



Il Polinomio di Kauffman: un invariante di isotopia regolare

Tesi di Laurea Triennale

Antonio De Lucreziis

Dipartimento di Matematica
Università di Pisa

18 Luglio 2025



Indice

Teoria dei Nodi

Polinomio di Kauffman

Laboratorio Computazionale



Nodi e Diagrammi

Nodo. $K \subset \mathbb{R}^3$ è un **nodo (tame)** se $\exists f : S^1 \hookrightarrow \mathbb{R}^3$ *embedding loc. piatto* con $K = f(S^1)$

Link. $S^1 \rightarrow \mathbb{R}^3 \rightsquigarrow S^1 \sqcup \dots \sqcup S^1 \rightarrow \mathbb{R}^3$



Nodi e Diagrammi

Nodo. $K \subset \mathbb{R}^3$ è un **nodo (tame)** se $\exists f : \mathbb{S}^1 \hookrightarrow \mathbb{R}^3$ *embedding loc. piatto* con $K = f(\mathbb{S}^1)$

Link. $\mathbb{S}^1 \rightarrow \mathbb{R}^3 \rightsquigarrow \mathbb{S}^1 \sqcup \dots \sqcup \mathbb{S}^1 \rightarrow \mathbb{R}^3$

Def. K_0, K_1 sono equivalenti se $\exists H : \mathbb{R}^3 \times [0, 1] \rightarrow \mathbb{R}^3$ **isotopia ambiente**, ovvero tale che:

- $\forall t \in [0, 1], H(\cdot, t)$ è un omeomorfismo

e posta $H_t(x) := H(x, t)$ si ha:

- $H_0 = \text{id}_{\mathbb{R}^3}$
- $H_1(K_0) = K_1$



Nodi e Diagrammi

Nodo. $K \subset \mathbb{R}^3$ è un **nodo (tame)** se $\exists f : \mathbb{S}^1 \hookrightarrow \mathbb{R}^3$ *embedding loc. piatto* con $K = f(\mathbb{S}^1)$

Link. $\mathbb{S}^1 \rightarrow \mathbb{R}^3 \rightsquigarrow \mathbb{S}^1 \sqcup \dots \sqcup \mathbb{S}^1 \rightarrow \mathbb{R}^3$

Def. K_0, K_1 sono equivalenti se $\exists H : \mathbb{R}^3 \times [0, 1] \rightarrow \mathbb{R}^3$ **isotopia ambiente**, ovvero tale che:

- $\forall t \in [0, 1], H(\cdot, t)$ è un omeomorfismo

e posta $H_t(x) := H(x, t)$ si ha:

- $H_0 = \text{id}_{\mathbb{R}^3}$
- $H_1(K_0) = K_1$

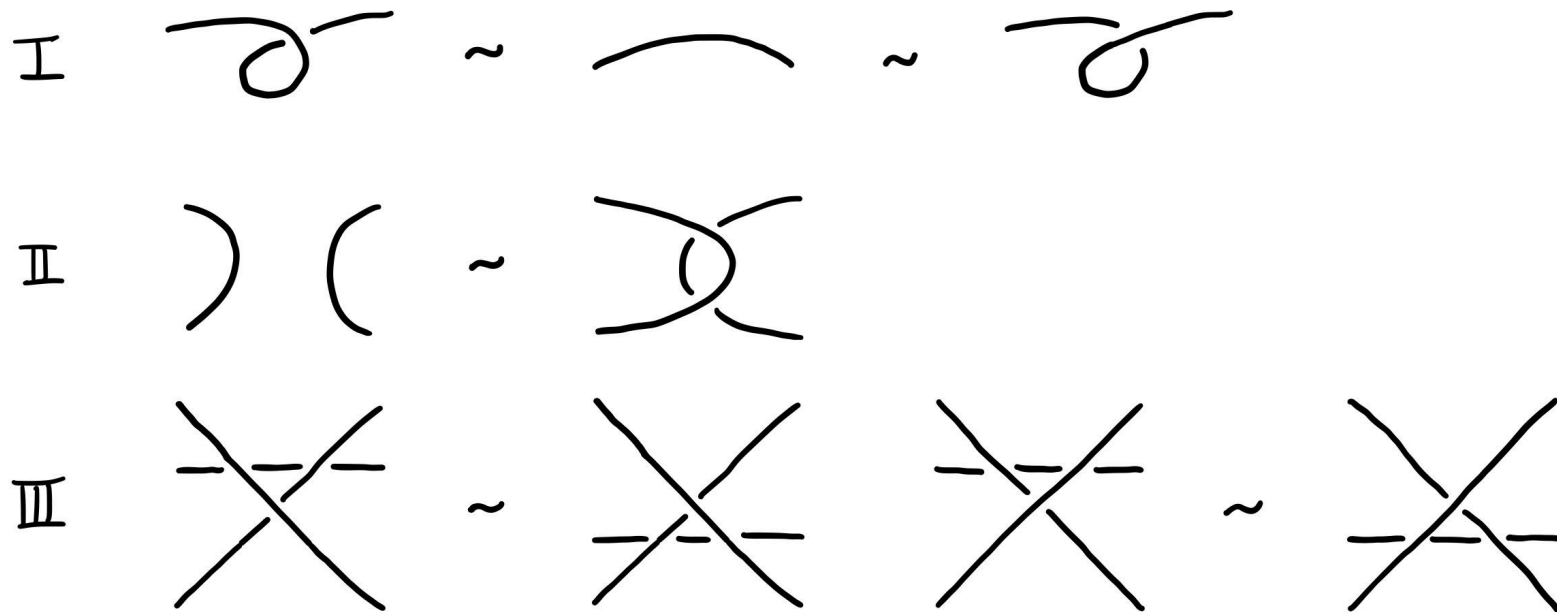
Def. Dato un *link* $L \subset \mathbb{R}^3$ esiste un suo **diagramma** $D \subset \mathbb{R}^2$ attraverso una proiezione regolare. I punti doppi del diagramma sono detti **incroci**.



Teorema di Reidemeister

Le mosse I, II, III in figura, sono dette **mosse di Reidemeister**.

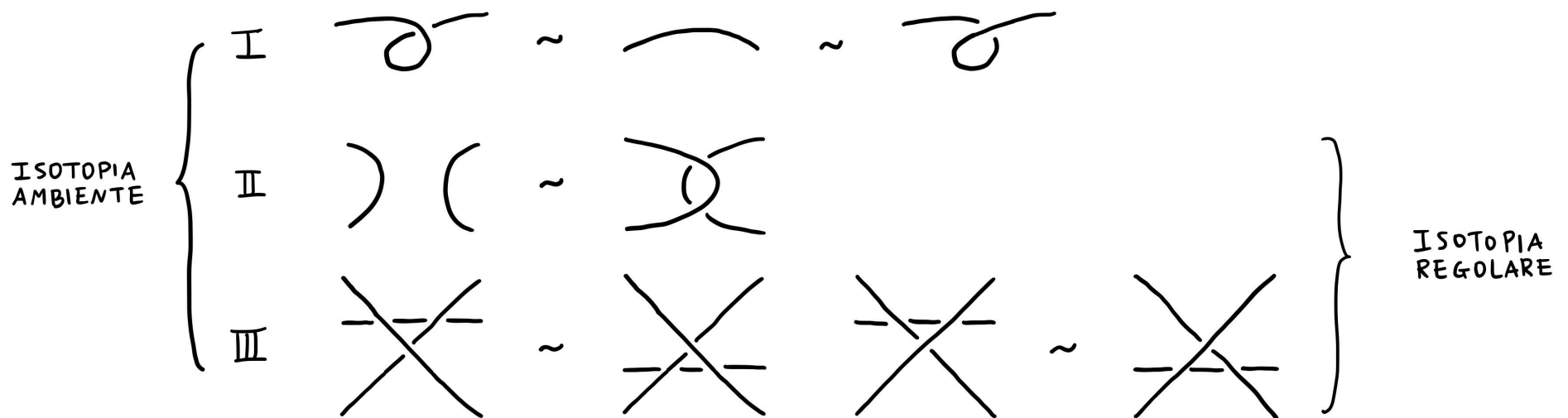
Teorema (di Reidemeister). Due diagrammi di link *equivalenti* sono collegati da una *successione finita di mosse di Reidemeister* e isotopie planari.





Isotopia Regolare

L'**isotopia regolare** è la relazione di equivalenza su diagrammi di link generata solo dalle mosse II e III.

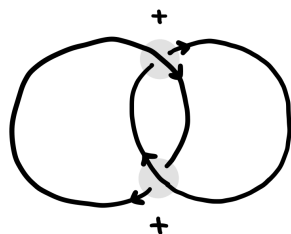




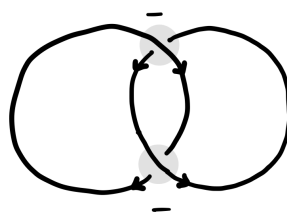
Writhe

Il **segno** di un incrocio di un diagramma orientato è: $\varepsilon\left(\begin{array}{c} \nearrow \\ \nwarrow \end{array}\right) = +1, \varepsilon\left(\begin{array}{c} \nwarrow \\ \nearrow \end{array}\right) = -1$

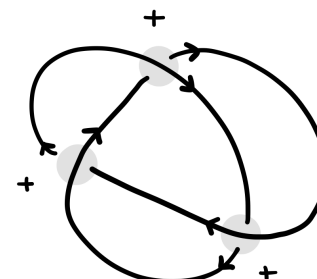
D diagramma di un link orientato, il **writhe** $w(D) := \sum_{c \text{ incrocio}} \varepsilon(c)$.



$$w = +2$$



$$w = -2$$



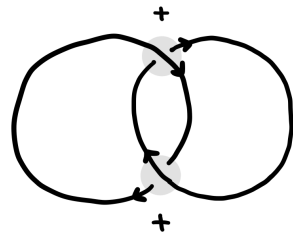
$$w = 3$$



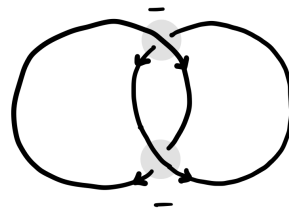
Writhe

Il **segno** di un incrocio di un diagramma orientato è: $\varepsilon\left(\begin{array}{c} \nearrow \\ \searrow \end{array}\right) = +1, \varepsilon\left(\begin{array}{c} \nwarrow \\ \nearrow \end{array}\right) = -1$

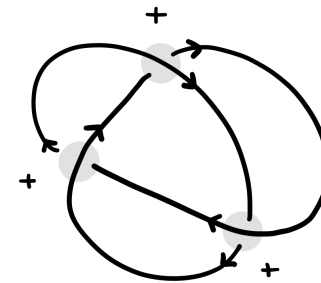
D diagramma di un link orientato, il **writhe** $w(D) := \sum_{c \text{ incrocio}} \varepsilon(c)$.



$$w = +2$$



$$w = -2$$



$$w = 3$$

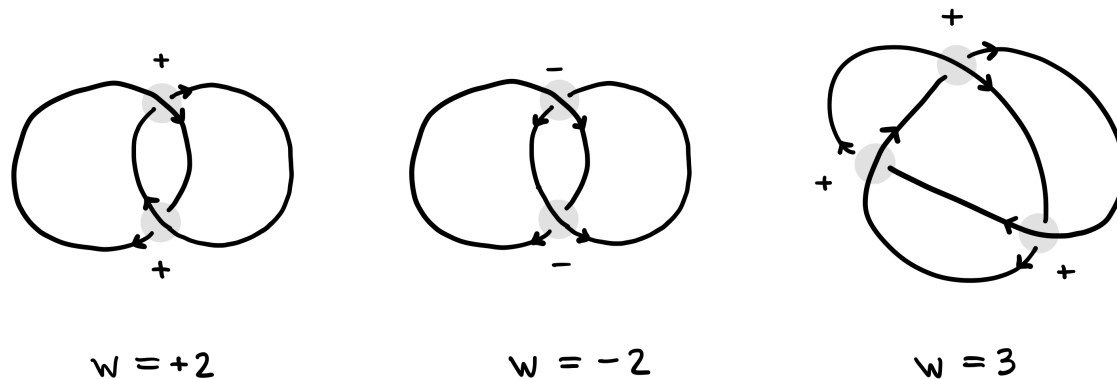
Prop. Se D è il diagramma di un nodo, il *writhe* **non dipende dall'orientazione**.



Writhe

Il **segno** di un incrocio di un diagramma orientato è: $\varepsilon\left(\begin{array}{c} \nearrow \\ \searrow \end{array}\right) = +1, \varepsilon\left(\begin{array}{c} \nwarrow \\ \nearrow \end{array}\right) = -1$

D diagramma di un link orientato, il **writhe** $w(D) := \sum_{c \text{ incrocio}} \varepsilon(c)$.



Prop. Se D è il diagramma di un nodo, il *writhe* **non dipende dall'orientazione**.

Prop. Il writhe è un **invariante di isotopia regolare**, ovvero $D_1 \sim D_2 \Rightarrow w(D_1) = w(D_2)$.



Indice

Teoria dei Nodi

Polinomio di Kauffman

Laboratorio Computazionale



Assiomi

Dimostreremo che per ogni *diagramma di link non orientato* D , esiste un polinomio L_D con $L_D \in \mathbb{Z}[a, a^{-1}, z, z^{-1}]$ invariante di *isotopia regolare* e che verifica i seguenti assiomi:

i) $D \sim D' \Rightarrow L_D = L_{D'}$.

ii) Valgono le seguenti relazioni:

a) $L[\text{crossing}] + L[\text{crossing}] = z(L[\text{cup}] + L[\text{cap}])$

b) $L[\text{circle}] = 1$

c) $L[\text{curl}] = aL[\text{arc}]$

d) $L[\text{curl}] = a^{-1}L[\text{arc}]$



Normalizzazione a invariante di isotopia ambiente

Definizione. $F_D(a, z) := a^{-w(D)} \cdot L_D(a, z)$



Normalizzazione a invariante di isotopia ambiente

Definizione. $F_D(a, z) := a^{-w(D)} \cdot L_D(a, z)$

Prop. F_D invariante di isotopia ambiente.

Dimostrazione.

- $w(D)$ invariante di *isotopia regolare* $\Rightarrow a^{-w(D)}$ invariante di *isotopia regolare*.



Normalizzazione a invariante di isotopia ambiente

Definizione. $F_D(a, z) := a^{-w(D)} \cdot L_D(a, z)$

Prop. F_D invariante di isotopia ambiente.

Dimostrazione.

- $w(D)$ invariante di *isotopia regolare* $\Rightarrow a^{-w(D)}$ invariante di *isotopia regolare*.
- $F[\varnothing] = a^{-w(\varnothing)} \cdot L[\varnothing]$



Normalizzazione a invariante di isotopia ambiente

Definizione. $F_D(a, z) := a^{-w(D)} \cdot L_D(a, z)$

Prop. F_D invariante di isotopia ambiente.

Dimostrazione.

- $w(D)$ invariante di *isotopia regolare* $\Rightarrow a^{-w(D)}$ invariante di *isotopia regolare*.
- $F[\overline{\mathcal{D}}] = a^{-w(\overline{\mathcal{D}})} \cdot L[\overline{\mathcal{D}}] \quad (L[\overline{\mathcal{D}}] = aL[\neg], \quad w(\overline{\mathcal{D}}) = w(\neg) + 1)$



Normalizzazione a invariante di isotopia ambiente

Definizione. $F_D(a, z) := a^{-w(D)} \cdot L_D(a, z)$

Prop. F_D invariante di isotopia ambiente.

Dimostrazione.

- $w(D)$ invariante di *isotopia regolare* $\Rightarrow a^{-w(D)}$ invariante di *isotopia regolare*.
- $F[\overline{\mathcal{D}}] = a^{-w(\overline{\mathcal{D}})} \cdot L[\overline{\mathcal{D}}] \quad (L[\overline{\mathcal{D}}] = aL[\neg], \quad w(\overline{\mathcal{D}}) = w(\neg) + 1)$
 $= a^{-w(\neg)-1} \cdot aL[\neg]$



Normalizzazione a invariante di isotopia ambiente

Definizione. $F_D(a, z) := a^{-w(D)} \cdot L_D(a, z)$

Prop. F_D invariante di isotopia ambiente.

Dimostrazione.

- $w(D)$ invariante di *isotopia regolare* $\Rightarrow a^{-w(D)}$ invariante di *isotopia regolare*.
- $F[\overline{\cup}] = a^{-w(\overline{\cup})} \cdot L[\overline{\cup}]$ $(L[\overline{\cup}] = aL[\cup], \quad w(\overline{\cup}) = w(\cup) + 1)$
 $= a^{-w(\cup)-1} \cdot aL[\cup]$
 $= a^{-w(\cup)} \cdot aL[\cup]$



Normalizzazione a invariante di isotopia ambiente

Definizione. $F_D(a, z) := a^{-w(D)} \cdot L_D(a, z)$

Prop. F_D invariante di isotopia ambiente.

Dimostrazione.

- $w(D)$ invariante di *isotopia regolare* $\Rightarrow a^{-w(D)}$ invariante di *isotopia regolare*.
- $F[\overline{\cup}] = a^{-w(\overline{\cup})} \cdot L[\overline{\cup}]$ $(L[\overline{\cup}] = aL[\cup], \quad w(\overline{\cup}) = w(\cup) + 1)$
 $= a^{-w(\cup)-1} \cdot aL[\cup]$
 $= a^{-w(\cup)} \cancel{a} \cdot \cancel{a}L[\cup]$
 $= a^{-w(\cup)} \cdot L[\cup]$



Normalizzazione a invariante di isotopia ambiente

Definizione. $F_D(a, z) := a^{-w(D)} \cdot L_D(a, z)$

Prop. F_D invariante di isotopia ambiente.

Dimostrazione.

- $w(D)$ invariante di *isotopia regolare* $\Rightarrow a^{-w(D)}$ invariante di *isotopia regolare*.
- $F[\bigcirc] = a^{-w(\bigcirc)} \cdot L[\bigcirc] \qquad (L[\bigcirc] = aL[\text{---}], \quad w(\bigcirc) = w(\text{---}) + 1)$
 $= a^{-w(\text{---})-1} \cdot aL[\text{---}]$
 $= a^{-w(\text{---})} \cancel{a} \cdot \cancel{a}L[\text{---}]$
 $= a^{-w(\text{---})} \cdot L[\text{---}]$
 $= F[\text{---}]$



Calcoli impliciti

Calcolo di $L[\bigcirc \bigcirc]$



Calcoli impliciti

Calcolo di $L[\bigcirc \bigcirc]$

$$(\text{figure-eight}, \text{figure-eight}, \text{figure-eight}, \text{figure-eight})$$



Calcoli impliciti

Calcolo di $L[\bigcirc \bigcirc]$

$$L[\text{figure-eight}] + L[\text{figure-eight}] = z \left(L[\text{two circles}] + L[\text{figure-eight}] \right)$$



Calcoli impliciti

Calcolo di $L[\bigcirc \bigcirc]$

$$L[\text{crossing}] + L[\text{crossing}] = z(L[\text{two circles}] + L[\text{crossing}])$$

$$\Rightarrow aL[\bigcirc] + a^{-1}L[\bigcirc] = z(\delta + L[\bigcirc])$$



Calcoli impliciti

Calcolo di $L[\bigcirc \bigcirc]$

$$L[\text{crossing}] + L[\text{crossing}] = z(L[\text{two circles}] + L[\text{two circles}])$$

$$\Rightarrow aL[\bigcirc] + a^{-1}L[\bigcirc] = z(\delta + L[\bigcirc])$$

$$\Rightarrow a + a^{-1} = z(\delta + 1)$$



Calcoli impliciti

Calcolo di $L[\bigcirc \bigcirc]$

$$L[\text{crossing}] + L[\text{crossing}] = z(L[\text{two circles}] + L[\text{two circles}])$$

$$\Rightarrow aL[\bigcirc] + a^{-1}L[\bigcirc] = z(\delta + L[\bigcirc])$$

$$\Rightarrow a + a^{-1} = z(\delta + 1)$$

$$\Rightarrow \delta = \frac{a + 1/a}{z} - 1$$



Calcoli impliciti

Calcolo di $L[\bigcirc \bigcirc]$

$$L[\text{crossing}] + L[\text{crossing}] = z(L[\text{two circles}] + L[\text{two circles}])$$

$$\Rightarrow aL[\bigcirc] + a^{-1}L[\bigcirc] = z(\delta + L[\bigcirc])$$

$$\Rightarrow a + a^{-1} = z(\delta + 1)$$

$$\Rightarrow \delta = \frac{a + 1/a}{z} - 1$$

$$\leadsto L[D_1 \sqcup D_2] = \delta L[D_1]L[D_2]$$



Calcoli impliciti

Calcolo di $L[\bigcirc \bigcirc]$

$$L[\text{figure-eight}] + L[\text{figure-eight}] = z(L[\text{two circles}] + L[\text{two circles}])$$

$$\Rightarrow aL[\bigcirc] + a^{-1}L[\bigcirc] = z(\delta + L[\bigcirc])$$

$$\Rightarrow a + a^{-1} = z(\delta + 1)$$

$$\Rightarrow \delta = \frac{a + 1/a}{z} - 1$$

$$\leadsto L[D_1 \sqcup D_2] = \delta L[D_1]L[D_2]$$

Link di Hopf

$$L[\text{Hopf link}] + L[\text{Hopf link}] = z(L[\text{Hopf link}] + L[\text{Hopf link}])$$

$$\Rightarrow L[\text{Hopf link}] + \delta = z(a + a^{-1})$$

$$\Rightarrow L[\text{Hopf link}] = -(a + a^{-1})z^{-1} + 1 + (a + a^{-1})z$$

Nodo trifoglio

$$L[\text{trifoglio}] + L[\text{trifoglio}] = z(L[\text{trifoglio}] + L[\text{trifoglio}])$$

$$\Rightarrow L[\text{trifoglio}] + a = z(L[\text{Hopf link}] + a^{-2})$$

$$\Rightarrow L[\text{trifoglio}] = -(2a + a^{-1}) + (1 + a^{-2})z + (a + a^{-1})z^2$$



Considerazioni preliminari

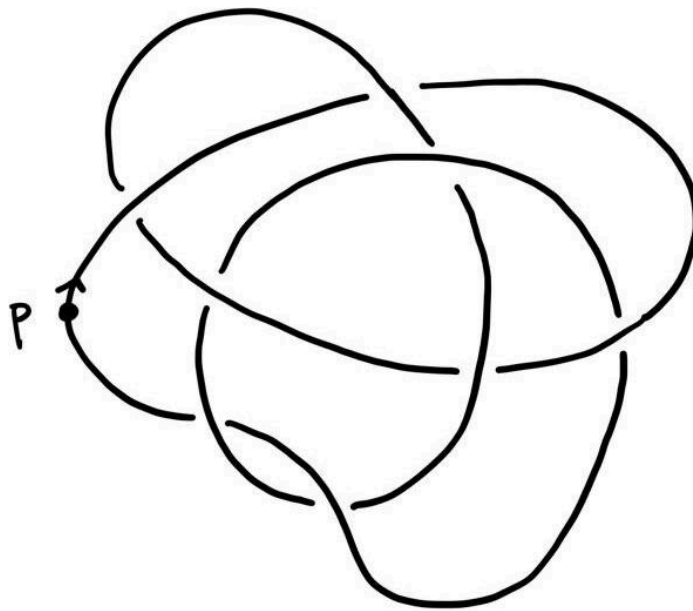
Sia D un diagramma di un link, i etichetta di uno degli incroci:

$$\begin{array}{cccc}
 \begin{array}{c} i \\ \diagup \quad \diagdown \\ \diagdown \quad \diagup \end{array} &
 \begin{array}{c} i \\ \diagdown \quad \diagup \\ \diagup \quad \diagdown \end{array} &
 \begin{array}{c} i \\ \frown \\ \smile \end{array} &
 \begin{array}{c} i \\) \quad (\end{array} \\
 D & S_i D & E_i D & e_i D
 \end{array}$$

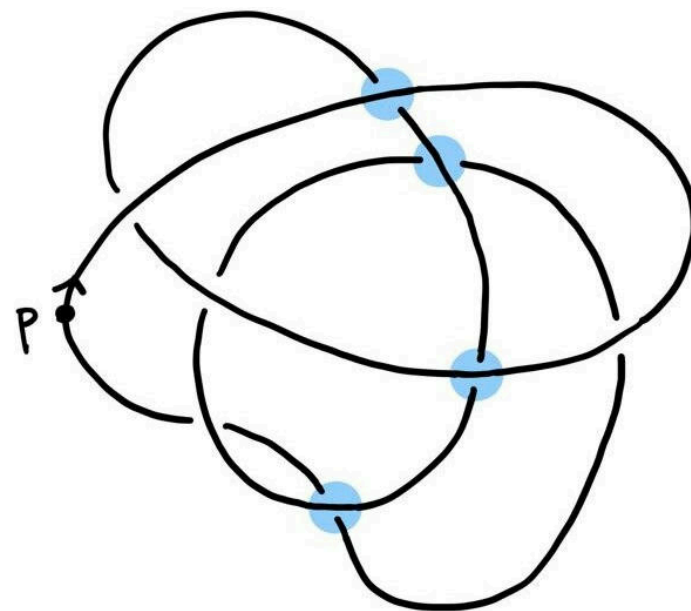


Considerazioni preliminari

Il **nodo banale standard** (o in *forma discendente*) associato a D è $\hat{D}(\mathcal{U}, p)$:



D

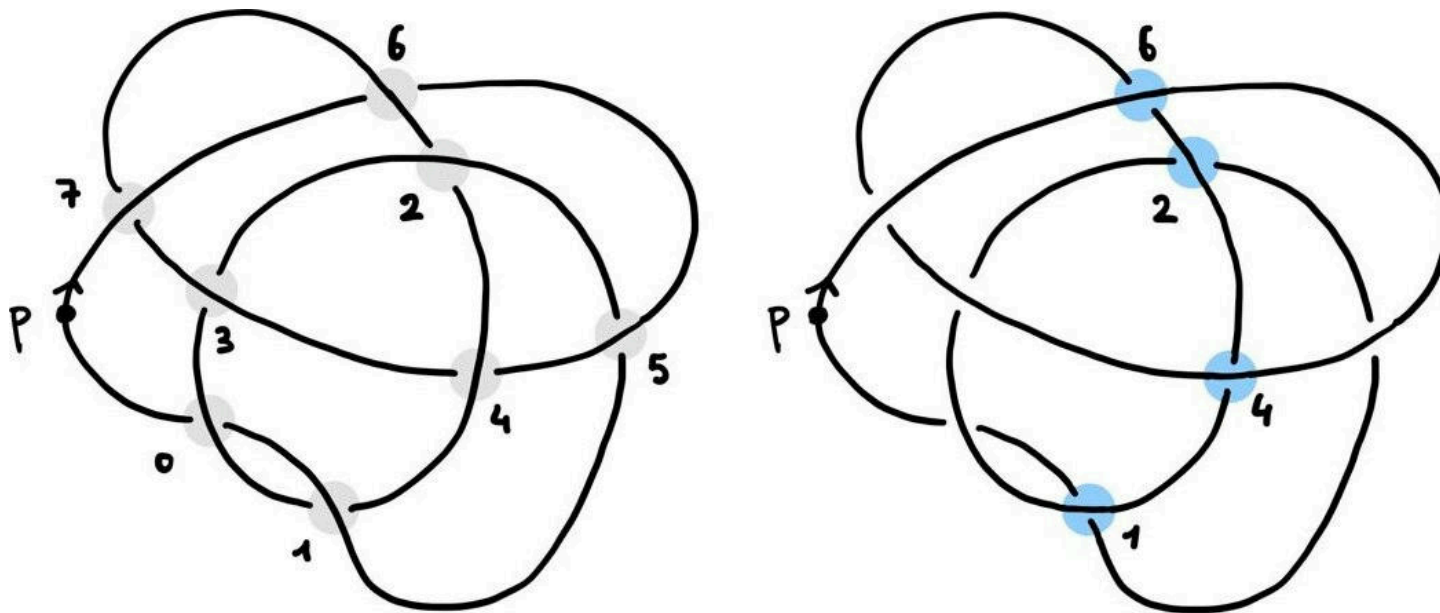


$\hat{D}(\mathcal{U}, p)$



Considerazioni preliminari

Il **nodo banale standard** (o in *forma discendente*) associato a D è $\hat{D}(\mathcal{U}, p)$:

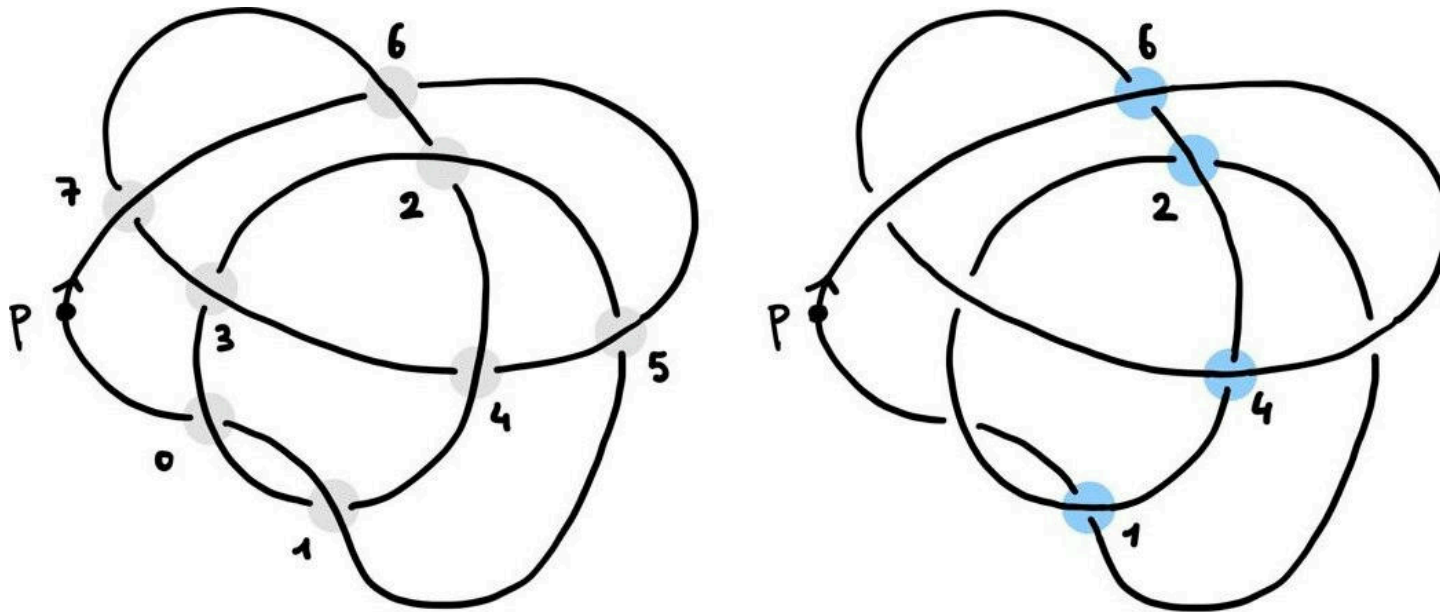


$$D \rightsquigarrow \lambda = (6, 4, 2, 1) \rightsquigarrow \hat{D}(\mathcal{U}, p)$$



Considerazioni preliminari

Il **nodo banale standard** (o in *forma discendente*) associato a D è $\hat{D}(\mathcal{U}, p)$:



$$D \rightsquigarrow \lambda = (6, 4, 2, 1) \rightsquigarrow \hat{D}(\mathcal{U}, p)$$

$$\hat{D}(p) = S_6 S_4 S_2 S_1 D$$



Considerazioni preliminari

Sia p punto base direzionato, $\lambda = (n, \dots, 0)$ una sequenza di scambi che porta D a $\hat{D}(p)$:

$$L[D] + L[S_0 D] = z(L[E_0 D] + L[e_0 D])$$



Considerazioni preliminari

Sia p punto base direzionato, $\lambda = (n, \dots, 0)$ una sequenza di scambi che porta D a $\hat{D}(p)$:

$$L[D] + L[S_0 D] = z(L[E_0 D] + L[e_0 D])$$

$$L[S_0 D] + L[S_1 S_0 D] = z(L[E_1 S_0 D] + L[e_1 S_0 D])$$



Considerazioni preliminari

Sia p punto base direzionato, $\lambda = (n, \dots, 0)$ una sequenza di scambi che porta D a $\hat{D}(p)$:

$$L[D] + L[S_0 D] = z(L[E_0 D] + L[e_0 D])$$

$$L[S_0 D] + L[S_1 S_0 D] = z(L[E_1 S_0 D] + L[e_1 S_0 D])$$

$$L[S_1 S_0 D] + L[S_2 S_1 S_0 D] = z(L[E_1 S_1 S_0 D] + L[e_1 S_1 S_0 D])$$

$$\vdots$$



Considerazioni preliminari

Sia p punto base direzionato, $\lambda = (n, \dots, 0)$ una sequenza di scambi che porta D a $\hat{D}(p)$:

$$L[D] + L[S_0 D] = z(L[E_0 D] + L[e_0 D])$$

$$L[S_0 D] + L[S_1 S_0 D] = z(L[E_1 S_0 D] + L[e_1 S_0 D])$$

$$L[S_1 S_0 D] + L[S_2 S_1 S_0 D] = z(L[E_2 S_1 S_0 D] + L[e_2 S_1 S_0 D])$$

$$\vdots$$

$$L[S_{n-1} \cdots S_0 D] + L[\hat{D}(p)] = z(L[E_n S_{n-1} \cdots S_0 D] + L[e_n S_{n-1} \cdots S_0 D])$$



Considerazioni preliminari

Sia p punto base direzionato, $\lambda = (n, \dots, 0)$ una sequenza di scambi che porta D a $\hat{D}(p)$:

$$L[D] + L[S_0 D] = z(L[E_0 D] + L[e_0 D])$$

$$-(L[S_0 D] + L[S_1 S_0 D]) = -z(L[E_1 S_0 D] + L[e_1 S_0 D])$$

$$L[S_1 S_0 D] + L[S_2 S_1 S_0 D] = z(L[E_1 S_1 S_0 D] + L[e_1 S_1 S_0 D])$$

$$\vdots$$

$$(-1)^n (L[S_{n-1} \cdots S_0 D] + L[\hat{D}(p)]) = (-1)^n z(L[E_n S_{n-1} \cdots S_0 D] + L[e_n S_{n-1} \cdots S_0 D])$$



Considerazioni preliminari

Sia p punto base direzionato, $\lambda = (n, \dots, 0)$ una sequenza di scambi che porta D a $\hat{D}(p)$:

$$L[D] + \cancel{L[S_0 D]} = z(L[E_0 D] + L[e_0 D])$$

$$-(\cancel{L[S_0 D]} + \cancel{L[S_1 S_0 D]}) = -z(L[E_1 S_0 D] + L[e_1 S_0 D])$$

$$\cancel{L[S_1 S_0 D]} + \cancel{L[S_2 S_1 S_0 D]} = z(L[E_1 S_1 S_0 D] + L[e_1 S_1 S_0 D])$$

$$\vdots$$

$$(-1)^n (\cancel{L[S_{n-1} \cdots S_0 D]} + L[\hat{D}(p)]) = (-1)^n z(L[E_n S_{n-1} \cdots S_0 D] + L[e_n S_{n-1} \cdots S_0 D])$$

$$\Rightarrow L[D] + (-1)^n L[\hat{D}(p)] = z \sum_{i=0}^n (-1)^i (L[E_i S_{i-1} \cdots S_0 D] + L[e_i S_{i-1} \cdots S_0 D])$$



Considerazioni preliminari

Sia p punto base direzionato, $\lambda = (n, \dots, 0)$ una sequenza di scambi che porta D a $\hat{D}(p)$:

$$L[D] + \cancel{L[S_0 D]} = z(L[E_0 D] + L[e_0 D])$$

$$-(\cancel{L[S_0 D]} + \cancel{L[S_1 S_0 D]}) = -z(L[E_1 S_0 D] + L[e_1 S_0 D])$$

$$\cancel{L[S_1 S_0 D]} + \cancel{L[S_2 S_1 S_0 D]} = z(L[E_1 S_1 S_0 D] + L[e_1 S_1 S_0 D])$$

$$\vdots$$

$$(-1)^n (\cancel{L[S_{n-1} \cdots S_0 D]} + L[\hat{D}(p)]) = (-1)^n z(L[E_n S_{n-1} \cdots S_0 D] + L[e_n S_{n-1} \cdots S_0 D])$$

$$\Rightarrow L[D] + (-1)^n L[\hat{D}(p)] = z \underbrace{\sum_{i=0}^n (-1)^i (L[E_i S_{i-1} \cdots S_0 D] + L[e_i S_{i-1} \cdots S_0 D])}_{\text{Notazione: } \sum_D (\lambda(p))}$$

Notazione: $\sum_D (\lambda(p))$



Considerazioni preliminari

Sia p punto base direzionato, $\lambda = (n, \dots, 0)$ una sequenza di scambi che porta D a $\hat{D}(p)$:

$$L[D] + \cancel{L[S_0 D]} = z(L[E_0 D] + L[e_0 D])$$

$$-(\cancel{L[S_0 D]} + \cancel{L[S_1 S_0 D]}) = -z(L[E_1 S_0 D] + L[e_1 S_0 D])$$

$$\cancel{L[S_1 S_0 D]} + \cancel{L[S_2 S_1 S_0 D]} = z(L[E_1 S_1 S_0 D] + L[e_1 S_1 S_0 D])$$

$$\vdots$$

$$(-1)^n (\cancel{L[S_{n-1} \cdots S_0 D]} + L[\hat{D}(p)]) = (-1)^n z(L[E_n S_{n-1} \cdots S_0 D] + L[e_n S_{n-1} \cdots S_0 D])$$

$$\Rightarrow L[D] + (-1)^n L[\hat{D}(p)] = z \sum_D (\lambda(p))$$



Considerazioni preliminari

Sia p punto base direzionato, $\lambda = (n, \dots, 0)$ una sequenza di scambi che porta D a $\hat{D}(p)$:

$$L[D] + \cancel{L[S_0 D]} = z(L[E_0 D] + L[e_0 D])$$

$$-(\cancel{L[S_0 D]} + \cancel{L[S_1 S_0 D]}) = -z(L[E_1 S_0 D] + L[e_1 S_0 D])$$

$$\cancel{L[S_1 S_0 D]} + \cancel{L[S_2 S_1 S_0 D]} = z(L[E_1 S_1 S_0 D] + L[e_1 S_1 S_0 D])$$

$$\vdots$$

$$(-1)^n (\cancel{L[S_{n-1} \cdots S_0 D]} + L[\hat{D}(p)]) = (-1)^n z(L[E_n S_{n-1} \cdots S_0 D] + L[e_n S_{n-1} \cdots S_0 D])$$

$$\Rightarrow L[D] = (-1)^{n+1} L[\hat{D}(p)] + z \sum_D (\lambda(p))$$



Considerazioni preliminari

Sia p punto base direzionato, $\lambda = (n, \dots, 0)$ una sequenza di scambi che porta D a $\hat{D}(p)$:

$$L[D] + \cancel{L[S_0 D]} = z(L[E_0 D] + L[e_0 D])$$

$$-(\cancel{L[S_0 D]} + \cancel{L[S_1 S_0 D]}) = -z(L[E_1 S_0 D] + L[e_1 S_0 D])$$

$$\cancel{L[S_1 S_0 D]} + \cancel{L[S_2 S_1 S_0 D]} = z(L[E_1 S_1 S_0 D] + L[e_1 S_1 S_0 D])$$

$$\vdots$$

$$(-1)^n (\cancel{L[S_{n-1} \cdots S_0 D]} + L[\hat{D}(p)]) = (-1)^n z(L[E_n S_{n-1} \cdots S_0 D] + L[e_n S_{n-1} \cdots S_0 D])$$

$$\Rightarrow L[D] = (-1)^{|\lambda(p)|+1} L[\hat{D}(p)] + z \sum_D (\lambda(p))$$



Considerazioni preliminari

Sia p punto base direzionato, $\lambda = (n, \dots, 0)$ una sequenza di scambi che porta D a $\hat{D}(p)$:

$$L[D] + \cancel{L[S_0 D]} = z(L[E_0 D] + L[e_0 D])$$

$$-(\cancel{L[S_0 D]} + \cancel{L[S_1 S_0 D]}) = -z(L[E_1 S_0 D] + L[e_1 S_0 D])$$

$$\cancel{L[S_1 S_0 D]} + \cancel{L[S_2 S_1 S_0 D]} = z(L[E_1 S_1 S_0 D] + L[e_1 S_1 S_0 D])$$

$$\vdots$$

$$(-1)^n (\cancel{L[S_{n-1} \cdots S_0 D]} + L[\hat{D}(p)]) = (-1)^n z(L[E_n S_{n-1} \cdots S_0 D] + L[e_n S_{n-1} \cdots S_0 D])$$

$$\Rightarrow L[D] = (-1)^{|\lambda(p)|+1} L[\hat{D}(p)] + z \sum_D (\lambda(p))$$



Definizione induttiva

Definiamo ora il polinomio $L_D(a, z)$ induttivamente come segue:

- i) Se D è in *forma discendente*: $L_D(a, z) := a^{w(D)}$
- ii) Se $D = D_1 \cup D_2$: $L(D_1 \cup D_2) := \delta L(D_1)L(D_2)$ (con $\delta := \frac{a+1/a}{z} - 1$)
- iii) Altrimenti $D = D_1 \cup \dots \cup D_n$:

$$\text{a) Se } n > 1: L_D(a, z) := \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left((-1)^{|\lambda(p_i)|+1} \delta L_{D_i} L_{D-D_i} + z \sum_D (\lambda(p_i)) \right)$$

$$\text{b) Se } n = 1: L_D(a, z) := (-1)^{|\lambda(p)|+1} L[\hat{D}(p)] + z \sum_D (\lambda(p))$$



Definizione induttiva

Definiamo ora il polinomio $L_D(a, z)$ induttivamente come segue:

- i) Se D è in *forma discendente*: $L_D(a, z) := a^{w(D)}$
- ii) Se $D = D_1 \cup D_2$: $L(D_1 \cup D_2) := \delta L(D_1)L(D_2)$ (con $\delta := \frac{a+1/a}{z} - 1$)
- iii) Altrimenti $D = D_1 \cup \dots \cup D_n$:
 - a) Se $n > 1$: $L_D(a, z) := \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left((-1)^{|\lambda(p_i)|+1} \delta L_{D_i} L_{D-D_i} + z \sum_D (\lambda(p_i)) \right)$
 - b) Se $n = 1$: $L_D(a, z) := (-1)^{|\lambda(p)|+1} L[\hat{D}(p)] + z \sum_D (\lambda(p))$



Definizione induttiva

Definiamo ora il polinomio $L_D(a, z)$ induttivamente come segue:


- i) Se D è in *forma discendente*: $L_D(a, z) := a^{w(D)}$
- ii) Se $D = D_1 \cup D_2$: $L(D_1 \cup D_2) := \delta L(D_1)L(D_2)$ (con $\delta := \frac{a+1/a}{z} - 1$)
- iii) Altrimenti $D = D_1 \cup \dots \cup D_n$:

$$\text{a) Se } n > 1: L_D(a, z) := \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n \sum_{q=p_i, \bar{p}_i} \left((-1)^{|\lambda(q)|+1} \delta L_{D_i} L_{D-D_i} + z \sum_D (\lambda(q)) \right)$$

$$\text{b) Se } n = 1: L_D(a, z) := \frac{1}{2} \sum_{q=p, \bar{p}} \left((-1)^{|\lambda(q)|+1} L_{\hat{D}(q)} + z \sum_D (\lambda(q)) \right)$$



Ipotesi induttiva

Ipotesi induttiva. Dimostreremo induttivamente le seguenti proprietà: per ogni diagramma di link D con $< N$ incroci e per diagrammi contenenti  con $< N$ incroci:

- a) L_D è ben definito (non dipende dalla scelta di punto base)
- b) L_D verifica gli assiomi:
 - $L[D] + L[S_i D] = z(L[e_i D] + L[E_i D])$
 - $L[\text{positive crossing}] = aL[\text{negative crossing}], L[\text{negative crossing}] = a^{-1}L[\text{positive crossing}]$
- c) L_D è invariante per mosse di tipo II e III che non aumentano il numero di incroci
- d) Per certi diagrammi vale $L_D = a^{w(D)}$



Dimostrazione buona definizione

Dimostrazione.

- a) L_D è ben definito (non dipende dalla scelta di punto base)
 - Invarianza $\sum_D(\lambda(p))$ per rotazioni
 - Caso più componenti
 - Caso una sola componente
 - Splice di un nodo in forma discendente
 - Assiomi di L_D per nodi in forma discendente
- b) L_D verifica gli assiomi
- c) L_D è invariante per mosse di tipo II e III che non aumentano il numero di incroci
- d) Per certi diagrammi vale $L_D = a^{w(D)}$



Indice

Teoria dei Nodi

Polinomio di Kauffman

Laboratorio Computazionale



Implementazione in Python

Implementazioni esistenti:

- **KnotScape** – scritto in C, degli anni ~1990
- **KnotTheory** – ultimo aggiornamento ~2010, per Wolfram Mathematica



Implementazione in Python

Implementazioni esistenti:

- **KnotScape** – scritto in C, degli anni ~1990
- **KnotTheory** – ultimo aggiornamento ~2010, per Wolfram Mathematica

Per il progetto di Laboratorio Computazionale abbiamo scritto una **nuova implementazione** in **Python** open source:

- Strutture dati per la rappresentazione di nodi con **codici P.D.** e **S.G.**
- Algoritmo per il calcolo di L_D e F_D



Implementazione in Python

Implementazioni esistenti:

- **KnotScape** – scritto in C, degli anni ~1990
- **KnotTheory** – ultimo aggiornamento ~2010, per Wolfram Mathematica

Per il progetto di Laboratorio Computazionale abbiamo scritto una **nuova implementazione** in **Python** open source:

- Strutture dati per la rappresentazione di nodi con **codici P.D.** e **S.G.**
- Algoritmo per il calcolo di L_D e F_D
- Verifica di tutti i polinomi contenuti nel **database di KnotInfo** (~7K tra nodi e link, ~20min)



Implementazione in Python

Implementazioni esistenti:

- **KnotScape** – scritto in C, degli anni ~1990
- **KnotTheory** – ultimo aggiornamento ~2010, per Wolfram Mathematica

Per il progetto di Laboratorio Computazionale abbiamo scritto una **nuova implementazione** in **Python** open source:

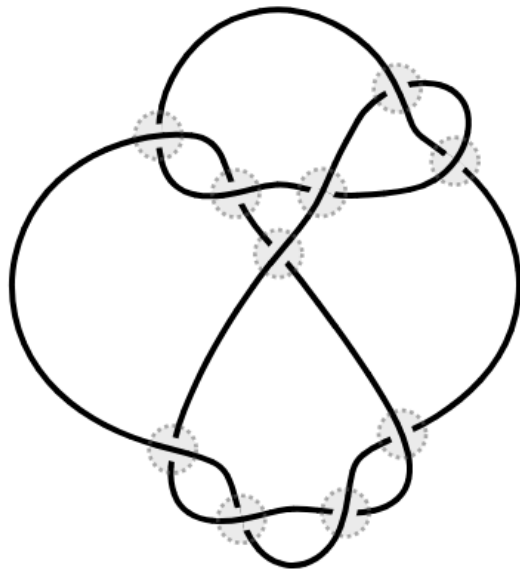
- Strutture dati per la rappresentazione di nodi con **codici P.D.** e **S.G.**
- Algoritmo per il calcolo di L_D e F_D
- Verifica di tutti i polinomi contenuti nel **database di KnotInfo** (~7K tra nodi e link, ~20min)
- *Trovato un errore nel nodo 10_{125} : è presente $F[m(10_{125})]$ invece di $F[10_{125}]$ ovvero $F[10_{125}](1/a, z)$*



Implementazione in Python

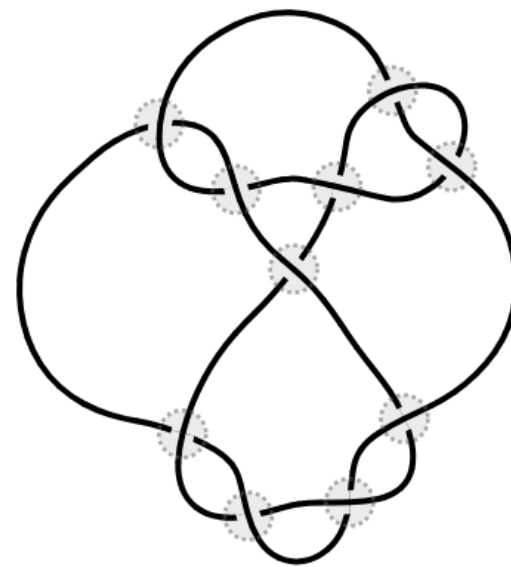
Polinomio corretto

$$\begin{aligned}
 F[10_{125}] = & z^8 \left(\frac{1}{a^2} + 1 \right) + z^7 \left(a + \frac{2}{a} + \frac{1}{a^3} \right) + z^6 \left(-6 - \frac{6}{a^2} \right) \\
 & + z^5 \left(-5a - \frac{11}{a} - \frac{6}{a^3} \right) + z^4 \left(2a^2 + 13 + \frac{11}{a^2} \right) \\
 & + z^3 \left(a^3 + 8a + \frac{17}{a} + \frac{10}{a^3} \right) + z^2 \left(a^4 - 6a^2 - 15 - \frac{8}{a^2} \right) \\
 & + z \left(a^5 - a^3 - 6a - \frac{8}{a} - \frac{4}{a^3} \right) + 3a^2 + 7 + \frac{3}{a^2}
 \end{aligned}$$



Polinomio in KnotInfo

$$\begin{aligned}
 F[m(10_{125})] = & z^8(a^2 + 1) + z^7 \left(a^3 + 2a + \frac{1}{a} \right) + z^6(-6a^2 - 6) \\
 & + z^5 \left(-6a^3 - 11a - \frac{5}{a} \right) + z^4 \left(11a^2 + 13 + \frac{2}{a^2} \right) \\
 & + z^3 \left(10a^3 + 17a + \frac{8}{a} + \frac{1}{a^3} \right) + z^2 \left(-8a^2 - 15 - \frac{6}{a^2} + \frac{1}{a^4} \right) \\
 & + z \left(-4a^3 - 8a - \frac{6}{a} - \frac{1}{a^3} + \frac{1}{a^5} \right) + 3a^2 + 7 + \frac{3}{a^2}
 \end{aligned}$$





Fine

Grazie per l'attenzione