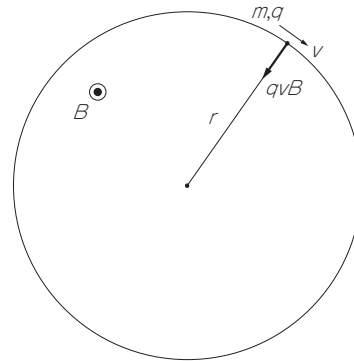


図 3-50 リスト 3-14 の実行画面例



磁場 B の向き：紙背から紙面向き

図 3-51 一様磁場内の荷電粒子の運動

3-14 | サイクロトロンの原理 図 3-50

● サイクロトロンの原理

図 3-51 のように、一様な磁場 B に垂直な平面内を速さ v で運動する正の荷電粒子(質量 m 、電荷 q)は磁場からローレンツ力 qvB を受け、等速円運動する。円の半径を r とすると、円運動方程式は、

$$\frac{mv^2}{r} = qvB \quad \therefore r = \frac{mv}{qB} \dots\dots\dots (3-64)$$

となる。これを用いて円運動の周期 T を求めると、

$$T = \frac{2\pi r}{v} = \frac{2\pi m}{qB} \dots\dots\dots (3-65)$$

が得られる。これによると、荷電粒子の円運動周期は粒子の速さや円の半径によらず、加えられた磁場の強さ(磁束密度) B のみに関係することがわかる。このことを利用して、ローレンスが陽子加速器であるサイクロトロンを発明した。図 3-52 のように一様な磁場 B の中で、二つの空洞 D_1 、 D_2 を対峙させ、両者間に式(3-65)に等しい周期の交流の高電圧 V をかけると、陽子は半周して D_1 と D_2 の間隙に来るごとに

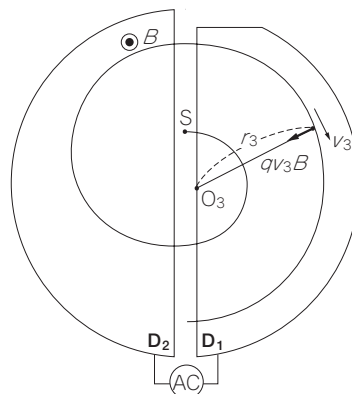


図 3-52 サイクロトロンの原理

高周波電源 (周期: T)

加速され、回転半径を増していくが、式(3-65)により回転周期は変わらない。D₁、D₂間の電圧Vによる1回ごとの加速で陽子の運動エネルギーはqV(J)ずつ増加していく：

$$\frac{1}{2}mv_{i+1}^2 = \frac{1}{2}mv_i^2 + qV \quad \therefore v_{i+1} = \sqrt{v_i^2 + 2qV/m} \dots\dots\dots(3-66)$$

以上の原理を基に、サイクロトロンによる陽子の加速のシミュレーション・ソフトを作成する^{注3-17}。

● プログラムの解説(リスト 3-14)

▶ ボタン 1: 初期設定と初期画面

陽子の円運動の軌跡をスムーズに描くための周期T₀、時間区分dt、線源を出る陽子の初速度のダミー値V₀を設定し、陽子の回転数N、磁束密度B、加速電圧Voltの既定値を与える。陽子の質量m、電荷qとBを式(3-65)に用いて、陽子の実際的な周期T_{real}を求めておく。また式(3-66)により半周期ごとの陽子の速度V(i)、式(3-64)から軌道半径R(i)と隣り合う軌道半径の差dr(i)を計算して登録しておく。dr(i)は半周期ごとの軌道を描くための円の中心を定めるのに利用する。

▶ Timer1 プロシージャ

図 3-53 のように、線源Sを出て加速された陽子は最初(j=1)に CenterX=CenterX₀+10 で D₁ 内の磁場に入り、O₁ を中心に半径 R(1) の円運動をする。半周期後に D₁ を出て、D₁-D₂ 間で加速され、CenterX=CenterX₀-10 で D₂ に入り 2 回目(j=2)の半円運動に移る。O₂ を中心とする半径 R(2) の円運動であるが、O₂ は dr(2)=R(2)-R(1) だけ上方にずれている。次の半周期後には D₂ を出て、加速されて D₁ に入る。ここで、O₂ より下方に dr(3)=R(3)-R(2) だけずらした O₃ を中心に円運動する。以下これを P=2*N 回繰り返す、最後に D₂ を出て直進し、標的の原子核に衝突して核反応を起こすことになる。これらの半回転番号(No. j)ごとの過程を整理すると、次のようになる。

No. j	軌道半径 R(j)	隣り合う軌道半径の差 dr(j)	軌道中心 O _j の y 座標
1	R(1)=m*V(1)/(q*B)	dr(1)=0	CenterY1=CenterY
2	R(2)=m*V(2)/(q*B)	dr(2)=R(2)-R(1)	CenterY2=CenterY1 - dr(2)
3	R(3)=m*V(3)/(q*B)	dr(3)=R(3)-R(2)	CenterY3=CenterY2 + dr(3)
.....			

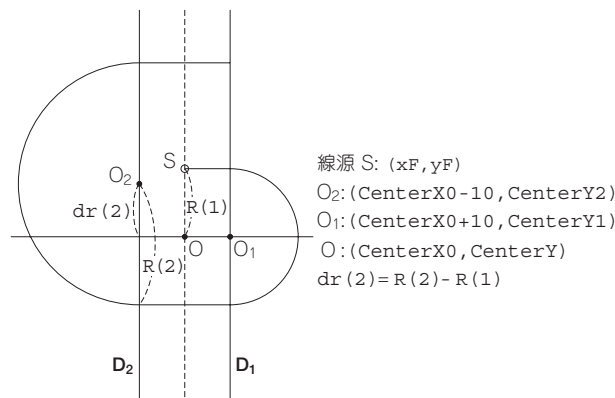


図3-53 各半円軌道の中心O_jのy座標

注3-17：先行発表として下記文献を参考にし、さらにわかりやすくするための説明図を作成した。
和田正信著『マイコンシミュレーションで見る物理の世界』、(培風館)、1983年9月、節17。

リスト3-14 サイクロトロンの原理

```

' サイクロトロンの原理

Public Class Form1

    Dim t, dt, x, y, xF, yF, xL, yL, V0, V(42), R(42), dr(42), T0, Treal, q, m, PI As Single
    Dim k, KE, B, Volt, CenterX0, CenterX, CenterY, CenterY0, RR(1), Vmax, Rmax As Single
    Dim N, P, j As Integer
    Dim MyFont As New Font("MS明朝ゴシック", 10, FontStyle.Regular)

    ' 初期設定と初期画面
    Private Sub Button1_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As System.EventArgs) Handles Button1.Click
        CenterX0 = PictureBox1.Width / 2
        CenterY = PictureBox1.Height / 2
        dt = 0.0005 : T0 = 1 : V0 = 1 : PI = Math.PI 'V0: 線源から出た陽子の速さ(ダミー値)
        N = 10 : TextBox1.Text = N ' 回転数
        P = 2 * N
        B = 1 : TextBox2.Text = B ' 磁束密度 (Wb/m^2)
        Volt = 10 ^ 6 : TextBox3.Text = Volt ' 加速電圧 (ボルト)
        q = 1.6E-19 : m = 1.67E-27 ' 陽子の電荷 (C) と質量 (kg)
        Treal = 2 * PI * m / (q * B) ' 陽子の回転周期 (s)
        Treal = 1 / 100 * Int(100 * Treal / 10 ^ -8 + 0.5)
        TextBox4.Text = Treal & "x10^-8 s"
        For i As Integer = 1 To P ' 各軌道上の陽子の速さ (m/s) の計算. 登録
            If i = 1 Then k = 1 Else k = 2
            V(i) = Math.Sqrt(V0 ^ 2 + k * q * Volt / m)
            V0 = V(i)
        Next i
        For i As Integer = 1 To P ' 各軌道半径と隣り合う半径の計算. 登録
            R(i) = m * V(i) / (q * B) ' 軌道半径 (m)
            dr(i) = R(i) - R(i - 1) ' 隣り合う軌道半径の差 (m)
        Next i
        j = 1 : t = 0 ' 初期条件
        xF = CenterX0 ' 陽子の初期位置 (線源 S), 画像の中心 O より
        yF = CenterY - 150 * R(1) / R(P) ' 第1軌道の半径だけ上方位置
        Aux()
    End Sub

    ' スタート
    Private Sub Button2_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As System.EventArgs) Handles Button2.Click
        Timer1.Interval = 1
        Timer1.Enabled = True
    End Sub

    ' Go/Stop
    Private Sub Button3_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As System.EventArgs) Handles Button3.Click
        Timer1.Enabled = Not Timer1.Enabled
    End Sub

    ' 再スタート
    Private Sub Button4_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As System.EventArgs) Handles Button4.Click
        Dim gr As Graphics = PictureBox1.CreateGraphics()
        gr.Clear(Color.White)
        CenterY = PictureBox1.Height / 2
        N = Val(TextBox1.Text) ' 回転数
        P = 2 * N
        B = Val(TextBox2.Text) ' 磁束密度 (Wb/m^2)
        Volt = Val(TextBox3.Text) ' 加速電圧 (ボルト)
        V0 = 1
        q = 1.6E-19 : m = 1.67E-27 ' 陽子の電荷と質量
        For i As Integer = 1 To P ' 各軌道上の陽子の速さ (m/s)
            If i = 1 Then k = 1 Else k = 2
            V(i) = Math.Sqrt(V0 ^ 2 + k * q * Volt / m)
            V0 = V(i)
        Next i
        For i As Integer = 1 To P
    
```