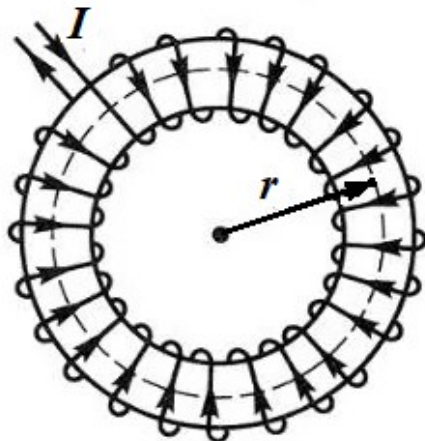


Тороидтың магнит өрісінің кернеулік векторының күш сызықтары центрлері тороидтың осінде жататын шеңбердің бойында жатады.

Контур ретінде радиусы r шеңберді таңдап алып, магнит өрісінің кернеулік векторы циркуляциясының өрнегін жазайық:

$$\oint \vec{H}_L \cdot d\vec{l} = N \cdot I$$



6.15-сурет

Тороидтың ішінде магнит өрісі біртекті болады $\vec{H} = \text{const}$, олай болса циркуляция өрнегін интегралдау арқылы $H \cdot l = N \cdot I$. Мұндағы $l = 2\pi r$ – шеңбердің ұзындығы, N - тороидтың орам саны. Сонда тороидтың магнит өрісінің кернеулік векторының өрнегі:

$$H = \frac{N \cdot I}{2\pi r} \quad (6.39)$$

$H = \frac{B}{\mu \cdot \mu_0}$ екендігін ескерсек, (6.39)-өрнекті мына түрде жазуға болады:

$$B = \frac{\mu \cdot \mu_0 \cdot N \cdot I}{2\pi r} \quad (6.39^*)$$

Бақылау сұрақтары

1. Токтардың өзара әсерлесуінің механизмін түсіндір.
2. Тоғы бар жазық тұйық контурдың магнит өрісімен әсерлесуін баянда.
3. Магнит индукция векторының бағытын анықтауды мысалдармен түсіндір.
4. Био-Савар-Лаплас заңын жаз, оның физикалық мағанасын түсіндір.
5. Био-Савар-Лаплас заңын қолданып түзу токтың және шеңберлі токтың магнит өрісін анықтау өрнектерін қорытып жаз.
6. Екі параллель токтардың өзара әсерлесу механизмін баянда.
7. Магнит өрісі үшін Остроградский-Гаус теоремасын жаз.
8. Магнит өрісінің кернеулік векторы циркуляциясы және толық ток заңын қорытып шығар.

Лекция №7. Электр және магнит өрістерінің қозғалыстағы зарядқа әсері

7.1 Магнит өрісінің қозғалыстағы зарядқа әсері. Лоренц күші.

7.2 Электр және магнит өрісінде қозғалған элементар бөлшектің меншікті зарядын анықтау. Томсон тәжірибесі.

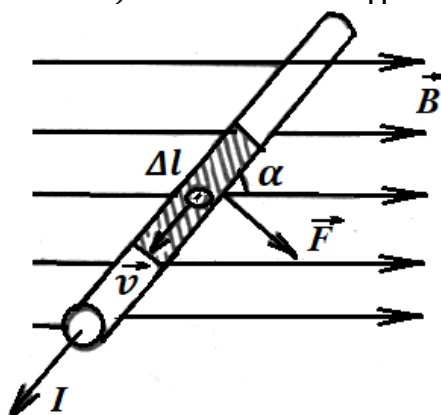
7.3 Холл эффектісі.

7.4 Зарядталған бөлшектердің үдеткіші.

7.1 *Магнит өрісінің қозғалыстағы зарядқа әсері. Лоренц күші.* Магнит өрісіне тогы бар өткізгішті ендіргенде оған магнит өрісі тарапынан күш әсер ететіндігі, ол күш Ампер күші деп аталатындығы белгілі. Сол сияқты көптеген эксперименттер магнит өрісі өзіне енген қозғалыстағы зарядтарға да күшпен әсер ететіндігін көрсетеді.

Магнит өрісіне енген қозғалыстағы зарядқа өріс тарапынан әсер ететін күш Лоренц күші деп аталады.

Индукция векторы \vec{B} болатын біртекті магнит өрісіндегі ұзындығы l тогы бар өткізгішті қарастырайық (7.1-сурет). Магнит өрісінің күш сызықтары (индукция векторының бағыты) өткізгішке α бұрышпен орналасқан болсын.



7.1-сурет

Тогы бар өткізгішке магнит өрісі тарапынан Ампер күші әсер етеді. Металл өткізгіште электр тогы электрондардың бағытталған қозғалысы болып табылатындықтан, электронға магнит өрісі тарапынан әсер етуші күшті анықтайық. Тогы бар өткізгіш бойынан бөліп алынған Δl элементке магнит өрісі тарапынан әсер етуші Ампер күшінің өрнегін жазсақ: $F_A = IB \cdot \Delta l \cdot \sin \alpha$

Ток күшінің концентрацияға тәуелділігінен: $I = envS$ Сонда Ампер күші

$$F_A = envS B \cdot \Delta l \cdot \sin \alpha \quad (7.1)$$

мұндағы e - электронның заряды, n - өткізгіштің бірлік көлеміндегі еркін электрондардың саны (концентрациясы), v - электрондардың реттелген қозғалысының жылдамдығы, S - өткізгіштің көлденең қимасының ауданы.

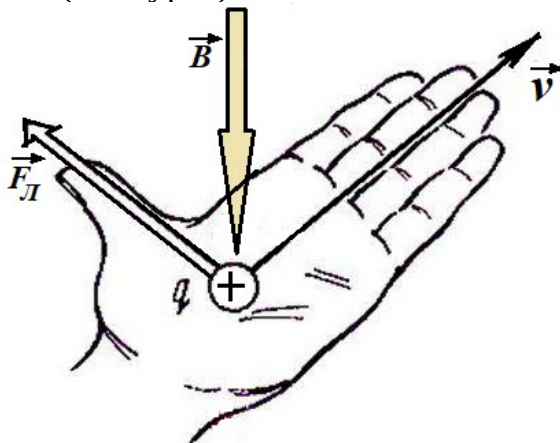
Көлденең қимасының ауданы S болатын өткізгіштің Δl элементіндегі барлық электрондар саны $N = n \cdot \Delta l \cdot S$ болса, өткізгіш ішімен реттелген қозғалысқа түсетін әрбір электронға әсер ететін күш (7.1)-өрнекпен анықталатын Ампер күшінің өткізгіштің Δl элементіндегі барлық электрондар

санына қатынасына тең болады: $F_L = \frac{F_A}{N} = \frac{envS B \cdot \Delta l \cdot \sin \alpha}{n \cdot \Delta l \cdot S} = ev B \sin \alpha$

Сонымен магнит өрісіндегі қозғалатын q зарядқа магнит өрісі тарапынан әсер ететін күш Лоренц күші деп аталады: $F_L = q v B \sin \alpha \quad (7.2)$

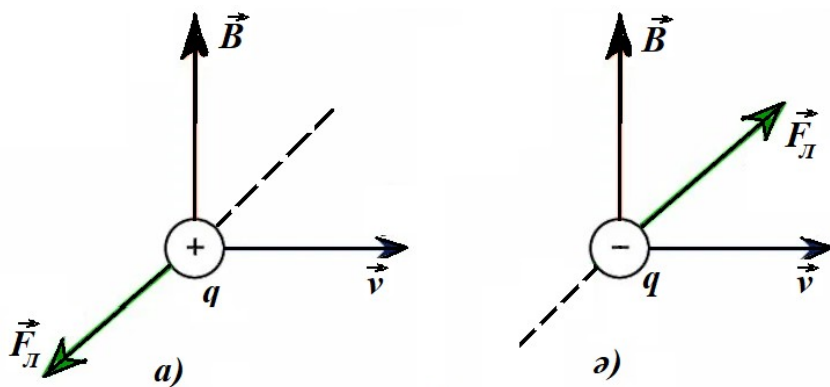
(7.2)-өрнек Лоренц күшінің өрнегі болып табылады. Векторлық түрде ол былайша жазылады: $\vec{F}_L = q \cdot [\vec{v} \cdot \vec{B}]$ (7.2*)

Лоренц күшінің бағыты Ампер күшінің бағыты сияқты «сол қол» ережесімен анықталады, ол былайша тұжырымдалады: егер сол қолды магнит өрісі индукция векторының перпендикуляр құраушысы алақанға енетіндей, ал созылған төрт саусақты оң зарядталған бөлшектің қозғалыс бағытымен сәйкес келетіндей етіп орналастырса, 90° бұрылған басбармақ бағыты магнит өрісі тарапынан қозғалыстағы зарядқа әсер ететін Лоренц күшінің бағытына сәйкес келеді (7.2-сурет).



7.2-сурет

Магнит өрісіндегі қозғалатын q зарядқа магнит өрісі тарапынан әсер ететін Лоренц күшінің бағыты зарядтың таңбасына байланысты болады (7.3-сурет). Заряд оң таңбалы болса, онда Лоренц күшінің бағыты «сол қол» ережесімен сәйкес анықталады, ал егер заряд теріс таңбалы болса, онда Лоренц күшінің бағыты «сол қол» ережесіндегі басбармақ бағытына қарама-қарсы бағытпен сәйкес келеді.



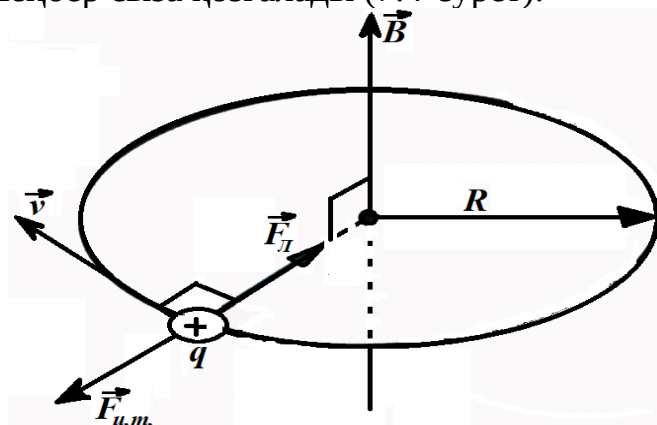
7.3-сурет

Лоренц күші әрқашан зарядтың орын ауыстыру (\vec{v}) бағытына перпендикуляр ($\vec{F}_L \perp \vec{v}$), олай болса Лоренц күші жұмыс жасамайды, тек зарядтың жылдамдығының бағытын ғана өзгертеді, магнит өрісінде қозғалған зарядтың жылдамдығының шамасы өзгермейді.

Заряды q бөлшекке Лоренц күші әсер етуі үшін (7.2)-өрнектен көрініп тұрғандай бөлшек магнит индукциясы векторының бағытына белгілі бір бұрышпен \vec{v} жылдамдықпен енуі керек, яғни қозғалыс жылдамдығының векторы мен магнит индукциясы векторы арасындағы бұрыштың синусының

мәні ешқашан нөлге тең болмауы тиіс. Мысалы сыртқы магнит өрісіне енген зарядталған бөлшектің \vec{v} жылдамдық векторы магнит индукциясы векторымен бағыттас немесе қарама-қарсы болса ($\vec{v} \parallel \vec{B}$), $\sin \alpha = 0$ болады, бұл жағдайларда Лоренц күші бөлшекке әсер етпейтіндіктен ол \vec{v} жылдамдықпен бірқалыпты түзу сызықты қозғалыс күйін сақтайды.

Заряды q бөлшек магнит өрісінің күш сызықтарына перпендикуляр бағытта \vec{v} жылдамдықпен енсе ($\vec{v} \perp \vec{B}$), $\sin \alpha = 1$ болады, бұл жағдайда Лоренц күшінің мәні тұрақты, ал бағыты қозғалыс траекториясына жүргізілген жанамаға перпендикуляр болатындықтан бөлшек \vec{v} тұрақты жылдамдықпен магнит өрісінде шеңбер сыза қозғалады (7.4-сурет).



7.4-сурет

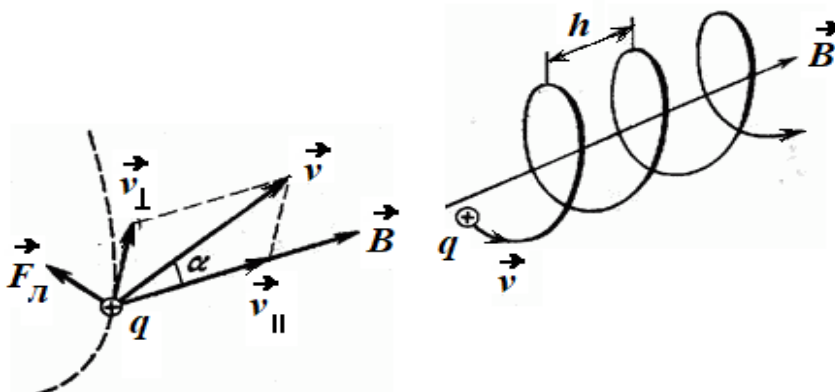
Бұл жағдайда заряд шеңбер бойымен тұрақты \vec{v} жылдамдықпен қозғалатындықтан оған әсер ететін Лоренц күші мен центрден тепкіш күш бір-бірін теңгереді:

$$qvB = \frac{mv^2}{R} \Rightarrow qB = \frac{mv}{R} \quad (7.3)$$

(7.3)-өрнектен шеңбердің радиусын $R = \frac{mv}{qB}$ және зарядтың айналу периодын анықтауға болады $v = \frac{2\pi R}{T} \Rightarrow T = \frac{2\pi R}{v} = \frac{2\pi m}{qB}$ (7.4)

\vec{v} жылдамдықпен қозғалып келе жатқан заряды q бөлшек біртекті магнит өрісі индукция векторының бағытына $\alpha \neq 90^\circ$ бұрышпен енсе, онда бөлшек винт траектория бойымен қозғалады (7.5-сурет).

Бұл жағдайда Лоренц күші зарядталған бөлшекті шеңбер сызуға бағыттағанымен, оның бастапқыдағы жылдамдығының \vec{B} векторына параллель құраушысы ықпалымен бөлшек винт пішінді траекториямен қозғалады.



7.5-сурет

7.5-суреттегі h қадам келесі өрнекпен анықталады: $h = v_{\perp} \cdot T = v_{\perp} \cdot \frac{2\pi m}{qB}$

мұндағы: $v_{\perp} = v \cdot \cos \alpha$ екендігін ескерсек: $h = \frac{2\pi m}{qB} \cdot v \cdot \cos \alpha$ (7.5)

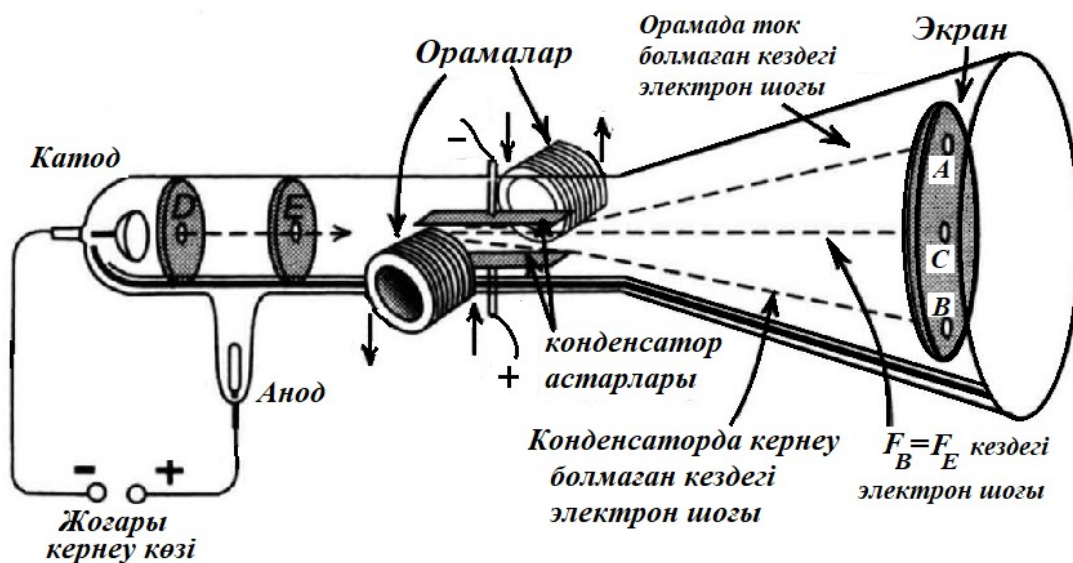
ал винттің сызықтық радиусы $R = \frac{mv_{\perp}}{qB}$ мұндағы: $v_{\perp} = v \cdot \sin \alpha$ екендігін ескерсек:

$$R = \frac{mv}{qB} \cdot \sin \alpha \quad (7.6)$$

7.2 *Электр және магнит өрісінде қозғалған элементар бөлшектің меншікті зарядын анықтау. Томсон тәжірибесі.* Заряды q бөлшек \vec{v} жылдамдықпен қозғалып келіп, әрі электр өрісіне (\vec{E}) әрі магнит өрісіне (\vec{B}) енгенде бөлшекке біртекті екі күш: электр өрісі тарапынан электрлік күш ($\vec{F}_{эл} = q\vec{E}$), ал магнит өрісі тарапынан Лоренц күші ($\vec{F}_{л} = q[\vec{v} \cdot \vec{B}]$) әсер етеді. Олай болса, зарядталған бөлшекке әсер етуші қорытқы күш электрлік күш пен Лоренц күшінің векторлық қосындысымен анықталады:

$$\vec{F} = q \cdot \vec{E} + q \cdot [\vec{v} \cdot \vec{B}] \quad (7.7)$$

1897 жылы Дж.Дж.Томсон электрондық-сәулелік түтікшенің көмегімен электронның меншікті зарядын ($\frac{e}{m_e}$) анықтады (7.6-сурет).



7.6-сурет

Анодтағы саңылаудан шыққан электрондар шоғы жазық конденсатордың астарларының арасынан өтіп флуоресценциялық экранға түседі де ол жерде жарқырауық дақ пайда болады. Конденсатор астарларына кернеу беру арқылы электрондар шоғына біртекті электр өрісімен әсер еткенде олар вертикал ығысып, экрандағы А нүктесіне түседі. Суреттен көрініп тұрғандай түтік электромагнит (орама) полюстерінің арасына орналастырылған. Ток көзіне жалғау арқылы электромагниттің көмегімен электрондар шоғының жолының сол бөлігінде электр өрісіне перпендикуляр біртекті магнит өрісін тудыруға болады.

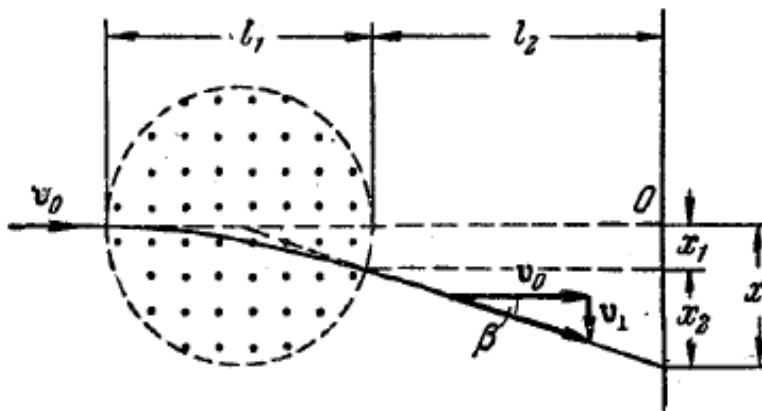
Осылайша электрондар шоғына біртекті магнит өрісімен әсер еткенде олар вертикал ығысып, экрандағы В нүктесіне түседі.

Әрбір өрісті жеке бергенде электрондар шоғы вертикаль бағытта ығыстырады, ал екі өрісті қатар тудырғанда және электрондар шоғына әсер етуші электрлік күш пен Лоренц күші модулі жағынан тең болған жағдайда ($F_B = F_E$) электрондар шоғы экрандағы С нүктесіне түседі. Томсон магнит өрісін қосып ол тудырған шоқтың ізінің ығысуын өлшеп (7.7-сурет), одан соң ол электр өрісін қосып, оның шамасын магнит өрісімен ығыстырылған шоқ С нүктесіне түсетіндей етіп таңдайды.

$$x = \frac{e}{m_e} B \frac{l_1}{v_0} \left(\frac{1}{2} l_1 + l_2 \right) \quad (7.8)$$

Бұл жағдайда электр өрісі мен магнит өрісі электрондық шоққа шамалары жағынан бірдей бағыттары жағынан қарам-қарсы күштермен әсер етеді, яғни келесі шарт орындалады: $eE = e v_0 B$ (7.9)

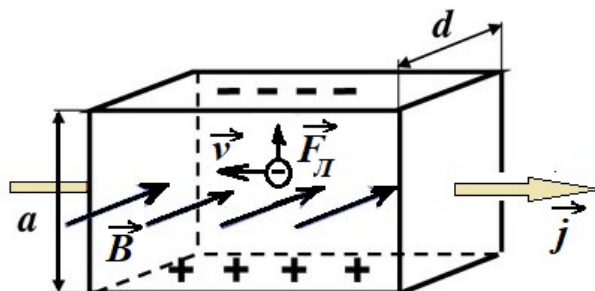
(7.8)-ші және (7.9)-өрнектерді бірге шеше отырып, Томсон электронның меншікті зарядын $\frac{e}{m_e}$ және оның жылдамдығын (v_0) есептеді.



7.7-сурет

Эксперимент нәтижесінде электронның меншікті заряды $\frac{e}{m_e} = 1,76 \cdot 10^{11} \frac{Кл}{кг}$ болатындығы анықталды.

7.3 Холл эффектiсi. Біртекті магнит өрісіне оның индукция векторының бағытына перпендикуляр етіп тогы бар тік төртбұрышты өткізгішті орналастырғанда оның екі қарама-қарсы (астыңғы және үстіңгі жағында) жағында потенциалдар айырымы пайда болады да, бір жағына тек теріс таңбалы зарядтар, ал қарама-қарсы жағына оң таңбалы зарядтар шоғырланады. Бұл құбылысты ең алғаш 1879 жылы американи физигі Э.Холл байқағандықтан құбылыс *Холл эффектiсi* деп аталады (7.8-сурет).



7.8-сурет

Зарядтардың тік төртбұрышты өткізгіштің қарама-қарсы жағына шоғырлануы оларға әсер ететін Лоренц күші ($F_L = e v B$) мен электрлік күш ($F_{эл} = qE$) модулі жағынан теңескенде стационар күйге келеді $e v B = eE$.

мұндағы электр өрісінің кернеулігі $E = \frac{U}{d}$ екендігін ескерсек: $v B = \frac{U}{d}$. Соңғы өрнектен *Холл эффектiсi* кезінде өткізгіштің қарама-қарсы жағында пайда болатын потенциалдар айырымы: $U = v B d$. Ток тығыздығының өрнегінен:

$$v = \frac{j}{en} \text{ екендігін ескерсек: } U = \frac{1}{en} \cdot j B d \quad (7.9)$$

мұндағы: $\frac{1}{en} = R$ - Холл тұрақтысы деп аталады. $U = R \cdot j B d$ (7.9*)

Холл эффектiсi кезінде өткізгіштің жоғарғы және төменгі жақтарының арасындағы пайда болатын потенциалдар айырымы өткізгіштегі ток тығыздығына, өткізгіштің қалыңдығына және магнит өрісі индукциясының шамасына тура пропорционал болады.

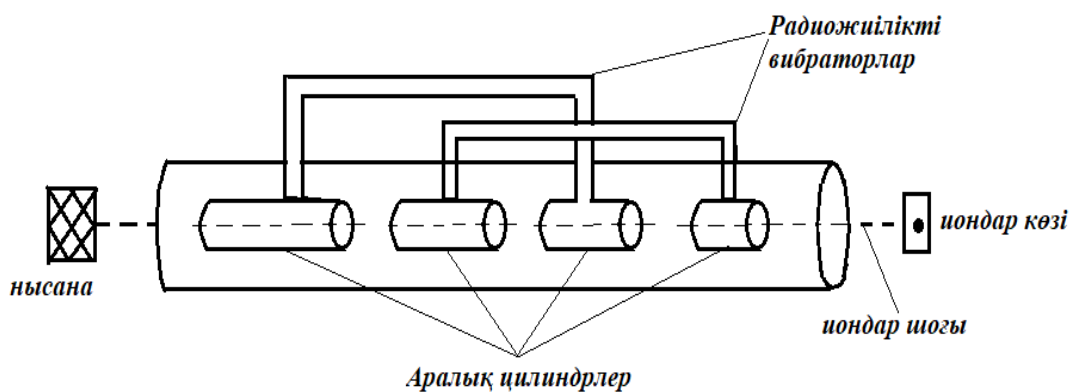
7.4 Зарядталған бөлшектердің үдеткіші. Зарядталған бөлшектерге өріс арқылы әсер етіп, оларға үдеу беруге болады. осы принциппен жұмыс жасайтын құрылғылар үдеткіштер деп аталады.

Зарядталған бөлшектердің үдеткіші деп электр және магнит өрістерінің көмегімен жоғары энергиялы бөлшектер (протондар, электрондар, иондар т.б.) шоғын алуға және оны басқаруға мүмкіндік беретін құрылғыны айтады.

Үдеткіштер бір-бірінен үдететін зарядталған бөлшектер типімен, бөлшектерге берілетін энергияның мөлшерімен, бөлшектер шоғының интенсивтігімен ерекшеленеді. Үдеткіштер жұмыс істеу принципіне қарай негізінен үздіксіз және импульстік болып екіге бөлінеді. Үздіксіз үдеткіштерде уақытқа бойынша бірқалыпты бөлшектер шоғы алынады, ал импульстік үдеткіштерде бөлшектер шоғы импульс түрінде беріледі және импульс ұзақтығымен ерекшеленеді.

Үдеткіштер үдетілетін бөлшектердің типіне сәйкес *электрондық үдеткіштер, протондық үдеткіштер, иондық үдеткіштер* болып бөлінеді. Сонымен қатар, үдетілетін бөлшектер шоғының траекториясының пішініне және бөлшектерді үдету механизміне байланысты үдеткіштер *сызықтық, циклдік* болып бөлінеді. *Сызықтық үдеткіштерде* бөлшектердің траекториясы түзу сызыққа жақын болады, ал *циклдік үдеткіштерде* бөлшектердің траекториясы дөңгелек немесе спираль пішінді болады.

Сызықтық үдеткіштерде зарядталған бөлшектер электростатикалық өріс көмегімен (мысалыға Ван-де-Грааф жоғары кернеулі генераторының көмегімен) бірнеше қайтара үдетіліп, кинетикалық энергиясы $W_k = q(\varphi_1 - \varphi_2)$, 10 МэВ-қа дейін жеткізіледі (7.9-сурет).

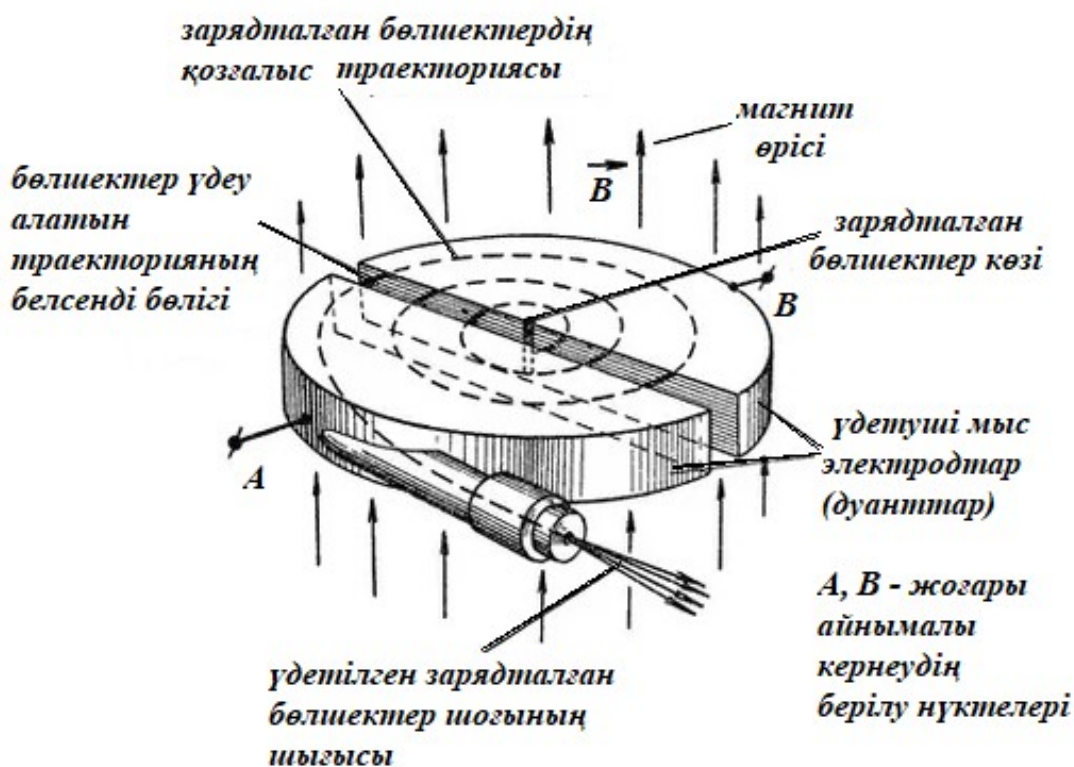


7.9-сурет

Сызықтық резонанстық үдеткіштерде зарядталған бөлшектер бөлшектердің қозғалысымен синхронды өзгеретін аса жағары жиілікті электр өрісінің көмегімен үдетіледі. Мұндай үдеткіштерде протондар бірнеше ондаған МэВ энергияға дейін, ал электрондар бірнеше ондаған ГэВ энергияға дейін үдетіледі.

Циклдік үдеткіштердің бірі **циклотрон** - ауыр бөлшектердің (протондар, иондар) циклдік резонанстық үдеткіші. Ол жарты дөңгелек қорап түрінде жасалған екі электродтан (дуанттан) тұрады (7.10-сурет).

Біртекті магнит өрісін тудырушы электромагнит полюстерінің аралығына магнит өрісінің күш сызықтарына перпендикуляр етіп ауасы сорып алынған қорапқа орнатылған дуанттар орналастырылады. Дуанттарға (А және В нүктелерінде) жоғары жиілікті айнымалы кернеу беріледі. Берілген кернеу ең үлкен шамасына жеткен мезетте дуанттар арасындағы саңылауға оң зарядталған бөлшек енгізілсе, онда ол теріс электродқа қарай қозғалады. Дуанттар арасында бөлшек тек магнит өрісінде ғана радиусы бөлшектің жылдамдығына пропорционал шеңбер бойымен қозғалады. Дуанттар арасындағы кернеудің өзгеру жиілігін келесідей принциппен тандап алынды: бөлшек шеңбердің жартысынан өтіп саңылауға келген кезде дуанттар арасындағы потенциал айырымы таңбасын өзгертіп, амплитудалық мәніне жететіндей мезет алынады. Сонда бөлшек тағы да үдетіледі де, екінші дуантқа екі есе көп энергиямен ұшып кіреді. Үлкен жылдамдыққа ие болған бөлшек екінші дуантта радиусы үлкенірек ($R \propto v$) шеңбер бойымен қозғалатын болады. Егер кернеудің өзгеру жиілігін бөлшектің айналу периодына теңгерсек, онда ол спиральға жақын келетін сызық бойымен қозғалады да, дуанттар арасындағы саңылау арқылы әр өткен сайын qU -ға тең қосымша энергия үлесін алады. Циклотрон көмегімен протонды 25 МэВ энергияға дейін үдетуге болады.



7.10-сурет

Циклдік үдеткіштердің ең алғашқысы болып саналатын циклотронды АҚШ-тың Калифорния штатындағы Беркли университетінде 1930 жылы Э.Лоуренс жасап шығарды. Осы еңбегі үшін Э.Лоуренс 1939 жылы физика саласы бойынша Нобель сыйлығының иегері атанды.

Бақылау сұрақтары

1. Лоренц күшінің өрнегін қорытып шығар.
2. Лоренц күшінің бағыты жөнінде ойыңды тұжырымда.
3. Магнит өрісінің күш сызықтарына перпендикуляр енген зарядтың траекториясы туралы баянда.
4. Магнит өрісінің күш сызықтарына $\alpha \neq 90^\circ$ бұрышпен енген зарядтың траекториясы туралы ой пікіріңді тұжырымда.
5. Хоол эффектісінің пайда болу механизмін түсіндір.
6. Сызықтық үдеткіштердің жұмыс істеу принципін түсіндір.
7. Циклотронның құрылымы мен жұмыс істеу принципін талда.