

# Ciklotron szimulációja

(C. Sükösd 2014)

## Bevezetés

1929. január 5-én Szilárd Leó szabadalmi kérelmet nyújtott be egy olyan részecskegyorsítóra vonatkozóan, amelyben a részecskék körpályán mozognak. Tőle függetlenül a magyar Gaál Sándor küldött be egy hasonló tartalmú cikket 1929. május 6-án a Zeitschrift für Physik német nyelvű folyóiratnak. Ugyancsak tőlük függetlenül 1932-ben E. Lawrence amerikai fizikus megépítette az első ciklotront, amelyért 1939-ben Nobel-díjat is kapott.

A ciklotronban a részecskéket homogén mágneses mező tartja körpályán, s általában egyenes körmozgást végeznek. Amikor azonban áthaladnak a „gyorsítórésen” - a kör egyik átmérőjén -, az állandó mágneses mezőn kívül még pályairányú elektromos mező is hat rájuk, amelynek hatására a sebességük abszolút értéke - s ezzel az energiájuk is - nő. Mivel a körpályán haladó részecskék időről időre ismételten áthaladnak a gyorsítórésen, ezért ugyanazzal a feszültséggel sokszor lehet őket gyorsítani, feltéve hogy a gyorsítórésben a feszültség a körpályán való mozgásnak megfelelő ütemben váltakozik, s így „szinkronban” marad a keringő részecskékkel.

Ez annak a berendezésnek az alapelve, amit ma ciklotron néven ismerünk, s amelynek megalkotásáért E. Lawrence amerikai fizikus 1939-ben Nobel-díjat kapott.

A ciklotron beállításához szükséges összefüggések a *Számítási segítségben* vannak. A *Szimulációs program leírása* c. rész a program használatával kapcsolatos ismereteket tartalmazza.

---

## Mintafeladat

**Állítsunk elő kb. 20 MeV energiájú protonnyalábot a szimulációs programban szereplő, 200 cm sugarú ciklotronnal.**

Annál jobb lesz az eredményünk,

- ...minél pontosabban megközelítjük a 20 MeV-et a nyaláb energiájának átlagértékével;
- ...minél kisebb lesz a nyaláb energiájának a szórása;
- ...minél nagyobb hányadát tudjuk a kibocsátott részecskéknek a céltárgyra irányítani;
- ...minél kisebb lesz a blende és a ciklotronfal radioaktivitása.

---

## A szimulációs program leírása

A szimulációban szereplő ciklotron egy „képzelt” berendezés, nincs a valóságban ilyen paraméterekkel rendelkező gyorsító.

A képernyő bal oldalán vannak a beállítható üzemi paraméterek, a jobb oldal felső részén egy ciklotron vázlatos rajza látható. A kicsinyítés mértéke akkora, hogy a ”valóságban” a

ciklotron sugara 200 cm. A jobb oldal alsó részén néhány grafikont hívhatunk elő. Ezeknek az eredmények megjelenítésében van szerepe.

Először a képernyő bal oldalán látható beviteli mezőket vesszük sorra, amelyekkel az egyes üzemi paraméterek állíthatók be.

### Mágneses mező

A ciklotron rajzán fekete színű az a terület, ahol a képernyő síkjára merőleges állandó **mágneses mező** hat a részecskékre. A mágneses mező maximális értéke 0,5 T.

A rajz felső részén lévő világoskék téglalap olyan tartomány, ami még a ciklotron vákuumkamrájához tartozik, de ahol a mágneses mező 0. Az ide bekerülő részecskék egyenes vonalban „balról jobbra” mozognak.

### Gyorsító feszültség

A ciklotron rajzán lévő függőleges fehér vonal jelöli ki a gyorsítórést. Itt a részecskékre gyorsító elektromos mező hat. A gyorsítórés két oldalán van a két félteke (ezeket a szakemberek „D”-nek hívják – az alakjuk alapján). A gyorsító mezőt a két féltekére adott periodikusan váltakozó feszültséggel állítják elő. A gyorsító mező a rajzon „vízszintes” irányú. A gyorsító feszültség **frekvenciáját és amplitúdóját** a megfelelő beviteli mezőkben adhatjuk meg. A váltakozó feszültség pillanatnyi értékét a jobb oldali rajzon látható, periodikusan jobbra-balra mozgó pont jelzi. (Gondoljuk azt, hogy a bal oldali D le van földelve, és a mozgó pont az ehhez képest mért potenciál pillanatnyi értékét jelzi.) Fontos tudni, hogy nem lehet akármekkora frekvenciát választani, hiszen a ciklotron két féltekéje, mint üregrezonátor, csak bizonyos frekvencia tartományokra tud „rezonálni”. A megengedett frekvenciatartomány 3 MHz-től 10 MHz-ig terjed. Hasonlóképpen, a váltakozó feszültséget előállító oszcillátor legfeljebb 1000 kV amplitúdójú feszültséget tud előállítani (ezek az értékek a valóságban mások, itt a szimulációs feladat könnyítése miatt engedünk meg ilyen értékeket). A tájékozódás kedvéért a ciklotron rajza alatt láthatjuk, hogy a legnagyobb energiájú részecske energiája mennyivel változott ( $dE$ ) a gyorsítórésen történő áthaladásakor.

### Részecskék

Ebben a beviteli részben választhatjuk ki, hogy milyen részecskéket kívánunk gyorsítani. A ciklotronunk háromféle részecskét tud kezelni: protonokat, deuteronokat és alfa-részecskéket ( $\text{He}^{2+}$  ionokat).

### Szimulációs beállítások

Itt három paramétert állíthatunk. Kérhetjük azt, hogy a program csak **egyetlen részecskét** indítson el (ezt az üzemmódot célszerű használni a „beállítások” ideje alatt), de kérhetjük azt is, hogy a program véletlenszerű időkből **folyamatosan** indítson újabb és újabb részecskéket (ezt az üzemmódot kell választani, amikor „nyalábot” kell előállítani).

A **Lassítás** nevű mező csak a megjelenítést befolyásolja, a számolást nem. Ha valamilyen oknál fogva - pl. a beállításkor - le akarjuk lassítani a szimulációt, hogy jobban megfigyelhessük, hogy mi történik, adjunk meg ide nagyobb értéket. Egy bizonyos értéknél kisebbet megadva a program futása már nem gyorsul tovább, mert elértük a processzor sebességének a határát.

A **Pályagörbe** bekapcsolásával kérhetjük, hogy a program rajzolja ki a részecskék pályáját a képernyőre. Sok részecske indítása esetén a pályarajzolást a program csak a legnagyobb energiájú (általában sárgával jelölt) részecskére végzi el, a többi részecske pályájából csak egy-egy aktuális szakaszt rajzol ki (különben a képernyő hamarosan megtelne a pályákkal).

**Céltárgyba érkező részecskék** elnevezésű mezők:

A felhasználók számára fontos, hogy a szolgáltatott nyalábban repülő részecskék energiája ne nagyon térjen el a megadott értéktől. Az lenne a legjobb, ha mindegyik részecskének

pontosan ugyanakkora energiája lenne. Ezek a mezők azt mutatják meg, hogy ezt mennyire sikerült megvalósítani. Láthatjuk a beérkező részecskék energiájának középértékét, és az ettől való eltérést (szórást). Ezeknek az értékét a program állítja, közvetlenül nem állíthatók.

### **Ionforrás, blende, ciklotronfal, radioaktivitás**

A gyorsítandó részecskék **ionforrás**ból jönnek. Az ionforrás helyét egy kis fehér négyzet jelzi valahol a ciklotron közepe táján. A **blende** pedig tulajdonképpen egy fémlap, amely a ráeső részecskéket elnyeli, és ezzel megakadályozza őket a további mozgásukban. A blende helyét egy kék színű kis téglalap jelzi a rajzon. Az **Ionforrás** és **Blende paramétere**i mezőkben megadhatjuk a középpontjuk Y koordinátáját. Az X koordinátájuk mindig 0. Az origó a ciklotron középpontjában van. Mechanikai okok miatt az ionforrás középpontja az origótól Y irányban csak a [0,-40 cm] intervallumban lehet. Megadhatjuk még a blende hosszúságát (Y-irányú kiterjedését) is.

A **ciklotronfal** fémből készült (ugyancsak kék színnel jelzett), és abban hasonlít a blendéhez, hogy a ráeső részecskéket elnyeli. Fontos tudni, hogy minden 0,45 MeV-nél nagyobb energiájú részecske, amely a blendére vagy a falra esik, magreakciók révén **radioaktivitást** hoz létre. Mégpedig a létrehozott aktivitás a becsapódott részecske tömegegységre eső energiájának (energia/tömeg) monoton növekedő (de nem lineáris) függvénye. A létrehozott radioaktivitás a felezési idejének megfelelően csökken, a becsapódó részecskék következtében pedig nő. Így előbb-utóbb egyensúly alakul ki, amely körül kisebb ingadozások figyelhetők meg. A *feladat értékelésekor az egyik szempont* az, hogy az előírt nyalábot a lehető legkisebb radioaktivitás létrehozásával kell megvalósítani.

### **Eredmények**

A szimuláció során elért eredményeinket a jobb oldali alsó ábrákon értékelhetjük ki. Itt három grafikon közül választhatunk: **Energia eloszlás**, **Időbeli eloszlás** és **További adatok**. Ezek vizsgálatának azonban csak akkor van igazán értelme, ha a szimulációt **folymatos** üzemmódban futtattuk, s már érkeztek részecskék a céltárgyra. A **További adatok** grafikonjain látjuk, hogy hány részecskét nyelt el a **céltárgy**, a **blende** és a **ciklotronfal**, de itt látjuk azt is, hogy a blende és a ciklotronfal mennyire lett radioaktív az elnyelt részecskék következtében. (A radioaktivitást jellemző számok önkényes egységekben vannak.) Természetesen a számunkra hasznos részecskék a „céltárgy” oszlopban vannak.

Az **Energia eloszlás** és az **Időbeli eloszlás** grafikonok a céltárgyra megérkezett „hasznos” részecskékre adnak információt. Az egyik a részecskék energia (MeV) szerinti, a másik pedig az idő szerinti (másodperc) eloszlását mutatja. (Figyeljük meg, hogy a ciklotronból kinyert nyaláb időben nem folytonos, hanem csak egyes időpontok közelében csapódnak be részecskék a céltárgyba.)

A függőleges tengelyek skáláját a tengely mellett lévő fel/le nyilakkal változtathatjuk.

## Számítási segítség

Az alábbi összefüggések segíthetnek a ciklotron paramétereinek beállításánál.

1)  $\mathbf{B}$  indukciójú mágneses mezőben a  $\mathbf{B}$  vektorra merőleges  $\mathbf{v}$  sebességgel mozgó,  $q$  töltésű részecskére erő hat, amelynek abszolút értéke:  $F = qvB$ . Az erő iránya merőleges mind a  $\mathbf{B}$  vektorra, mind pedig a  $\mathbf{v}$  sebességvektorra. Ezt az erőt Lorentz-erőnek hívjuk, s ez szolgáltatja a körpályán való mozgáshoz a centripetális erőt, azaz  $m v^2 / R = qvB$ . Itt  $m$  a részecske tömege,  $R$  pedig a körpálya sugara. Ennek alapján a mágneses mezőben mozgó töltött részecske körfrekvenciája könnyen meghatározható:  $\omega = v/r = qB/m$ .

A frekvencia pedig:  $f = \omega / 2\pi = qB / (2\pi m)$ . Ha a részecske töltése  $q = Z \cdot e$ , és tömege  $m = A \cdot m_u$ , akkor  $f = e / (2\pi \cdot m_u) \cdot Z \cdot B / A = 15,3575 \cdot (Z \cdot B / A)$  [MHz].

A fenti egyenletből az  $R$  sugarú pályán haladó részecske sebességének abszolút értéke:  $v = (qB/m)R$ , és ezért mozgási energiája:  $E = (mv^2)/2 = (q^2 B^2 / 2m)R^2$ .

2) Ha egy  $q$  töltésű részecske  $U$  potenciálkülönbségen halad át, energiája megváltozik. Az energiaváltozás nagysága:  $\Delta E = qU$ . Ennek alapján változik meg a ciklotron gyorsítórésén áthaladó részecskék energiája is. Természetesen itt  $U$  helyébe azt az  $U(t)$  pillanatnyi értéket kell írni, amekkora a feszültség volt abban a pillanatban, amikor a részecske odaért a réshez!

3) A szimulációban a gyorsító feszültség a következőképpen függ az időtől:

$$U(t) = U_0 \cos(2\pi f t)$$

Itt  $f$  a frekvencia,  $U_0$  az amplitúdó. Látható, hogy a gyorsítófeszültség éppen maximális a „kezdeti” időpontban ( $t = 0$ ).