

ЦИКЛОТРОН И СИНХРОЦИКЛОТРОН

Ордан Печијаре

За да се предизвика претворување на едно атомно јадро во друго, т. е. за да стане јадрена реакција, треба да се дејствува на атомното јадро со соодветна честица — проектил, која ќе може да стигне до него. За да пак една наелектризирана честица, (алфа честица, протон, деутрон) стигне до атомното јадро и предизвика јадрена реакција, таа мора да има достаточна брзина односно енергија за да ги совлада електростатичните одбојни сили на атомното јадро.

Првите јадрени реакции беа предизвикани со алфа честичи испуштани од природно радиоактивните елементи. Но предизвиканите јадрени реакции на овој начин беа извонредно ретки. Затоа природно беше да се побараат и разработат методи што ќе овозможат да се конструираат такви уреди, кои ќе можат да послужат како извори за добивање на сноп од честичи — проектили, со многу поголем интензитет и енергија, отколку што може да се добие од природно радиоактивните елементи.

Ако се има во предвид дека алфа честичите, протоните и деутроните не се ништо друго до атомни јадра на хелиумот, водородот и деутериумот, т. е. атоми кои ги изгубиле своите електрони и на тој начин постанале позитивни јони, тогаш принципно не е тешко да се создадат такви уреди. Тие уреди треба прво, да овозможат да се создадат јони, на пример од споменатите три вида атоми, а после на овие јони да му дадат голема брзина односно енергија со помошта на електрично поле. Спрема тоа овие уреди би се состоеле од три дела: извор на јони, високо евакуирана цевка односно простор во кој ќе се врши забрзување на јоните и генератор за висок напон со помошта на кој ќе се создава јако електрично поле, кое ќе му даде на јоните голема брзина односно енергија.

Како извор на јони може да послужи и една Круксова цевка, т. е. цевка за канални зраци. Во зависност од тоа какви честичи треба да се добијат, цевката се полни под мал притисок со хелиум — за добивање на алфа честичи; со водород — за добивање на протони; со деутериум — за добивање на деутрони итн. Кога во цевката настане елек-

трично празнење, гасот се јонизира и се добиваат соодветни честици. Јонизацијата овде се должи на сударите што ги вршат катодните зраци (електроните), испуштани од катодата, со атомите на гасот во цевката. Многу е попросто и позгодно ако за катода се употреби усвитена жица, па јонизацијата да ја вршат електроните коишто таа ги испушта, т. е. да се ползува термо електронската емисија.

На овој начин добиените јони, т. е. алфа честиците, протоните, деутроните, се упатуваат во високо евакуиран простор, каде што со помошта на електрично поле ќе му се даде голема брзина односно енергија, после кое тие се упатуваат на целта, т. е. на елементот чии што атоми се бомбардираат.

Енергијата што ќе ја добие една наелектризирана честица со маса m и електричен полнеж e , кога е изложена на потенцијална разлика V , ќе биде еднаква на производот од потенцијалната разлика и електричниот полнеж, т. е. ќе биде eV . Ако честицата под дејството на приложената потенцијална разлика добие брзина v , тогаш е јасно дека нејзината кинетичка енергија ќе биде $\frac{mv^2}{2}$. Енергијата дадена со производот eV и енергијата дадена со изразот $\frac{mv^2}{2}$, е една иста енергија, т. е. тоа е енергија на една иста честица. Спрема тоа може да се напише:

$$\frac{mv^2}{2} = eV. \quad (1)$$

Решавајќи ја оваа равенка по v , добиваме:

$$v = \sqrt{\frac{2eV}{m}}. \quad (2)$$

Формулата (2) може да ни послужи за изнајдување на брзината што ќе ја постигне една честица со маса m и електричен полнеж e , кога е изложена на потенцијална разлика V .

Но формулата (2) може да ни послужи за пресметување на брзината на честиците само во случај кога брзината на честиците е далеку помала од брзината на светлината (300000 км/сек), т. е. во случај кога масата m може да се смета константна. Во противен пак случај, согласно на теоријата на релативитетот, на масата m треба да ѝ се даде вредност спрема формулата:

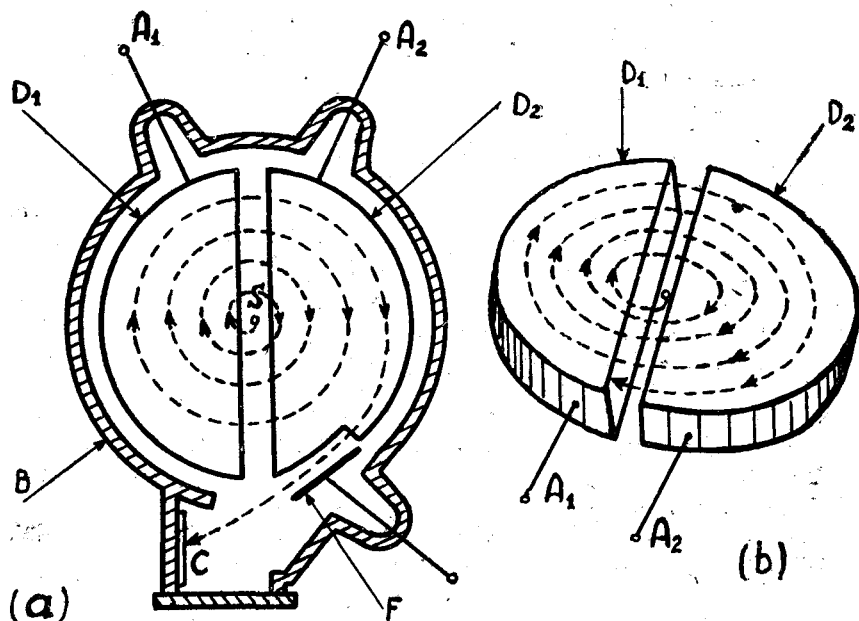
$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}, \quad (3)$$

каде што е m масата на честицата во движење, m_0 нејзината маса на мирувањето, v брзината со која таа се движи и c брзината на светлината.

Постоат повеќе уреди со кои можат да се добијат честици со висока енергија, па дури и енергија од преку милијарда електрон-волти. Напредокот на јадрената физика, поред другото, во голема мера има да благодари на постојаното усовршување на овие уреди. Еден од ваквите уреди е и циклотронот односно синхроциклотронот.

Циклотронот служи за добивање на високо енергетски позитивно наелектризиран честици: протони, деутрони, алфа честици. Тој е основан на принципот, да една наелектризирана честица повеќе пати се забрза со помошта на еден ист, релативно неголем, наизменичен напон. Идејата за овој уред е дадена 1930 год. од американскиот физичар Лауренс, а 1931 веќе е конструиран првиот експериментален циклотрон од страна Лауренса и Ливингстона.

Циклотронот се состои од една високо евакуирана комора B (10^{-6} мм Hg), сл. 1, во која се сместени на извесно мало растојание две сплоснати полуцилиндрични шупливи



Сл. 1. Шема на циклотрон:

а) B високо евакуирана комора; D_1 и D_2 , електроди; A_1 и A_2 , спојки за сврзување на електродите со половите на високочестотниот електричен генератор; F негативно наелектризирана плоча „дефлектор“; S извор на јони; C бомбардираниот елемент.

б) Општ изглед на електродите заедно со патеките на јоните.

електроди D_1 и D_2 , кои личат на латинската буква „D“, поради што и се викаат дуанти, спрема англиското име за буквата D . Електродите се меѓу себе добро изолирани, а исто така од комората B . Комората B заедно со електродите D_1 и D_2 е сместена меѓу половите на еден јак електромагнет, сл. 2, кој создава јако напречно магнетно поле, т. е. магнетно поле чиј правец е нормален на основите на полуцилиндричните електроди. Преку спојките A_1 и A_2 , електродите D_1 и D_2 се сврзуваат со еден високофреквентен извор за наизменичен напон, на пример со честота од неколку милиони осцилации во секунда и јачина 10^4 – 10^5 волти.



Сл. 2. Положбата на електродите меѓу половите на електромагнетот кај циклотронот.

На овој начин во тесниот простор меѓу електроидите се создава јако наизменично електрично поле, дури во празнините на електродите, т. е. во нивната внатрешност, ова поле не постои.

Во средината на електродите се најдува изворот на јони S . Како извор на јони може да послужи, поред споменатите извори на јони, и електричен лак кој се создава во внатрешноста на еден шуплив метален конус. Лакот гори меѓу усвитената катода и сидовите на конусот кој служи како анода. Во овој простор се доведува низ еден тесен отвор гасот што треба да се јонизира под притисок од 10^{-2} – 10^{-3} мм Hg. Во зависност од доведениот гас, т. е. дали е тој водород, деутериум или хемиум, ќе се добијат јони на водород, деутериум или хелиум односно протони, деутрони или алфа честици. Овие пак низ една тесна цевчица влегуваат во просторот меѓу електродите. Делот од доведуваниот гас што проникнува и во другите области на циклотронот, се отстранува со вакуум пумпи што работат непрестајно.

Да видиме сега што станува со еден позитивен јон кога се најде во просторот меѓу електродите. Ќе претпоставиме дека во моментот кога позитивниот јон се нашол во просторот меѓу електродите, левата електрода D_1 имала максимален негативен потенцијал. Во овој случај електричното поле во просторот меѓу електродите е најјако и има смер од десно

на лево, т. е. од D_2 кон D_1 . Заради тоа позитивниот јон ќе се движи налево и ќе влезе во празнината на електродата D_1 , каде што е јачината на електричното поле нула, со некоја брзина v , која не се менува по големина за сето време дури јонот се движи во неа.

Ако максималната потенцијална разлика меѓу електродите е V , тогаш еден јон што носи еден елементарен полнеж електричество (протон, деутрон), ќе влезе во празнината на електродата D_1 со енергија V електрон-волти. Но ако во празнината на електродата D_1 нема електрично поле, таму има магнетно поле чии правец е нормален на правецот на движењето на јоните. Под дејството на магнетното поле јонот опишува во празнината на електродата D_1 полукруг за некое време t и повторно стигнува во просторот меѓу електродите. Радиусот на овој полукруг ќе биде:—

$$r = \frac{mc}{eH} v, \quad (4)$$

каде што е m масата на јонот, c брзината на светлината, v брзината на јонот, e електричниот полнеж на јонот изразен во електростатички единици и H јачината на магнетното поле изразена во електромагнетни единици. Ако сега за ова време t електродите си го променат својот знак и тоа така, да десната добие максимален негативен потенцијал, а левата максимален позитивен потенцијал, тогаш јонот добива ново забрзување во смерот кон десната електрода и влегува во нејзината празнина со енергија од $2V$ електрон-волти, па спрема тоа и со поголема брзина.

Согласно пак на равенката (4), поради поголемата брзина, тој ќе се движи по полукруг со малце поголем радиус отколку што беше радиусот на предодно од него опишаниот полукруг во празнината на левата електрода D_1 . Ова е заради тоа, што сега магнетното поле послабо му го изменува правецот на движењето на јонот, кој се движи со поголема брзина од предодната. Се разбира дека брзината со која се движи сега јонот во празнината на десната електрода D_2 е пак константна, бидејќи тука нема електрично поле.

После некое време јонот пак ќе се најде во празнината меѓу електродите. Ако и сега за време дури тој се движи во празнината на десната електрода D_2 , електродите си го променат својот знак и тоа така да левата електрода D_1 добие максимален негативен потенцијал, а десната D_2 максимален позитивен потенцијал, тогаш јонот, во тесниот простор меѓу електродите, ќе добие ново забрзување во смерот кон левата електрода D_1 и ќе влезе во нејзината празнина со енергија $3V$ електрон-волти, па спрема тоа и со поголема брзина отколку што ја имаше во празнината на десната

електрода D_2 . Согласно пак на равенката (4) тој ќе се движи по полукруг со поголем радиус од радиусот на предодниот полукруг по кој се движеше во празнината на десната електрода D_2 .

Јасно е сега, дека ако се оствари условот да секогаш кога јонот дојдува во просторот меѓу електродите, електродите се појавуваат со максимален но обратен по знак потенцијал од оној знак што го имале кога јонот бил предодно во просторот меѓу нив, тогаш јонот ќе добива забрзување кога ќе дојде во просторот меѓу електродите, зголемувајќи ја својата енергија секогаш за V електрон-волти. На овој начин тој ќе се движи по една спирала претставена на сл. 1 со непрекината линија. Оваа спирала ќе лежи во една рамнина нормална на правецот на магнетното поле, бидејќи е брзината нормална на магнетното поле.

Движејќи се по спиралата јонот постепено ќе се приближува кон периферијата на електродите, за да на едно место, привлечен од една високо негативно наелектризирана плоча F , на пример со постојанен потенцијал од 70000 волти, излезе од внатрешноста на електродите и се упати во просторот каде се најдува елементот што се бомбардира C .

Синхронизмот меѓу временскиот интервал што му е потребен на јонот да го мине патот во празнината на една од електродите и полупериодот на изворот на високочестотниот напон, лесно се постигнува благодарение на тоа, што времето t за кое јонот опише еден полукруг во внатрешноста на електродите, каде што постои хомогено магнетно поле, не зависи од неговата брзина односно радиусот на полукружната патека.

Радиусот на една полукржна патека на јонот во празнината на една од електродите ќе биде даден, како што споменавме порано, со равенката (4). За брзината пак од оваа равенка добиваме:

$$v = \frac{reH}{mc} \quad (5)$$

Времето за кое јонот ќе го мине тој полукружен пат, т. е. патот чија што должина е πr , ќе биде:

$$t = \frac{\pi r}{v} \quad (6)$$

Заместувајќи ја вредноста за v од равенката (5) во равенката (6) добиваме:

$$t = \frac{\pi mc}{eH} \quad (7)$$

Од равенката (7) гледаме дека за даден јон и дадено магнетно поле, времето t за које јонот мине пат од еден полукруг, не зависи нити од неговата брзина, нити пак од радиусот на неговата кружна патека. Ова е заради тоа, што ако се зголеми брзината, се зголемува и радиусот на кругот по кој се движи јонот, па спрема тоа се зголемува и патеката на јонот, а времето t на едно полузавртување си останува исто. На овој начин се постигнува компензација, т. е. во колку полукружните патеки на јонот се продолжуваат, во толку се зголемува и неговата брзина.

Спрема тоа за даден вид јони и дадена честота на наизменичниот напон, јачината на магнетното поле може така да се избере, да времето t , за коешто јонот мине пат од еден полукруг, биде еднакво на полупериодот $\frac{T}{2}$ од наизменичната потенцијална разлика меѓу електродите, и на тој начин да се постигне нужниот синхронизам за правилно функционирање на циклотронот. Во овој случај јачината на магнетното поле ќе се добие од равенката (7) и ќе биде:

$$H = \frac{\pi m c}{e t}. \quad (8)$$

Така на пример ако полупериодот $\frac{T}{2}$ на приложениот наизменичен напон на електродите $t = 4,35 \cdot 10^{-8}$ секунди, тогаш за да биде исполнет условот за синхронизмот, магнетното поле спрема равенката (8), треба да ја има следната јачина:

$$H = \frac{\pi m c}{4,35 \cdot 10^{-8} e} \quad (9)$$

Ако јоните се деутрони, чија маса m е $3,33 \cdot 10^{-24}$ грама, а електричниот полнеж $e = 4,80 \cdot 10^{-10}$ електростатички CGS единици количество електричество, тогаш заменувајќи ги овие вредности во равенката (9), како и вредностите за $c = 3 \cdot 10^{10}$ см/сек и $\pi = 3,14$, за јачината на магнетното поле ќе се добие следната вредност:

$$H = \frac{3,14 \cdot 3,33 \cdot 10^{-24} \cdot 3 \cdot 10^{10}}{4,35 \cdot 10^{-8} \cdot 4,80 \cdot 10^{-10}} = 15023,28 \text{ ерстеди.}$$

Значи ако полупериодот на приложениот наизменичен напон на електродите е $4,35 \cdot 10^{-8}$ секунди, а јоните се деутрони, тогаш за да се постигне бараниот синхронизам, магнетното поле треба да има јачина од 15023,28 ерстеди.

Јасно е дека при дадена јачина на магнетното поле и дадени јони, за да се постигне потребниот синхронизам треба честотата на наизменичниот напон односно негавиот

полупериод да има определена вредност. Оваа вредност за полупериодот на наизменичниот напон може да се определи од равенката (7).

Ако е радиусот на полукружната патека по која се движел еден деутрон во моментот кога ги напушта сосем електродите, т. е. неговиот максимален радиус 50 см, тогаш максималната брзина со која деутронот ги напушта електродите, ќе ја најдеме од равенката (5):

$$v = \frac{eHr}{mc} = \frac{4,80 \cdot 10^{-10} \cdot 15023,28 \cdot 50}{3,33 \cdot 10^{-24} \cdot 3 \cdot 10^{10}} = 3,6 \cdot 10^9 \text{ см/сек.}$$

Значи при горните услови максималната брзина на деутроните ќе биде $3,6 \cdot 10^9$ см/сек.

Ако при истите услови се забрзуваат протони, тогаш односот $\frac{e}{mc}$ во предодната равенка е двапати поголем во споредба со истиот однос кај деутроните, па спрема тоа и максималната брзина на протоните ќе биде двапати поголема отколку кај деутроните. За алфа честиците пак овој однос е ист како и кај деутроните, што значи дека при исти услови и алфа честиците ќе добијат иста максимална брзина.

Максималната кинетичка енергија што можат да ја добијат јоните во циклотроните е дадена со изразот:

$$E = \frac{mv^2}{2}, \quad (10)$$

каде што е m масата на еден јон, а v неговата максимална брзина. Ако v во оваа равенка се замени со нејзината вредност од равенката (5), тогаш максималната кинетичка енергија на јонот, т. е. кинетичката енергија што е има јонот при напуштањето на електродите, ќе биде дадена со изразот:

$$E = \frac{1}{2} m \left(\frac{reH}{mc} \right)^2 = \frac{H^2 r^2}{2} \cdot \frac{e^2}{c^2 m} \quad (11)$$

Од оваа равенка се гледа, дека максималната кинетичка енергија која може да ја добие даден јон е определена со производот $H^2 r^2$.

Ако при даден циклотрон јачината на магнетното поле се одржува константна, а е константен и максималниот радиус на кружната патека на јонот, тогаш од равенката (11) излегува, дека максималната енергија што ќе ја добие еден јон ќе биде пропорционална на квадратот на електричниот полнеж на јонот e , а обратно пропорционална на неговата маса m .

Спрема тоа за алфа честиците, кои имаат двапати поголем електричен полнеж од протоните, а четирипати поголема маса, односот $\frac{e^2}{m}$ останува ист. Заради тоа алфа честиците и протоните под дадените горни услови, во циклотронот ќе добијат иста максимална енергија. Деутроните пак, за кои односот $\frac{e^2}{m}$ има двапати помала вредност од истиот однос кај протоните односно алфа честиците, ќе добијат двапати помала максимална енергија, отколку што добиваат при исти услови протоните односно алфа честиците.

Равенката (11) се употребува за пресметување на максималната енергија на разни јони ако циклотронот работи со константна јачина на магнетното поле, а условот за синхронизам за различни јони се постигнува со промената на честотата на приложениот наизменичен напон на електродите.

Времето t за кое еден јон ќе мине било која полукружна патека, како што видовме, е дадено со равенката (7). Спрема тоа времето T кое ќе му биде потребно за да направи едно цело завртување, т. е. да мине две полукружни патеки, ќе биде:

$$T = \frac{2\pi mc}{eH}. \quad (12)$$

Бројот завртувања n што мора да ги прави јонот во една секунда за да остане во синхронизам со приложениот наизменичен напон на електродите, ќе биде еднаков на реципрочната вредност на равенката (12), т. е.:

$$n = \frac{eH}{2\pi mc}. \quad (13)$$

Решавајќи ја оваа равенка по H добиваме:

$$H = \frac{2\pi mc n}{e}. \quad (14)$$

Заместувајќи ја оваа вредност за H во равенката (11), за максималната кинетичка енергија на јоните ќе добиеме:

$$E = 2\pi^2 r^2 n^2 m. \quad (15)$$

Дури равенката (11) се употребува за пресметување на максималната енергија на различни јони ако се работи со циклотрон што има константна јачина на магнетното поле, а условите за синхронизам за различни јони се исполнуваат со променување на честотата на приложениот наизменичен

напон на електродите, дотука равенката (15) ни овозможува да ја најдеме максималната енергија на различни честици ако циклотронот работи со константна честота на приложениот наизменичен напон на електродите, а јачината на магнетното поле се менува така, да биде задоволена равенката (13) за различни јони, т. е. да се оствари синхронизмот меѓу приложениот наизменичен напон на електродите и движењето на јоните.

Од равенката (15) гледаме, дека кога се работи со циклотрон што има консонантна честота на приложениот напон на електродите, па било какви јони да се забрзуваат во него, максималната енергија што ќе ја добие еден јон ќе биде пропорционална на неговата маса m и нема да зависи од неговиот електричен полнеж, што не е случај кога циклотронот работи со константно магнетно поле, т. е. кога се применува равенката (11).

Спрема тоа кога циклотронот работи со константна честота, максималната енергија што ќе ја добиваат деутроните ќе биде двапати поголема, а на алфа честиците четирипати поголема од енергијата на протоните.

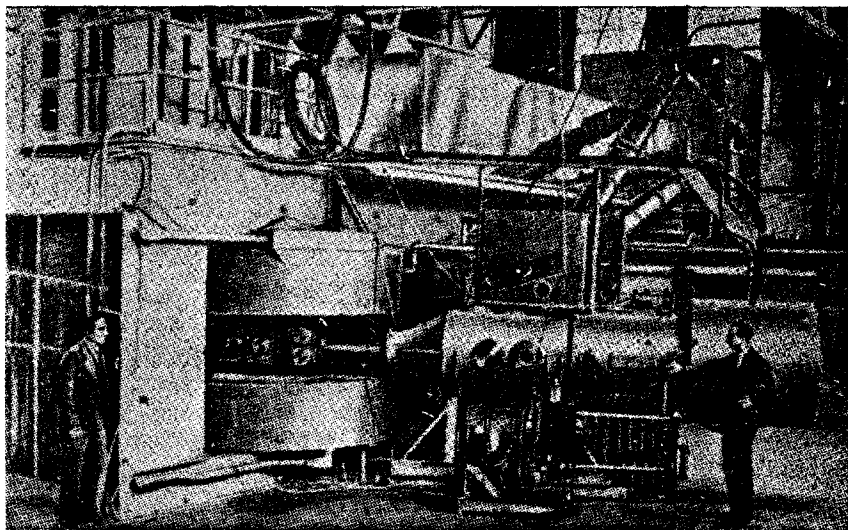
Ако се погледаат равенките (5), (11) и (15), одма паѓа во очи, дека јачината на приложениот наизменичен напон на електродите при даден циклотрон не врши никакво влијание на максималната брзина на дадени јони односно на нивната максимална енергија. Ова е заради тоа, што ако е приложениот напон на електродите поголем, јоните ќе направат помал број завртувања пред да стигнат до периферијата на електродите; ако е пак приложениот напон помал, овој број на завртувањата ќе биде поголем и така јоните ќе стигнат до периферијата на електродите пак со иста енергија како и кога беше приложен на електродите поголем напон.

Анализирајќи ја равенката (11) дојдуваме до заклучок, дека максималната енергија што може да ја постигне даден јон во циклотронот е определена со квадратот на производот од јачината на магнетното поле и радиусот на полуцилиндричните електроди, т. е. со изразот $H^2 r^2$.

Спрема тоа ако сакаме да добиеме јони со голема енергија, мораме да ја зголемиме јачината и големината на елекеромагнетот низ чие поле јоните се движат по своите спирални патеки. Заради тоа циклотроните се масивни уреди кои тежат обично по неколку стотини тона па и повеќе. На сл. 3 е претставен општиот изглед на еден циклотрон од средна големина.

Циклотронот дава извонредно интензивен сноп на јони, т. е. овозможува голем број јони во единица време да се упатат на целта. Големата важност на оваа особина на циклотронот може одма да се увиди, ако се има во предвид колку тешко се погодува атомното јадро (отприлика една

алфа честица на 50000 ќе погоди едно атомно јадро). Циклотрони од средна големина упатуваат на целта неколку пати повеќе јони во една секунда отколку што емитира алфа честици 1 кг радиум во секоја секунда. За да ни стане јасно колку интензивни снопови јони дава циклотронот и колкава

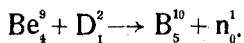


Сл. 3. Општ изглед на циклотрон.

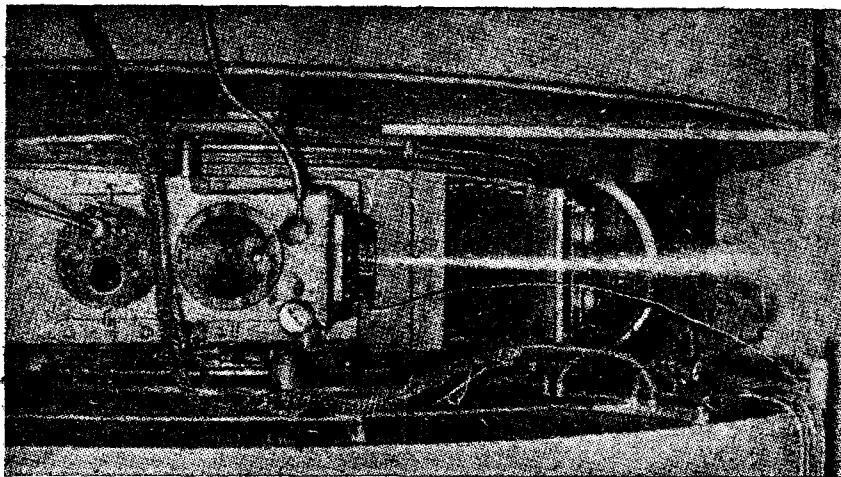
е неговата корист, ќе се потсетиме дека 1 кг радиум емитира во секоја секунда $3,7 \cdot 10^{13}$ алфа честици. Поголемите циклотрони даваат снопови на јони со уште поголем интензитет. Така на пример постои циклотрон чии сноп деутрони има интензитет 200 μ A (микро амperi); што значи дека секоја секунда се упатуваат на целта околу $1,2 \cdot 10^{15}$ деутрони, бидејќи на еден микро ампер му одговара околу $6 \cdot 10^{12}$ деутрони во секунда.

На сл. 4 е дадена фотографија на сноп од деутрони со енергија од 15 MeV испуштани во воздух од еден циклотрон. Светлата трака е долга 70 см.

Досега зборувавме за забрзувањето на наелектризирани честици во циклотронот, т. е. протони, деутрони, хилиумови јадра (алфа честици). Но со помошта на циклотронот може да се добие и извонредно интензивен поток на неутрони. За таа цел се ставува на патот на јоните што излегуваат од циклотронот соодветен елемент, на пример танок лист од берилиум, ако јоните се деутрони. Удирајќи на овој елемент, деутроните ослободуваат од него неутрони по следнава јадрена реакција.



На овој начин со помошта на циклотронот може да се добие поток на неутрони со таков интензитет којшто би можел да се добие само при употребата на неколку килограми радиум.



Сл. 4. Сноп на деутрони со енергија од 15 MeV испуштани во воздух од еден циклотрон.

Вака добиените неутрони можат ефикасно да се употребат за бомбардирање на други елементи, т. е. за предизвикување на јадрени реакции.

Согласно на равенката (11) би требало да се очекува, дека со зголемувањето на јачината на магнетното поле односно со зголемување на радиусот на периферната патека, кој може да се смета дека е еднаков на радиусот на полуцилиндричните електроди, ќе може постојано да се зголемува и максималната енергија на јоните што излегуваат од циклотронот. Но ова зголемување на кинетичката енергија на јоните е ограничено поради зависноста на масата на јоните од нивната брзина.

Како што ни е познато од порано, спрема теоријата на релативитетот, масата на телата расте со растењето на нивната брзина и тоа во толку побрзо во колку брзината повеќе се приближува кон брзината на светлината, согласно на равенката (3).

Заради оваа зависност на масата на јоните од нивната брзина, за некоја достаточна голема брзина односно енергија на јоните, нивната маса m не може повеќе да се смета

за непроменлива, како што ние досега ја сметавме. Затоа за големи кинетички енергии на јоните односно брзини, заклучокот што го правевме на основа на равенката (7), дека времето t , што му е потребно на даден јон да мине една полукружна патека во празнината на една од електродите, не зависи од неговата брзина односно од радиусот на полукружните патеки, ќе важи само за брзини што се далеку од брзината на светлината, кога навистина масата на јоните практички може да се смета за константна.

Практички масата на деутроните може да се смета за константна сè дури нивната енергија не ја премине вредноста од 20 MeV. Деутроните со ваква енергија имаат брзина која е 0,145-ти дел од брзината на светлината, а нивната маса во движење m , спрема равенката (3), е 1,01-пати поголема од нивната маса на мирување m_0 , т. е. $m = 1,01 m_0$. Олкава промена на масата не врши некое битно влијание на работата на циклотронот. Општо земено за јони со помала маса, како што се протоните, ограничувањето на растењето на енергија во циклотроните настанува побрзо, бидејќи тие побрзо достигнуваат поголеми брзини.

За енергии високи значи, спрема сето ова што го кажавме досега, согласно на равенката (7), времето t , за кое даден јон мине една полукружна патека во празнината на електродите, расте со растењето на масата на јонот. Заради тоа јонот наместо да стигнува во просторот меѓу електродите во моментот кога е напонот меѓу нив најголем и да прими најповеќе енергија, тој ќе стигнува постојано со извесно задоцнување, заради што ќе прима сè помалку и помалку енергија. Во овој случај велиме дека јонот не е во фаза со наизменичниот напон меѓу електродите. На крајот на краиштата, поради релативистичкото зголемување на масата, тој може толку многу да заостане со пристигањето во просторот меѓу електродите од моментот кога е напонот меѓу нив најголем, да напонот повеќе не само што не го забрзува, туку дури ѝ го успорува.

Но штом јонот почне да се успорува, масата негова почнува да намалува, и согласно на равенката (7), и времето t , за кое јонот ќе мине една полукружна патека во празнината на електродите, ќе се намали и заради тоа идното пристигање на јонот во просторот меѓу електродите ќе биде во момент кога напонот ќе може да му соопшти извесно забрзување односно енергија. Но ова зголемување на енергијата на јонот односно неговата брзина, предизвикува зголемување на неговата маса, со што се зголемува времето t и идното пристигање на јонот меѓу електродите пак ќе задоцни. На овој начин патеката на јонот ќе осцилира околу некоја стабилна патека, корегирајќи се аутоматски сама себе.

Исто така ќе осцилира и енергијата на јонот околу една „равнотежна“ вредност, која ќе одговара на стабилната патека и нема да се зголемува. Спрема тоа за да се зголеми енергијата на ваков јон, треба да се зголеми „равнотежната“ енергија.

Ете зошто поради релативистичкото зголемување на масата е ограничена максималната енергија што може да ја добие еден јон во обичен циклотрон што работи под дадени услови.

Ова заостанување на јоните по фаза од фазата на приложениот наизменичен напон на електродите може донекаде да се намали, а со тоа и да се зголеми максималната енергија на јоните при даден циклотрон, со зголемување на приложениот напон меѓу електродите.

И навистина во колку е повисок приложениот напон меѓу електродите, во толку јонот ќе собере повеќе енергија, пред да се добие меѓу јонот и напонот осетна фазна разлика односно полна фазна дисхармонија, бидејќи при поголем напон меѓу електродите јонот треба да направи релативно мал број завртувања за да добие поголема енергија. Но и ова зголемување на напонот е ограничено поради електричното празнење кое настанува при така високи потенцијали на електродите. За деутроните граничната вредност на енергијата што можат тие да ја достигнат во циклотронот при напон меѓу електродите од еден милион волти е околу 100 MeV.

За да се добијат јони со значително поголема енергија отколку што можат да се добијат при обичниот циклотрон, советскиот физичар В. И. Векслер предложи два начина за компензирање на влијанието на прираштајот на масата на брзите јони на времето t , за кое јоните минат една полукружна патека во празнината на електродите. Благодарение на тие два начина се постигнува да и јони што се движат со поголема брзина се одржат во фаза со приложениот наизменичен напон на електродите, т. е. да стигнуваат меѓу електродите секогаш кога напонот ќе им соопшти максимум енергија односно забрзување во смерот на нивното движење.

Еден од овие начини е да се зголемува јачината на магнетното поле H пропорционално на зголемувањето на масата на јонот. На овој начин односот m/H ќе остане константен и спрема равенката (7), времето t , за кое јонот ќе мине една полукружна патека во празнината на електродите, нема да се менува со зголемувањето на масата на јонот и потребниот синхронизам меѓу движењето на јонот и промените на напонот ќе биде запазен.

Друг начин за да се запази синхронизмот односно јонот, чија маса се зголемува, да остане во фаза со приложениот наизменичен напон меѓу електродите е, да јачината

на магнетното поле остане константна, а да се намалува постепено честотата на приложениот наизменичен напон, паралелно со зголемувањето на масата на јоните. Циклотрон кај кого што е исползуван овој втор начин за запазување на синхронизмот, се вика синхроциклотрон или физотрон.

Спрема тоа синхроциклотронот е циклотрон *при кого што зголемувањето на времето t , за коешто јоните ќе минат една полукружна патека во празнината на електродите, а кое зголемување настанува поради зголемувањето на нивната маса со растењето на нивната брзина, се компензира со постепеношто намалување на честотата на приложениот наизменичен напон односно со постепеношто растење на неговиот период.*

Наголемувањето на честота на приложениот наизменичен напон на електродите за да се компензира зголемувањето на брзината, се остварува со вклучување во колото на генераторот на наизменичниот напон еден променлив кондензатор којшто брзо се врти.

Синхроциклотронот на универзитетот во Беркли во Калифорнија, кој има електромагнет што тежи 4000 тона, дава деутрони со енергија 200 MeV , а алфа честици со енергија 400 MeV . За добивање на овие енергии на деутроните и алфа честичите, приложениот наизменичен напон на електродите се променува од 11,5 милиони херца, која вредност ја има во моментот на уфрлањето на јоните во центарот меѓу електродите, па до 9,8 милиони херца, која вредност ја има во моментот кога јоните стигнат до периферијата на електродите.

Ако се има во предвид равенката (7) не е тешко да се разбере, зошто при овие два вида различни јони може да се ползува иста промена на честотата на приложениот наизменичен напон на електродите, т. е. од 11,5 милиони херца до 9,8 милиони херца. Времето t , за кое еден јон мине една полукружна патека во празнината на електродите, не зависи само од масата m на јонот, туку поточно речено од односот $\frac{m}{e}$, т. е. од односот на неговата маса и неговиот електричен полнеж. За деутроните, чија што маса е 2 ME , (масени единици), а елементарниот полнеж 1 елементарна единица количество електричество, овој однос е ист, како и за алфа честичите, чија маса е 4 ME , а електричниот полнеж 2 елементарни единици количество електричество. Заради овој еднаков однос, за овие два вида различни јони, може да се ползува иста промена на честотата на приложениот наизменичен напон на електродите.

Деутроните со енергији од 200 MeV и алфа честиците со енергија од 400 MeV имаат брзина околу $1,4 \cdot 10^{10} \text{ cm/sec}$ или околу 47% од брзината на светлината. На основа пак на равенката (3) нивната маса ќе биде за околу 14% поголема од нивната маса во мирување односно кога имаат мала енергија. Заради тоа честотата на приложениот наизменичен напон на електродите треба да се намалува во истиот однос за да деутроните и алфа честиците останат во фаза со приложениот наизменичен напон на електродите којшто ги забрзува. Ова е пак постигнато со споменатото намалување на честотата на приложениот наизменичен напон на електродите.

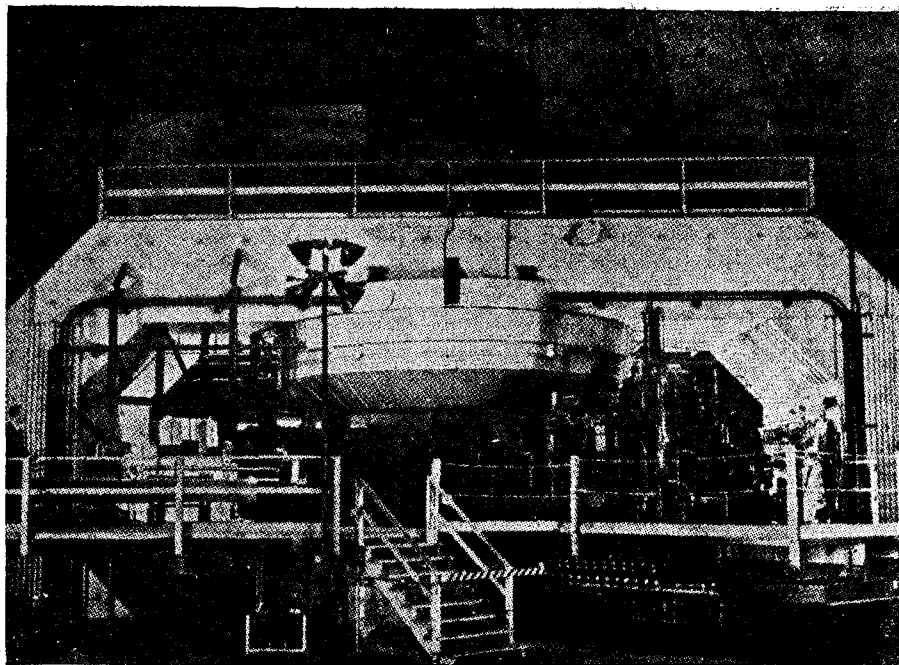
За протони, чии однос m/e е единица, приложениот наизменичен напон на електродите, при споменатиот синхроциклотрон, се променува од 23 милиони херца, која вредност е има во моментот на уфрлувањето на протоните во центарот меѓу електродите, па до 15,9 милиони херца, која вредност е има во моментот кога протоните ја достигнуаат периферијата на електродите. Со оваа промена на честотата на приложениот наизменичен напон на електродите, се компензира промената на времето за коешто протоните ќе минат една полукружна патека во празнината на електродите, а која промена настанува поради зголемувањето на нивната брзина односно маса. На овој начин се добиваат протони со енергија од 350 MeV . На сл. 5 е претставен надворешниот изглед на споменатиот синхроциклотрон.

Бомбардирајќи танки ливчиња на берилиум или литиум со протони со енергија од 350 MeV , се добиваат неутрони со енергија од 280 MeV .

Кај циклотронот еден јон што го почнува своето движење во моментот кога приложениот наизменичен напон на електродите има максимална вредност V , после v завртувања тој добива енергија која одговара на напон од $2vV$, бидејќи при едно завртување тој двапати добива исто количество енергија односно едно исто забрзување, а тоа е секогаш кога минува низ тесниот простор меѓу електродите, каде на него дејствува поред магнетното и електричното поле.

Ако пак напонот кога јонот попадна во просторот меѓу електродите е само половина од максималниот напон, т. е. $\frac{V}{2}$, тогаш јонот ќе добива двапати помала енергија, односно забрзување, отколку што би добивал кога би во тој простор запаѓал во моментот кога приложениот наизменичен напон на електродите е максимален. Но синхронизмот меѓу движењето на јонот и промените на наизменичниот напон и во овој случај ќе биде запазен. Ова е заради тоа, што времето t , за кое тој ќе мине една полукружна патека

во празнината на електродите спрема равенката (7), не зависи од приложениот напон, туку зависи само од односот m/e , кој за даден јон е константна величина, и од јачината на магнетното поле H , кое исто така има константна величина. Разлика ќе биде само во тоа што ваков јон ќе добива двапати помала енергија односно забрзување кога



Сл. 5. Надворешен изглед на еден синхроциклотрон.

минува меѓу електродите и спрема тоа за да ја достигне максималната енергија определена со радиусот на електродите r , тој треба да направи двапати поголем број завртувања, отколку што му треба на оној јон што запаѓа во просторот меѓу електродите кога напонот има максимална вредност.

Од сето ова што го кажавме досега излегува, дека кај циклотронот ќе бидат забрзани и оние јони што не попаѓаат во просторот меѓу електродите кога напонот е максимален. Поред тоа потокот на јоните што го дава циклотронот може да се смета за константен, при сè што тој се состои од низа импулси што одговараат на секоја полуосцилација на приложениот наизменичен напон на елек-

тродите. Така на пример за честота на наизменичниот напон од 10 милиони херца, би се добило за време од една секунда 20 милиони импулси. Значи честотата на импулсите во овој случај е 20 милиони во секунда.

Кај синхроциклотронот, како што видовме, синхронизмот не се нарушува и при достигнувањето на големи енергии од страна на забрзуваните јони, што не е случај кај циклотронот. Но дури кај циклотронот сите јони чие што движење почнува во било кој момент ќе го минат целиот цикл на забрзување и ќе излезат од циклотронот, дотука тоа не е случај со синхроциклотрон. Кај синхроциклотронот целиот цикл на забрзување ќе го минат само оние јони чие што движење почнува блиску до моментот кога приложениот наизменичен напон на електродите мине низ својот максимум. Јони чие што движење ќе почне подоцна, нема да го минат целиот цикл на забрзување и спрема тоа за јонскиот поток што ќе излегува од синхроциклотрон тие се изгубени. Заради ова извонредно многу се намалува интензитетот на јонскиот поток кај синхроциклотронот, што е од друга страна пак компензирано со значителното зголемување на енергијата на јоните.

Поради споменатите причини кај синхроциклотронот јонскиот поток не може да се смета за континуиран, туку дисконтинуиран, испрекинат, што значи дека забрзаните јони ќе излегуваат од синхроциклотронот со прекиди, т. е. определен број пати во секунда, во вид на импулси. Честотата на овие импулси е извонредно многу помала од честотата на импулсите кај циклотронот. Таа износи околу шеесет импулси во секунда.

Работата на синхроциклотронот се одвива на тој начин што за времето дури се намалува честотата на приложениот осцилаторен напон, т. е. од нејзината почетна, па се до нејзината крајна вредност, т. е. за време од $\frac{1}{60}$ од секунда, паралелно со ова намалување на честотата се пренесува еден импулс на јони од центарот на електродите до нивната периферија. После ова честотата на приложениот осцилаторен напон се враќа на својата првобитна вредност и појавата се повторува по истиот начин, т. е. нов импулс на јони тргнува од центарот на електродите кон нивната периферија. Овој процес, кога синхроциклотронот работи, се повторува околу 60-пати во секоја секунда, што значи дека ефектот на јонскиот поток ќе се состои од 60 вакви јонски импулси односно од низа импулси со споменатата честота. Значи, ефектот на јонскиот поток ќе го одредуваат 60 вакви јонски импулси односно тој ќе се состои од една низа импулси што ќе следат еден по друг во временски интервал од една шеесетина од секунда.

Поред тоа што синхроциклотронот дава честици со многу поголема енергија отколку што дава циклотронот, тој има уште една предимност над циклотронот, а тоа е што за добивање на вака високо енергетски честици, приложениот напон на електродите има релативно мала амплитуда. Поред овие две предимства над циклотронот синхроциклотронот има и еден недостаток во споредба со циклотронот. Тој дава, како што видовме, многу помало количество забрзани јони во споредба со циклотронот.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] *M. S. Livingston*: High-energy accelerators, New York (1954).
 - [2] *S. Glasstone*: Sourcebook on atomic energy, New York (1950).
 - [3] *J. M. Cork*: Radioactivité et physique nucléaire, Paris (1949).
 - [4] *Э. В. Шполюский*: Атомная физика, том II, Москва—Ленинград (1951).
-