

*МГУ, Физический факультет,  
Кафедра физики моря и вод суши*

*Лекция: Нелинейные задачи  
динамики вихрей в двухслойной  
вращающейся жидкости*

**17'05-18'40; 30 октября 2020 г.**

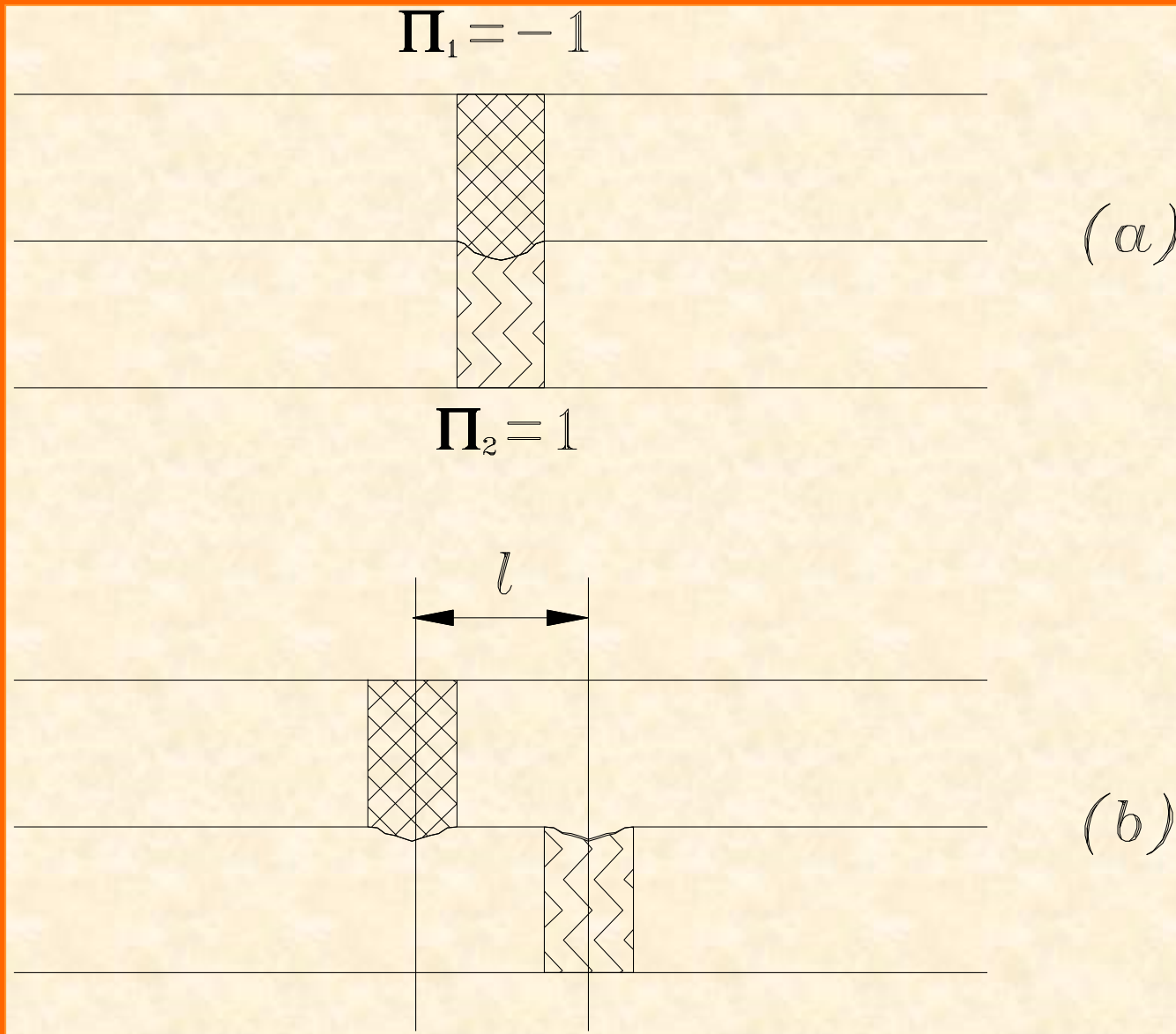
*Лектор: д.ф.-м.н. М.А. Соколовский  
(Институт водных проблем РАН)*

Hogg N.G., Stommel H.M.

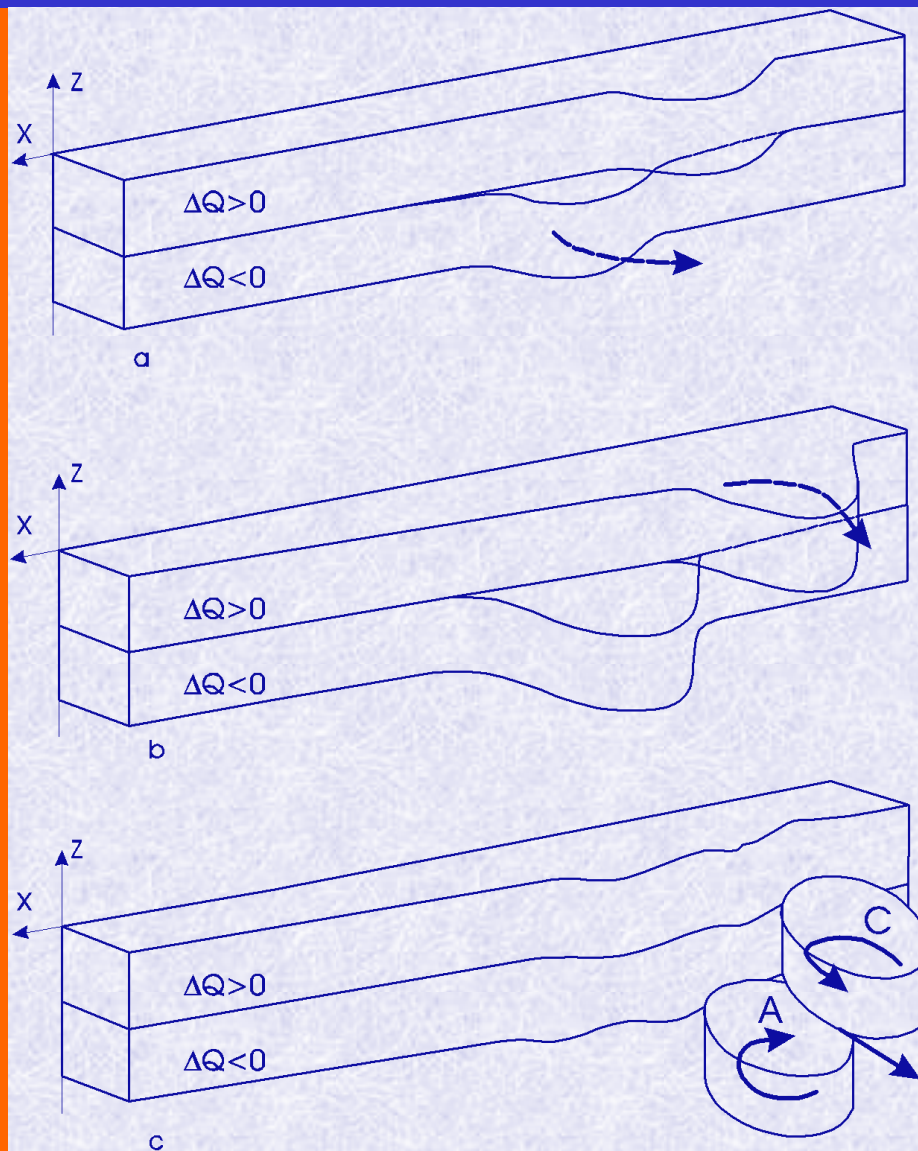
*The heton, an  
elementary interaction between  
discrete baroclinic geostrophic  
vortices, and its implications  
concerning eddy heat-flow.*

**Proc. R. Soc. Lond. 1985, v. A397,  
p. 1-20.**

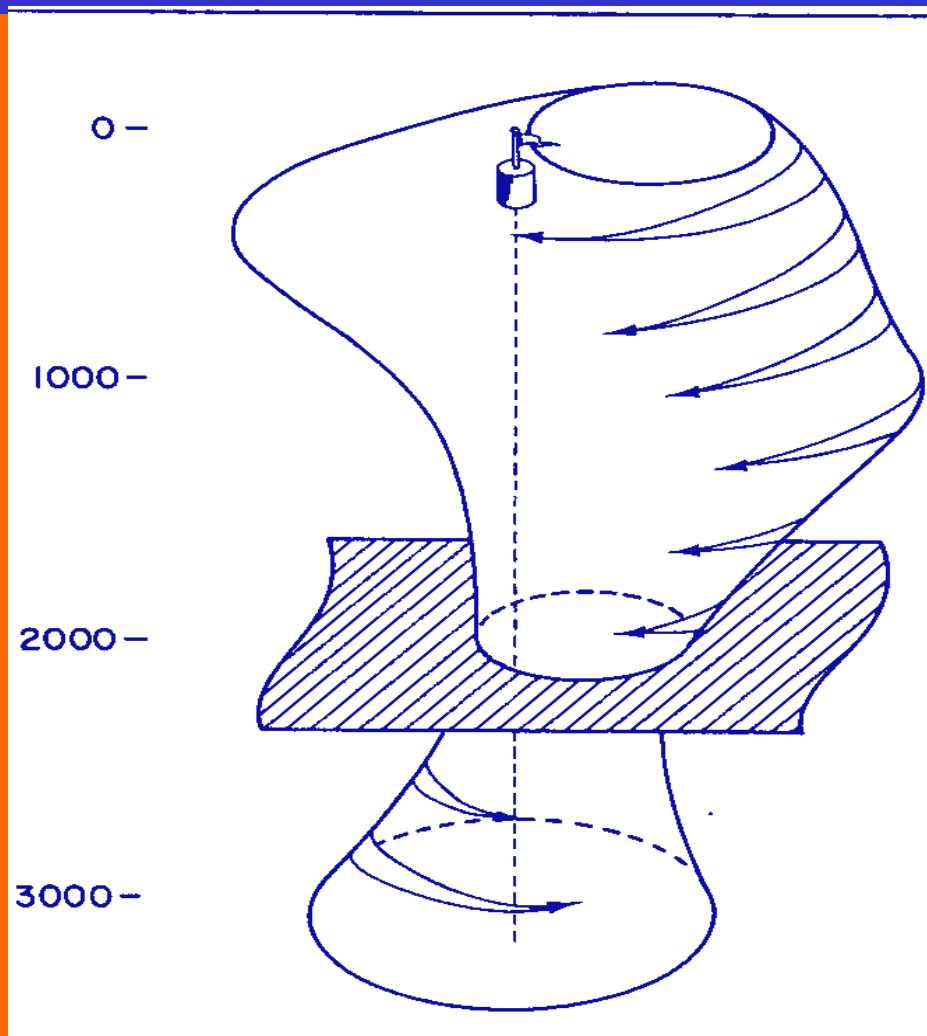
# Схематическое представление хетонов «вертикальной осью» и с «наклонной осью»



# Схема формирования хетона с наклонной осью (Morel & McWilliams, JPO'2001)



# *Пространственное изображение хетона в АЦТ (Savchenko, Emery & Vladimirov, JPO'1978)*



# *«Чечевицевидные облака»*

<http://www.point.ru/photo/galleries/16958/3.html>



# Основные уравнения

$$u_{jt} + u_j u_{jx} + v_j u_{jy} - f v_j = -\frac{P_{jx}}{\rho_0}$$

$$v_{jt} + u_j v_{jx} + v_j v_{jy} + f u_j = -\frac{P_{jy}}{\rho_0}$$

$$P_{jz} = \rho_j z$$

$$u_{jx} + v_{jy} + w_{jz} = 0 \quad j = 1, 2$$

# Граничные условия по вертикали и обозначения

$$z = 0: \quad w_1 = 0$$

$$z = h_1 - \eta: \quad w_1 = -\frac{D_1 \eta}{Dt}, \quad w_2 = -\frac{D_2 \eta}{Dt}, \quad p_1 = p_2$$

$$z = h_1 + h_2 - \zeta: \quad w_2 = -\frac{D_2 \zeta}{Dt}$$

$$\frac{D_j}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + u_j \frac{\partial}{\partial x} + v_j \frac{\partial}{\partial y}$$



# *Уравнения сохранения потенциального вихря*

$$\frac{D_j \Pi_j}{Dt} = 0, \quad j = 1, 2$$

$$\Pi_1 = \nabla^2 p_1 + \frac{\eta}{h_1}, \quad \Pi_2 = \nabla^2 p_2 + \frac{\zeta - \eta}{h_2}$$

$$\eta = F(p_2 - p_1)$$

$$u_j = -p_{jy}, \quad v_j = p_{jx}, \quad j = 1, 2$$

# *Разделение переменных*

$$p = h_1 p_1 + h_2 p_2$$

$$\nabla^2 p = h_1 \Pi_1 + h_2 \Pi_2 - \zeta$$

$$\nabla^2 \frac{\eta}{F} - \gamma^2 \frac{\eta}{F} = \Pi_2 - \Pi_1 - \frac{\zeta}{h_2},$$

## *Основные параметры:*

$$F = f^2 D^2 / g'(h_1 + h_2)$$

$$g' = g\Delta\rho / \rho_0$$

$$\gamma = \sqrt{\frac{F}{h_1 h_2}} = \frac{D}{R_d}$$

$$R_d = \frac{1}{f} \sqrt{\frac{g' h_1 h_2}{h_1 + h_2}}$$

# Обобщение на двухслойный случай метода контурной динамики

$$\Pi_j = \Pi_{j0} + \sum_{\alpha=1}^{A_j} \Pi_j^\alpha(x, y, t), \quad j = 1, 2$$

$$p_j(x, y, t) = p_{j0} + h_j \sum_{\alpha=1}^{A_j} \iint_{S_j^\alpha} \Pi_j^\alpha \left[ G(r) + \frac{h_{3-j}}{h_j} G_0(r) \right] dx' dy' +$$

$$h_{3-j} \sum_{\alpha=1}^{A_{3-j}} \iint_{S_{3-j}^\alpha} \Pi_{3-j}^\alpha \left[ G(r) - G_0(r) \right] dx' dy', \quad j = 1, 2$$

$$G(r) = (1/2\pi) \ln r, \quad G_0(r) = -(1/2\pi) K_0(\gamma r)$$

$$p_j = p_{j0} + h_j \sum_{\alpha=1}^{A_j} \Pi_j^\alpha \oint_{C_j^\alpha} W \left[ M(r) + \frac{h_{3-j}}{h_j} M_0(r) \right] d\nu +$$

$$h_{3-j} \sum_{\alpha=1}^{A_{3-j}} \Pi_{3-j}^\alpha \oint_{C_{3-j}^\alpha} \left[ M(r) - M_0(r) \right] d\nu, \quad j = 1, 2$$

$$W = \frac{(x' - x)(\partial y' / \partial \nu) - (y' - y)(\partial x' / \partial \nu)}{r^2}, \quad M = \frac{r^2}{4\pi} \left( \ln r - \frac{1}{2} \right),$$

$$M_0 = \frac{1}{2\pi\gamma^2} \left[ \gamma r K_1(\gamma r) - 1 \right]$$

$$\frac{d}{dt} x_j^{\alpha k} = u_j^{\alpha k}, \quad \frac{d}{dt} y_j^{\alpha k} = v_j^{\alpha k},$$

$$x_j^{\alpha k} \Big|_{t=0} = x_{j0}^{\alpha k}, \quad y_j^{\alpha k} \Big|_{t=0} = y_{j0}^{\alpha k},$$

$$j = 1, 2; \quad \alpha = 1, 2, \dots, A_j; \quad k = 0, 1, 2, \dots, K_j^\alpha$$

# Предельный случай дискретных вихрей

$$\lim_{\substack{S_j^\alpha \rightarrow 0 \\ \Pi_j^\alpha \rightarrow \infty}} \Pi_j^\alpha S_j^\alpha = \kappa_j^\alpha$$

$$\Pi_j^\alpha = \kappa_j^\alpha \delta(x - x_j^\alpha) \delta(y - y_j^\alpha),$$

$$p_j(x, y) = \frac{h_j}{2\pi} \left\{ \sum_{\alpha=1}^{A_j} \kappa_j^\alpha \left[ \ln r - \frac{h_{3-j}}{h_j} K_0(\gamma r) \right] + \sum_{\alpha=1}^{A_{3-j}} \frac{h_{3-j}}{h_j} \kappa_{3-j}^\alpha \left[ \ln r + K_0(\gamma r) \right] \right\}$$

# Уравнения движения дискретных вихрей

$$\dot{x}_j^\alpha = -\frac{h_j}{2\pi} \left\{ \sum_{\substack{\beta=1 \\ \beta \neq \alpha}}^{A_j} \kappa_j^\beta \frac{y_j^\alpha - y_j^\beta}{(r_{jj}^{\alpha\beta})^2} \left[ 1 + \frac{h_{3-j}}{h_j} \gamma r_{jj}^{\alpha\beta} K_1(\gamma r_{jj}^{\alpha\beta}) \right] + \sum_{\beta=1}^{A_{3-j}} \kappa_{3-j}^\beta \frac{h_{3-j}}{h_j} \frac{y_j^\alpha - y_{3-j}^\beta}{(r_{j(3-j)}^{\alpha\beta})^2} \left[ 1 - \gamma r_{j(3-j)}^{\alpha\beta} K_1(\gamma r_{j(3-j)}^{\alpha\beta}) \right] \right\}$$

$$\dot{y}_j^\alpha = \frac{h_j}{2\pi} \left\{ \sum_{\substack{\beta=1 \\ \beta \neq \alpha}}^{A_j} \kappa_j^\beta \frac{x_j^\alpha - x_j^\beta}{(r_{jj}^{\alpha\beta})^2} \left[ 1 + \frac{h_{3-j}}{h_j} \gamma r_{jj}^{\alpha\beta} K_1(\gamma r_{jj}^{\alpha\beta}) \right] + \sum_{\beta=1}^{A_{3-j}} \kappa_{3-j}^\beta \frac{h_{3-j}}{h_j} \frac{x_j^\alpha - x_{3-j}^\beta}{(r_{j(3-j)}^{\alpha\beta})^2} \left[ 1 - \gamma r_{j(3-j)}^{\alpha\beta} K_1(\gamma r_{j(3-j)}^{\alpha\beta}) \right] \right\}$$

# Гамильтоновость системы

$$Q = \sum_{j=1}^2 h_j \sum_{\alpha=1}^{A_j} \kappa_j^\alpha, \quad P_x = \sum_{j=1}^2 h_j \sum_{\alpha=1}^{A_j} x_j^\alpha \kappa_j^\alpha,$$

$$P_y = \sum_{j=1}^2 h_j \sum_{\alpha=1}^{A_j} y_j^\alpha \kappa_j^\alpha, \quad M = \sum_{j=1}^2 h_j \sum_{\alpha=1}^{A_j} \left[ (x_j^\alpha)^2 + (y_j^\alpha)^2 \right] \kappa_j^\alpha$$

$$\dot{q}_j^\alpha = \frac{\partial \mathcal{H}}{\partial p_j^\alpha} \equiv J(q_j^\alpha, \mathcal{H}), \quad \dot{p}_j^\alpha = -\frac{\partial \mathcal{H}}{\partial q_j^\alpha} \equiv J(p_j^\alpha, \mathcal{H}),$$

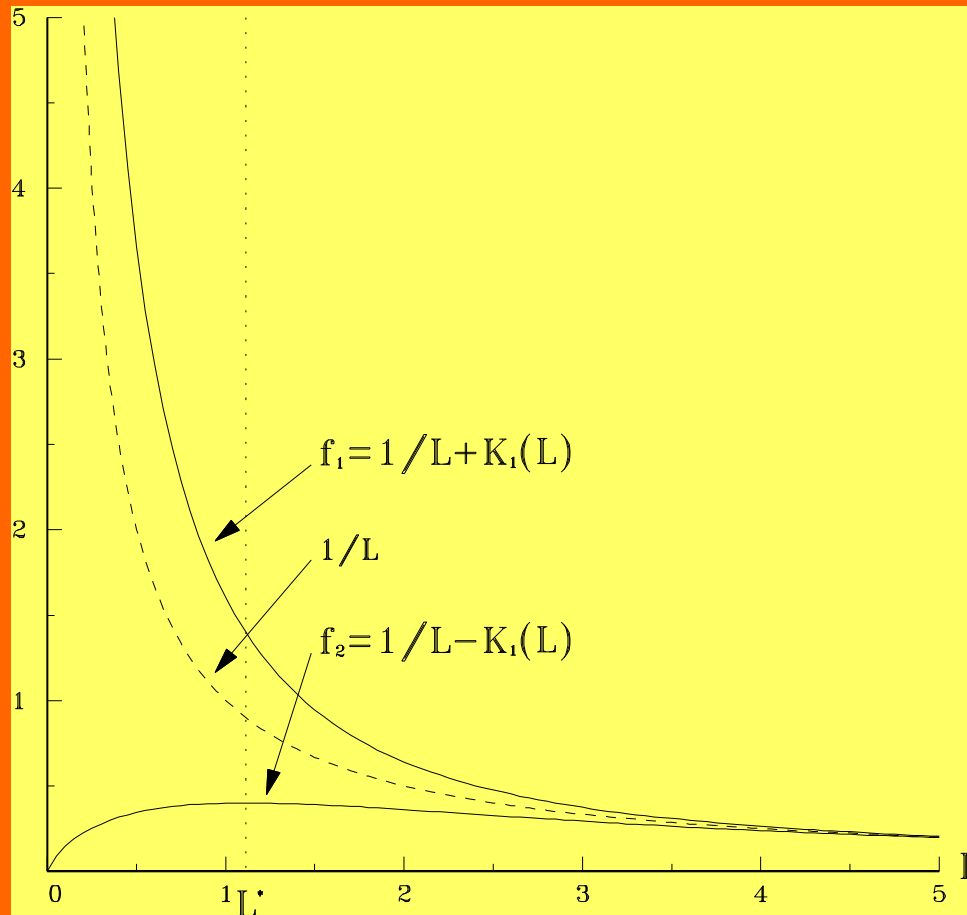
$$\alpha = 1, 2, \dots, A^j; \quad j = 1, 2; \quad q_j^\alpha = x_j^\alpha, \quad p_j^\alpha = y_j^\alpha \kappa_j^\alpha / 2$$

$$\mathcal{H} = -\frac{1}{2\pi} \sum_{j=1}^2 h_j \left\{ \sum_{\substack{\alpha, \beta=1 \\ \alpha \neq \beta}}^{A_j} \kappa_j^\alpha \kappa_j^\beta \left[ \ln r_{jj}^{\alpha\beta} - \frac{h_{3-j}}{h_j} K_0 \left( \gamma r_{jj}^{\alpha\beta} \right) \right] + \right. \\ \left. \sum_{\alpha, \beta=1}^{A_j, A_{3-j}} \frac{h_{3-j}}{h_j} \kappa_j^\alpha \kappa_{3-j}^\beta \left[ \ln r_{j(3-j)}^{\alpha\beta} + K_0 \left( \gamma r_{j(3-j)}^{\alpha\beta} \right) \right] \right\}$$



*Динамика  
дискретных вихрей*

# Зависимость скорости двухслойного вихря с «наклонной осью» от расстояния между вихрями



*Проблема интегрируемости:*

Задача трех вихрей  
интегрируема  
всегда!

# Частный случай трех вихрей

$$\kappa_1^1 = \mu, \quad \kappa_2^1 = \kappa_2^2 = 1$$

$$Q = \frac{1}{2}(2 + \mu) \quad P_x = \frac{1}{2}(x_2^1 + \mu x_1^1 + x_2^2) \quad P_y = \frac{1}{2}(y_2^1 + \mu y_1^1 + y_2^2)$$

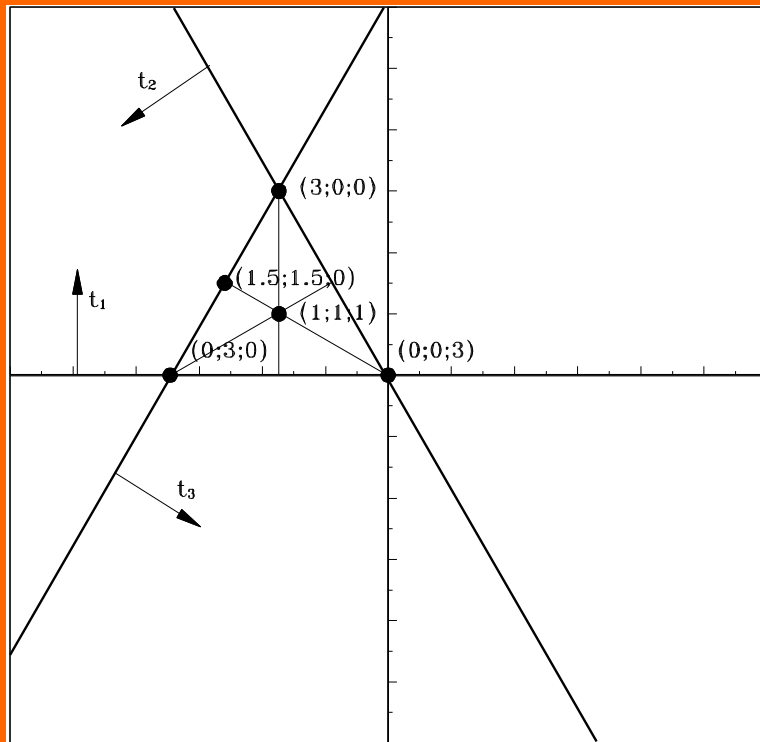
$$M = \frac{1}{2} \left\{ (x_2^1)^2 + (y_2^1)^2 + \mu \left[ (x_1^1)^2 + (y_1^1)^2 \right] + (x_2^2)^2 + (y_2^2)^2 \right\}$$

$$L = 4 \left[ QM - (P_x)^2 - (P_y)^2 \right]$$

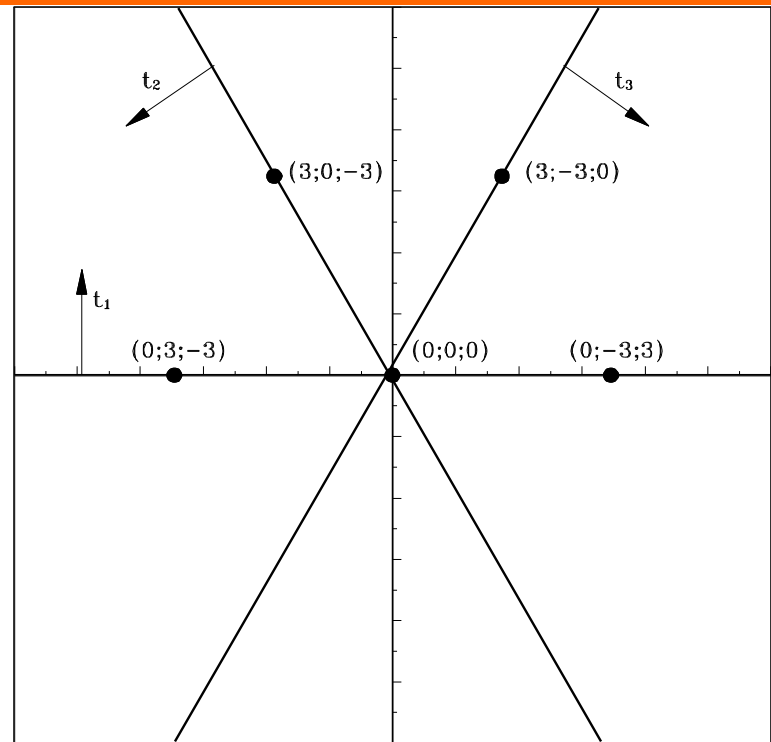
$$t_1 + t_2 + t_3 = 3 \quad t_1 = \frac{3(r_{22}^{12})^2}{L} \quad t_2 = \frac{3(r_{12}^{12})^2}{L} \quad t_3 = \frac{3(r_{12}^{11})^2}{L}$$

$$t_1 + t_2 + t_3 = 0 \quad t_1 = 3(r_{22}^{12})^2 \quad t_2 = 3(r_{12}^{12})^2 \quad t_3 = 3(r_{12}^{11})^2$$

# Трилинейные координаты

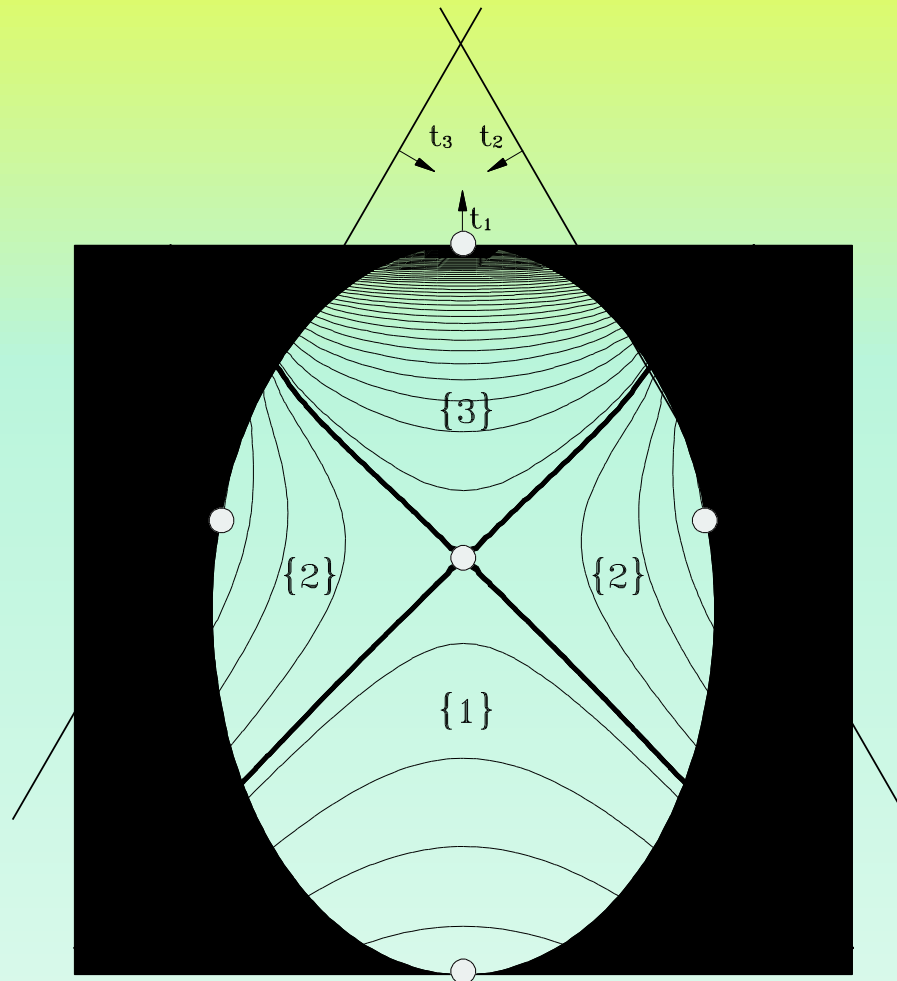


(a)

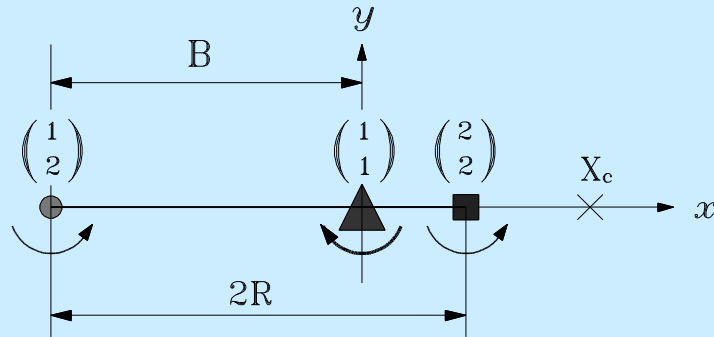


(b)

# Пример фазового портрета в трилинейных координатах



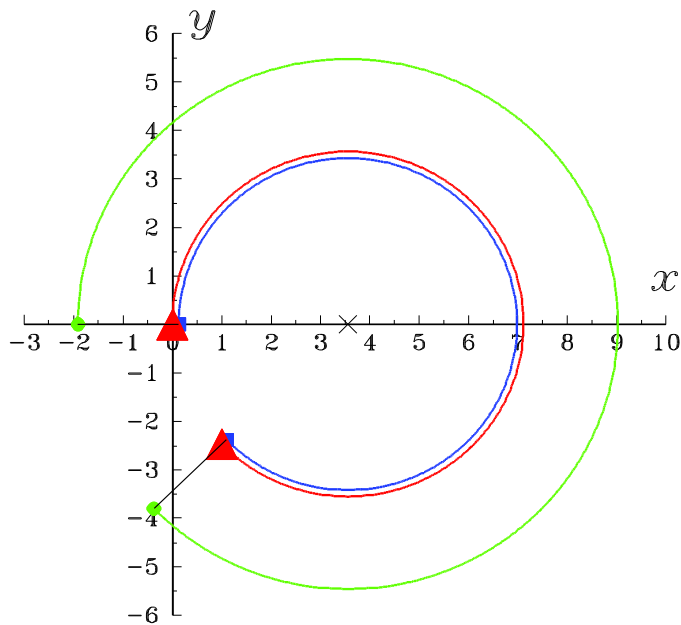
# Схема начального расположения вихрей



$$\frac{1}{2R} + \frac{2R(1+\mu)}{B(2R-B)} + K_1(2R) + \frac{(2R+B\mu)K_1(2R-B) - [2R(1+\mu) - B\mu]K_1(B)}{2(R-B)} = 0$$

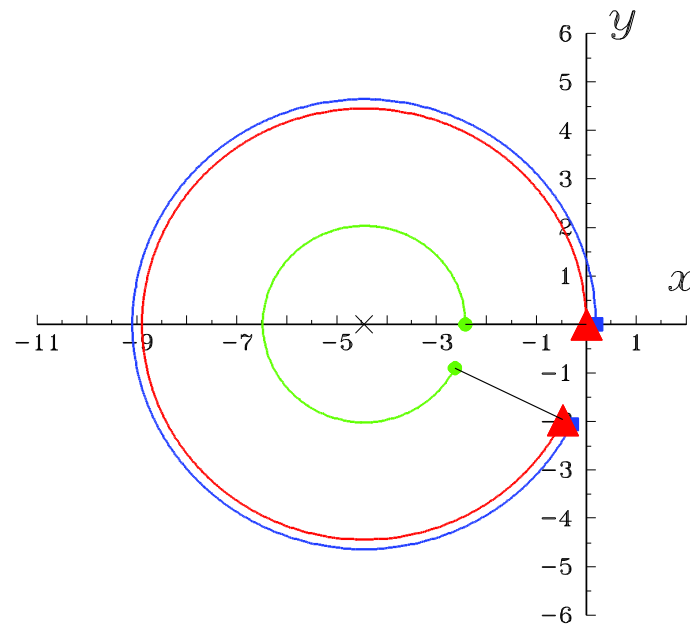
$$\omega = \frac{\mu+2}{4\pi(2R+B\mu)} \left[ \frac{B+2R\mu}{2BR} - \mu K_1(B) + K_1(2R) \right] \quad (X_c, Y_c) = \left( \frac{2(R-B)}{\mu+2}, 0 \right)$$

# Примеры эксцентрической карусели: (a), (b) и тритона: (c)



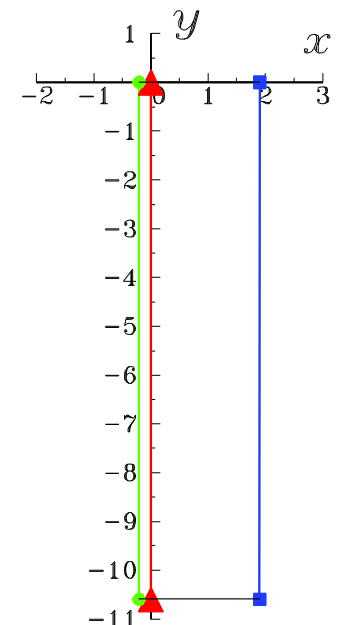
(a)

$$\mu = -2.5$$



(b)

$$\mu = -1.5$$

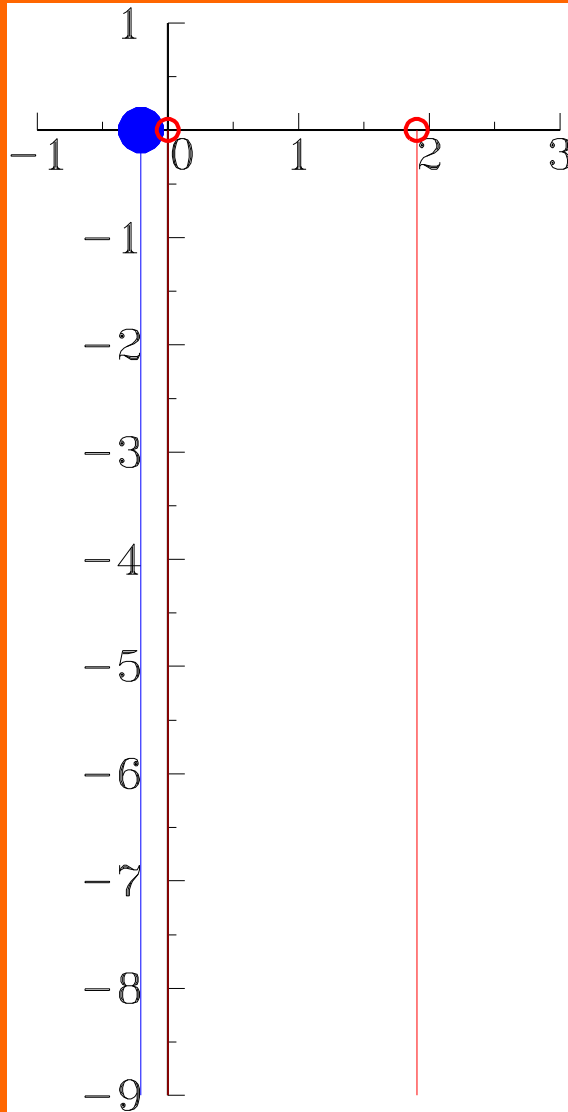


(c)

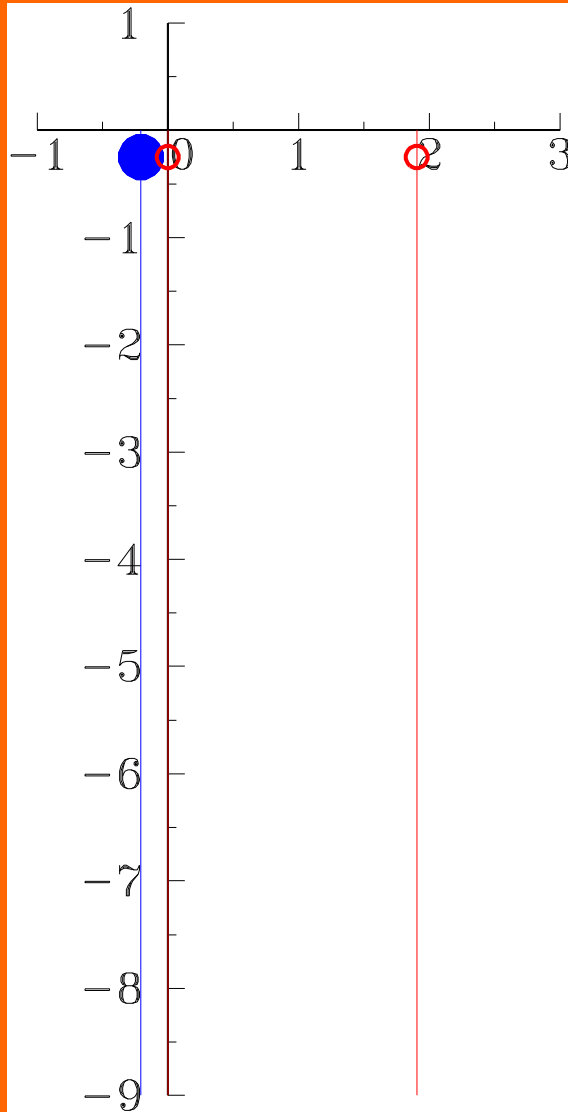
$$\mu = -2.0$$



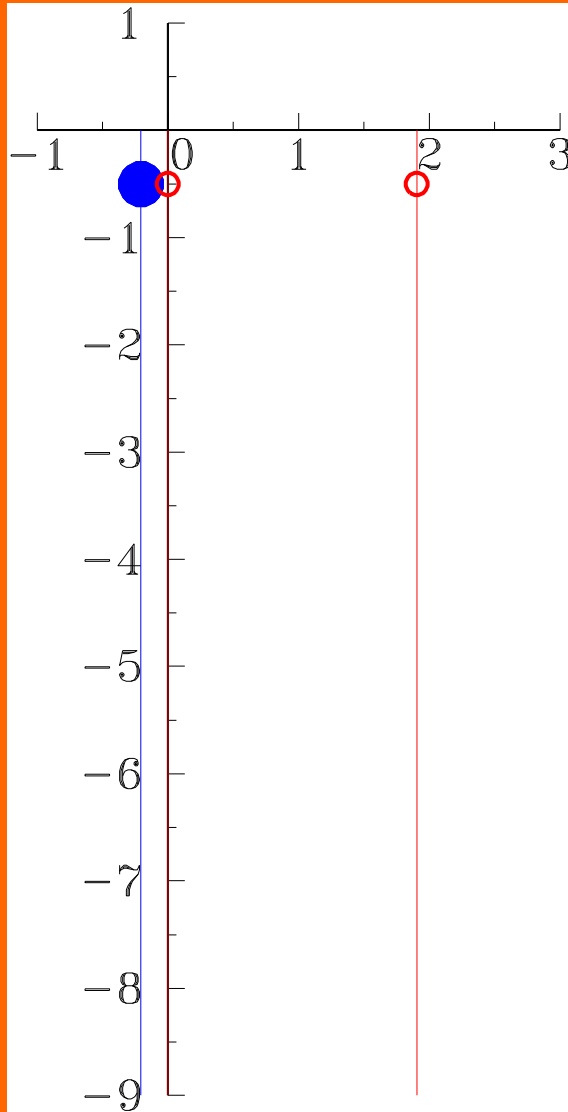
$t=0$



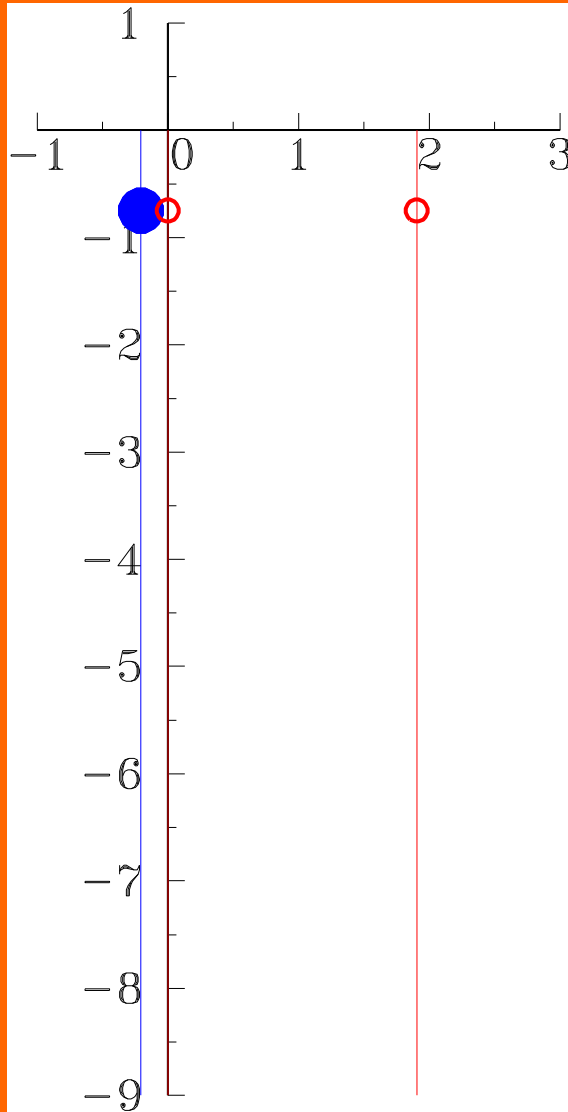
$t=1$



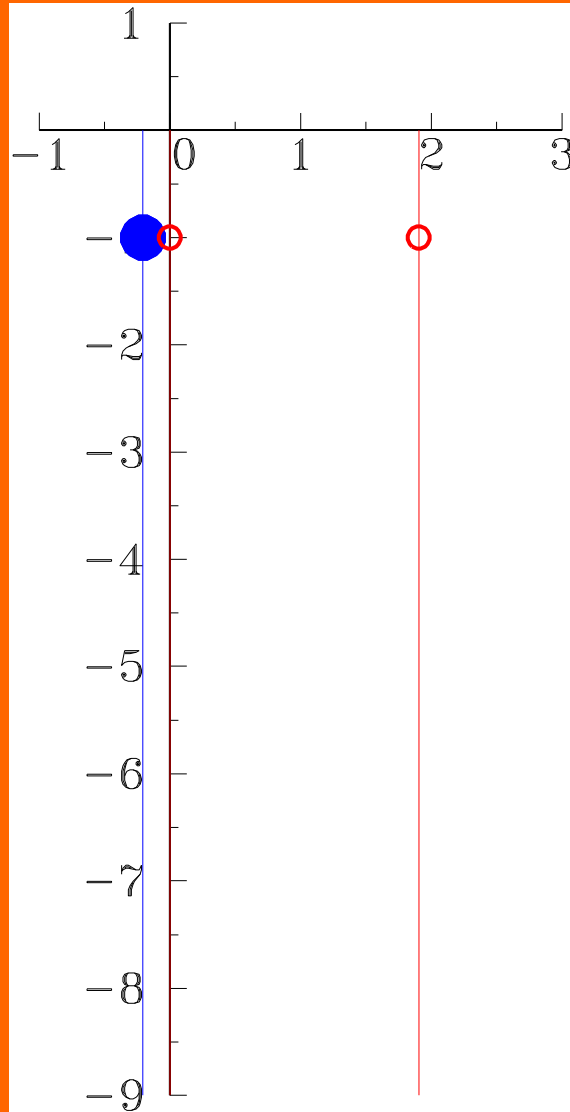
$t=2$



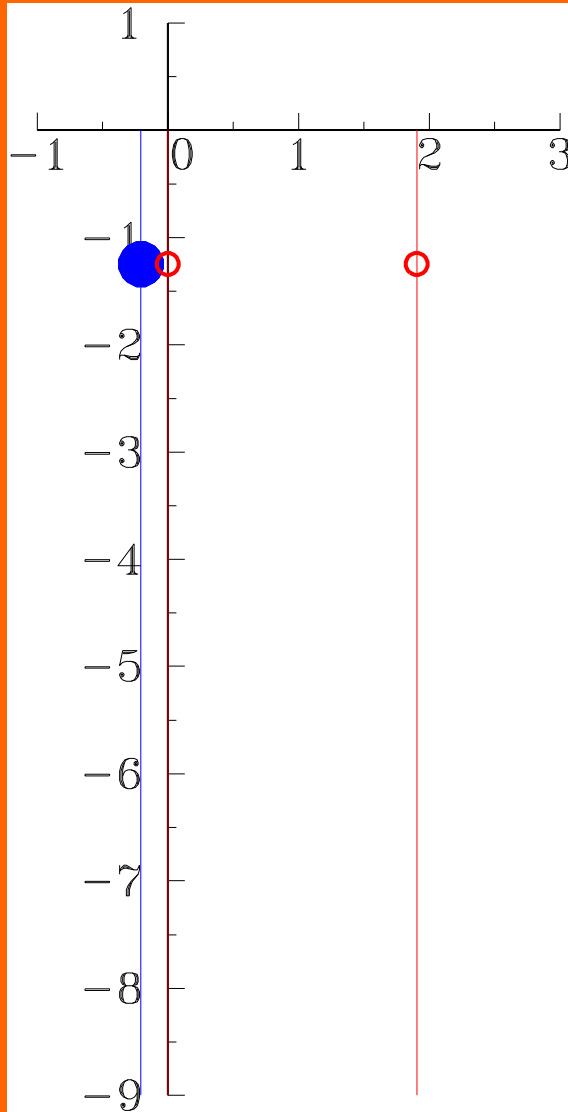
$t=3$



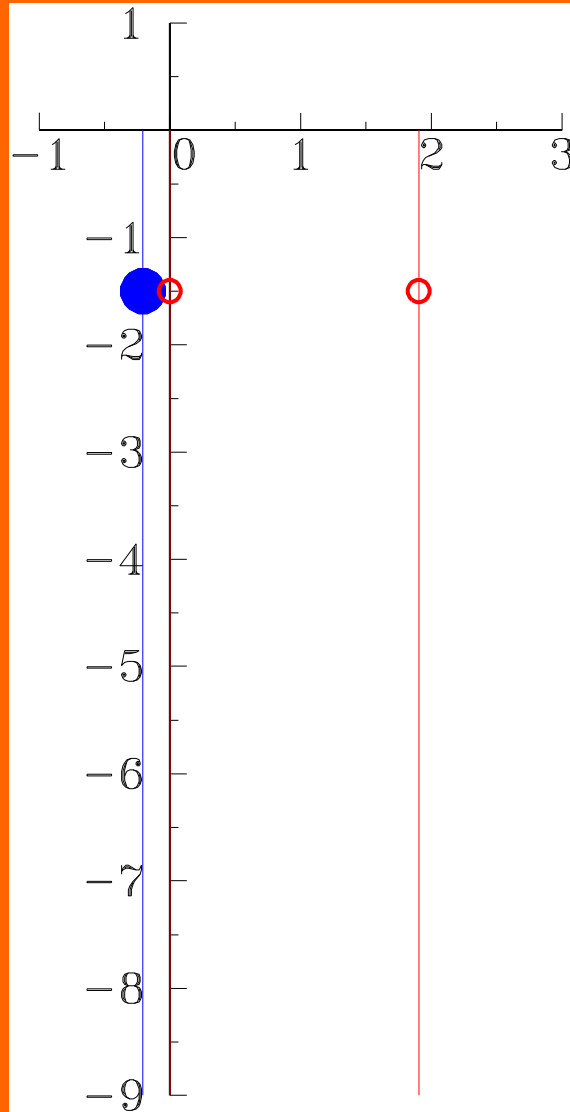
$t=4$



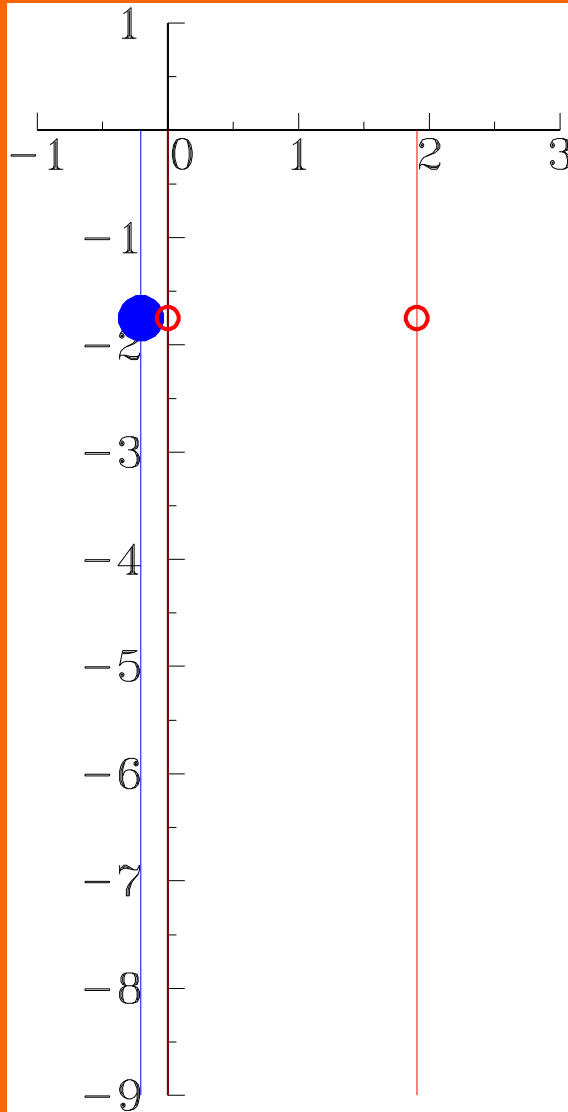
$t=5$



$t=6$

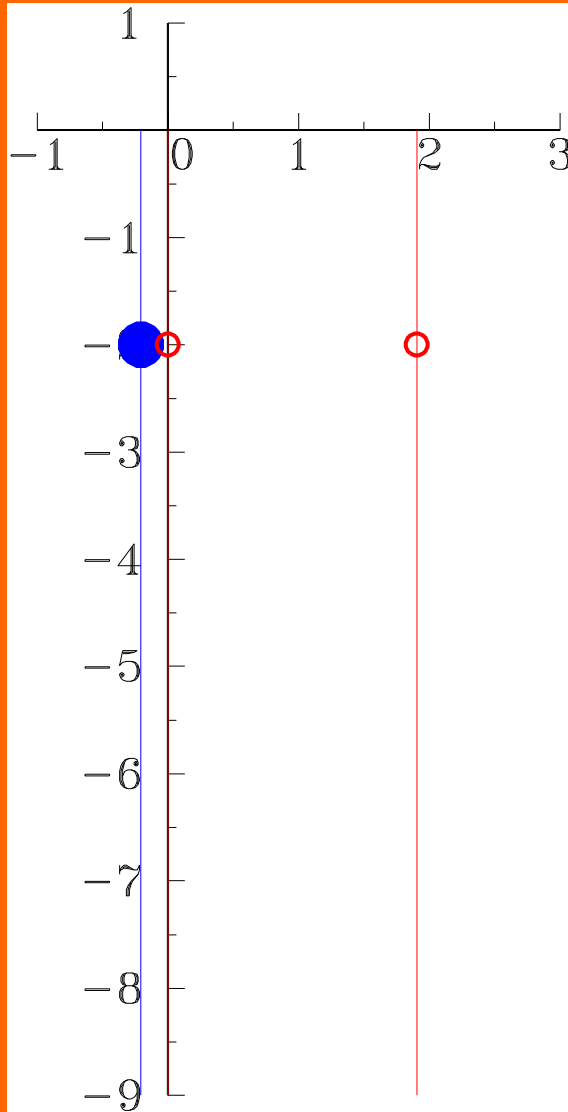


$t=7$

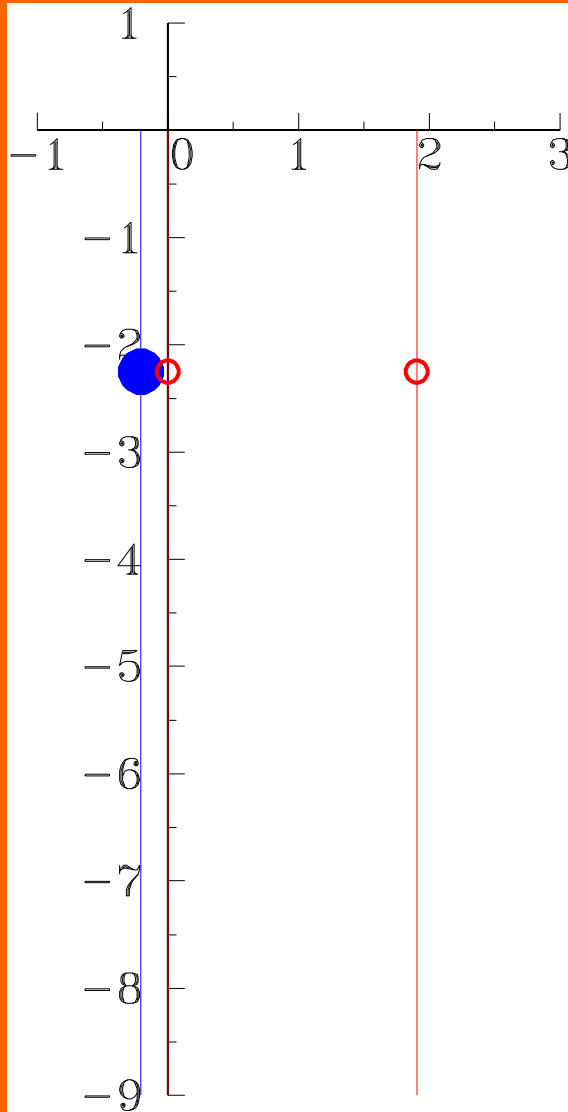




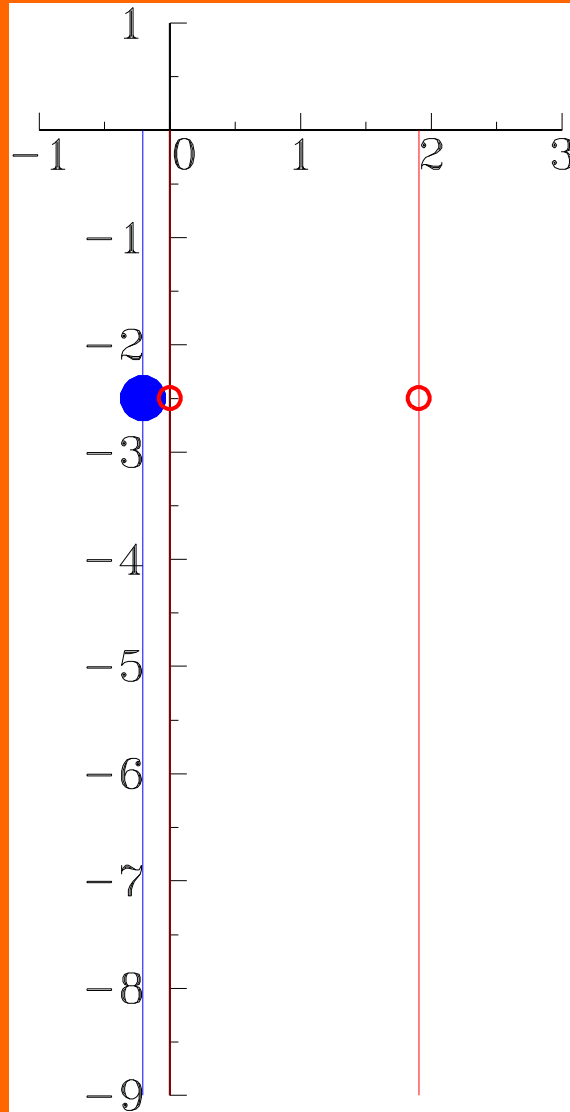
$t=8$



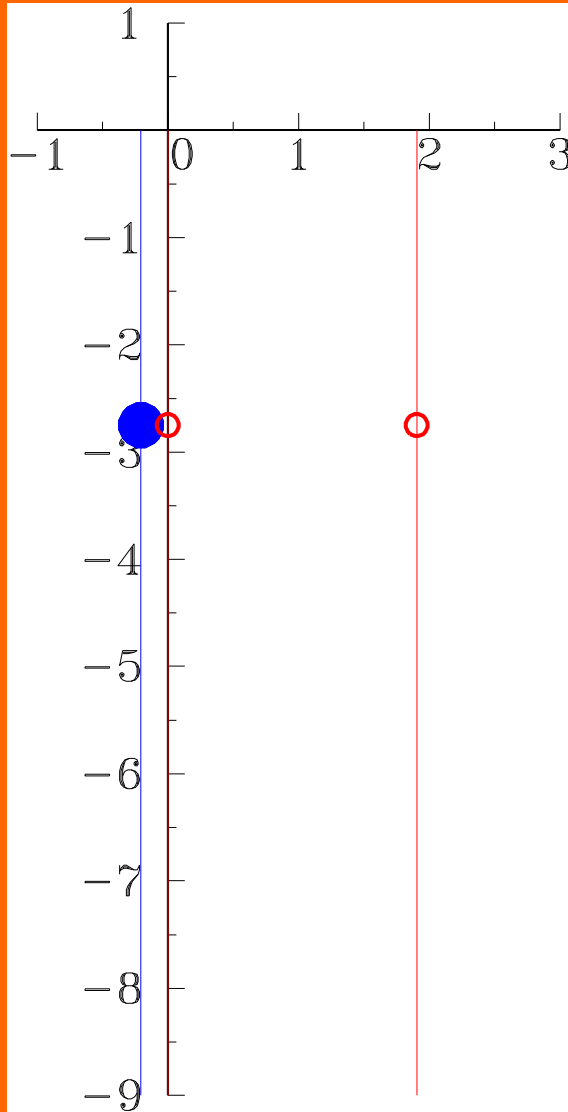
$t=9$



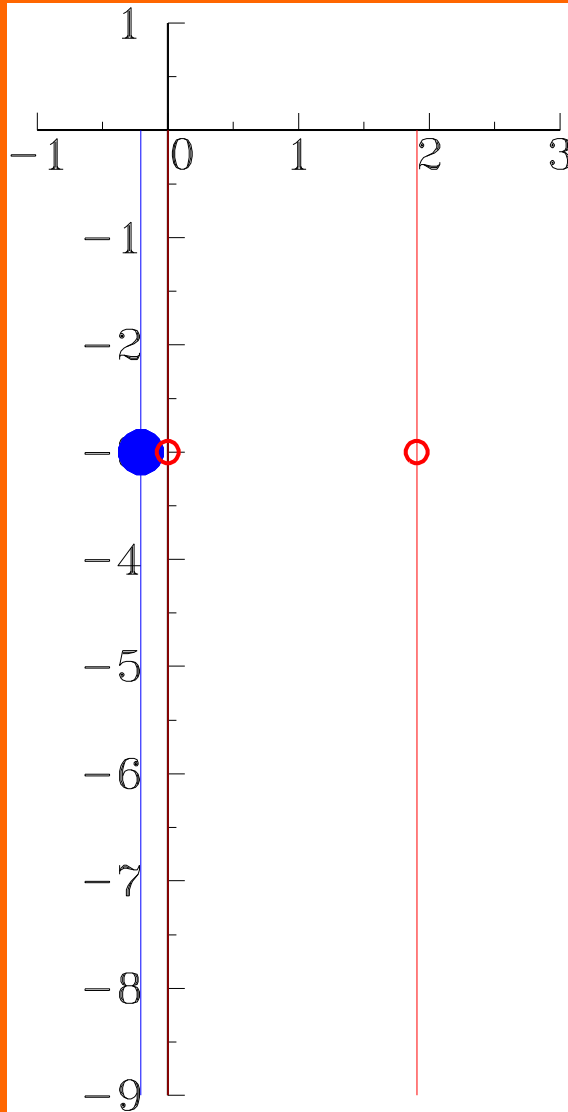
**t=10**



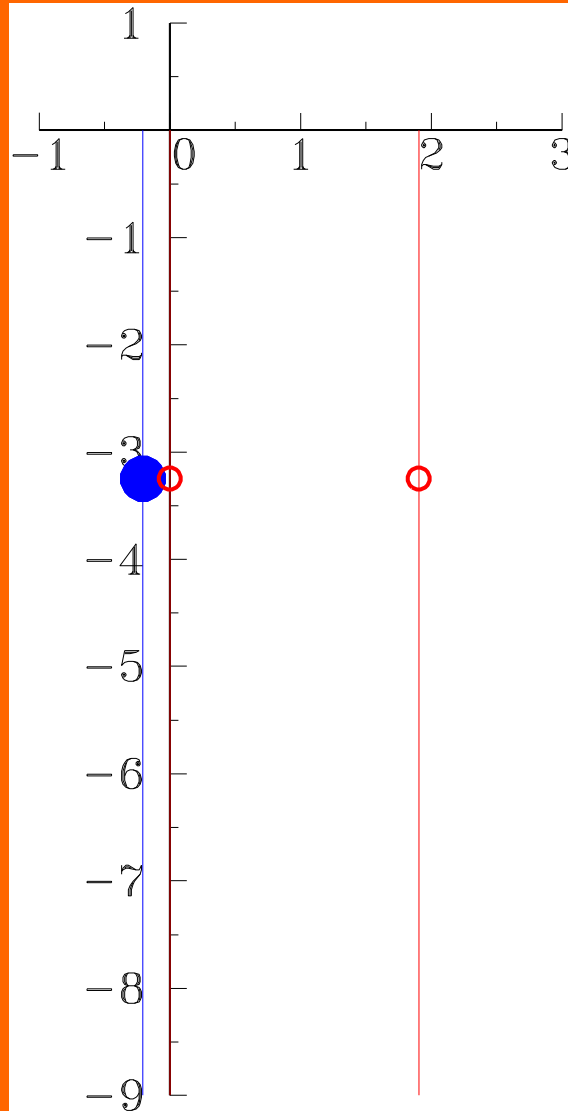
$t=11$



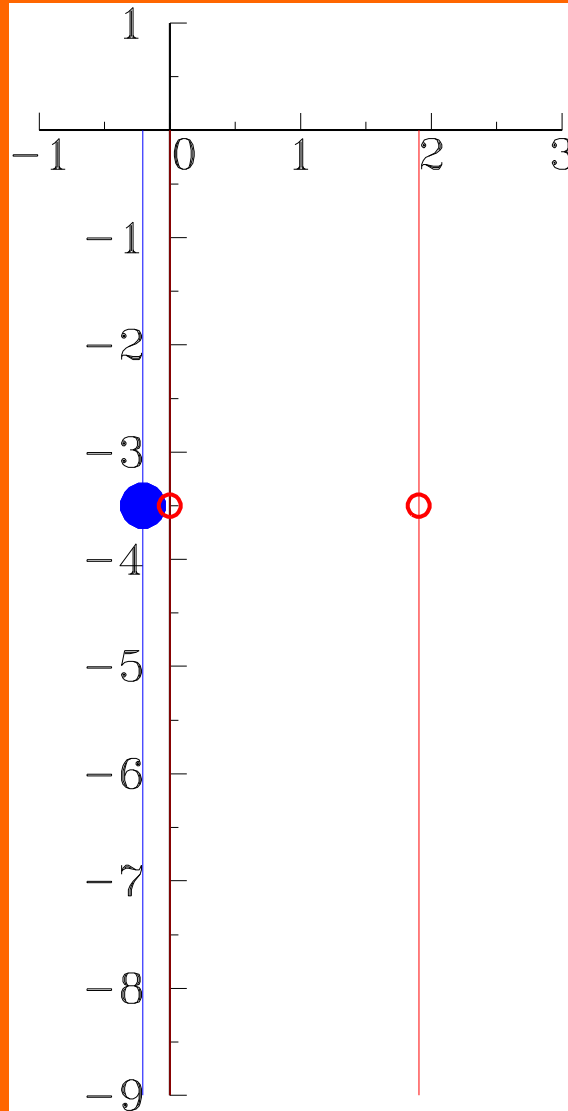
$t=12$



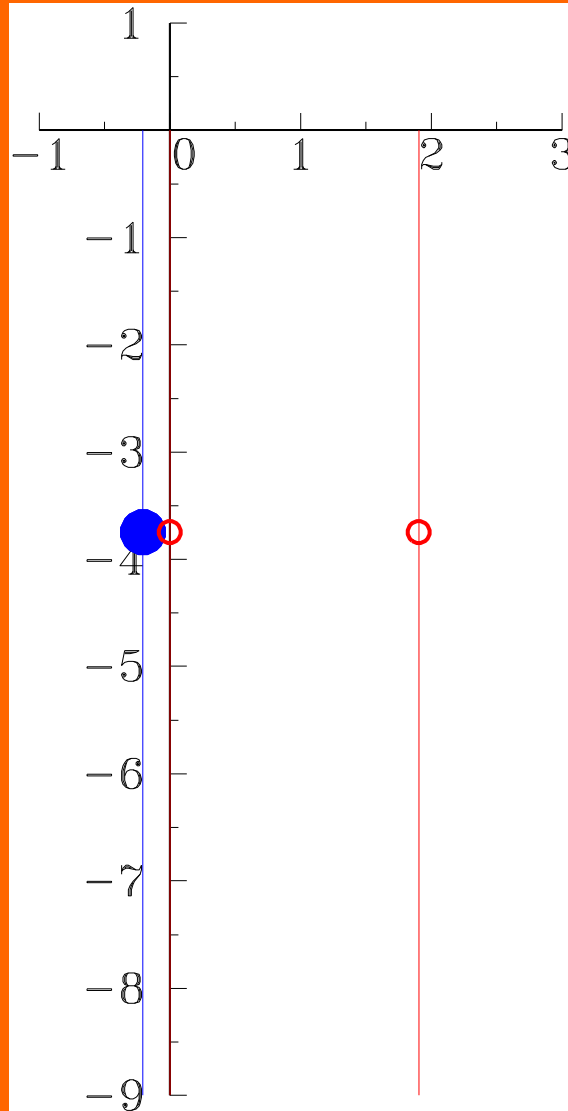
**t=13**



$t=14$

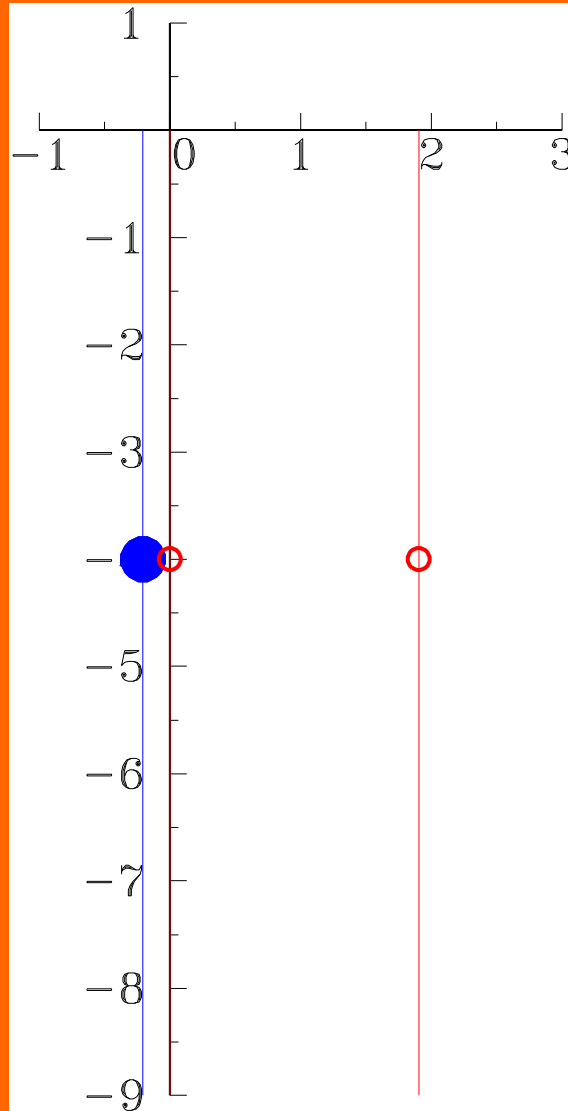


$t=15$

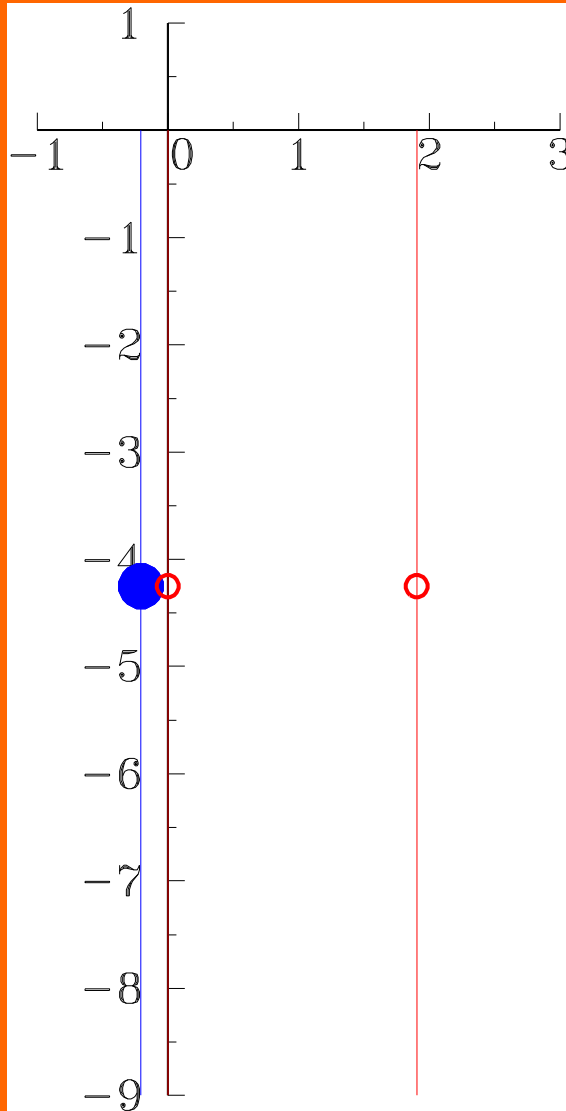




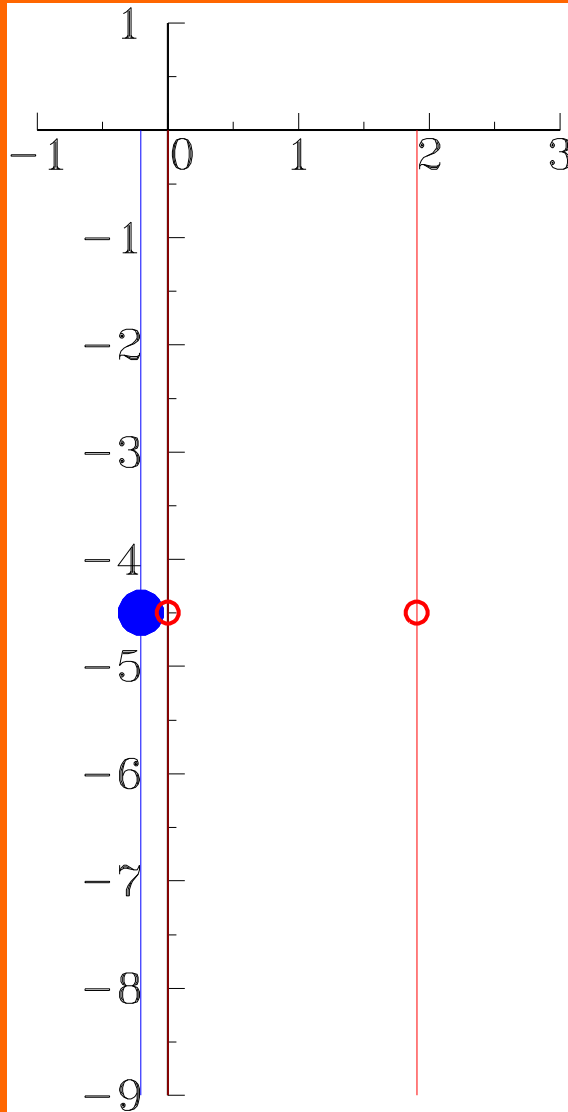
**t=16**



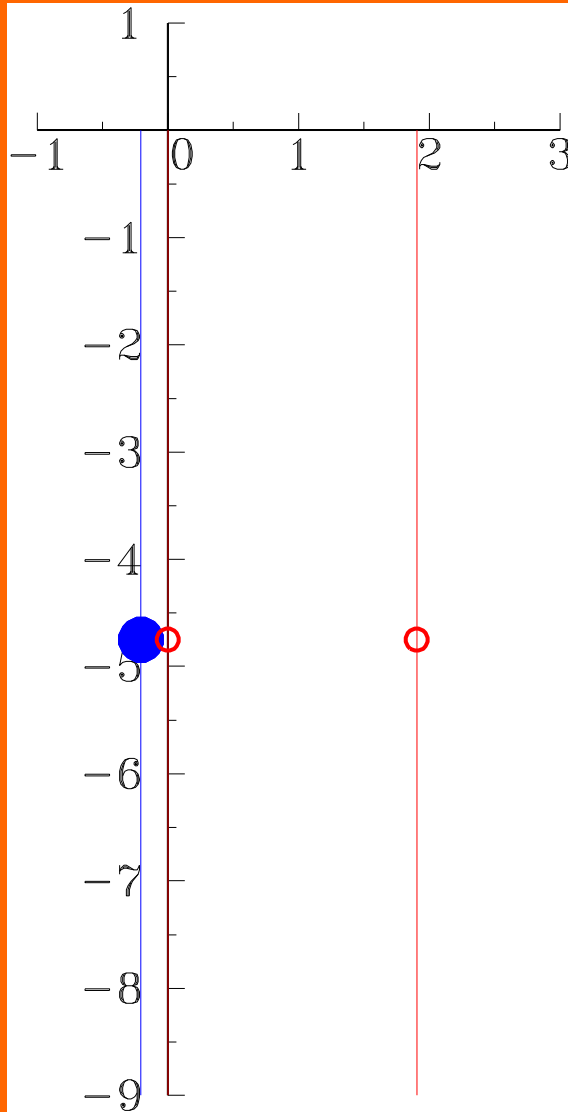
$t=17$



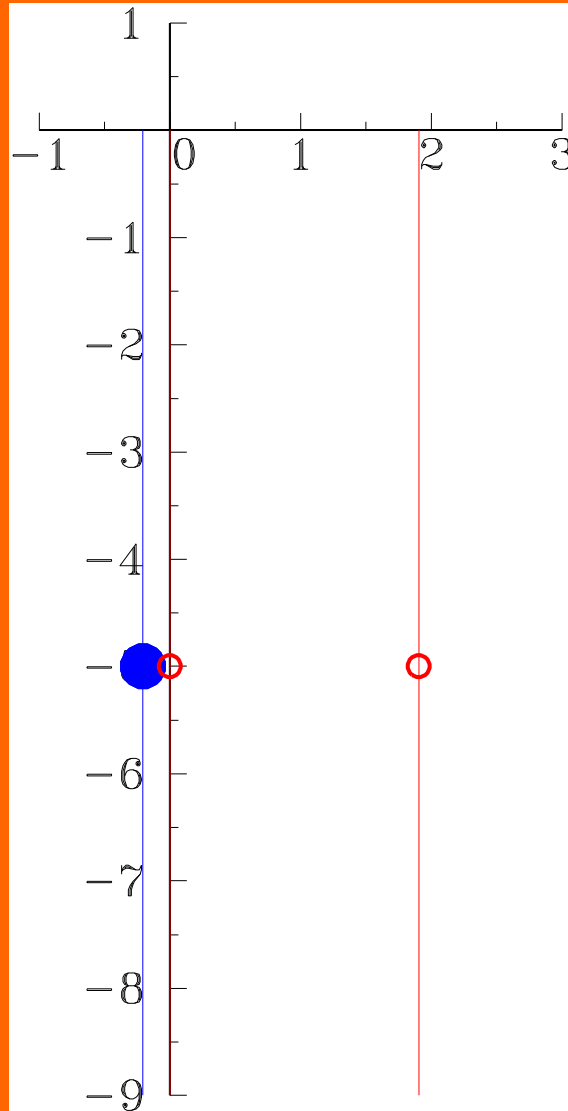
**t=18**



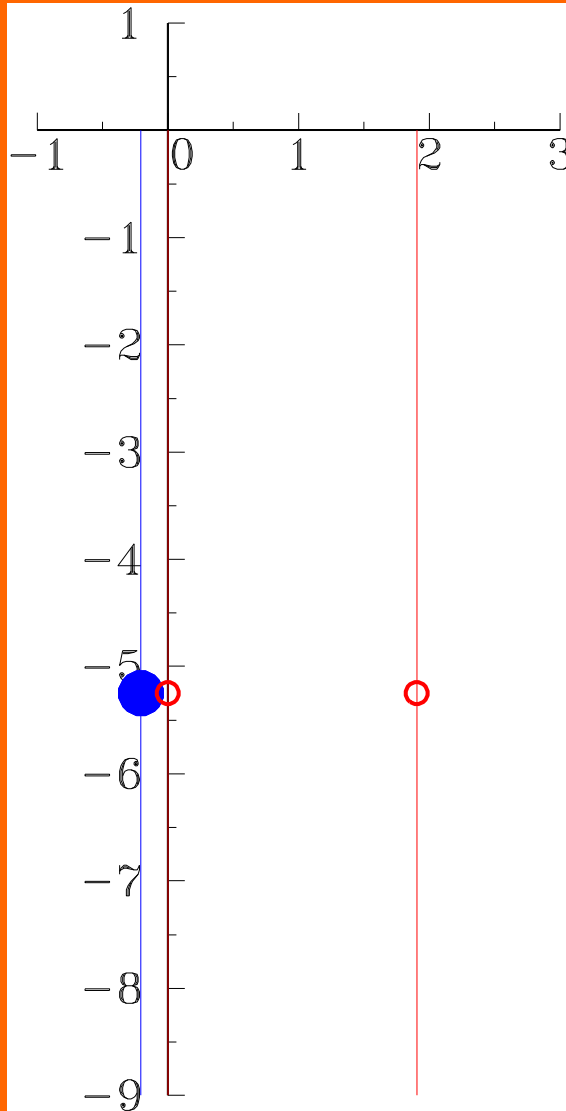
$t=19$



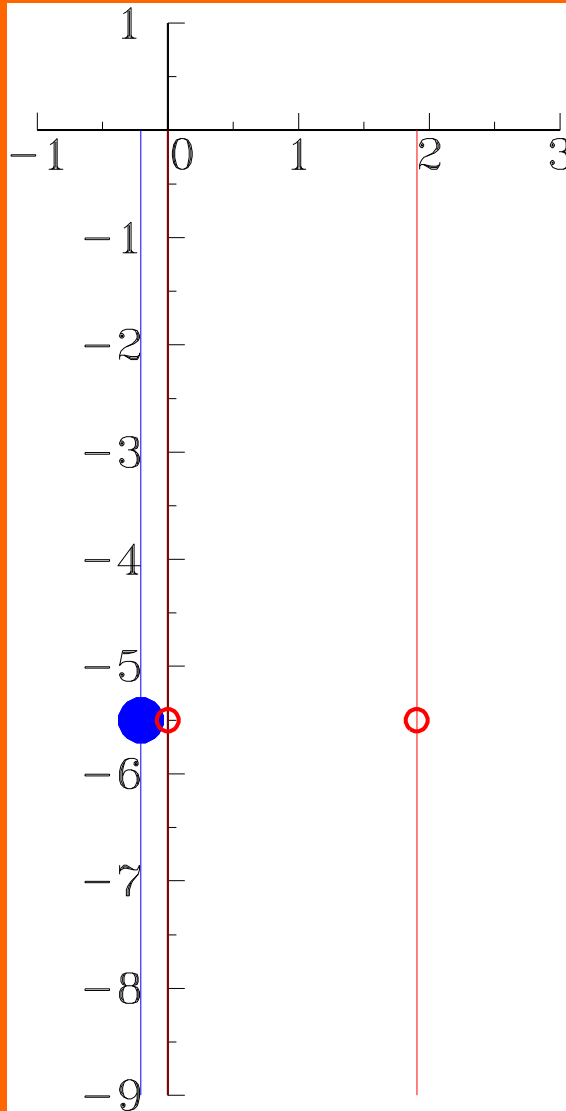
$t=20$



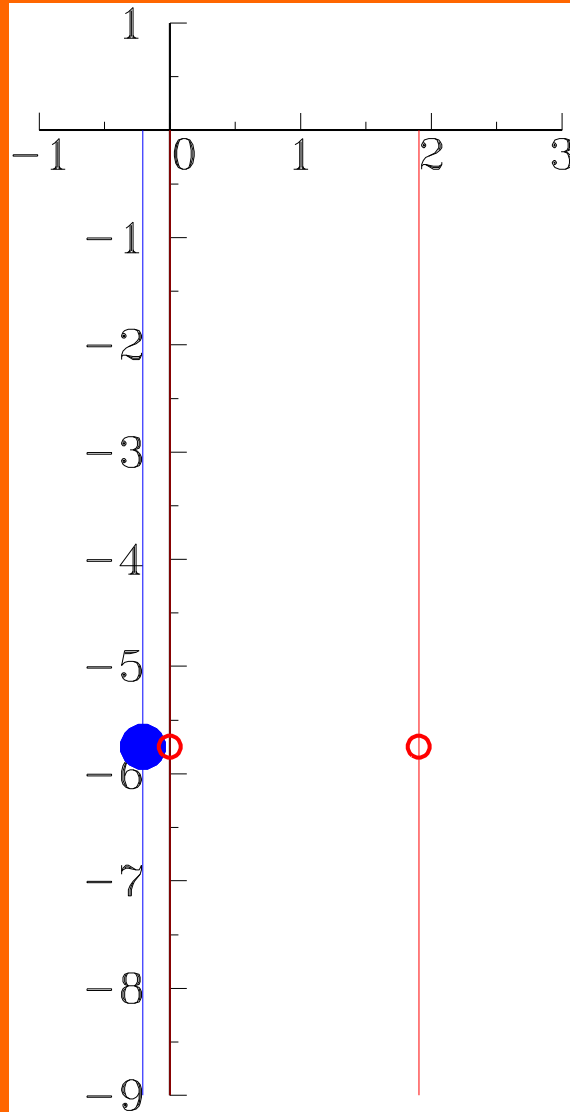
$t=21$



$t=22$

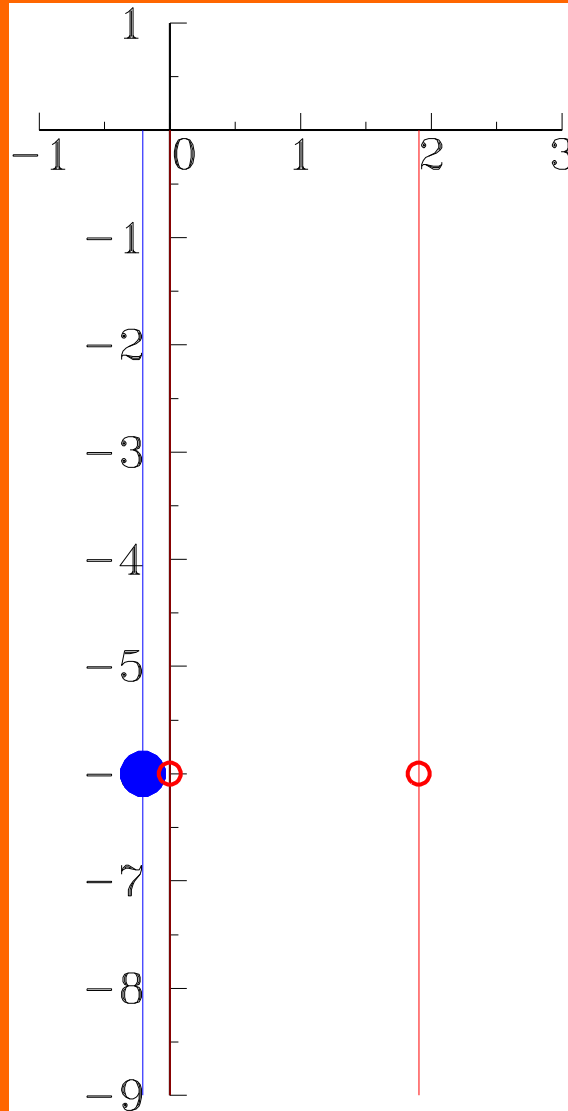


$t=23$

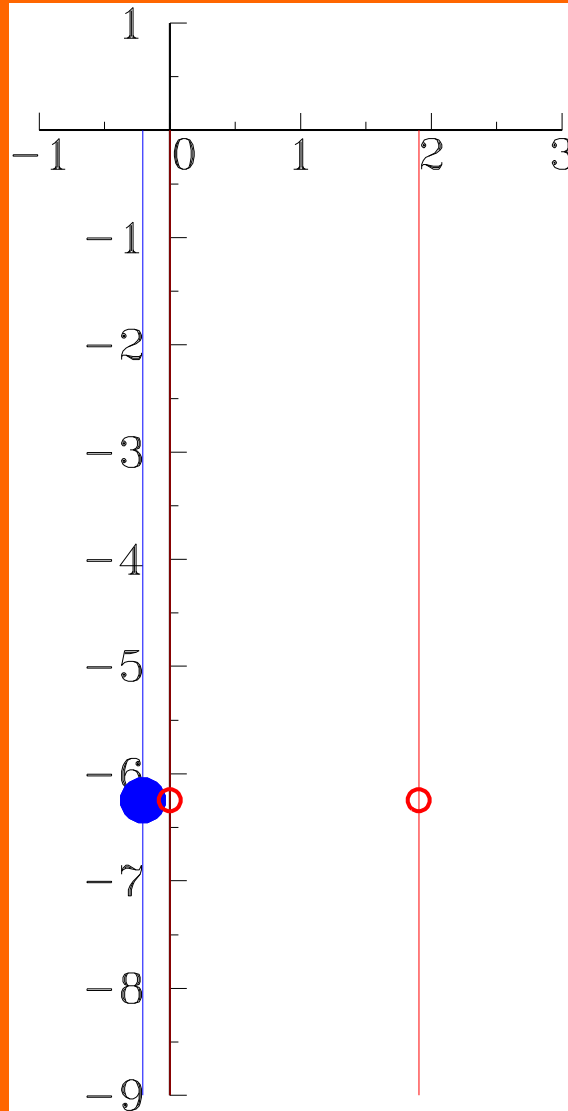




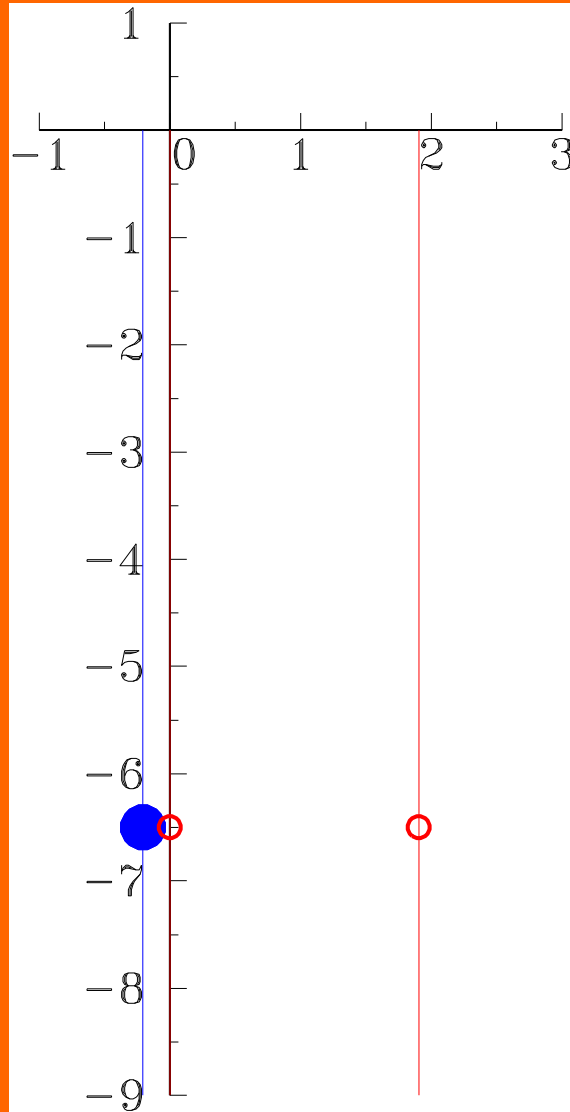
$t=24$



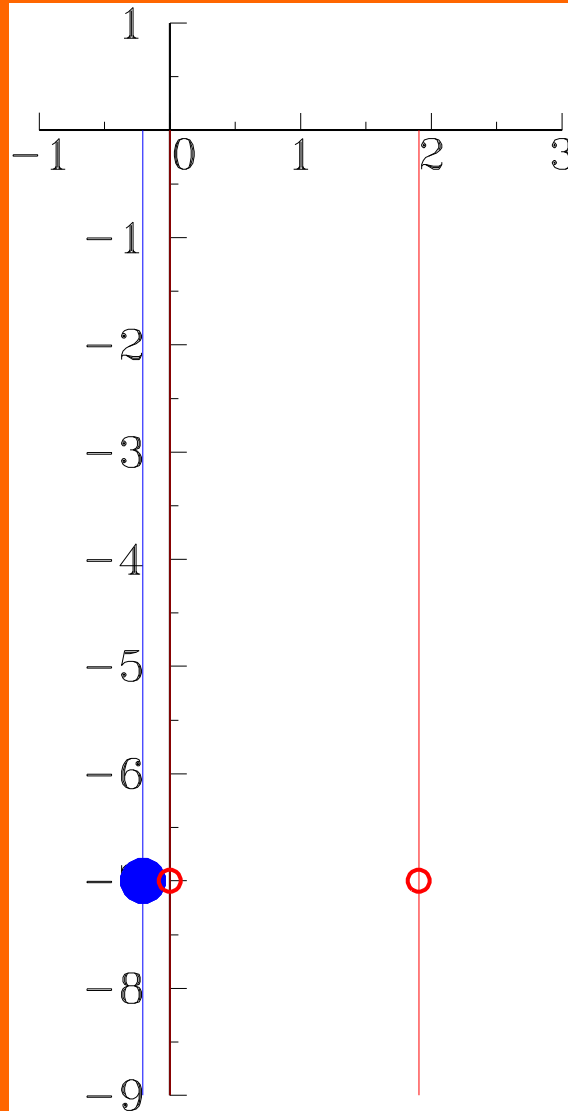
$t=25$



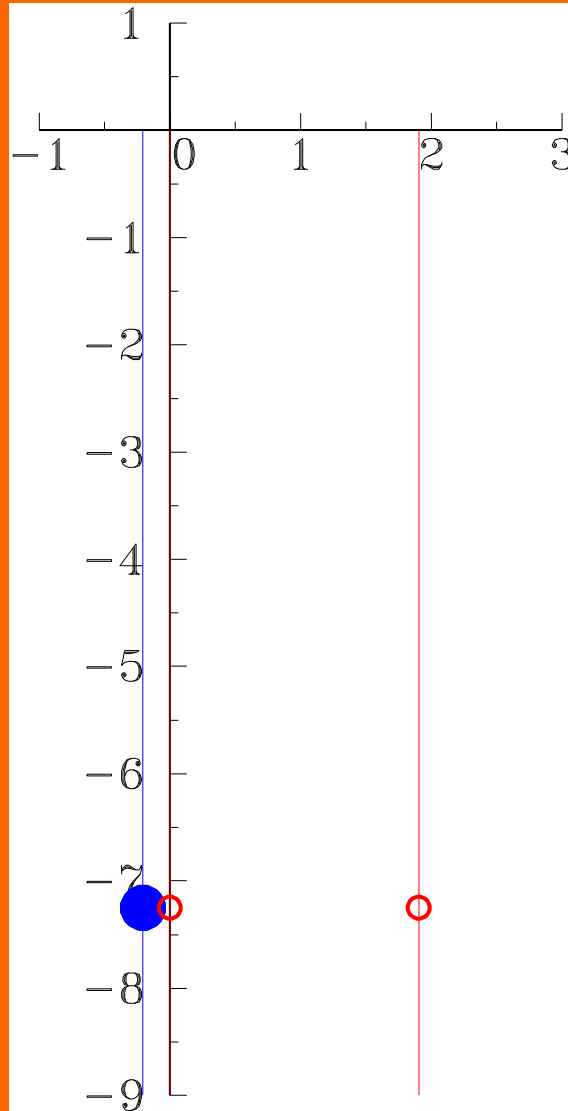
**t=26**



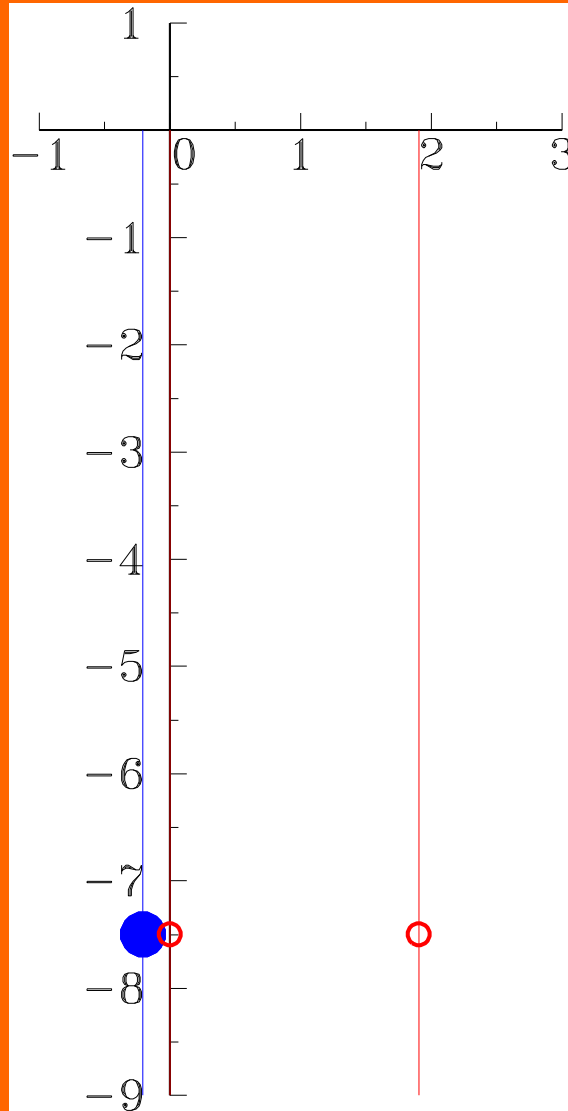
$t=27$



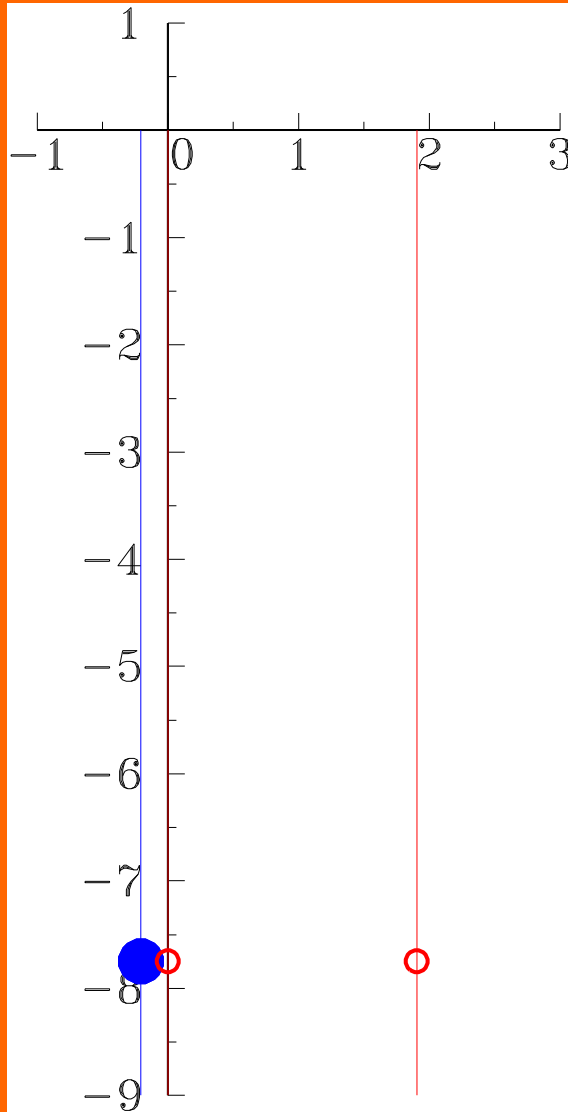
$t=28$



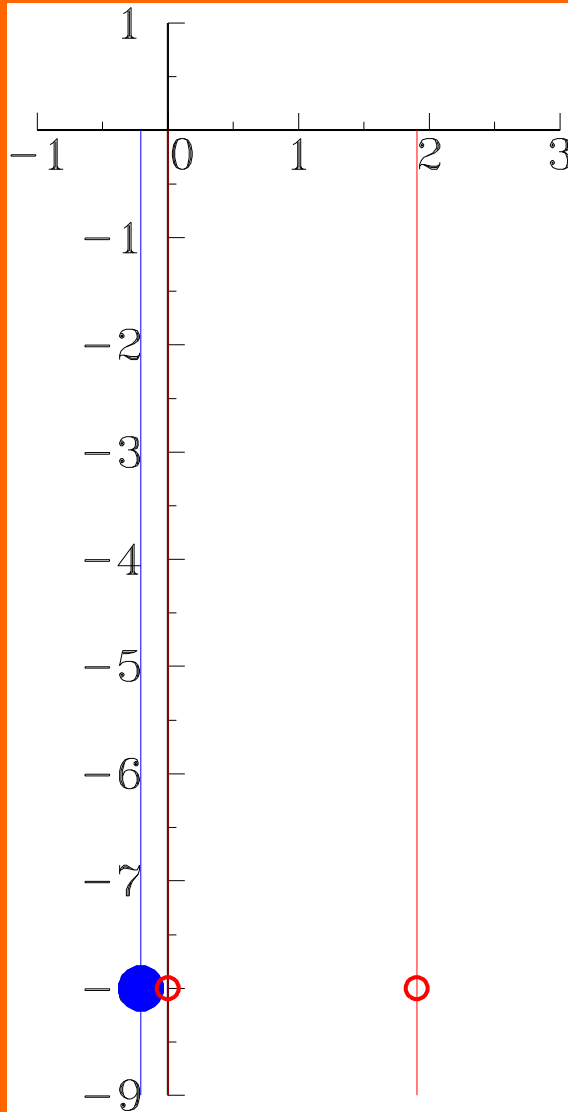
$t=29$



$t=30$

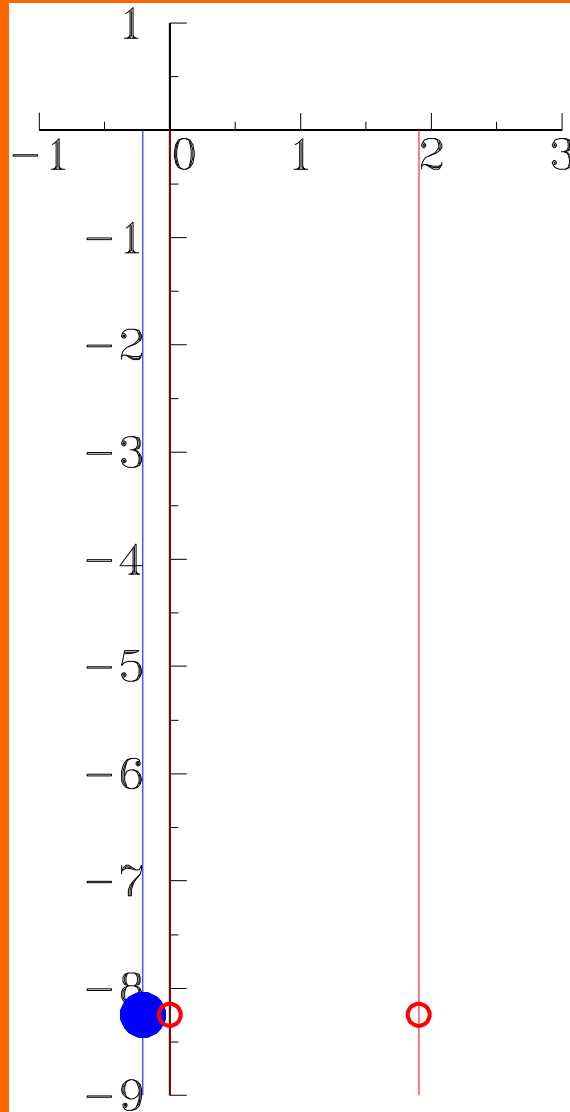


$t=31$





$t=32$



# Задача об $A$ хетонах, расположенных в вершинах равностороннего $A$ -угольника

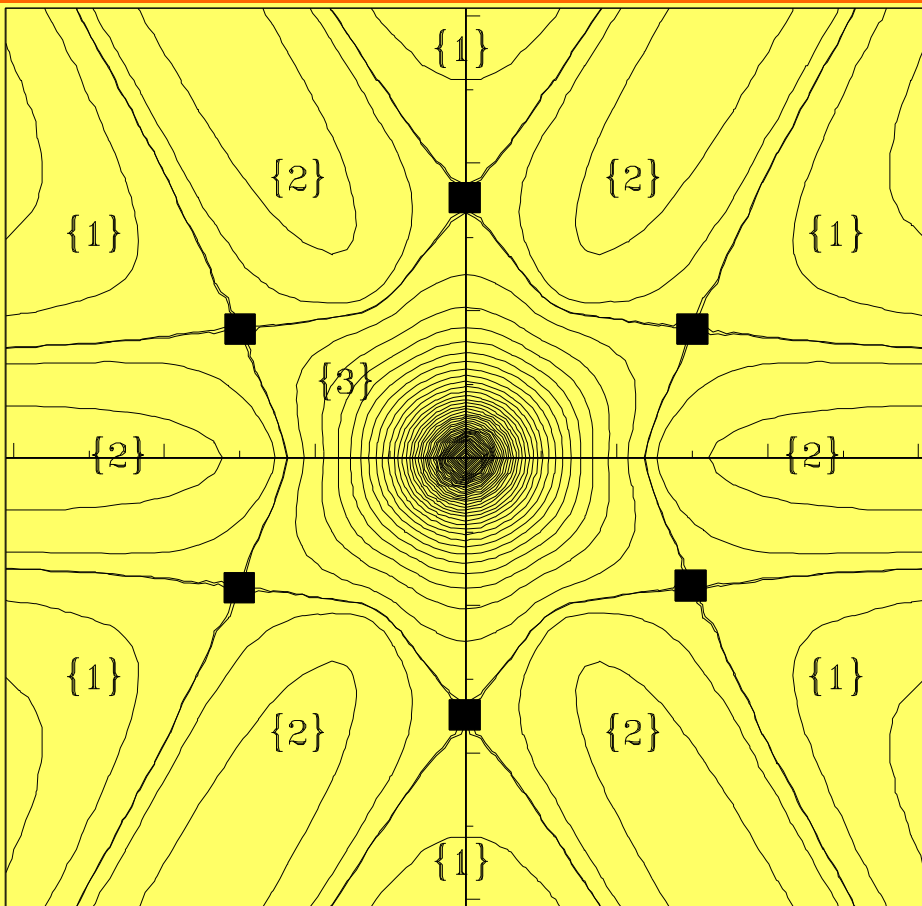
$$x_j^\alpha = r(t) \cos \left[ \varphi_j(t) + \frac{2\pi(\alpha - 1)}{A} \right], \quad y_j^\alpha = r(t) \sin \left[ \varphi_j(t) + \frac{2\pi(\alpha - 1)}{A} \right]$$

$$\dot{r} = -\frac{\kappa}{4\pi r} \left\{ \frac{A}{2} s(0, A\varphi) - \gamma r \left[ \sum_{\alpha=1}^{A-1} s(\alpha, 0) S(\alpha, 0) + \sum_{\alpha=0}^{A-1} s(\alpha, \varphi) S(\alpha, \varphi) \right] \right\}$$

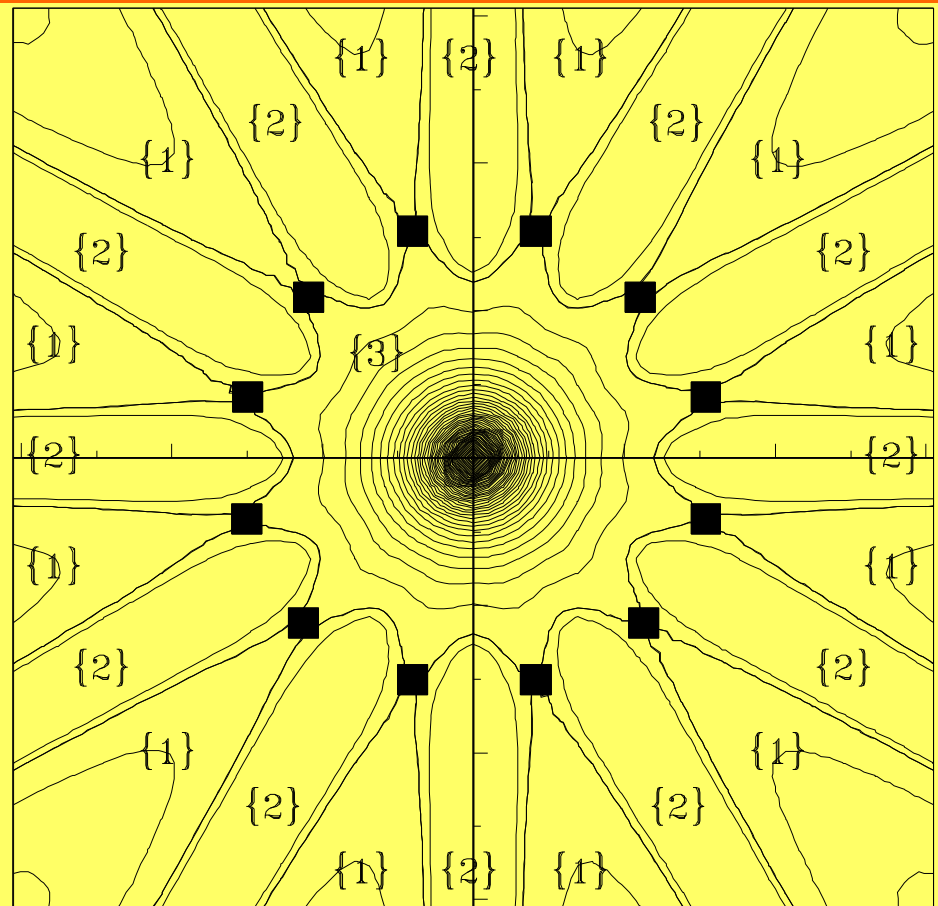
$$\dot{\varphi} = \frac{\kappa}{4\pi r^2} \left\{ -\frac{1}{2} + \gamma r \left[ \sum_{\alpha=1}^{A-1} S(\alpha, 0) + \sum_{\alpha=0}^{A-1} S(\alpha, \varphi) \right] \right\}$$

$$s(c, d) = \frac{\sin \left( \frac{2\pi c}{A} + d \right)}{1 - \cos \left( \frac{2\pi c}{A} + d \right)}, \quad S(c, d) = \left| \sin \left( \frac{\pi c}{A} + \frac{d}{2} \right) \right| K_1 \left[ 2\gamma r \left| \sin \left( \frac{\pi c}{A} + \frac{d}{2} \right) \right| \right].$$

# Фазовые портреты

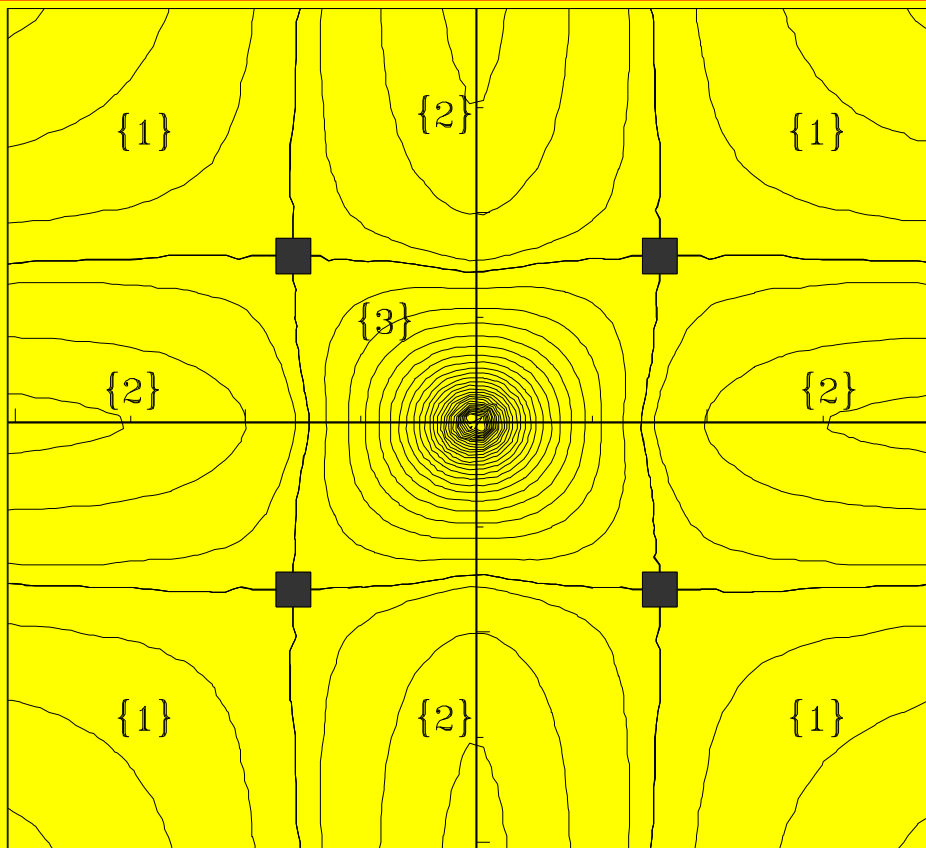


(a)

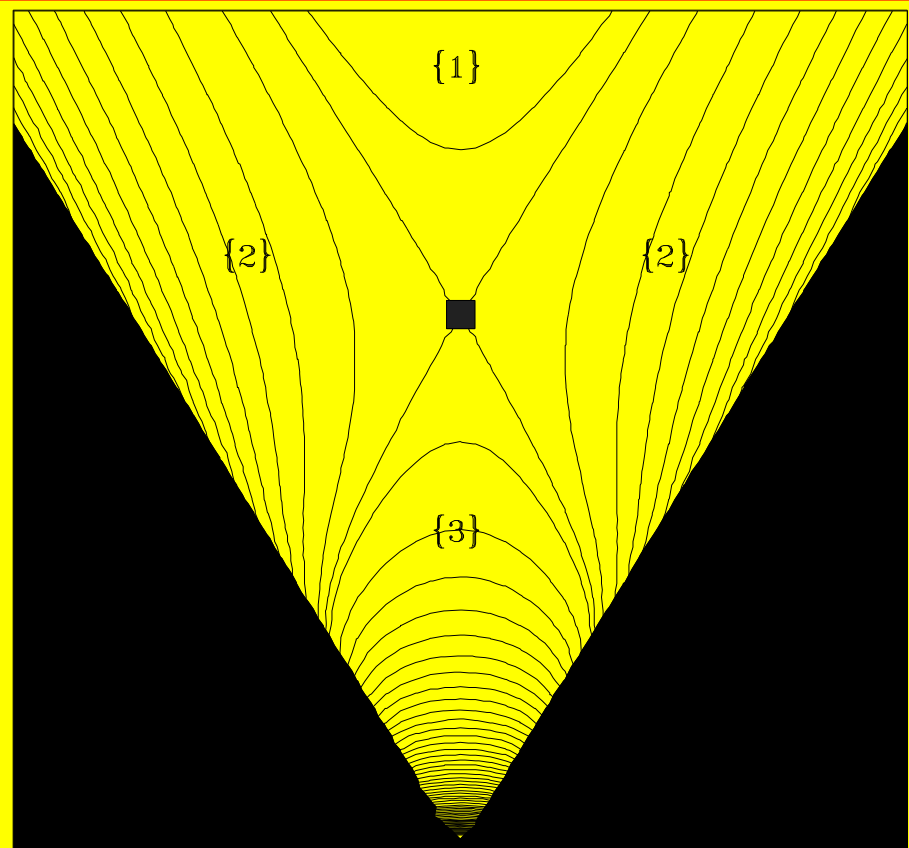


(b)

# Фазовые портреты при $A=2$

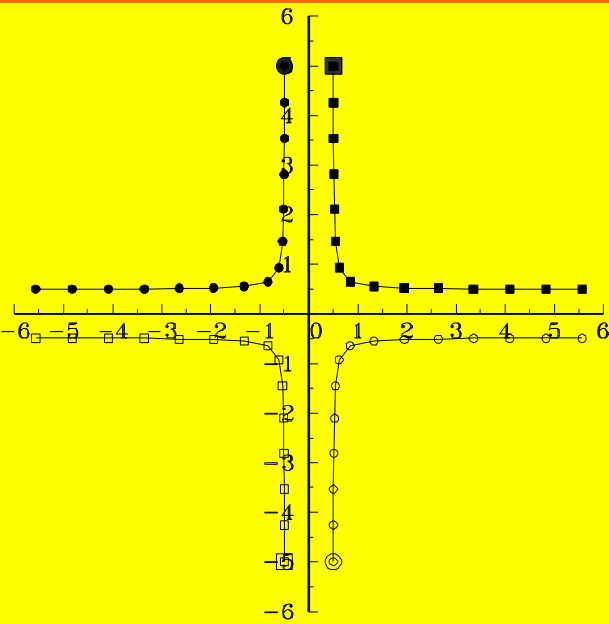


(a)

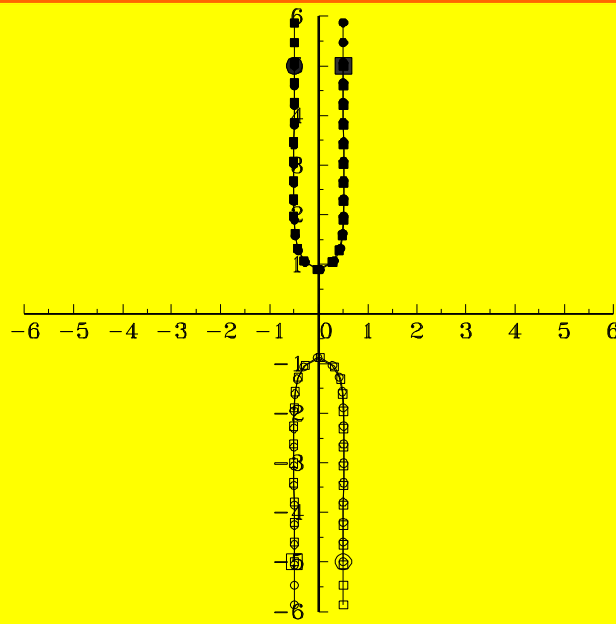


(b)

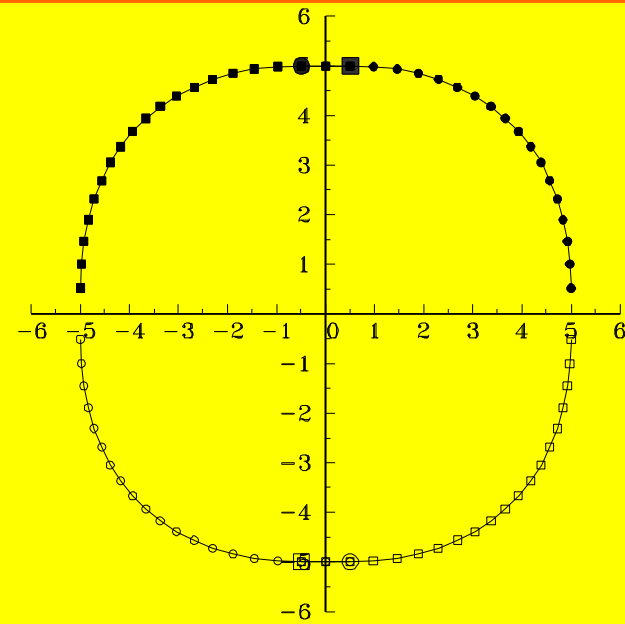
# Динамика двух хетонов



(a)

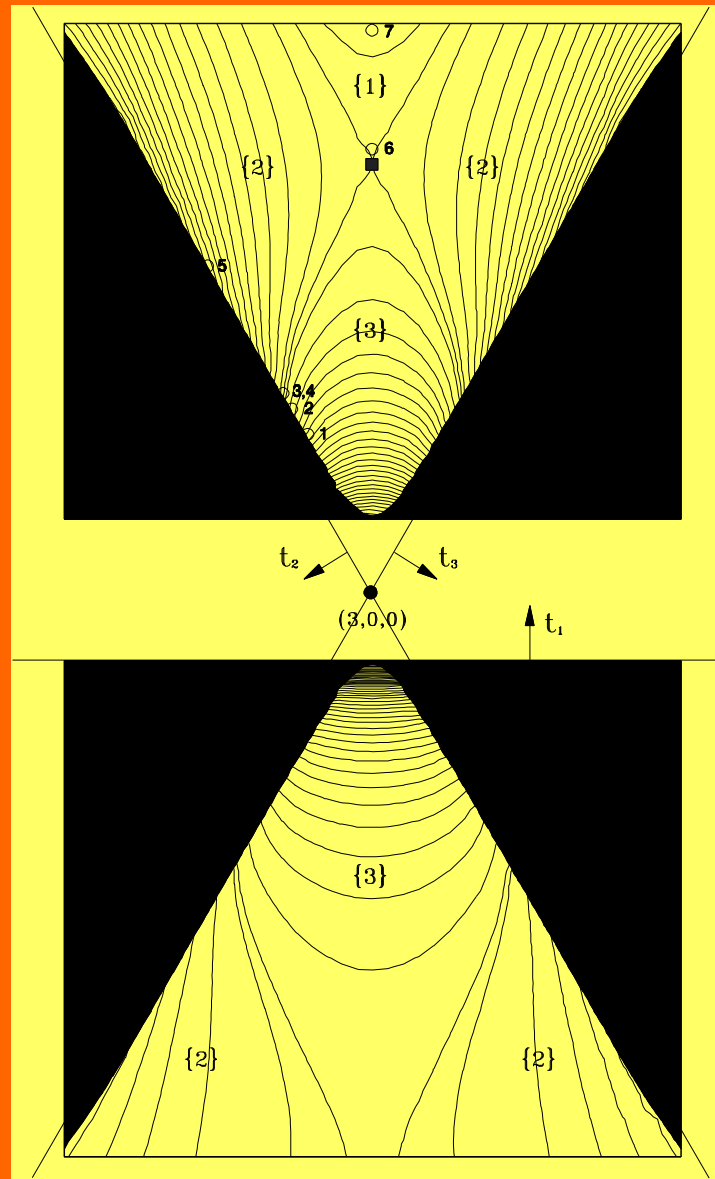


(b)

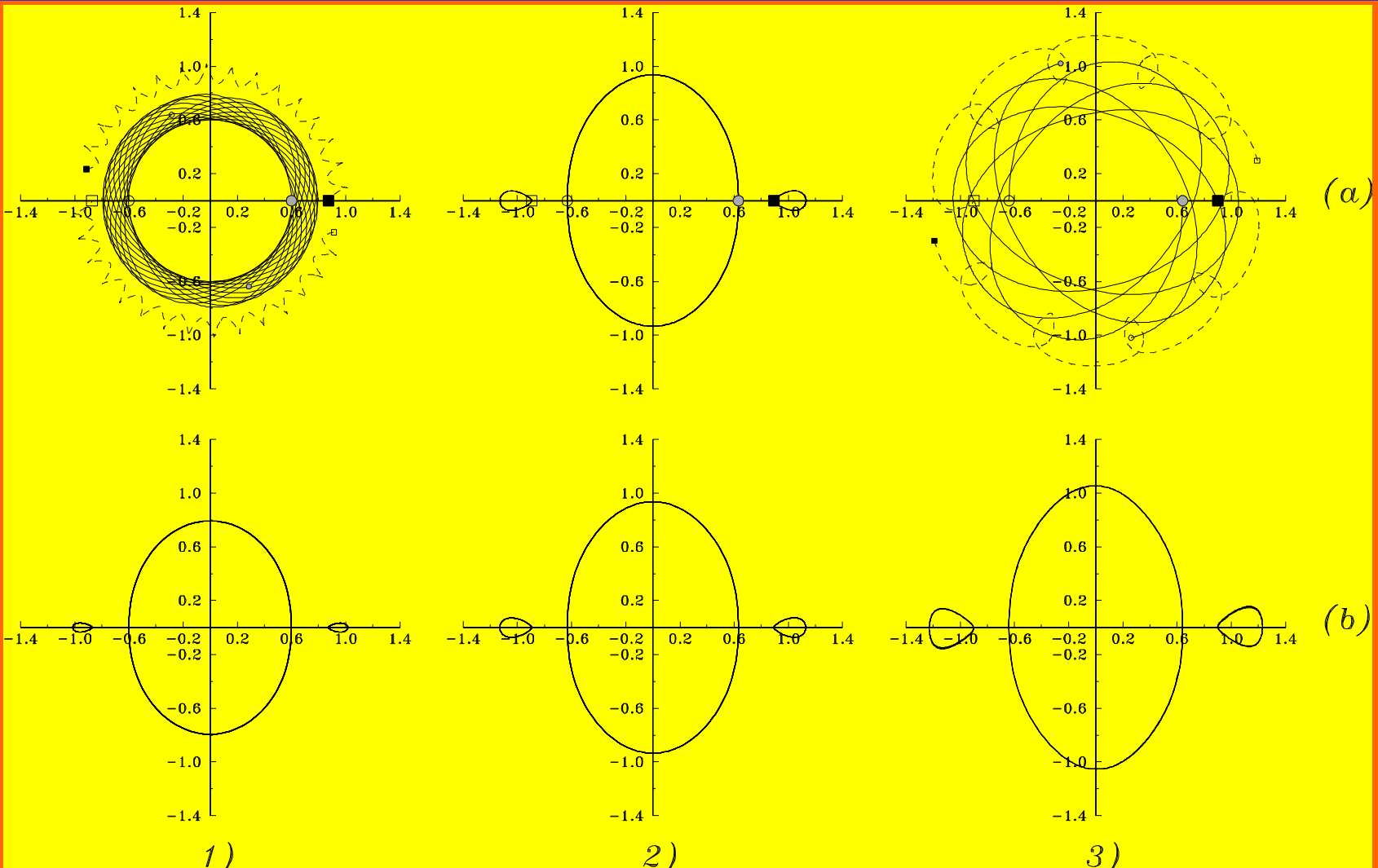


(c)

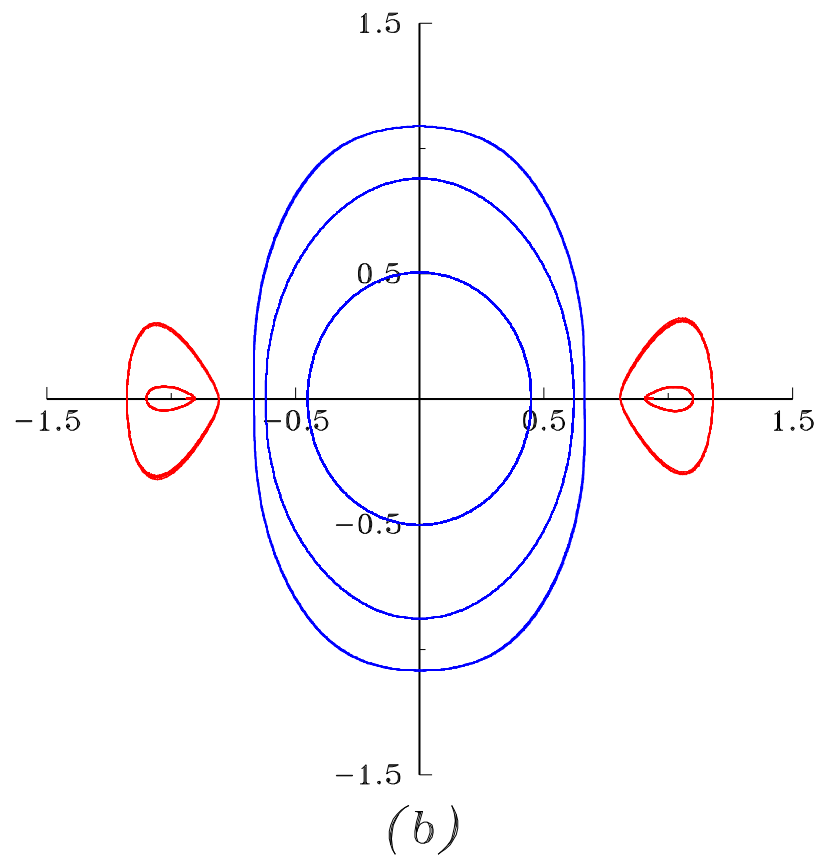
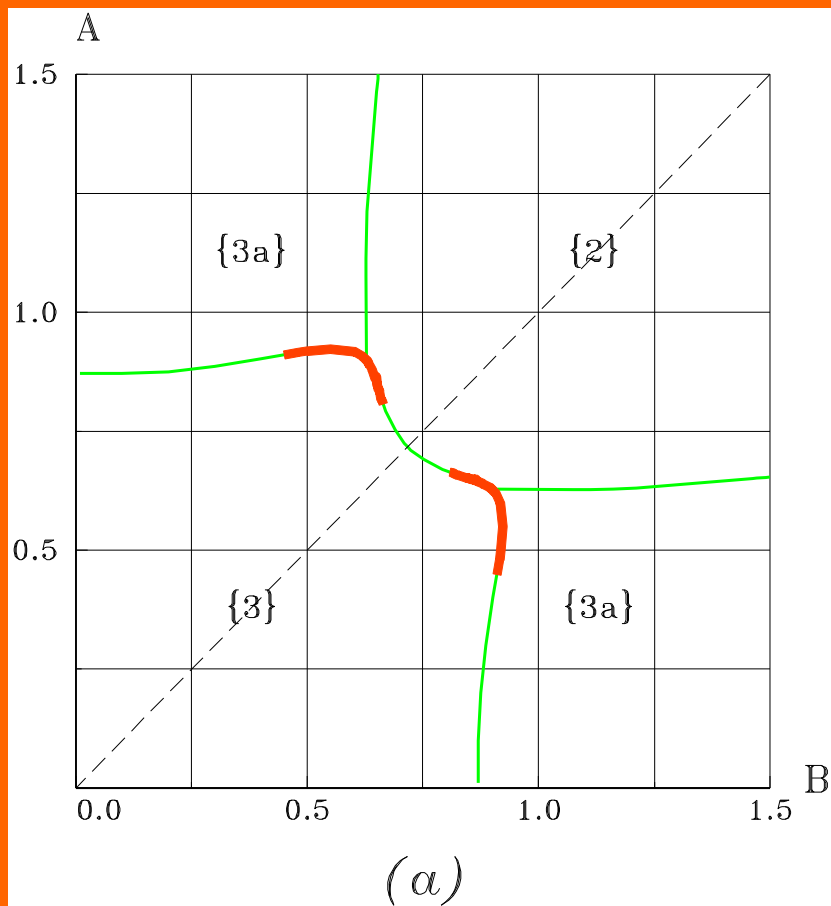
# Фазовые портреты при $A = 2$ , $M \neq 0$



# Траектории абсолютного движения и относительные хореографии для случая {3}

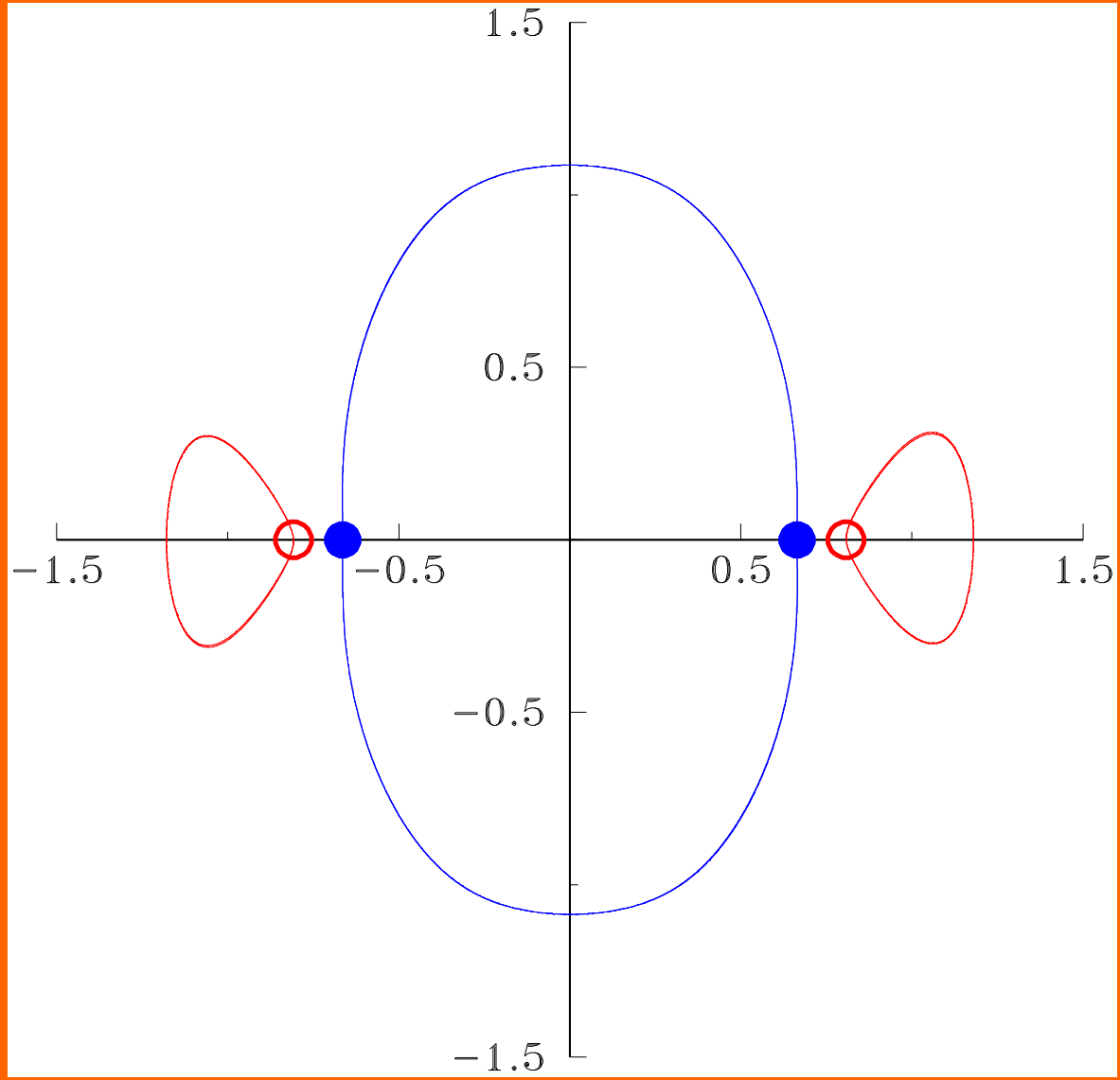


# Случай $A=2$ , $M \neq 0$ . Семейство абсолютных сложных хореографий

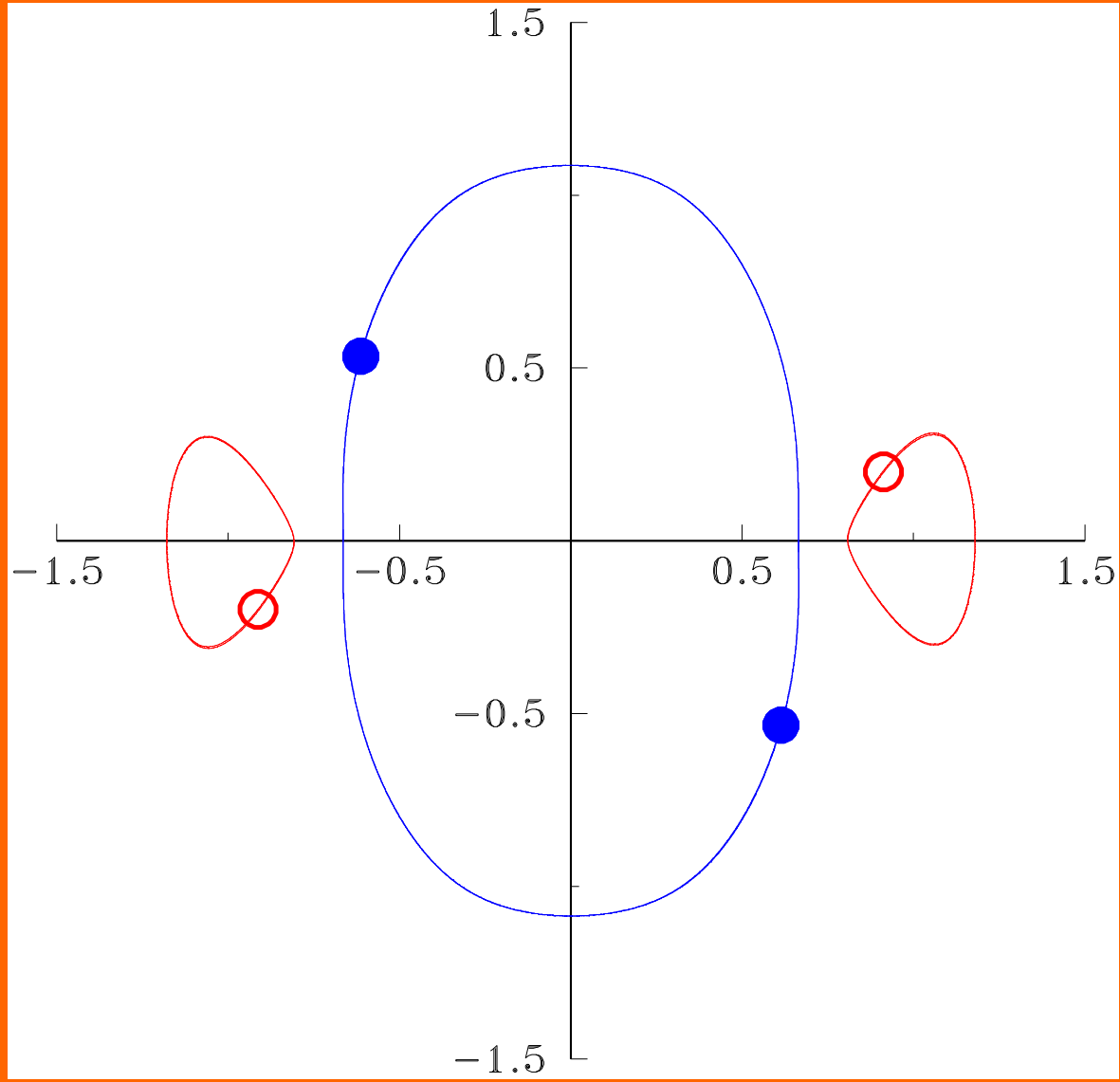




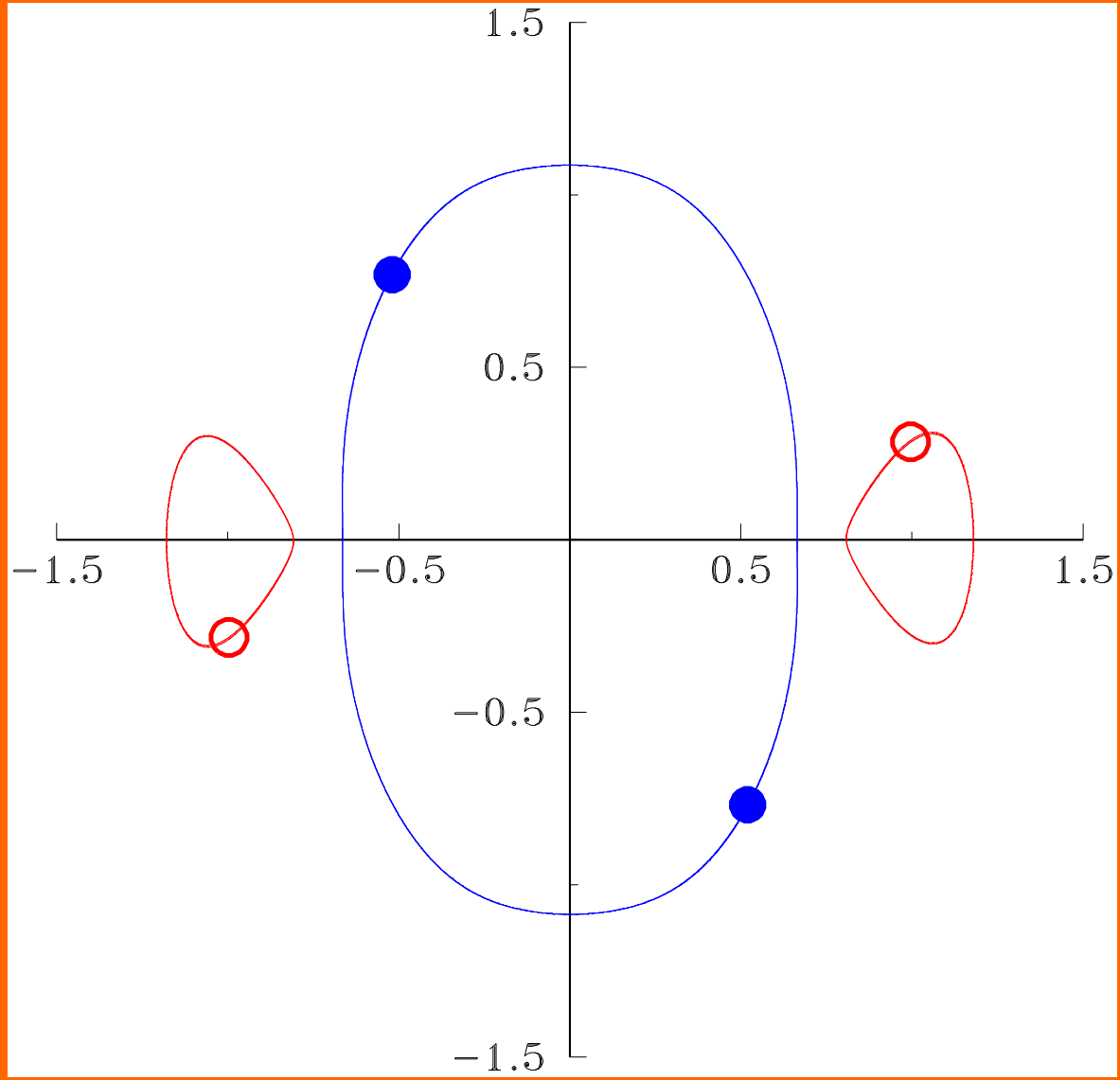
$t=0$



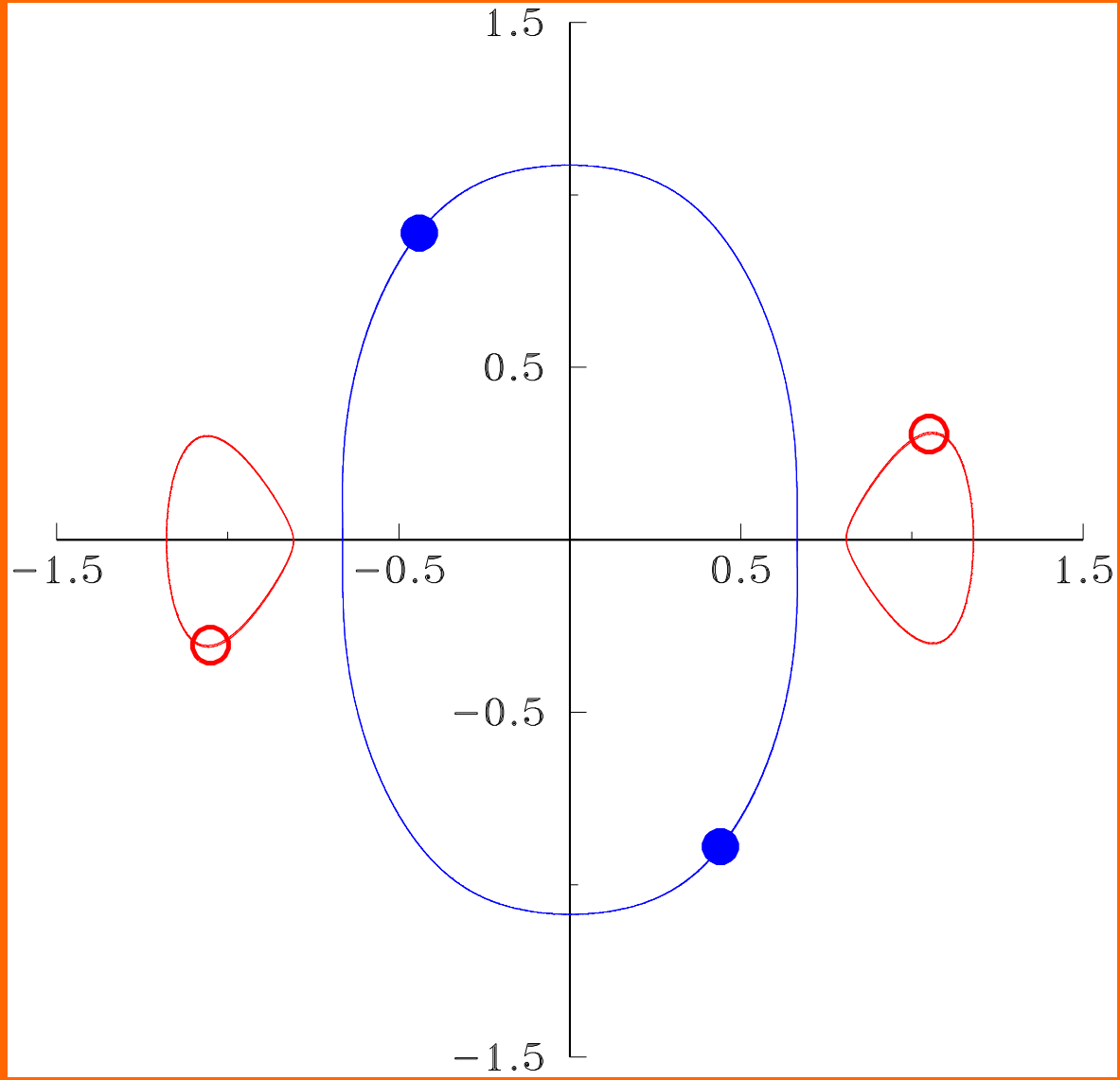
**t=1**



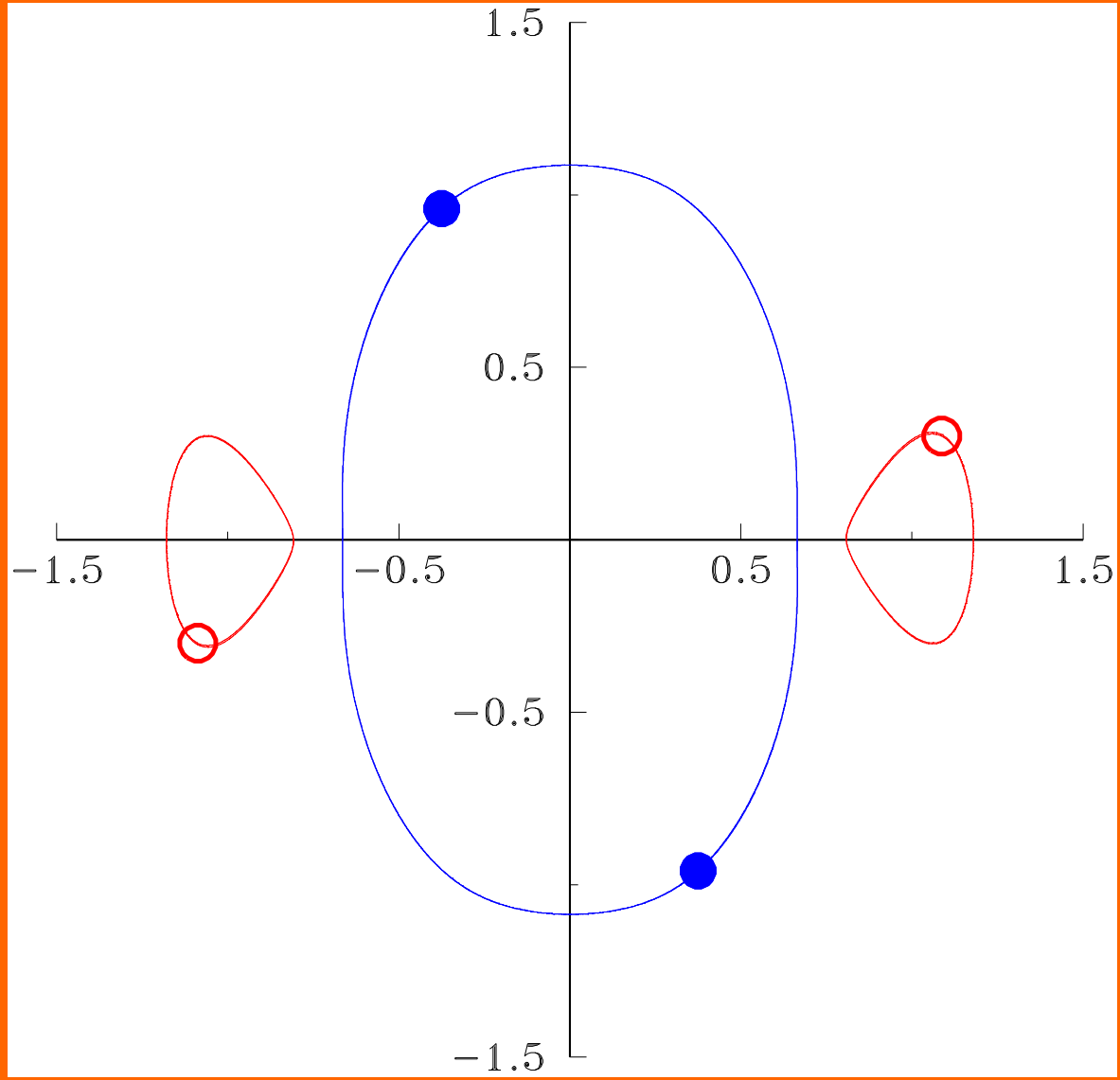
**t=2**



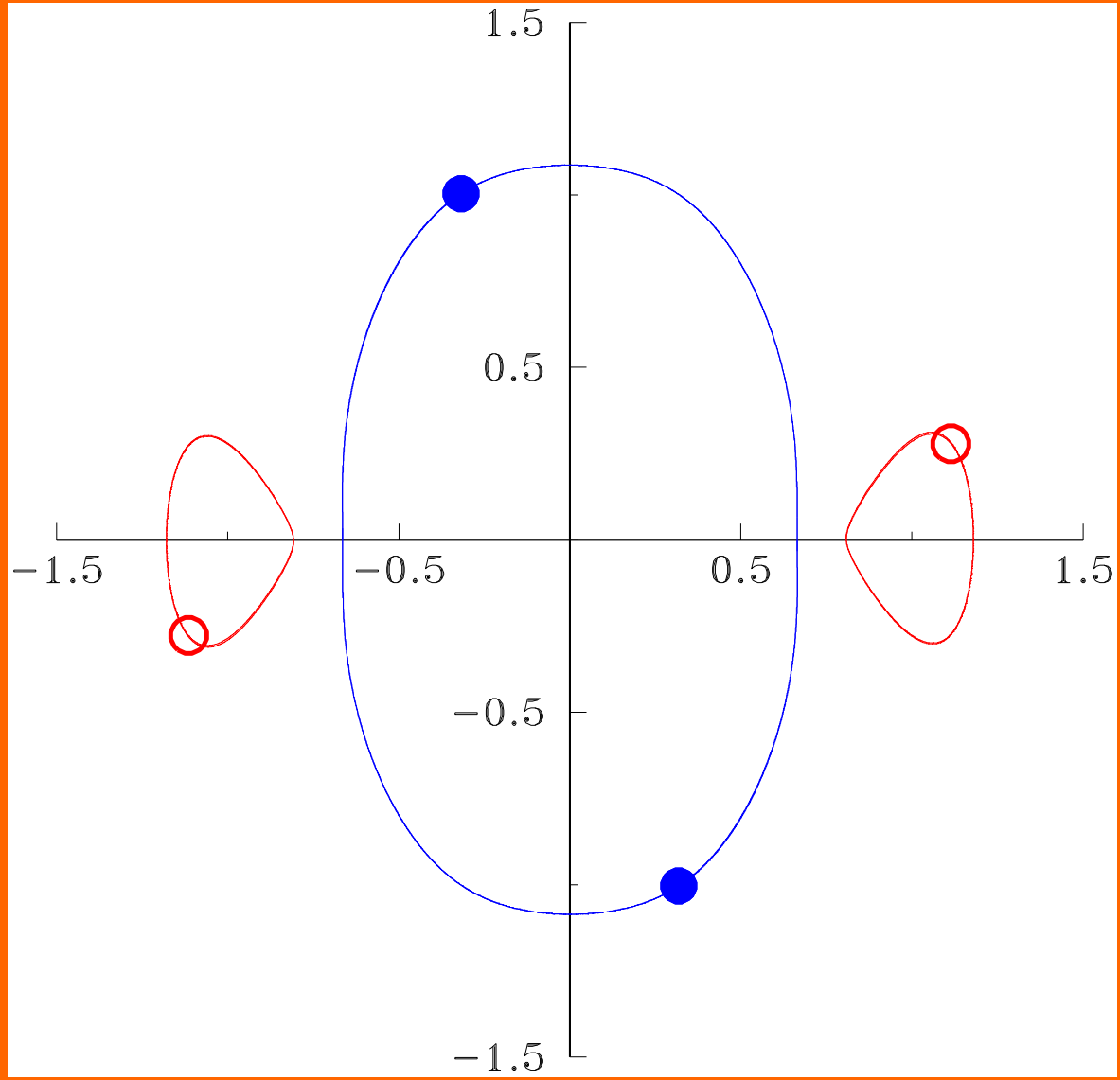
$t=3$



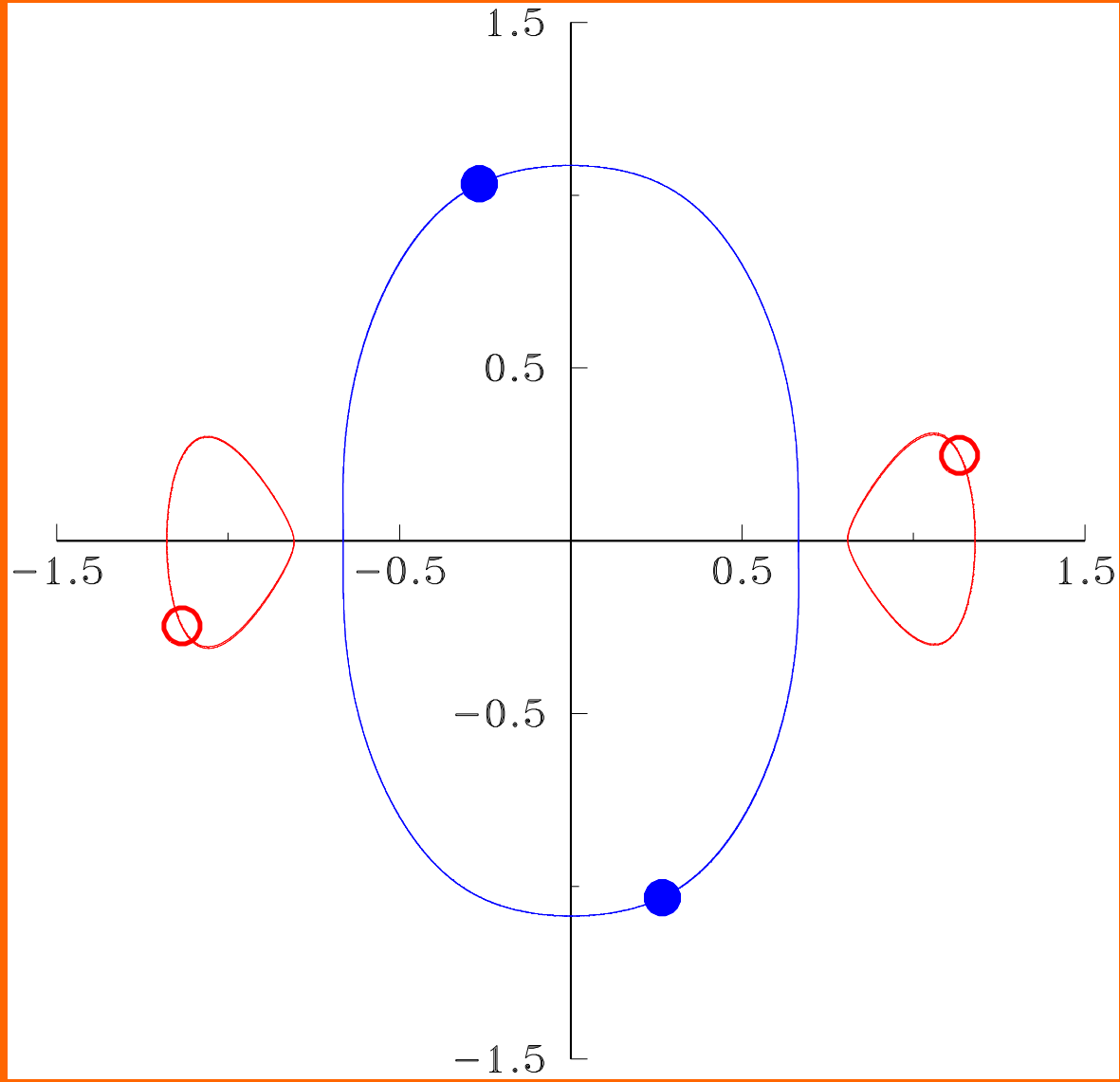
$t=4$



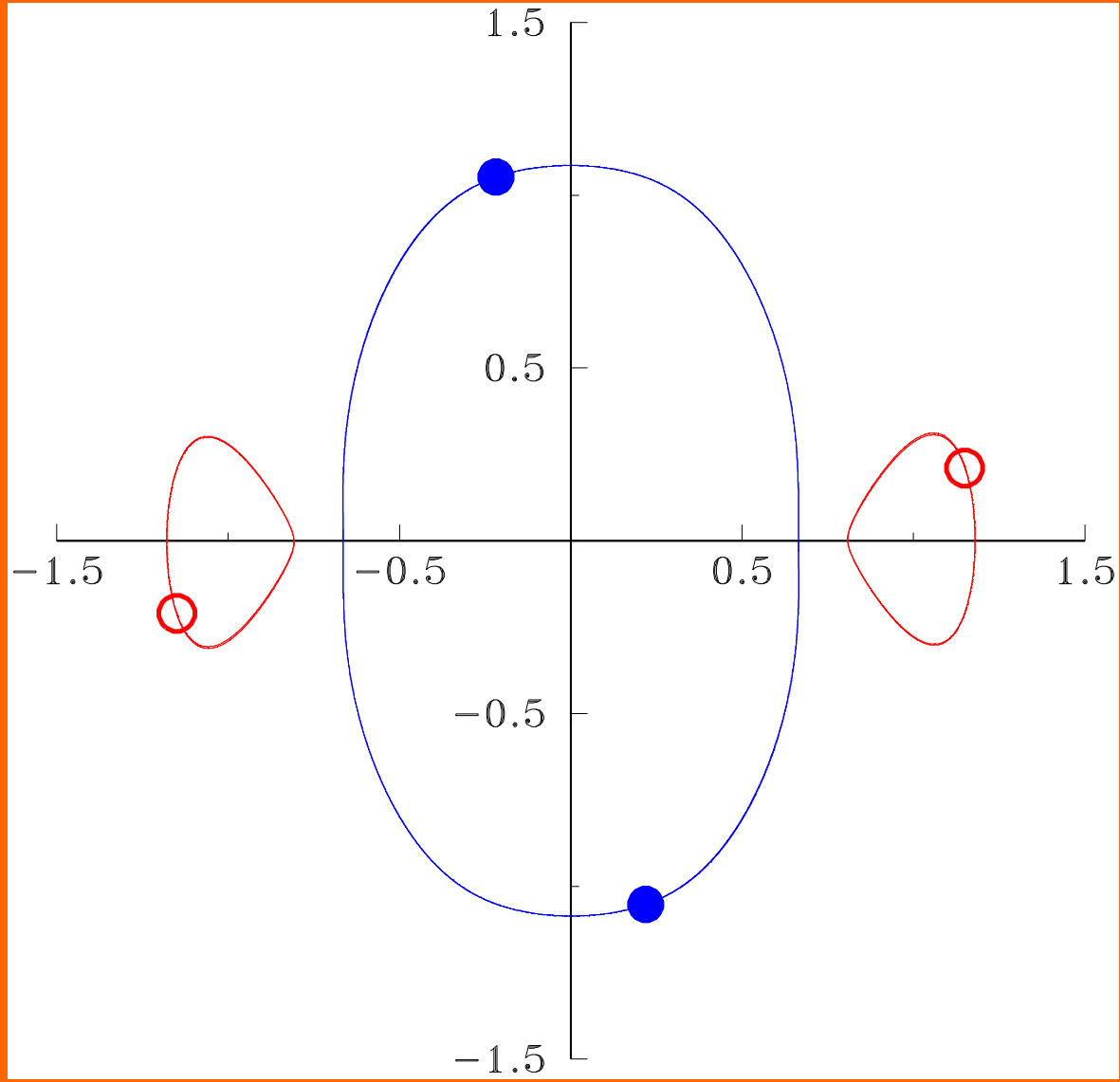
$t=5$



**t=6**

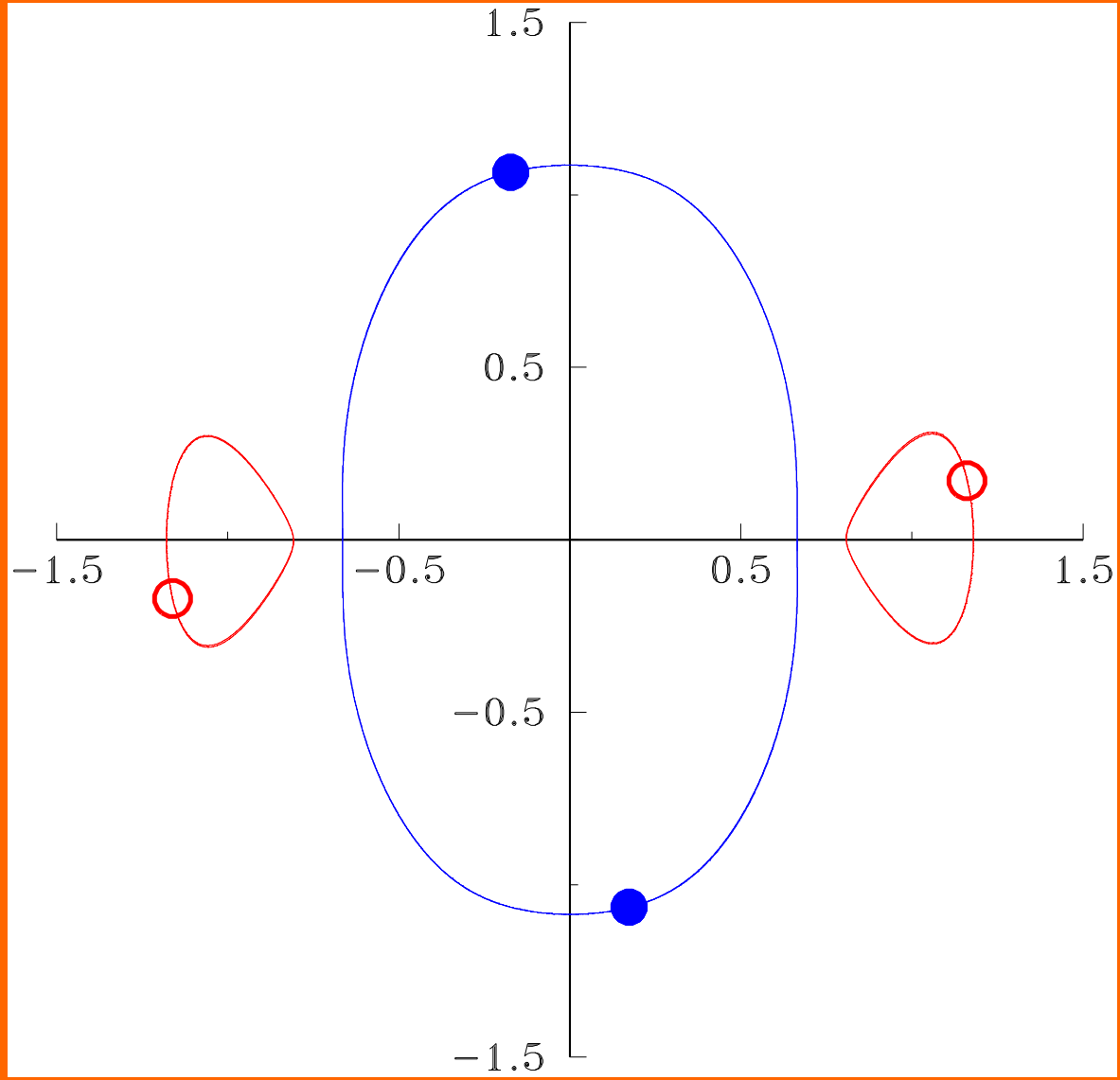


$t=7$

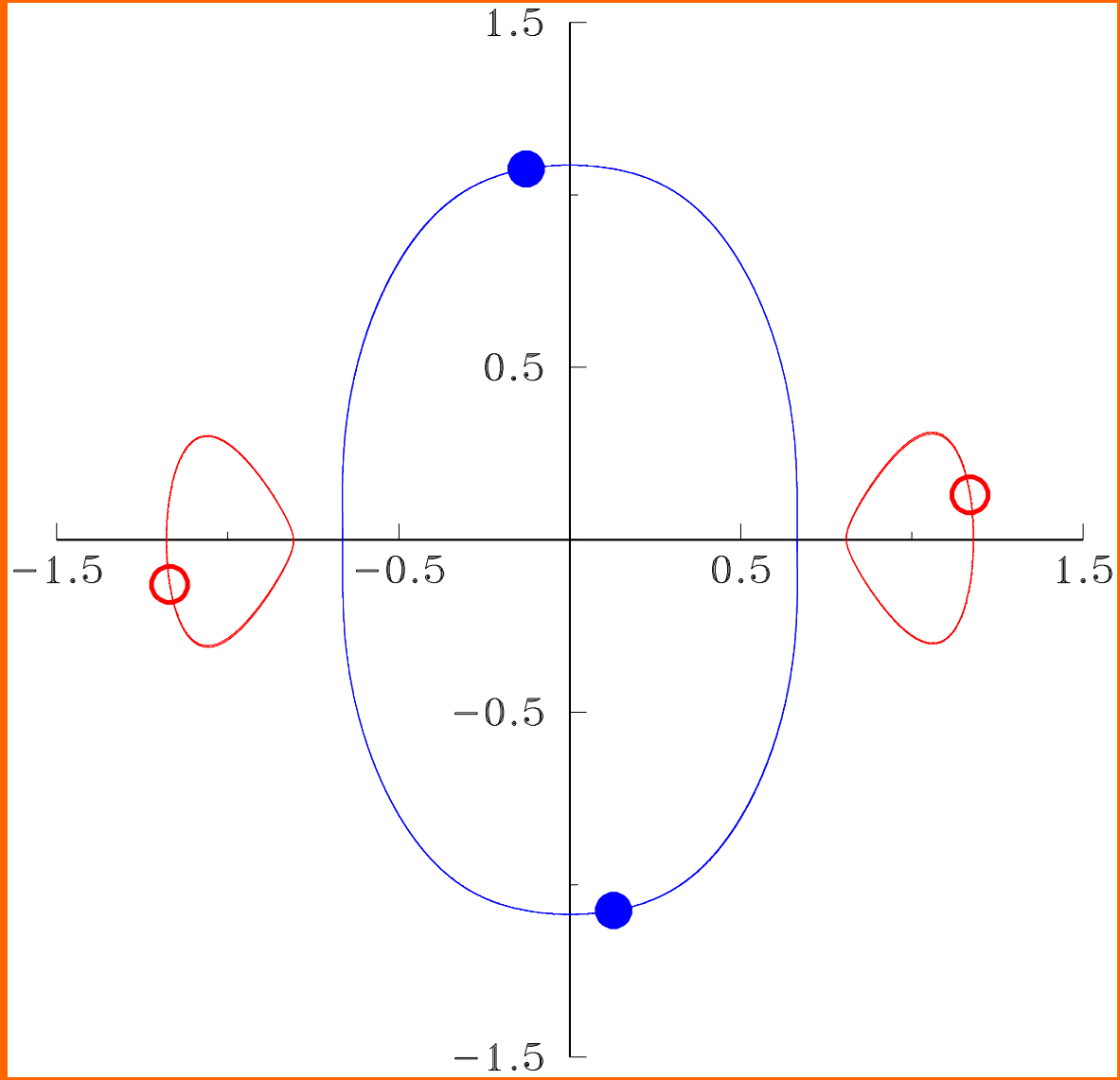




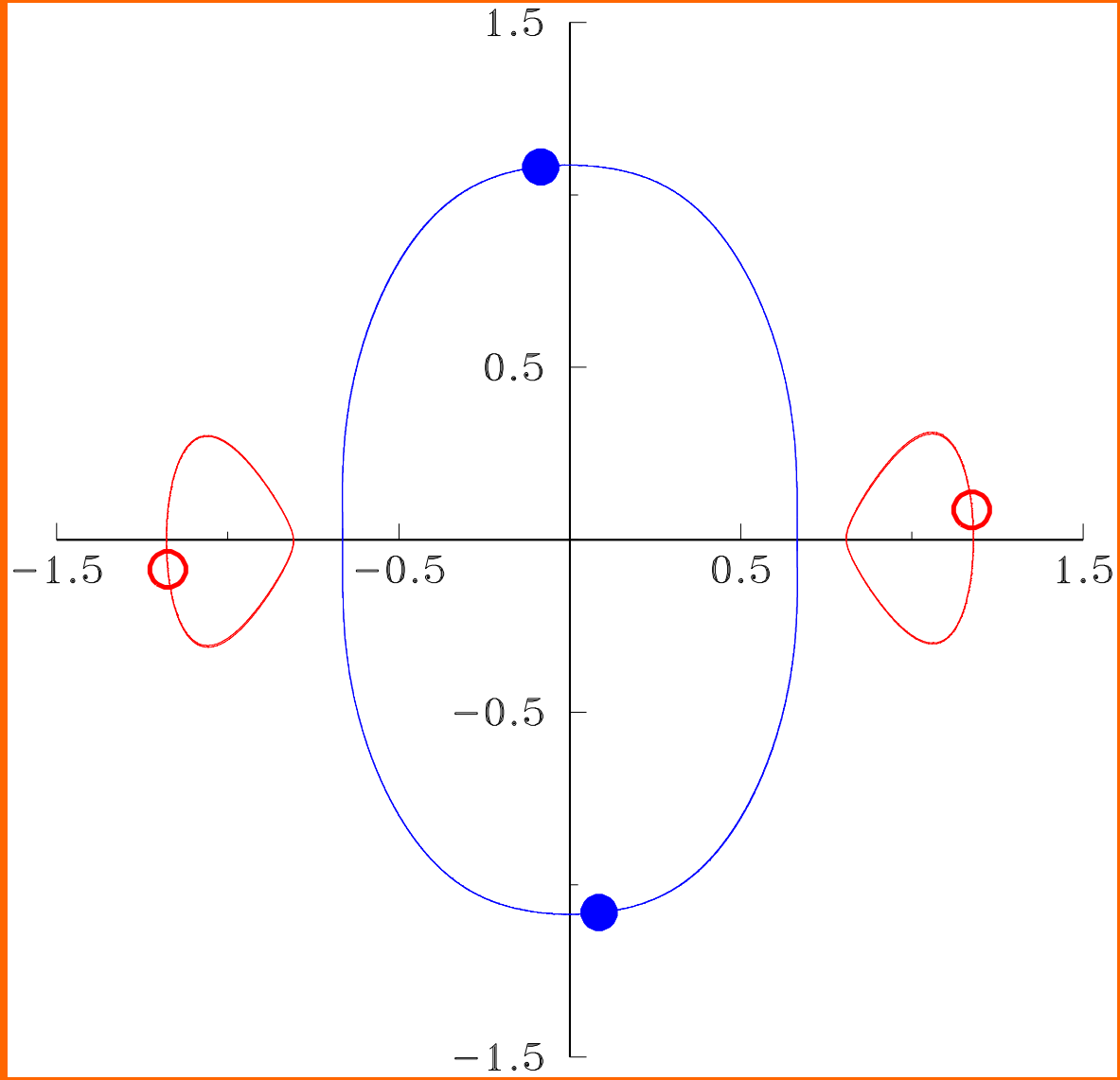
**t=8**



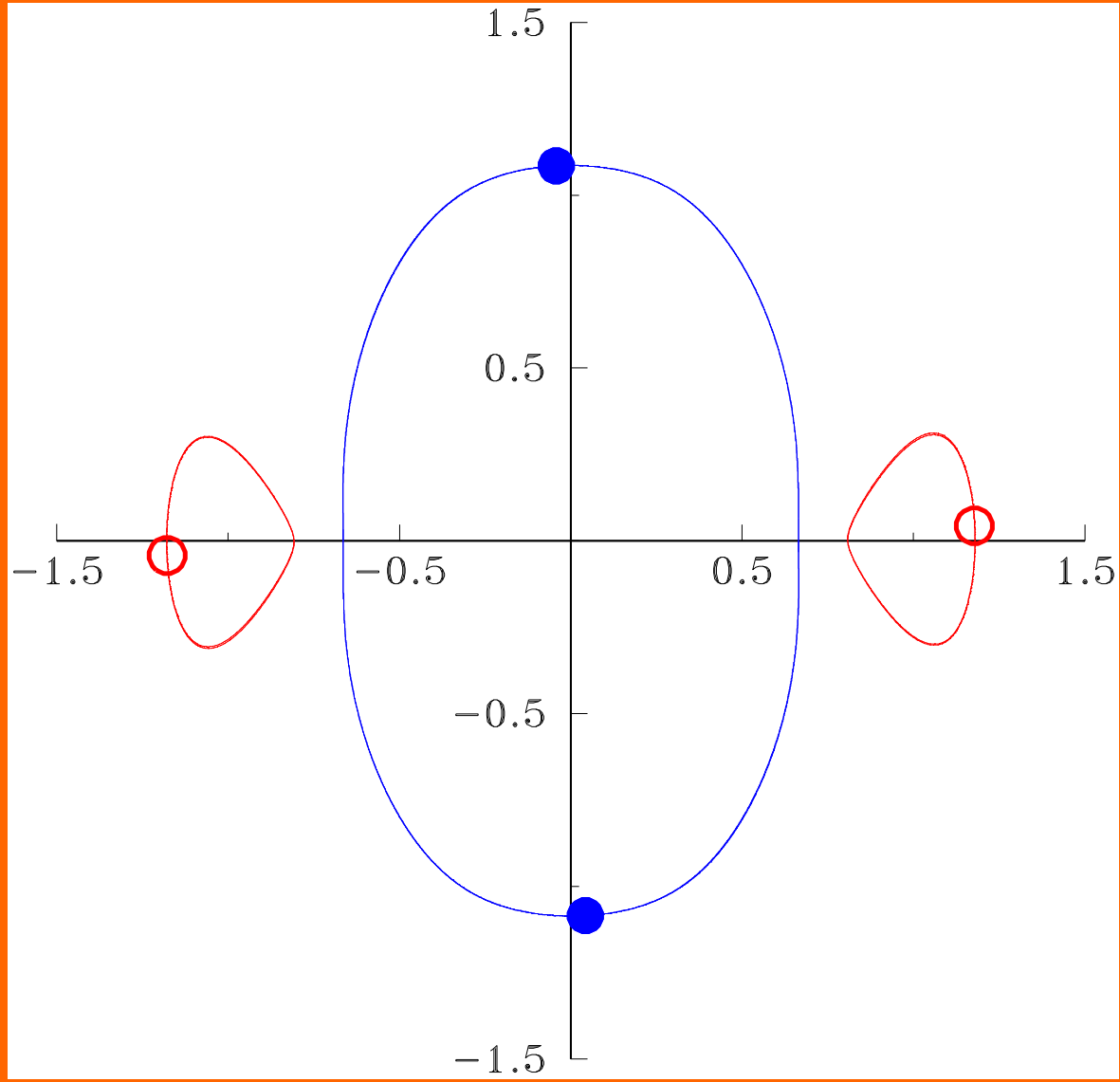
$t=9$



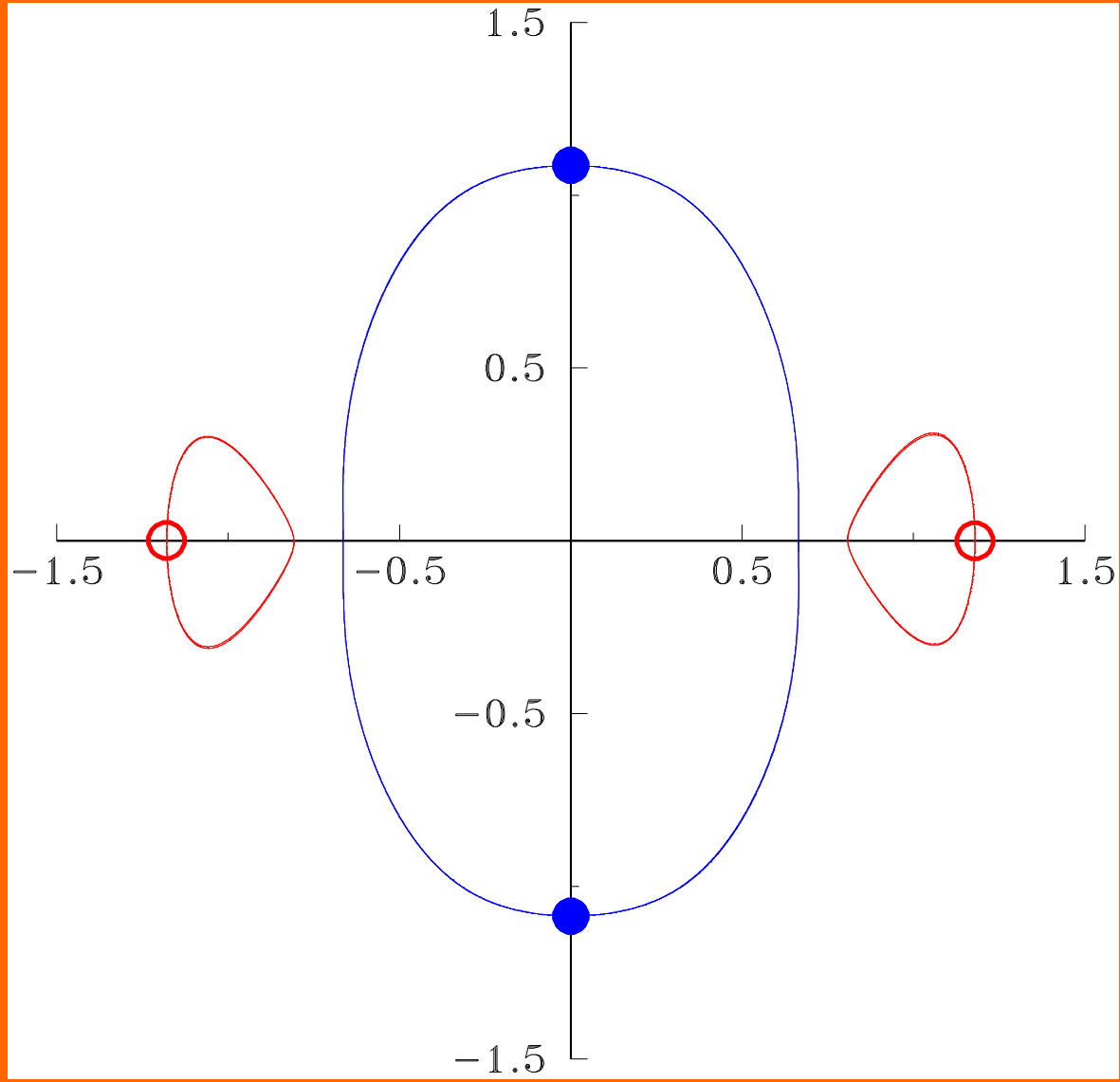
**t=10**



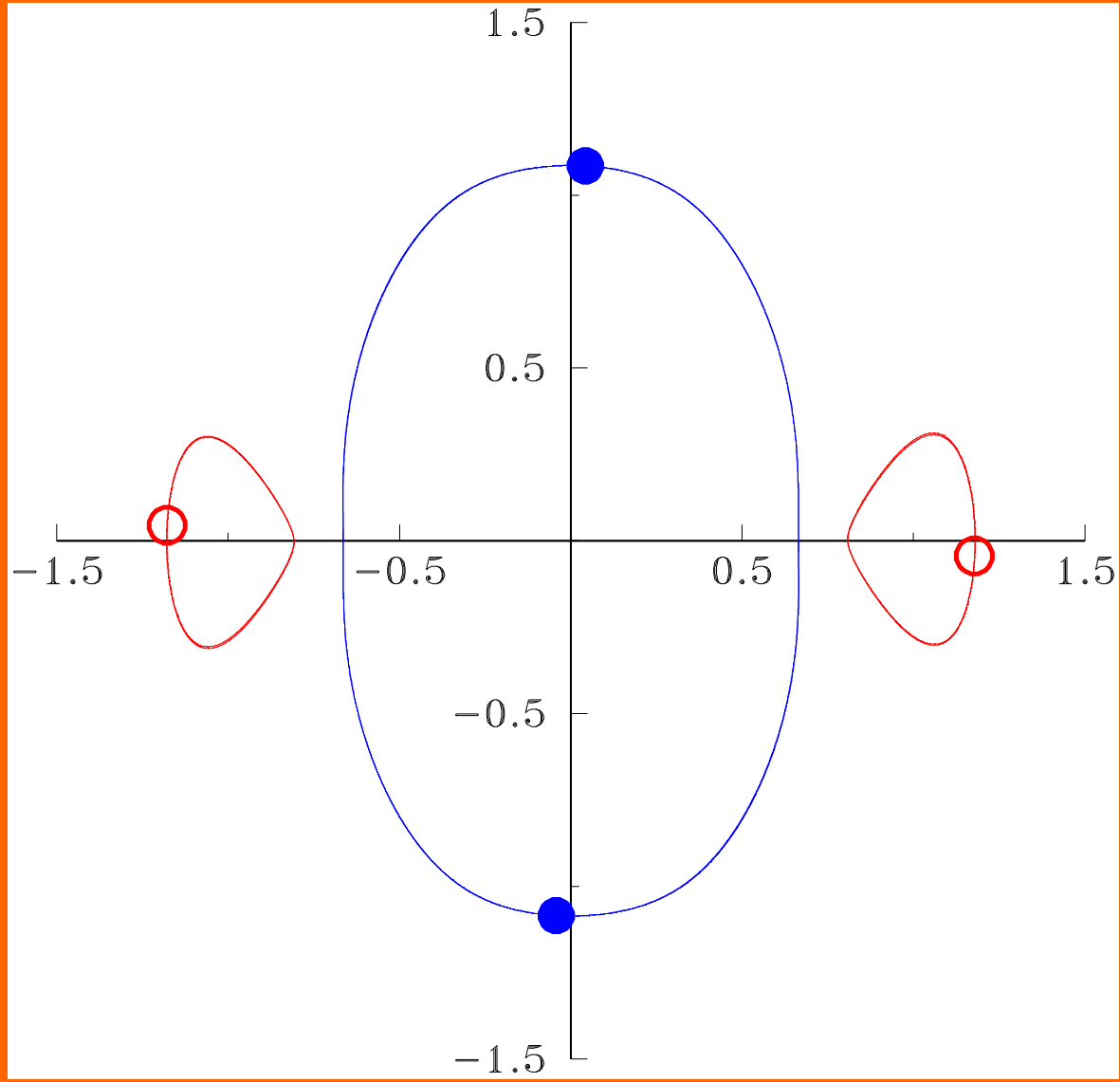
**t=11**



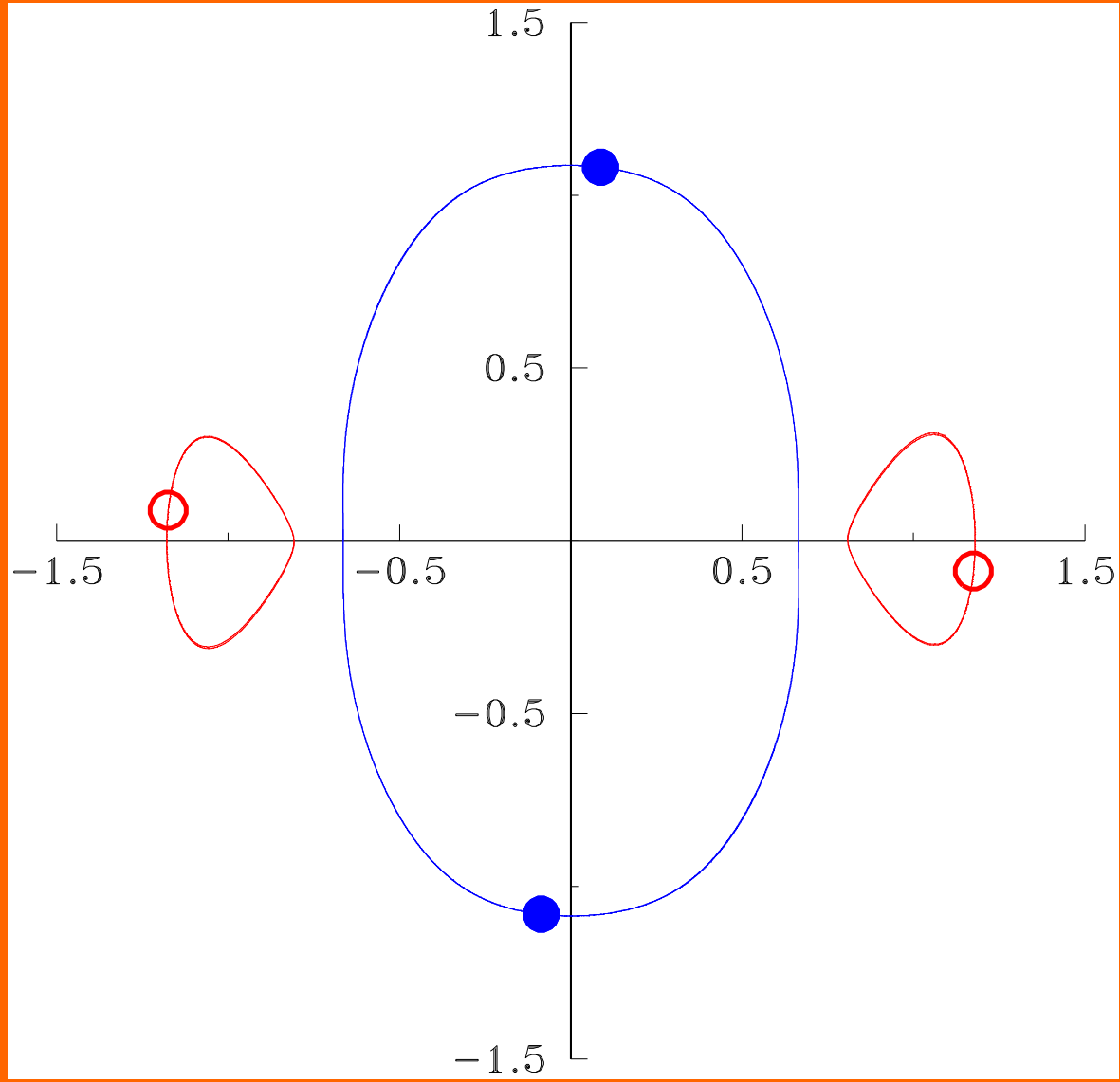
**t=12**



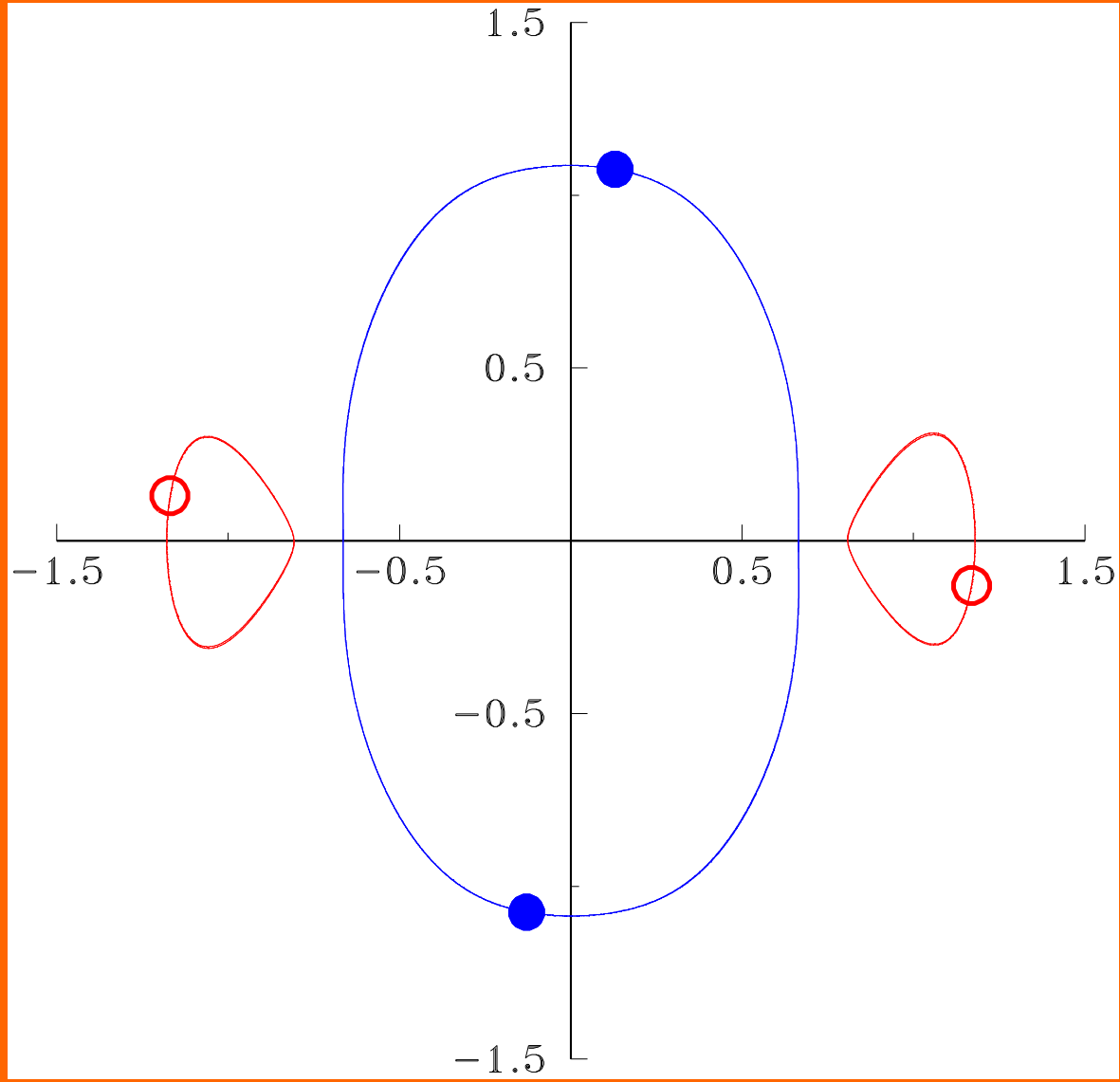
**t=13**



**t=14**

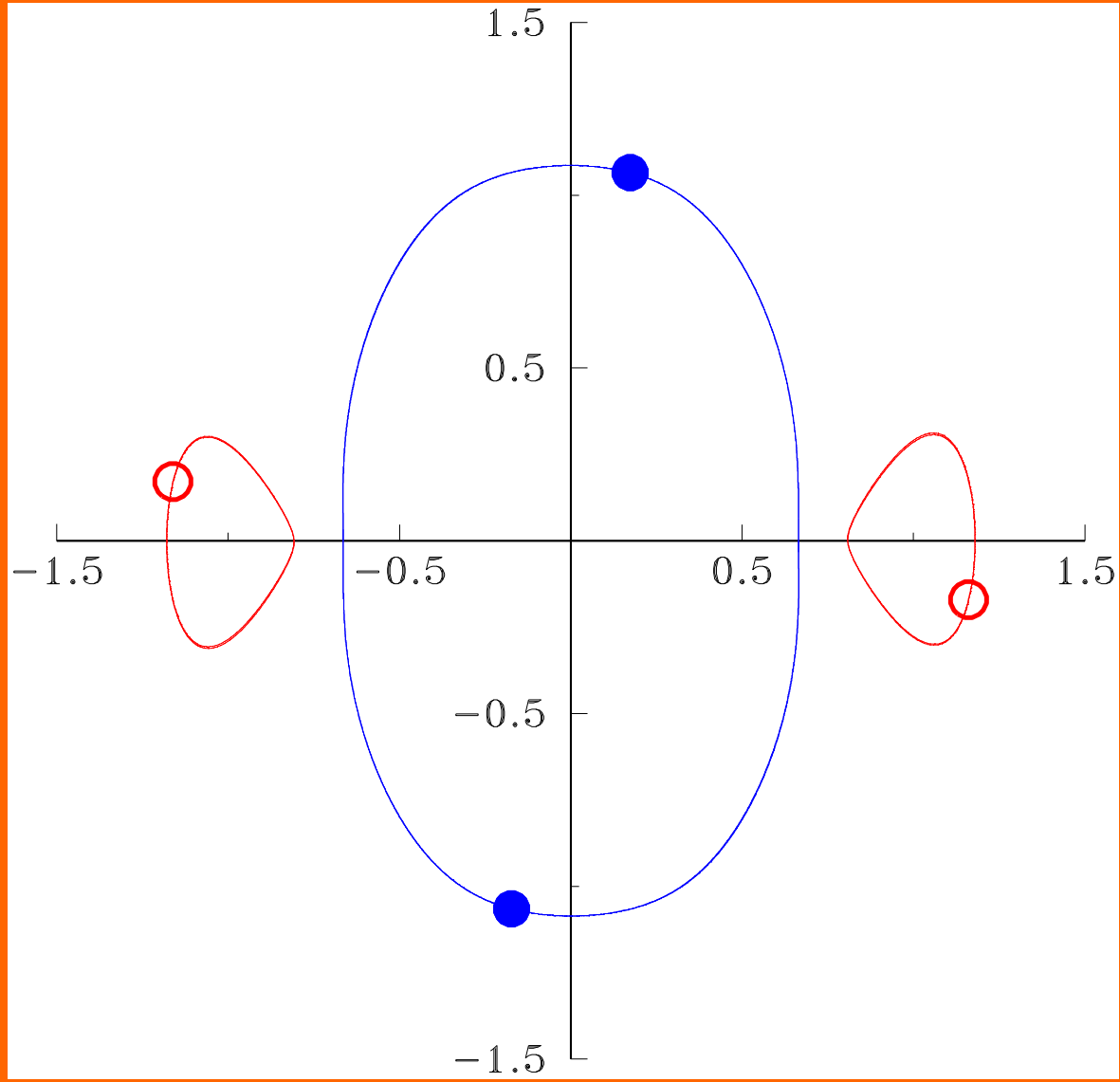


**t=15**

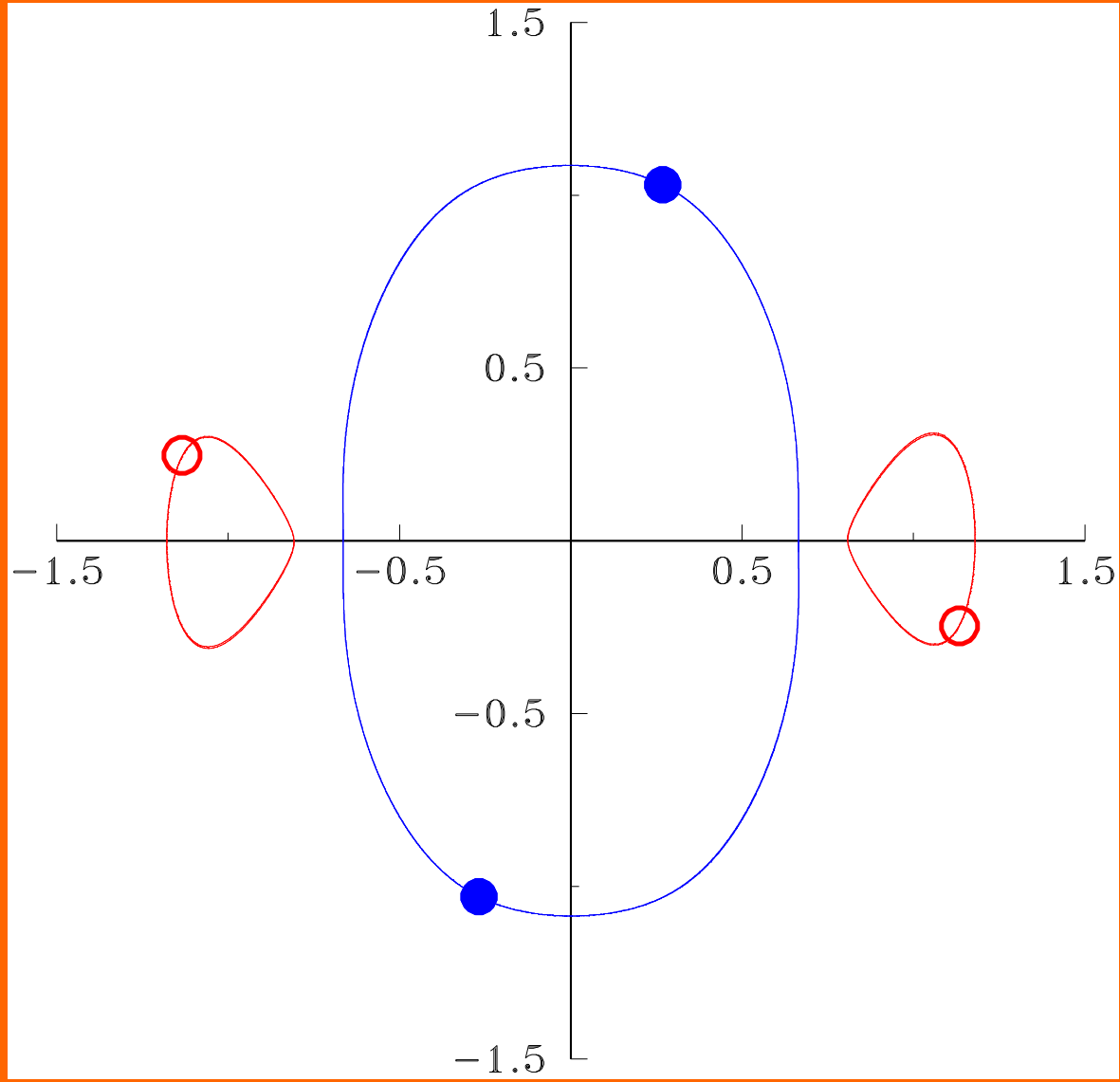




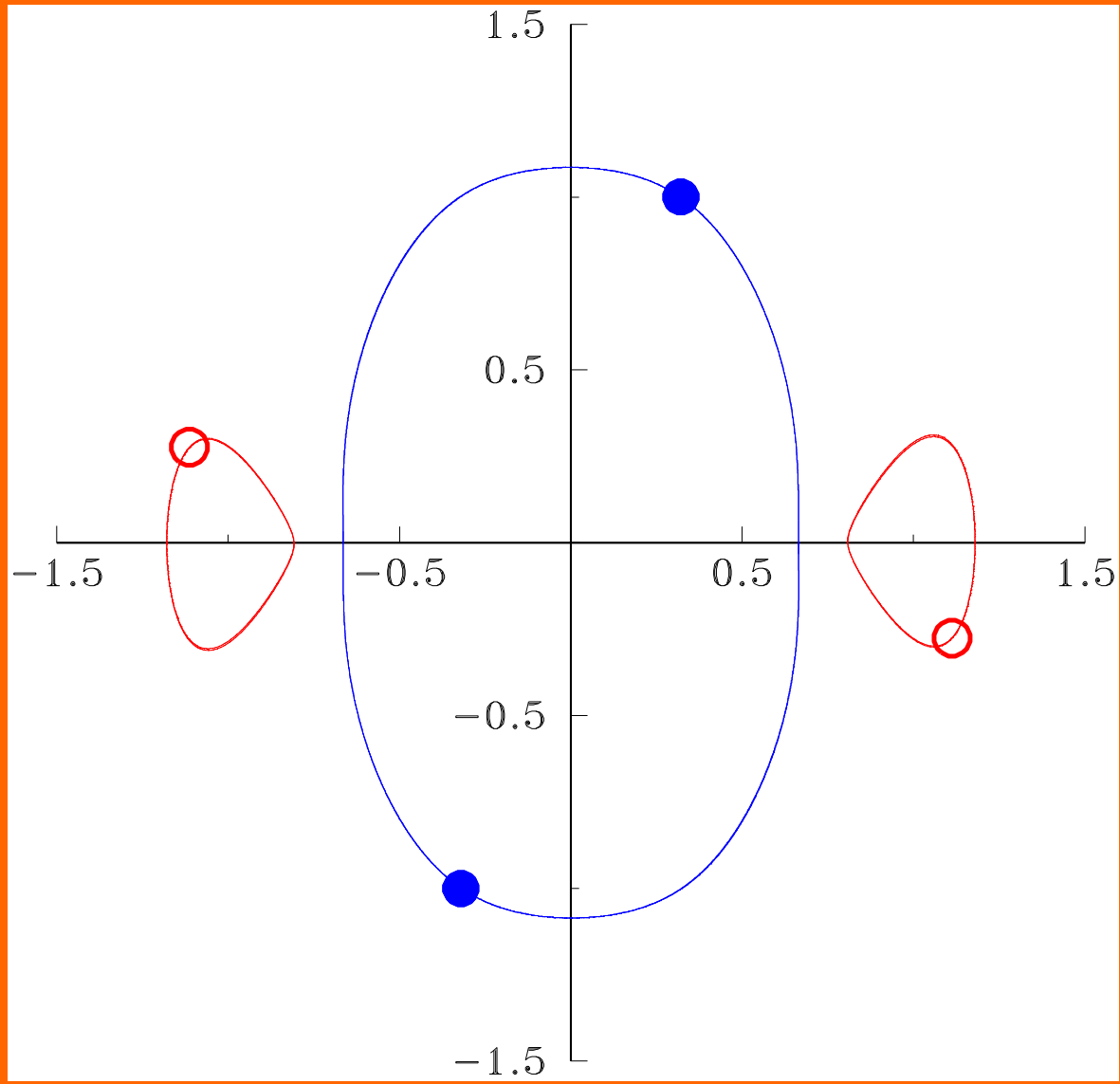
**t=16**



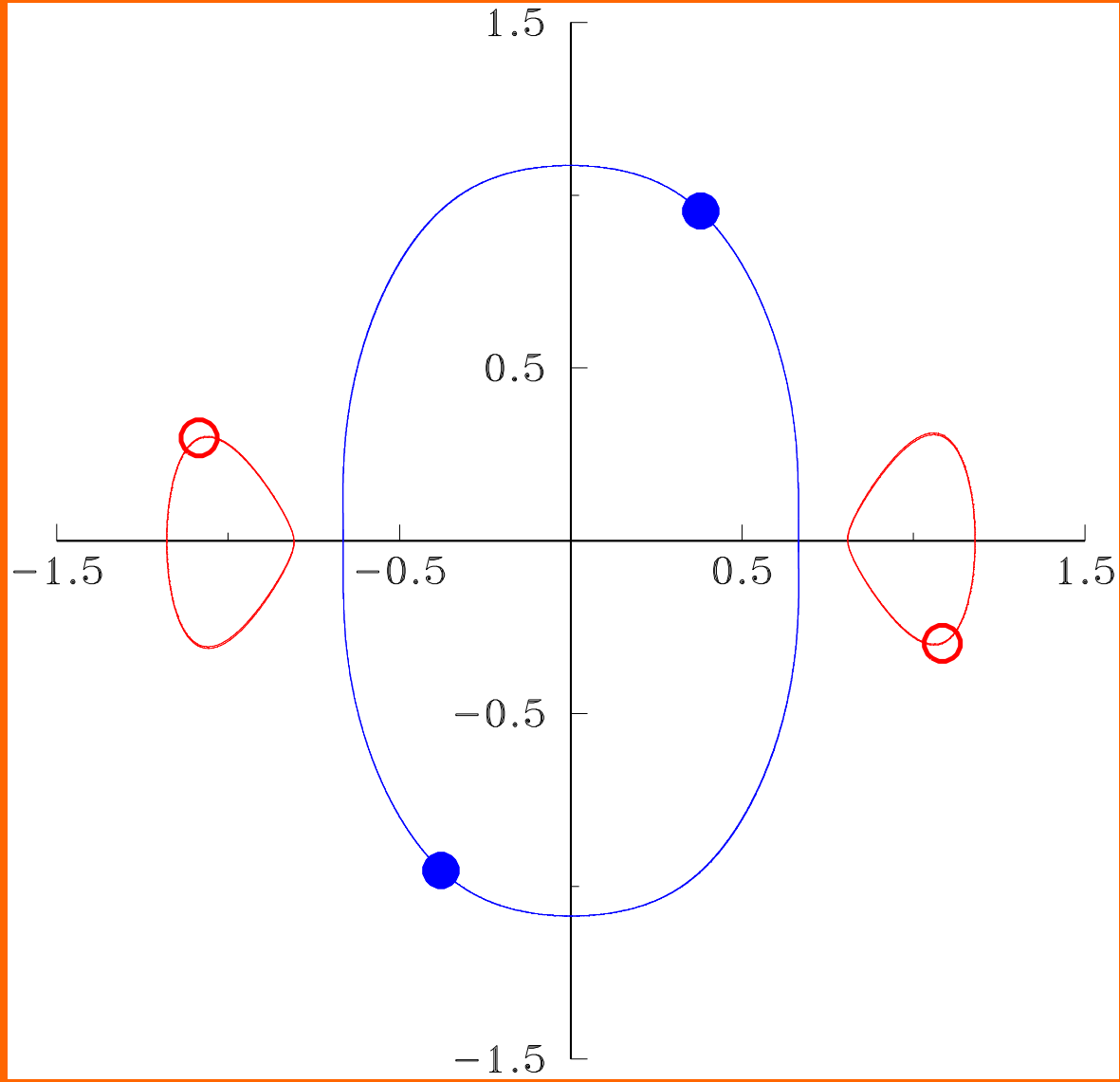
**t=17**



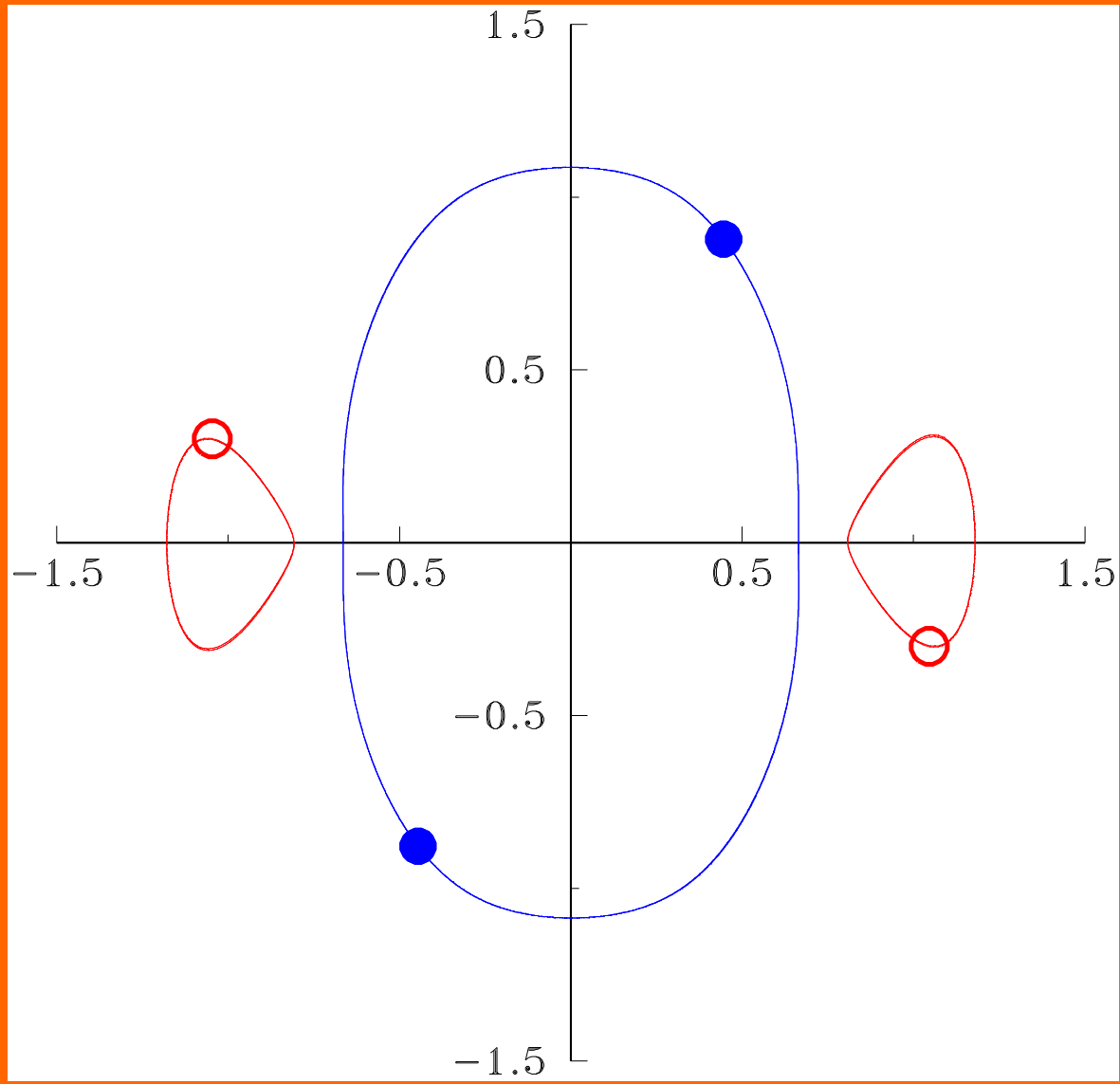
**t=18**



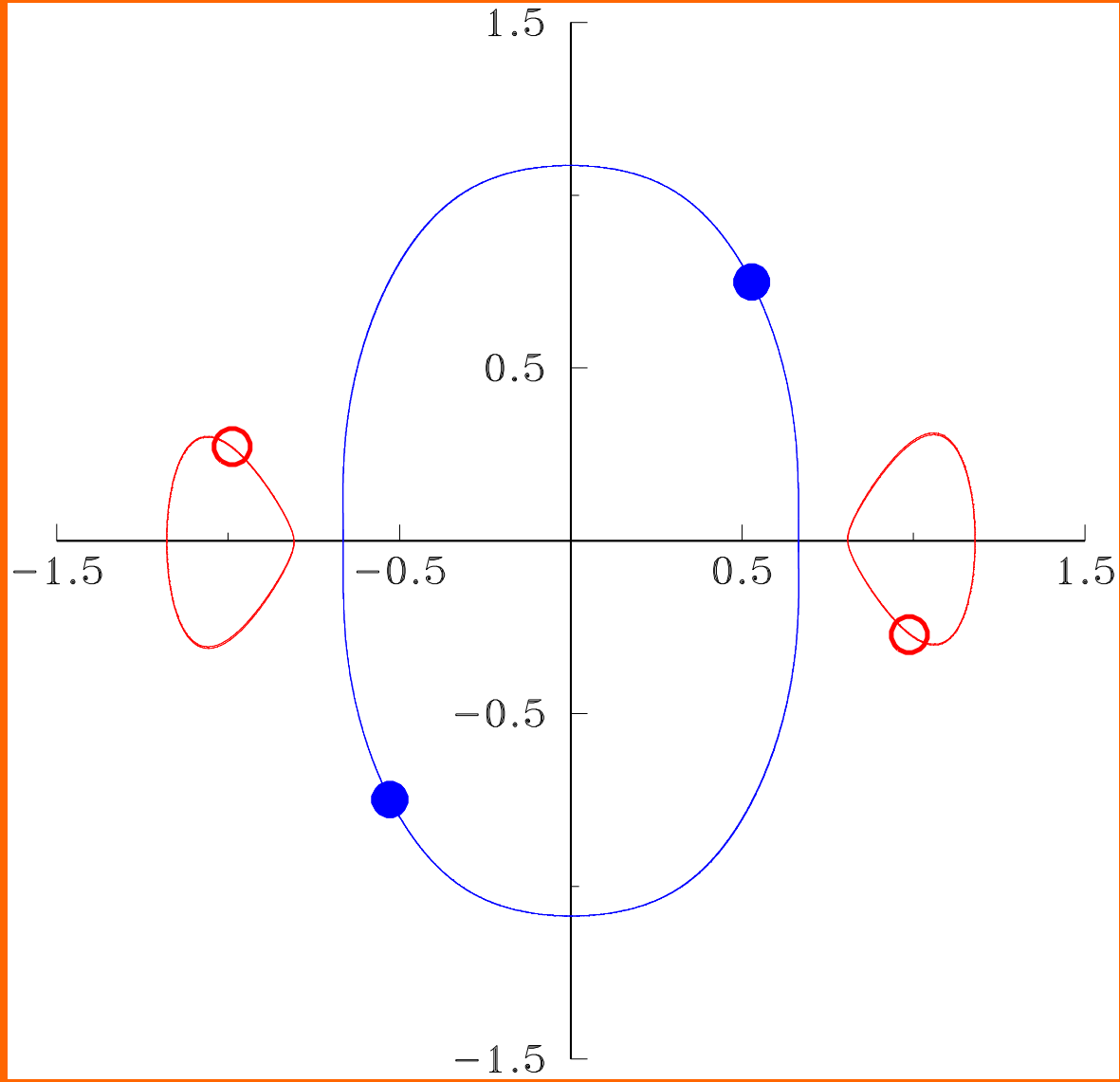
**t=19**



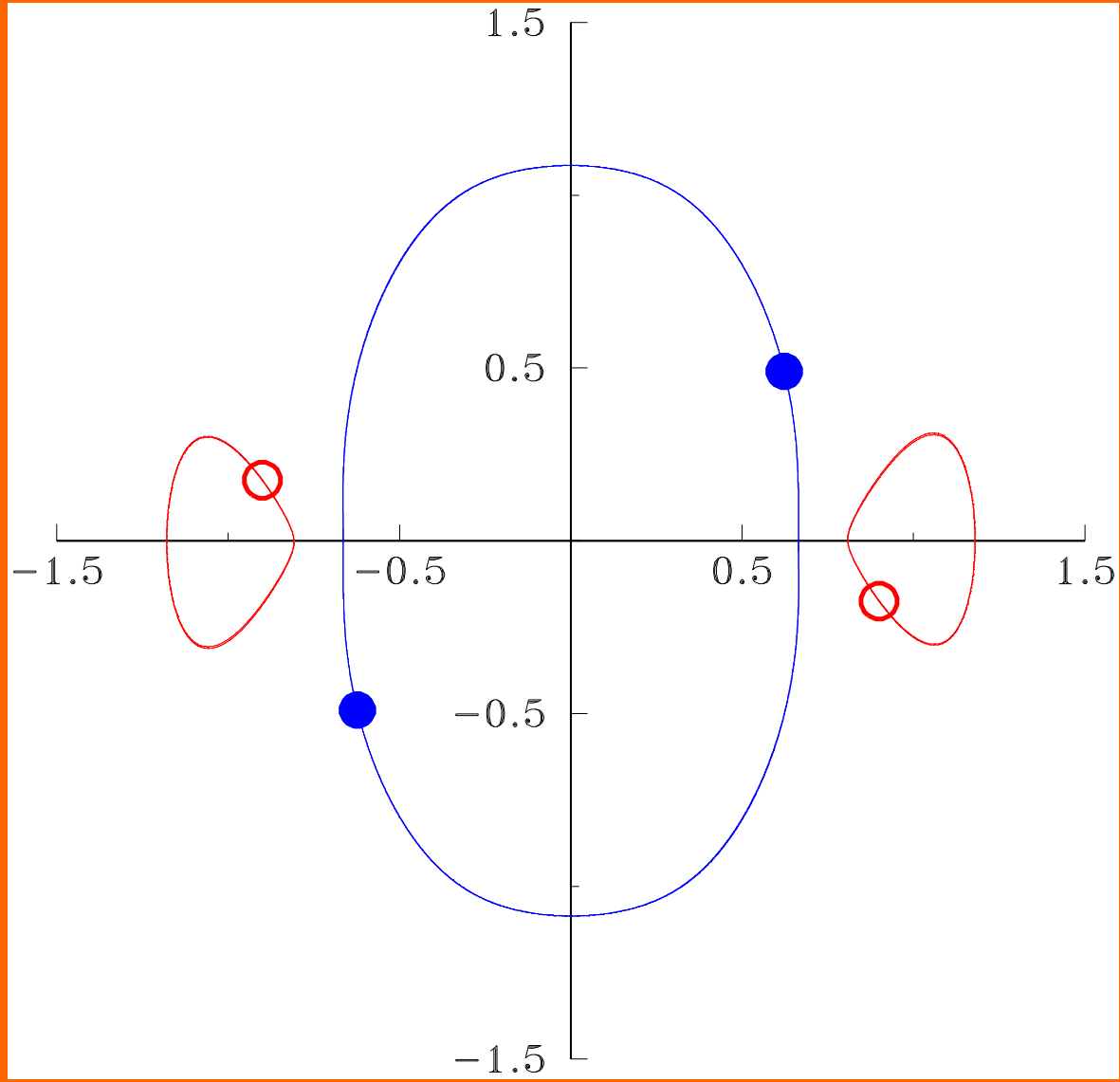
**t=20**



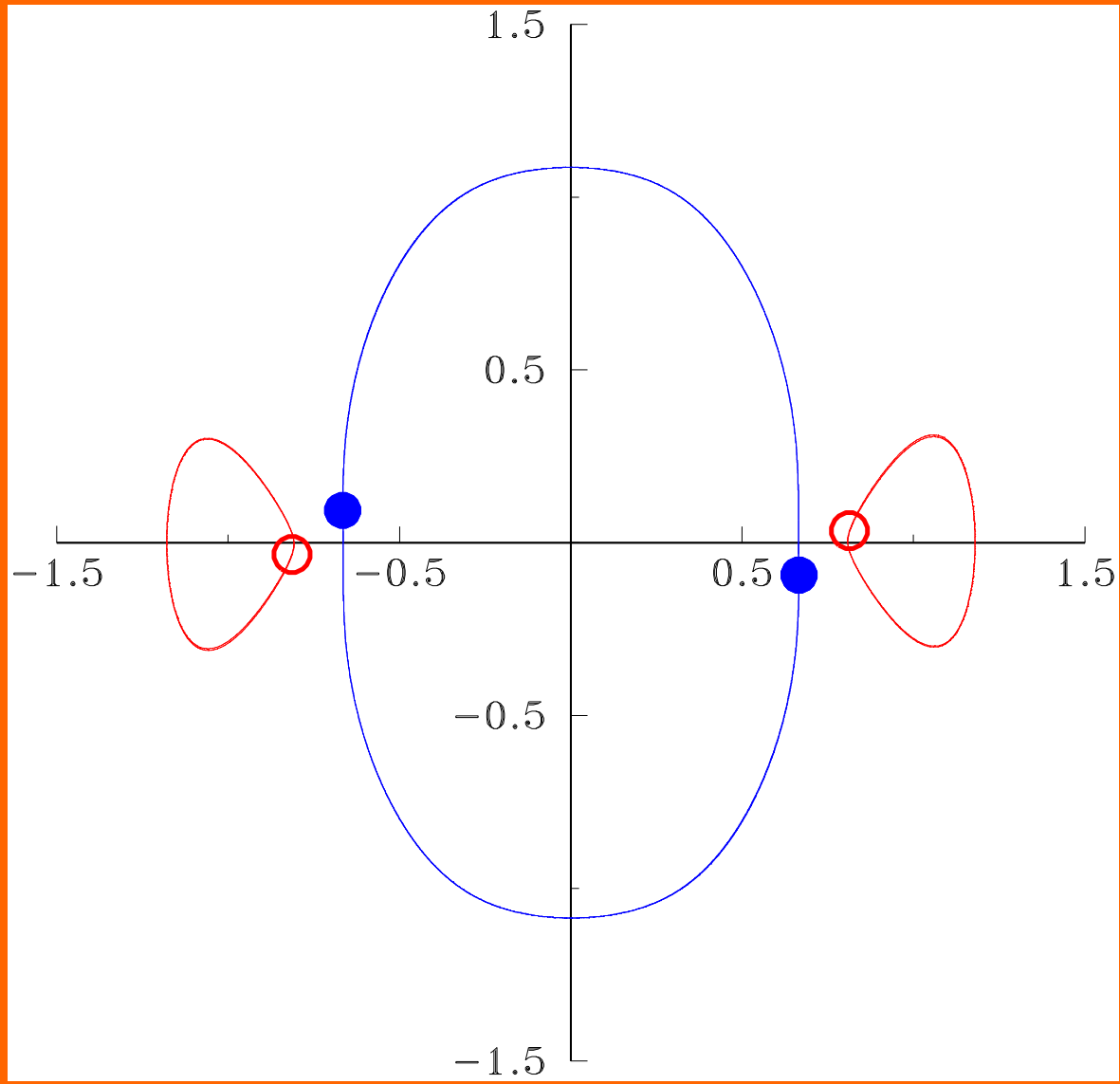
**t=21**



**t=22**

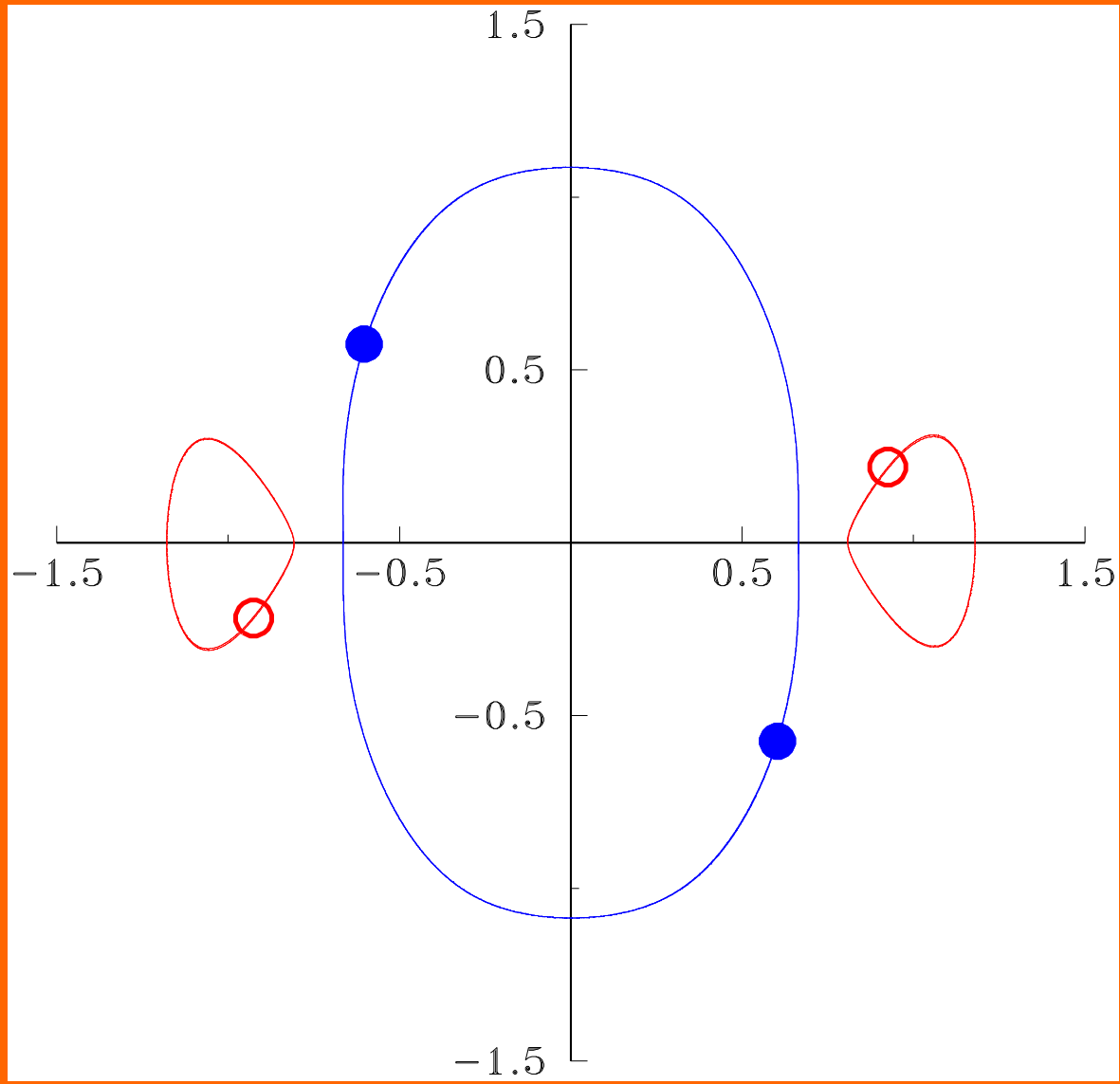


**t=23**

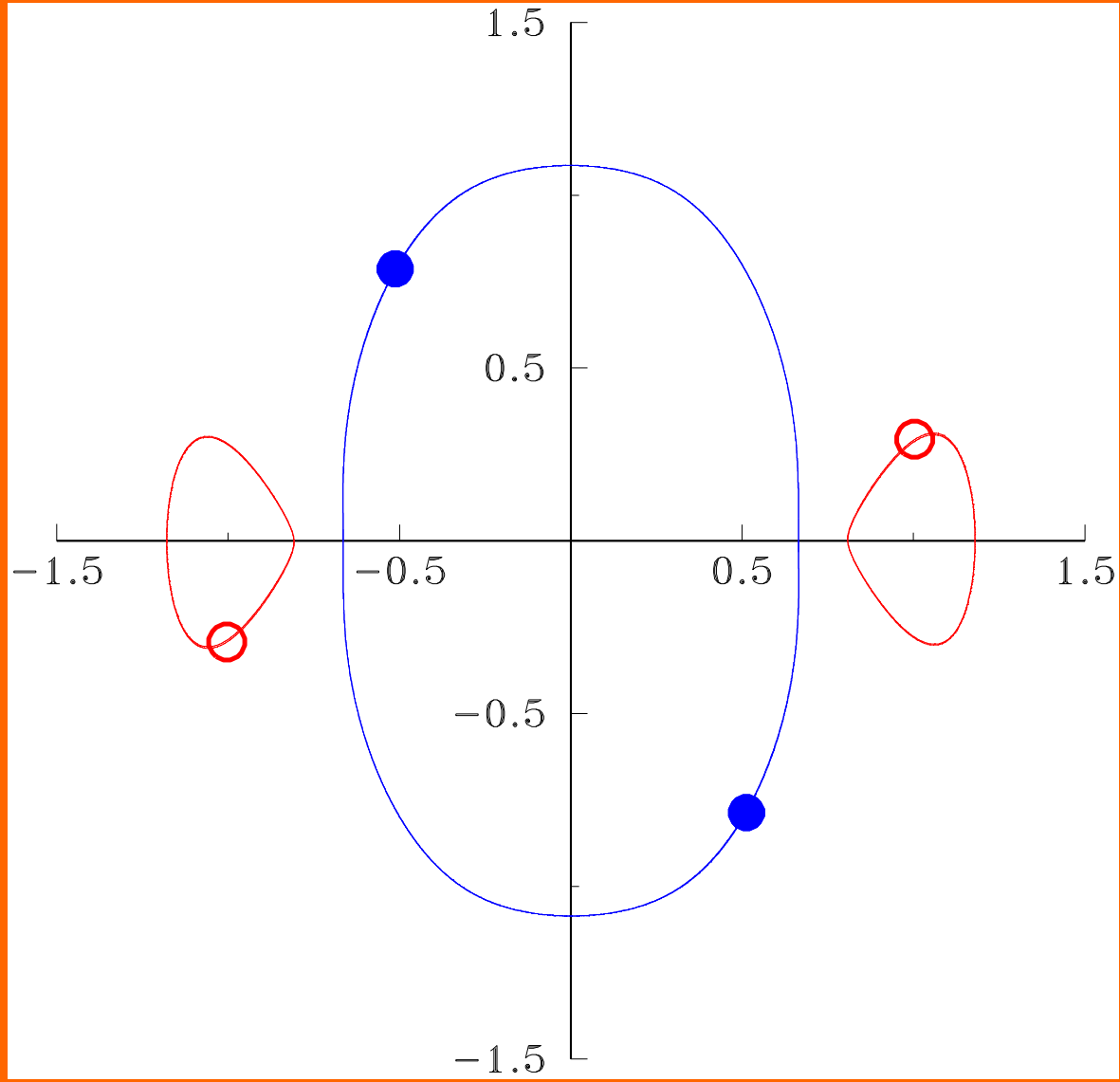




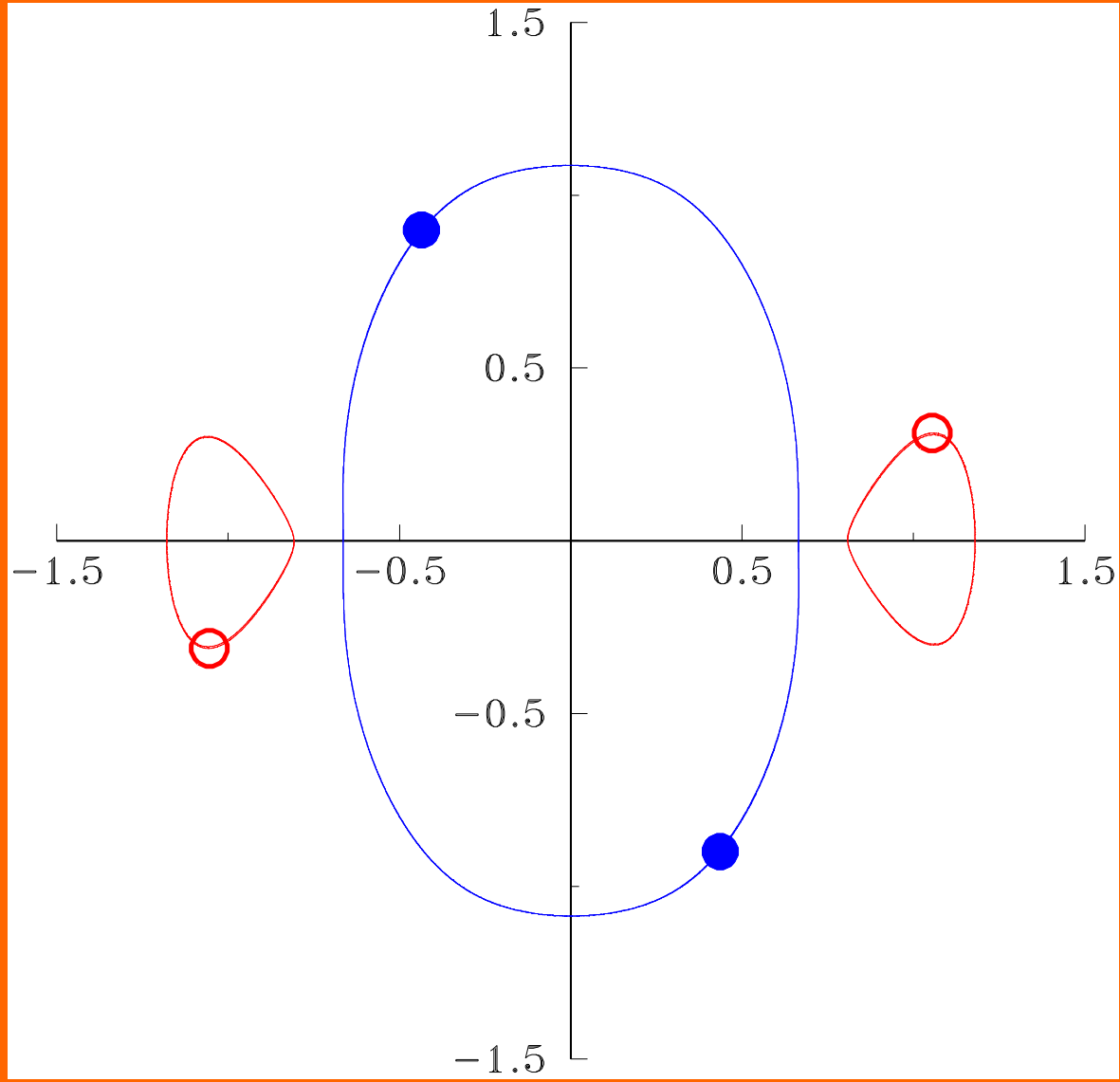
**t=24**



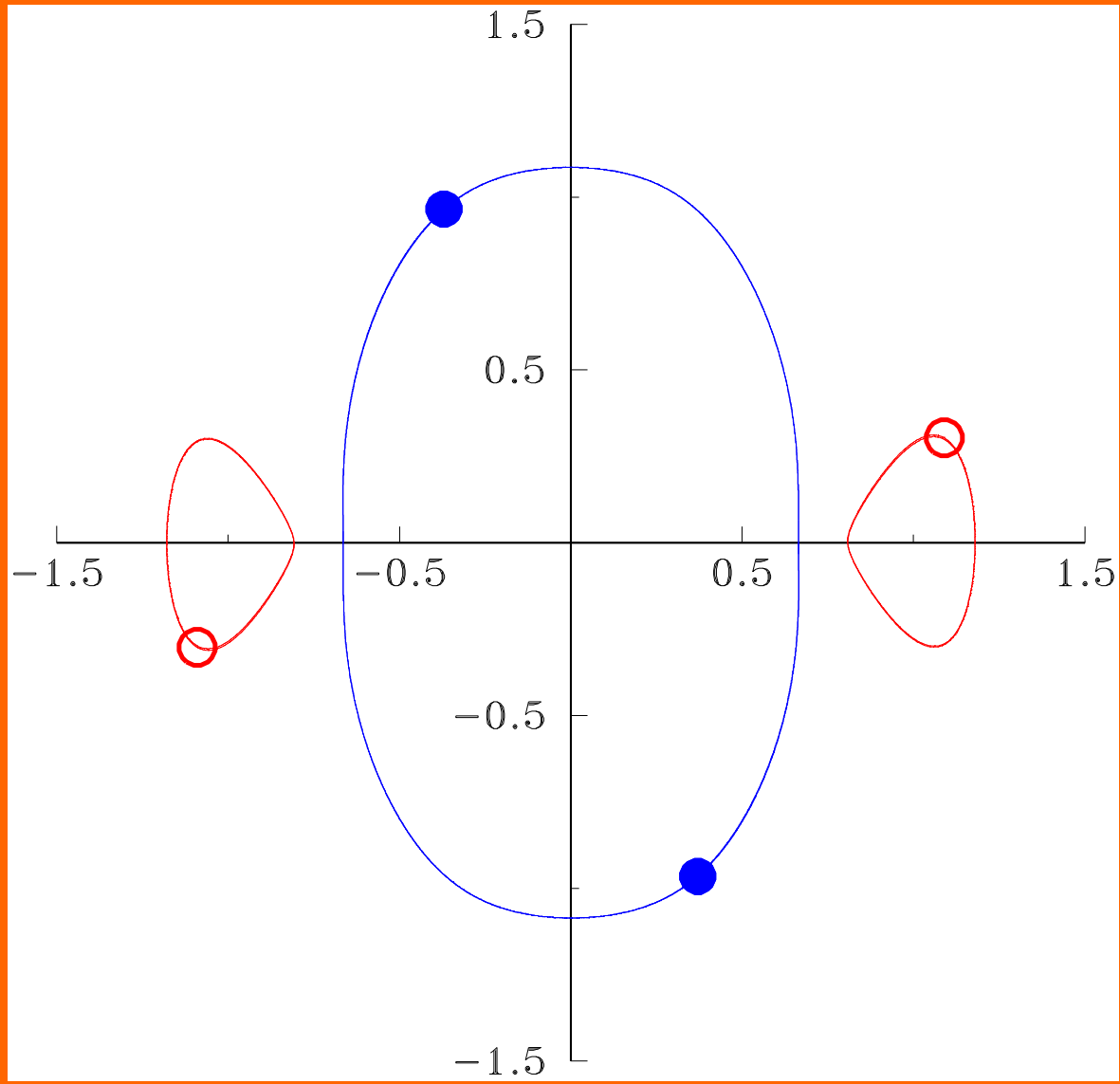
**t=25**



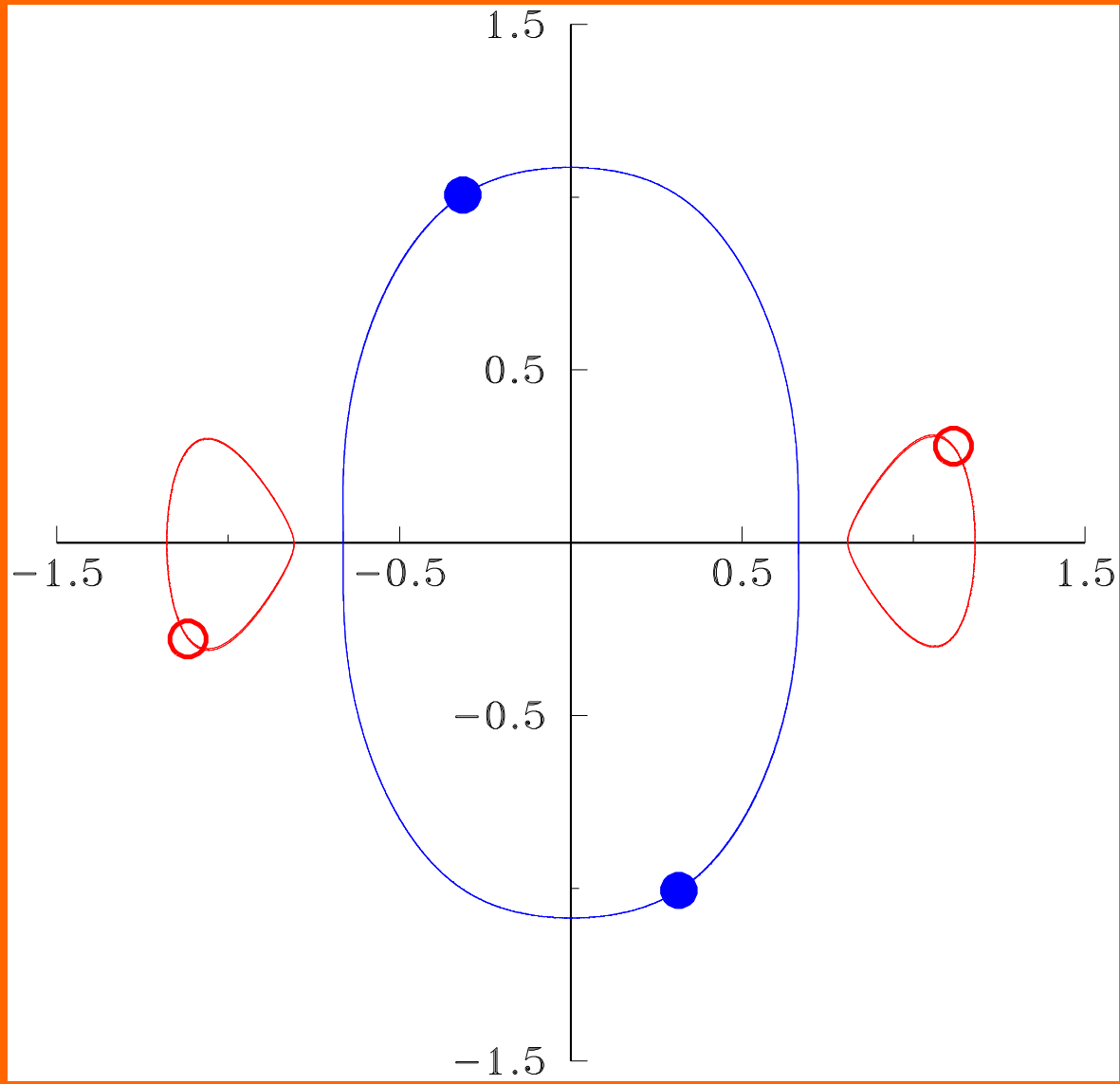
**t=26**



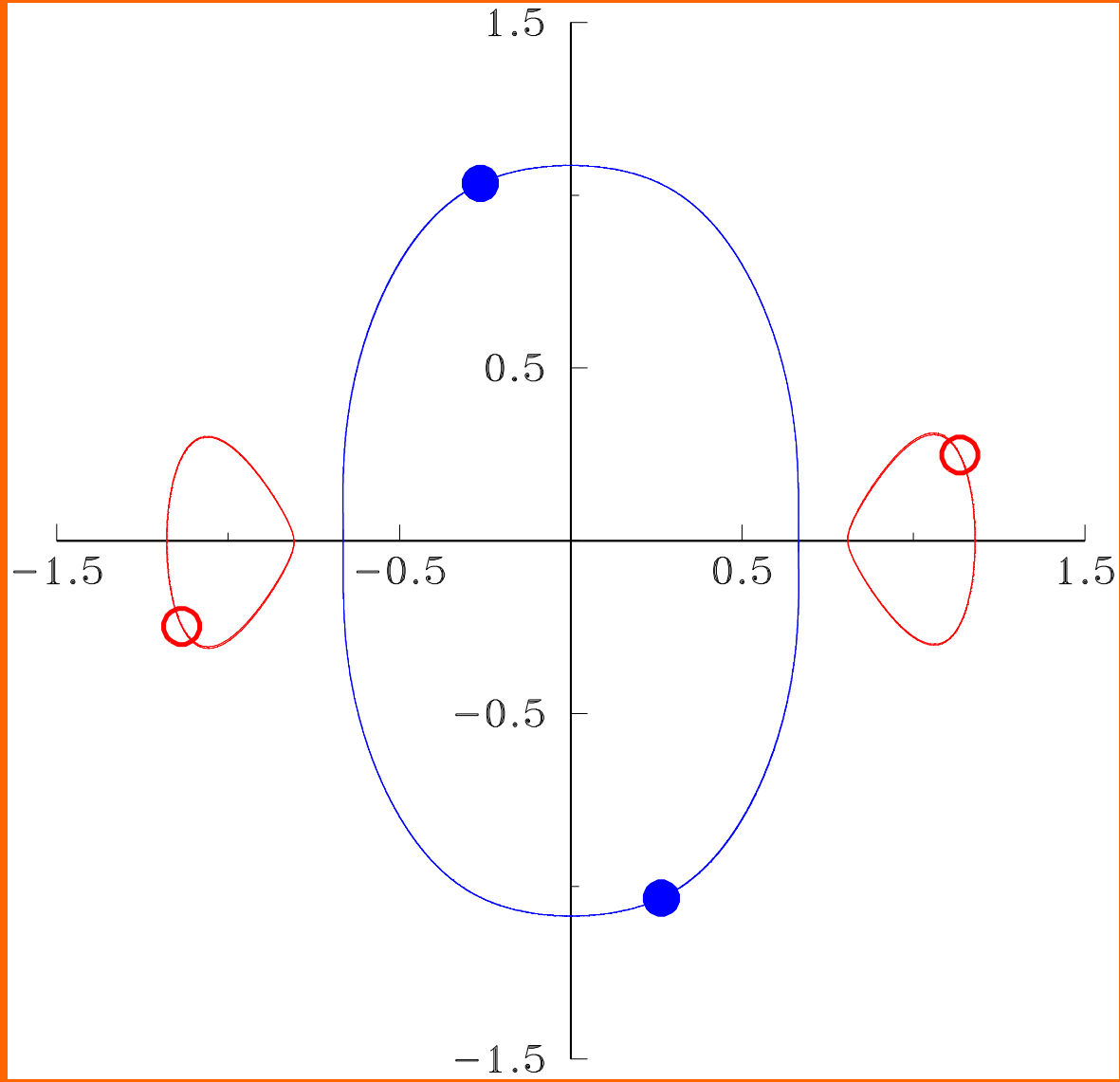
**t=27**



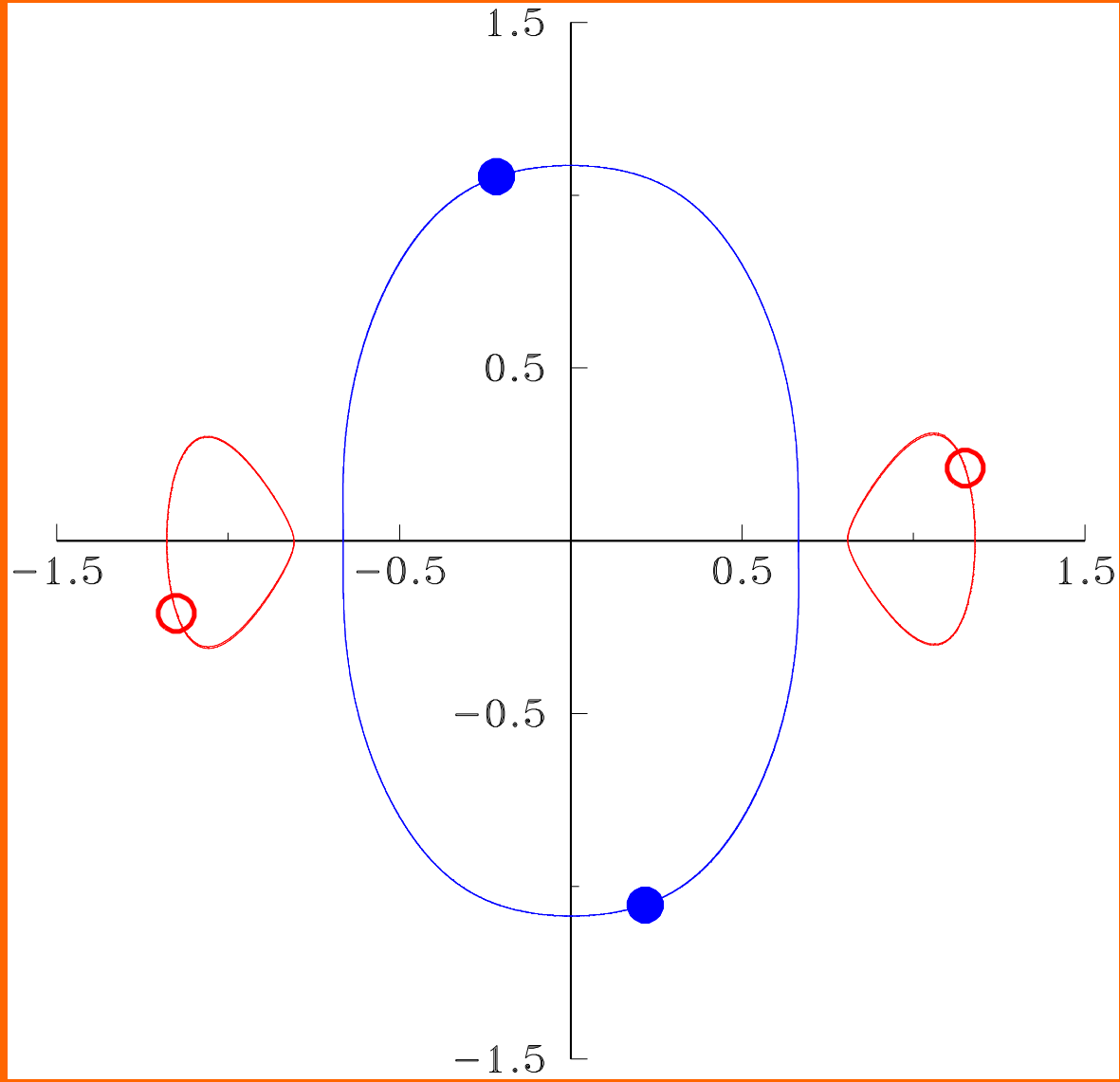
**t=28**



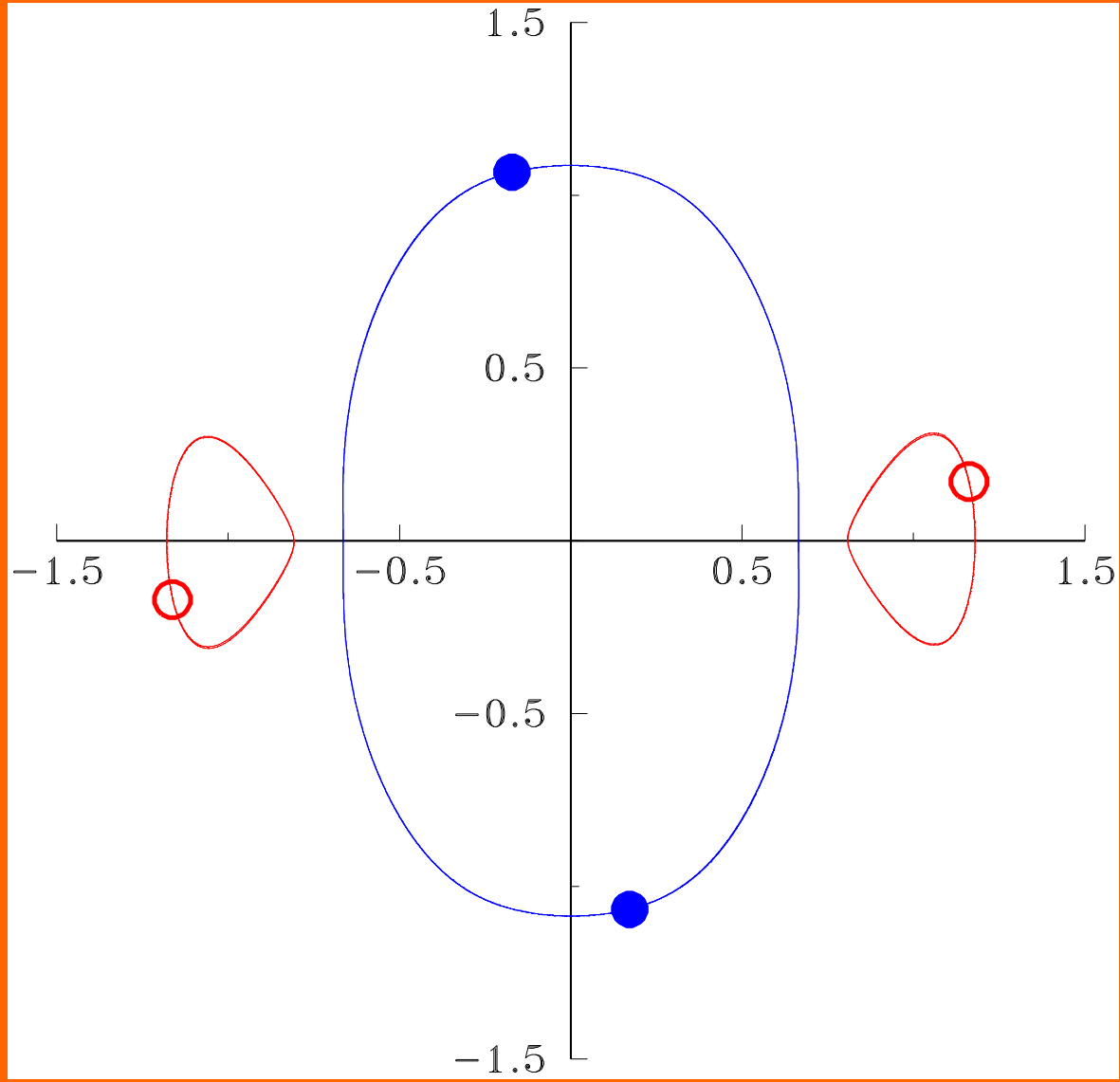
**t=29**



**t=30**

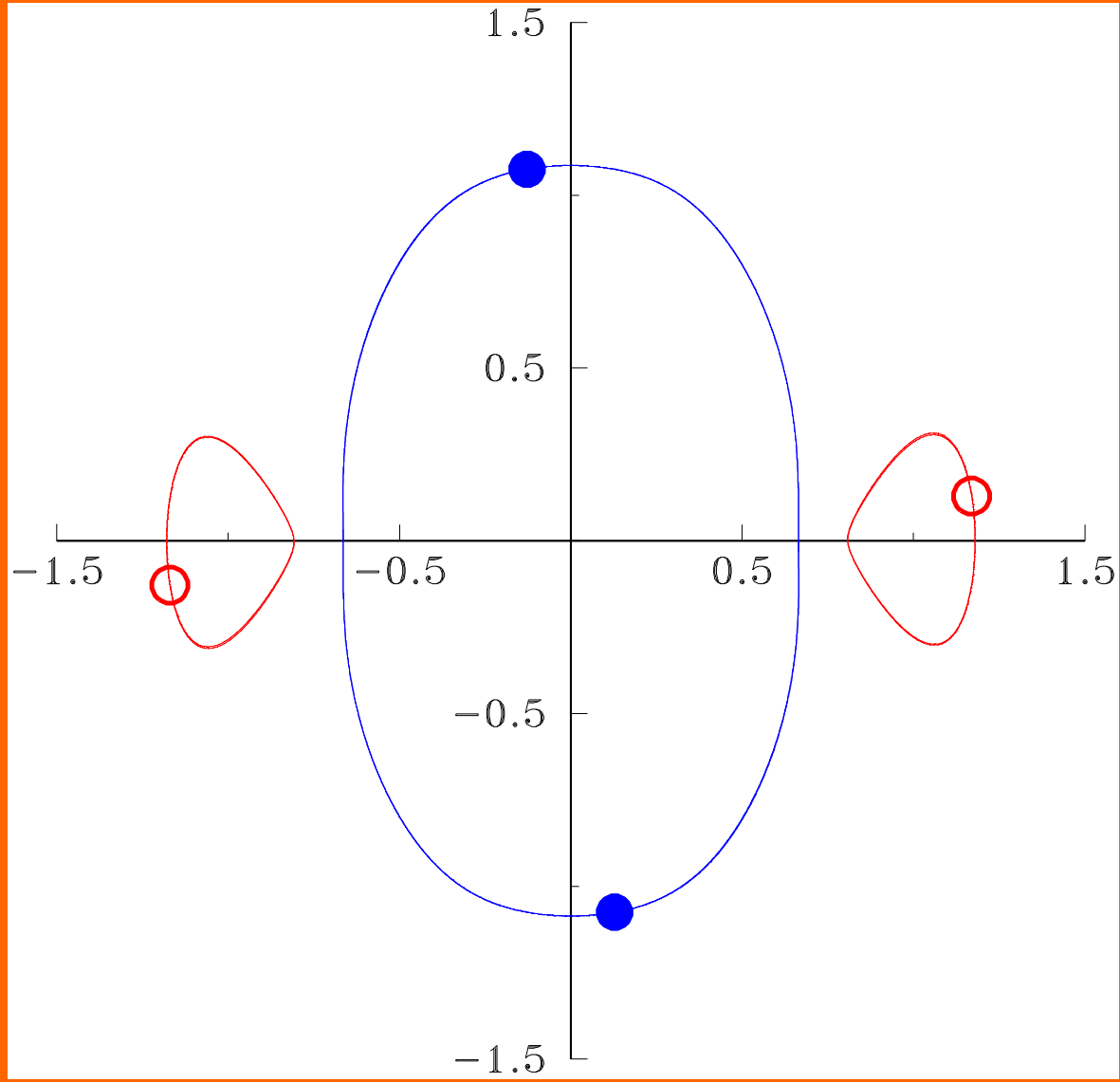


**t=31**

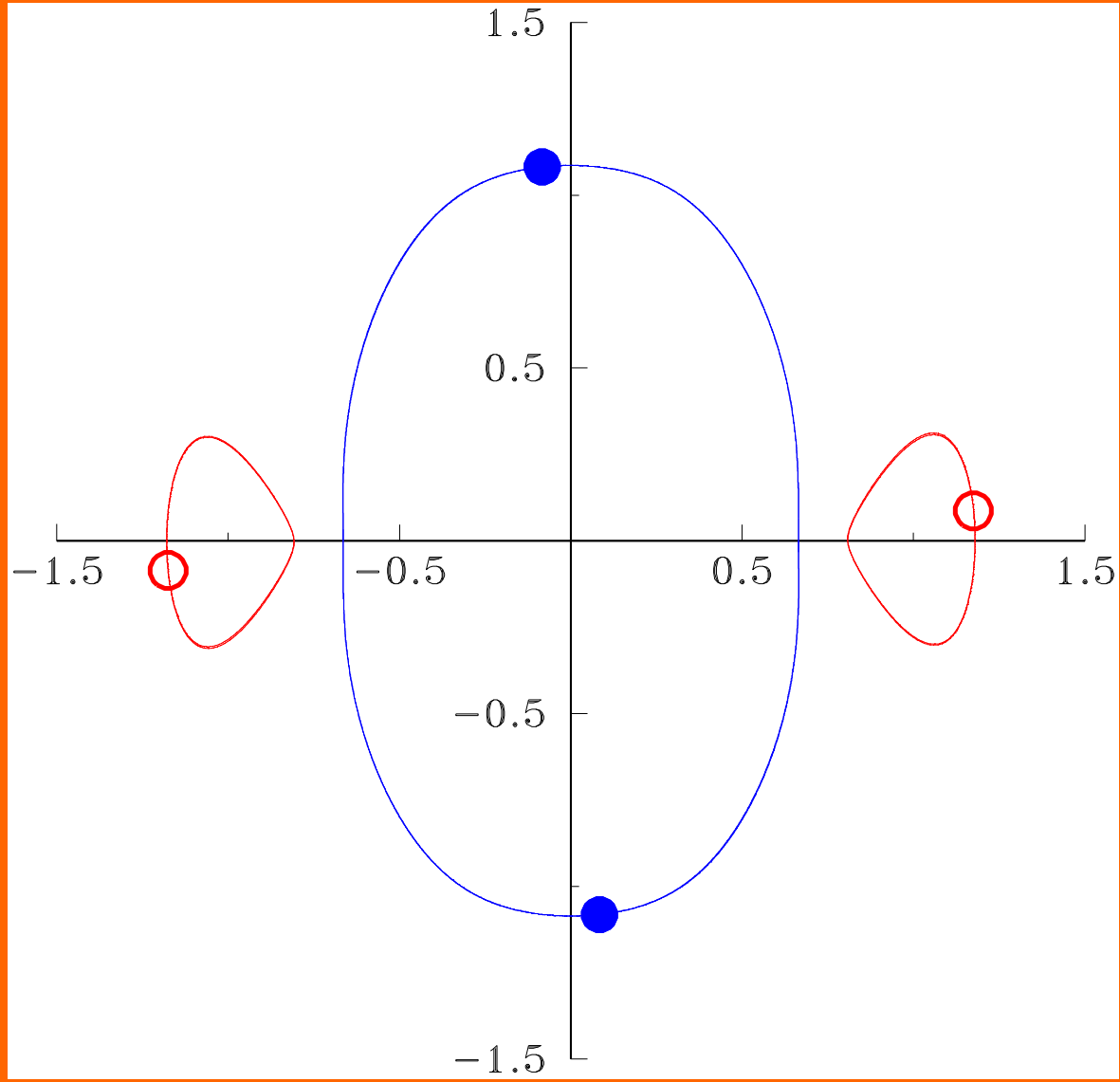




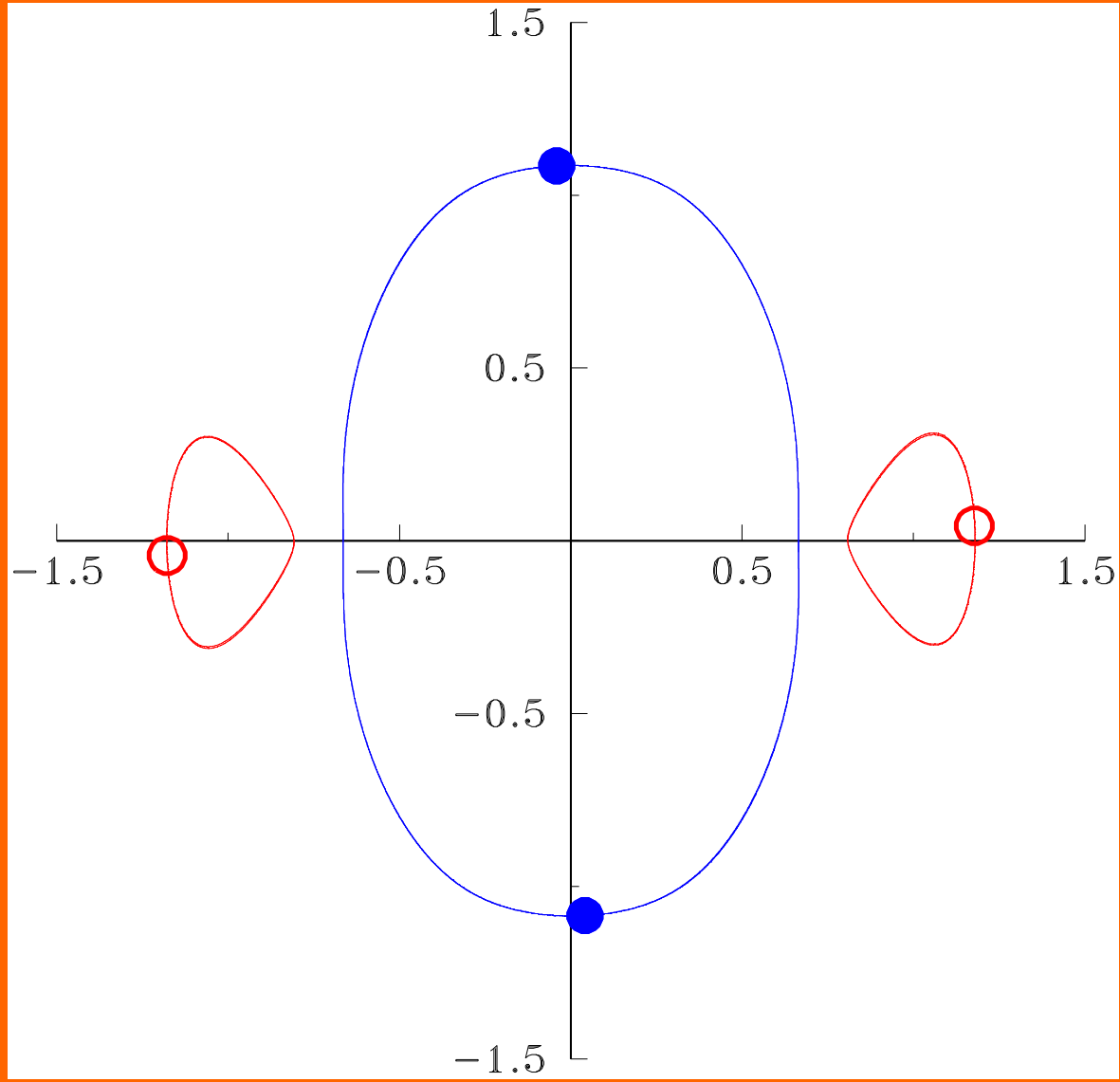
**t=32**



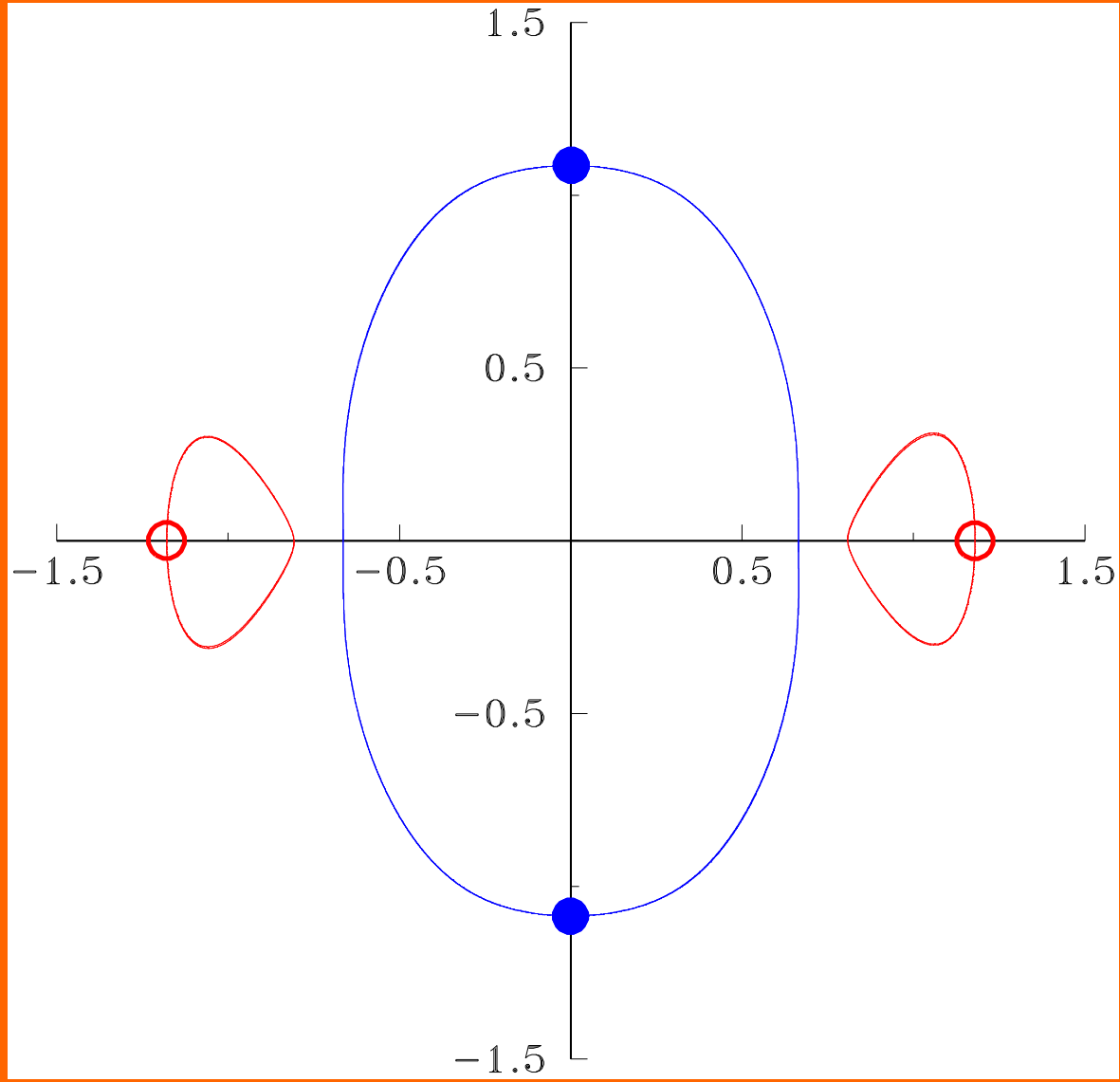
**t=33**



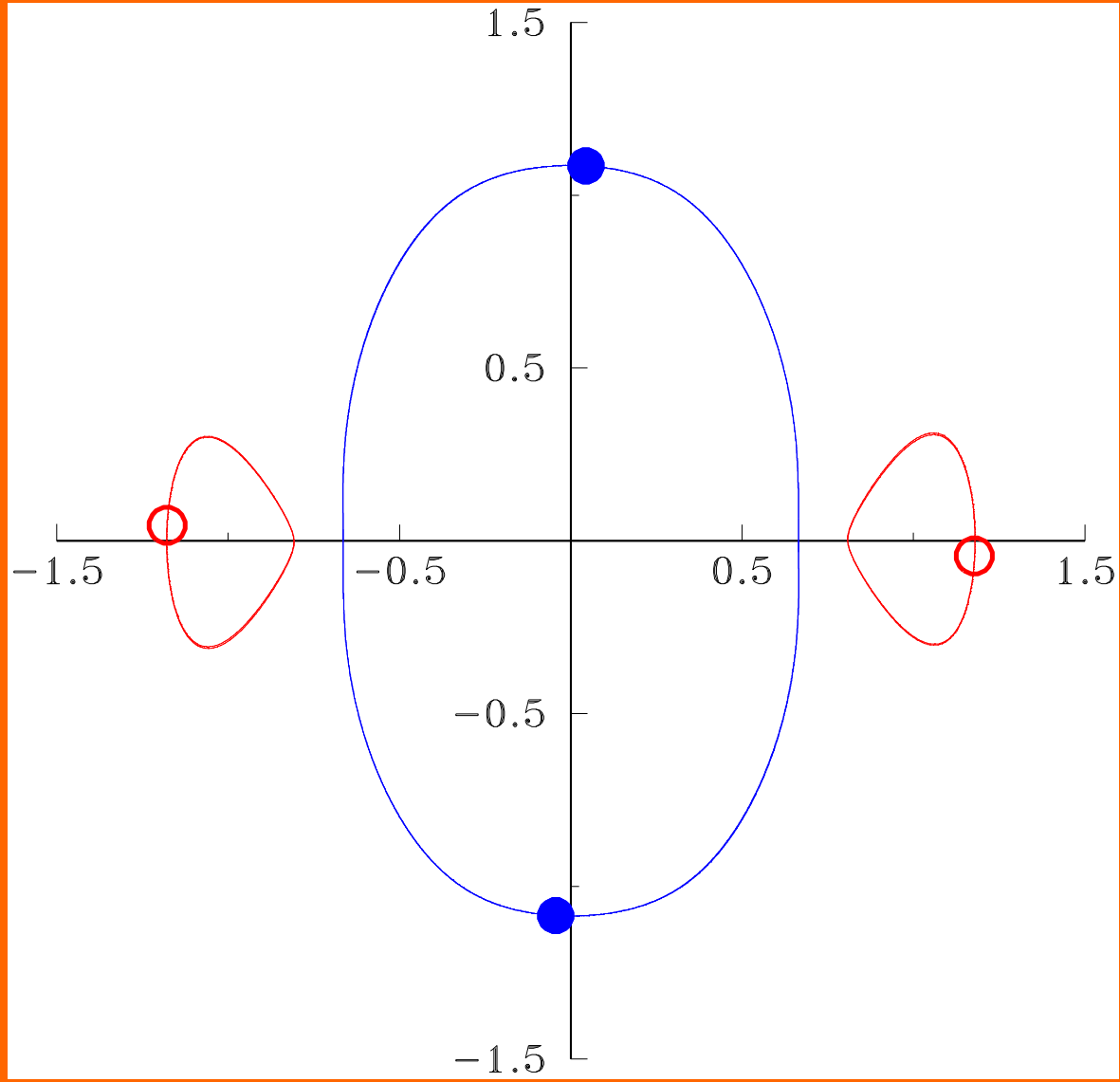
**t=34**



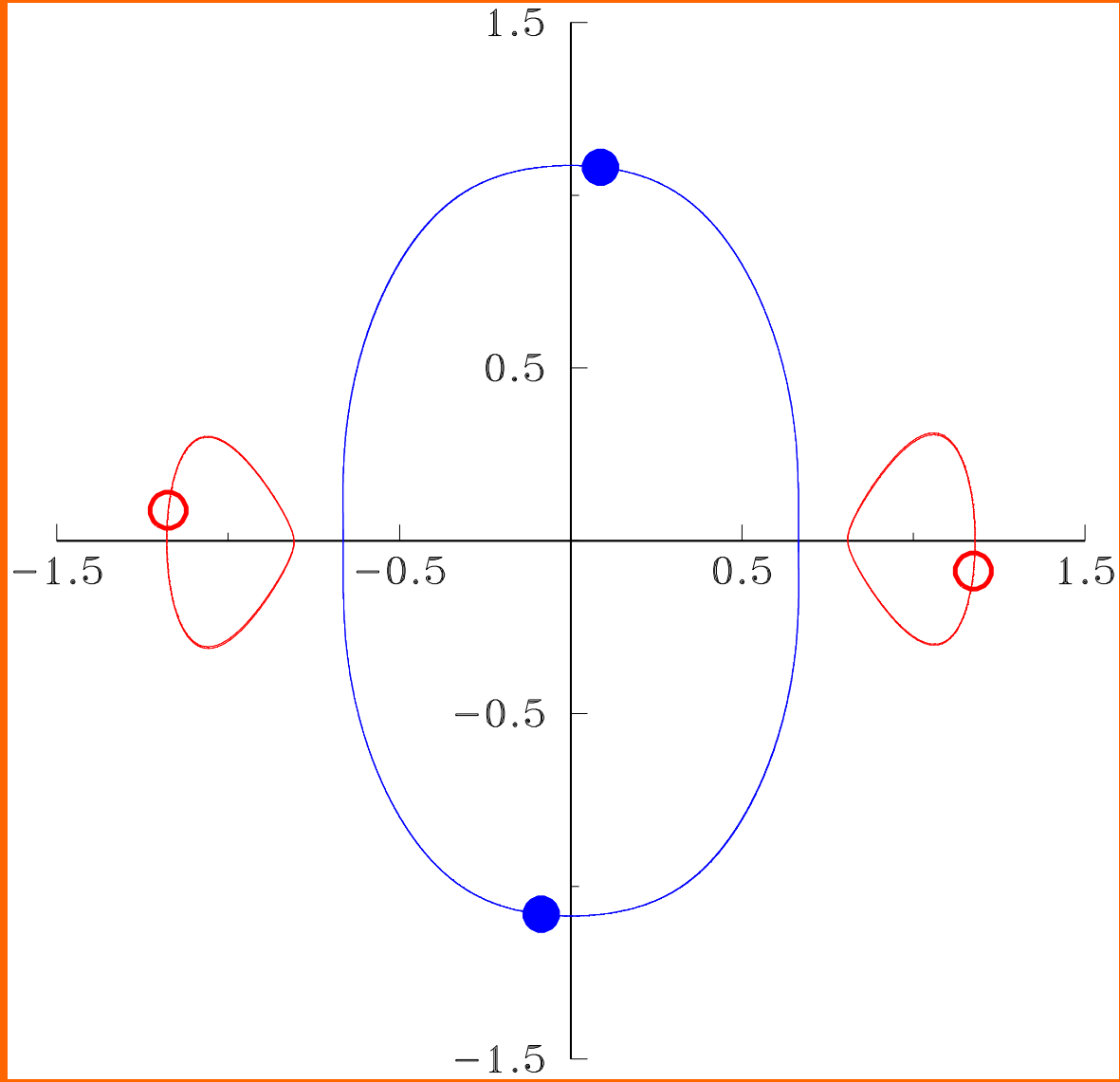
**t=35**



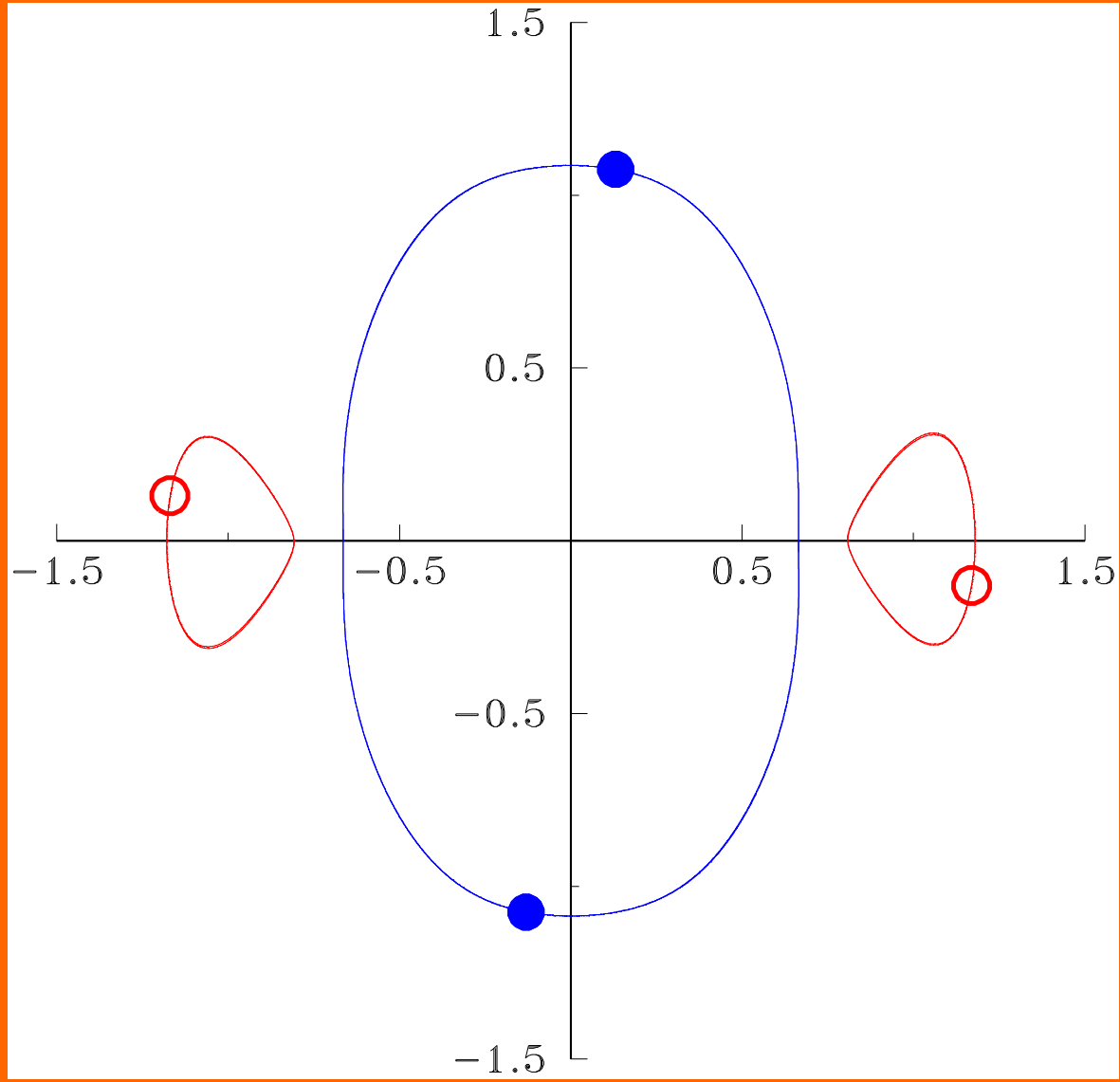
**t=36**



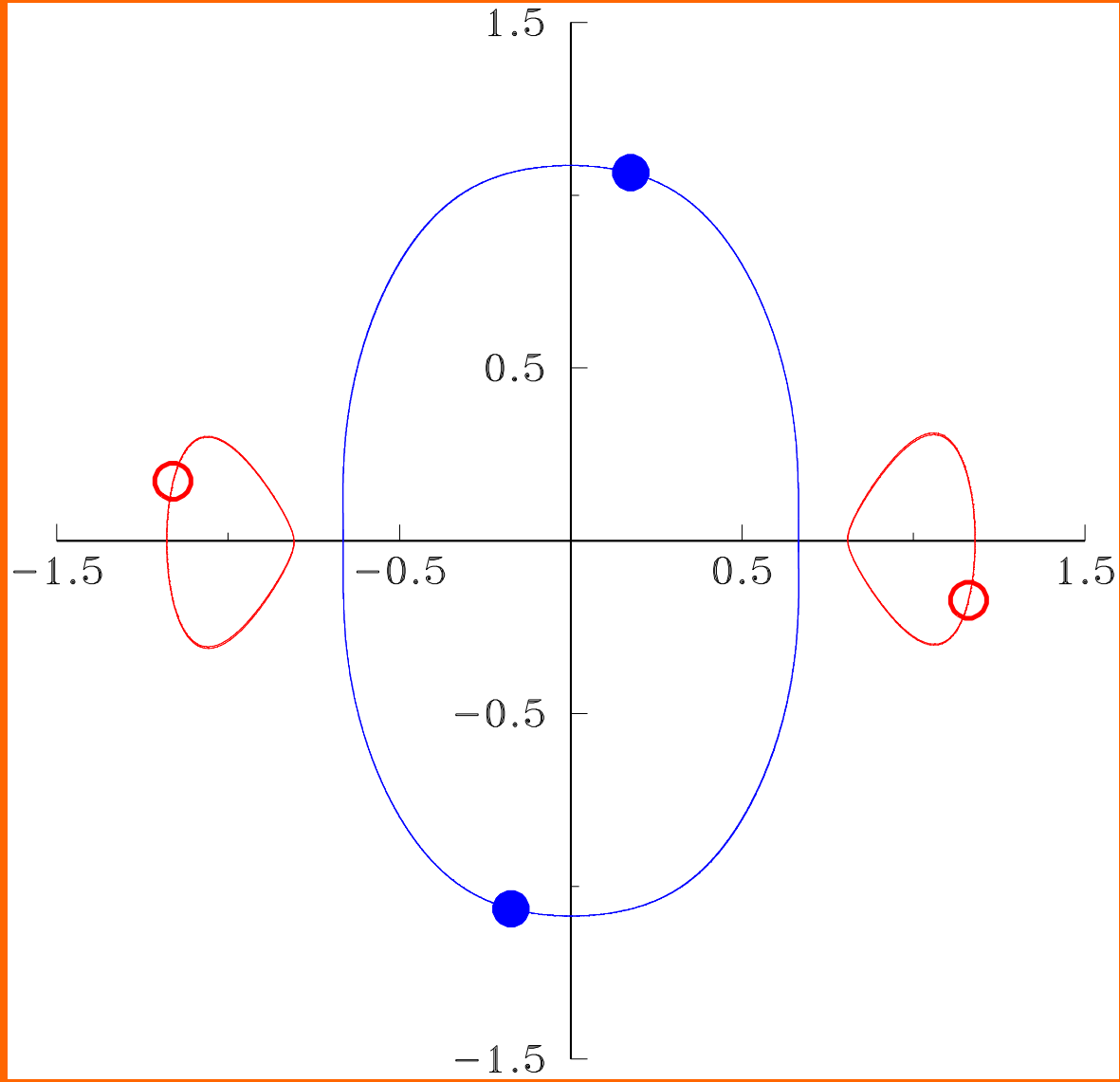
**t=37**



**t=38**

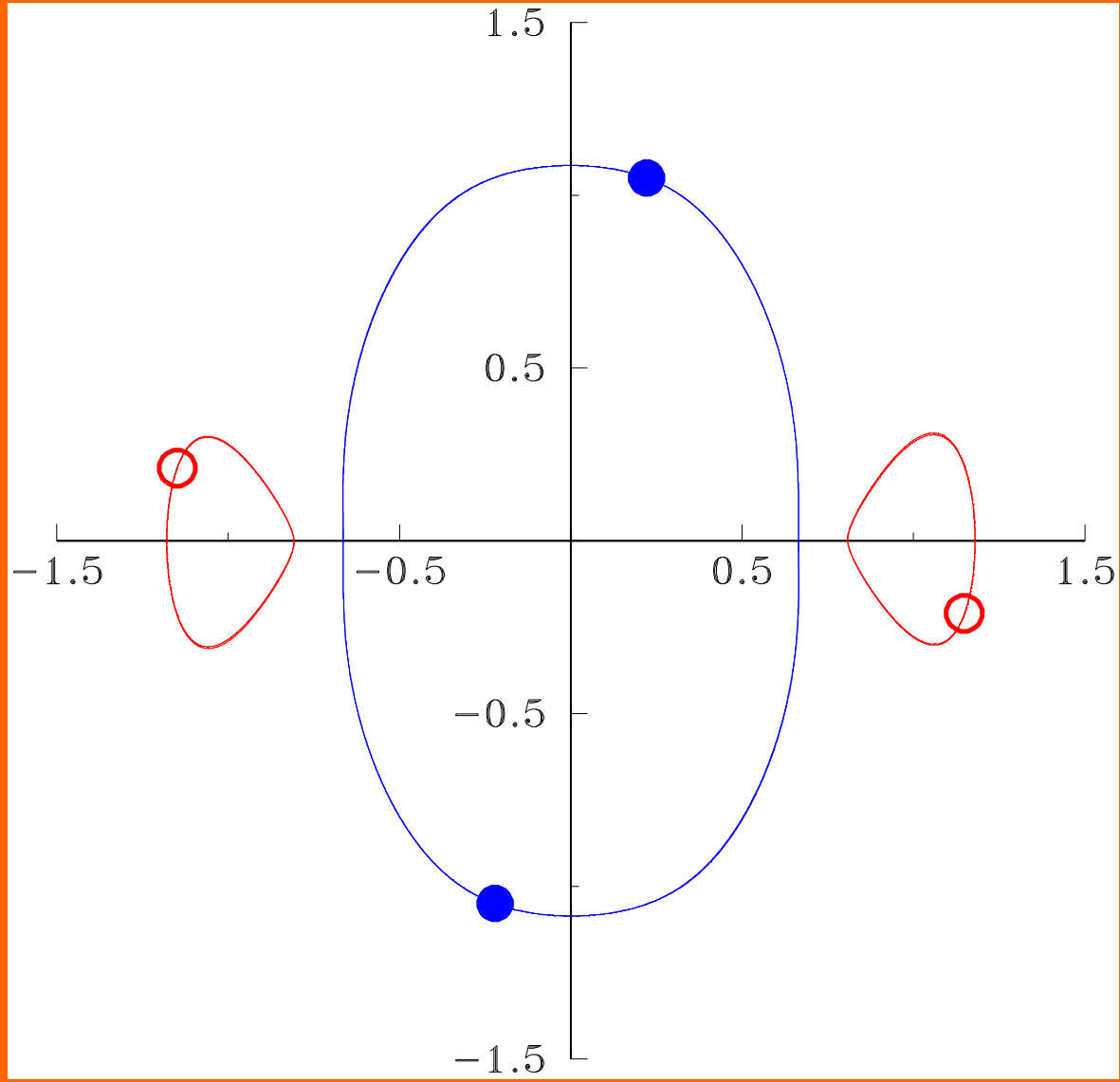


**t=39**

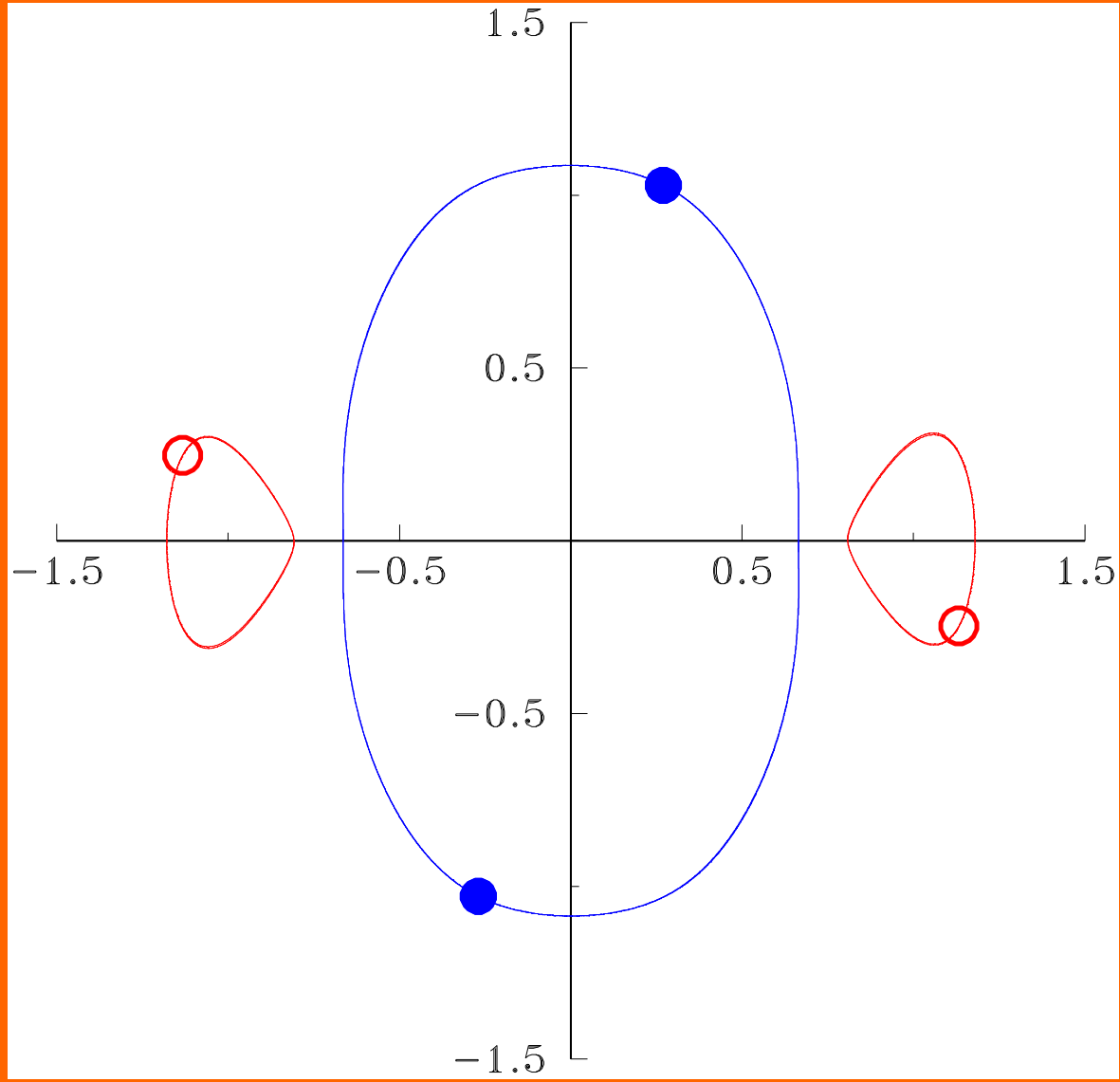




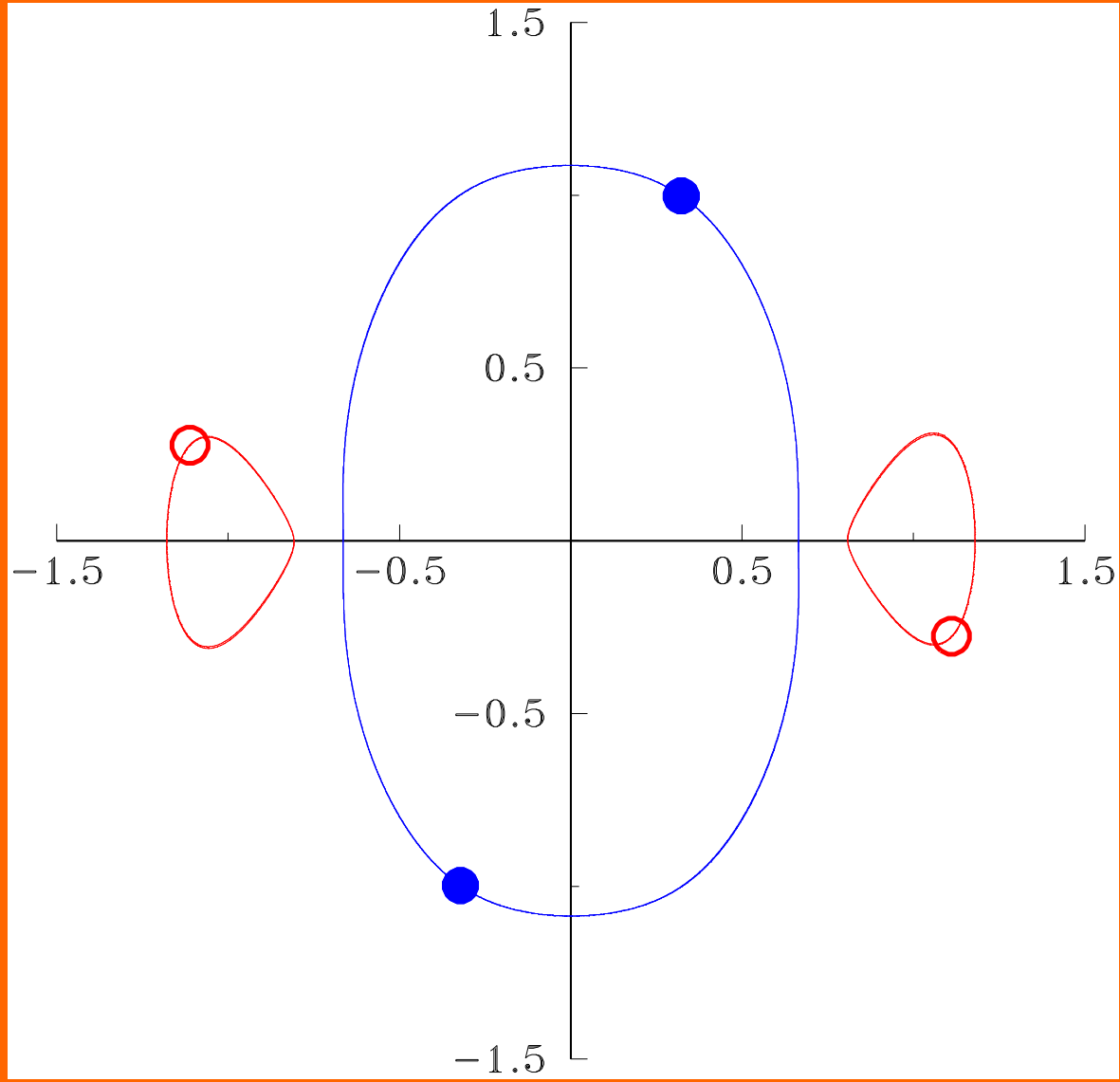
**t=40**



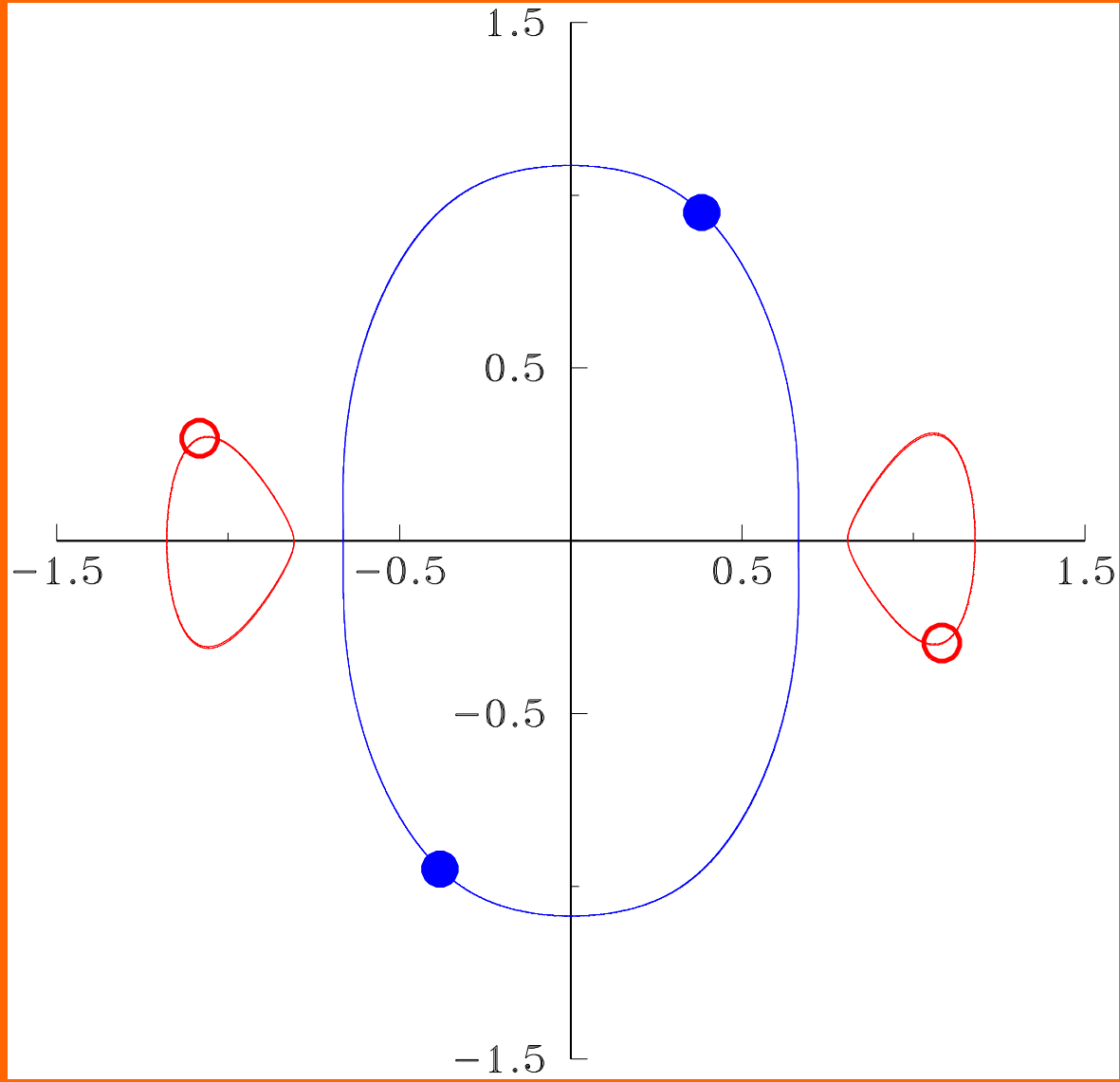
**t=41**



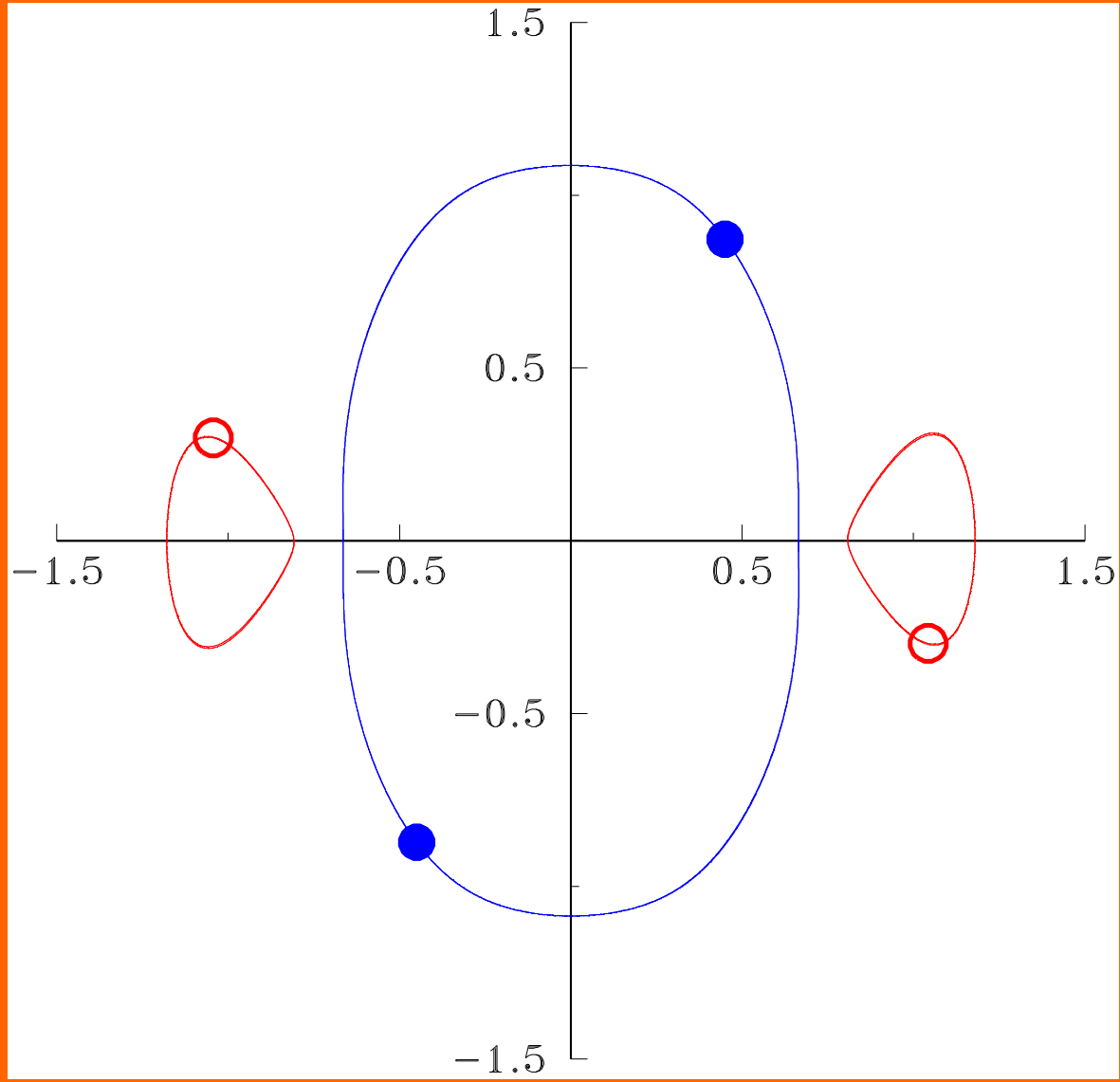
**t=42**



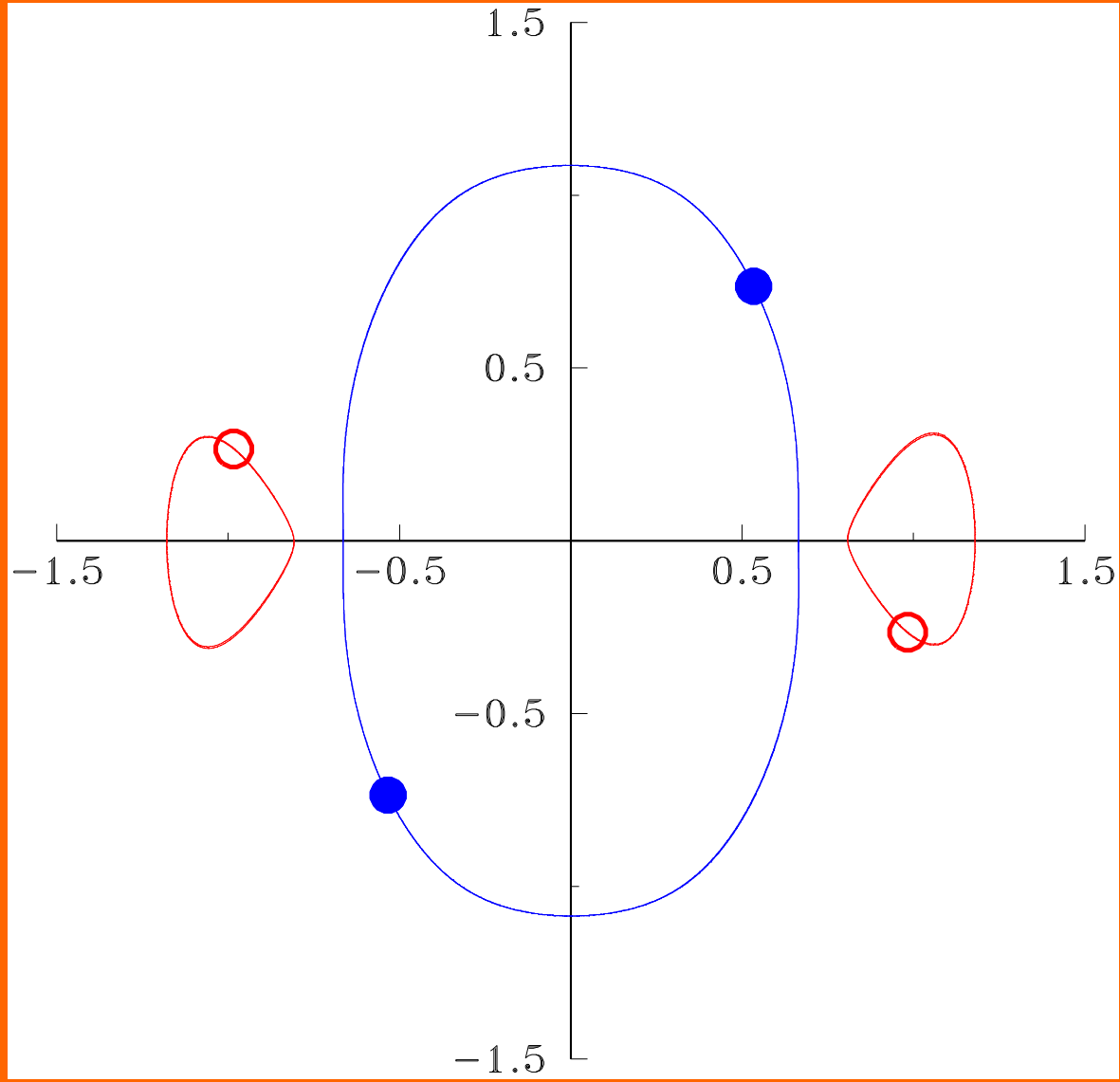
**t=43**



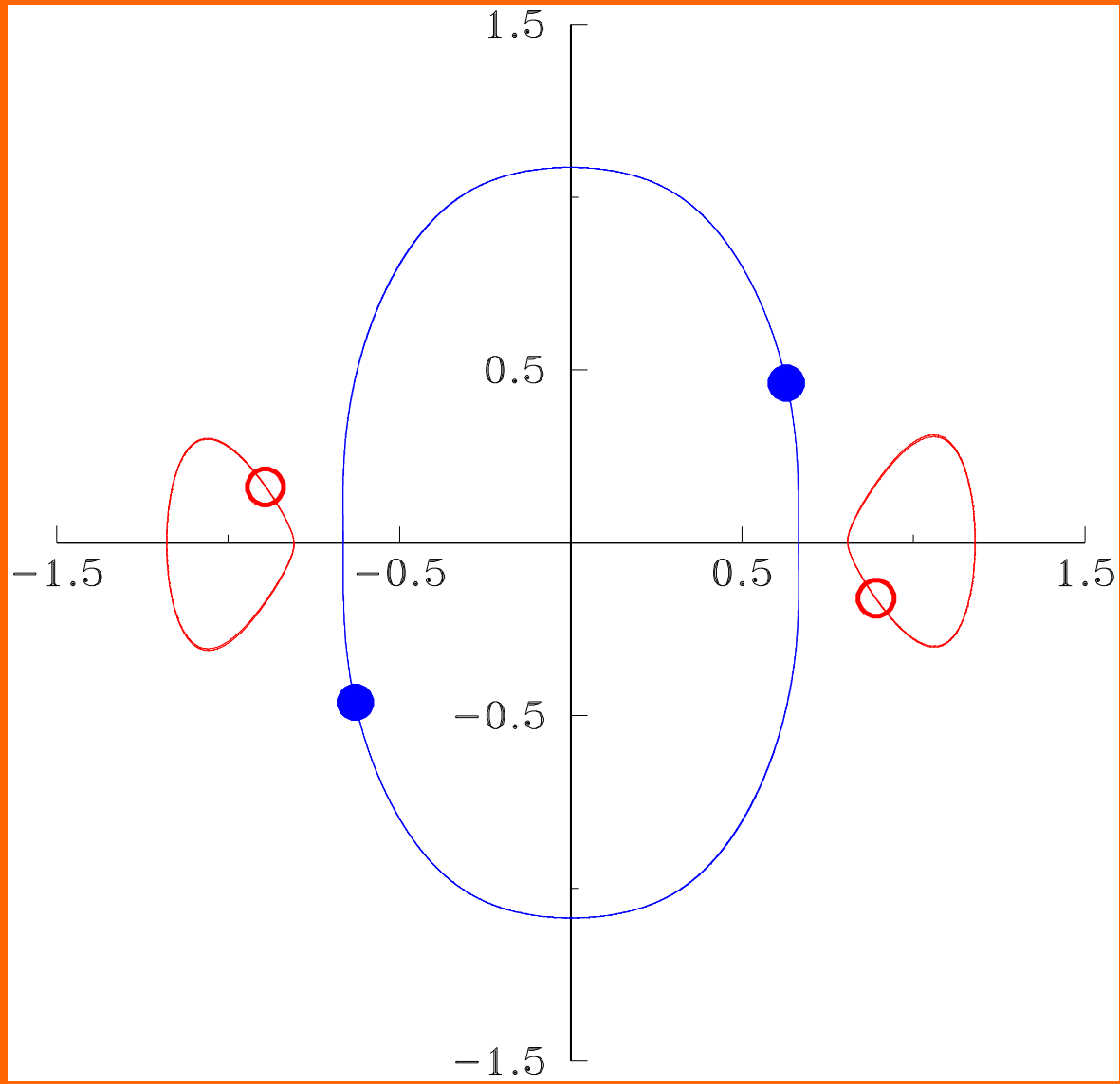
**t=44**



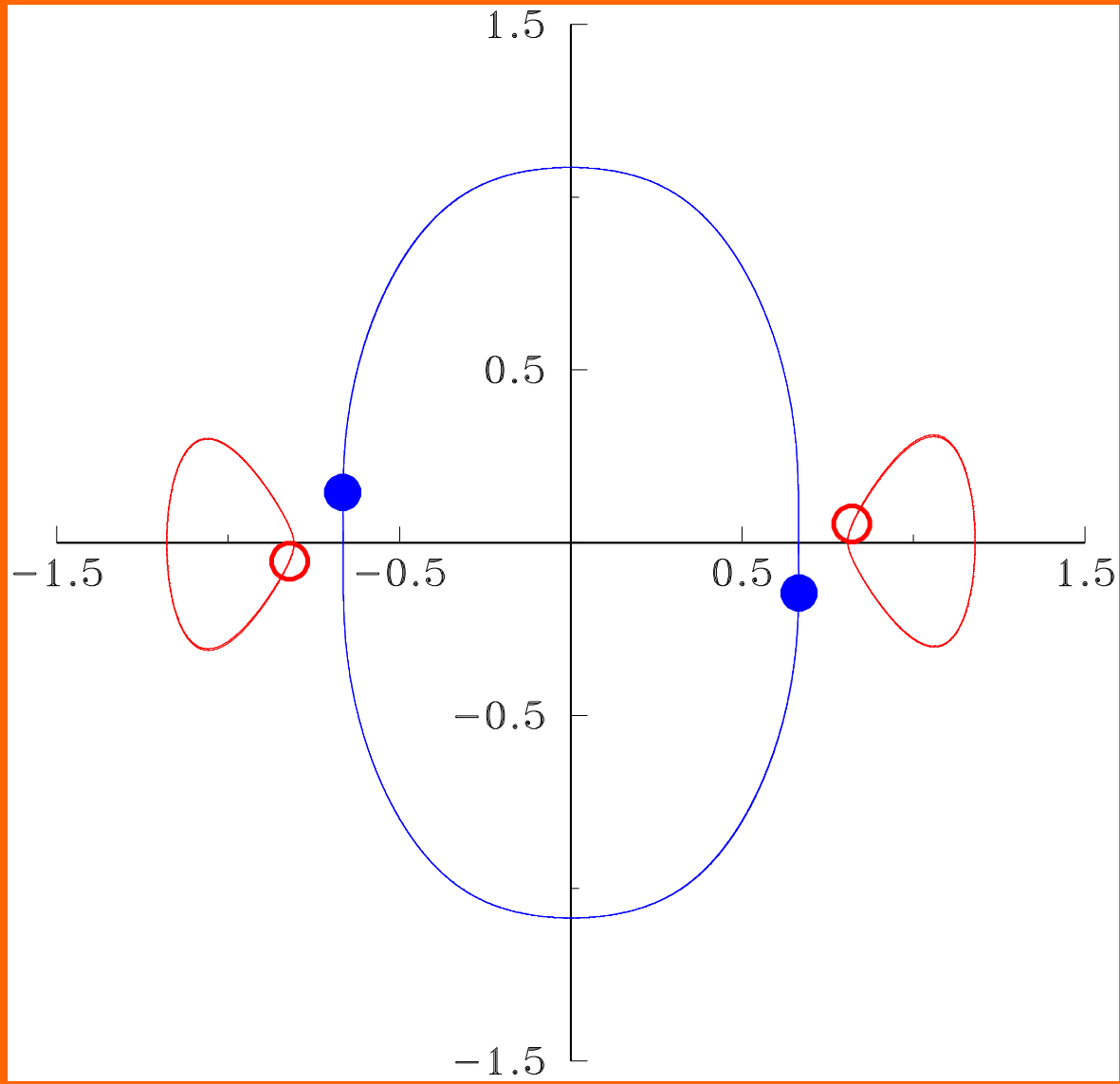
**t=45**



**t=46**

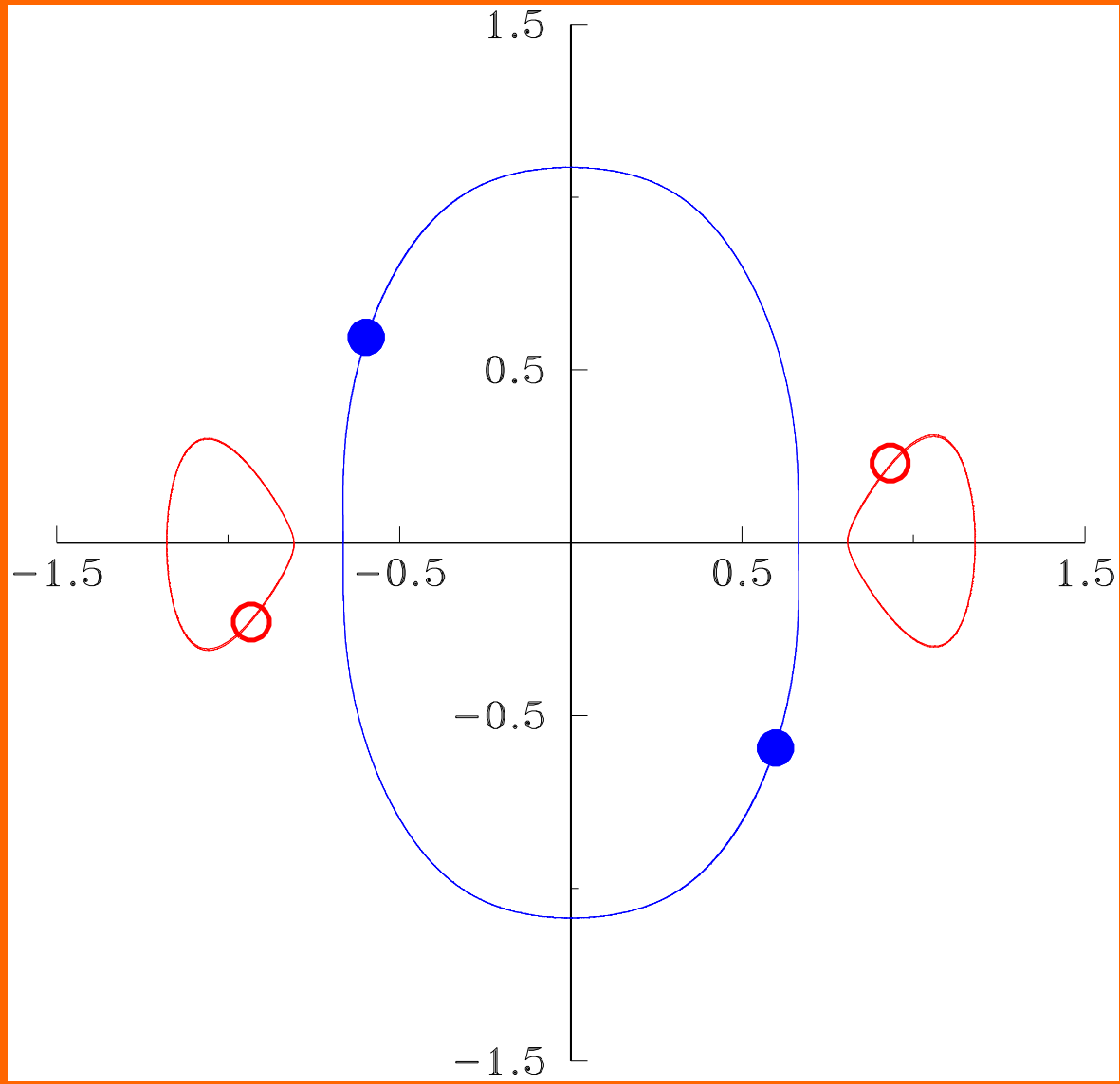


**t=47**

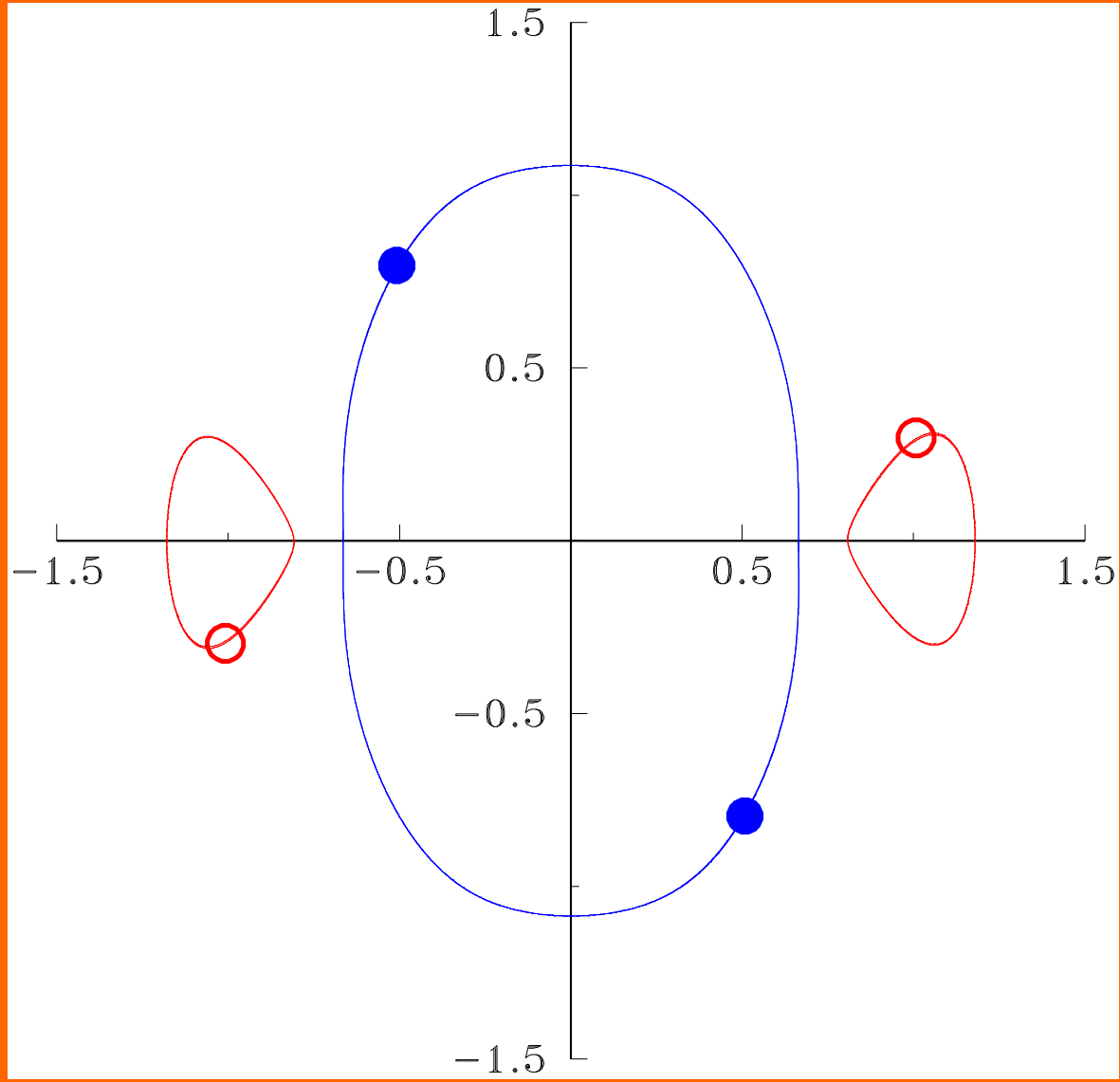




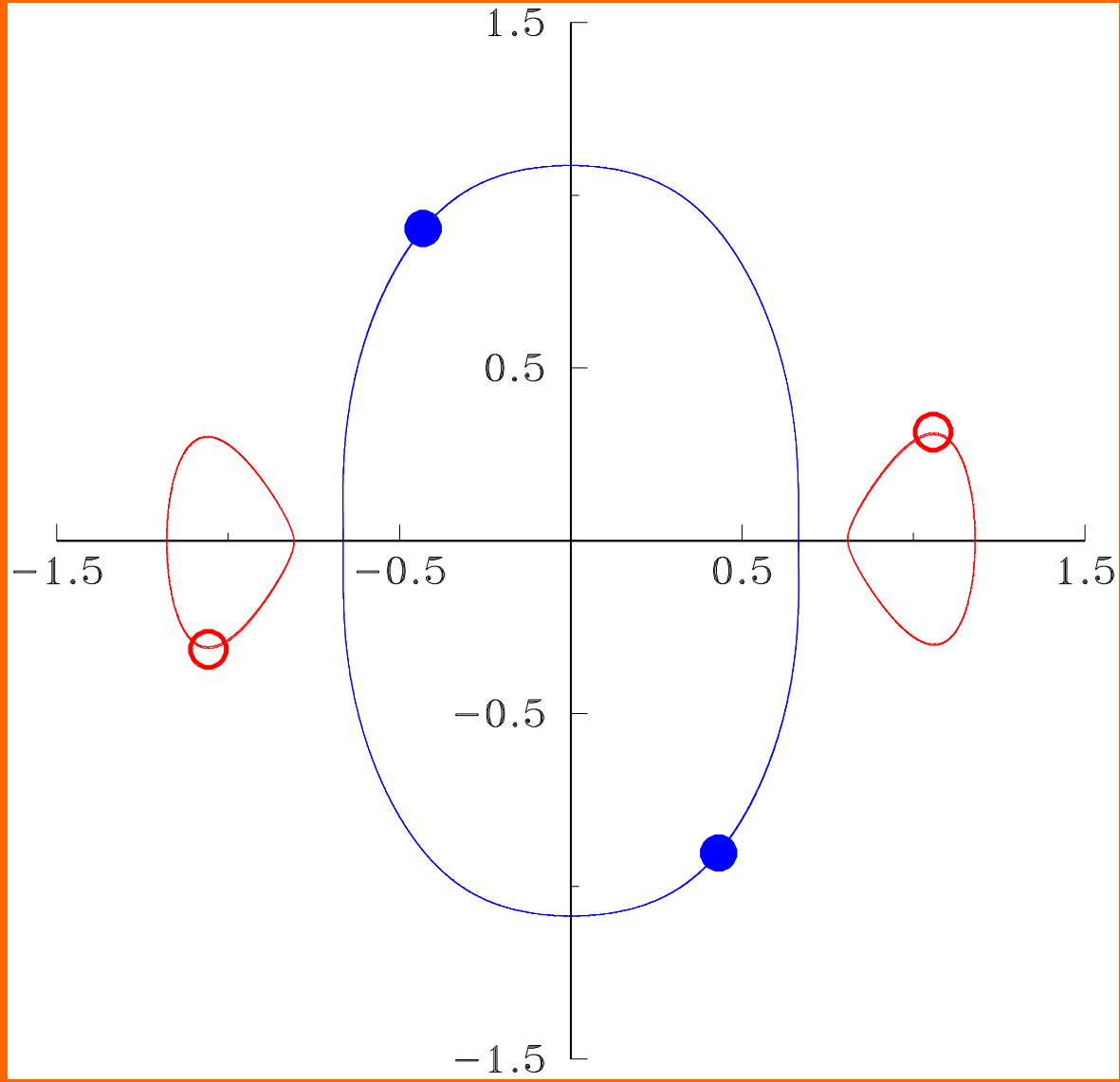
**t=48**



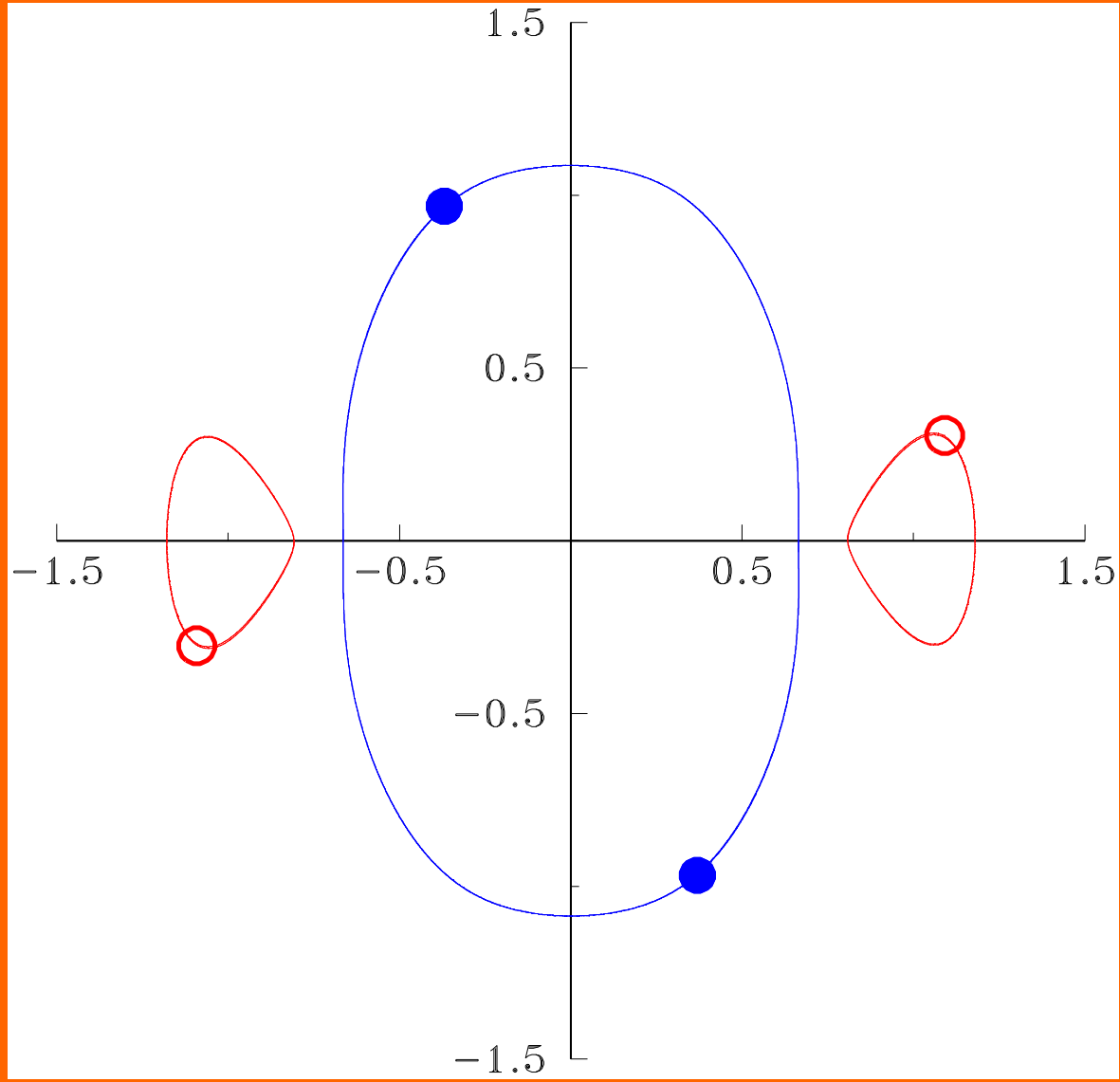
**t=49**



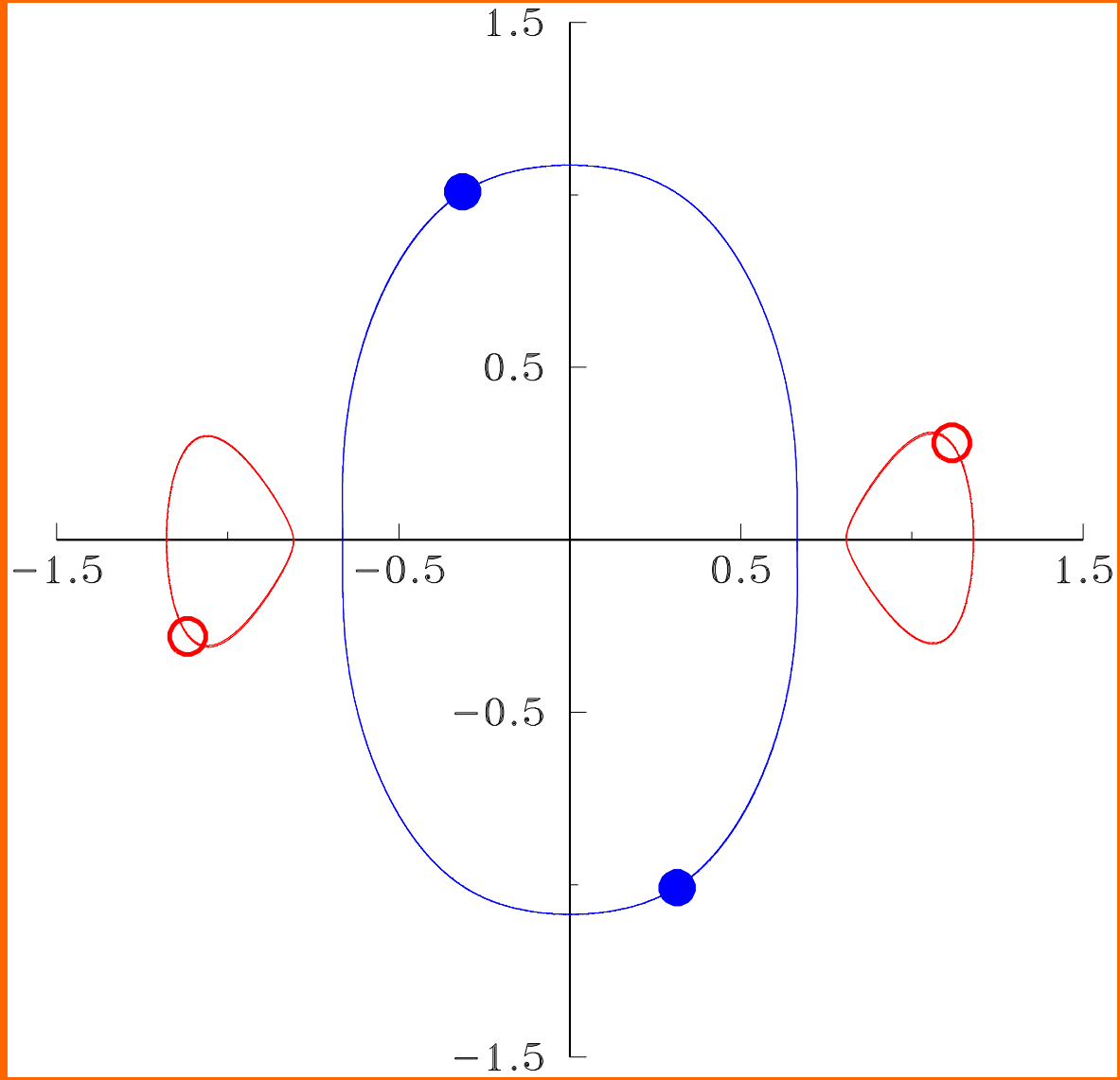
**t=50**



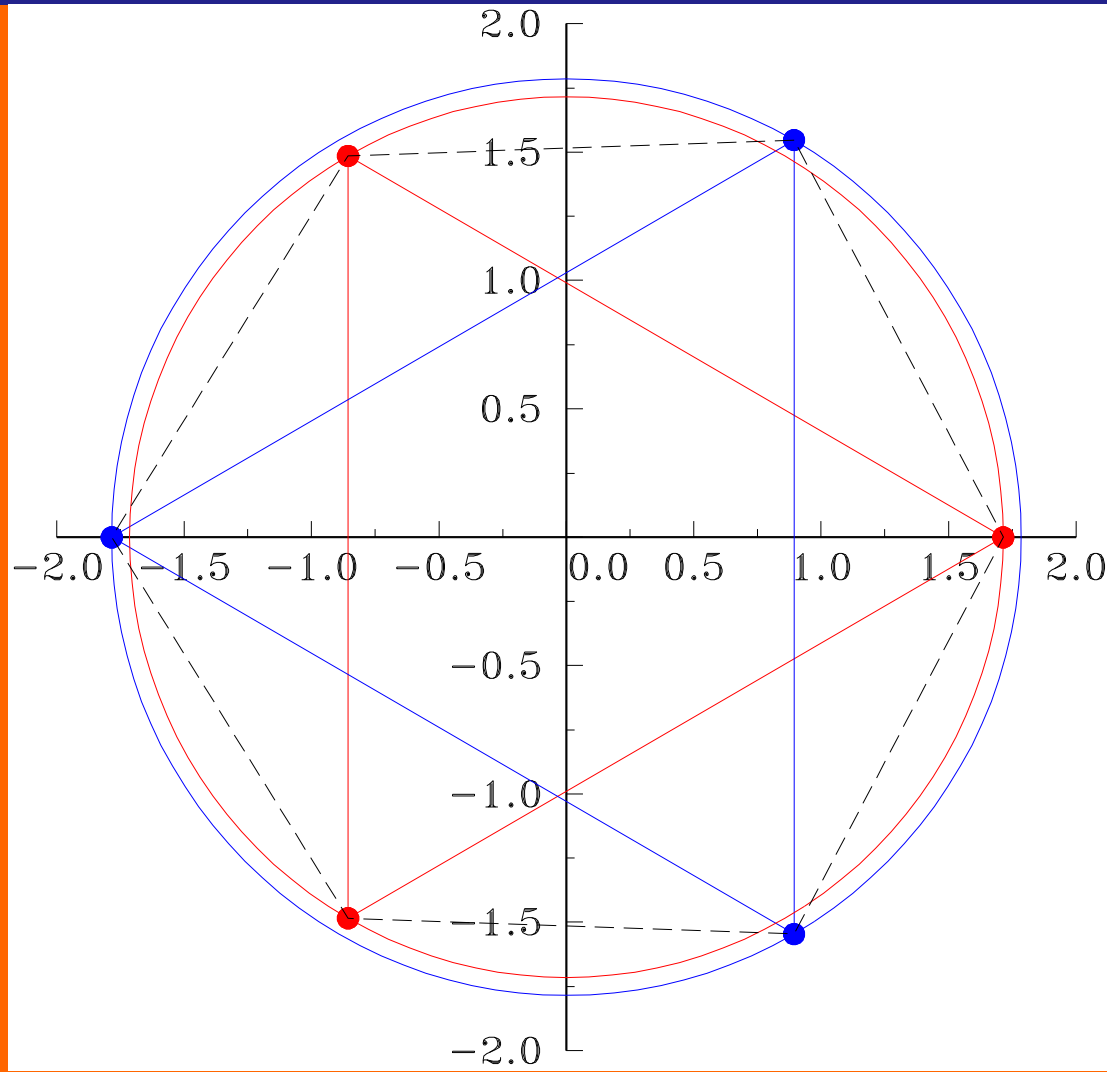
**t=51**



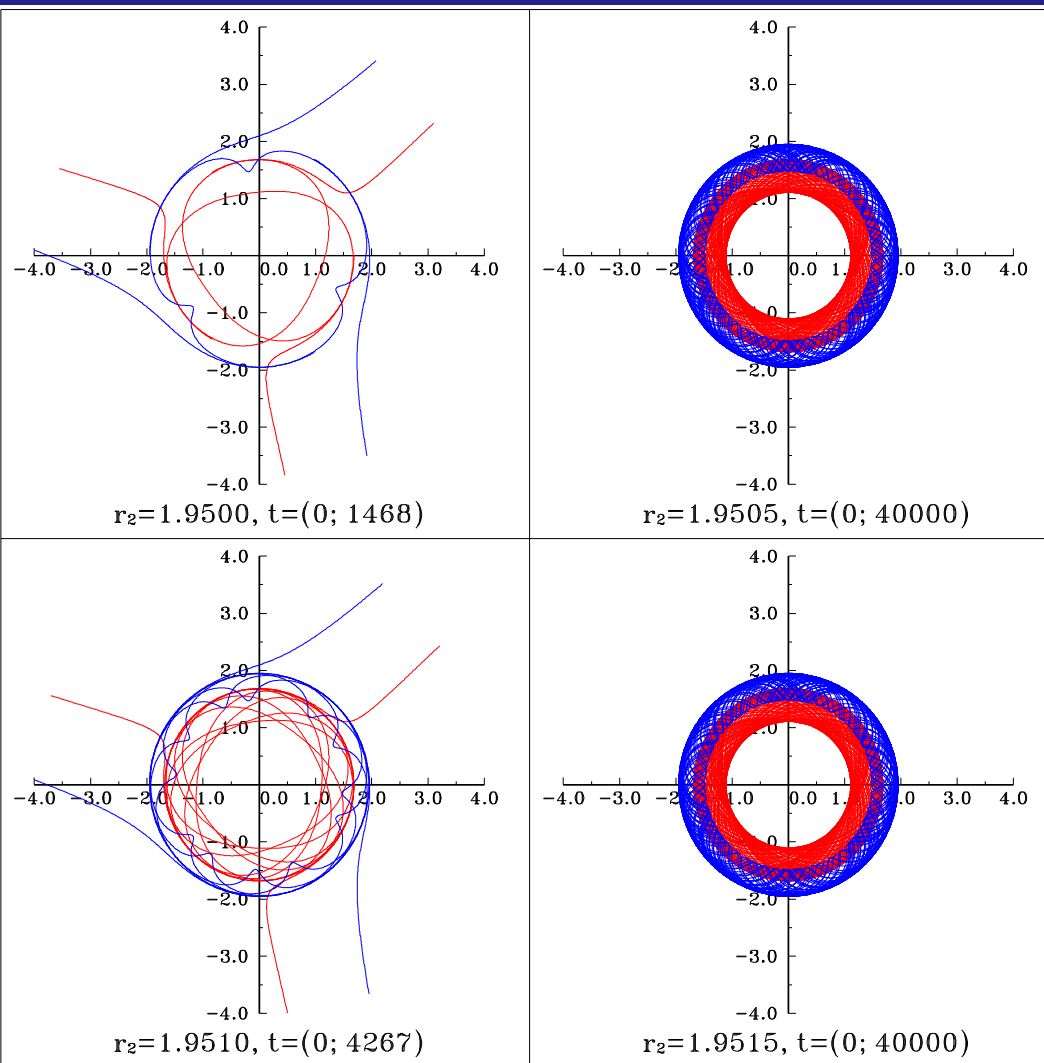
**t=52**



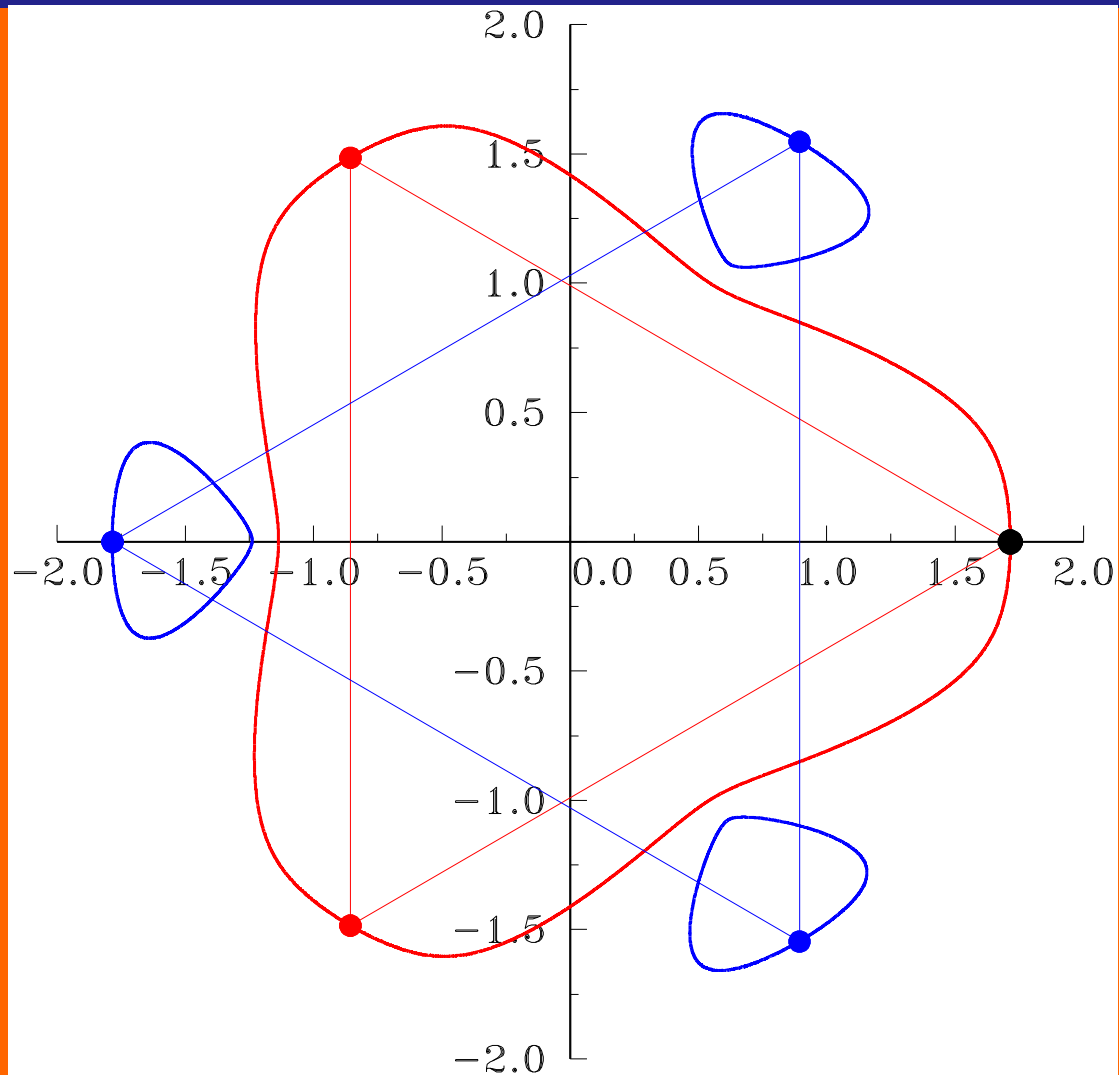
# Случай $A=3$ , $M \neq 0$ . Схема начального расположения вихрей



# Пример параметрического резонанса при $r_1=1.683$

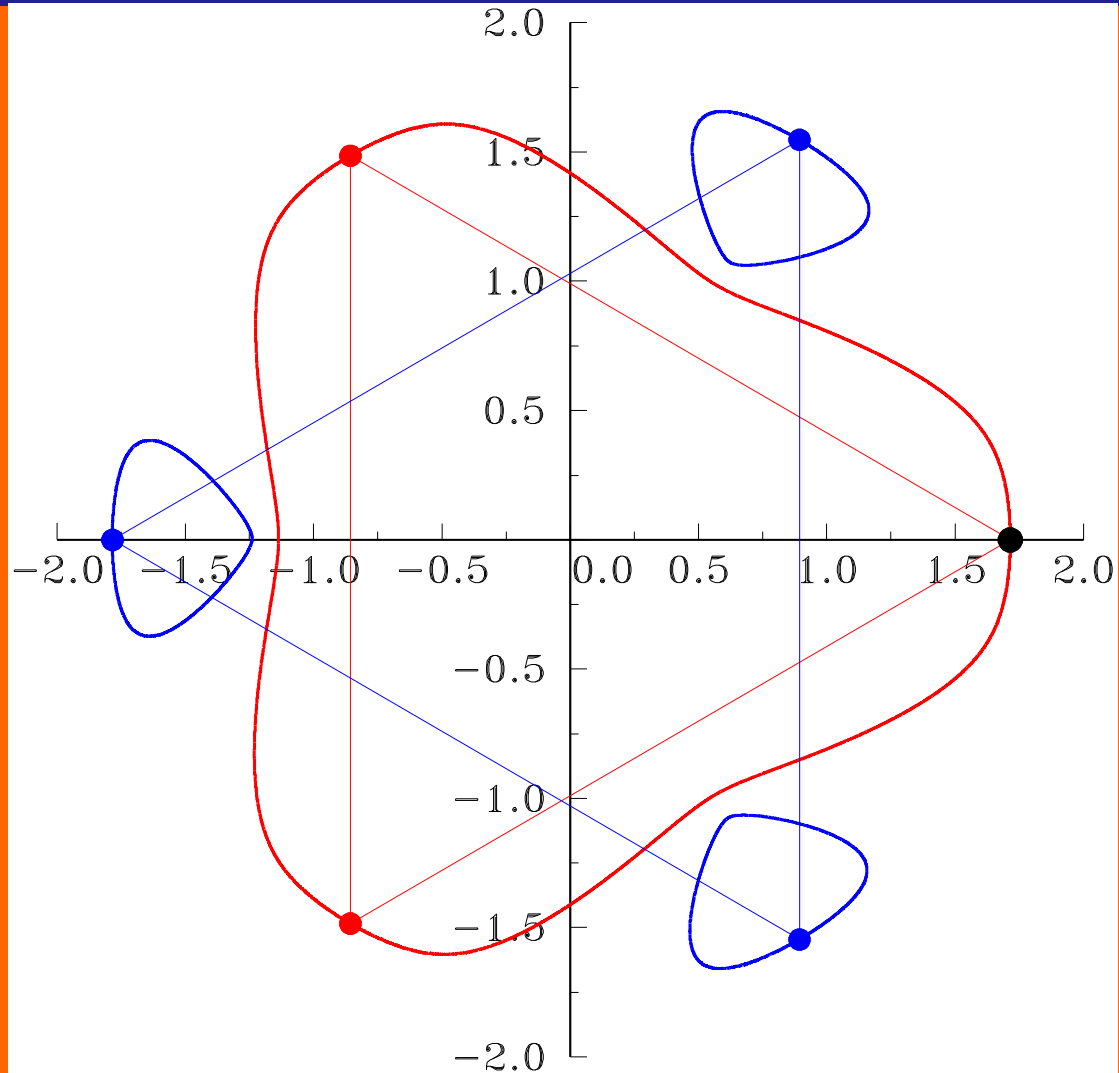


# Абсолютная сложная хореография при $r_1=1.715$ и $r_2=1.785$

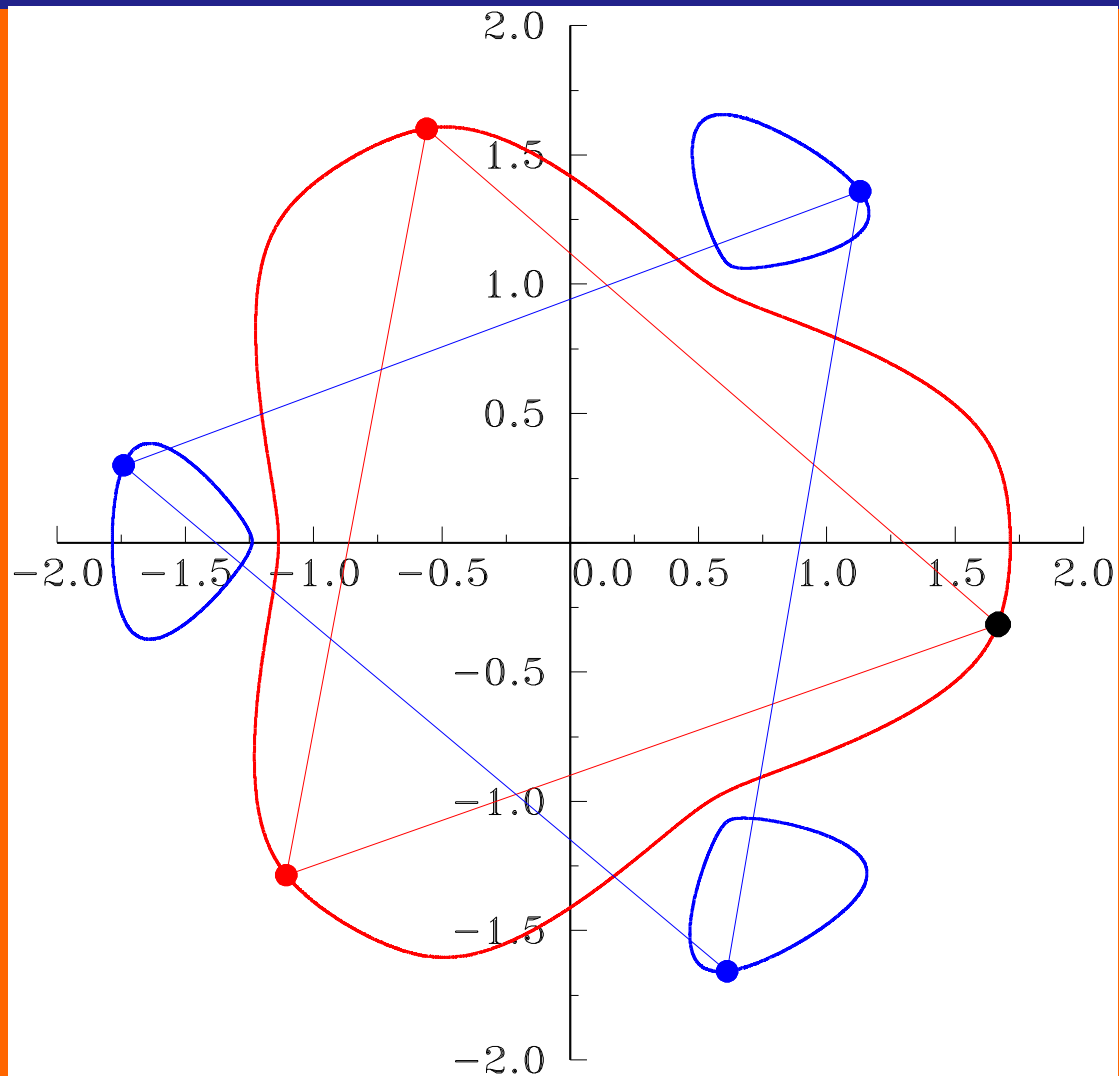




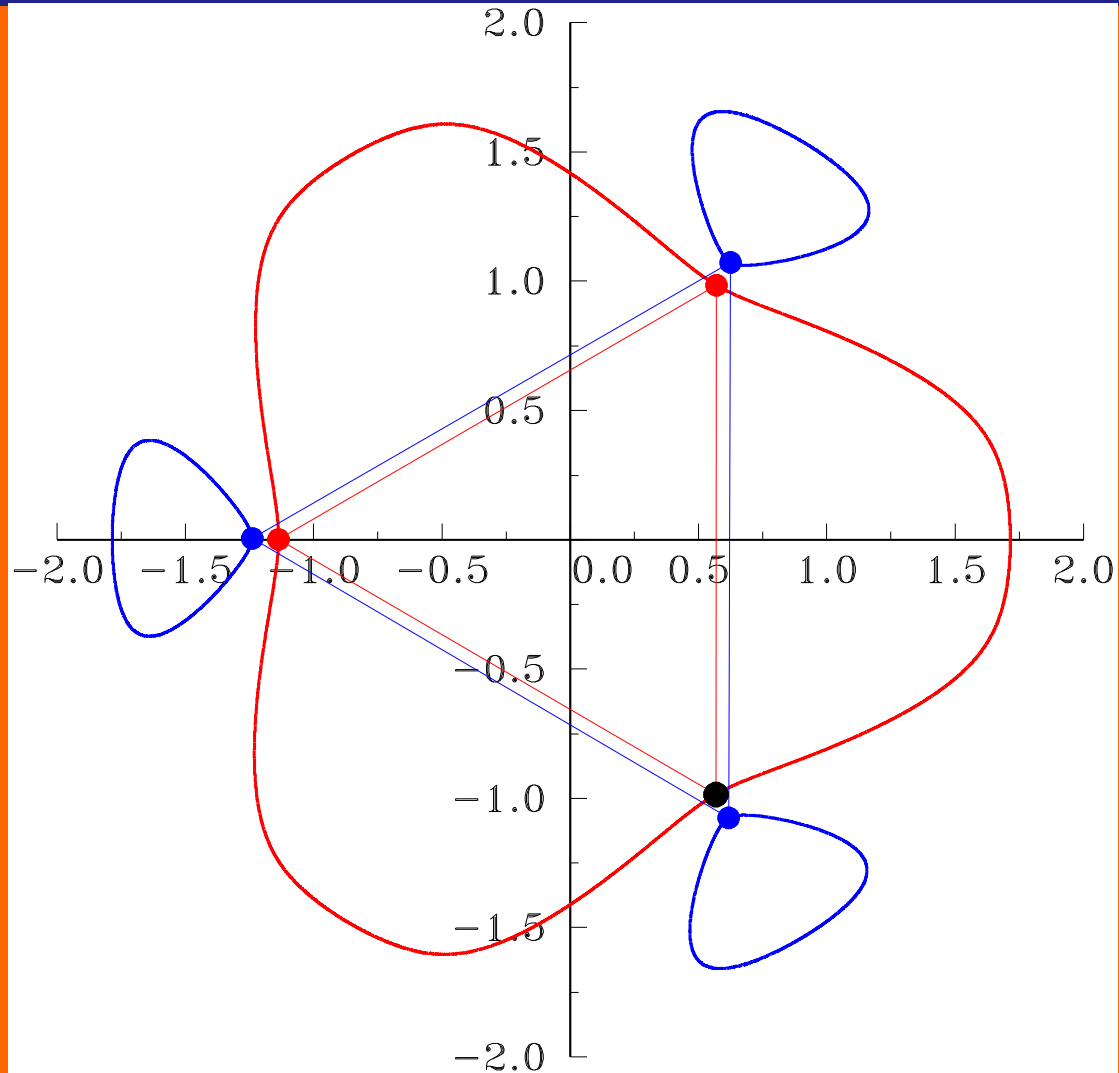
$t=0$



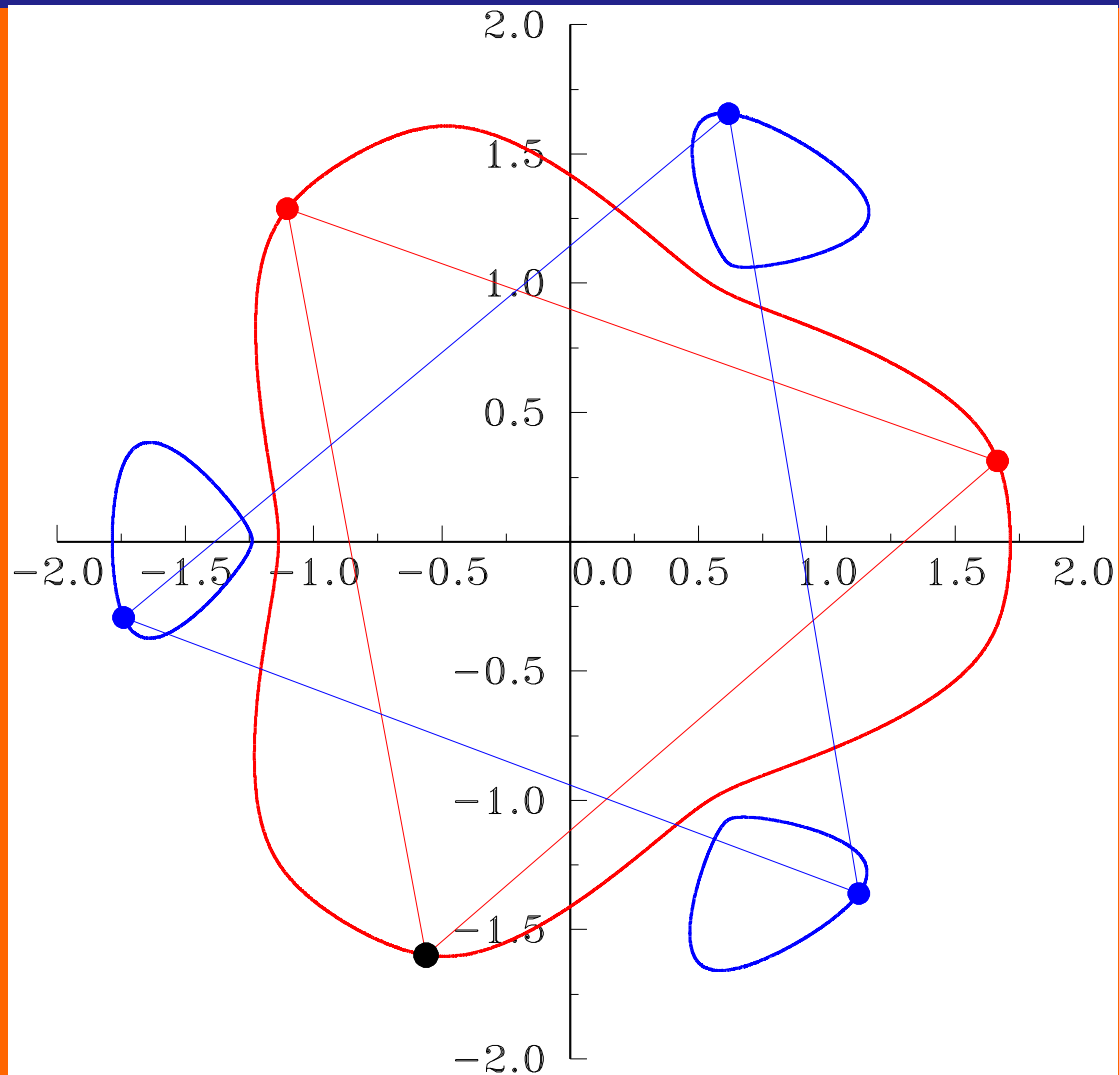
**$t=T/12$**



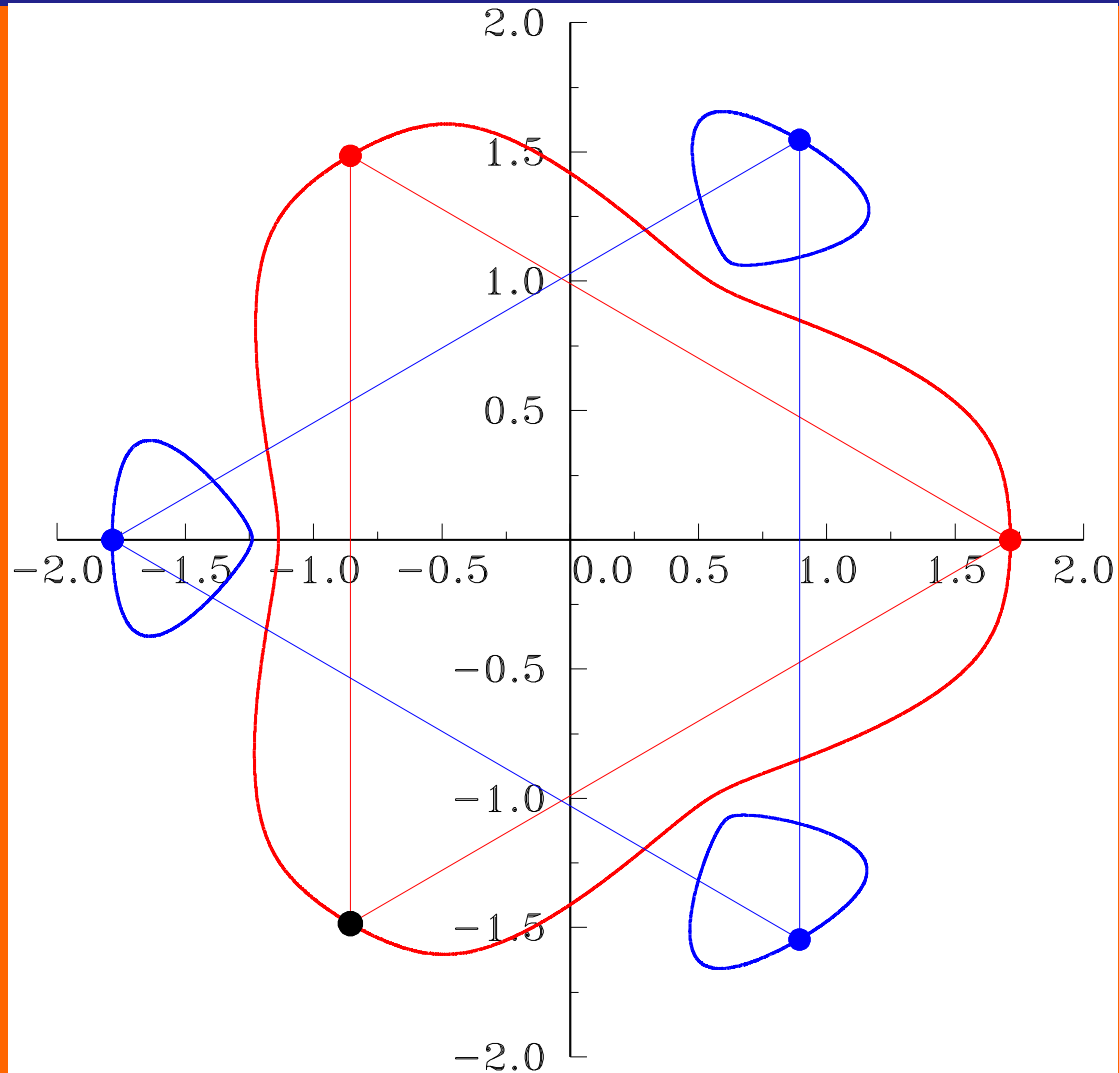
$t=2T/12$



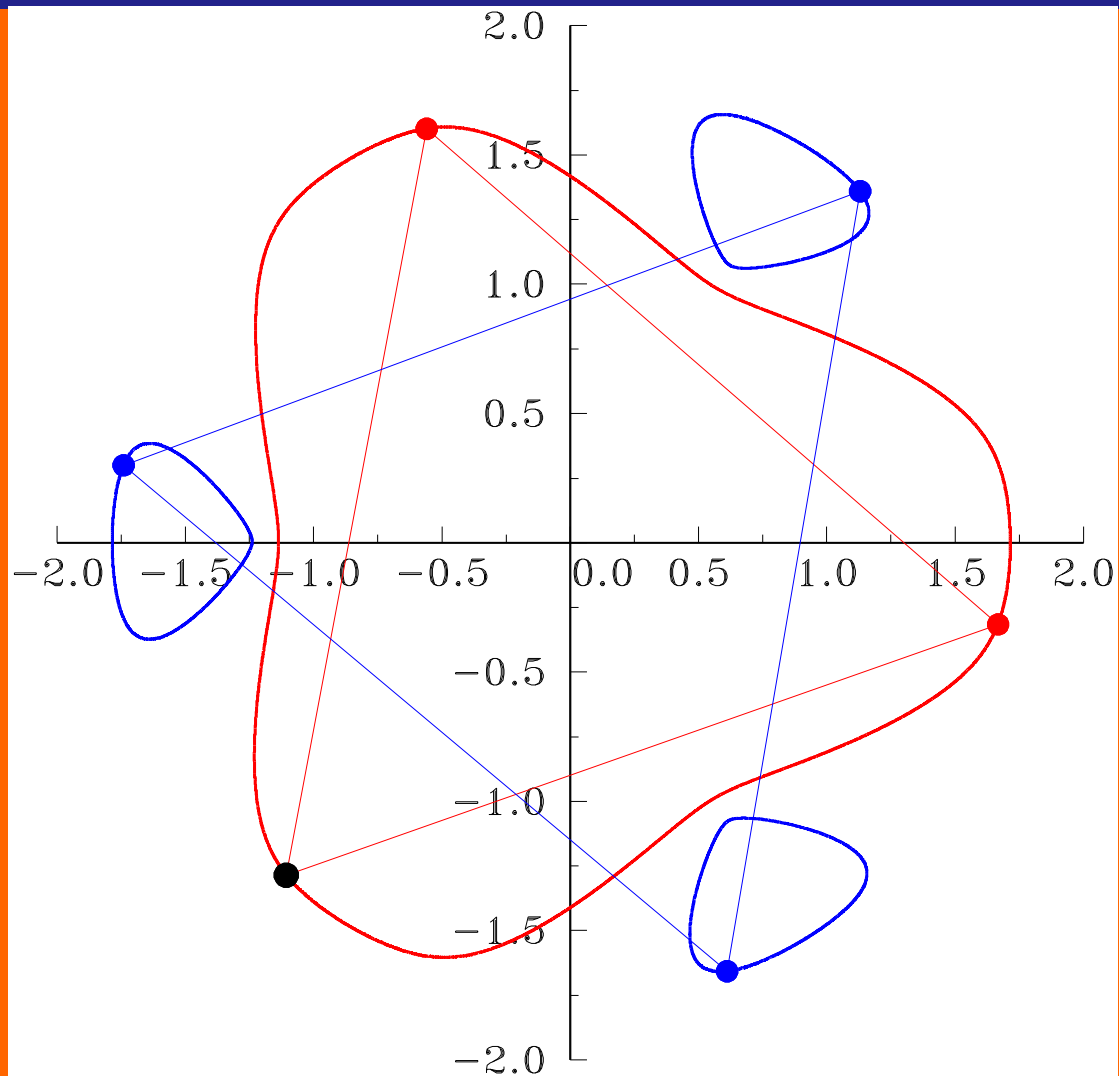
$t=3T/12$



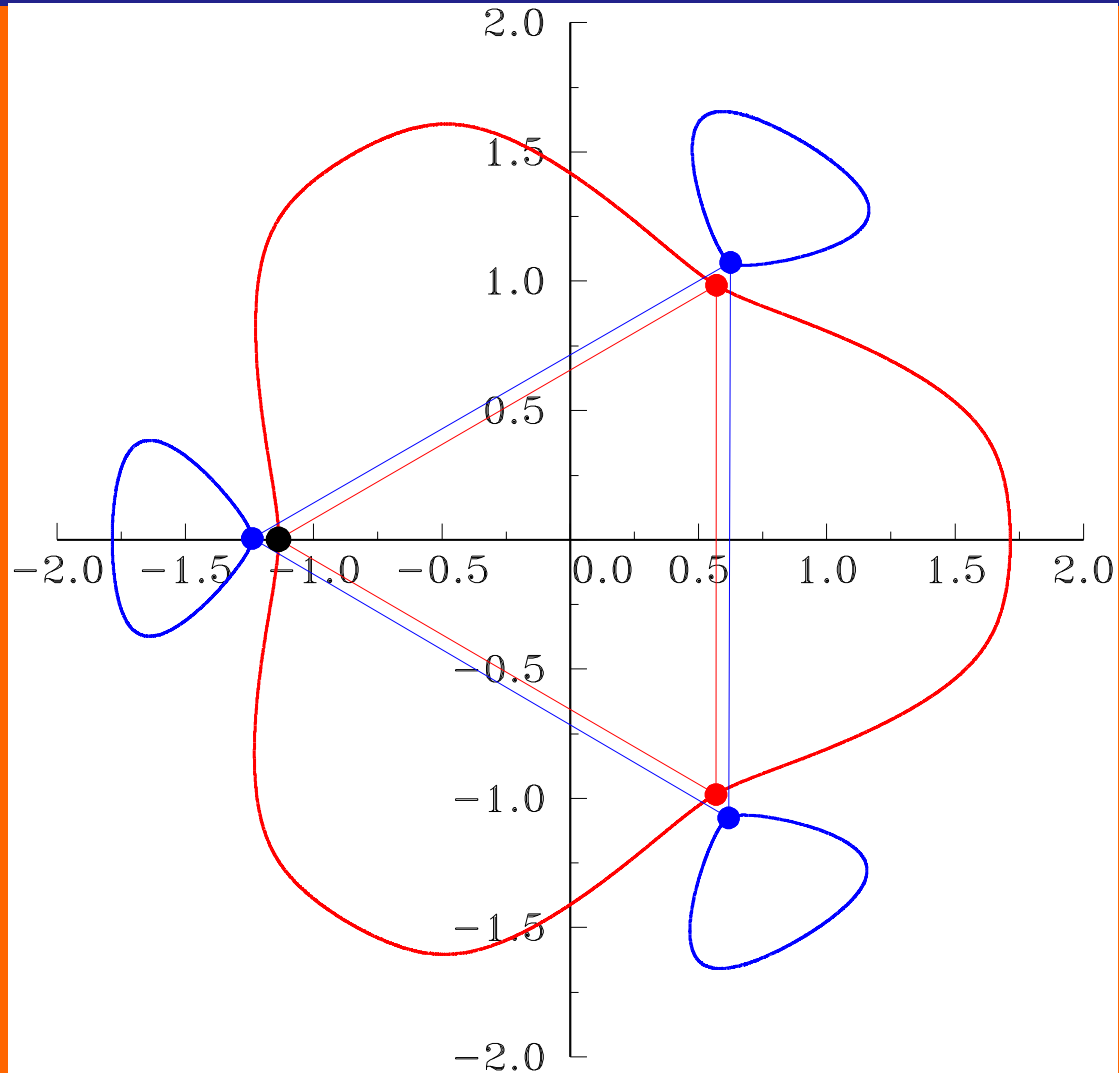
$t=4T/12$



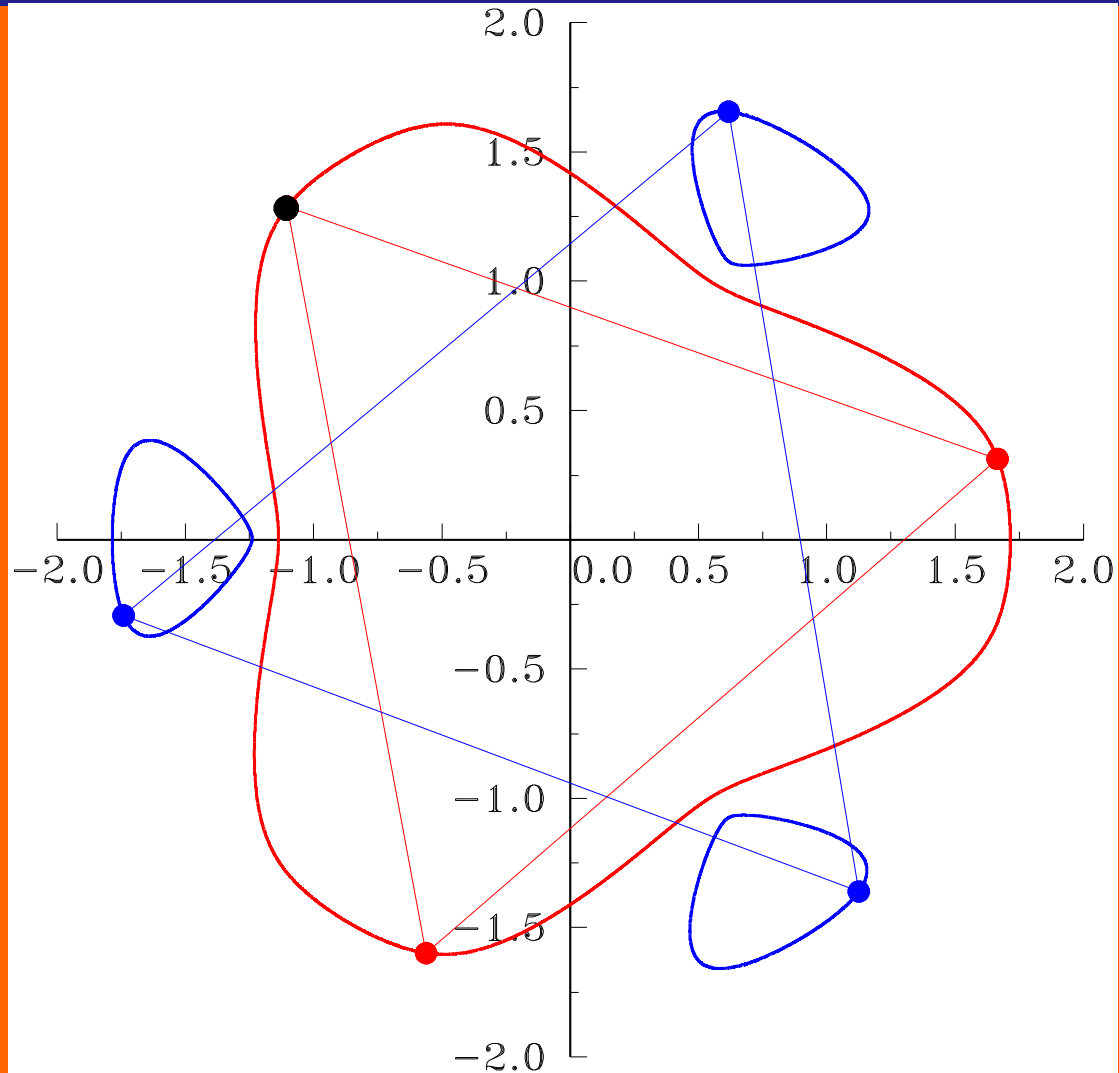
$t=5T/12$



**$t=6T/12$**

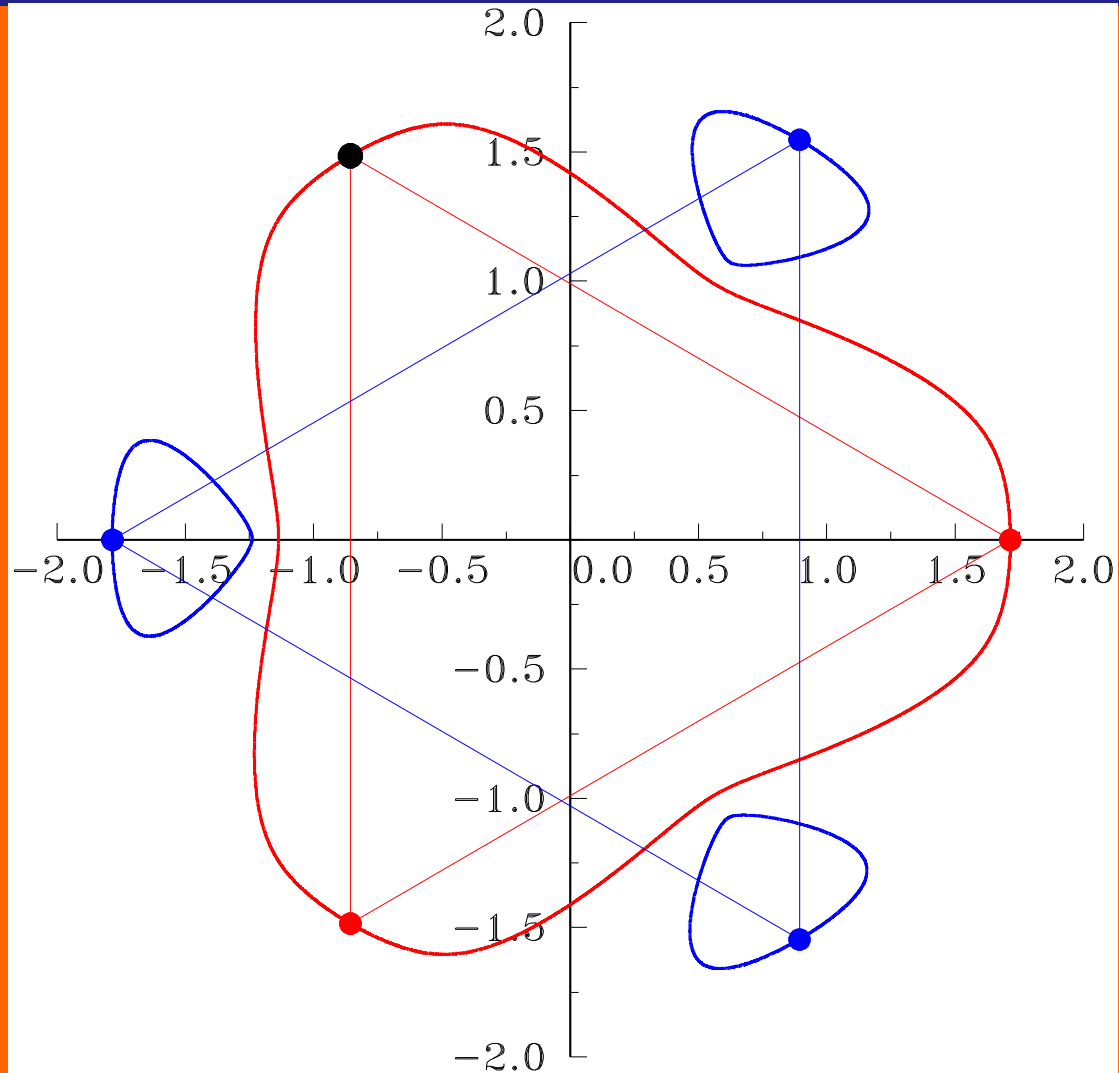


$t=7T/12$

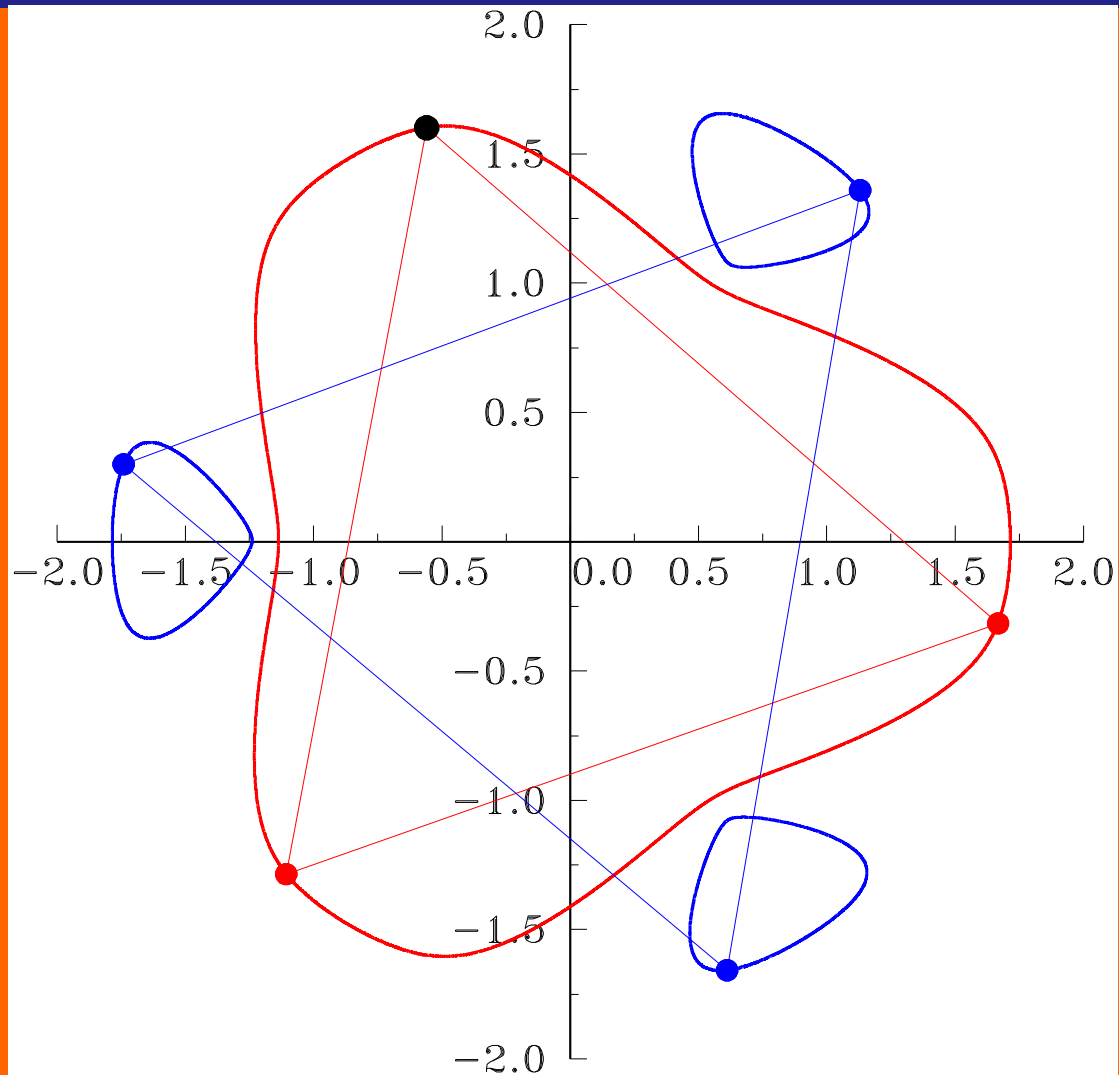




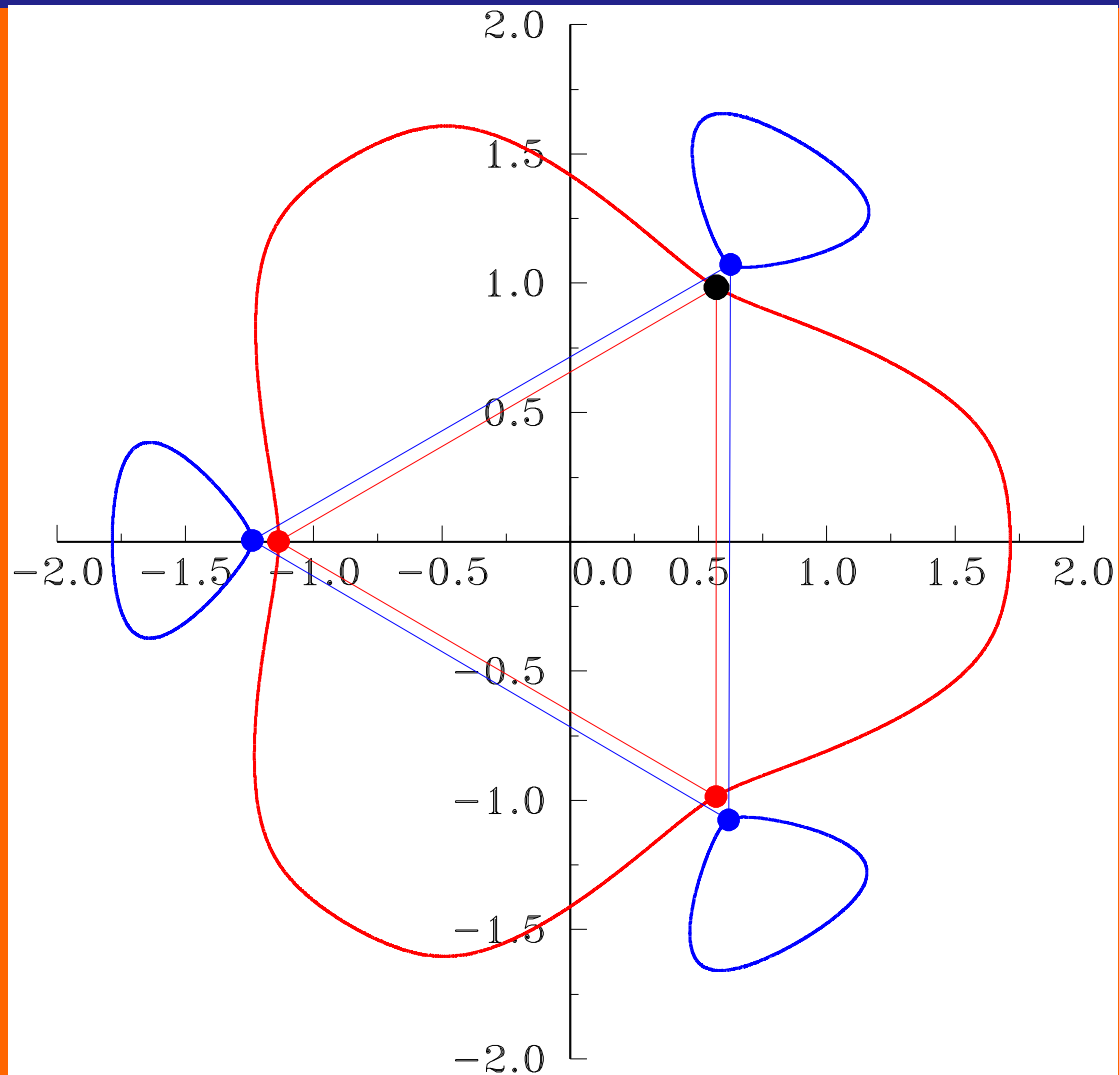
$t=8T/12$



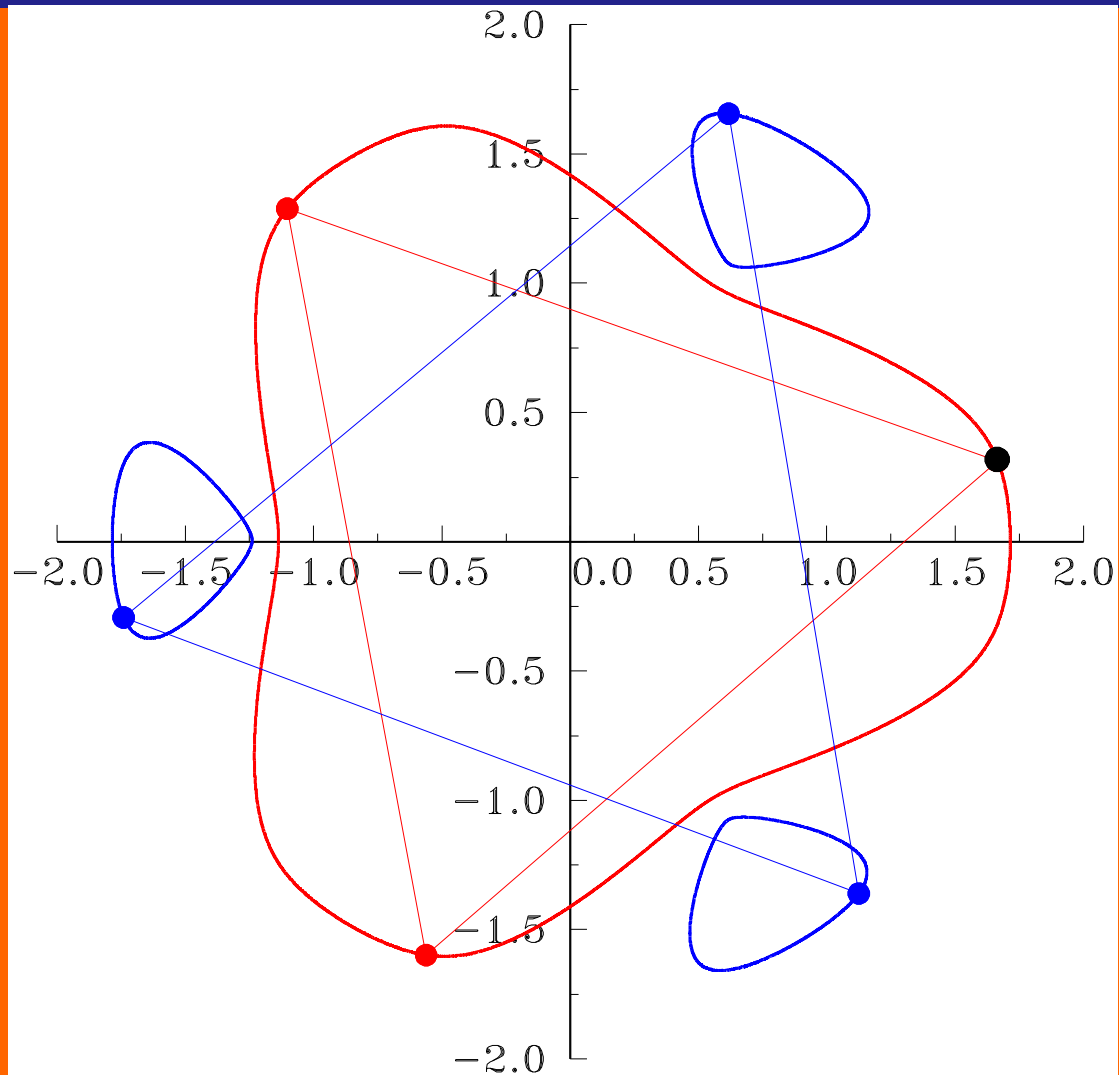
$t=9T/12$



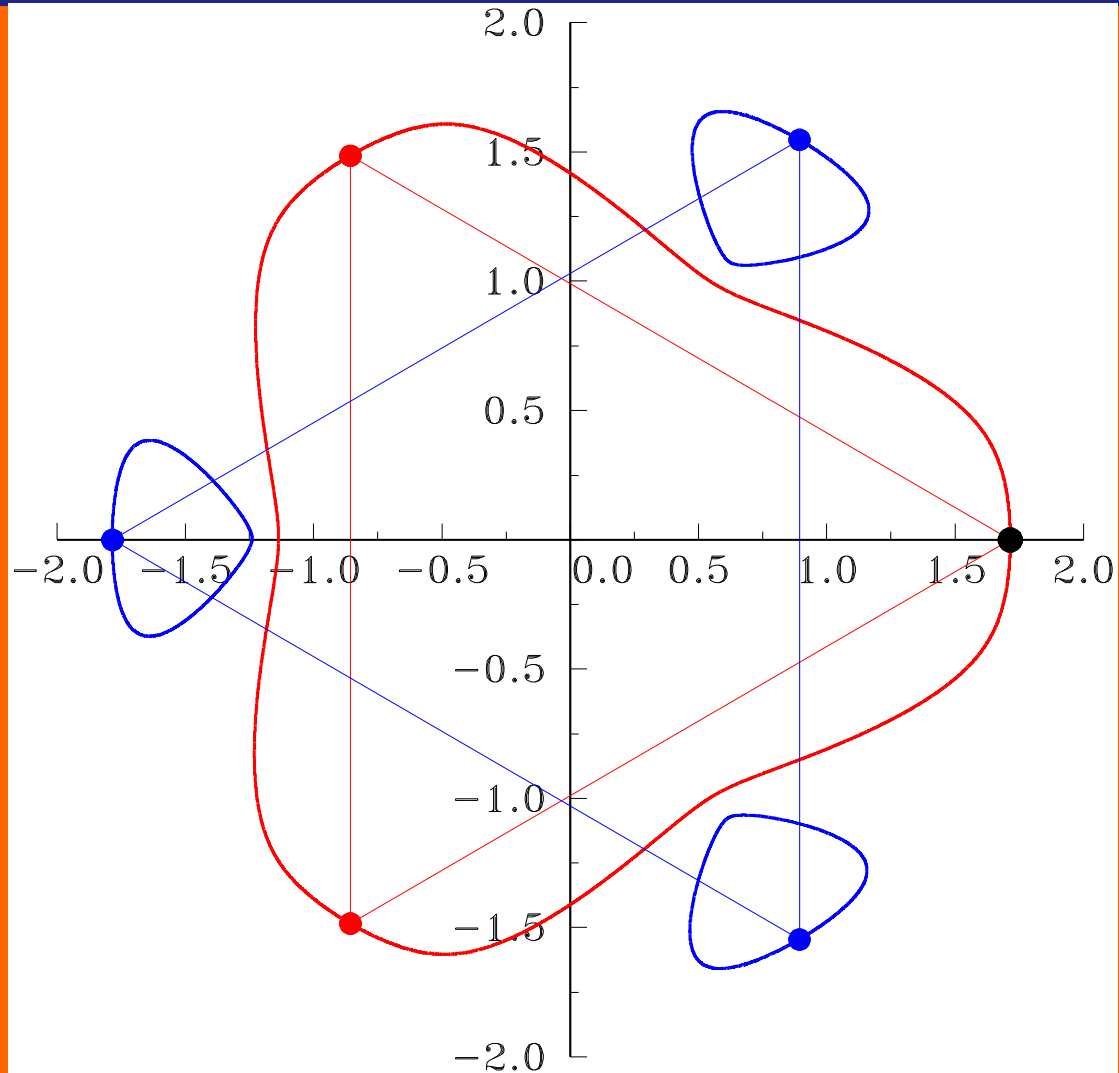
$t=10T/12$



$t=11T/12$



$t=T$



*Динамика  
распределенных вихрей*

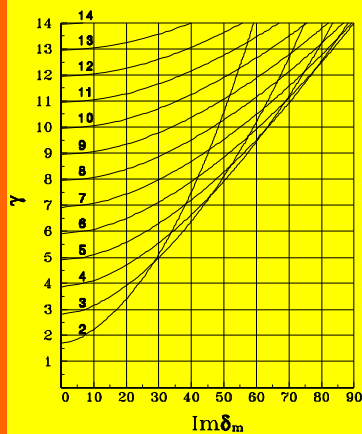
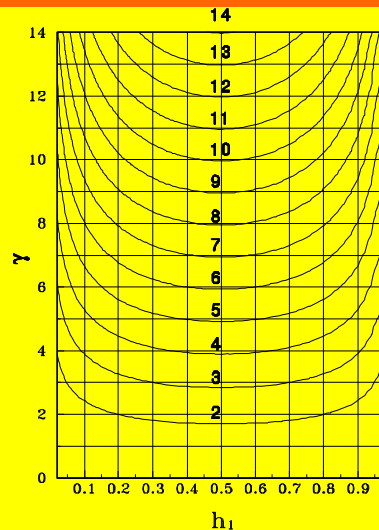
# Анализ линейной устойчивости двухслойного вихря

$$\delta_m = \frac{\bar{\Pi}_1}{2(1-h)} \left\{ (1-h) \left( 1 - L_1(\gamma) - \frac{1}{2m} \right) (1 + \Delta) + h \left[ \left( \frac{1-h}{h} \right)^2 + \Delta \right] \times \right. \\ \left. \left( L_1(\gamma) - L_m(\gamma) \right) \pm \sqrt{\Phi_m(\gamma, h)} \right\}$$

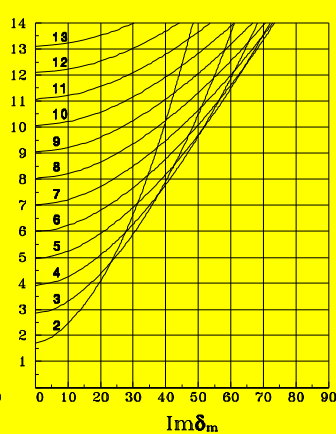
$$\Phi_m(\gamma, h) = \left\{ (1-h) \left( L_1(\gamma) - \frac{1}{2m} \right) (1 - \Delta) + h \left[ \left( \frac{1-h}{h} \right)^2 - \Delta \right] \times \right. \\ \left. \left( L_1(\gamma) - L_m(\gamma) \right) \right\}^2 + 4(1-h)^2 \Delta \left( \frac{1}{2m} - L_m(\gamma) \right)^2$$

$$L_n(\gamma) = I_n(\gamma) K_n(\gamma), \quad n \geq 1.$$

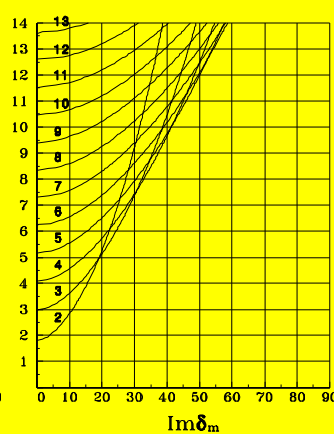
# Кривые нейтральной устойчивости и инкрементов роста неустойчивых мод для осесимметричного хетона



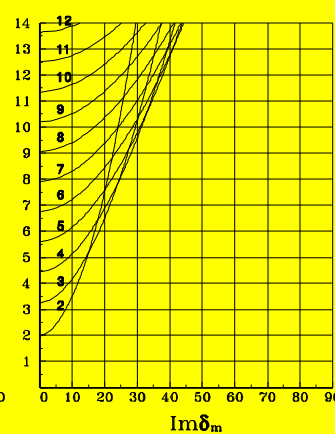
(a)



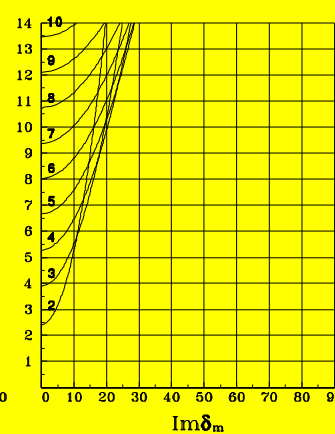
(b)



(c)



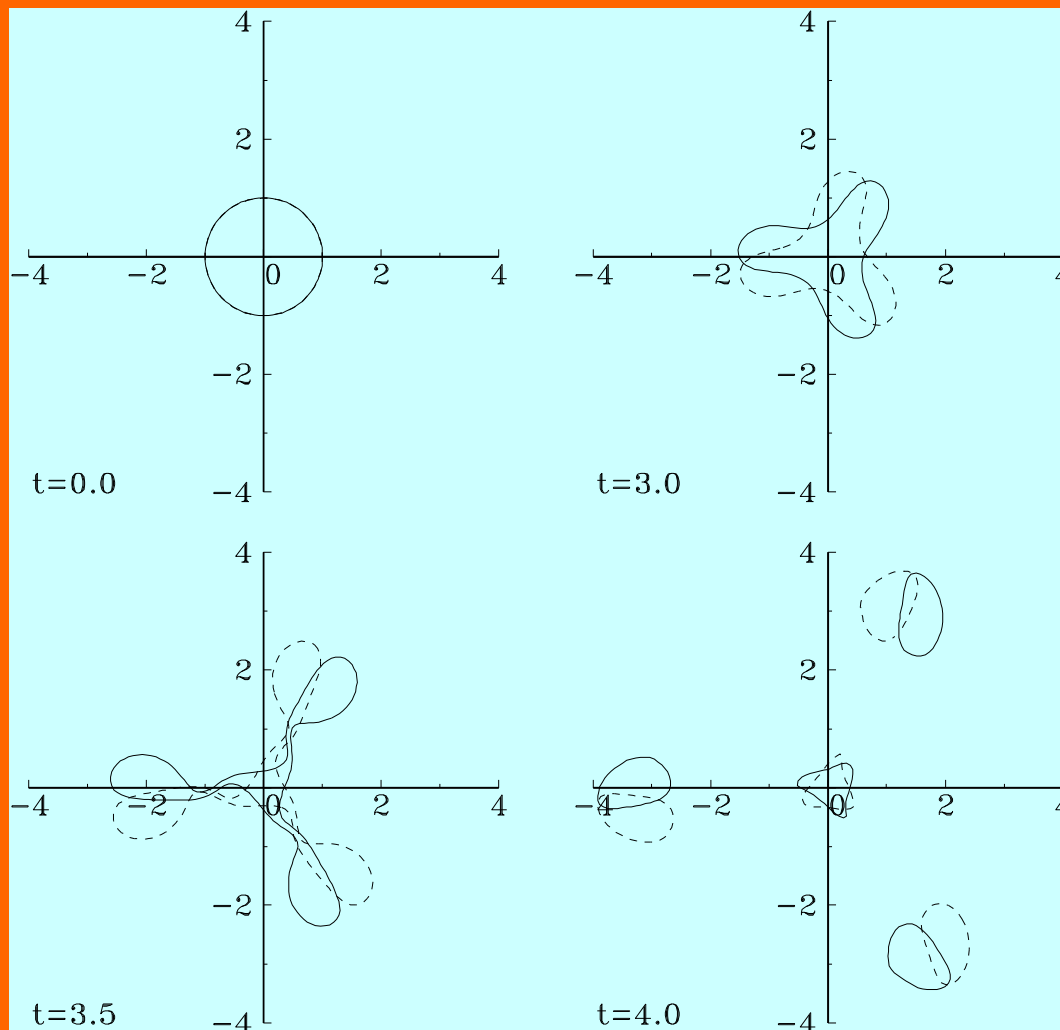
(d)



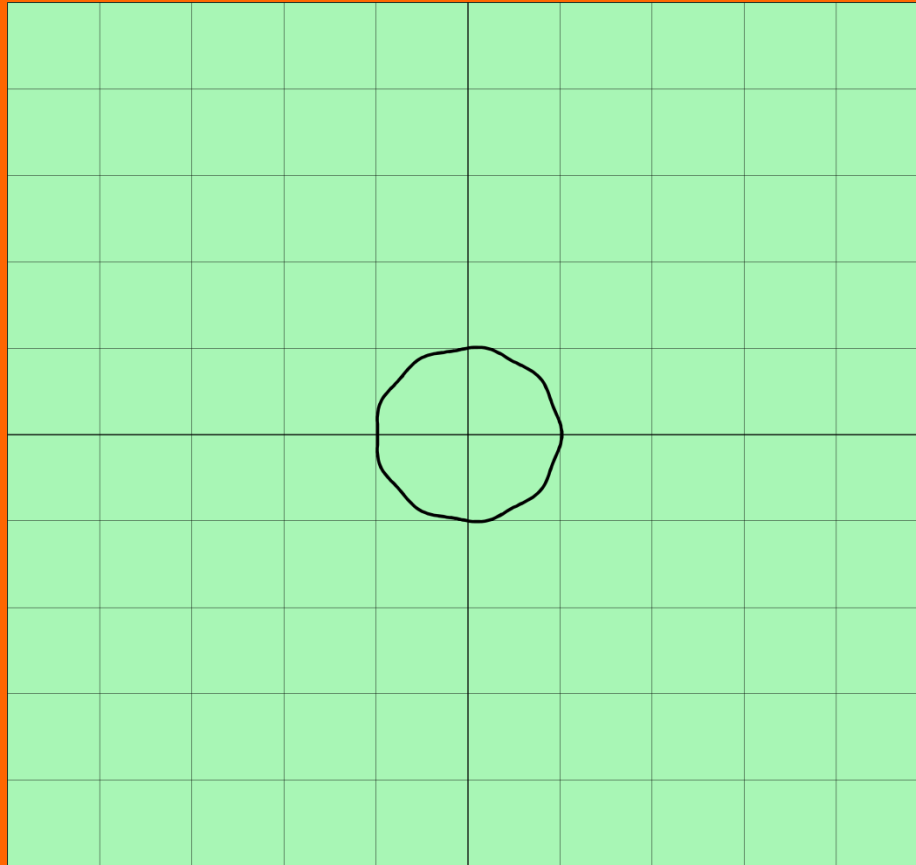
(e)

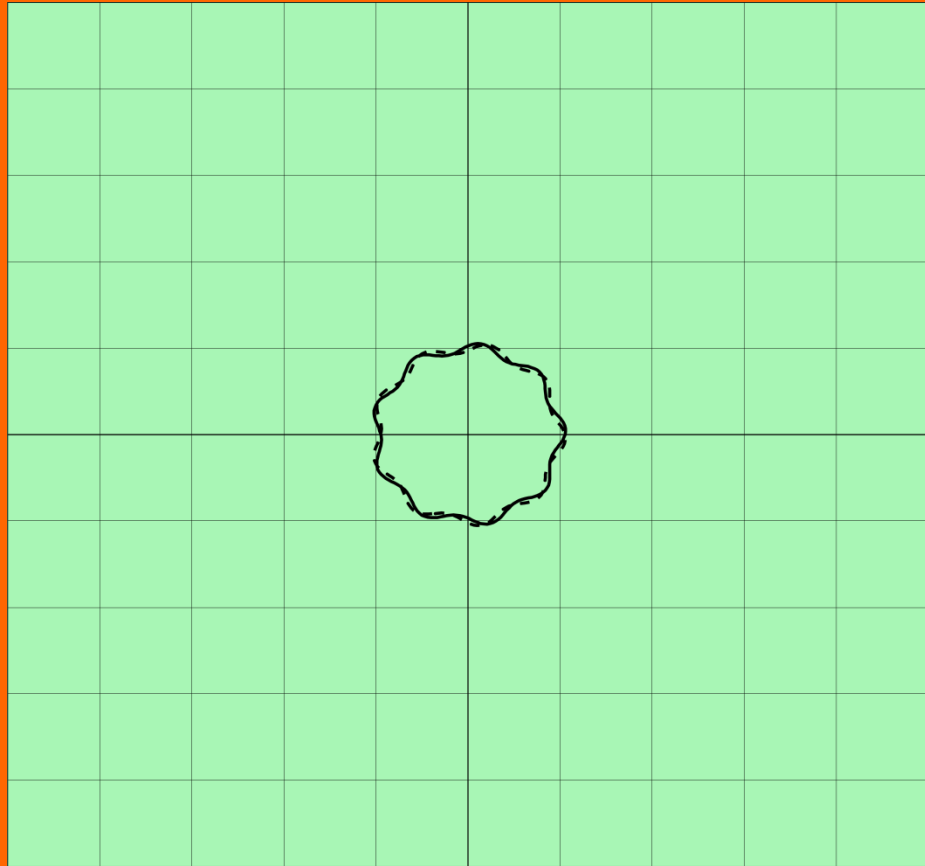


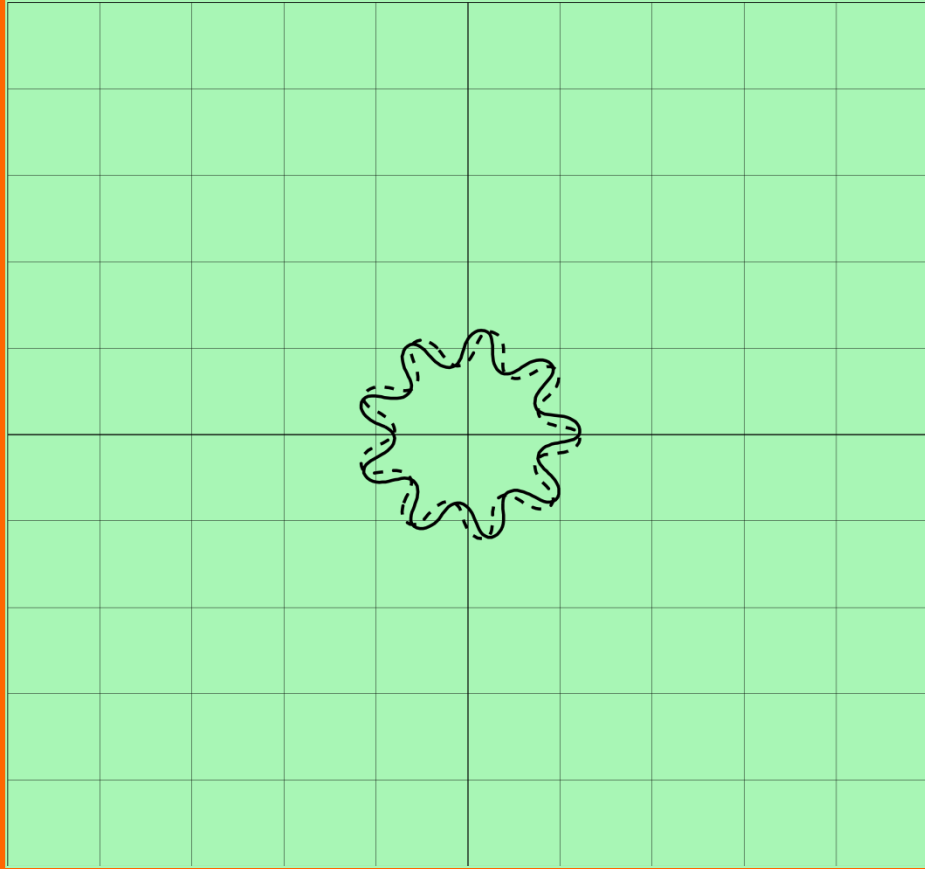
# Пример реализации нелинейного этапа неустойчивости моды с $m=3$

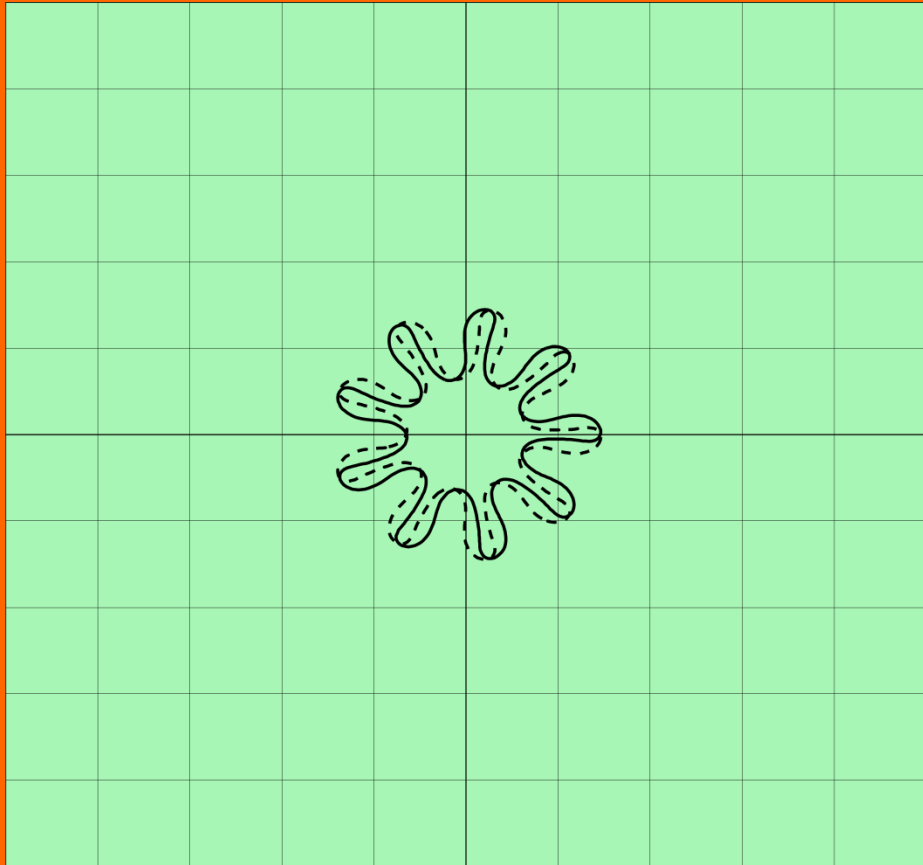


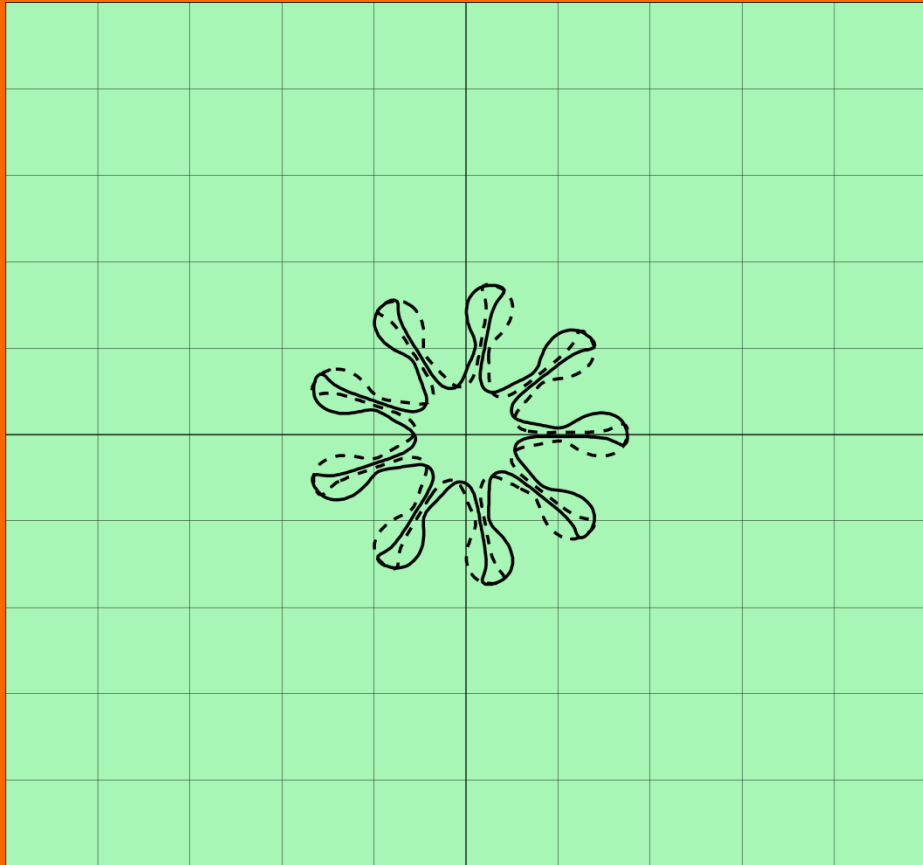
*Пример реализации процесса каскадной  
неустойчивости для моды с  $m=9$*

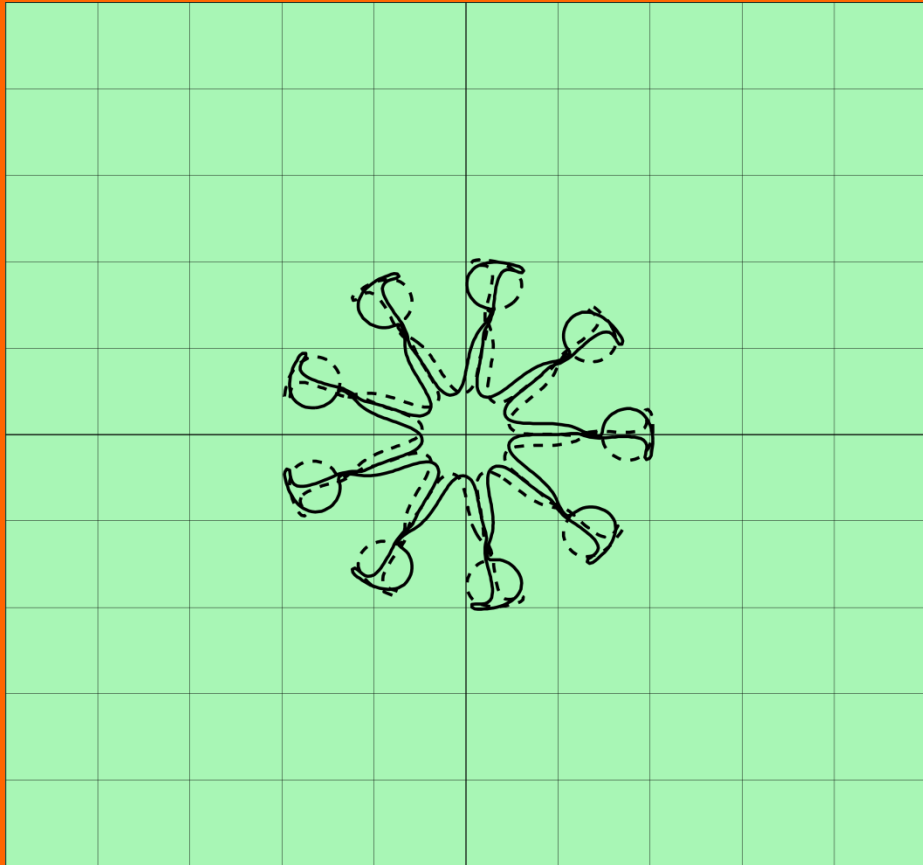


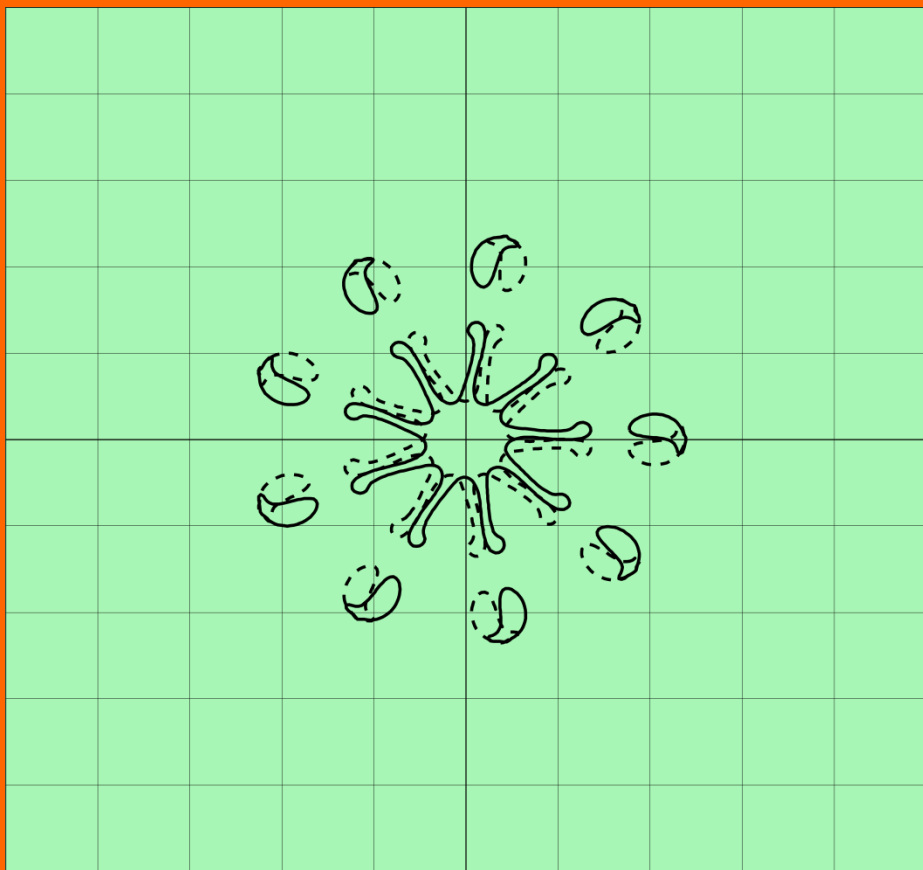




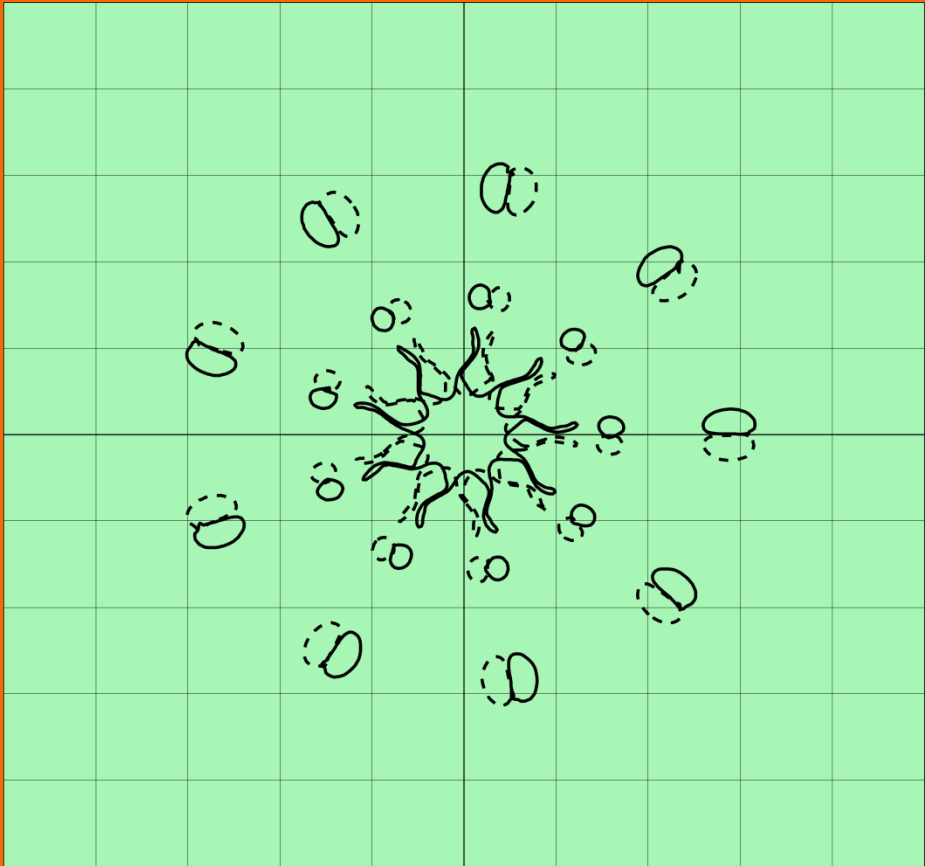


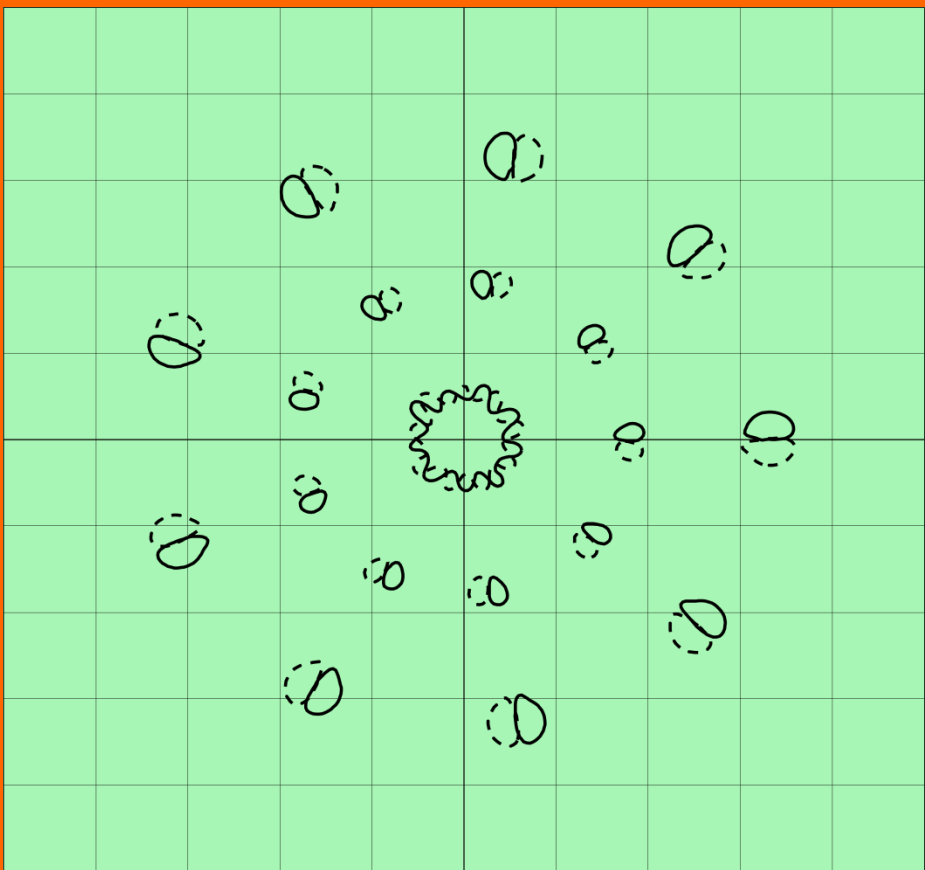


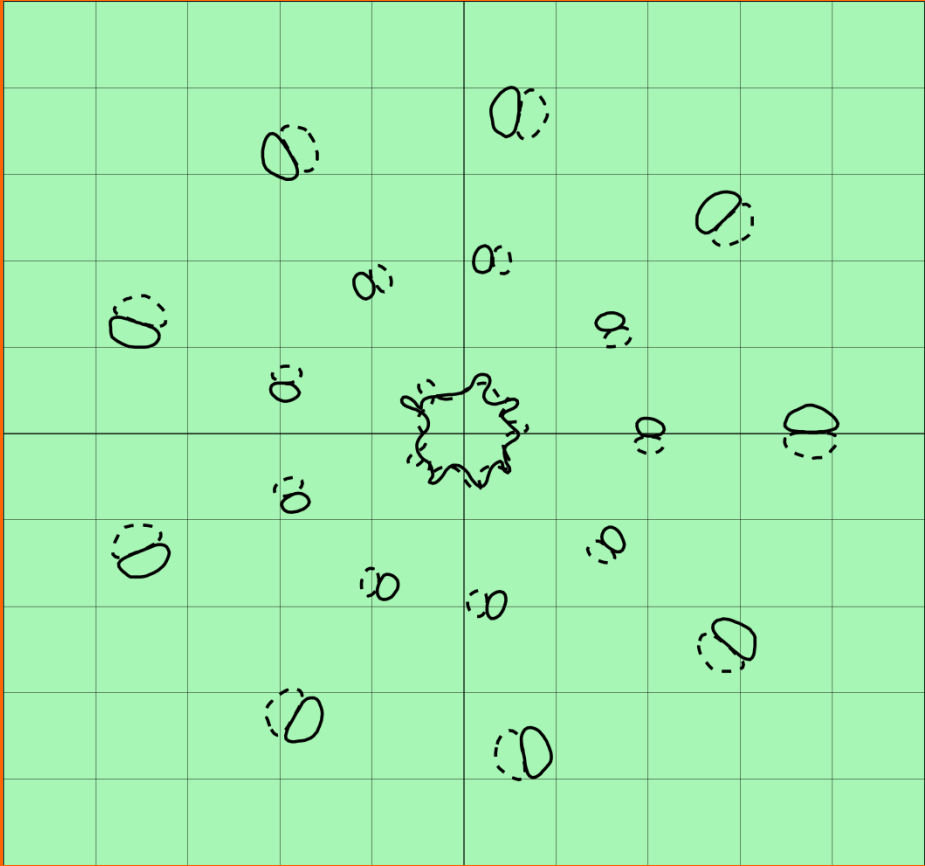


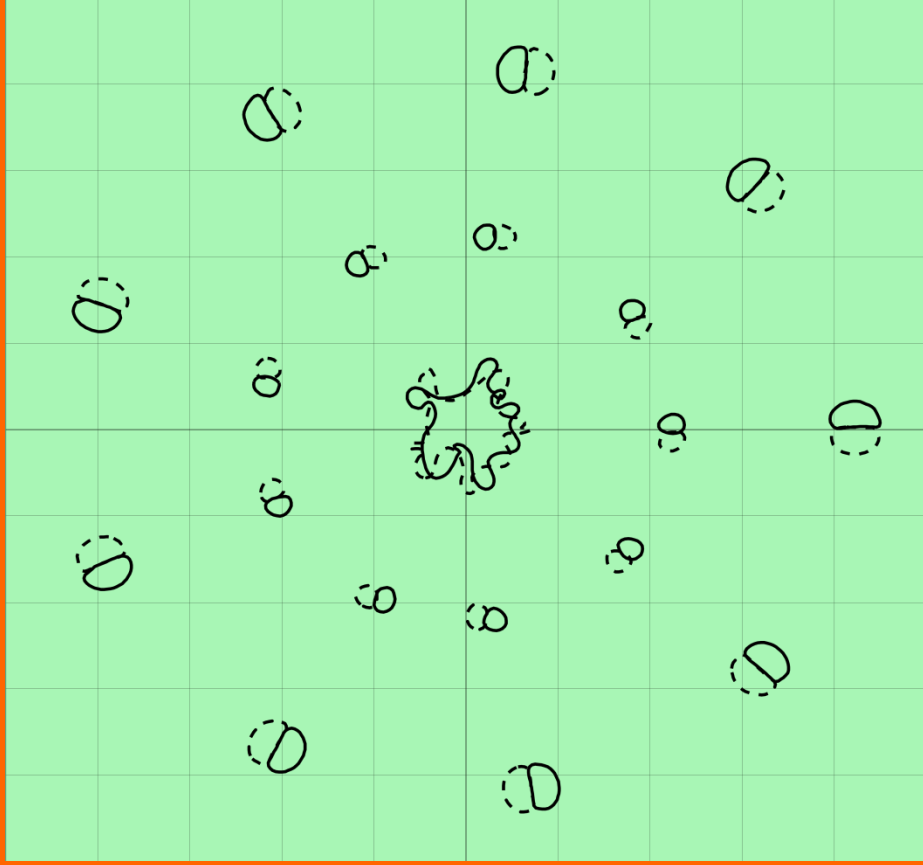


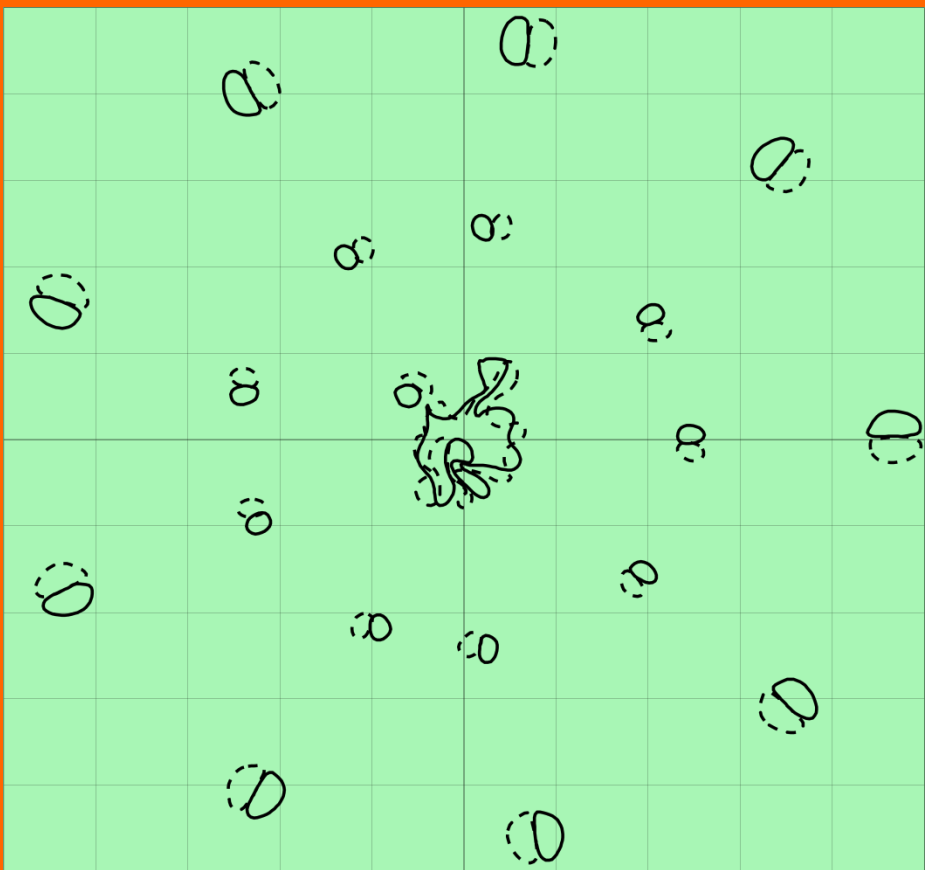




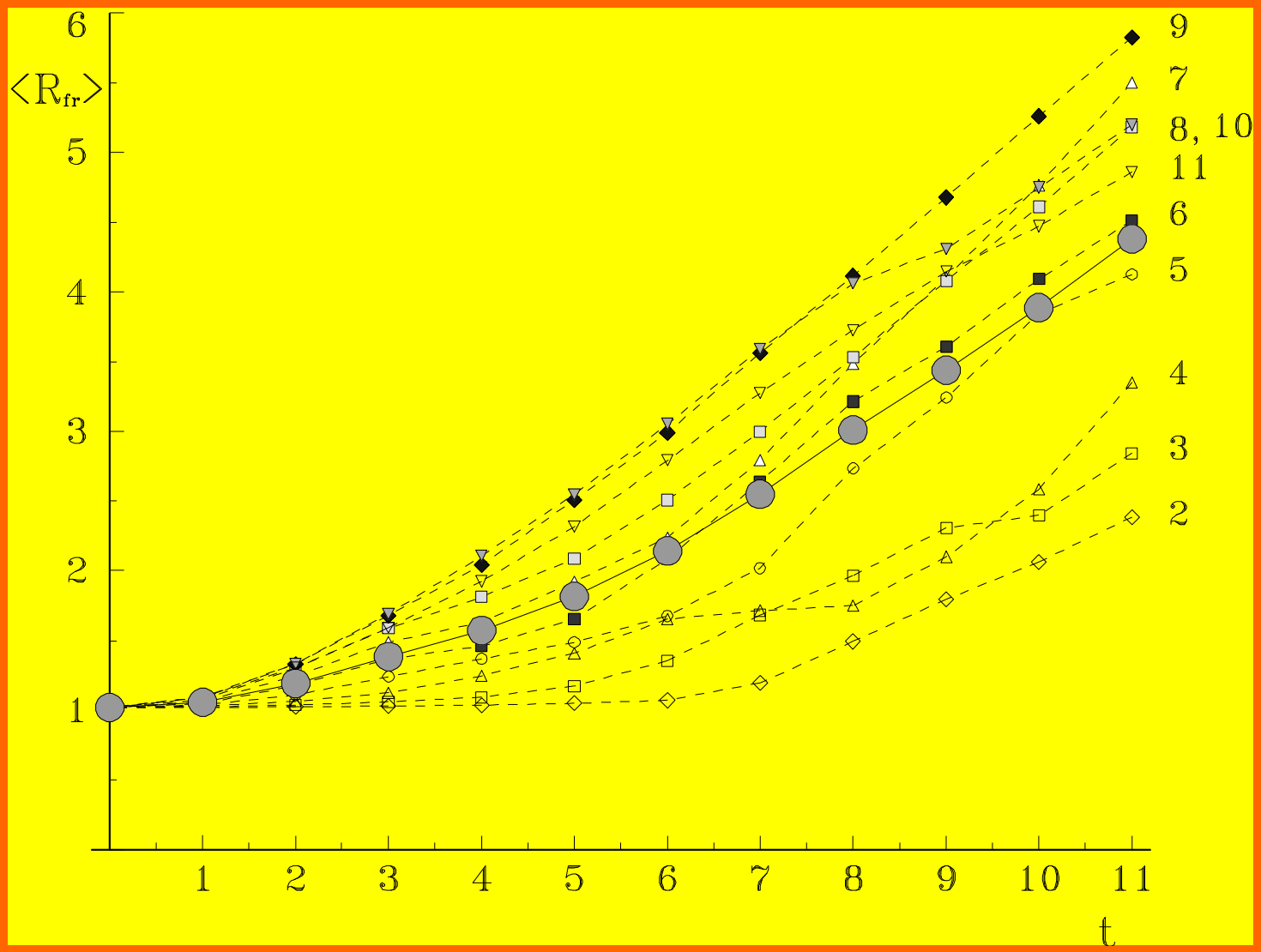




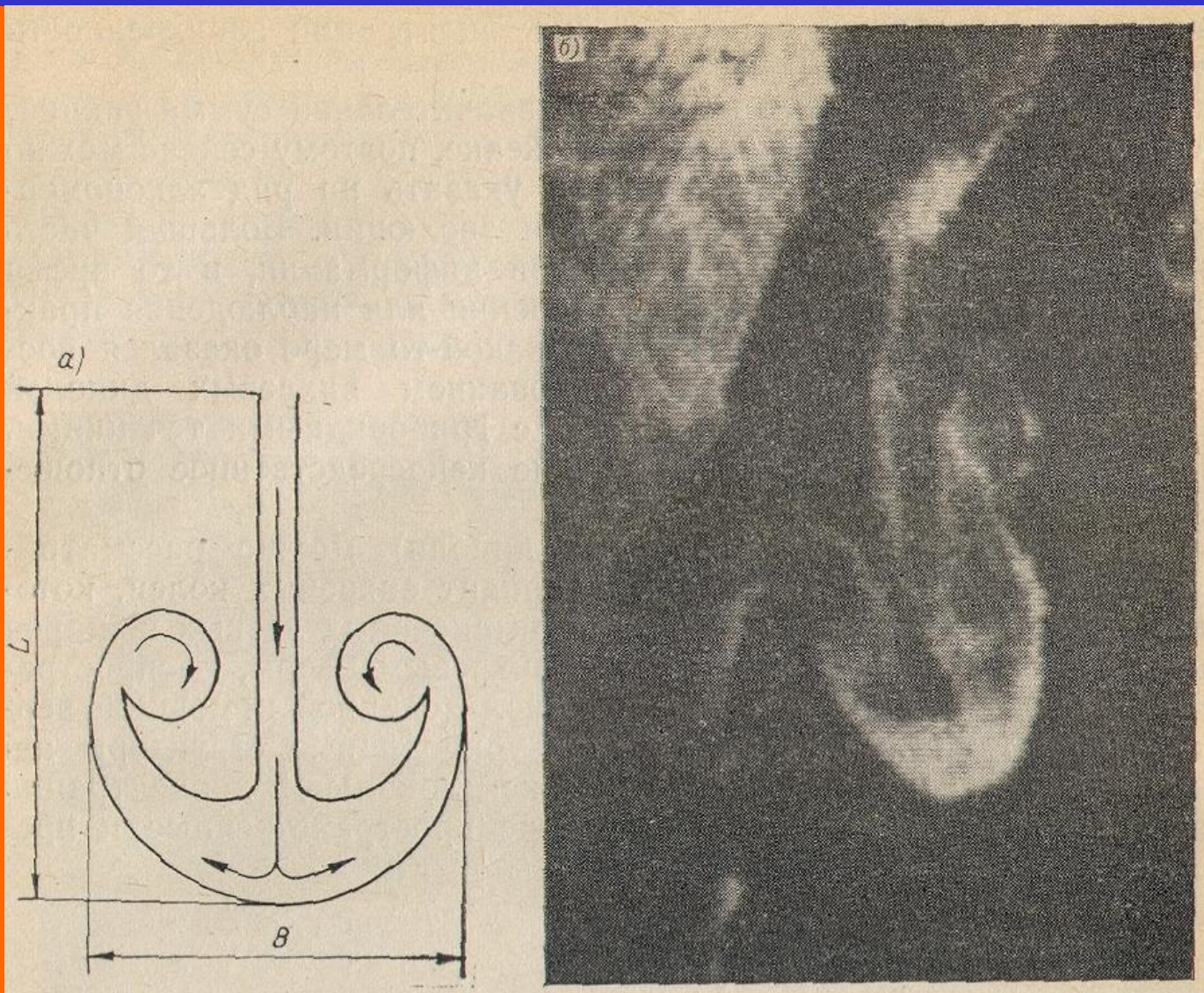




# Закон распространения фронта теплового пятна



*К.Н. Федоров, А.И. Гинзбург. Приповерхностный  
слой океана. Л., Гидрометеоиздат, 1988*

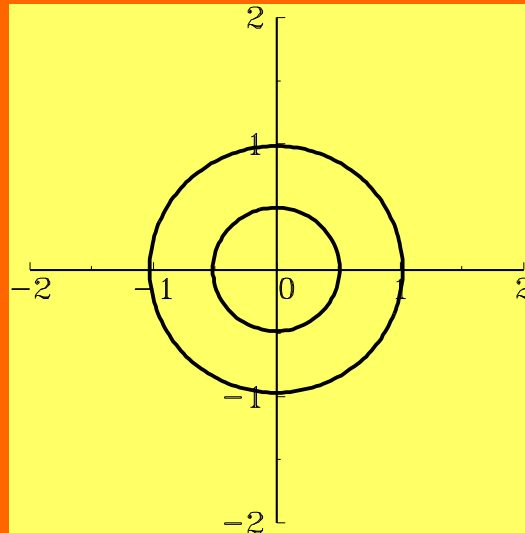
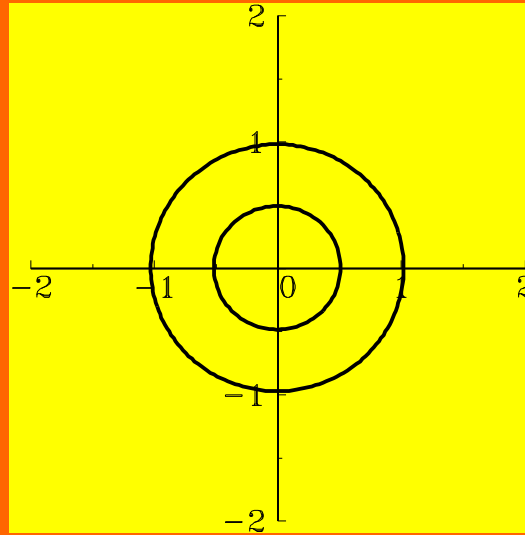


*Mied R.P. et al. The generation and evolution of mushroom-like vortices // J. Phys. Oceanogr. 1991, v. 21, p. 489-510.*

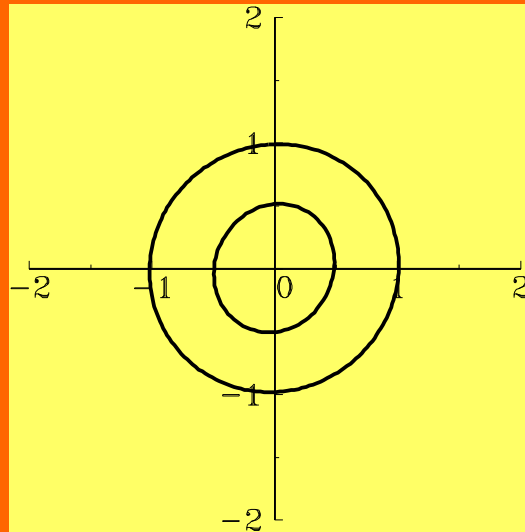
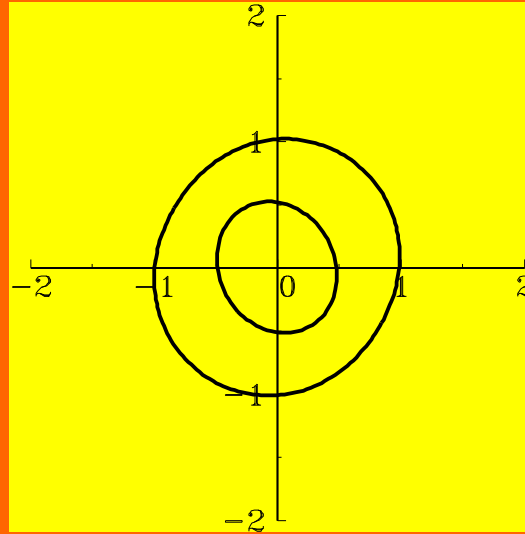




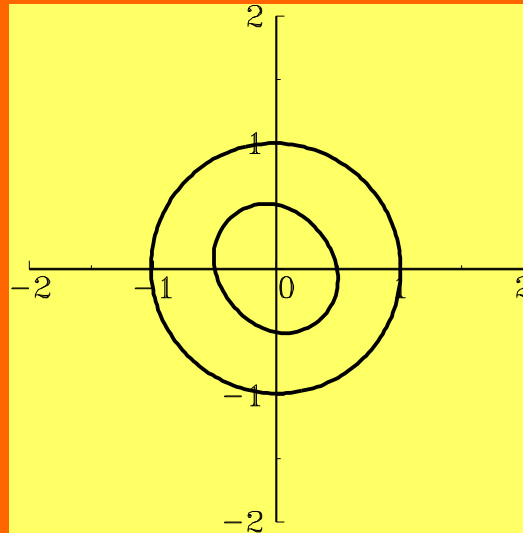
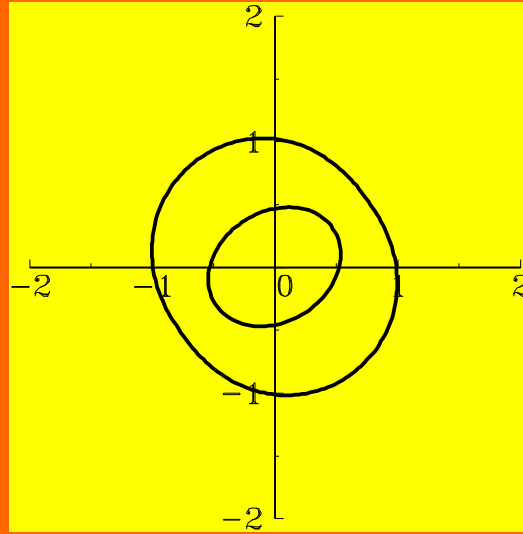
# *Процесс трансформации кольцевого вихря в две грибовидные структуры ( $t=0$ )*



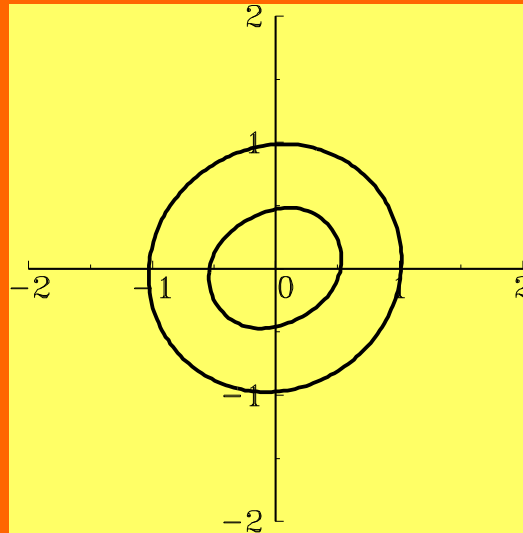
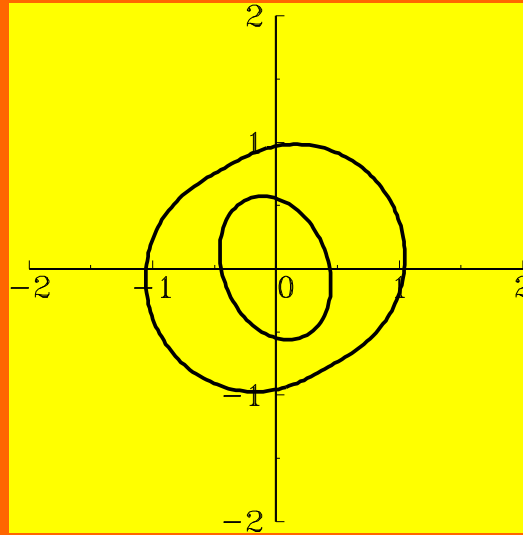
# *Процесс трансформации кольцевого вихря в две грибовидные структуры ( $t=2$ )*



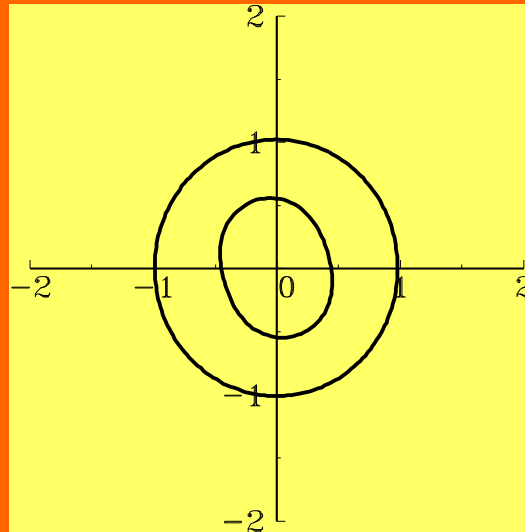
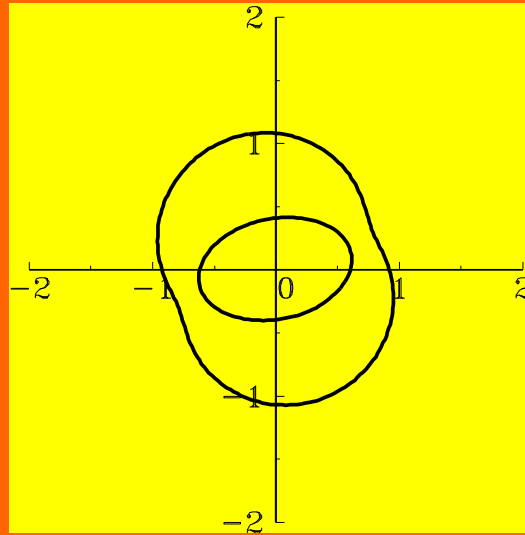
# *Процесс трансформации кольцевого вихря в две грибовидные структуры ( $t=4$ )*



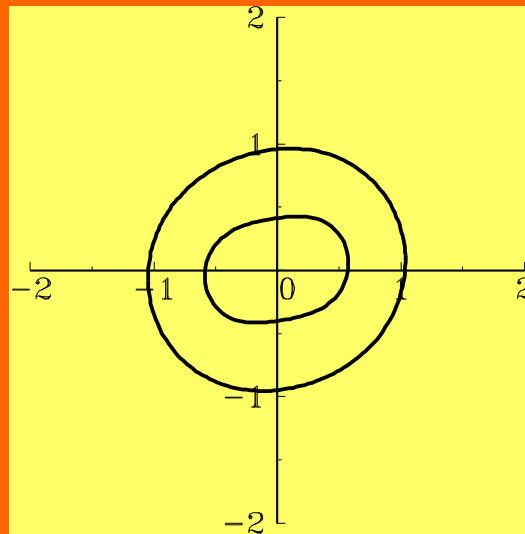
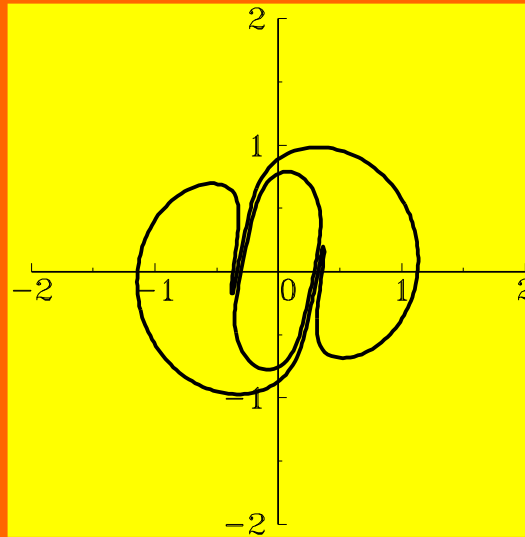
# *Процесс трансформации кольцевого вихря в две грибовидные структуры ( $t=6$ )*



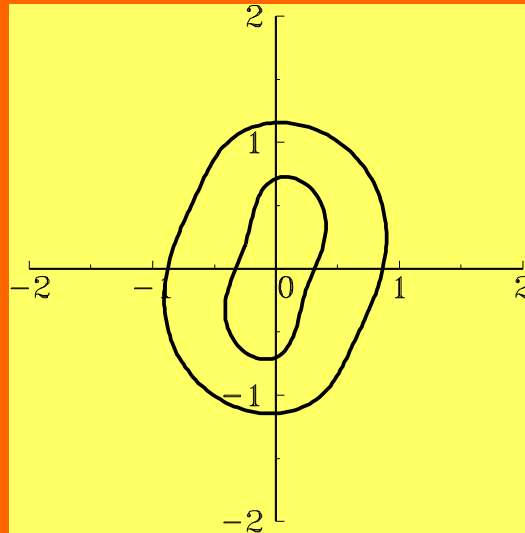
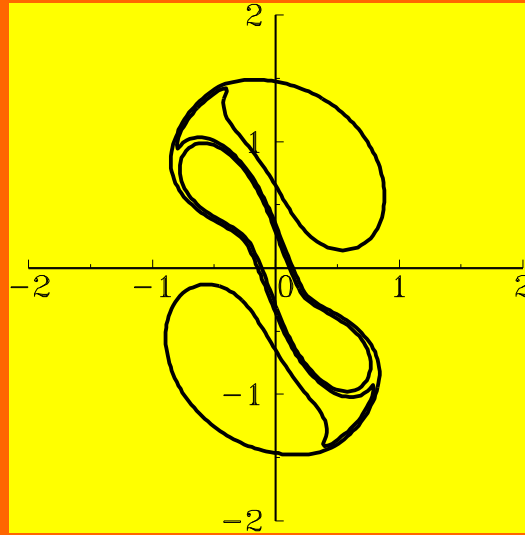
# *Процесс трансформации кольцевого вихря в две грибовидные структуры ( $t=8$ )*



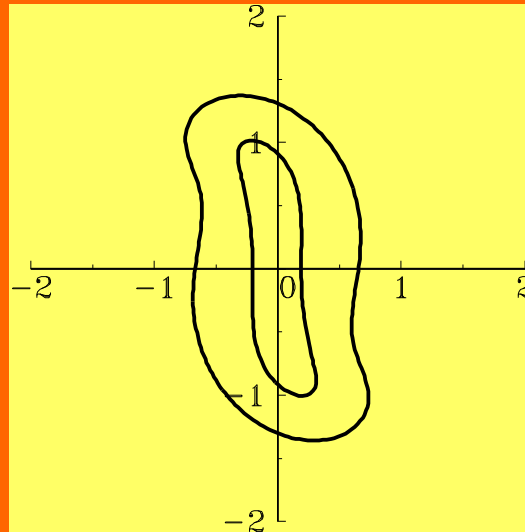
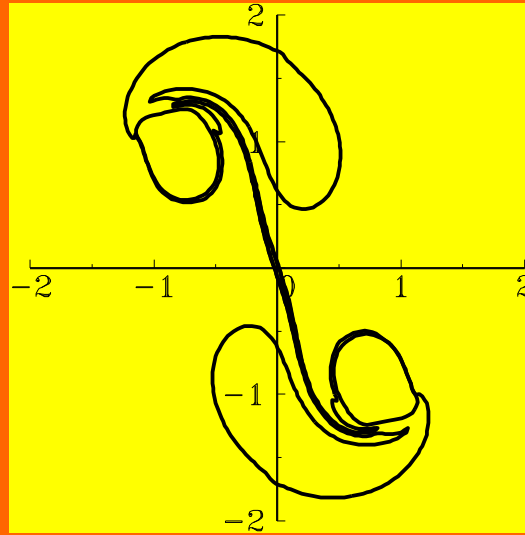
# *Процесс трансформации кольцевого вихря в две грибовидные структуры ( $t=10$ )*



# *Процесс трансформации кольцевого вихря в две грибовидные структуры ( $t=12$ )*

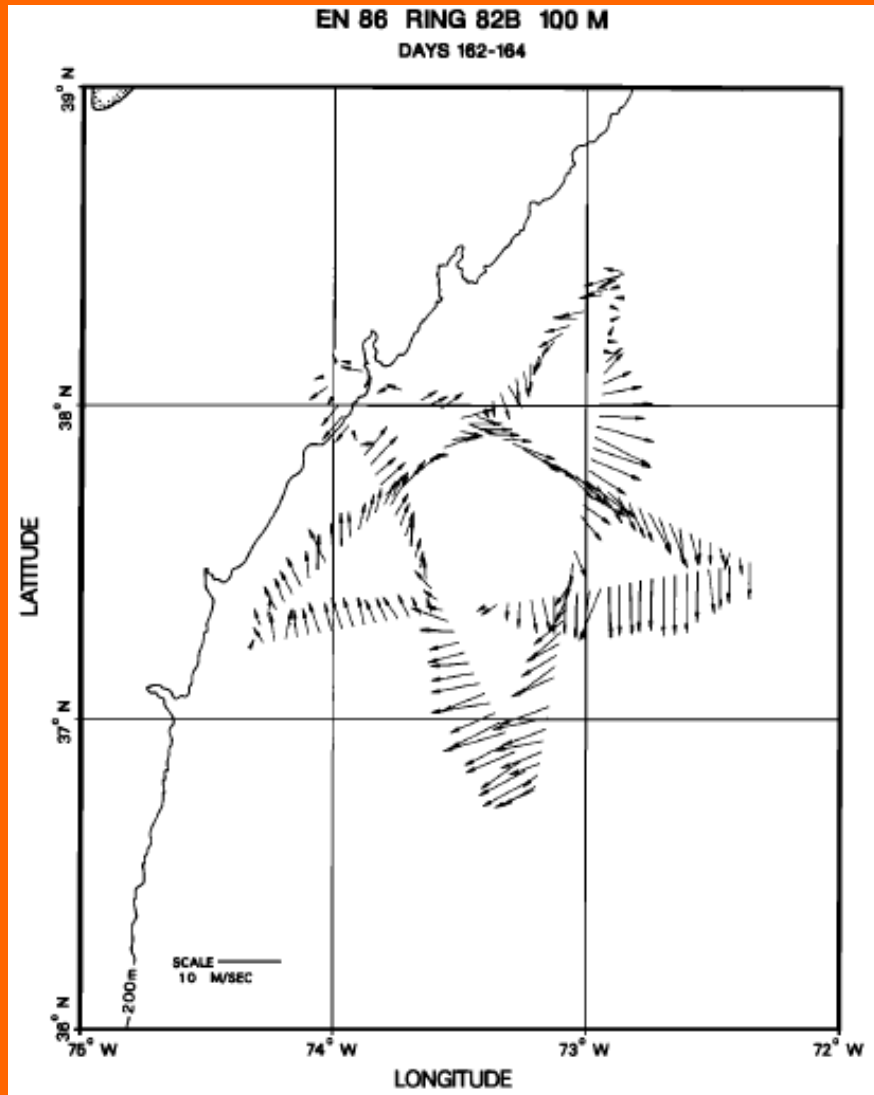


# *Процесс трансформации кольцевого вихря в две грибовидные структуры ( $t=14$ )*

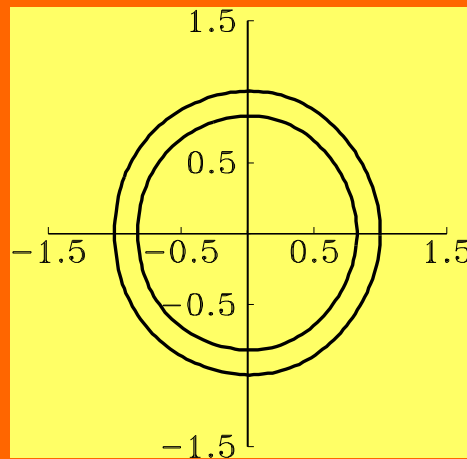
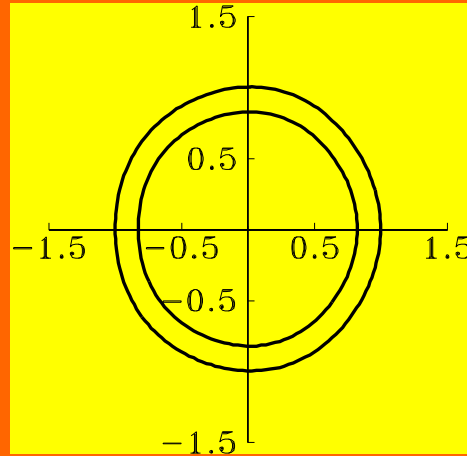




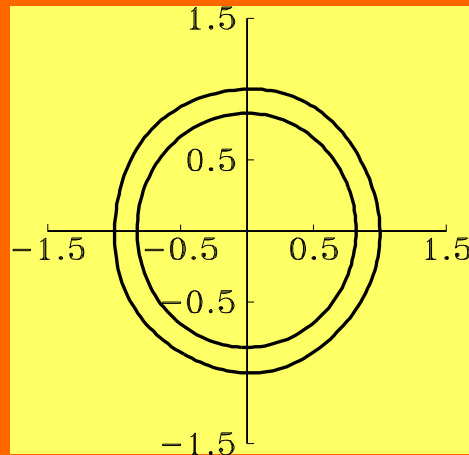
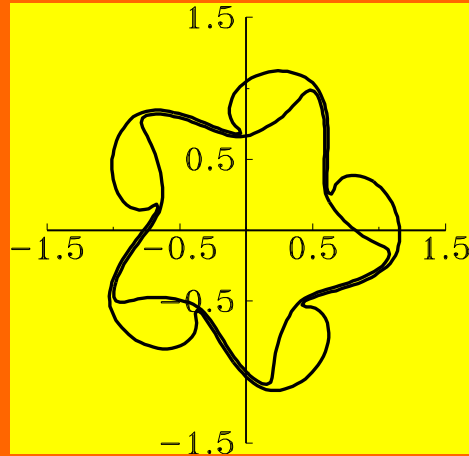
*Kennelly M.A., Evans R.H., Joyce T. M. Small-scale cyclones on the periphery of Gulf Stream warm-core rings // J. Geophys. Res. 1985, v. 90, No C5, p. 8845-8857.*



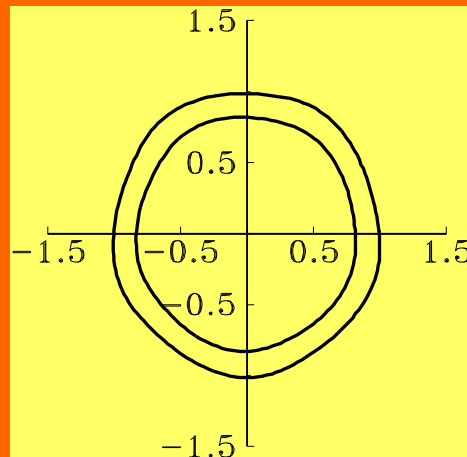
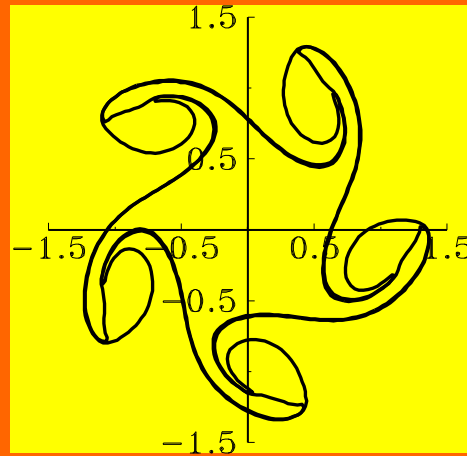
# *Модель формирования циклонических ринглетов на периферии антициклонического ринга ( $t=0$ )*



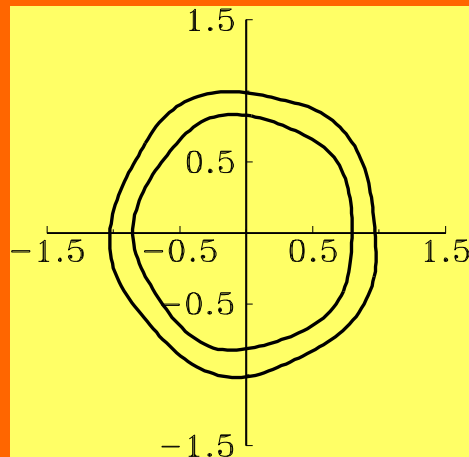
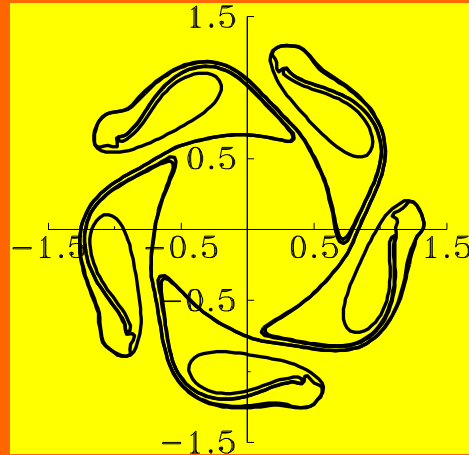
# Формирование циклонических ринглетов на периферии антициклонического ринга ( $t=3$ )



# Формирование циклонических ринглетов на периферии антициклонического ринга ( $t=4$ )



# Формирование циклонических ринглетов на периферии антициклонического ринга ( $t=5$ )



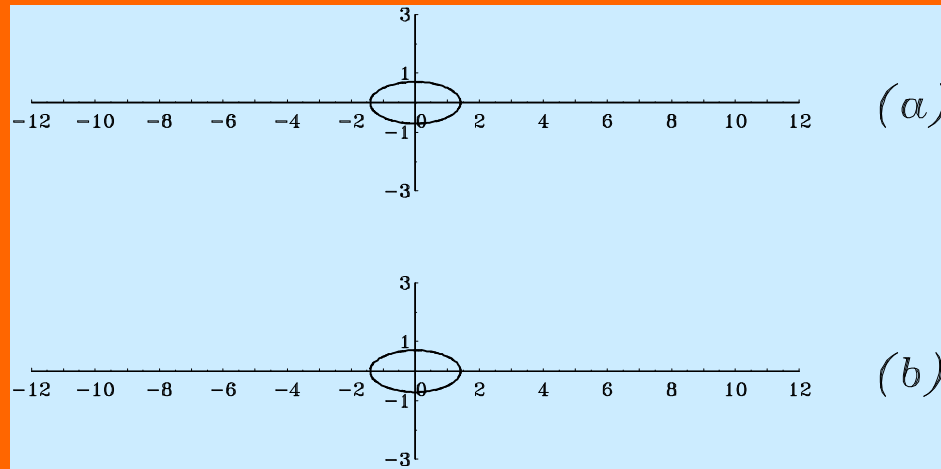
# *Синхронные конфигурации устойчивого и неустойчивого эллиптических хетонов*

$$\chi = 2$$

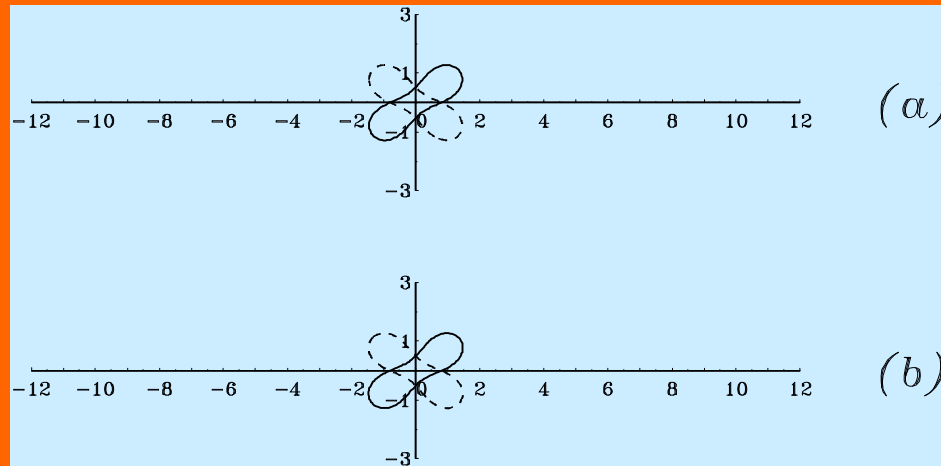
$$(a) \quad \gamma = 1.56$$

$$(b) \quad \gamma = 1.57$$

$t=0$

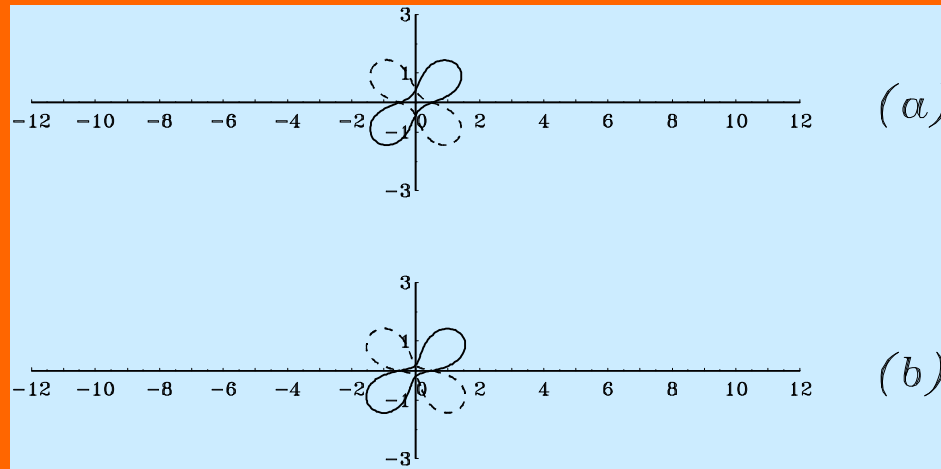


**t=10**

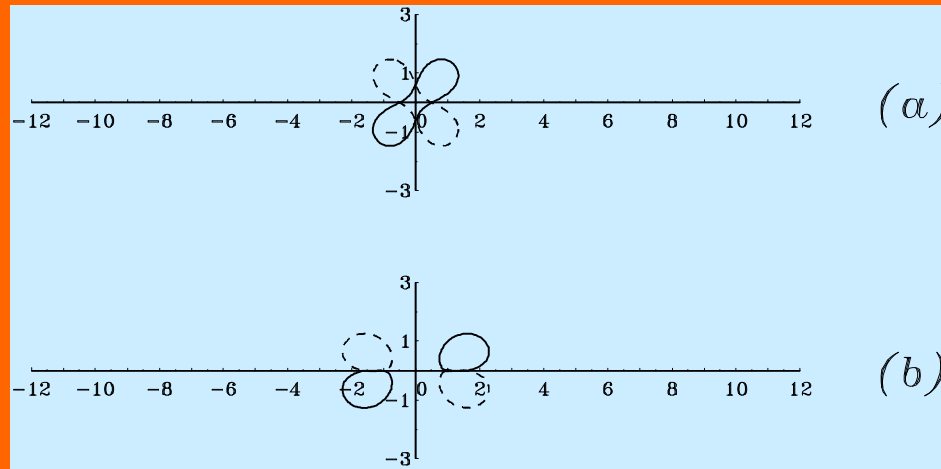




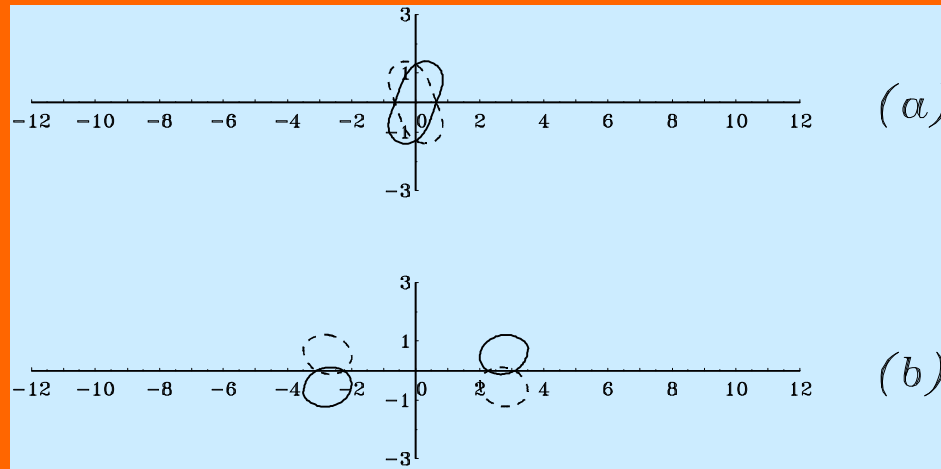
**t=20**



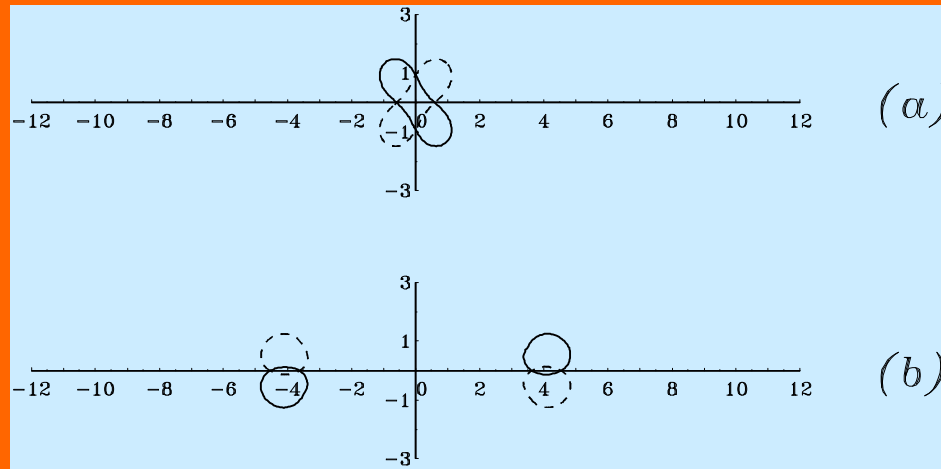
**t=30**



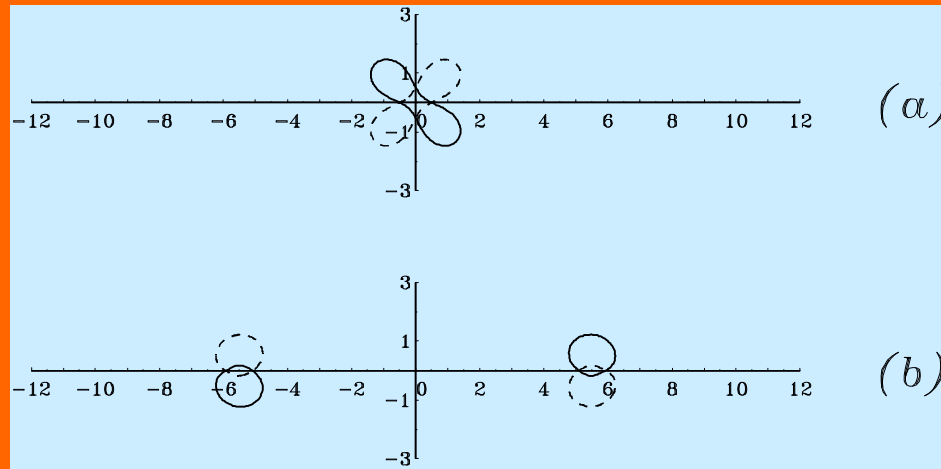
**t=40**



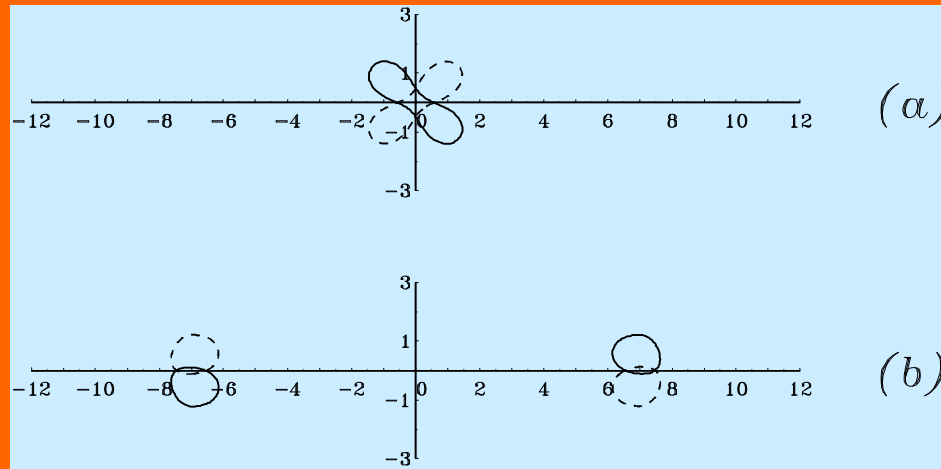
**t=50**



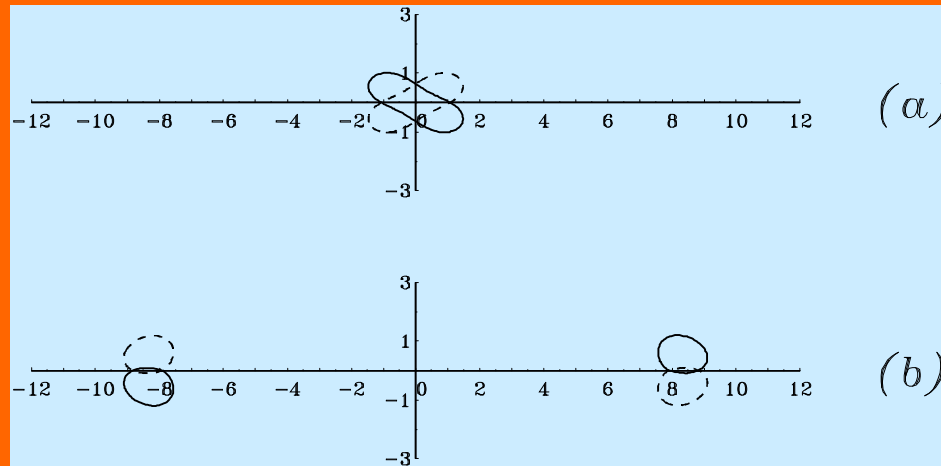
**t=60**



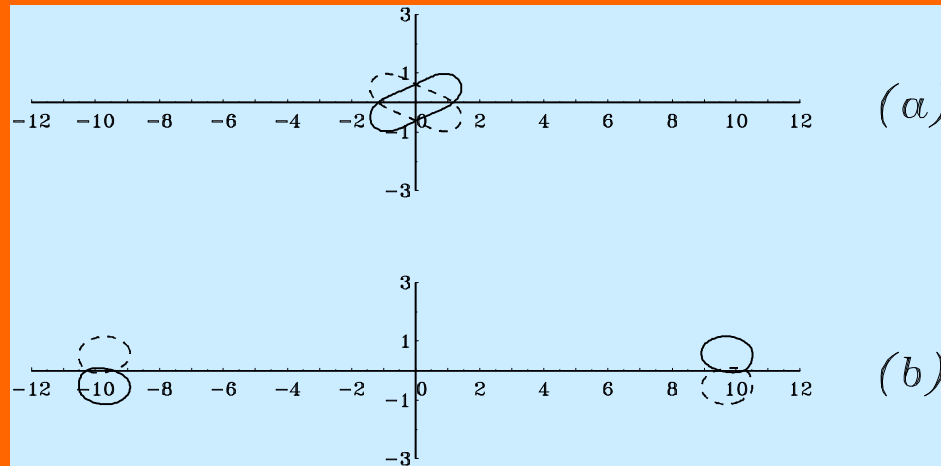
**t=70**



$t=80$

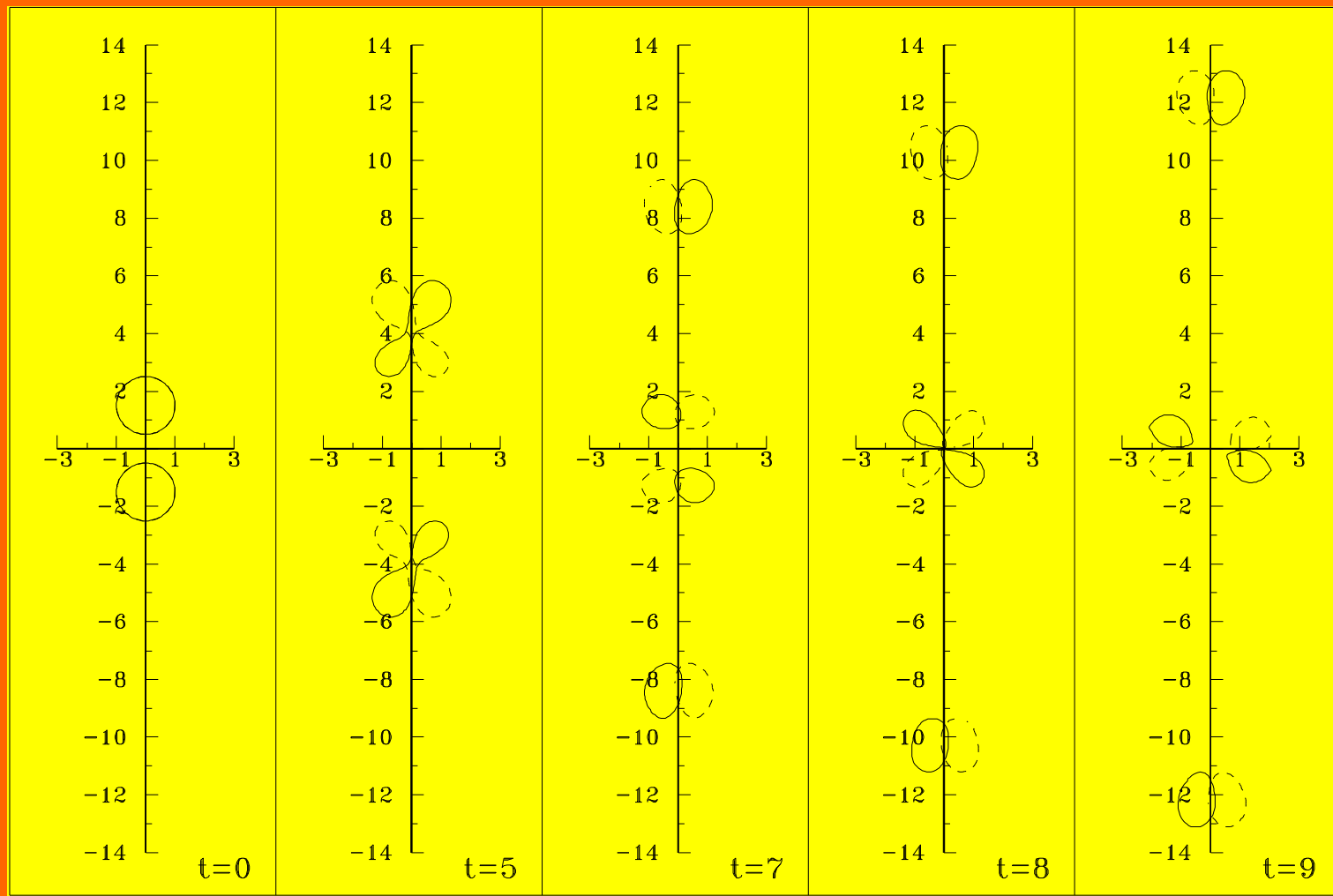


$t=90$

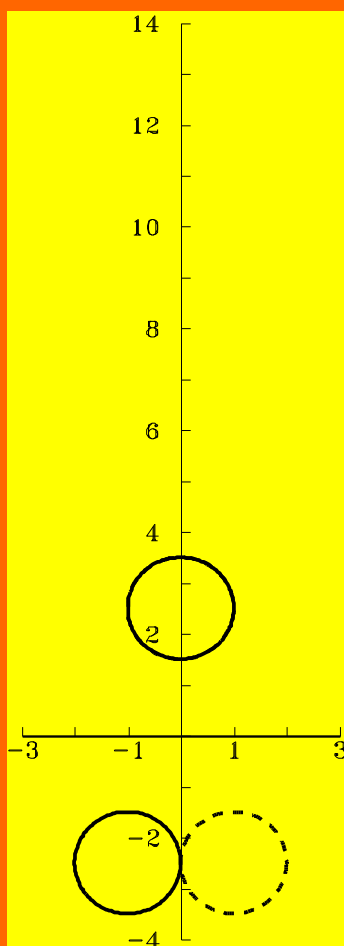




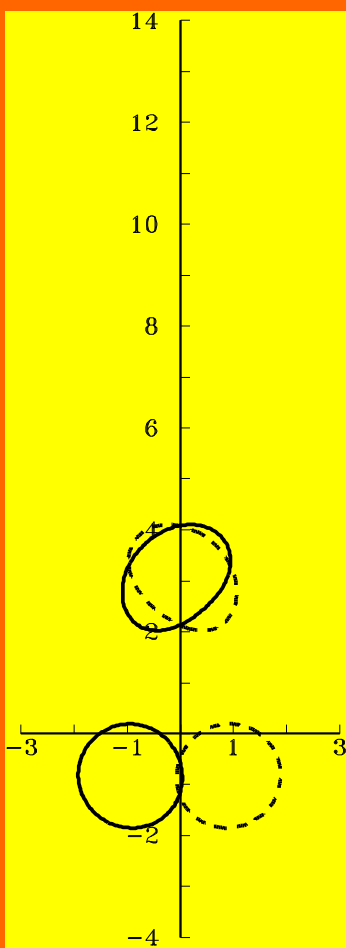
# Пример взаимодействия двух хетонов с вертикальными осями (неустойчивый тип)



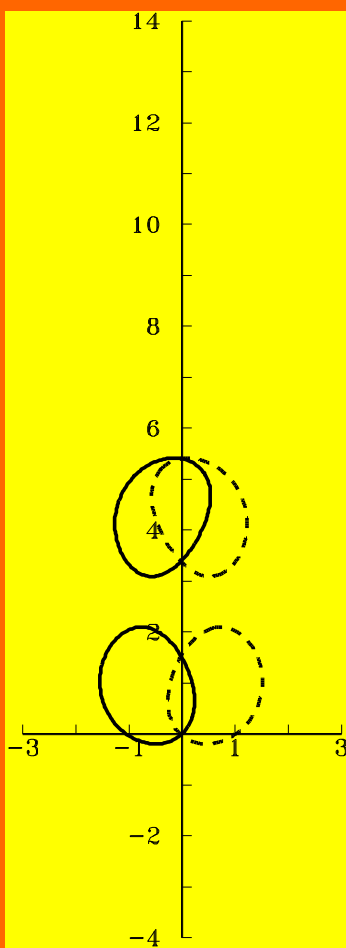
*Взаимодействие хетона с вертикальной осью и хетона с наклонной осью - аналог бильярдного удара «клапшотос» ( $t=0$ )*



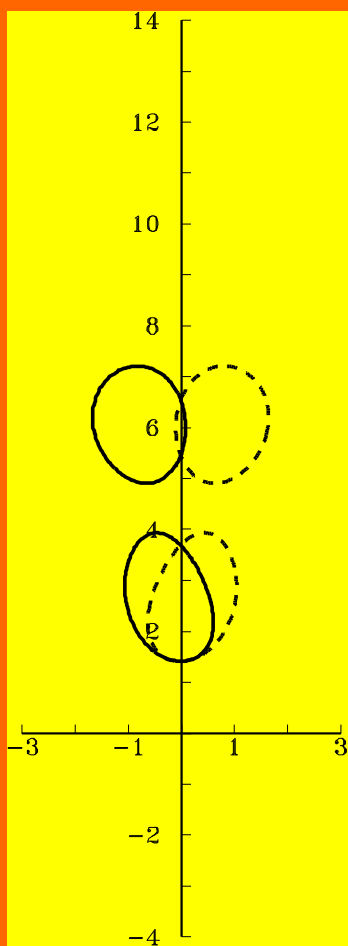
*Взаимодействие хетона с вертикальной осью и хетона с наклонной осью - аналог бильярдного удара «клапшотос» ( $t=2$ )*



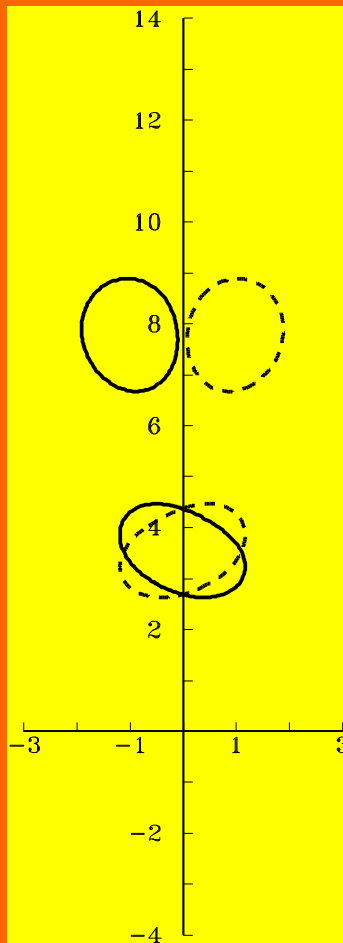
*Взаимодействие хетона с вертикальной осью и хетона с наклонной осью - аналог бильярдного удара «клапшотос» ( $t=4$ )*



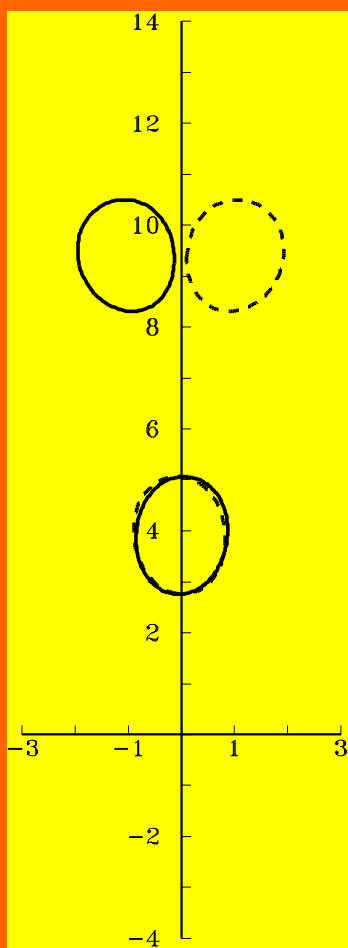
*Взаимодействие хетона с вертикальной осью и хетона с наклонной осью - аналог бильярдного удара «клашинос» ( $t=6$ )*



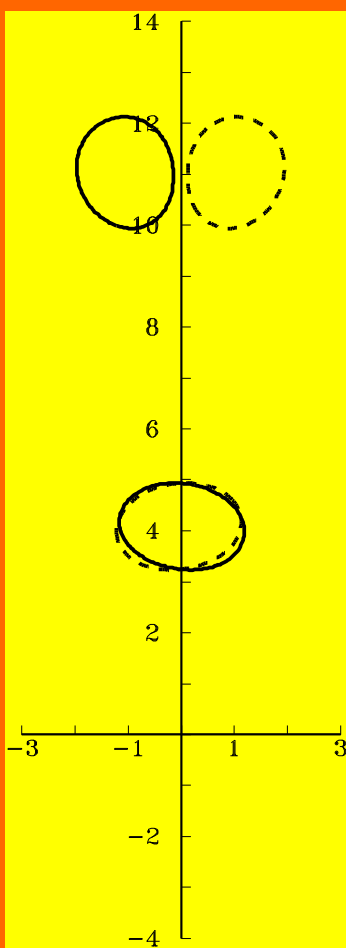
*Взаимодействие хетона с вертикальной осью и хетона с наклонной осью - аналог бильярдного удара «клапшотос» ( $t=8$ )*



*Взаимодействие хетона с вертикальной осью и хетона с наклонной осью - аналог бильярдного удара «клапшотос» ( $t=10$ )*

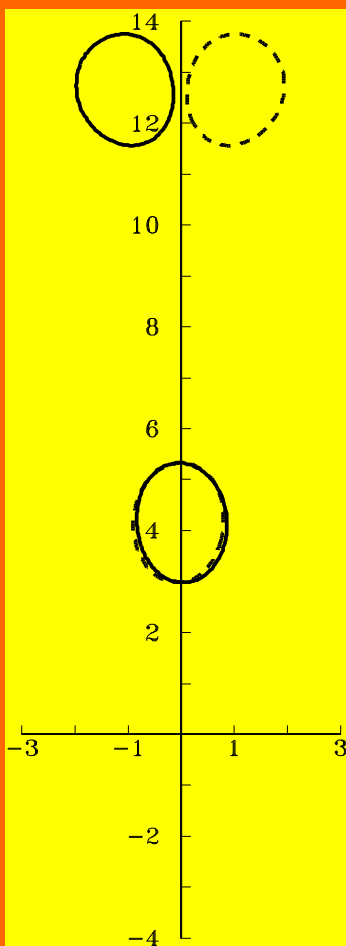


*Взаимодействие хетона с вертикальной осью и хетона с наклонной осью - аналог бильярдного удара «клапшотос» ( $t=12$ )*

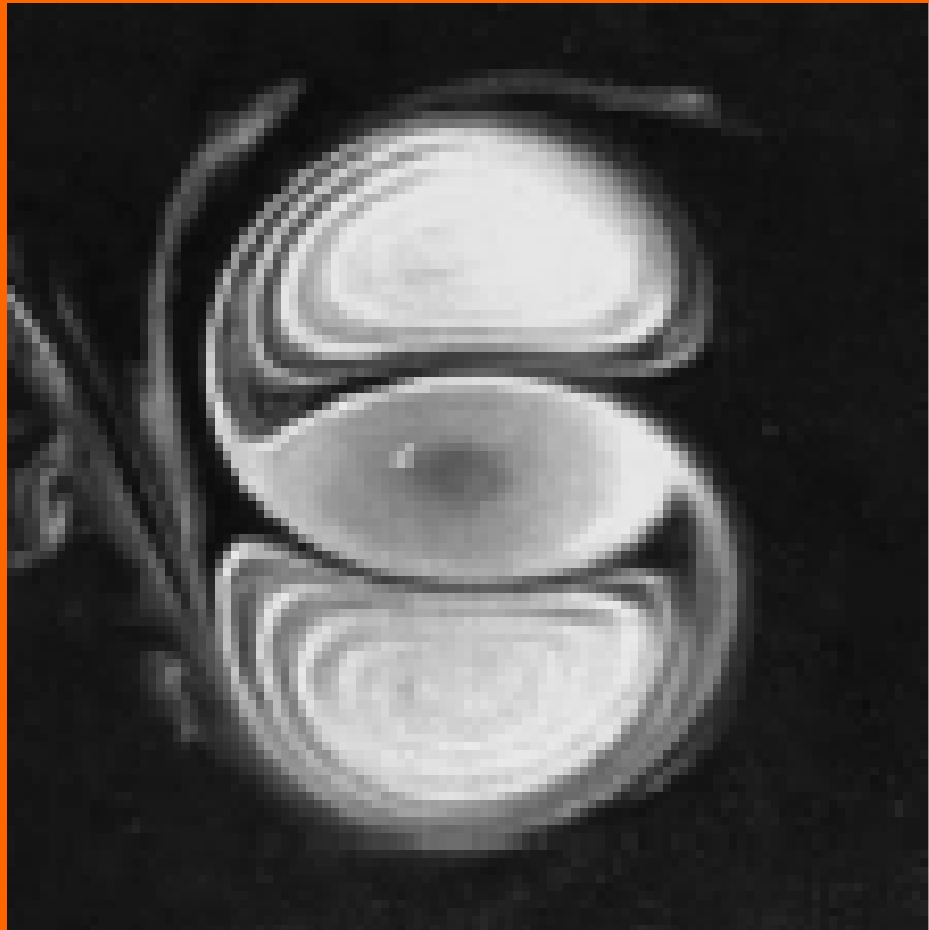




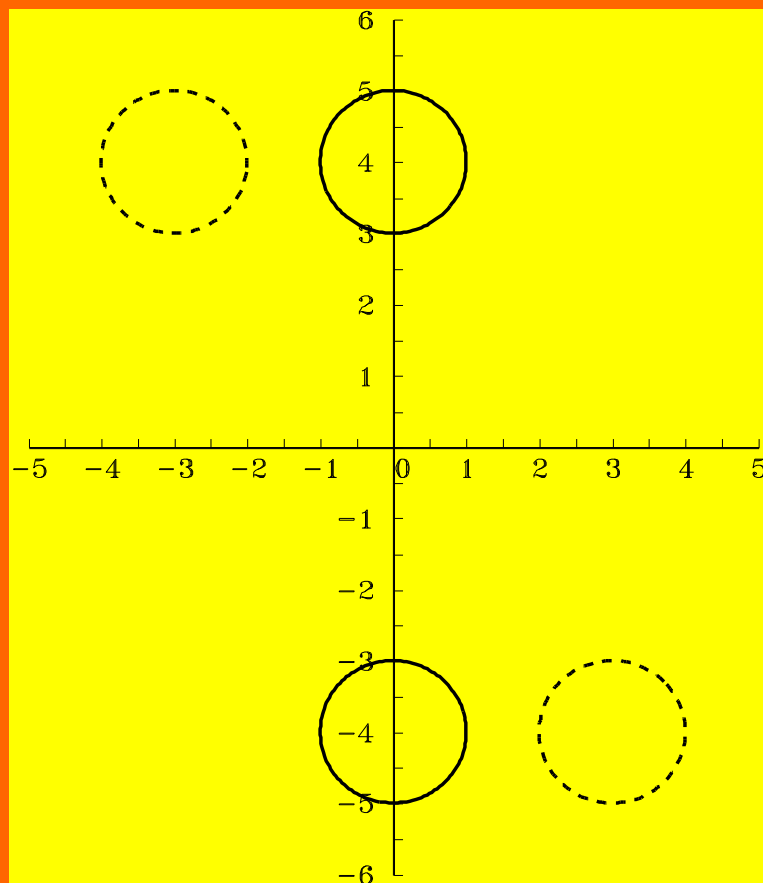
*Взаимодействие хетона с вертикальной осью и хетона с наклонной осью - аналог бильярдного удара «клапшотос» ( $t=14$ )*



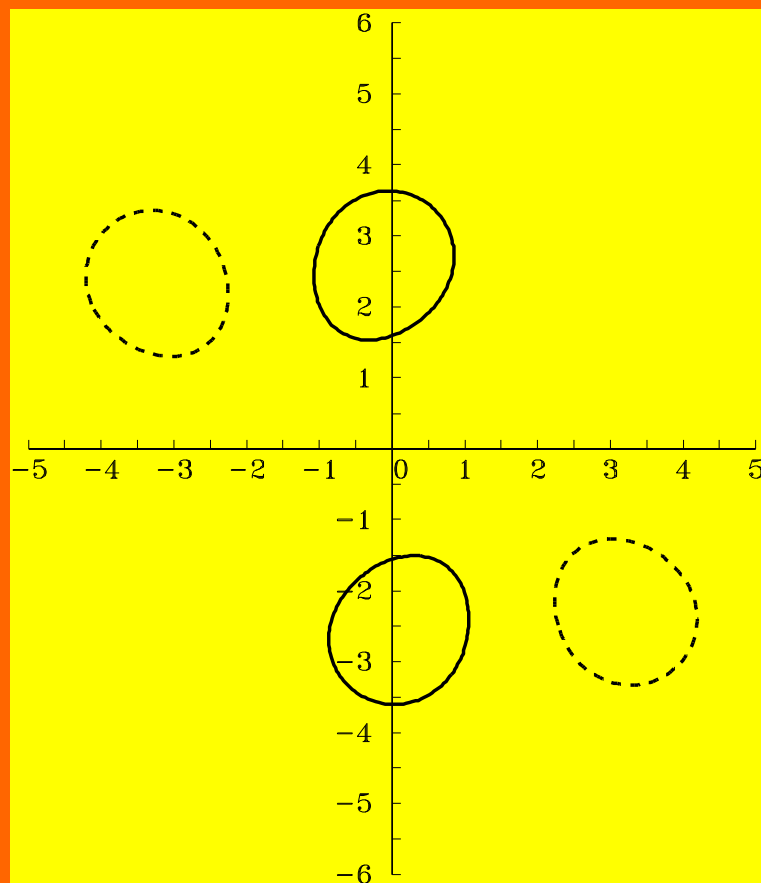
*Z. Kizner, R. Khvoles. The tripole vortex:  
Experimental evidence and explicit solutions //  
Phys. Ref. E 70, 2004*



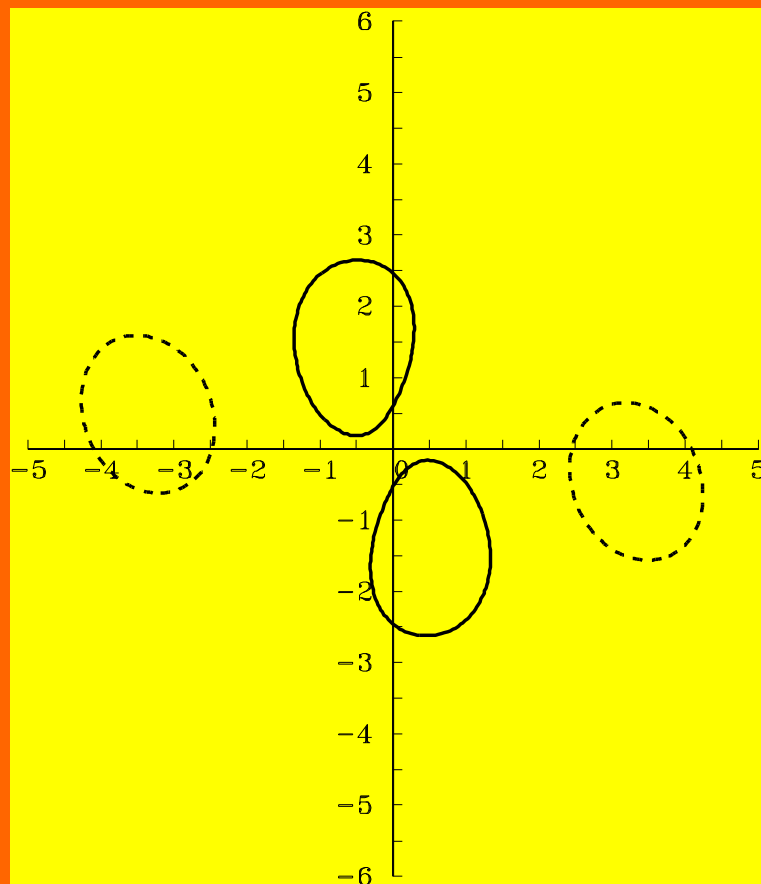
# *Формирование двухслойной триполярной структуры при косом взаимодействии двух хетонов ( $t=0$ )*



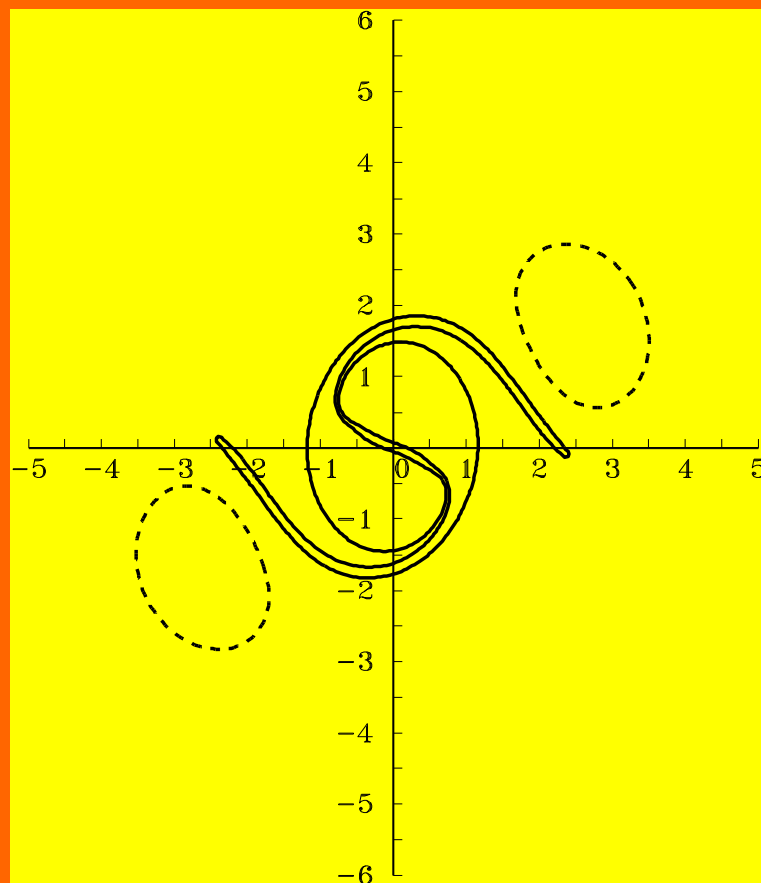
# *Формирование двухслойной триполярной структуры при косом взаимодействии двух хетонов ( $t=2$ )*



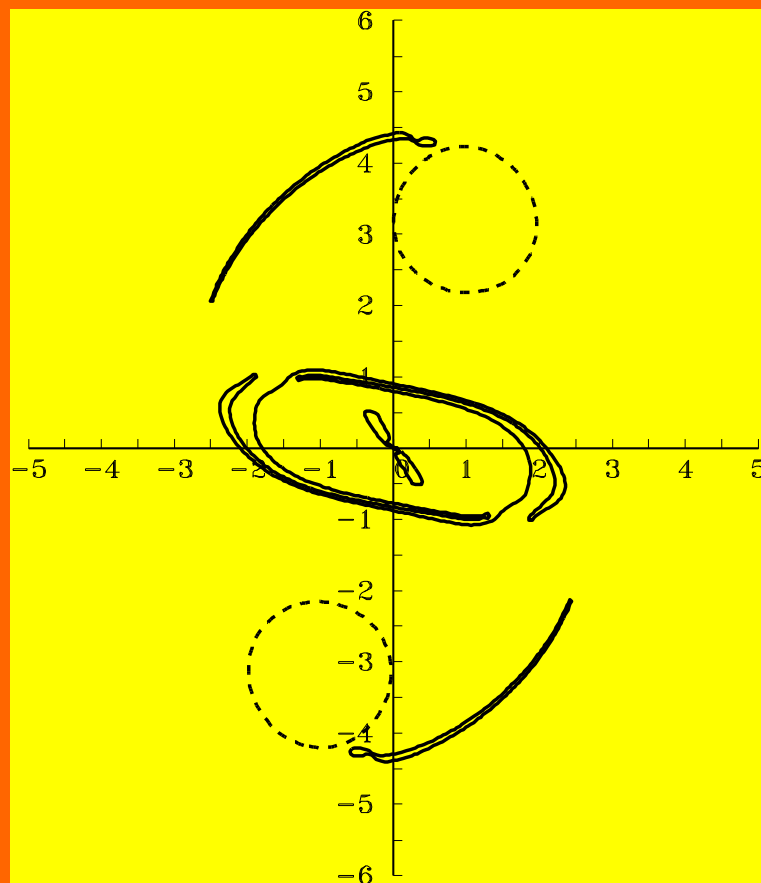
*Формирование двухслойной триполярной структуры при косом взаимодействии двух хетонов ( $t=4$ )*



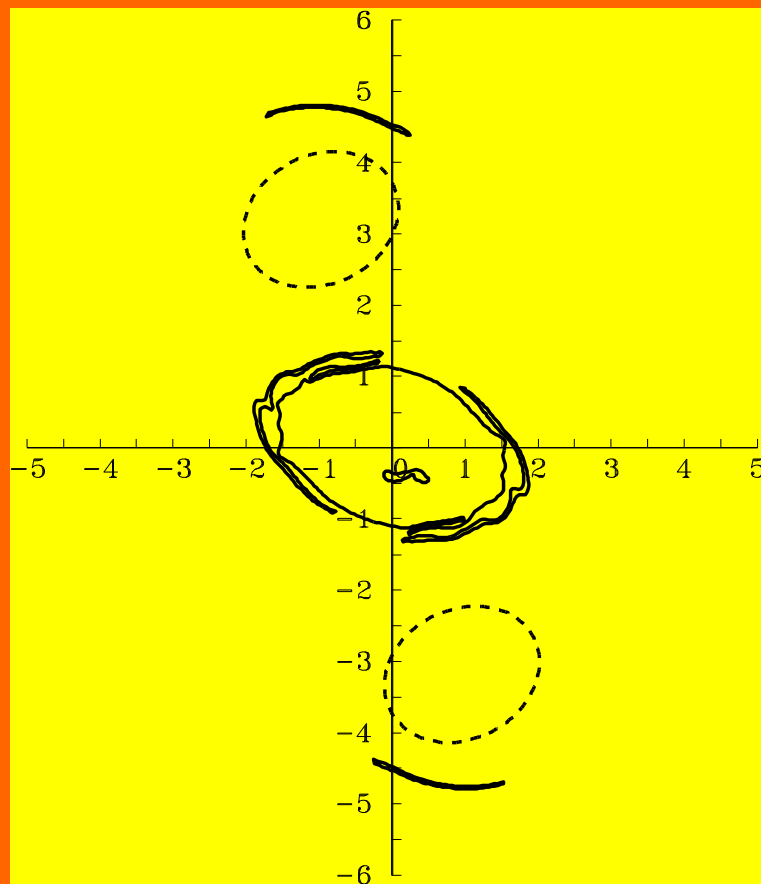
*Формирование двухслойной триполярной структуры при косом взаимодействии двух хетонов ( $t=6$ )*



# Формирование двухслойной триполярной структуры при косом взаимодействии двух хетонов ( $t=8$ )

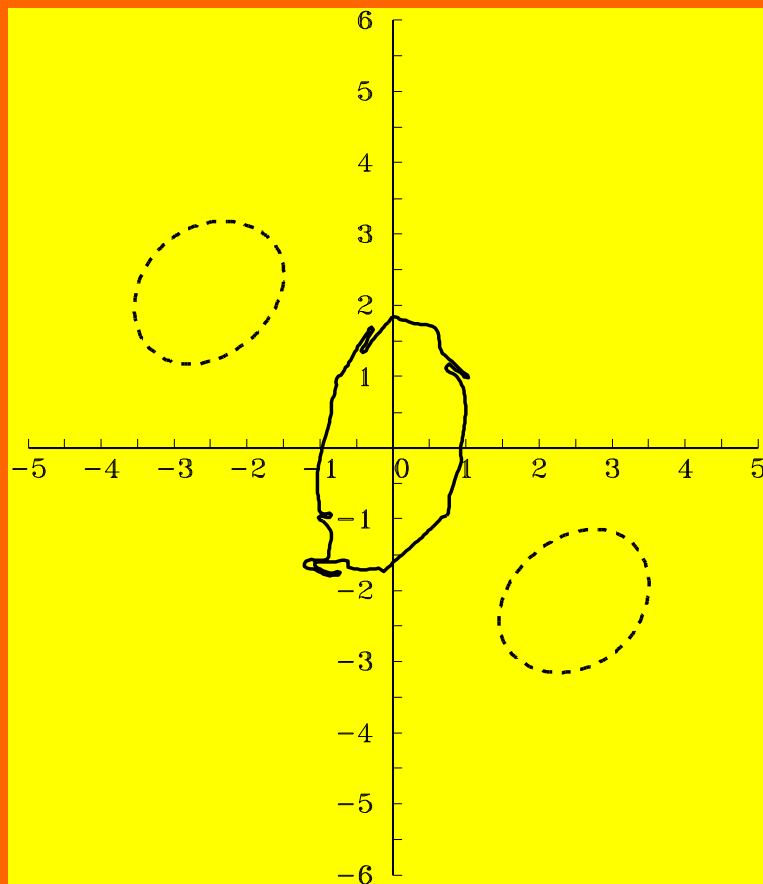


# *Формирование двухслойной триполярной структуры при косом взаимодействии двух хетонов ( $t=10$ )*

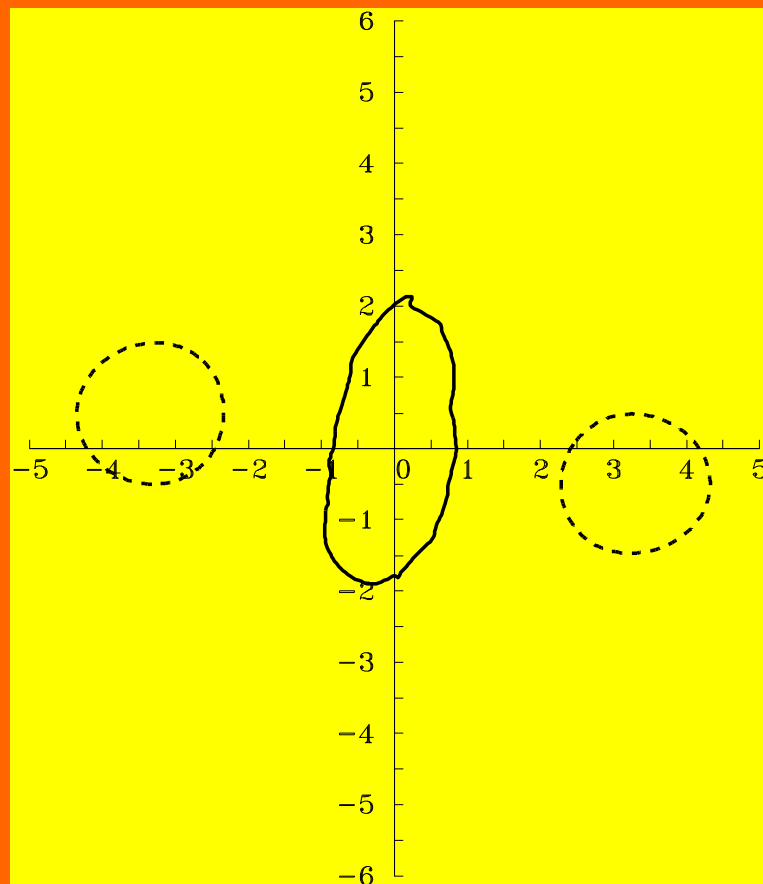




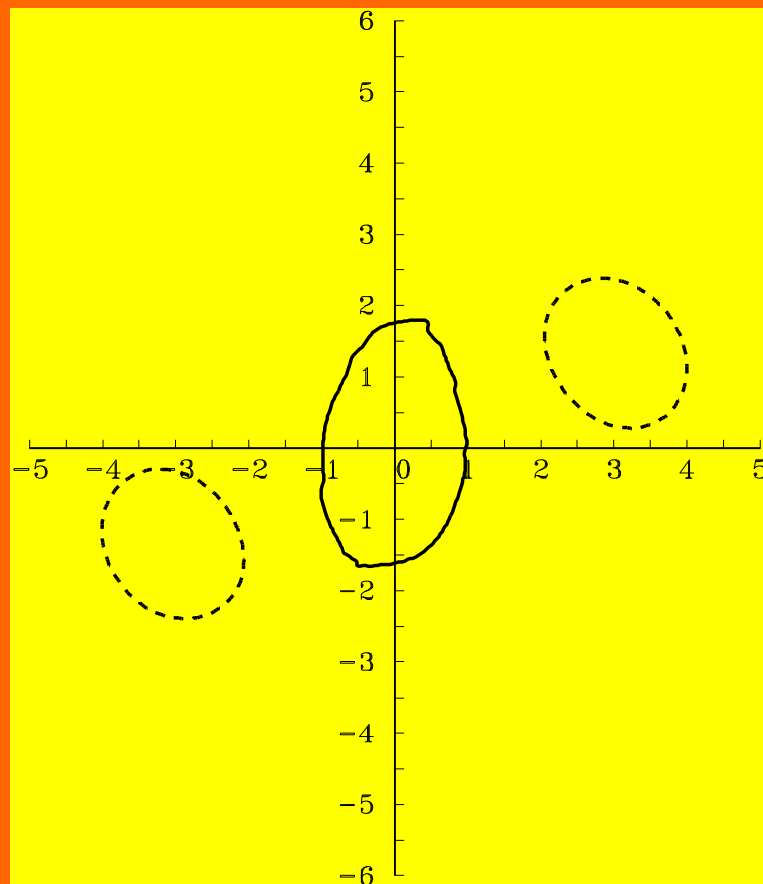
*Формирование двухслойной триполярной структуры при косом взаимодействии двух хетонов ( $t=12$ )*



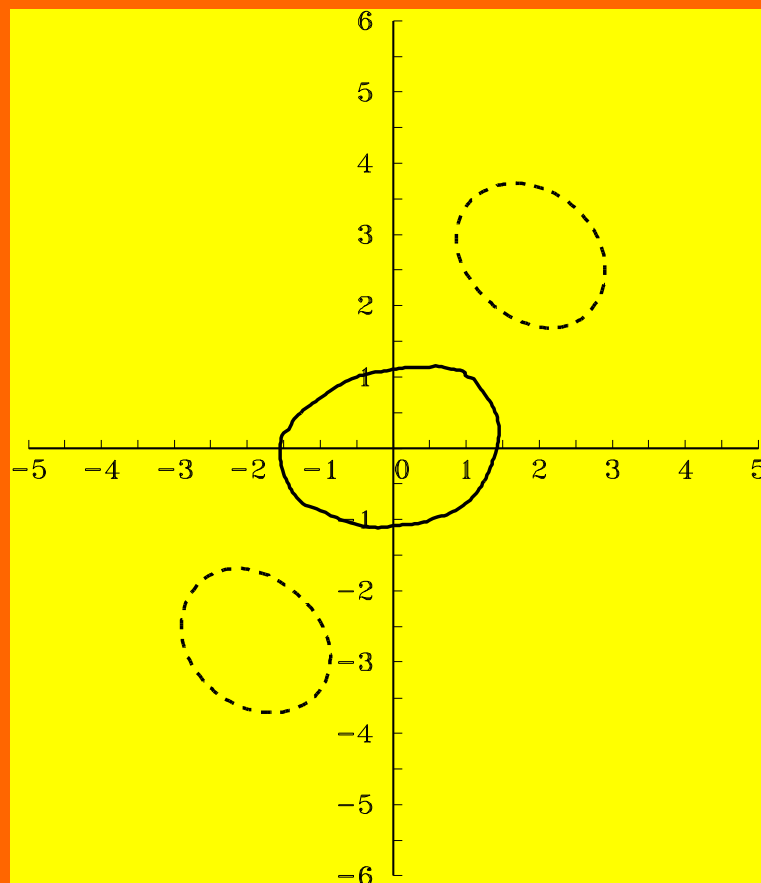
*Формирование двухслойной триполярной структуры при косом взаимодействии двух хетонов ( $t=14$ )*



*Формирование двухслойной триполярной структуры при косом взаимодействии двух хетонов ( $t=16$ )*



*Формирование двухслойной триполярной структуры при косом взаимодействии двух хетонов ( $t=18$ )*



**Спасибо за внимание!**

