. повече от два пъти тази в AGS!

За проверка на работата на различните системи на ускорителя първоначално в ИТЕФ се строи 1:10 модел на големия ускорител. Това е силно фокусиращият протонен синхротрон У-10, който започва работа в ИТЕФ през 1961 г. Този ускорител има диаметър на магнита 80 m и ускорява протоните до енергия 7 - 10 GeV. Благодарение на новата технология при същата максимална енергия на протоните както в Синхрофазотрона в У-10 се използва вакуумна камера с напречно сечение от само 11 x 8 cm (срещу 200 x 40 cm).

За големия ускорител, този за 76 GeV, било решено да се създаде съвсем нов научен център – Институтът за физика на високите енергии (ИФВЕ). От една страна през 60-те години на миналия век Дубна вече се оформила като международен научен център, а ИФВЕ е замислен като изцяло руски научен институт. По-важната причина обаче са крайно неблагоприятните геоложки условия в района на Дубна. Дубна е разположена на брега на Волга върху пясъчна почва, която е податлива на разнообразни движения. В същото време новият ускорител използва за удържане на ускорените протони на кръгова орбита и за фокусирането им към тази орбита 120 магнитни блока с дължина от 10,4 m и общо тегло 20 000 t. При диаметър на орбитата на ускорителя 472 m тези магнитни блокове трябва да са монтирани с точност по-висока от 100 μ m. Това предполага здрава скална основа на машината. От геоложки съображения площадката на новия ускорител е избрана на 100 km южно от Москва, недалеч от гр. Серпухов, където са разположени т.нар. средноруски скали. Тук в боровата гора на брега на р. Протва възниква и нов научен град – Протвино – фиг. П2. 46.



Фиг. П2. 46. Протвино

Новият ускорител е наречен У-70 и започва работа през 1967 г. – фиг. П2. 47, П2. 48. Той ускорява протоните до максимална енергия 76 GeV и в продължение на 5 г. остава най-големият ускорител в света.

През 1972 г. започва работа протонният синхротрон за 500 GeV в Националната ускорителна лаборатория на САЩ “Е. Ферми”.

В У-70 протоните се ускоряват предварително до енергия 100 MeV в линеен ускорител с дължина 80 m. След това протоните се инжектират в ускорителния

пръстен, където, за да достигнат до максимална енергия, протоните извършват 500 000 оборота, изминавайки 750 000 km, т.е. разстоянието до Луната и обратно! Ускоряването се извършва в 54 ускоряващи резонатора с амплитуда на напрежението на всеки резонатор 7 kV. Честотата на ускоряващото напрежение “следи” енергията на частиците, изменяйки се от 2,6 MHz до 6,1 MHz. Магнитното поле във всеки от 120-те магнитни блока се изменя от 0,038 T при инжектирането на протоните до 1,2 T при максимална енергия. Импулсната мощност, захранваща електромагнита, е огромна – 100 MW. Средната мощност на захранването на електромагнита е 15 MW. Ускорителят е разположен в тунел с размери 6 x 8 m. Максималната интензивност на ускоряваните протони е $1,5 \cdot 10^{13}$ протона за импулс.



Фиг. П2. 47. Протонният синхротрон У-70 в Протвино – [9]



Фиг. П2. 48. Общ вид на ускорителя У-70, експерименталните корпуси и град Протвино – [10]

През следващите години на интензивни изследвания в ИФВЕ са получени цяла редица важни резултати. Открит е нов тип симетрия във физиката на частиците – мащабната инвариантност при стълкновението на адроните. Тя отразява съставната природа на адроните. При изучаването на регенерацията на K^0 -мезоните е потвърдена валидността на теоремата на Померанчук за равенството на сеченията на частици и античастици при високи енергии. Показано е, че с нарастването на енергията на сблъскване на адроните в областта над 30 GeV интензивността и радиусът на действие на силните взаимодействия нарастват, т. нар. “серпуховски ефект”. През 1970 г. са създадени първите антихелиеви и антитритиеви ядра.

П2. 4. 5. Новосибирският ИЯФ и Г. И. Будкер

Г. И. Будкер започва научната си кариера като теоретик в Курчатовия институт в Москва. През 1953 г. той публикува една от своите знаменити разработки – относно възможностите за създаване на стабилизирани интензивни снопове от релятивистки електрони. Такъв снопове би могъл да се използва за генерирането на интензивно електромагнитно СВЧ лъчение и за ефективното ускоряване на йони.

По предложение на И. В. Курчатов и Л. А. Арцимович през 1953 г. в института се създава специална лаборатория за експериментиране на новата идея. Тя е наречена Лаборатория за нови методи на ускоряване.

През първите години в лабораторията на Будкер се разработват и създават силнотокви електронни ускорители – бетатрони и безжелезни синхротрони с уникални характеристики. Получени са електронни снопове с ток 75 – 300 А.



През 1956 г. на Първата международна конференция по ускорители в Женева Д. Керст лансира идеята експериментите във физиката на високите енергии да се провеждат не чрез бомбардирането на неподвижна мишена с ускорените частици, а чрез сблъскването на два снопа ускорени частици, които се движат един срещу друг. При това цялата налична енергия на двата снопа ще се използва за възбуждането на изследвания процес и за създаването

Фиг. П2. 49. Г. И. Будкер

на нови частици. Първоначално се разглежда възможността за сблъскването на два насрещни електронни снопа. Новият тип ускорител е наречен ускорител с насрещни снопове или колайдър. За да има в един колайдър достатъчен брой насрещни удари между частиците, очевидно са необходими много интензивни и силно фокусирани (с много малко напречно сечение) електронни снопове.

Силнотоквите електронни ускорители вече са “специалитет” на лабораторията на Будкер и било напълно естествено именно тук да се разгърнат изследвания по реализацията на метода на насрещните снопове.

Докато в ускорител с неподвижна мишена ускорените частици бомбардират мишена с голяма плътност, то в колайдърите ролята на мишена играе движещият се насрещно снап, който има многократно по-малка плътност.

Първоначално никой и не мисли сериозно за ускорител с насрещни снопове – идеята изглеждала толкова фантастична. Когато Курчатов дал първите предложения на Будкер за рецензия на няколко водещи специалисти, всички те единодушно заявили, че предложението е пълен абсурд и че подобна машина никога няма да работи. Въпреки тези мнения, доверявайки се повече на своята интуиция Курчатов подкрепя започването на проучвания и първоначални разработки на новия метод.

Точно по-това време по предложение на М. Лаврентиев е взето правителствено решение за създаването в СССР на нов голям научен център – Сибирското отделение на АН СССР. В атмосферата на подем по време на “хрущовското размразяване” за първи път в света през 1957 г. край Новосибирск се създава научен център, обхващащ голям брой академични институти, с разнообразен профил. Създава се и нов научен град – знаменитият Академгородок –фиг. П2. 50.



Фиг. П2. 50. Академгородок

Решено е лабораторията на Будкер да бъде преместена в новия научен център. Тя става ядро на новия Институт за ядрена физика (ИЯФ).

Колективът на ИЯФ включвал плеяда талантиливи учени и бъдещи знаменитости: Г. И. Будкер (директор), А. А. Наумов, В. С. Панасюк, Р. Сагдеев, А. Н. Скрински, И. Н. Мешков, Б. В. Чириков, Е. А. Абрамян, Н. С. Дикански, В. В. Пархомчук и мн. др. Оформя се знаменитата школа на Будкер.

Много е написано за стила на работа на Г. И. Будкер, за колегиалността, демократичността, за многобройните дискусии, за вниманието му към битовите и материалните проблеми на всеки един от сътрудниците. Съвсем не е случайно, че именно в Новосибирския ИЯФ се раждат и реализират толкова много нови идеи и разработки: първият електрон - електронен колайдър, цяла поредица от електрон - позитронни колайдъри, протон - антипротонен колайдър, методът на електронно охлаждане на йонни снопове, методът за инжектиране в циклични ускорители с презареждане, практическото използване на синхротронното лъчение, използването на поляризирани снопове и др.

Имайки предвид серията колайдъри създадени от Будкер в ИЯФ, Ландау го нарича “релятивистки инженер”.

В ИЯФ се разгръщат и изследвания по управляем термоядрен синтез, на базата на предложението от Г. И. Будкер нов тип плазмен магнитен капан, наречен пробкотрон.

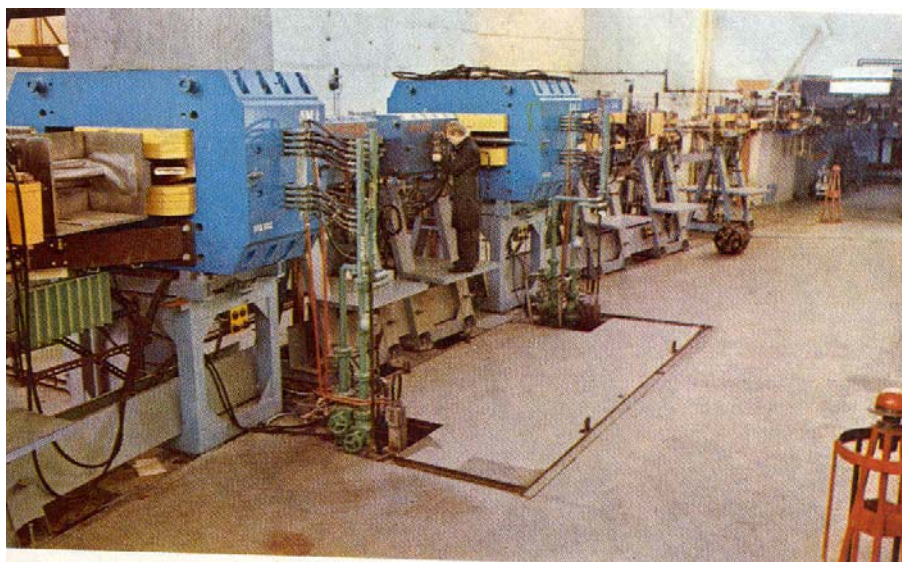
Под ръководството на Будкер към ИЯФ е създадено звено за разработването и производството на малки ускорители за приложни цели. Създадена е цяла гама от електронни ускорители с енергии от стотици keV до няколко MeV и мощности на снопа 20 – 100 kW (ЭЛИТ, ИЛУ, ЭЛВ). Тези ускорители намират разнообразни приложения в технологиите, химията и др. С парите получени от тази дейност се закупува необходимо за научните разработки оборудване, разгръща се строителството на жилища за сътрудниците и др.

Първият електрон-електронен колайдър ВЭП-1 е създаден в ИЯФ през 1963 г. Той използва два допиращи се пръстена с диаметър 1 m , в които се натрупват два интензивни електронни снопа всеки с енергия 160 MeV. Този малък колайдър е еквивалентен на електронен ускорител с неподвижна мишена и с енергия на електроните 100 GeV.

След успешната проверка на работоспособността на метода на насрещните снопове в ИЯФ започва създаването на електрон – позитронен колайдър ВЭПП-2. От физическа гледна точка насрещните снопове от частици и античастици са многообещаващи, защото отпадат много от забраните за възможните канали на реакция. От техническа гледна точка частиците и античастиците могат да се натрупват в един и същ магнитен пръстен. Те се въртят във взаимно противоположни направления, като се сблъскват в няколко точки от периметъра на орбитата. Във ВЭПП-2 се сблъскавали електрони и позитрони с енергии от 670 MeV.

След ВЭПП-2 следват електрон-позитронните колайдъри ВЭПП-3 с енергия $2 \times 3 \text{ GeV}$ и ВЭПП-4 с енергия $2 \times 7 \text{ GeV}$. ВЭПП-4 има диаметър на пръстена 360 m и светимост на колайдъра $L = 10^{31} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ – фиг. П2. 51.

На електрон-позитронните колайдъри на ИЯФ се провеждат изследвания в областта на физиката на частиците. Ето някои важни резултати: изучаване на характеристиките на Φ -частицата, експериментално потвърждаване на двойното e^-e^+ раждане, множественото раждане на адрони при e^-e^+ аниhilации.



Фиг. П2. 51. Електрон – позитронния колайдър ВЭПП-4 – [11]

Електроните и позитроните са леки частици. Когато се движат в магнитното поле на натрупващ пръстен, те излъчват интензивно синхротронно лъчение. Губейки енергия за синхротронно лъчение, електронните и позитронните снопове бързо се свиват до много малки напречни размери. Това позволява натрупването на големи количества електрони и позитрони чрез тяхното многократно инжектиране в пръстена.

Ситуацията значително се усложнява при протон–антипротонните колайдъри.

Антипротони се получават при облъчването на метална мишена с протони ускорени до достатъчно висока енергия. Ефективността на раждането и събирането на антипротони е много ниска, приблизително на един милион налитащи протони се ражда един антипротон.

От друга страна протоните и антипротоните са тежки частици и при тях почти отсъства синхротронно лъчение. Това затруднява натрупването на интензивни p/\bar{p} снопове.

През 1966 г. Г. И. Будкер предлага метод за натрупването на интензивни йонни снопове, т. нар. електронно охлаждане. То позволява натрупването на протони и антипротони в магнитния пръстен чрез многократно инжектиране на нови порции частици.

Първото експериментално доказателство на метода на електронното охлаждане е осъществено в ИЯФ върху натрупващия пръстен НАП-М с енергия на протоните 65 MeV.

Синхротронното лъчение на електроните в циклични ускорители има уникални характеристики. То има непрекъснат спектър, простиращ се от инфрачервената област до твърдото рентгеново лъчение, има много висока насоченост и яркост, превишаваща на много порядъци тази във всички други известни източници. ИЯФ е сред пионерите в света по използването на синхротронното лъчение за разнообразни приложения – спектроскопия, рентгеноструктурен анализ, рентгенова литография и мн. др. В ИЯФ е създаден един от първите в света центрове за синхротронно лъчение

По-късно специалистите от ИЯФ построяват в Курчатовия институт в Москва два електронни ускорителя, специализирани за генерирането на синхротронно лъчение: “Сибир-1” през 1988 г. и “Сибир-2” през 1988 г.

П2. 4. 6. Други ускорителни центрове в бившия СССР

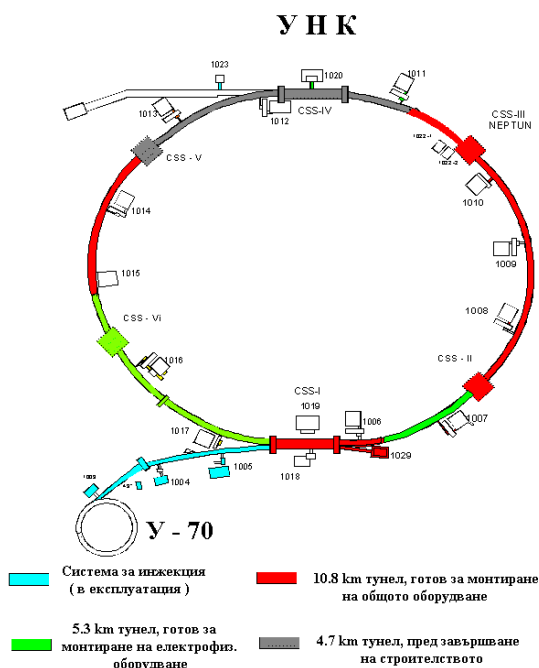
Без да се спираме подробно само ще изброим някои други ускорителни центрове в Русия и в страните от бившия СССР, които днес са независими държави.

- Харковският физико-технически институт. Тук работи линеен електронен ускорител за 1,8 GeV. Той е създаден под ръководството на А. И. Ахиезер, В. В. Владимирски, Я. Б. Файнберг и О. А. Валднер
- Томският политехнически институт. Тук работи електронният синхротрон “Сириус” за 1,5 GeV. Под ръководството на А. А. Воробъев е разгърнато производството на бетатрони за приложни цели.
- Ереванският физически институт. Тук работи електронният синхротрон АРУС за 6 GeV. Ускорителят е създаден под ръководството на А. И. Алиханян, С. И. Есин и Ю. Ф. Орлов.
- Филиалът на ФИАН в Троицк край Москва. Тук работи електронният синхротрон “Пахра” за 1,2 GeV.
- Московската мезонна фабрика в Троицк, на 20 km от Москва. Тук работи 600 MeV протонен линеен ускорител със среден ток 0,5 mA. Ускорителят има дължина 500 m. Използува се като импулсен източник на неутрони – 320 ns при 10^{15} n/s и за производството на радиоизотопи за медицината и индустрията.

П2. 4. 7. Трудни времена

Оседемдесетте и деветдесетте години на ХХ в. донасят всевъзможни трудности и проблеми за научните изследвания в Русия и в новообразуваните се след разпадането на СССР (1991 г.) независими държави. Още по времето на т. нар. “години на застои на Л. Брежнев” руската ускорителна физика и техника постепенно започна да губи позициите си на една от световните сили, както в областта на идеите, но в още по-голяма степен в областта на реализациите. От една страна ускорителите загубват военното си значение, а от друга те стават все по-скъпи. Съвременните ускорители са и истинско предизвикателство към равнището на технологиите.

От началото на 70-те години в ИФВЕ под ръководството на К. П. Мизвиков започват проектни работи по създаването на базата на протонният синхротрон У-70 на голям ускорителен център с максимална енергия $2 \times 3000 \text{ GeV}$, т. нар. Ускорително – натрупвателен комплекс (УНК). УНК трябва да включва два пръстена, разположени в един подземен тунел – с топли магнити за 600 GeV и със свръхпроводящи магнити за 3000 GeV – фиг. П2. 52. След продължително проектиране и многобройни обсъждания строителството на подземния тунел започва през 1987 г. Той има дължина $20\,772 \text{ m}$ и обхваща $3,1 \times 3,5 \text{ km}$. През 1994 г. е завършен и изпитан каналът по който протоните ще се превеждат от съществуващия ускорител У-70 до УНК. Той има дължина $2,7 \text{ km}$ – фиг. П2. 53. Започва строителството на първата степен на УНК – протонен синхротрон за 600 GeV работещ с фиксирана мишена. Общата цена на този “топъл” пръстен се оценява на 1 млрд. USD . Ускорителят ще има 2194 дипола и 496 фокусиращи квадруполни лещи. Част от оборудването на ускорителя вече е монтирано, но липсата на финансиране затруднява завършването на работите по ускорителния комплекс.



Фиг. П2. 52. Ускорително-натрупвателният комплекс (УНК) в Протвино – [12]



Фиг. П2. 53. Каналът за транспортиране на протоните от У-70 до УНК – [13]

През 1993 г. в ОИЯИ – Дубна започна работа синхротронът за ускоряване на тежки йони “Нуклотрон”. Този ускорител използва свръхпроводящи магнити и ускорява йоните до енергия 6 GeV/A – фиг. П2. 54.



Фиг. П2. 54. Свръхпроводящият ускорител на тежки йони Нуклотрон в ОИЯИ – Дубна – [8]

Литература

1. И. Н. Головин. И. В. Курчатов. М., Атомиздат, 1979
2. История Курчатовского института. “Курчатовец”, 1997, № 12-13.
3. В. Никитина (ред.). М. Г. Мещеряков – жизнь, посвященная Науке и Дубне. ОИЯИ, Дубна, 2001.
4. М. А. Марков, А. Н. Горбунов (ред.). Воспоминания о В. И. Векслере. М., Атомиздат, 1987
5. М. Г. Шафранова (ред.). В. И. Векслер. ОИЯИ, Дубна, 2003.
6. И. Н. Иванов (ред.). В. П. Саранцев – жизнь, отданная науке. ОИЯИ, Дубна, 2001.
7. Международный центр в Дубне, М., Планета, 1975.
8. JINR – LHE. User’s Handbook, Dubna, 1993.
9. А. Логунов, В. Ярба. В глубины строения материи - Наука и жизнь, 1981, № 3, 2-10
10. N. Tyurin. Forty Years of High-Energy Physics in Protvino - CERN Courier, V. 43, 2003, № 9, 31-33.
11. Сибирское отделение АН СССР. Институт Ядерной Физики, Внешторгиздат, 1980
12. V. A. Yarba. The Status and Development of the UNK - Second Europ. Part. Accel. Conf. EPAC’90, Nice, 1990, 60-84.
13. Serpukhov. UNK Transfer Beamline Commissioned - CERN Courier, V. 34, 1994, № 5, 18-20

