

## אלגוריתמים 2

23 בפברואר 2016

מרצה: ד"ר עדן כלמטץ'  
מסכם: מני סדיגורסקי

### תוכן עניינים

### סיבוכיות של פעולות אריתמטיות

29.10.15

**תזכורת:** חיבור וחיסור ניתנים לביצוע בזמן  $\mathcal{O}(n)$  כאשר  $n$  הוא מספר הביטים (ולא גודל המספר). כפל וחילוק ניתנים לחישוב בזמן  $\mathcal{O}(n^2)$ .  
כלומר אם אנו עובדים עם  $m_1, m_2 \approx 1024$  אזי חיבור, לדוגמה, יתבצע בייצוג בינארי בזמן  $\mathcal{O}(\log_2(1024)) = \mathcal{O}(10)$  ולא בזמן  $\mathcal{O}(1024)$ .

**הערה:** חשוב לשים לב שמצד שני אם נבנה אלגוריתמים שרצים בזמן ריצה שתלוי בגודל הקלט (כלומר גודל המספר, נניח 1024) אזי התלות באורך הקלט כלומר (גודל הייצוג של הקלט נניח, 10 ביטים) תהיה גדולה אקספוננציאלית.  
לדוגמה בבעיית הגנב (*Knapsack problem*) הראנו שניתן בעזרת תכנון דינאמי לבנות אלגוריתם שרץ בזמן שהוא לינארי בגודל המספרי של הקלט  $m$  והיה נראה לנו שזה מצוין אלא שבעצם מה שחשוב בדרך כלל זה הייצוג כי זה אורך הקלט של התוכנית ובמקרה הזה נקבל שזמן הריצה כתלות באורך הייצוג  $n$  הוא

$$n = \log_2 m \Rightarrow m = 2^n \Rightarrow \mathcal{O}(m) = \mathcal{O}(2^n)$$

כלומר למעשה האלגוריתם ירוץ זמן ריצה אקספוננציאלי באורך הקלט.

### חשבון מודולרי

**חיבור:**  $a + b \pmod{m}$  כאשר  $a, b \in \mathbb{Z}_m$  ו-1  $m$  באורך  $n \geq$  ביטים  
על פי ההגדרה  $0 \leq a, b < m$  ומכאן ש  $0 \leq a + b < 2m$  ולכן נקבל זמן ריצה

$$\mathcal{O}(n) \ni \begin{cases} a + b \pmod{m} = a + b & \Leftarrow a + b < m \\ a + b \pmod{m} = a + b - m & \Leftarrow a + b \geq m \end{cases}$$

**כפל:**  $ab \pmod m$  אשר  $a, b \in \mathbb{Z}_m$  ו- $m \geq n$  ביטים  
 החישוב דורש פעולת כפל + פעולת חילוק עם שארית ובסה"כ זמן ריצה  $\mathcal{O}(n^2)$

**חילוק:** למעשה חילוק מעל הממשיים משמעותו הכפלה באיבר ההופכי כלומר  $a/b \Rightarrow ab^{-1}$   
 כאשר  $b^{-1}b = 1$

כמו שראינו בקורס באלגברה ב- $\mathbb{Z}_m$  לא תמיד קיים הופכי אבל אם  $m$  ראשוני ו- $a \in \mathbb{Z}_m$  אזי קיים  $a' \in \mathbb{Z}_m$  כך ש- $aa' = 1 \pmod m$   
 במקרה כזה נאמר ש- $\mathbb{Z}_m$  הוא לא רק חוג אלא שדה.

## האלגוריתם של אוקלידס למציאת GCD

נעבור לדון כעת באלגוריתם  $gcd(a, b)$  כאשר במהלך היום בלי הגבלת הכלליות  $a \leq b$

**טענה:** אם  $b = 0 \pmod m$  כלומר  $a \mid b$  אזי  $gcd(a, b) = a$   
 אחרת  $gcd(a, b) = gcd(a, a - b)$

**נימוק:**

$$c \mid a \wedge c \mid a \Rightarrow c \mid ab$$

ומנגד

$$c \mid a \wedge c \mid (b - a) \Rightarrow c \mid (a + (b - a)) = b$$

אם כך נוכל להמשיך טענה זו ולחסר את  $a$  מ- $b$  שוב ושוב (ועדיין להישאר עם אותו  $gcd$ ) עד שנרד מתחת ל- $a$  ומה נקבל בתוצאת החיסור הוא  $b \pmod a$  או במילים אחרות -

**מסקנה:**  $gcd(a, b) = gcd(a, b - ka) = gcd(a, b \pmod a)$

ומכאן נקבל אלגוריתם רקורסיבי:

$GCD - Euclid(a, b)$ :

$$c = b \pmod a$$

$$\bullet \text{ אם } c = 0 \text{ נחזיר } a$$

$$\bullet \text{ אחרת - נחזיר } GCD - Euclid(c, a)$$

**זמן ריצה** -  $a, b$  באורך  $n \geq$  ביטים

בהתבוננות ראשונית נוכל לשים לב שבכל צעד אחד המספרים קטן ולכן נוכל להסיק שעומק הרקורסיה  $2^n \geq \max(a, b) \geq$   
 ננסה לחסום באופן טוב יותר.

$$\text{טענה: } b \pmod a \leq \frac{b}{a}$$

**הוכחה:** נחלק למקרים -

$$1. \quad b \bmod a < a \leq \frac{b}{2} \Leftrightarrow a \leq \frac{b}{2}$$

$$2. \quad a > \frac{b}{2} \Leftrightarrow \text{כמו שראינו } b \bmod a = b - ka \text{ מאחר ו } a > \frac{b}{2} \text{ נקבל שאם } k > 1$$

$$k > 1 \Rightarrow b \bmod a = b - ka \leq b - 2a < 0$$

$$\text{ולכן בהכרח } k = 1 \text{ ולכן נקבל כי } b \bmod a = b - a < b - \frac{b}{2} = \frac{b}{2}$$

אם כך בכל צעד, אחד הפרמטרים קטן לפחות בחצי  $\Leftarrow$  כל שני צעדים, שני הפרמטרים קטנים בחצי  $\Leftarrow$  מספר האיטרציות הוא לכל היותר  $2 \cdot \log_2 \min(a, b)$   
מאחר ו  $a, b \leq 2^n$  נקבל  $O(n)$  איטרציות, כלומר נבצע  $O(n)$  פעמים חילוק עם שארית ולכן סה"כ זמן ריצה  $O(n^3)$

**משפט:** אם  $m$  ראשוני ו  $a \in \mathbb{Z}_m$  אזי קיים  $a' \in \mathbb{Z}_m$  כך ש  $aa' = 1 \in \mathbb{Z}_m$

**למה:** הלמה של בזו (Bézout)

לכל  $a, b \in \mathbb{N}$  קיימים  $x, y \in \mathbb{Z}$  כך ש:

$$xa + yb = \text{GCD}(a, b)$$

(נוכיח עוד מעט)

**הוכחת המשפט:** יהי  $a \in \mathbb{Z}_m$  כאשר  $0 \neq a$  ראשוני

$$\text{GCD}(a, m) = 1 \Rightarrow \exists x, y : xa + ym = 1 \Rightarrow xa = 1 + (-y)bm \Rightarrow xa = 1 \pmod{m}$$

**הערה:** גם אם  $m$  פריק אבל  $\text{GCD}(a, m) = 1$  קיים הופכי  $a$  ב  $\mathbb{Z}_m$

**הוכחת הלמה:** נשנה מעט את הלגוריתם של אוקלידס כך שיחזיר גם  $x, y$  שעבורם  $xa + yb = \text{GCD}(a, b)$

$\text{GCD} - \text{Euclid}(a, b)$ :

- $b = da + c$  ונשמור את  $d$  שעבורו  $c = b \bmod a$
- אם  $c = 0$ : נחזיר את  $a$  וגם את  $x = 1, y = 0$
- אחרת: נחזיר את  $\text{GCD}(c, a)$  וגם את  $x = y' - dx, y = x'$  כאשר את  $x', y'$  קיבלנו מהרקורסיה

**הסבר:** נניח שהקריאה הרקורסיבית החזירה  $x', y'$  כך ש

$$x'c + y'a = \text{GCD}(c, a) = \text{GCD}(a, b)$$

בפעולה  $b \bmod a$  קיבלנו  $c, d$  כך ש

$$b = da + c$$

כלומר

$$x'c + y'a = x'(b - da) + y'a = x'b + (y' - dx')a$$

ולכן נחזיר בנוסף ל-GCD גם את

$$y = x' \quad x = y' - dx$$

כנדרש

**סבוכיות:**  $\mathcal{O}(n^3)$  (ניתוח זמן הריצה לא השתנה מהאלגוריתם המקורי)

## בדיקת ראשוניות

### חישוב חזקה בחשבון מודולרי

$a, b, m$  באורך  $n \geq$  ביטים

רוצים לחשב את  $a^b \bmod m$

**הבעיה:**  $a^b$  הוא מספר באורך  $ab \approx$  ביטים כלומר  $\mathcal{O}(n^2)$  ולבצע פעולות על מספרים באורך כזה זו בעיה.

**רעיון:** נבצע  $\bmod m$  לאחר כל כפל.

זה פותר את הבעיה שהזכרנו אבל עדיין זה לא מספיק משום שאנחנו נדרשים לבצע  $b$  פעולות/איטרציות כאשר  $b = \mathcal{O}(2^n)$  כלומר נקבל זמן ריצה אקספוננציאלי באורך הקלט  $n$ .

**טריק נפוץ ושימושי:** נחשב את הסדרה

$$a \bmod m, a^2 \bmod m, a^4 \bmod m, \dots, a^{2^n} \bmod m$$

סדרה בת  $n$  איברים

בשביל לחשב כל איבר בסדרה פשוט נעלה את קודמו בריבוע

$$(a^i \bmod m)^2 = a^{2i} \bmod m$$

נשים לב שמתכונות החשבון המודולרי תוצאת ה- $\bmod$  תהיה זהה גם אם נבצע אותה אחרי כל העלאה בריבוע, וכך נמנע מלבצע פעולות חשבוניות עם מספרים גדולים מדי. נקבל שלחישוב כל איבר נזדקק לפעולת כפל + פעולת  $\bmod$  (ששוות ערך לחילוק עם שארית) כלומר  $\mathcal{O}(n^2)$  פעולות

ולכן בסך הכל עבור ככל הסדרה נקבל שיזמן החישוב הוא  $\mathcal{O}(n^3)$  כעת נוכל לפרק את החזקה (בעזרת הייצוג הבינארי שלה) לסכום של חזקות של 2 כלומר

$$b = 2^{x_1} + 2^{x_2} + \dots$$

נקבל, אם כך, שנוכל לחשב את פעולת העלאה בחזקה בעזרת חישוב כפל של חזקות

$$a^b = a^{2^{x_1}} \cdot a^{2^{x_2}} \dots$$

גם כאן נכניס את פעולת ה  $\text{mod}$  פנימה ונקבל:

$$b = \sum 2^{x_k} \Rightarrow a^b \text{ mod } m = \prod_k (a^{2^{x_k}} \text{ mod } m)$$

**דוגמה:**

$$5^{13} \text{ mod } 7$$

$$5 \text{ mod } 7, \Rightarrow 5^2 = 25 \text{ mod } 7 = 4 \Rightarrow 5^4 = 4^2 = 2 \text{ mod } 7 \Rightarrow 5^8 = 2^2 = 4 \text{ mod } 7$$

$$5^{13} \text{ mod } 7 = 5^{\sum(2^3+2^2+2^0)} \text{ mod } 7 = 5^8 \cdot 5^4 \cdot 5^1 \text{ mod } 7 = 4 \cdot 2 \cdot 5 = 5 \text{ mod } 7$$

**זמן ריצה:**

- עיבוד ראשוני -  $\mathcal{O}(n^3)$  עבור חישוב הסדרה
- בכל שלב עבור כל  $2^{x_k}$  נבצע -

$$\left(\prod_{j=1}^{k-1} a^{2^{x_j}} \text{ mod } m\right)(a^{2^{x_k}} \text{ mod } m) \text{ mod } m$$

כאשר הכופל השמאלי הוא מה שחושב עד כה והימני הוא החישוב הבא המבוקש

- ולכן מדובר בכל שלב בכפל  $\text{mod} +$  סה"כ  $\mathcal{O}(n^3)$

## PRIMES

ישנן שתי בעיות קרובות אבל שונות מאוד בתחום של ראשוניות:

1. בדיקת ראשוניות (*PRIMES*) - בהינתן  $m \in \mathbb{N}$  האם הוא ראשוני?
2. פירוק לגורמים (*FACTORING*) - בהינתן  $m \in \mathbb{N}$ , פריק, מצא גורם של  $m$  בהנתן אלגוריתם שפותר את בעיה 2 נוכל למצוא בעזרתו את כל הגורמים של  $m$  - נחלק במה שמצאנו ונפעיל את האלגוריתם על תוצאת החילוק.

בעיה 1 היא בעיה קלה - שיערו שזה כך, ואכן בשנת 2002 הוכח שהיא ב  $P$   
בעיה 2 לעומת זאת נחשבת בעיה קשה - לא ידוע על אלגוריתם שפותר אותה בזמן סביר.

- 1976:** אלגוריתם של *Miller* דטרמיניסטי ופולינומי  
*Miller* הוכיח שהאלגוריתם נכון אם השערת רימן המוכללת נכונה
- 1977:** אלגוריתם של *Solovay – Shostak* רנדומי, פולינומי, נכון ללא הנחות  
הם הראו ש  $PRIMES \in CO - RP$   
*CO - RP* - אלגוריתמים בעלי אפשרות רנדומית לטעות חד-צדדית.  
כלומר במקרה שלנו - אם  $m$  ראשוני - האלגוריתם יחזיר "כן" תמיד, אם הוא פריק -  
האלגוריתם יחזיר "לא" בהסתברות  $\frac{1}{2} \leq$   
אם חוזרים  $k$  פעמים על האלגוריתם על  $m$  נתון, ההסתברות שנחזיר בכל הפעמים "כן"  
כאשר למעשה  $m$  פריק היא  $\left(\frac{1}{2}\right)^k \geq$
- 1980:** *Miller – Rabin* אלגוריתם ב  $CO - RP$  (כלומר עם שגיאה הסתברותית חד צדדית),  
יעיל יותר (דרגת הפולינום נמוכה יותר), נכון ללא הנחות
- 1992:** *Adelman – Hung* אלגוריתם  $ZPP$  כלומר רנדומי במובן הזה שהוא תמיד מחזיר  
תשובה נכונה ותוחלת זמן הריצה היא פולינומית  
הערה: נניח שתוחלת זמן הריצה  $n^c$  נקבל מאי-שוויון מרקוב  $Pr[run - time \geq 2n^c] \leq \frac{1}{2}$   
ולכן אם נריץ את האלגוריתם  $k$  פעמים כל פעם במשך  $2n^c$  צעדים ההסתברות שאף  
ריצה לא תעצור בזמן הזה היא  $\left(\frac{1}{2}\right)^k \geq$
- 2001:** *Agrawal, Kayal, Saxena* הוכיחו ש  $PRIMES \in P$

### מציאת מספר ראשוני

הרעיון הכללי: נגדיל מספר באורך  $m$  ביטים ונריץ אלגוריתם לבדיקת ראשוניות, אם התשובה  
היא "כן" נחזיר את  $m$ .

### משפט המספרים הראשוניים: נגדיר

$$\pi(x) = |\{p | p \leq x, p \text{ is prime}\}|$$

אזי

$$\pi(x) = (1 + o(1)) \frac{x}{\ln(x)}$$

ומכאן שבין  $x$  ל- $2x$  יש  $(1 + o(1)) \frac{x}{\ln(x)}$  ראשוניים

כלומר אם נגדיל מספר שלם  $2^n \leq m \leq 2^{n+1}$  נקבל ש

$$Pr[m \text{ is prime}] = \frac{(1 + o(1)) \frac{2^n}{\ln(2^n)}}{2^n} = (1 + o(1)) \frac{1}{n \ln(2)}$$

אם נבצע  $kn$  חזרות ההסתברות להצלחה באחת מהן היא

$$1 - Pr[failor] = 1 - \left(1 - \frac{1 + o(1)}{n \ln 2}\right)^{kn} \geq 1 - \left(e^{-\frac{1 + o(1)}{n \ln 2}}\right)^{kn} = 1 - \left(e^{-\frac{1 + o(1)}{\ln 2}}\right)^k > 1 - \left(\frac{1}{4}\right)^k$$

**השערה:** השערת Cramer - הפער המקסימלי בין שני ראשוניים עוקבים באורך  $n$  ביים הוא  $O(n^2)$

התוצאה הכי טובה בדרך להוכחת ההשערה היא שהפער לא גדול מ  $\frac{1}{n} 2^{\frac{n}{2}} \approx$

### אלגוריתם $CO - RP$ לבדיקת ראשוניות

עד פשוט לפריקות:  $m$  פריק  $\Leftrightarrow$  קיים  $0 < a < m$  כך ש  $GCD(a, m) \neq 1$   
 דוגמה: אם  $m = pq$  כאשר  $p, q$  ראשוניים באורך  $n$   $(2^{2n} \approx m, 2^n \approx p, q)$  כמה עדים יהיו?

$$m \text{ מתוך } p + q + 2 \Leftarrow \begin{cases} p, 2p, \dots, (q-1)p \\ q, 2q, \dots, (p-1)q \end{cases}$$

כלומר אם נגדיל מספר, ההסתברות שנפגע בעד היא בערך  $O(\frac{1}{2^n}) = O(\frac{2 \cdot 2^n}{2^{2n}})$  - לא יעיל!

**משפט:** משפט פרמה הקטן

אם  $p$  ראשוני אזי לכל  $1 < a < p-1$  מתקיים  $a^{p-1} \equiv 1 \pmod{p}$

**הוכחה:** נבחר  $1 < a < p-1$  ונסתכל על הקבוצה

$$A = \{a \cdot i \pmod{p} \mid i = 1 \dots p-1\}$$

$\mathbb{Z}_p$  שדה  $\Leftarrow$  אם  $i, j \in \mathbb{Z}_p$  כך ש

$$i \equiv j \pmod{p} \Leftarrow (i-j)a \equiv 0 \pmod{p} \Leftarrow (i-j)a \equiv 0 \Leftarrow ia \equiv ja$$

מנימוק דומה ניתן להראות שכל אברי הקבוצה שונים מ0 ולכן למעשה אברי  $A$  הם כל המספרים  $1, \dots, p-1$  בפרמוטציה כלשהי ומכאן

$$0 \neq \prod_{i=1}^{p-1} i \equiv \prod_{i=1}^{p-1} ai \equiv a^{p-1} \prod_{i=1}^{p-1} i \pmod{p}$$

השוויון \* נובע מכך שבשדה מכפלה של אברים שאינם אפס בהכרח שונה מאפס. מאחר ואנחנו בשדה לכל איבר קיים הופכי ולכן נוכל להכפיל ב  $\left(\prod_{i=1}^{p-1} i\right)^{-1}$  ולקבל

$$a^{p-1} \equiv \left(\prod_{i=1}^{p-1} i\right) \left(\prod_{i=1}^{p-1} i\right)^{-1} \equiv 1 \pmod{p}$$

צינו מקודם שאם  $m$  פריק קיים  $0 < a < m$  כך ש  $GCD(a, m) \neq 1$  ובפרט

$$a^{m-1} \not\equiv 1 \pmod{m}$$

כי אם  $c|a, m$  נקבל

$$\forall j, k : c|a^k - jm \Rightarrow c|a^k \pmod{m}$$

כלומר מחזקות של  $a$  נקבל תמיד מספר שמחלק את  $c$  (מודולו  $m$ ) ולא נקבל 1

**שאלה:** בעזרת הטענה אפשר לשלול ראשוניות באופן חד משמעי (אם היא לא מתקיימת עבור  $a$  כלשהו) אבל מה יקרה אם  $m$  למעשה פריק? אז יתכן מצב שבו קיים  $a$  שיקיים את השקילות  $a^{m-1} \equiv 1 \pmod{m}$ . נרצה לוודא שאם המספר פריק בדיקת השקילות של משפט פרמה תכשל בסבירות גבוהה.  
אם כך נשאל - מה קורה אם קיים  $a$  כך ש

$$\text{GCD}(a, m) = 1$$

ובנוסף  $a$  הוא עד לפריקות על פי פרמה כלומר

$$a^{m-1} \not\equiv 1 \pmod{m}$$

או במילים אחרות  $a$  אמנם זר ל  $m$  ולכן לא יכול להפריך את הראשוניות של  $m$  באופן הנאיבי שהצענו אבל מצד שני הוא כן מפריך את הראשוניות על פי פרמה:

**למה:** אם קיים  $a$  כך ש  $\text{GCD}(a, m) = 1$  ובנוסף  $a^{m-1} \not\equiv 1 \pmod{m}$  אזי לפחות חצי מהמספרים  $b \in \{1, \dots, m-1\}$  מקיימים גם  $b^{m-1} \not\equiv 1 \pmod{m}$

**הוכחה:** נניח שקיים  $a$  כזה ונגדיר

$$X = \{1 \leq x \leq m-1 \mid x^{m-1} \not\equiv 1 \pmod{m}\}$$

נסמן את שאר האיברים בטווח

$$Y = \{1 \leq y \leq m-1 \mid y^{m-1} \equiv 1 \pmod{m}\}$$

נראה ש  $|Y| < |X|$  על ידי המיפוי החד-חד-ערכי מ  $Y$  ל- $X$  הבא:

$$y \in Y \mapsto ay \pmod{m}$$

נראה תחילה שזו אכן מעתיקה איברים מ  $Y$  ל- $X$

$$(ay)^{m-1} \equiv a^{m-1}y^{m-1} \equiv a^{m-1} \not\equiv 1 \pmod{m} \Rightarrow ay \in X$$

הראנו בעבר שגם אם  $\mathbb{Z}_m$  לא שדה עבור  $a$  כך ש  $\text{GCD}(a, m) = 1$  קיים הופכי ב  $\mathbb{Z}_m$  נשתמש בעובדה זו כדי להראות את החד-חד-ערכיות של ההעתקה שהגדרנו

$$ay \equiv az \pmod{m} \Rightarrow a^{-1}ay \equiv a^{-1}az \pmod{m} \Rightarrow y \equiv z \pmod{m}$$

**מסקנה:** אם קיים  $a$  שהינו עד שסותר את משפט פרמה הקטן אבל הוא זק ל- $m$  אזי יש "הרבה" כאלה (יותר מ  $\frac{1}{2}$ ) עדים כאלה.  
ולכן נוכל להגדיר את האלגוריתם הבא:

: *Not - Quite - Miller - Rabin(m)*

• נגדיר  $a \in \{1, \dots, m-1\}$  ונבדוק

- אם  $a^{m-1} \equiv 1 \pmod{m}$  : נחזיר "כן"



– אחרת : נחזיר "לא"

אם  $m$  ראשוני אז על פי משפט פרמה הקטן תנאי הבדיקה יהיה תמיד חיובי ולכן תמיד נזהה נכון ונחזיר "כן"

אם  $m$  פריק אז - או שתנאי הבדיקה של משפט פרמה הקטן יכשל ונזהה נכון את  $m$  כפריק או שבמקרה ניפול על  $a \in Y$  כלומר  $a^{m-1} \equiv 1 \pmod{m}$  ואז נטעה ונחשוב ש  $m$  ראשוני. אבל הראנו שהסיכוי שהאפשרות השניה תקרה היא קטנה מ  $\frac{1}{2}$  כלומר במקרה ש  $m$  פריק נחזיר תשובה נכונה בהסתברות  $\frac{1}{2} \leq$ .

5.11.15

**הגדרה:** מספרי קרמייקל *Carmichael* מספר  $m \in \mathbb{N}$  כך שלכל  $a$  ש  $GCD(a, m) = 1$  ומתקיים  $a^{m-1} \equiv 1 \pmod{m}$  כלומר זהו מספר שאין עבורו עדים מהסוג של משפט פרמה הקטן ועבורתם האלגוריתם שתיארנו יכשל בסבירות 1 (ולא  $\frac{1}{2}$  כפי שרצינו).

**בעיה:** יש אינסוף מספרי קרמייקל למרות שהם נדירים

**משפט:** עבור  $n$  ביטים

$$Pr[m \text{ is Carmichael number}] \leq e^{-\Omega\left(n \frac{\log(\log(n))}{\log(n)}\right)}$$

לעומת זאת

$$Pr[m \text{ is prime}] = \Theta\left(\frac{1}{n}\right)$$

ולכן האלגוריתם שראינו מספיק טוב כדי להגריל ולהיות מספר ראשוני בהסתברות גבוה מאוד. אם נפלטו על ראשוני אז מצוין. אם נפלטו על סתם מספר פריק בהרבה הרצות של הבדיקה נקבל סיכוי נמוך מאוד שנטעה ונחשוב שהוא ראשוני והסיכוי שכל הבדיקה נכשלה כי נפלטו על מספר קרמייקל הוא גם קלוש כי הם ממש נדירים.

אבל בתור אלגוריתם לבדיקה של מספר נתון זה לא מספיק, כי כאשר כבר נתון מספר לא מעניינת אותנו ההסתברות לקבל דווקא אותו ואם נפלטו על אחד בעייתי ניכשל בוודאות בלי קשר לכמה פעמים נבדוק. לכן הוסיפו באלגוריתם שלב של בדיקה שמזהה מספרי קרמייקל.

**אבחנה:** אם  $p$  ראשוני

ומתקיים  $x^2 \equiv 1 \pmod{p}$  אז:

$$(x+1)(x-1) = x^2 - 1 \equiv 0 \pmod{p}$$

ומראשוניות  $p$

$$p|(x+1)(x-1) \Rightarrow p|x+1 \text{ or } p|x-1 \Rightarrow x \equiv \pm 1 \pmod{p}$$

ולכן עד נוסף לפריקות  $m$  :  $a < m$  כך ש  $a^2 \equiv 1 \pmod{m}$  אבל  $a \not\equiv \pm 1 \pmod{m}$

וכעת

*Miller – Rabin(m)*

- נגדיל באופן אחיד  $a \in \{1, \dots, m-1\}$

- אם  $a^{m-1} \not\equiv 1 \pmod m$  : נחזיר "לא"

- אחרת (כלומר  $a^{m-1} \equiv 1 \pmod m$ )

– נכתוב  $m-1 = 2^t q$  עבור  $t \in \mathbb{N}$  ו  $q$  אי-זוגי

– נחשב את הסדרה

$$a_0 = a^q \pmod m, a_1 = a^{2q} \pmod m, \dots, a_t = a^{2^t q} \pmod m = a^{m-1} \pmod m = 1$$

– לכל הסדרה: אם קיים  $j \in \{1, \dots, t\}$  כך ש  $a_j = 1$  ו  $a_{j-1} \neq \pm 1$  : נחזיר "לא"

– אחרת : נחזיר "כן"

**הסבר לצעד הנוסף:** אם קיים  $j$  כמו שמתואר בצעד כלומר קיים

$$a_j = a^{2^j q} = \left(a^{2^{j-1} q}\right)^2 = 1 \pmod m$$

ובנוסף

$$a^{2^{t-1} q} = a_{j-1} \neq 1 \pmod m$$

ולכן  $a_{j-1}$  הוא עד לפריקות כפי שהראנו מקודם.

**משפט:** אם  $m$  מספר קרמייקל אזי הבדיקה הנוספת תחזיר "לא" בהסתברות  $\frac{3}{4}$  (וללא הוכחה)

**זמן ריצה:**

- חישוב  $\mathcal{O}(n^3) : a^m \pmod m$

- לחשב  $\mathcal{O}(n^3) : a_0 = a^q \pmod m$

- חישוב  $\mathcal{O}(n^2) : a_j = a_{j-1} \cdot a_{j-1} \pmod m$  ונבצע זאת מספר פעמים :  $t \leq \log(m) = \mathcal{O}(n)$

ולכן סב"כ -  $\mathcal{O}(n^3)$

## קריפטוגרפיה

הצפנה במובן הקלאסי דורשת מפתח שבעזרתו ניתן להצפין הודעות ולפענח אותם. הצפנה שכזאת מכונה - הצפנה סימטרית.

בשנת 1977 פרסמו *Diffie, Hellman* מאמר ובו העלו את הרעיון שניתן לבנות מערכות הצפנה שאינן סימטריות הם אף תיארו פרוטוקול ראשוני בעל אופי לא סימטרי.

סכימה כללית של פרוטוקול הצפנה במפתח ציבורי:

1. בוריס מייצר (לפי אלגוריתם אקראי) את המפתחות  $(e, d)$  כאשר  $d = \text{private key}$ ,  $e = \text{public key}$

2. בוריס מפרסם את  $e$  ושומר אצלו את  $d$

3. אנסטסיה מצפינה את המסר  $x$  באמצעות  $E(x, e) = y$

4. בוריס מפענח את המסר  $y$  באמצעות  $D(y, d) = x$

**הנחת הקושי:** אי אפשר לגלות את  $x$  בהסתברות סבירה בלי  $d$

**הנחה יותר פורמלית (ויותר מחמירה):** לכל אלגוריתם  $A$  ולכל שתי הודעות  $x_1, x_2$  מתקיים<sup>1</sup>

$$\Pr[A(E(x_1, e), e) = 1] \approx \Pr[A(E(x_2, e), e) = 1]$$

*RSA*

8.11.15

ייצור המפתחות:

- בוריס מגדיל באקראי שני מספרים ראשוניים גדולים  $p, q$  ומחשב  $N = p \cdot q$
- בוחר  $e$  כך ש  $\text{GCD}(e, (p-1)(q-1)) = 1$
- מחשב באמצעות האלגוריתם של אוקלידס את  $d$  כך ש  $ed = 1 \bmod (p-1)(q-1)$
- מפרסם את  $(N, e)$
- שומר לעצמו את  $(d)$
- אנסטסיה רוצה לשלוח לבוריס את ההודעה  $x$ :
- מצפינה את  $x$  באופן הבא  $y = x^e \bmod N$
- שולחת לבוריס את  $y$
- בוריס רוצה לפענח:
- מחשב את  $y^d \bmod N$
- טענה:  $y^d \bmod N = x$

**הוכחה קצרה ולא סחומרי:** גודל החבורה  $\mathbb{Z}_N^*$  (חבורת המספרים הזרים ל  $N$ ) היא  $\varphi(N) = (p-1)(q-1)$  ועל פי משפט מתורת החבורות

$$\forall a, b \in \mathbb{Z}_N^* : a^b \equiv a^{b \bmod \varphi(N)} \bmod N$$

ולכן מאחר ו  $ed = 1 \bmod \varphi(N)$  נקבל

$$y^d = (x^e)^d = x^{ed} \equiv x^1 \equiv x \bmod N$$

<sup>1</sup>למעשה יש הגדרה עוד יותר פורמלית שמגדירה במדויק מה הכוונה  $\approx$

הוכחה קצרה פחות וכן בחומר: לפי המשפט הקטן של פרמה

$$x^{p-1} = 1 \mod p, \quad x^{q-1} = 1 \mod q$$

ולכן

$$ed = 1 \mod (p-1)(q-1) \Rightarrow ed = 1 + c(p-1)(q-1)$$

$$\Rightarrow y^d = (x^e)^d = x^{ed} = x^{1+c(p-1)(q-1)} = x(x^{p-1})^{c(q-1)}$$

אבל  $x^{p-1} = 1 \mod p$  ולכן

$$\Rightarrow x^{ed} = x \cdot 1^{c(q-1)} \mod p = x \mod p$$

באותו אופן נקבל

$$x^{ed} = x \mod q$$

ומכאן נקבל ש  $x^{ed} - x$  מתחלק ב- $p$  וגם ב- $q$  ומאחר והם ראשוניים הוא מתחלק גם במכפלה  $pq = N$  ולכן בסה"כ

$$x^{ed} - x = 0 \mod N \Rightarrow x^{ed} = x \mod N \quad \blacksquare$$

אם יבגני (שמצוטט לקו ומנסה להבין מה המסר שעבר מאנסטסיה לבוריס) ידע לפרק את  $N$  אזי הוא יוכל לעשות את אותם חישובים בדיוק כמו בוריס ולפענח את המסר המוצפן.

**הנחת קושי:** בהינתן  $y, e, N$  קשה לחשב את  $x$  בלי לדעת את  $d$  (לא קיימת הוכחה<sup>2</sup>)

## הפרד ומשול

### כפל מספרים

נרצה לנסות לחסוך בפעולות הדרושות לשם חישוב כפל.

נתבונן אם כך בשני מספרים בינאריים מאורך  $a, b - 2^n$

נחלק כל אחד מהם לשרשור של שני חלקים שווים:

$$a = a_1 a_2 = \overbrace{\dots a_1 \dots}^{n/2 \text{ bits}} \overbrace{\dots a_2 \dots}^{n/2 \text{ bits}} = a_1 \cdot 2^{\frac{n}{2}} + a_2$$

$$b = b_1 b_2 = \overbrace{\dots b_1 \dots}^{n/2 \text{ bits}} \overbrace{\dots b_2 \dots}^{n/2 \text{ bits}} = b_1 \cdot 2^{\frac{n}{2}} + b_2$$

---

<sup>2</sup>בתרגיל בית ראינו את "הצפנת רבין" ועבורה הראנו שקילות לבעיית הפירוק לגורמים

והכפל ביניהם יתן

$$a \cdot b = a_1 b_1 2^n + (a_1 b_2 + a_2 b_1) 2^{\frac{n}{2}} + a_2 b_2$$

נשים לב שהכפלה ב- $2^k$  פירושה הזזה של תוצאת הכפל ב- $k$  ביטים. פעולה לא משמעותית מבחינת זמן הריצה.

הרעיון הוא לנסות לבצע ברקורסיה את הכפל בין החצאים השונים. אלא שבמצב הנוכחי בכל שלב ברקורסיה נבצע 4 קריאות רקורסיביות

$$1. a_1 b_1 \quad 2. a_1 b_2 \quad 3. a_2 b_1 \quad 4. a_2 b_2$$

ונקבל בדיוק את אותו זמן ריצה כמו באלגוריתם הנאיבי שאנו מכירים (נראה את חישוב זמן הריצה בהמשך).

אבל נשים לב שמתקיים

$$a_1 b_2 + a_2 b_1 = (a_1 + a_2)(b_1 + b_2) - a_1 b_1 - a_2 b_2$$

ואת  $a_1 b_2$  ואת  $a_2 b_1$  אנו מחשבים ממילא ולכן נוכל בעזרת השוויון הזה לחסוך קריאה רקורסיבית אחת.

**אלגוריתם קרצובה**  $Karatsuba(a, b, n)$ :

• אם  $n = 1$ : נחזיר את  $a \cdot b$

• אחרת:

– נחלק את  $a, b$  ל  $a_1, a_2, b_1, b_2$  כמו שתיארנו למעלה (מדובר בסך הכל בכמה פועלות הזזה)

– נחשבת רקורסיבית:

$$k_1 \leftarrow Karatsuba\left(a_1, b_1, \frac{n}{2}\right)$$

$$k_2 \leftarrow Karatsuba\left(a_2, b_2, \frac{n}{2}\right)$$

$$k_3 \leftarrow Karatsuba\left((a_1 + a_2), (b_1 + b_2), \frac{n}{2}\right)$$

– ונחזיר

$$k_2 + 2^n k_1 + 2^{\frac{n}{2}} (k_3 - k_2 - k_1)$$

זמן ריצה:

קריאה אחת בלי רקורסיה:  $\mathcal{O}(n)$

עבור הקריאות הרקורסיביות:

נסמן ב  $T(n)$  את זמן הריצה עבור מספר באורך  $n$  נקבל

$$T(n) = 3T\left(\frac{n}{2}\right) + \mathcal{O}(n)$$

בכל שלב ברקורסיה נקרא ל-3 קריאות. מאחר ובכל קריאה אנחנו מחלקים את  $n$  ב-2 עומק הרקורסיה יהיה  $\log_2(n)$

לא נחשב במדויק (ראינו בעבר שיטות איך לעשות זאת) אלא נתאר באופן כללי עץ קריאות רקורסיביות. לכל קודקוד בעץ יהיו 3 בנים ועומק העץ יהיה  $\log_2(n)$  ולכן מספר העלים יהיה

$$3^{\log_2(n)} = n^{\log_2 3} \approx n^{1.584}$$

זמן הריצה שכל קודקוד מתאר הוא למעשה סכום של הבנים שלו ועוד זמן לינארי שלא משפיע על החישוב. לכן נקבל שזמן הריצה הסופי שווה אסימפטוטית למספר העלים כלומר

$$T(n) = \mathcal{O}(n^{\log_2 3}) \approx \mathcal{O}(n^{1.584})$$

שזה שיפור לעומת ה- $\mathcal{O}(n^2)$

מאז נעשו עוד שיפורים בזמן הריצה. האלגוריתם הכי יעיל שידוע כיום הוא של 2007 של *Fürer* שרץ בזמן -  $\mathcal{O}(n \cdot \log(n) \cdot 2^{\Theta(\log^*(n))})$

## מכפלת מטריצות

יהיו  $A, B$  מטריצות  $n \times n$  נרצה לייעל את זמן הריצה של פעולת ההכפלה ביניהם.

יש  $n^2$  תוצאות שצריך לחשב ולכן זמן הריצה יהיה לכל הפחות  $n^2$ .

אלגוריתם נאיבי - לכל תא במטריצה נבצע את הכפלת השורה והעמודה המתאימות כלומר נבצע  $\mathcal{O}(n)$  פעולות כאורך עמודה/שורה. בסה"כ נקבל  $\mathcal{O}(n^3)$  עבור כל החישוב.

ננסה לצמצם את מספר הפעולות באופן הדומה לזה שראינו באלגוריתם קרצובה.

יהיו  $X, Y$  נחלק אותם ל-4 מטריצות בלוקים כל אחד בגודל  $n/2 \times n/2$

$$X = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix}, Y = \begin{pmatrix} E & F \\ G & H \end{pmatrix}$$

תוצאת הכפל תהיה בייצוג הזה

$$XY = \begin{pmatrix} AE + BG & AF + BH \\ CE + DG & CF + DH \end{pmatrix}$$

<sup>3</sup>נשים לב שאם לא היינו מצמצמים אלא נשארים עם 4 קריאות רקורסיביות בכל שלב היינו מקבלים זמן ריצה  $\mathcal{O}(4^{\log_2 n}) = \mathcal{O}(n^{\log_2 4}) = \mathcal{O}(n^2)$  כלומר זהה לאלגוריתם הנאיבי.

אם ננסה כעת לחשב ברקורסיה את כל המכפלות נקבל 8 קריאות רקורסיביות בדומה לחישוב שראינו לגבי כפל מספרים נקבל זמן ריצה

$$\mathcal{O}(8^{\log_2 n}) = \mathcal{O}(n^{\log_2 8}) = \mathcal{O}(n^3)$$

כמו באלגוריתם הנאיבי. משום כך ננסה לצמצם את מספר הקריאות, אפילו הורדה של קריאה אחת כבר תהווה שיפור בזמן הריצה.

**אלגוריתם שטראסן 1969 – Strassen:**

•

$$P_1 = A(F - H), P_2 = (A + B)H, P_3 = (C + D)E, P_4 = D(G + E),$$

$$P_5 = (A + D)(E + H), P_6 = (B - D)(G + H), P_7 = (A - C)(E + F)$$

• והתוצאה תתקבל על ידי

$$XY = \begin{pmatrix} P_4 + P_5 + P_6 - P_2 & P_1 + P_2 \\ P_3 + P_4 & P_4 + P_5 - P_7 \end{pmatrix}$$

**זמן ריצה:** אחרי האלגוריתם של שטראסן התקבלו הרבה מאוד תוצאות ושיפורים וצמח תחום שלם של אלגוריתמים לחישוב כפל מטריצות. ובעקבות זאת החליטו לתת סימון מיוחד כדי לסמן את זמני הריצה של אלגוריתמים בתחום  $\omega$ .  
האלגוריתם שראינו עכשיו נותן  $\omega = \log_2 7$   
בשנים שאחרי התקבלו התוצאות הבאות

$$\omega = 2.796, 2.78, 2.548, 2.5222, 2.517, 2.416, 2.409, 2.376$$

התוצאה האחרונה ברשימה התקבלה בסוף שנות ה-80 ומאז במשך שנים אף אחד לא הצליח לשפר. לפני 4 שנים Williams הצליחה להשיג  $\omega = 2.3727$  [התברר אחרי זה שמאסטרנט בשם Stathers הצליח כמה חודשים לפני להשיג  $\omega = 2.3275$  אבל אף אחד לא שמע על זה כי הוא לא טרח לפרסם את זה כמו שצריך]

## כפל פולינומים והתמרת פורייה

12.11.15

נתונים שני פולינומים ממשיים נדרגה  $n \geq$

$$a(x) = \sum_{i=0}^n a_i x^i, \quad b(x) = \sum_{i=0}^n b_i x^i$$

הייצוג של הפולינומים, שהוא למעשה הנתון שלנו, יהיה, בשלב זה, על ידי סדרת המקדמים של הפולינום. כלומר נתונות לנו שתי סדרות של מקדמים מששיים.

רוצים למצוא את המכפלה שלהם

$$a(x)b(x) = c(x) = \sum_{i=0}^n c_i x^i$$

כלומר רוצים למצוא את סדרת המקדמים  $\{c_0, \dots, c_n\}$  כך ש

$$c_k = \sum_{j=0}^k a_j b_{k-j}$$

אם נחשב כל מקדם באופן הנאיבי הזה, עבור כל מקדם  $c_k$  נבצע  $\mathcal{O}(k)$  פעולות כפל. מאחר ויש  $\mathcal{O}(n)$  מקדמים נקבל בסה"כ

$$1 + 2 + \dots + n = \mathcal{O}(n^2)$$

נשים לב לפער בין מספר פעולות הכפל שקיבלנו לבין אורך הפלט (באופן כללי אורך הפלט מהווה חסם תחתון לזמן הריצה, שהרי המינימום אותו יש לעשות הוא להדפיס את הפלט. הרבה פעמים לא ניתן להגיע ממש עד לחסם התחתון הזה אבל ננסה כמה שניתן לצמצם את הפער עד אליו).

אנו נראה איך ניתן לשפר את התוצאה הזאת עד כדי  $\mathcal{O}(n \cdot \log(n))$  בעזרת מושג שנקרא "התמרת פורייה".

כדי להתעסק בנושא נתחיל בתזכורת/מבוא על פונקציות מרוכבות:

### פונקציות מרוכבות - על רגל אחת

אנו מתעסקים במרחב המספרים המרוכבים

$$\mathbb{C} = \{a + bi \mid a, b \in \mathbb{R}, i = \sqrt{-1}\}$$

נוסחת אויילר אומרת ש-

$$e^{i\pi} - 1 = 0$$

למה זה נכון? נתבונן בטור טיילור של פונקציית האקספוננט

$$e^x = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{x^n}{n!}$$

נזכור שמתקיים

$$i^0 = 1, i^1 = i, i^2 = -1,$$

$$i^3 = -1 \cdot i = -i, i^4 = -i \cdot i = -(-1) = 1$$

ולכן אם נציב בפונקציה  $xi$  נקבל

$$e^{xi} = \frac{(xi)^0}{1} + \frac{(xi)^1}{1} + \frac{(xi)^2}{2} + \frac{(xi)^3}{6} + \frac{(xi)^4}{24} \dots$$



$$= \frac{x^0}{1} 1 + \frac{x^1}{1} i + \frac{x^2}{2} (-1) + \frac{x^3}{6} (-i) + \frac{x^4}{24} 1 \dots$$

$$= \frac{x^0}{1} + \frac{x^1}{1} i - \frac{x^2}{2} - \frac{x^3}{6} i + \frac{x^4}{24} \dots$$

נפריד את הסכום לשניים - האיברים שמוכפלים ב  $i$  ואלה שלא

$$e^{xi} = \begin{cases} \frac{1}{1} - \frac{x^2}{2} + \frac{x^4}{4!} + \dots \\ + \left( \frac{x}{1} - \frac{x^3}{3!} + \frac{x^5}{5!} + \dots \right) i \end{cases}$$

ואלה למעשה טורי טיילור של פונקציות  $\cos(x)$  ו  $\sin(x)$  ולכן

$$e^{xi} = \cos(x) + i \cdot \sin(x)$$

או בסימון מקוצר

$$e^{xi} = cis(x)$$

כעת אם נציב  $x = \pi$  נקבל

$$e^{\pi i} = \cos(\pi) + i \cdot \sin(\pi) = -1 + i \cdot 0 = -1$$

באופן מקביל אפשר להתייחס אל  $r \cdot e^{\theta i}$  בתור דרך הצגה אחרת של מספרים מרוכבים. אפשר לראות כל מספר מרוכב כנקודה במישור המרוכב הדו-מימדי. לכל נקודה כזאת נתבונן בישר ממנה לראשית הצירים (המספר המרוכב  $0 + 0i$ ) ונסמן ב  $\theta$  את הזווית מהישר לציר  $x$  וב  $r$  את האורך של הישר. במילים אחרות, המהראשית על הציר הממשי ("ציר  $x$ ") לפי  $r$  ואז "מסתובבים" בזווית  $\theta$ . הצגה זו  $(r, \theta)$  נקראית - "הצגה פולרית" או "הצגה קובטית".

אם נעשה את החשבון (לא נעשה אותו כעת) נוכל לראות שהמעבר מהצגה זו להצגה ה"רגילה" של  $a + bi$  ממירה נקודה בייצוג פולרי  $(r, \theta)$  לנקודה

$$r(\cos(\theta) + i \cdot \sin(\theta)) = r \cdot e^{\theta i}$$

אם נתייחס למקרה הפרטי בו  $r = 1$  נקבל ש  $e^{xi}$  מייצג למעשה נקודות על מעגל היחידה (המרחק  $r$  מהראשית הוא 1, הזווית היא המשתנה).

הבצעה הזאת כפל של מספרים מרוכבים נעשה פשוט וברור יותר

$$z_1 = r_1 \cdot cis(\theta_1), \quad z_2 = r_2 \cdot cis(\theta_2)$$

$$z_1 \cdot z_2 = r_1 \cdot e^{\theta_1 i} \cdot r_2 \cdot e^{\theta_2 i} = (r_1 r_2) e^{(\theta_1 + \theta_2) i} = (r_1 r_2) cis(\theta_1 + \theta_2)$$

ובאותו אופן נקבל שהעלאה בריבוע של  $e^{\theta i}$  תיתן

$$e^{\theta i} \cdot e^{\theta i} = e^{2\theta i}$$

אם נחזור לפרשנות הגיאומטרית שהכזרנו למעלה, המשמעות של פעולת העלאה בריבוע היא סיבוב של נקודה על מעגל היחידה, זווית הסיבוב היא  $\theta$ <sup>4</sup>.  
באופן כללי נוכל להראות באינדוקציה שהעלאה בחזקה היא

$$(e^{\theta i})^n = e^{n\theta i}$$

**הערה:** ההצגה לא יחידה שהרי

$$r \cdot e^{\theta i} = r \cdot e^{(2\pi k + \theta)i}$$

עבור חזקות שלמות (כלומר  $(r \cdot e^{\theta i})^n$  כאשר  $n \in \mathbb{Z}$ ) נקבל ש

$$(r \cdot e^{\theta i})^n = r^n \cdot e^{n\theta i} = r^n \cdot e^{2\pi n k + n\theta i} = (r \cdot e^{2\pi k + \theta i})^n$$

ולכן יש לנו סוג של "סגירות" תחת  $2\pi k$  ולכן חוסר היחידות לא באמת מהווה בעיה.  
אבל עבור חזקות לא שלמות נקבל שיש לנו בעיה של הגדרה, למעשה ההצגה הזאת לא לגמרי מוגדרת היטב.

ערך מוחלט מוגדר כ<sup>5</sup>

$$|z| = \begin{cases} |a + bi| & = \sqrt{a^2 + b^2} = \sqrt{z \cdot \bar{z}} \\ |r \cdot cis(\theta)| & = r \end{cases}$$

אפשר לומר שהערך המוחלט מודד את המרחק מהמספר 0 ולכן, בהתאם להסבר הגיאומטרי לעיל, מתבקש שאכן בהצגה הזאת נקבל שהוא פשוט שווה ל  $r$ .

**הגדרה:** פולינום מרוכב

עבור  $\theta$ - פרמטר קבוע כלשהו. נסמן

$$x = e^{\theta i}$$

נקבל ש

$$x^k = e^{k\theta i}$$

נשים לב שעבור "סיבוב" אחד של  $x$  על מעגל היחידה  $x^k$  יבצע  $k$  "סיבובים". כלומר עבור הערכים  $\theta \in [0, 2\pi]$  שעבורם המשתנה  $x$  יתן את כל הערכים על מעגל היחידה פעם אחת,  $x^k$  יתן את כל הערכים, כל אחד  $k$  פעמים.

**העשרה**

**המשפט היסודי של האלגברה (עבור  $\mathbb{C}$ )** לכל פולינום  $p(x) \in \mathbb{R}[x]$  (פולינום עם מקדמים מ  $\mathbb{R}$ ) יש שורש. כלומר קיים  $x_0$  כך ש  $p(x_0) = 0$

ההוכחה תושלם כשיהיה לי זמן (זה לא חלק מהחומר פשוט עדן אמר ש"חבל לדלג על זה. זאת הכוחה ממש יפה")

**הערה:** המבוא הזה, להבנתו, לא לגמרי נחוץ כדי להבין איך ולמה אלגוריתם  $FFT$  עובד. למי שאין כוח להתעמק בהקשר הרחב יותר של התמרת פורייה אפשר לדלג עד הכותרת "בחזרה לפולינומים"

נתעסק במרחב הוקטורי של פונקציות מהסוג

$$f : [-\pi, \pi] \rightarrow \mathbb{R}$$

כאשר חיבור פונקציות מוגדר

$$(f + g)(x) = f(x) + g(x)$$

וכפל בסקלר באופן דומה

$$(\lambda f)(x) = \lambda \cdot f(x)$$

**הגדרה:** מרחב מטרי הוא מרחב שבו הוספנו פונקציית מרחק בין איברים במרחב (מטרי מלשון "מטר" כלומר דרך למדוד מרחקים)

**תזכורת:** מרחב מכפלה פנימית הוא מרחב וקטורי שהוספנו לו אפשרות של כפל בעל תכונות מסויימות המכונה "מכפלה פנימית".

המכפלה הפנימית מאפשר גם למדוד אורכים/גדלים של איברים במרחב. גודל זה נקרא "נורמה".

ניתן להגדיר פונקציית מרחק/מטריקה בעזרת הנורמה - המרחק בין איברים יוגדר להיות ההפרש בין הנורמות.

**במקרה שלנו:** המכפלה הפנימית מוגדרת להיות<sup>6</sup>

$$\langle f, g \rangle = \int_{-\pi}^{\pi} f(x) g(x) dx$$

המטריקה שמקבלים ממכפלה פנימית זו נקראית מטריקה  $L_2$  (עבור פונקציות)

והיא מוגדרת באופן הבא

$$\|f - g\|_2 = \sqrt{\int_{-\pi}^{\pi} |f(x) - g(x)|^2 dx}$$

והיא למעשה מהווה הרחבה (עבור פונקציות) של פונקציית המרחק האוקלידית המוכרת בין שתי נקודות במרחב דו-מימדי.

<sup>4</sup>עבור מספר מרוכב כללי  $r \cdot e^{\theta i}$  העלאה בריבוע תגרום לסיבוב הנקודה באווית  $\theta$  ובנוסף להגדלת המרחק מהראשית

פי  $r$

<sup>5</sup>נסמן ב  $\bar{z}$  את המספר ה"צמוד" ל  $z$ . כלומר  $\bar{z} = a - bi$  כאשר  $z = a + bi$

<sup>6</sup>ההגדרה היא רק עבור  $[-\pi, \pi]$  כי צמצמנו את המרחב לתחום הזה בלבד

**משפט:** אם נצמצם את המרחב לפונקציות "נחמדות"<sup>7</sup> אזי ניתן להגדיר למרחב בסיס אורתונורמלי<sup>8</sup> מהצורה

$$\frac{1}{2\sqrt{\pi}}, \frac{1}{\sqrt{\pi}} \cos x, \frac{1}{\sqrt{\pi}} \sin x, \frac{1}{\sqrt{\pi}} \cos(2x), \frac{1}{\sqrt{\pi}} \sin(2x), \dots$$

או בכתוב אחר

$$B = \left\{ \frac{1}{2\sqrt{\pi}} \right\} \cup \left\{ \frac{1}{\sqrt{\pi}} \cos(nx) \mid n \in \mathbb{N} \right\} \cup \left\{ \frac{1}{\sqrt{\pi}} \sin(nx) \mid n \in \mathbb{N} \right\}$$

המשמעות היא שכל פונקציה "נחמדה" ניתן לייצג כסכום של  $\frac{1}{2\sqrt{\pi}}$  ופונקציות מהצורה  $\frac{1}{\sqrt{\pi}} \cos(nx), \frac{1}{\sqrt{\pi}} \sin(nx)$  למעשה כפי שראינו באלגברה ניתן גם לבטא הצגה זו באופן מפורש

$$\begin{aligned} f(x) &= \left( \int_{-\pi}^{\pi} \frac{1}{2\sqrt{\pi}} f(t) dt \right) \frac{1}{2\sqrt{\pi}} + \\ &\sum_{n=1}^{\infty} \left( \int_{-\pi}^{\pi} \frac{1}{\sqrt{\pi}} \cos(nt) f(t) dt \right) \frac{1}{\sqrt{\pi}} \cos(nx) + \\ &\sum_{n=1}^{\infty} \left( \int_{-\pi}^{\pi} \frac{1}{\sqrt{\pi}} \sin(nt) f(t) dt \right) \frac{1}{\sqrt{\pi}} \sin(nx) \end{aligned}$$

טור פורייה

תזכורת: כאשר עסקנו בכפל פולינומים ראינו ש

$$a(x)b(x) = \sum c_k x^k$$

כאשר

$$c_k = \sum_{i=0}^k a_i b_{k-i}$$

ורצינו למצוא את המקדמים  $c_k$

המטרה שלנו היא לנסות להמיר את הפולינומים שלנו לייצוג של טורי פורייה (נראה תקף מה זה) ובמקרה הזה יהיה לנו הרבה יותר קל לחשב את המקדמים.

ראינו ש  $e^{xi} = \cos(x) + i \cdot \sin(x)$  על ידי העברת אגפים ועל פי זהויות טריגונומטריות נקבל ש

$$\cos(x) = \frac{e^{xi} - e^{-xi}}{2}, \sin(x) = \frac{e^{xi} - e^{-xi}}{2i}$$

<sup>7</sup>חשומות, אינטגרליות ובעלות מספר סופי של נקודות אירציות וקיצון  
<sup>8</sup>נשים לב שהמרחב, בניגוד לרוב המרחבים שהתעסקנו בהם באלגברה, הוא אינסוף מימדי, ולכן גם הבסיס יהיה אינסופי

נציב ערכים אלו בהצגה שראינו מקודם של  $f(x)$  ונקבל

$$f(x) = \frac{1}{2\sqrt{\pi}} \sum_{n=-\infty}^{\infty} c_n e^{nxi}$$

כאשר

$$c_n = \int_{-\pi}^{\pi} e^{-nti} f(t) dt$$

הערה: הפונקציה שמקבלת  $f$  ומחזירה פונקציה  $F(n) := c_n$  נקראת התמרת פורייה כדי להרחיב את ההגדרה ולייצג פונקציה מהצורה  $f: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$  מה שעושים זה להגדיר פונקציה מהצורה  $f: [-k, k] \rightarrow \mathbb{R}$  ומשאיפים את  $k$  לאינסוף. לאחר חישובים רבים שנוותר עליהם מקבלים ש

$$f(x) = \int_{-\infty}^{\infty} \hat{f}(\xi) e^{-2\pi xi\xi} d\xi$$

כאשר

$$\hat{f}(\xi) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) e^{2\pi xi\xi} dx$$

הגדרה: קונבולוציה

יהיו  $f, g$  פונקציות הקונבולוציה של  $f$  ו  $g$  מוגדרת להיות

$$(f \star g)(x) = \int_{-\infty}^{\infty} f(y) g(x-y) dy$$

אפשר להסתכל על קונבולוציה כעל מעין הרחבה של כפל טורים למקרה הרציף.  
משפט: משפט הקונבולוציה

$$(\hat{f}g)(\xi) = (\hat{f} \star \hat{g})(\xi)$$

$$(f \star \hat{g})(\xi) = (\hat{f}\hat{g})(\xi)$$

(ניסוח אחר אבל מעט שונה אומר שהתמרת פורייה של קונבולוציה של שתי פונקציות שווה למכפלת ההתמרות)  
כפי שנראה בהמשך

## בחזרה לפולינומים

למה: לכל  $x_1, \dots, x_d$  שונים זה מזה ו  $y_1, \dots, y_d$  (לאו דווקא שונים) קיים פולינום יחיד מדרגה  $d-1$  כך ש

$$\forall 1 \leq k \leq d : p(x_k) = y_k$$

מקרה פרטי של הלמה הזאת - בין כל שתי נקודות  $(x_1, y_1), (x_2, y_2)$  עובר קו ישר אחד (פולינום ממעלה 1)

מסקנה: ניתן לייצג פולינום ממעלה  $n$  על ידי רשימה של  $x_1, \dots, x_{n+1}$  שונים זה מזה ורשימה של ערך הפולינום עבור ערכי  $x_i$  אלו.

נשים לב שעבור שני פולינומים  $a(x), b(x)$  ותוצאות המכפלה שלהם  $a(x)b(x) = c(x)$  נחשב בנקודה מסויימת את הערך של  $y_a = a(x_0)$  ואת הערך של  $y_b = b(x_0)$  הערך שנקבל מהפולינום  $c(x)$  בנקודה זו שווה למכפלת התוצאות כלומר

$$c(x_0) = y_a y_b$$

ולכן אם נמיר את הייצוג הנוכחי של הפולינום כרשימת מקדמים לייצוג כרשימת ערכים (עבור רשימת  $x$ -ים שנבחרו מראש) נוכל לקבל את  $c(x)$  בייצוג כרשימת ערכים בקלות רבה.

אם נבחר את רשימת ה- $x$ ים באופן אקראי, חישוב ערך פולינום ממעלה  $n$  בנקודה  $x_0$  כלשהי דורש  $\mathcal{O}(n)$  פעולות העלאה בחזקה ו  $\mathcal{O}(n)$  פעולות חיבור. אפילו אם נתייחס אל העלאה בחזקה בתור פעולה בזמן  $\mathcal{O}(1)$  עדיין נקבל שעלינו לבצע  $\mathcal{O}(n)$  פעולות לכל  $x_i$  ויש לנו  $n+1$  כאלה ולכן נקבל לכל הפחות  $\mathcal{O}(n^2)$  כמו באלגוריתם הנאיבי.

הטריק הוא צריך למצוא רשימת  $x$ -ים שתאפשר לנו חישוב מהיר של ערכי  $a(x), b(x)$  עבורם. בהינתן פולינום נפצל אותו לחזקות זוגיות וחזקות אי-זוגיות

$$\begin{aligned} a(x) &= a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 + \dots \\ &= (a_0 + a_2x^2 + a_4x^4 + \dots) \\ &\quad + (a_1x + a_3x^3 + a_5x^5 + \dots) \\ &= (a_0 + a_2x^2 + a_4x^4 + \dots) \\ &\quad + x(a_1 + a_3x^2 + a_5x^4 + \dots) \\ &= (a_0 + a_2(x^2) + a_4(x^2)^2 + \dots) \\ &\quad + x(a_1 + a_3(x^2) + a_5(x^2)^2 + \dots) \end{aligned}$$

כפי שניתן לראות קיבלנו בתור הסוגריים שני פולינומים שהמשתנה בהם הוא  $x^2$  נקרא לראשון  $a_{even}(x)$  ולשני  $a_{odd}(x)$ . כלומר

$$a_{odd}(x) = a_0 + a_2x + a_4x^2 + \dots$$

$$a_{even}(x) = a_1 + a_3x + a_5x^2 + \dots$$

הפולינום שלנו מתקבל מהם באופן הבא

$$a(x) = a_{even}(x^2) + x \cdot a_{odd}(x^2)$$

בכך פיצלנו את  $a(x)$  לשני פולינומים צדרגה  $\geq \frac{n}{2}$ . השלב הבא והמתבקש יהיה להשתמש ברקורסיה כדי לחשב את הערכים עבור הפולינומים החדשים.

כעת נשים לב שמאחר והמשתנה של הפולינומים החדשים הוא  $x^2$  הם נותנים את אותו ערך עבור  $\pm x_0$  לכל  $x_0$ . משום כך אם נרכיב את רשימת ה- $x$ ים שלנו מזוגות של מספרים הופכיים, נצטרך לחשב רק חצי מהערכים ונחסוך זמן. אילו  $x$ ים נבחר?

נתבונן במקרים הבסיסיים:

אם  $n = 1$  נבחר  $x_1 = 1$

אם  $n = 2$  אז נבחר  $x_1 = 1, x_2 = -1$  וכפי שראינו נחסוך כד חצי מהפעולות על ידי רקורסיה.

אם  $n = 4$  אנו מעוניינים בזוגות של ערכים שכל זוג הוא מסוג  $\pm x$ . בנוסף נרצה לאפשר קריאה לרקורסיה כלומר אם  $x$  ברשימה נרצה לחשב את הפולינומים  $a_{\text{odd}}(x), a_{\text{even}}(x)$  עבור  $x^2$ . הפולינומים האלה הם מדרגה  $n = 2$  ולכן נרצה שעבורם נקבל את הערכים  $\pm 1$  כלומר נרצה ש  $x^2 = \pm 1$  ולכן נבחר

$$\begin{aligned} x^2 &= \pm 1 \\ \Rightarrow x_1, x_2 &= \sqrt{1} \\ x_3, x_4 &= \sqrt{-1} \\ \Rightarrow x_1 &= 1, x_2 = -1 \\ x_3 &= i, x_4 = -i \end{aligned}$$

כאמור בחרנו ב  $n = 2$  את  $\pm 1$  כלומר  $x$ ים המקיימים  $x^2 = 1$  ולכן במקרה של  $n = 4$  למעשה נבחר את 4 הערכים המקיימים

$$(x^2)^2 = x^4 = 1$$

או במילים אחרות נבחר את את השורשים מסדר 4 של 1 ב  $\mathbb{C}$ .

**הסבר איטואיטיבי למה שהולך לקרות עכשיו** - כמו שאנחנו רואים במקרים הפרטיים שהצגנו עכשיו, נרצה לפעול באופן רקורסיבי. ההפעלה של הפולינום על ערך  $x$  שקולה להפעלה של שני פולינומים (אחרים, מדרגה קטנה ממנו פי 2) על  $x^2$ . משום כך בכל כניסה פנימה ברקורסיה אנחנו מעלים בריבוע את ה- $x$ ים שלנו. מה שנרצה שיקרה הוא שבכל שלב נקבל ערכים שמתחלקים לזוגות מהצורה  $\pm x$  כך שכאשר נעלה אותם בריבוע בשלב הבא התוצאה של הפעלת הפולינום על  $(x)^2$  שווה לתוצאה של הפעלה שלו על  $(-x)^2$  ונוכל לחשב רק אחד מהם ונחסוך חצי מהחישוב בכל רמה.

בסיס הרקורסיה כמובן נבחר לחשב פולינום ממעלה 1 על המספר 1. לכן בשלב אחד לפני נבחר שני ערכים שאם נעלה אותם בריבוע נקבל 1 כלומר את השורשים הריבועיים של 1 שהם  $\pm 1$ . בשלב לפני כן נבחר את השורשים שלהם  $\pm 1, \pm i$  שהם למעשה השורשים של 1 מסדר 4 (כלומר  $\sqrt[4]{1}$ ) ובשלב לפני כן את השורשים שלהם וכן הלאה. אם כך אם נתחיל מפולינום דרגה  $n$ , נניח ש  $n$  חזקה כלשהי של 2, נבחר בתור ערכים התחלתיים את  $\vec{x} = \sqrt[n]{1}$  (נזכור שזו רשימה של  $n$  ערכים) וכאשר נקרא לרקורסיה ונעלה אותם בריבוע נקבל את  $\vec{x}^2 = \sqrt[n]{1}$  וכך נמשיך עד שנגיע לבסיס הרקורסיה 1 כפי שרצינו.

באופן פחות איטואיטיבי ויותר פורמלי עבור  $n$  כלשהו נבחר את  $n$  השורשים מסדר  $n$  של 1. לשם כך נגדיר:

$$\omega = e^{\frac{1}{n}2\pi i}$$

כזכור הפרשנות הגיאומטרית של  $e^{xi}$  היא נקודה על מעגל היחידה בזווית  $x$  ולכן מאחר זווית  $2\pi$  מתארת מעגל שלם  $x = 2\pi/n$  מתארת זווית שהיא  $\frac{1}{n}$  ממעגל שלם. נשים לב שמתקיים

$$\omega^k = \left( e^{\frac{1}{n}2\pi i} \right)^k = e^{\frac{k}{n}2\pi i}$$

וקיבלנו, בדומה להסבר הקודם, זווית שהיא  $\frac{n}{k}$  ממעגל שלם. ולכן אם נתבונן בקבוצה

$$\{\omega^k | k = 0, \dots, n-1\}$$

נקבל בעצם חלוקה של מעגל היחידה ל- $n$  חלקים כאשר הקבוצה היא אוסף הנקודות על המעגל המתאימות לחלוקה שכזאת.

לדוגמה - עבור  $n = 4$  נקבל פשוט חלוקה של המעגל ל-4 ולכן נקבל

$$\{e^{0i}, e^{\pi/2i}, e^{\pi i}, e^{3\pi/2i}\} = \{1, i, -1, -i\}$$

נבחר אם כן, בתור הרשימה  $x_0, \dots, x_{n-1}$  את הרשימה  $\omega^0, \dots, \omega^{n-1}$ . עבור  $x$  ימים אלו מתקיים:

1. הערכים מתחלקים לזוגות כלומר לכל  $x^k$  קיים  $x^j$  יחיד שעבורו  $-x^k = x^j$

$$x_{k+\frac{n}{2}} = \omega^{k+\frac{n}{2}} = \omega^k \omega^{\frac{n}{2}} = \omega^k e^{\frac{n}{2} \frac{1}{n} 2\pi i} = \omega^k e^{\pi i} = -\omega^k = -x_k$$

2. גם אם נעלה בריבוע את הסדרה היא עדיין תתחלק לזוגות. כלומר לכל  $(x^k)^2$  קיים איבר בסדרה  $x^j$  כך ש  $(x^j)^2 = -(x^k)^2$ . נשים לב שכאשר אנו מעלים בריבוע את כל אברי הסדרה, בגלל תכונה 1 ומאחר ו  $x = -y \Rightarrow x^2 = y^2$  נקבל סדרה קצרה בחצי מזו שהיית לנו (בהנחה שאנחנו לא סופרים כפילויות).

#### בחזרה לכפל פולינומים

19.11.15

נתון פולינום

$$a(x) = a_0 + a_1x + \dots + a_{n-1}x^{n-1}$$

כזכור רצינו לבחור  $x_0, \dots, x_{n-1}$  ולחשב את

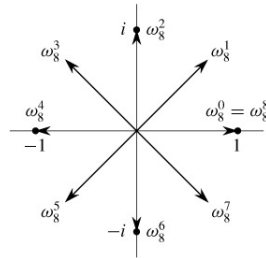
$$\forall 0 \leq i \leq n-1 : A_i = a(x_i)$$

ובחרנו את

$$x_k = \omega^k = e^{\frac{2\pi i}{n}k}$$



כאשר  $\omega$  הוא שורש יחידה מסדר  $n$  והסדרה למעשה יוצרת "חלוקה" של מעגל היחידה ל- $n$  חלקים



איור 1: דוגמה עבור  $n = 8$

נציב כעת ערך זה בפולינום ונקבל

$$A_k = a(\omega^k) = a\left(e^{\frac{2\pi i}{n}k}\right) = \sum_{j=0}^{n-1} a_j \left(e^{\frac{2\pi i}{n}k}\right)^j$$

9

כפי שראינו ניתן להציג את הפולינום כצירוף של שני פולינומים במשתנה  $x^2$

$$a(x) = a_{\text{even}}(x^2) + x \cdot a_{\text{odd}}(x^2)$$

עבור  $x = \omega^k$  נקבל

$$a(\omega^k) = a_{\text{even}}\left((\omega^k)^2\right) + \omega^k \cdot a_{\text{odd}}\left((\omega^k)^2\right)$$

מאחר ו- $\omega$  הוא שורש יחידה מסדר  $n$   $\omega^2$  הוא שורש יחידה מסדר  $\frac{n}{2}$  ולכן כפי שראינו מתקיים

$$(\omega^k)^2 = (\omega^2)^k = (\omega^2)^{k+\frac{n}{2}} = (\omega^{k+\frac{n}{2}})^2$$

ולכן כאשר נרצה לחשב את  $a(\omega^k)$  נחשב רקורסיבית את  $a_{\text{even}}\left((\omega^k)^2\right)$ ,  $a_{\text{odd}}\left((\omega^k)^2\right)$  כאשר בקריאה הרקורסיבית

$$a_{\text{even}}\left((\omega^2)^k\right) = a_{\text{even}}\left((\omega^2)^{k+\frac{n}{2}}\right)$$

$$a_{\text{odd}}\left((\omega^2)^k\right) = a_{\text{odd}}\left((\omega^2)^{k+\frac{n}{2}}\right)$$

---

<sup>9</sup>תזכורת (למי שראה) בטורי פורייה מקדמי פורייה היו דומים למדי לביטוי הזה

$$\hat{f}(k) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) e^{-2\pi k i x} dx$$

ומכאן הקשר להתמרת פורייה. אנו עושים שימוש במשהו שדומה לגרסה דיסקרטית של התמרת פורייה

מאחר ואנו מעוניינים לחשב את

$$a_{even} \left( (\omega^2)^k \right), a_{odd} \left( (\omega^2)^k \right), \quad k = 0, \dots, n-1$$

נוכל לחשב

$$a_{even} \left( (\omega^2)^k \right), a_{odd} \left( (\omega^2)^k \right), \quad k = 0, \dots, \frac{n}{2} - 1$$

ונקבל "בחינם", על פי השיויון הקודם, את

$$a_{even} \left( (\omega^2)^k \right), a_{odd} \left( (\omega^2)^k \right), \quad k = \frac{n}{2}, \dots, n-1$$

ומכאן נקבל את

$$a(\omega^k) = a_{even} \left( (\omega^k)^2 \right) + \omega^k \cdot a_{odd} \left( (\omega^k)^2 \right), \quad k = 0, \dots, n-1$$

ובאופן הזה נחסוך חצי מהקריאות.

**אלגוריתם**  $FFT(a(\cdot), \omega)$

כאשר  $a(\cdot)$  נתון כסדרה של מקדמים.  $\omega = e^{\frac{2\pi i}{n}k}$  כאשר  $n$  = מספר המקדמים.

- אם  $\omega = 1 = e^{\frac{2\pi i}{1}k}$  : כלומר  $a(\cdot) = a_0$  ולכן נחזיר את  $a_0$
- אחרת :

– נקרא ל  $FFT(a_{even}(\cdot), \omega^2)$  נקבל חזרה את

$$a_{even} \left( (\omega^2)^0 \right), a_{even} \left( (\omega^2)^1 \right), \dots, a_{even} \left( (\omega^2)^{\frac{n}{2}-1} \right)$$

– נקרא ל  $FFT(a_{odd}(\cdot), \omega^2)$  נקבל חזרה את

$$a_{odd} \left( (\omega^2)^0 \right), a_{odd} \left( (\omega^2)^1 \right), \dots, a_{odd} \left( (\omega^2)^{\frac{n}{2}-1} \right)$$

– כעת עבור  $k = 0, \dots, n-1$  נחשב ונחזיר:

$$a(\omega^k) \leftarrow a_{even} \left( (\omega^2)^k \right) + \omega^k \cdot a_{odd} \left( (\omega^2)^k \right)$$

כאשר את הערכים  $k = \frac{n}{2}, \dots, n-1$  מתקבלים ע"י

$$a_{even} \left( (\omega^2)^k \right) = a_{even} \left( (\omega^2)^{k+\frac{n}{2}} \right)$$

$$a_{odd} \left( (\omega^2)^k \right) = a_{odd} \left( (\omega^2)^{k+\frac{n}{2}} \right)$$

**ניתוח:** נסמן את מספר הקריאות הרקורסיביות עבור  $n$  ב  $T(n)$ . בכל שלב יש שתי קריאות רקורסיביות לחישוב  $a_{\text{even}}(\omega^2)$ ,  $a_{\text{odd}}(\omega^2)$ . כפי שראינו בכל אחת מהקריאות מספר הקריאות הנדרשות לצורך החישוב קטנות בחצי. כאשר אנו קוראים ל  $a_{\text{even}}(\omega^2)$  אנו נדרשים לחשב רק עבור  $k = 0, \dots, \frac{n}{2} - 1$ . מלבד זאת בכל שלב עלינו לחשב את הסכום  $a_{\text{even}}((\omega^2)^k) + \omega^k \cdot a_{\text{odd}}((\omega^2)^k)$  עבור  $k = 0, \dots, n - 1$  כלומר  $\mathcal{O}(n)$  פעולות בכל שלב מעבר לקריאות הרקורסיביות. ולכן

$$T(n) = 2T\left(\frac{n}{2}\right) + \mathcal{O}(n) \Rightarrow T(n) = \mathcal{O}(n \cdot \log(n))$$

דרך אחרת להבין את המעבר אחרון אפשר לראות שבכל שלב  $n$  קטן בחצי ולכן עומק הרקורסיה הוא  $\log(n)$ . בכל רמה של עץ הרקורסיה יש 2 קריאות כל אחת מהן מגודל  $\frac{n}{2}$  ולכן כל רמה לוקחת  $\mathcal{O}(n)$  ולכן סה"כ כל הרמות יחד נקבל  $\mathcal{O}(n \cdot \log(n))$

כעת, לאחר שחישבנו את ערכם של  $a(\cdot)$  ו  $b(\cdot)$  ב  $n$  נקודות שונים, נוכל לחשב את  $c(\cdot)$  ב  $a(\cdot)$  ו  $b(\cdot)$  באותם נקודות. כעת כל שנותר הוא לחשב את המקדמים של  $c(\cdot)$  מתוך רשימה של  $n$  ערכים. כלומר, מה שנותר לעשות הוא אינטרפולציה.

נסמן ב  $FFT^{-1}$  את הפעולה ההפוכה מקבלים שערכים (מה הפולינום, שאיננו ידוע, מחזיר עבור רשימה של  $x$ ) ומחזירים את מקדמי הפולינום. נראה בהמשך ש  $FFT^{-1}$  רצה באותו זמן ריצה של  $FFT$ .

נסכם את כל מה שראינו ונתאר את האלגוריתם השלם להכפלת פולינומים:

#### אלגוריתם כפל פולינומים

קלט: פולינומים  $a(\cdot)$ ,  $b(\cdot)$  מדרגה  $d \geq$

- נפעיל  $FFT$  על  $a(\cdot)$ ,  $b(\cdot)$  ונקבל הערכה שלהם על  $n$  נקודות  $x$  בזמן  $\mathcal{O}(n \cdot \log(n))$  (נבהיר בהמשך מי זה  $n$ )
- נחשב  $c(\omega^i) = a(\omega^i) b(\omega^i)$ ,  $i = 0, \dots, n - 1$  בזמן  $\mathcal{O}(n)$
- נפעיל  $FFT^{-1}$  על רשימת השערכים של  $c(\cdot)$  שקיבלנו ונקבל את מקדמי  $c(\cdot)$  בזמן  $\mathcal{O}(n \cdot \log(n))$

**בסך הכל:** זמן ריצה  $\mathcal{O}(n \cdot \log(n))$

**הערה:**  $c(\cdot)$  מדרגה  $2d \geq$  ולכן (ממשפט האינטרפולציה שראינו) כדי לקבל אותו עלינו למצוא  $2d + 1$  שערכים שלו. מצד שני,  $FFT$  עובד עם שערוך של מספר נקודות שהוא חזקה שלמה של 2. כלומר  $n$  מספר הנקודות (שאותו נכניס כקלט של  $FFT$ ) צריך להיות  $2^k$  המינימלי כך ש

$$2d + 1 \leq 2^k = n$$

במקרה הכי גרוע  $2d + 1$  גדול ב1 מחזקה שלמה של 2 (ולכן הפער עד החזקה הבאה הוא מקסימלי). במצב כזה  $2d = 2^k$  עבור  $k$  כלשהו ולכן

$$2d + 1 = 2^k + 1 \Rightarrow n = 2^{k+1} = 2 \cdot 2^k = 2(2d) = 4d$$

כלומר גם במקרה גרוע

$$n = \mathcal{O}(d)$$

ומשום כך זמן הריצה שקיבלנו שקול לזמן ריצה

$$\mathcal{O}(d \cdot \log(d))$$

$$FFT^{-1}$$

**סימון:**  $C_k$  (אות גדולה) מסמל ערך שמתקבל כאשר מציבים  $\omega^k$  בפולינום  $c(\cdot)$ .  $c_k$  (אות קטנה) מסמל את המקדם ה- $k$  בפולינום  $c(\cdot)$ .

כזכור קיבלנו  $C_0, \dots, C_{n-1}$  כאשר  $C_k = c(\omega^k)$  ואנו רוצים למצוא את  $c_0, \dots, c_{n-1}$ . נכתוב את הפולינום באופן מפורש

$$c(\cdot) = \sum_{j=0}^{n-1} c_j x^j$$

והנתון שלנו משמעותו ש

$$c(\omega^0) = \sum_{j=0}^{n-1} c_j (\omega^0)^j = c_0 + c_1 + \dots + c_{n-1} = C_0$$

$$c(\omega^1) = \sum_{j=0}^{n-1} c_j (\omega^1)^j = c_0 + c_1 \omega + \dots + c_{n-1} \omega^{n-1} = C_1$$

$$c(\omega^2) = \sum_{j=0}^{n-1} c_j (\omega^2)^j = c_0 + c_1 \omega^2 + \dots + c_{n-1} (\omega^2)^{n-1} = C_1$$

...

$$c(\omega^{n-1}) = \sum_{j=0}^{n-1} c_j (\omega^{n-1})^j = c_0 + c_1 \omega^{n-1} + \dots + c_{n-1} (\omega^{n-1})^{n-1} = C_{n-1}$$

קיבלנו  $n$  משוואות לינאריות ב  $n$  נעלמים  $c_0, \dots, c_{n-1}$  ולכן נוכל לכתוב בכתוב אלגברי

$$\begin{pmatrix} C_0 \\ C_1 \\ \vdots \\ C_{n-1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & \cdot & \cdot & \cdot & 1 \\ 1 & \omega & \omega^2 & \cdot & \cdot & \cdot & \omega^{n-1} \\ 1 & \omega^2 & \omega^4 & \cdot & \cdot & \cdot & (\omega^2)^{n-1} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 1 & \omega^{n-1} & (\omega^{n-1})^2 & \cdot & \cdot & \cdot & (\omega^{n-1})^{n-1} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} c_0 \\ c_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ c_{n-1} \end{pmatrix}$$

נשים לב שקיבלנו מטריצה  $n \times n$  שמזכירה מאוד את מטריצת ואן-דרמונדה נסמנה ב  $W$ . כדי לפתור את מערכת המשוואות ולקבל את  $c_0, \dots, c_{n-1}$  כל שעלינו לעשות הוא לעפוף את המטריצה  $W$  שקיבלנו. סתם כך להפוך מטריצה לוקח  $O(n^2)$  אלא שכאן מדובר במקרה מיוחד שבו אנו יודעים מה המטריצה ההופכית. מתקיים

$$\begin{pmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ 1 & \omega & \dots & \omega^{n-1} \\ 1 & \omega^2 & \dots & (\omega^2)^{n-1} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ 1 & \omega^{n-1} & \dots & (\omega^{n-1})^{n-1} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ 1 & \omega^{-1} & \dots & \omega^{-n+1} \\ 1 & \omega^{-2} & \dots & (\omega^{-2})^{n-1} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ 1 & \omega^{-n+1} & \dots & (\omega^{-n+1})^{n-1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} n & 0 & \dots & 0 \\ 0 & n & & \\ \vdots & & \ddots & \\ 0 & \dots & \dots & n \end{pmatrix}$$

**נימוק:** האברים על האלכסון מתקבלים מכפל של שורה ועמודה בעלי אינדקס זהה

$$\sum_{j=0}^{n-1} \omega^{kj} \omega^{-kj} = \sum_{j=0}^{n-1} \omega^0 = \sum_{j=0}^{n-1} 1 = n$$

שאר האיברים מתקבלים מכפל של עמודה  $k_1$  ושורה  $k_2$  כאשר  $k_1 \neq k_2$  נסמן את התוצאה ב  $s$

$$\sum_{j=0}^{n-1} \omega^{k_1 j} \omega^{-k_2 j} = \sum_{j=0}^{n-1} \omega^{j(k_1 - k_2)} = s$$

נחשב כעת

$$\begin{aligned} \omega^{k_1 - k_2} \cdot s &= \sum_{j=0}^{n-1} \omega^{j(k_1 - k_2)} \omega^{\omega^{k_1 - k_2}} = \sum_{j=0}^{n-1} \omega^{(j+1)(k_1 - k_2)} \\ &= [i = j + 1] = \sum_{i=0}^n \omega^{i(k_1 - k_2)} \end{aligned}$$

ולבסוף נחשב

$$(\omega^{k_1 - k_2} - 1) \cdot s = \omega^{k_1 - k_2} \cdot s - \omega^{k_1 - k_2} =$$

$$\sum_{i=0}^n \omega^{i(k_1 - k_2)} - \sum_{j=0}^{n-1} \omega^{j(k_1 - k_2)} = \omega^{n(k_1 - k_2)} - \omega^{0(k_1 - k_2)} = 0$$

המעבר האחרון נובע מכך  $\omega^{0(k_1 - k_2)} = 1$  ובנוסף מאחר ו  $\omega$  הינו שורש יחידה מסדר  $n$  נקבל

$$\omega^{n(k_1 - k_2)} = (\omega^n)^{(k_1 - k_2)} = 1^{(k_1 - k_2)} = 1$$

אבל הרי  $k_1 \neq k_2$  ושניהם מספרים בין 0 ל- $n-1$  ולכן  $0 < k_1 - k_2 < n$  ומכאן נקבל שבהכרח

$$\omega^{k_1 - k_2} - 1 \neq 0$$

אבל ראינו ש

$$(\omega^{k_1 - k_2} - 1) \cdot s = 0$$

ולכן המסקנה היא ש

$$\sum_{j=0}^{n-1} \omega^{j(k_1 - k_2)} = s = 0$$

### בחזרה לאלגוריתם למציאת המקדמים:

כדי לקבל את המקדמים  $c_0, \dots, c_{n-1}$  נחשב

$$\begin{pmatrix} c_0 \\ c_1 \\ \vdots \\ c_{n-1} \end{pmatrix} \leftarrow \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & \dots & 1 \\ 1 & \omega^{-1} & \omega^{-2} & \dots & \omega^{-n+1} \\ 1 & \omega^{-2} & \omega^{-4} & \dots & (\omega^{-2})^{n-1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & \omega^{-n+1} & (\omega^{-n+1})^2 & \dots & (\omega^{-n+1})^{n-1} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} C_0 \\ C_1 \\ \vdots \\ C_{n-1} \end{pmatrix}$$

כעת נשים לב שאם היינו רוצים לקבל את תוצאת המכפלה של המטריצה  $W$  בוקטור כלשהו המשמעות היא למעשה להפעיל  $FFT$  על הוקטור הזה (בתור וקטור של מקדמים של פולינום) וכך היינו מקבלים את תוצאת המכפלה באופן מהיר יותר. שהרי תוצאת  $FFT$  מקיימת את המשוואה האלגברית הראשונה שראינו.

באותה מידה נשים לב שנוכל לקבל את תוצאת ההכפלה של המטריצה  $W^{-1}$  בוקטור נתון ע"י הפעלה של  $FFT$  אלא שאת  $\omega$  נחליף ב- $\omega^{-1}$ .

$\omega^{-1}$  הוא גם שורש יחידה. אם נזכר במשמעות הגיאומטרית של  $\omega$  - חילקנו את מעגל היחידה ל  $n$  חלקים ו  $\omega$  הוא הנקודה הראשונה מעל הציר הממשי (זווית  $\frac{2\pi}{n}$ ) והחזקות שלו היו שאר הנקודות (חזקה  $k$  נמצאת בזווית  $\frac{2\pi}{n}k$ ). באותו אופן

$$\omega^{-1} = e^{-\frac{2\pi}{n}i} = e^{2\pi - \frac{2\pi}{n}} = e^{\frac{2\pi}{n}(n-1)} = \omega^{n-1}$$

במילים אחרות  $\omega^{-1}$  הוא הנקודה שנקבל אם נזז על מעגל היחידה בזווית  $\frac{2\pi}{n}$  כלפי "מטה" (בכיוון ההפוך לזה הלכנו כדי לקבל את  $\omega$ ) והחזקות שלו יתנו את אותם ערכים שקיבלנו מהחזקות של  $\omega$  בסדר הפוך. ולכן ניתן לבנות אלגוריתם  $FFT^{-1}$  באותו אופן בדיוק כמו  $FFT$  כאשר השינוי היחיד הוא שימוש ב- $\omega^{-1}$  במקום  $\omega$  (האלגוריתם זהה למעט החלפה זו).

מסקנה: השלב האחרון באלגוריתם הכפלת הפולינומים אכן דורש זמן  $\mathcal{O}(n \cdot \log(n))$  כפי שרצינו.

לצער, בשל קוצר זמן, אני לא אספיק לסכם את הנושא של זיווגים. מקווה אחרי המבחן לעשות את זה.

## תהליכים סטוכסטיים

6.10.15

### הגדרות בסיסיות:

- **תהליך סטוכסטי** (בדיד, סופי) הוא סדרה של משתנים מקריים  $X_0, X_1, \dots$  מעל קבוצה סופית של מצבים  $S$
- נאמר שלתהליך יש את **תכונת מרקוב** אם לכל  $i > 0$  המשתנה המקרי  $X_t | X_{t-1}$  בלתי תלוי בכל המשתנים  $X_0, \dots, X_{t-2}$  כלומר בכל "רגע" מה יהיה מצב הבא בתהליך תלוי אך ורק במצב שקדם לא (כאילו "לא זוכרים" את המצבים הקודמים)
- **שרשרת מרקוב** (*Markov Chain*) הינה תהליך סטוכסטי בעל תכונת מרקוב, כך שקיימים  $\{p_{ij} | i, j \in S\}$  כך שלכל  $t > 0$  מתקיים

$$Pr[X_t = j | X_{t-1} = i] = p_{ij}$$

כלומר לכל שני מצבים  $i, j \in S$  קיימת ההסתברות למעבר ממצב  $i$  למצב  $j$  והיא קבוע  $(p_{i,j})$  ולא תלויה בזמן שבו היא מתרחשת. כל שרשרת מרקוב ניתן להגדיר על ידי מטריצת מעברים, המטריצה תכיל את הערך  $p_{ij}$  בשורה  $i$  בעמודה  $j$ .

דוגמה:

### הילוך מקרי בגרף

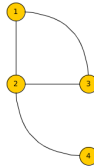
הסבר אינטואיטיבי - נתון גרף ונקודת התחלה. אנו מגדירים את ההסתברות למעבר בין כל שתי נקודות. כלומר לכל שני קודקודים  $u, v \in V$  בגרף נתייחס למאורע שהגענו איכשהו ל  $u$  ונקבע מה ההסתברות שבצעד הבא נלך ל  $v$ . באופן כזה נקבל סדרה של משתנים מקריים שכל אחד מהם  $X_i$  נותן לנו התפלגות מה ההסתברות להיות בכל אחד מהקודקודים בצעד ה  $i$ .

פורמלית - נתון גרף  $G = \langle V, E \rangle$  נגדיר את המצבים להיות הקודקודים  $S = V$  ומטריצת המעברים תהיה  $P = \{p_{u,v}\}_{u,v \in V}$  כאשר

$$p_{u,v} = \begin{cases} 0 & (u,v) \notin E \\ \frac{1}{deg(u)} & (u,v) \in E \end{cases}$$

כלומר מכל קודקוד  $u$  ההסתברות להתקדם בצעד הבא אל קודקוד שאיננו מחובר אליו בקשת הינה 0 לעומת זאת ההסתברות להתקדם אל כל אחד מהקודקודים שכן מחוברים אליו בקשת מתפלגת באופן אחיד.

**דוגמה לדוגמה:** עבור הגרף הבא



איור 2: גרף לדוגמה

נקבל את מטריצת המעברים

$$P = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & 0 \\ \frac{1}{3} & 0 & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

כל סדרת משתנים מקריים כזאת, מוגדרת היטב על ידי התפלגות המצב הראשון  $X_0$  ומטריצת המעברים (למעשה נראה עוד מעט שמההתפלגות הראשונה, המייצגת את ההסתברות להמצאות בכל מצב ברגע הראשון, ההתפלגות אחרי  $n$  צעדים, תתקבל ע"י הכפלת  $X_0$  במטריצה  $n$  פעמים).

**הבהרה:** הוקטורים שאנו עוסקים בהם מייצגים התפלגות על המצבים. כלומר בוקטור  $X_0$  לדוגמה הערך במקום ה- $j$  מסמן את הסיכוי להיות במצב  $j$  בזמן 0 (כלומר הסיכוי שנתחיל את הסדרה מהמצב  $j$ ).

באופן פורמלי לכל סדרת מצבים  $\sigma_0, \dots, \sigma_n$  נוכל לשאול מה ההסתברות שזה המסלול שנעבור ב- $n$  הצעדים הראשונים ונקבל

$$Pr[X_0 = \sigma_0, \dots, X_n = \sigma_n] = Pr[X_0 = \sigma_0] \cdot \prod_{t=1}^n p_{\sigma_{t-1}, \sigma_t}$$

**הגדרה:** שרשרת מרקוב המוגדרת על ידי מטריצת המעברים  $P$  היא אי-פריקה אם לכל  $i, j \in S$  יש מסלול עם הסתברות חיובית מ- $i$  ל- $j$  לפי  $P$

בדוגמה של הילוך מקרי בגרף ההגדרה הזאת שקולה לדרישה שהגרף יהיה קשיר

**נשים לב:** בהינתן מצב, אם נסכום את ההסתברויות למעבר ממנו לשאר המצבים, מהגדרה של הסתברות נקבל 1. במילים אחרות לכל  $i$  מתקיים

$$\sum_{j \in S} p_{i,j} = 1$$



בכתיב אלגברי יותר - מאחר והכפלה בוקטור אחדות בעצם מחזירה את הסכום בכל שורה, והסכום הזה הרי שווה ל 1 ולכן

$$P \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ 1 \end{bmatrix} \Rightarrow (P - I) \begin{bmatrix} 1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ 1 \end{bmatrix} = 0$$

**למה 1:**  $rank(P - I) = n - 1$  כאשר  $n = |S|$  והשרשרת-מרקוב היא אי־פריקה

**טענת עזר:** לכל  $x = (x_1, \dots, x_n) \in \mathbb{R}^n$  אם  $(P - I)x = 0$  אזי  $x_1 = x_2 = \dots = x_n$  כלומר לא רק שוקטור האחדות מאפס את  $P - I$  כמו שראינו הוא גם היחיד (עד כדי כפל בסקלר)

אם נוכיח את טענת העזר נוכל להוכיח את הלמה תוך שימוש במשפט מאלגברה (מימד הגרעין- $n$  = דרגת מטריצה)

$$\dim(ker(P - I)) = 1 \Rightarrow rank(P - I) = n - \dim(ker(P - I)) = n - 1$$

**טריק שימושי:** פונקציות הרמוניות

תהי  $f : \{1, \dots, n\} \rightarrow \mathbb{R}$  ונתון כי

$$\forall t \in \{1, \dots, n\} : f(t) = \frac{f(t+1) - f(t)}{2}$$

וכמו כן מספרים לנו שבנקודה  $k$  הפונקציה מקבל מקסימום כלומר  $argmax(f) = k$  אזי בהכרח

$$f(k+1) = f(k) = f(k-1)$$

**הסבר:** הערך בכל נקודה הוא הממוצע של שני הערכים השכנים לו. עבור נקודה  $k$  שבה נקבל מקסימום - אם אחד השכנים קטן ממנה השכן השני היה צריך להיות גדול ממנה כדי לאזן (שהרי ממוצע של שני מספרים נמצא תמיד בין שניהם), מאחר ו  $k$  מקסימלי הרי אין שכן שגדול ממנו ולכן האפשרות היחידה היא שאף אחד מהם גם לא קטן ממנו אלא שניהם שווים לו.

הטענה נכונה באופן מקביל גם למינימום של  $f$

**מסקנה:** בקצוות הקטע, הפונקציה מקבלת מקסימום או מינימום

$$Px = x \text{ או במילים אחרות } (P - I)x = 0 \text{ ש } x = \begin{bmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} \text{ יהי בחזרה להוכחת הטענה:}$$

נקבל

$$\forall i \ x_i = (p_1, \dots, p_n) \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} = \sum_j p_{ij} x_j$$

כלומר  $x_i$  הוא "ממוצע משוקלל" של השכנים של  $i$ . כאשר אנו מגדירים "שכן" כמצב  $j$  כך שהסתברות לעבור מ  $i$  ל  $j$  חיובית -  $\{x_j | p_{ij} > 0\}$ .  
ומכאן - בהינתן  $i_0 \in S$  כך ש

$$x_{i_0} = \max_j (x_j)$$

לכל  $j$  שהינו "שכן" של  $i_0$  כלומר  $p_{i_0 j} > 0$  מתקיים

$$x_j = x_{i_0} = \max_i (x_i)$$

כי אחרת אם קיים "שכן" של  $i_0$ , כלומר מצב  $j$  שהסתברות למעבר מ  $i_0$  אליו היא חיובית, כך ש  $x_j < x_{i_0}$  אזי כדי "לאזן" את הממוצע המשוקלל שיהיה שווה ל  $x_{i_0}$  חייב להיות שכן אחר של  $i_0$  שמקיים  $x_{j'} > x_{i_0}$  בסתירה למקסימליות של  $x_{i_0}$ .  
כיוון שהשרשרת היא אי-פריקה לכל מצב  $j \in S$  קיים מסלול, בעל הסתברות חיובית להתרחשות, מ  $i_0$  עד אליו. משום כך לכל  $j \in S$ , מאותו הטיעון היינו מקבלים באינקודציה שהערך של כל השכנים של  $x_{i_0}$  שווה לערך של  $\max(x_i) = x_{i_0}$  והערך של כל השכנים שלהם גם שווה לזה וכן הלאה עד ל  $x_j$ , כלומר קיבלנו ש

$$\forall j \in S \ x_j = x_{i_0} (= \max(x_i))$$

ובסה"כ נקבל

$$x_1 = \dots = x_n$$

**נשים לב:** אם בזמן  $t$  ההתפלגות של המשתנה המקרי  $X_t$  נתונה על ידי  $q = (q_1, \dots, q_n)$  כאשר  $Pr[X_t = i] = q_i$

אזי בזמן  $t + 1$  ההתפלגות של  $X_{t+1}$  היא  $qP$

**הסבר:** נסמן  $qP = (q'_1, \dots, q'_n)$  מתקיים<sup>10</sup>

$$q'_j = q \cdot \begin{bmatrix} p_{1j} \\ \vdots \\ p_{nj} \end{bmatrix} = \sum_{i \in S} q_i p_{ij} = \sum_{i \in S} Pr[X_{t+1} = j | X_t = i] \cdot Pr[X_t = i] \stackrel{*}{=} Pr[X_{t+1} = j]$$

## התפלגות מקובעת

**הגדרה:** התפלגות על המצבים  $\pi = (\pi_1, \dots, \pi_n)$  נקראת התפלגות מקובעת (Stationary) אם

$$\pi P = \pi$$

כלומר אם בזמן  $t$  ההתפלגות הנוכחית היא  $\pi$  אזי גם בזמן  $t+1$  היא תישאר  $\pi$  (ובעצם גם בזמן הבא וכן הלאה, ההתפלגות בעצם מתקבעת מכאן והלאה)

**דוגמה:** בהילוך מקרי בגרף קשיר  $G = \langle V, E \rangle$  ההתפלגות המקובעת היא

$$\pi_v = \frac{\deg(v)}{2|E|}$$

למה זה נכון?

1. זאת התפלגות -

$$\sum_v \pi_v = \frac{\sum_v \deg(v)}{2|E|} = 1$$

כי כזכור סכום הדרגות בגרף שווה ל  $2|E|$

2. היא מקובעת -

$$\begin{aligned} Pr[X_{t+1} = v | X_t \sim \pi] &= \sum_u \pi_u p_{uv} = \sum_{u \in \Gamma(v)} \frac{\deg(u)}{2|E|} \cdot \frac{1}{\deg(u)} \\ &= \frac{1}{2|E|} \sum_{u \in \Gamma(v)} 1 = \frac{1}{2|E|} \deg(v) = \pi_v \end{aligned}$$

קיבלנו שלכל  $v$  הסיכוי שנהיה בו בזמן  $t+1$  שווה ל  $\pi_v$ , כלומר גם  $X_{t+1}$  מתפלג בהתפלגות  $\pi$ .

**למה 2:** אם  $P$  אי-פריקה אזי קיימת התפלגות מקובעת  $\pi$  וכן

$$1. \forall i \in S \pi_i > 0$$

2. ההתפלגות  $\pi$  היא ההתפלגות המקובעת היחידה

**הוכחה:** בלמה 1 ראינו כי

$$\text{rank}(P - I)^t = \text{rank}(P - I) = n - 1$$

ומכאן

$$\dim(\ker(P - I)^t) = 1$$

כלומר קיים וקטור  $v \neq 0$  יחיד (עד כדי מכפלה בסקלר) כך ש-

$$\exists v \neq 0 \quad (P - I)^t v = 0$$

ומאחר ובמטריצה ריבועית דרגת השורות שווה לדרגת העמודות, גם המימד של הגרעין שלהם שווה ולכן עבור  $v$  זה מתקיים

$$v^t(P - I) \Rightarrow v^t P = v^t$$

על ידי כפל בסקלר המתאים ניתן לנרמל את  $v$  כך שהוקטור המנורמל  $x$  יקיים  $\sum_i x_i = 1$ . נירמול כזה ניתן לבצע באופן אחד בלבד (על ידי כפל בסקלר מתאים) ומכאן שקיים וקטור יחיד (ממש)  $x$  כך ש  $xP = x$  ובנוסף הוא מקיים  $\sum_i x_i = 1$ . כדי להראות ש  $x$  אכן מייצג התפלגות, וכדי להראות את סעיף 1 מהמשפט, נותר להראות ש

$$\forall i \quad x_i > 0$$

לשם כך נחלק את המצבים לפי  $x$  לשתי קבוצות

$$S^+ = \{i | x_i > 0\} \quad S^{\leq 0} = \{i | x_i \leq 0\}$$

נתבונן בסכום

$$\sum_{j \in S^{\leq 0}} x_j$$

נשים לב ש  $xP = x$  או במילים אחרות (כאשר  $P_j$  מסמל את העמודה ה  $j$ )

$$\forall j \quad x_j = xP_j = \sum_{i \in S} x_i P_{ji}$$

ולכן נקבל

$$\sum_{j \in S^{\leq 0}} x_j = \sum_{j \in S^{\leq 0}} \left( \sum_{i \in S} x_i P_{ji} \right) = \sum_{j \in S^{\leq 0}} \left( \sum_{i \in S^{\leq 0}} x_i P_{ji} + \sum_{i \in S^+} x_i P_{ji} \right)$$

<sup>10</sup>המעבר האחרון (\*) נובע מנוסחאת ההסתברות השלמה

$$= \left( \sum_{j \in S} \sum_{i \in S^{\leq 0}} x_i P_{ij} - \sum_{j \in S^+} \sum_{i \in S^{\leq 0}} x_i P_{ij} \right) + \sum_{j \in S^{\leq 0}} \sum_{i \in S^+} x_i P_{ij}$$

נזכור שכל שורה וכל עמודה של  $P$  מייצגת התפלגות ולכן

$$\forall i \sum_{j \in S^{\leq 0}} P_{ij} = 1$$

נציב ונקבל

$$\sum_{i \in S^{\leq 0}} x_i - \sum_{j \in S^+} \sum_{i \in S^{\leq 0}} x_i P_{ij} + \sum_{j \in S^{\leq 0}} \sum_{i \in S^+} x_i P_{ij}$$

ובסה"כ קיבלנו את השוויון

$$\sum_{j \in S^{\leq 0}} x_j = \sum_{i \in S^{\leq 0}} x_i - \sum_{j \in S^+} \sum_{i \in S^{\leq 0}} x_i P_{ij} + \sum_{j \in S^{\leq 0}} \sum_{i \in S^+} x_i P_{ij}$$

נצמצם ונעביר אגפים ונקבל

$$(*) \sum_{j \in S^+} \sum_{i \in S^{\leq 0}} x_i P_{ij} = \sum_{j \in S^{\leq 0}} \sum_{i \in S^+} x_i P_{ij}$$

נשים לב ש  $P_{ij}$  תמיד אי-שלילי ובנוסף מהאופן בו הגדרנו את הקבוצות מתקיים

$$\forall i \in S^+ x_i > 0, \forall i \in S^{\leq 0} x_i \leq 0$$

ולכן ב(\*) צד ימין של השוויון בהכרח אי-שלילי ולעומת זאת צד שמאל אי-חיובי, כי הסימן נקבע על ידי ה  $x_i$  והם תלויים במקור של ה  $i$  ( $j$  לא משחק תפקיד בקביעת הסימן) ולכן בהכרח כל המחוברים בשני הצדדים שווה ל - 0

ובפרט

$$(**) \forall i \in S^+, j \in S^{\leq 0} : x_i P_{ij} = 0$$

מצד שני

$$\forall i \sum_j x_i = 1$$

ולכן בהכרח קיים  $i$  כך ש  $x_{i_0} > 0$  כלומר קיים  $i_0$  כך ש  $i_0 \in S^+$  ועבור  $i$  זה מתקיים  $i_0 > 0$  ולכן אם קיים  $j_0 \in S^{\leq 0}$  שהינו "שכן" של  $i_0$  כלומר מתקיים  $P_{i_0 j_0} > 0$  נקבל שעבור  $i_0, j_0$

$$x_{i_0} P_{i_0 j_0} > 0$$

בסתירה ל(\*\*)

מסקנה: לכל  $j$  "שכן" של  $i_0$ , כלומר שקיימת הסתברות חיובית למעבר מ- $i_0$  ל- $j_0$  (כלומר  $P_{i_0 j_0} > 0$ ) בהכרח

$$j_0 \in S^+$$

ובסה"כ נקבל שלכל  $i \in S^+$  כל "שכן"  $j$  גם הוא ב- $S^+$  ומכאן, בגלל האי־פריקות, נמשיך באינדוקציה לשכנים של  $j$  ולשכנים שלהם וכן הלאה עד שנגיע לכל המצבים (כאמור, בגלל האי־פריקות) ונקבל שכולם ב- $S^+$  או במילים אחרות

$$\forall i \in S \ x_i > 0$$



השלב הבא יהיה להראות שבשרשראות מרקוב אי־פריקות תמיד נתכנס להתפלגות  $\pi$  המקובעת. לשם כך נצטרך לסלק מצב בעייתי מסויים - כאשר יש מחזוריות בשרשרת. במצב שבו יש מחזוריות קבוע נקבל שבהינתן מצד התחלתי (אם לצורך הדוגמה נגדיר שההתפלגות ההתחלתית נותנת הסתברות 1 למצב נתון ולשאר 0) בכל שלב לאחר מכן נקבל מחזוריות של ההתפלגויות (למשל בדוגמה נקבל שבכל שלב נוכל ממש להגיד בדיוק איפה אנחנו אמורים להיות בתוך במחזור).

דוגמה: בגרף הבא



איור 3: גרף לא ארגודי

נגדיר, לשם נוחות, שההתפלגות ההתחלתית היא  $(1, 0)$  כלומר ההסתברות להתחיל מממצב מספר 1 היא 1 וההסתברות להתחיל מהמצב השני היא 0. נקבל שבצעד הבא בהכרח (הסתברות 1) נהיה במצב 2 כומר ההתפלגות תהיה  $(0, 1)$  וכן הלאה. נקבל מחזוריות 2 בין ההתפלגויות הנ"ל. באותו אופן גם אם היינו מגדירים את ההתפלגות ההתחלתית אחרת, ניתן להראות שהיינו מקבלים מחזוריות.

**הגדרה:** שרשרת מרקוב היא **ארגודית** אם היא אי־פריקה ובנוסף (התנאים הבאים שקולים זה לזה):

1. אי־מחזורית. כלומר

$$GCD(\{|c| \mid c - \text{circle with positive probability}\}) = 1$$

11

<sup>11</sup>או במילים - "נאפשר" מעגלים חיוביים אבל לא באופן כזה שכל המעגלים יהיו מאורך שהוא כפולה של מספר קבוע. נניח אם כל המעגלים מאורך שהוא כפולה של 3 נקבל שיש מחזוריות מאורך 3 בשרשרת ולכן היא לא ארגודית.

2. קיים  $n$  כך שלכל  $i, j \in S$  ו  $t > n$  :

$$Pr[x_t = j | x_0 = i] > 0$$

3. לכל  $i \in S$  קיים  $n > 0$  כך שלכל  $j \in S$  :

$$Pr[x_n = j | x_0 = i] > 0$$

**הגדרה אינטואיטיבית:** אנו דורשים שלא תהיה מחזוריות (כמו בדרישה 1) באופן שקול - אם נתקדם מספיק (נעבור את צעד מספר  $n$ ) נגיע למצב שבו לא משנה מאיפה התחלנו בכל צעד יש סיכוי (כלשהו) להיות בכל מצב.

**הערה:** לא נראה את ההוכחה לשקילות ההגדרות

**משפט:** תהי  $X_0, X_1, \dots$  שרשרת מרקוב ארגודית שבכל נקודת זמן  $t$  מתפלגת  $X_t \sim q^{(t)} = \left(q_0^{(t)}, \dots, q_n^{(t)}\right)$

אזי

$$q^{(t)} \xrightarrow{t \rightarrow \infty} \pi$$

**הוכחה:**

**הרעיון:** coupling-צימוד

נסמן את מטריצת המעברים של השרשרת הנתונה ב  $P$ . נגדיר שלוש שרשראות מרקוב:

1.  $X_0, X_1, \dots$  כאשר המעברים הם לפי  $P$  וההתפלגות ההתחלתית  $X_0 \sim q^{(0)}$  (זאת בעצם השרשרת הנתונה)

2.  $Z_0, Z_1, \dots$  כאשר המעברים הם לפי  $P$  וההתפלגות ההתחלתית  $Z_0 \sim \pi$  ומכאן ש  $\forall t : Z_t \sim \pi$

3.  $Y_0, Y_1, \dots$  שמוגדרת באופן הבא

$$Y_t = \begin{cases} Z_t & Y_{t-1} = Z_{t-1} \\ X_t & \text{otherwise} \end{cases}$$

כלומר  $\{Y_t\}_{t \rightarrow \infty}$  מתחילה יחד עם  $\{X_t\}$  והחל מהנקודה הראשונה בה  $\{X_t\}$  ו  $\{Z_t\}$  נפגשים עוברת לעקוב אחרי  $\{Z_t\}$ . מכאן נובע ש  $\{Y_t\}$  מתחילה בהתפלגו  $Y_0 \sim q^{(0)}$  והמעברים מוגדרים לפי  $P$ .

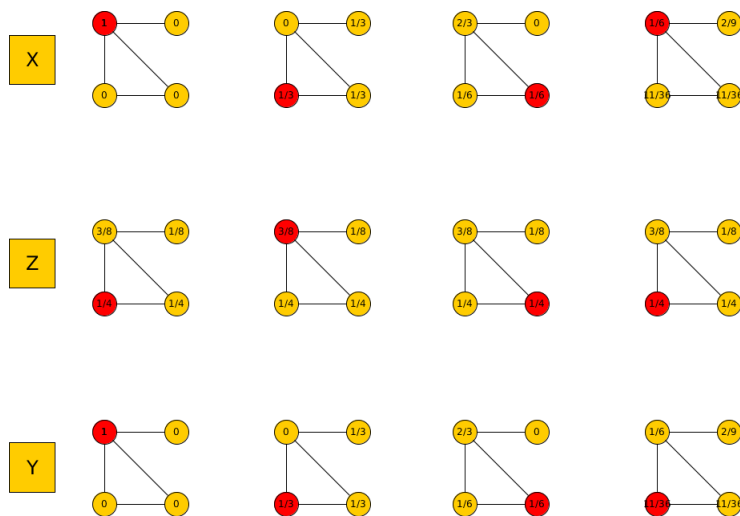
**הסבר נוסף:** חשוב להבחין בין ההתפלגות של משתנה מקרי לבין הערך שהוא מחזיר. לדוגמה:

נניח שיש לנו 3 קוביות - 2 מתפלגות אחיד (סתם קוביה) והשלישית מזחירה בהסתברות  $\frac{1}{2}$  את הספרה 6 ובהסתברות  $\frac{1}{10}$  כל ספרה אחרת. שתי הקוביות הרגילות מתפלגות זהה אבל יכולות להחזיר תוצאה שונה. והקוביה השלישית יכולה (במקרה) להחזיר את אותו הערך כמו אחת הקוביות הרגילות למרות שהן מתפלגות שונה.

$\{Y_t\}$  מתפלג בשלב ההתחלתי באופן זהה ל  $\{X_t\}$  וההתפלגויות בהמשך נובעות מהכפלה של התפלגות זו ב  $P$  ולכן למעשה  $\{Y_t\}$  ו  $\{X_t\}$  בעלות אותה התפלגות בכל צעד. בהתחלה הם גם מחזירים את אותו הערך ממש (כאילו  $Y$  מסתכל מה יצא ל  $X$  ועונה כמוהו). כאמור, כשאנחנו מציינים שיוויון בין משתנים מקריים לדוגמה  $Y_t = Z_t$  הכוונה שהם מחזירים אותה תוצאה (במקרה הקוביות - שתי הקוביות שלנו נפלו על אותה ספרה) ולא (לאו דווקא) שהם מתפלגים אותו דבר.

לאחר המפגש, כאשר בפעם הראשונה  $X_t = Y_t$ , מפסיק להחזיר את הערך שמחזיר  $\{X_t\}$  ועובר "להעתיק" את הערך ש  $\{Z_t\}$  מחזיר. עדיין, מאחר ו  $Y$  בכל שלב ושלב לא שינה את כללי המעבר (שוב המעבר הוא בין התפלגות בשלב  $t$  להתפלגות בשלב  $t+1$ , לא בין הערכים) הוא עדיין מתפלג כמו  $X$ .

ראה באיור לדוגמה. המספרים בקודקודים מסמנים את ההסתברות של המשתנה המקרי עבור הקודקוד (מצב) בצעד הנוכחי. הקודקוד האדום מסמן את ה"מיקום" בכל צעד, כלומר את הערך שהמשתנה המקרי החזיר. נשים לב שההתפלגות של  $Y$  זהה לזו של  $X$  גם בצעד הרביעי למרות שהם מחזירים ערך(קודקוד) שונה.



איור 4: דגימה של צימוד בהילוך מקרי בגרף

**הערה:** באופן פורמלי היה עלינו להראות ש  $\{Y_t\}$  היא אכן שרשרת מרקוב מוגדרת היטב שהרי לא הגדרנו אותה באופן הרגיל שבו מוגדרת שרשרת מרקוב אלא כהכלאה. לא הראנו את ההצדקה לכך אבל ניתן להבין ב"נפנוף ידיים" שמאחר ובכל שלב ההתפלגות גם של  $X$  וגם של  $Z$  מתקדמת לפי  $P$  ניתן לעבור ביניהם "באופן חלק" כאשר הם נפגשים.



עלינו להוכיח:

$$Pr[Y_t \neq Z_t] \xrightarrow{t \rightarrow \infty} 0$$

מדוע זה מספיק? כי מתקיים

$$\left| q_i^{(t)} - \pi_i \right| = |Pr[Y_t = i] - Pr[Z_t = i]| \leq Pr[Y_t = i, Z_i \neq i] + Pr[Y_t \neq i, Z_i = i]$$

$$\Rightarrow \sum \left| q_i^{(t)} - \pi_i \right| \leq \sum (Pr[Y_t = i, Z_i \neq i] + Pr[Y_t \neq i, Z_i = i]) = 2Pr[Y_t \neq Z_t]$$

ולכן אם  $Pr[Y_t \neq Z_t]$  שואף ל 0 גם  $\left| q_i^{(t)} - \pi_i \right|$  ישאף ל 0. לכן מספיק להוכיח ש  $X$  ו  $Z$  נפגשים בשלב כלשהו בהסתברות 1.

בחזרה להוכחה: לפי הארגודיות קיים  $N$  עבורו קיים  $p_0$  כך ש -

$$Pr[X_N = Z_N] \geq p_0$$

כי לכל דגימה אפשרית של  $Z_N$  (כאמור, מהארגודיות) יש הסתברות חיובית ש  $X$  "מגיע" לשם בצעד ה  $N$ .

טענה: גם אם נתנה בכך שבצעד ה  $N$  לא מתרחש מפגש באותו אופן ב  $N$  הצעדים הבאים הטענה עדיין תקפה כלומר מתקיים

$$Pr[X_{2N} = Z_{2N} | X_N \neq Z_N] \geq p_0$$

ובאופן כללי

$$Pr[X_{(k+1)N} = Z_{(k+1)N} | X_{kN} \neq Z_{kN}] \geq p_0$$

ולכן הסיכוי שבאף אחד מ  $k$  דילוגים כאלה לא יהיה מפגש הוא

$$Pr[X_N \neq Z_N, X_{2N} \neq Z_{2N}, \dots, X_{kN} \neq Z_{kN}] =$$

$$Pr[X_N \neq Z_N] \cdot Pr[X_{2N} \neq Z_{2N}, \dots, X_{kN} \neq Z_{kN} | X_N \neq Z_N]$$

$$\leq (1 - p_0) Pr[X_{2N} \neq Z_{2N}, \dots, X_{kN} \neq Z_{kN} | X_N \neq Z_N]$$

$$(1 - p_0) Pr[X_{2N} \neq Z_{2N} | X_N \neq Z_N] \cdot Pr[X_{3N} \neq Z_{3N}, \dots, X_{kN} \neq Z_{kN} | X_N \neq Z_N, X_{2N} \neq Z_{2N}]$$

$$\leq (1 - p_0)^2 Pr[X_{3N} \neq Z_{3N}, \dots, X_{kN} \neq Z_{kN} | X_N \neq Z_N, X_{2N} \neq Z_{2N}]$$

$$\dots \leq (1 - p_0)^k \xrightarrow{k \rightarrow \infty} 0 \quad \blacksquare$$

## זמני פגיעה וחזרה

הגדרות: תהי  $X_0, X_1, \dots$  שרשרת מרקוב עם מטריצת מעברים  $P$  נסמן:

1. הצעד הראשון שבו הגענו למצב  $i$

$$T_i = \min \{t \geq 0 | X_t = i\}$$

2. גרסה שונה מעט של 1

$$T_i^+ = \min \{t > 0 | X_t = i\}$$

3. זמן פגיעה  $Hitting - Time$  -

$$H_{ij} = E [T_j | X_0 = i]$$

כלומר תוחלת הזמן להגעה ממצב  $i$  למצב  $j$ .

4. זמן חזרה  $Return - Time$  -

$$R_i = E [T_i^+ | X_0 = i]$$

תוחלת מספר הצעדים שנדרש כדי לצאת מ  $i$  ולחזור אליו.

5. זמן כיסוי -

$$C_i = E \left[ \max_j T_j | X_0 = i \right]$$

תוחלת מספר הצעדים שנדרש כדי לעבור בכל קודקוד לפחות פעם אחת בהנחה שיצאנו ממצב  $i$

6. זמן כיסוי כללי -

$$C = \max_i C_i$$

טענה: אפשר לחשב את זמן הפגיעה  $H_{ij}$  לכל  $i, j \in S$  בזמן ריצה פולינומי. הוכחה: מהגדרה

$$H_{ii} = 0$$

לכל  $i \neq j$  כדי להגיע מ  $i$  ל  $j$  נעשה לפחות צעד אחד למצב  $k$  כלשהו (יתכן ש  $k = j$ ), בהסתברות  $p_{ik}$ , ומשם נמשיך (במידה ו  $j \neq k$ ) מ  $k$  ל  $j$ . כלומר

$$H_{ij} = \sum_k p_{ik} (H_{kj} + 1) = \sum_k p_{ik} + \sum_k p_{ik} \cdot H_{kj} = 1 + \sum_k p_{ik} \cdot H_{kj}$$

טענה: לכל  $j$  נגדיר משתנים

$$\forall 1 \leq i \leq n : x_i = H_{ij}$$

המשתנים הללו מקיימים מערכת משוואות לינארית

$$\begin{aligned} x_j &= 0 \\ i \neq j : x_i &= 1 + \sum_k p_{ik} x_k \end{aligned}$$

נראה שלמערכת יש פתרון יחיד:

נניח שיש לנו שני פתרונות

$$a_1, \dots, a_n$$

$$b_1, \dots, b_n$$

נגדיר

$$\forall i : c_i = a_i - b_i$$

$\{c_i\}$  מקיימים

$$\begin{aligned} c_j &= 0 \\ i \neq j : c_i &= \sum_k p_{ik} c_k \end{aligned}$$

מאחר ו

$$a_i - b_i = \left(1 + \sum_k p_{ik} a_k\right) - \left(1 + \sum_k p_{ik} b_k\right) = \sum_k p_{ik} c_k$$

בדומה למה שראינו בעבר - קיבלנו שכל  $c_i$ , פרט ל  $c_j$ , הוא "ממוצע משוקלל" של "שכניו" ולכן, מאותה טענה שראינו לעיל בנוגע לפונקציות הרמוניות, המקסימום וגם המינימום נמצאים בהכרח ב  $c_j = 0$ . משום שאם  $c_i$  אחר מקבל מקסימום נקבל שכל שכניו גם מקסימליים וכן הלאה עד שנגיע ל  $c_j$  (בהכרח נגיע בגלל שהשרשרת אי-פריקה) ונקבל שגם הוא מקסימלי ובאופן מקביל נקבל שהוא גם מינימלי.

כלומר קיבלנו ש

$$\forall i : a_i - b_i = 0 \Rightarrow a_i = b_i \quad \blacksquare$$

תזכורת: סימנו ב  $\pi$  את ההתפלגות המקובעת. נסמן ב  $\pi_i$  את ההסתברות להיות במצב  $i$  לפי ההתפלגות המקובעת. סימנו ב  $R_i/R(i)$  את זמן החזרה עבור המצב  $i$  משפט: בשרשרת מרקוב אי-פריקה, לכל מצב  $i$  מתקיים

$$R(i) = \frac{1}{\pi_i}$$

לא הוכחה: אם נאתחל את השרשרת להתפלגות המקובעת  $X_0 \sim \pi$  אזי שכזכור, היא תשאר בהתפלגות זו בכל הצעדים בהמשך. מהגדרת ההתפלגות נקבל שבתוחלת ב  $\pi_i$  מהצעדים נהיה במצב  $i$ . מצד שני מהגדרת זמן פגיעה אנו נחזור ל  $i$  כל  $R(i)$  צעדים ולכן אנחנו נהיה ב  $i$  ב  $\frac{1}{R(i)}$  מהצעדים מכאן ש

$$\pi_i = \frac{1}{R(i)}$$

כנדרש.

יותר הוכחה: בהינתן מצב  $i$ . נגדיר לכל מצב  $j$

$$r_j = E [|\{0 < t \leq T_i^+ : X_t = j\}| | X_0 = i]$$

כלומר תוחלת מספר הפעמים שנגיע ל  $j$  במסלול שמתחיל מ  $i$  וחוזר אל  $i$ .

נשים לב שמתקיים  $r_i = 1$

ובנוסף

$$\sum_j r_j = \sum_j E [|\{0 < t \leq T_i^+ : X_t = j\}|] = E \left[ \sum_j |\{0 < t \leq T_i^+ : X_t = j\}| \right]$$

מאחר בסכום אנו סוכמים את כל הצעדים בהם הגענו ל  $j_1$  ואת כל הצעדים בהם הגענו ל  $j_2$  וכן הלאה, אנו למעשה סוכמים את כל הצעדים במסלול מ  $i$  ל  $i$  ולכן

$$= E [|\{0 < t \leq T_i^+ : X_t = j\}|] = E [T_i^+] = R(i)$$

כדי לחשב את  $r_k$  נוכל לסכום את מספר הפעמים שהגענו בצעד אחד משכן כלשהו  $j$  אל  $k$  לפני סוף המסלול (נסכום לכל  $j$  כי עבור  $j$  שאיננו שכן התשובה תהיה 0)

$$r_k = E \sum_j \left[ \begin{matrix} \text{times before } T_i^+ \text{ we} \\ \text{went from } j \text{ to } k \end{matrix} \right] = \sum_j p_{jk} E \left[ \begin{matrix} \text{times before } T_i^+ \\ \text{we visit in } j \end{matrix} \right] = \sum_j p_{jk} r_j$$

קיבלנו מערכת משוואות לינאריות

$$\forall k : r_k = \sum_j p_{jk} r_j$$

וזו אותה מערכת משוואות שקיבלנו כאשר חישבנו את ההתפלגות  $\pi$ .

הראנו שלמערכת יש פתרון יחיד עד כדי מכפלה בסקלר ולכן קיים קבוע  $c > 0$  כך ש

$$\forall k : \forall r_k = \pi_k$$

אנו יודעים ש

$$R(i) = \sum_k r_k = \sum_k c \pi_k = c \sum_k \pi_k = c$$

ומאחר  $r_i = 1$  נקבל

$$r_i = c \cdot \pi_i = R(i) \cdot \pi_i \Rightarrow R(i) = \frac{1}{\pi_i} \quad \blacksquare$$

תזכורת: בגרף קשיר, לא מכוון, ההתפלגות המקובעת של הילוך מקרי היא

$$\pi_v = \frac{\deg(v)}{2|E|}$$

מסקנה: בגרף קשיר, לא מכוון, מתקיים

$$R(v) = \frac{2|E|}{\deg(v)}$$

### מסלול באורך $n$

נניח שי שלנו מסלול  $P$  באורך  $n$ :  $0, 1, \dots, n-1, n$  נרצה לחשב את  $H(0, n)$  כלומר את הזמן (בתוחלת) שיקח לנו להגיע בפעם הראשונה מ  $0$  ל  $n$ .

נסמן ב  $R_k(j)$  את זמן החזרה של נקודה  $j$  בגרף המתקבל מ  $k$  הנקודות הראשונות במסלול. וב  $\deg_k(j)$  את דרגת  $j$  בגרף זה.

נשים לב:  $\deg_k(k) = 1$  ובנוסף בגרף המושרה הזה יש  $k$  קשות ולכן

$$R_k(k) = \frac{2k}{\deg_k(k)} = 2k$$

כדי להגיע מ  $0$  ל  $n$  עלינו לעבור בכל הנקודות בדרך כאשר

$$0 = T_0 < T_1 < \dots < T_n$$

נשים לב שמתקיים

$$T_n - T_0 = T_n - T_{n-1} + T_{n-1} - T_{n-2} + \dots - T_0$$

ולכן

$$H(0, n) = E[T_n - T_0 | X_0 = 0] = E\left[\sum_{k=0}^{n-1} (T_{k+1} - T_k) | X_0 = 0\right]$$

$$= \sum_{k=0}^{n-1} E[(T_{k+1} - T_k) | X_0 = 0] = H(0, 1) + H(1, 2) + \dots + H(n-1, n)$$

כעת נשים לב שמהנקודה  $0$  ניתן רק לזוז לנקודה  $1$  ולכן  $H(0, 1) = 1$ . מנהקודה  $1$  ניתן לזוז קדימה ל  $2$  או אחורה ל  $0$  ואז חזרה (כי אין ברירה אחרת) ל  $1$  וחזרנו לנקודת המוצא. יש לנו "מטבע" (או משתנה מקרי ברנולי עם  $p = \frac{1}{2}$ ) שבהסתברות  $\frac{1}{2}$  "מצליח", כלומר אנחנו מתקדמים

ל 2 ובהסתברות  $\frac{1}{2}$  "נכשל" כלומר אנחנו זזים אחורה ל 0. על פי המאפיינים של משתנה ברנולי נקבל

$$E[\text{number of "failures"}] = \frac{1}{p} - 1 = 1$$

כל עוד אנחנו נכשלים המשמעות היא שאנו זזים צעד אחד ל 0 ואחד חזרה ל 1 ואז שוב "מטילים מטבע" כדי לדעת לאן נזוז. כאשר נצליח המשמעות היא שנלך צעד אחד נוסף כדי להגיע, סוף סוף, אל 2 ולכן

$$H(1, 2) = E\left[\text{number of times we went the "wrong way"}\right] \cdot E\left[\text{time to go 0 and return to 1}\right] + 1 = 1 \cdot 2 + 1 = 3$$

ובאופן כללי

$$H(k, k+1) = E\left[\text{number of times we went the "wrong way"}\right] \cdot E\left[\text{time to return to } k \text{ after we went the wrong way}\right] + 1$$

$$= 1 \cdot R_k(k) + 1 = 2k + 1$$

בסך הכל נקבל :

$$H(0, n) = \sum_{k=0}^{n-1} (2k + 1) = n^2$$

לצער, בשל קוצר זמן, אני לא אספיק לסכם את השיעור המבלבל מאוד והלא לגמרי קשור בנושא SAT.

## חישוב קוונטי

### רקע

**הברה** לא באמת צריך לדעת את הפיסיקה של תורת הקוונטים כדי לדעת לתכנן אלגוריתמים קוונטיים באותה מידה שלא היינו צריכים ידע באלקטרוניקה של מחשב קלאסי כדי לתכנן אלגוריתמים עד כה.

### ניסוי שני הסדקים

אם נזרוק אבל לבריקה היא תכרום לגל שינוע ממקום הפגיע במים לכל הכיוונים. אם נחסום את גל המים בקיר עם סדק הגל יעצר למעט הסדק מעבר לקיר ינוע גל שתחילתו בסדק. אם המים, לצורך הניסוי, יכתימו את צד הבריקה, נקבל שם כתם מקביל למקום הסדק שכלל שנתרחק ממנו הצבע יחלש. אם בקיר יהיו שני סדקים ולא רק אחד, ייווצרו מעבר לקיר שני גלים שיתנגשו. שני גלים שמתנגשים יכולים או להתווסף זה לזה או לבטל זה את זה (תלוי במצב של כל אחד, לא

קריטי) ולכן נקבל בצד הבריכה לא כתם שהולך ודוהה בקצוות כמקודם אלא תבנית מתחזקת ונחלשת לכל האורך (אם כי גם כאן הצבע יהיה יותר מודגש במרכז).

כמובן שתופעה זו נובעת מהאופי הגלי של תנועת המים. אם היינו מנסים את אותו ניסוי עם חפץ חלקיקי כלשהו (כלומר עשוי חלקיקים, נניח, אבן) החלקיקים, אלה שהיו מצליחים לעבור את הסדק, היו ממשיכים ישירות וצובעים נקודה ותו לא.

בתחילת המאה ה-19 בוצע ניסוי שכזה עם אור, במטרה לקבוע אם האור הוא גל או חלקיק, התוצאה הייתה שהאור התנהג כמו המים ממקודם, כלומר כמו גל. מאוחר יותר התברר שיש לאור גם מאפיינים חלקיקיים והוא מורכב מחלקיקים ששםם "פוטונים", האור, איכשהו, הוא גם גל וגם חלקיק.

בתחילת המאה ה-20 ניסו לבצע את הניסוי עם אלקטרונים. למרבה ההפתעה גם האלקטרונים התנהגו כמו גלים ויצרו תבנית גלית על המסך שמאחורי הסדקים.

אז הוחלט לעשות את הניסוי מעט אחרת - במקום לירות כל פעם שני חלקיקים (פוטונים במקרה הזה) אחד לכל סדק, הפעם ירו חלקיק אחד בלבד לכיוון שני הסדקים באופן כזה שיש לו אפשרות לעבור בכל סדק (כתלות ב"ספין" מאפיין כלשהו של פוטונים. הספין לא ידוע במהלך הניסוי). על המסך התקבלה תבנית מתחלפת כאילו ירינו לשני הסדקים בו זמנית. במובן מסוים התברר שהפוטון הבודד "הפריע לעצמו".

תורת הקוונטים סיפקה את ההסבר לתופעה - אין מיקום מוגדר לפוטון (וכן לגבי עוד כמה מאפיינים) אלא מעין התפלגות מיקום במרחב, רק כאשר אנו מנסים למדוד את המיקום ההתפלגות "קורסת" לערך מוגדר, כאילו יש משתנה אקראי שמגדיר את המיקום וניסיון למדוד אותו גורם לו להדגם ולעשות למוחלט. עקרון זה נקרא **עקרון הסופרפוזיציה**<sup>12</sup>.

## לעניינו

**הגדרה:** קיוביט (qubit - quantum bit) יחידת זכרון שיכולה להיות במצב קלאסי (כלומר  $\{0, 1\}$  כמו שראינו עד כה) שאותם נסמן ב-  $|0\rangle, |1\rangle$  או בסופרפוזיציה כלומר

$$\alpha_0|0\rangle + \alpha_1|1\rangle$$

$$|\alpha_0|^2 + |\alpha_1|^2 = 1 \text{ ש } \alpha_0, \alpha_1 \in \mathbb{C}$$

כלומר מצבו של קיוביט שנמצא בסופרפוזיציה הוא משהו שמזכיר הפתלות אלא שהפעם יש ל"הסתברות" כיוון.

אם מודדים קיוביט, כלומר נבדוק באיזה מצב הוא ובכך נכפה עליו מצב קלאסי, המצב של הקיוביט יהפוך ל-  $|0\rangle$  או  $|1\rangle$  כאשר

$$Pr[we \text{ got } |0\rangle] = |\alpha_0|^2, \quad Pr[we \text{ got } |1\rangle] = |\alpha_1|^2$$

## פעולות על קיוביטים

אנו לא מאפשרים כל פעולה על קיוביט.

<sup>12</sup>להמחשה של הניסוי <http://goo.gl/A5Cje0>

פעולה חייבת להיות לינארית. נחשוב על  $|0\rangle, |1\rangle$  כבסיס של מרחב וקטורי כלומר

$$|0\rangle = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad |1\rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

ולפי ההגדרות נקבל שסופרפוזיציה היא צירוף לינארי של אברי הבסיס

$$\alpha_0|0\rangle + \alpha_1|1\rangle = \begin{pmatrix} \alpha_0 \\ \alpha_1 \end{pmatrix}$$

ומאחר ו

$$\left\| \begin{pmatrix} \alpha_0 \\ \alpha_1 \end{pmatrix} \right\|^2 = |\alpha_0|^2 + |\alpha_1|^2 = 1$$

הוקטור המייצב את הסופרפוזיציה  $\begin{pmatrix} \alpha_0 \\ \alpha_1 \end{pmatrix}$  הוא וקטור יחידה.

מלינאריות נובע שפעולה  $U$  על קיוביט יחיד  $q = \alpha_0|0\rangle + \alpha_1|1\rangle$  כלשהו ניתנת להגדרה כמטריצה  $U \in \mathbb{C}^{2 \times 2}$  שפעולתה מוגדרת על אברי הבסיס

$$U(|0\rangle) \mapsto s_0 \in \mathbb{C}^2 \quad U(|1\rangle) \mapsto s_1 \in \mathbb{C}^2$$

ומכאן ש

$$U(q) = U(\alpha_0|0\rangle + \alpha_1|1\rangle) = \alpha_0 s_0 + \alpha_1 s_1$$

כדי לשמור על עקביות ההגדרה נרצה שתוצאת פעולה תהיה תמיד סופרפוזיציה תקינה של מצבים קלאסיים. כלומר שיתקיים

$$\forall v \in \mathbb{C}^2 : \|v\| = 1 \Rightarrow \|U(v)\| = 1$$

כלומר  $U$  מעבירה וקטורי יחידה לוקטורי יחידה, או במילים אחרות,  $U$  לא מכווצת ולא מעוות אלא היא מריצת שיקוף ו/או סיבוב. מריצה כזאת, כפי שלמדנו כקורס באלגברה נקראית מטריצה אוניטרית המוגדרת באופן פורמלי

$$U \cdot U^* = 1$$

כאשר  $U^* = \overline{U^T}$  הוא הצמוד המרוכב (אחרי שעשינו transpose) של  $U$

**הגדרה:** צירוף של כמה קיוביטים

$n$  קיוביטים יכולים להיות בסופרפוזיציה משותפת שמוגדרת כ

$$\sum_{b_1 \dots b_n \in \{0,1\}^n} \alpha_{b_1 \dots b_n} |b_1 \dots b_n\rangle$$

כך ש

$$\sum_{b_1 \dots b_n} |\alpha_{b_1 \dots b_n}|^2 = 1$$

הבהרה -  $b_1 \dots b_n$  היא מחרוזת של אפסים ואחדות.



במילים - סופרפוזיציה של כמה קיוביטים היא צירוף לינארי של מצבים קלאסיים, אלא שבמקום שני מצבים קלאסיים בלבד  $|0\rangle, |1\rangle$  יש לנו  $2^n$  מצבים קלאסיים  $|0\dots 0\rangle, |0\dots 01\rangle, \dots |1\dots 1\rangle$ .

**דוגמה:** בשני קיוביטים נקבל את המצבים הקלאסיים  $|00\rangle, |01\rangle, |10\rangle, |11\rangle$  וסופרפוזיציה של שני קיוביטים תהיה

$$\alpha_{00}|00\rangle + \alpha_{01}|01\rangle + \alpha_{10}|10\rangle + \alpha_{11}|11\rangle$$

כך ש

$$|\alpha_{00}|^2 + |\alpha_{01}|^2 + |\alpha_{10}|^2 + |\alpha_{11}|^2 = 1$$

גם כאן ניתן להתייחס לייצוג כמרחב וקטורי  $2^n$  מימדי והסופר פוזיציה הזאת, של שני קיוביטים תיוצג כ

$$\begin{pmatrix} \alpha_{00} \\ \alpha_{01} \\ \alpha_{10} \\ \alpha_{11} \end{pmatrix} \in \mathbb{C}^4$$

כך ש

$$\left\| \begin{pmatrix} \alpha_{00} \\ \alpha_{01} \\ \alpha_{10} \\ \alpha_{11} \end{pmatrix} \right\| = 1$$

**הגדרה:** אוסף של קיוביטים יכולים להיות במצב **שזור** (כלומר, יש מעין תלות בין המצבים שלהם, יוסבר בהמשך) או במצב לא שזור ואז ניתן לפרק את הסופרפוזיציה **למכפלה טנזורית** כלומר למכפלה הבאה<sup>13</sup>

$$q_1 \otimes \dots \otimes q_n = (\alpha_0^1|0\rangle + \alpha_1^1|1\rangle) \otimes \dots \otimes (\alpha_0^n|0\rangle + \alpha_1^n|1\rangle) = \sum_{b_1 \dots b_n} \left( \prod_{k=1}^n \alpha_{b_k}^k \right) |b_1 \dots b_n\rangle$$

כלומר במכפלה טנזורית אנחנו סוכמים על כל האינדקסים  $b_1 \dots b_n$  (מחרוזות מאורך  $n$  של אפסים ואחדות) ולכל אינדקס שכזה המקדם של המצב הקלאסי בעל האינדקס יהיה המכפלה של המקדמים המתאימים בכל קיוביט לדוגמה עבור 3 קיוביטים ועבור אינדקס  $b_1 b_2 b_3 = 001$  יהיה המקדם של  $|001\rangle$  יהיה

$$\prod_{k=1}^3 \alpha_{b_k}^k = \alpha_0^0 \alpha_0^1 \alpha_1^2$$

אם, לעומת זאת  $q_1, \dots, q_n$  היו שזורים לא היינו יכולים לבטא את הסופרפוזיציה (את הצירוף הלינארי) בתור מכפלה טנזורית באופן הזה.

**דוגמה:**

$$\alpha_0^1 \alpha_0^2 |00\rangle + \alpha_0^1 \alpha_1^2 |01\rangle + \alpha_1^1 \alpha_0^2 |10\rangle + \alpha_1^1 \alpha_1^2 |11\rangle = (\alpha_0^1 |0\rangle + \alpha_1^1 |1\rangle) \otimes (\alpha_0^2 |0\rangle + \alpha_1^2 |1\rangle)$$

ולכן המצבים לא שזורים.

<sup>13</sup> בדומה לפירוק של הסתברות על משתנים בלתי תלויים למכפלת הסתברויות

## מדידה חלקית

אם נבצע מדידה של  $k$  קיוביטים הראשונים בסופרפוזיציה אזי לכל תוצאות מדידה אפשרית  $a_1 \dots a_k \in \{0, 1\}^k$  (במדידה נקבל תמיד מצבים קלאסיים)

$$Pr \left[ \begin{array}{c} \text{the measurement} \\ \text{will return } a_1 \dots a_k \end{array} \right] = \sum_{b_{k+1} \dots b_n} |a_1 \dots a_k b_{k+1} \dots b_n|^2$$

כלומר הסיכוי לקבל תוצאה חלקית מסוימת שווה לסכום ה"גדלים" של תוצאות המדידה (של כל הקיוביטים) האפשריות ש"מסכימות" עם התוצאה החלקית.

נכנה הסתברות זו  $P_{a_1 \dots a_k}$

לאחר מדידה חלקית אם קיבלנו  $a_1 \dots a_k$  אזי שאר  $n-k$  הקיוביטים נמצאים עדיין בסופרפוזיציה שנובעת מהסופרפוזיציה שהיית כאשר  $k$  הקיוביטים הראשונים כבר לא חלק ממנה אלא הם כבר "נקבעו" כלומר

$$\sum_{b_{k+1} \dots b_n} \frac{\alpha_{a_1 \dots a_k b_{k+1} \dots b_n}}{\sqrt{P_{a_1 \dots a_k}}} |b_{k+1} \dots b_n\rangle$$

כלומר המקדם של המצבים הקלאסיים (הצירוף הלינארי כולל רק את האינדקסים שלא נמדדו) הוא סכום של המקדמים האפשריים בהינתן  $\alpha_0 = a_0, \dots, \alpha_k = a_k$ . חילקנו ב  $\sqrt{P_{a_1 \dots a_k}}$  כדי לנרמל את המקדמים באופן כזה שנשאר עם קואורדינטות שסכומם 1 כך שהסופרפוזיציה תקינה.

**הערה:** מדידה חלקית מזכירה קצת הסתברות מותנית - מה ההתפלגות בהינתן שחלק מהמשתנים הם נקבעו.

**דוגמה:** שני קיוביטים עם סופרפוזיציה משותפת <sup>14</sup>

$$\frac{-i}{\sqrt{2}}|00\rangle + 0|01\rangle - \frac{1}{\sqrt{6}}|10\rangle + \frac{i}{\sqrt{3}}|11\rangle$$

נמדוד את הקיוביט הראשון בלבד

$$Pr[q_1 = 1] = Pr[q_1 q_2 = 1 q_2] = |\alpha_{10}|^2 + |\alpha_{11}|^2 = \left| -\frac{1}{\sqrt{6}} \right|^2 + \left| \frac{i}{\sqrt{3}} \right|^2 = \frac{1}{6} + \frac{1}{3} = \frac{1}{2}$$

ומכך נובע שבמקרה המשלים <sup>15</sup>

$$Pr[q_1 = 0] = Pr[q_1 q_2 = 0 q_2] = \frac{1}{2}$$

לאחר המדידה:

• אם קיבלנו 0 - מאחר והמקדם של  $|01\rangle$  הוא 0 הרי שההקיוביט השני חייב להיות <sup>16</sup>

$$\frac{\alpha_{00}}{\sqrt{P_0}}|0\rangle = \frac{\frac{-i}{\sqrt{2}}}{\sqrt{\frac{1}{2}}}|0\rangle = -i|0\rangle$$

<sup>14</sup> את המחבר השני רשמנו רק למען הבהירות, סתם כך לא צריך לרשום מחוברים שהמקדם שלהם הוא 0

<sup>15</sup> גם אותו ניתן, כמובן, לחשב אך במקרה הזה אין צורך

<sup>16</sup> למעשה, במצב שהתקבל ברור שמדידת הקיוביט השני תחזיר 0

• אם קיבלנו 1 - אזי הקיוביט השני יהיה

$$P_1 = \frac{1}{2} \Rightarrow \frac{1}{\sqrt{P_1}} = \sqrt{2} \Rightarrow \sqrt{2} (\alpha_{10}|0\rangle + \alpha_{11}|1\rangle) = -\frac{1}{\sqrt{3}}|0\rangle + \sqrt{\frac{2}{3}}|1\rangle$$

### ניסוי/פרדוקס EPR – Einstein Podolsky Rosen

בשנת 1935 הציעו אלברט איינשטיין, בוריס פודולסקי וניית'ן רוזן ניסוי מחשבתי במטרה להדגים את הבעייתיות של תורת הקוואנטים.

נניח שיש בידנו שני קיוביטים  $\frac{1}{\sqrt{2}}|00\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}}|11\rangle$  (שאר המקדמים הם 0 ולכן לא טרחנו לרשום אותם). אם נעשה את החישוב כמו שעשינו מקודם (לא נתעכב על זה) נגלה שהם מתואמים לחלוטין, במובן שאם נמדוד קיוביט אחד הקיוביט השני בהכרח מקבל את אותו הערך. נניח שהפרדנו את הקיוביטים (בלי לפגוע בסופר פוזיציה המשותפת, זה אפשרי מבחינה פיזיקלית, לא משנה לנו איך) וכעת אנסטסיה מחזיקה בקיוביט הראשון ובוריס בשני.

שניהם מתפצלים כך שמהרחק ביניהם גדול, נניח בוריס טס למאדים. שניהם, בתיאום מראש, מודדים את הקיוביט שיש בידיהם באותו הזמן.

באופן "פלאי" שניהם יקבלו את אותה התוצאה. הבעיה היא שעל פניו, בשביל תוצאה מתואמת איזשהי אינפורמציה היית צריכה לעבור מאחד מהם לשני, אבל אם כך הרי שהמעבר הזה היה מהיר מאוד - מרחק גדול כרצוננו בשביר שניה, מה שסותר את תורת היחסות שטוענת שאין אפשרות לעבור את מהירות האור.

**תוספת העשרה:** איינשטיין התנגד נחרצות לפרשנות המקובלת לתוצאות של תורת הקוונטים (ובראשה מה שמכונה "אסכולת קופנהגן") שהסבירה שאין מאפיינים מוגדרים אלא סופרפוזיציה<sup>17</sup>. לטענת איינשטיין הפיזיקה מתנהגת באופן מוגדר ולכן הוא סבר שיש "משתנים חבויים" כלומר ישנם משתנים נוספים, שאנו לא יודעים עליהם עדיין, שנקבעים בשלב מוקדם יותר בניסוי והם קובעים, מראש את תוצאתו. ניסוי EPR (כמו גם הניסוי המחשבתי המפורסם על החתול של שרדינגר) בא להראות שהפרשנות הרווחת של תורת הקוונטים בעייתית. לצערו של איינשטיין, ניסויים רבים, ביניהם מימוש של הניסוי שהוא עצמו הגה, הראו שוב ושוב שדווקא פרשנות קופנהגן תואמת את הנתונים ושלא יתכן להניח את קיומם של משתנים חבויים<sup>18</sup>.

### שער הדמר (Hadamard)

רכיב לוגי, בדומה לשערי NOT, AND וכד' במחשב קלאסי, שמבצע את הפעולה הבאה:

$$H(|0\rangle) = \frac{1}{\sqrt{2}}|0\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}}|1\rangle$$

<sup>17</sup>או בניסוחו המפורסם מתוך מכתב לחבר "מכניקת הקוונטים בהחלט מרשימה. אך קול פנימי אומר לי שהיא עדיין איננה הדבר האמיתי. התאוריה אומרת הרבה, אך לא באמת מקרבת אותנו במאומה לסודו של "הזקן" [אלוקים]. אני, איך שלא יהיה, משוכנע שהוא אינו מטיל קוביות"

<sup>18</sup>או כמו שהגיב הפיזיקאי נילס בוהר בתגובה לאימרה של איינשטיין "תפסיק לומר לאלוקים מה לעשות עם הקוביות שלו!" וכמו שהוסיף עשרות שנים אחר כך סטיבן הוקינג "לא זו בלבד שאלוקים משחק בקוביות הוא גם לפעמים זורק אותם למקומות בהם לא ניתן לראות אותם".

ואם כבר אז אצטט גם את הסופר טרי פראצ'ט ז"ל "אלוקים לא משחק בקובייה עם היקום: הוא משחק משחק בלתי ברור שהוא המציא, שאפשר להשוות, מנקודת המבט של שאר השחקנים (כלומר: כולם), לגרסה של משחק פוקר מבולבל, מזורז בחדר חשוך לחלוטין עם קלפים ריקים על סכומים אינסופיים, עם מחלק שלא אומר לך את החוקים ומחייך כל הזמן"

$$H(|1\rangle) = \frac{1}{\sqrt{2}}|0\rangle - \frac{1}{\sqrt{2}}|1\rangle$$

בבסיס שלנו (שמוגדר על ידי המצבים הקלאסיים)  $|0\rangle = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$ ,  $|1\rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$  ולכן בכתיב מטריצוני הפעולה תוגדר כ

$$H = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix}$$

כלומר עבור קיוביט כלשהו  $\begin{pmatrix} \alpha_0 \\ \alpha_1 \end{pmatrix}$  הפעלת שער הדמר על הקיוביט היא למעשה הכפלה שלו במטריצה  $H$  כלומר  $H \cdot \begin{pmatrix} \alpha_0 \\ \alpha_1 \end{pmatrix}$

### פעולה חוקית על $k$ קיוביטים

פעולה על  $k$  קיוביטים היא בעצם פעולה לינארית ואוניטרית מעל מרחב ממימד  $2^k$  היא תפעל על וקטורים מהסוג

$$\begin{pmatrix} \alpha_{0\dots 0} \\ \vdots \\ \alpha_{1\dots 1} \end{pmatrix} = \sum_{j_1\dots j_k \in \{0,1\}} \alpha_{j_1\dots j_k} |j_1\dots j_k\rangle$$

נזכור שכאשר יש לנו אוסף של  $k$  קיוביטים אנו מתייחסים אל הבסיס המורכב מהמצבים הקלאסיים  $|0\dots 0\rangle, |0\dots 01\rangle, \dots, |1\dots 1\rangle$  וכל סופרפוזיציה היא צירוף לינארי של אברי הבסיס. נשים לב, בסכום כאן האינדקס רץ מ  $0\dots 0$  עד  $1\dots 1$ .

**דוגמה:** שער  $CNOT - \text{Controlled NOT}$

השער מקבל 2 קיוביטים  $q_1, q_2$  והופך את  $q_2$  אם  $q_1 = |1\rangle$

נשים לב שאנו צריכים רק לתאר מה הפעולה עושה למצבים הקלאסיים. במקרה של סופרפוזיציה תוצאת הפעולה תתקבל מהלינאריות של הפעולה ומכך שהסופרפוזיציה היא למעשה צירוף לינארי של הבסיס.

$$CNOT(|0q_2\rangle) = |0q_2\rangle, CNOT(|1q_2\rangle) = |0(1-q_2)\rangle$$

ובכתיב מטריצוני

$$CNOT = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

אפשר להגיע למטריצה על ידי כך שעבור כל וקטור בסיס  $e_i$  נשאל מה קורה כשמפעילים את הפעולה עליו ואת התשובה נכתוב בטור ה- $i$ . לדוגמה עבור

$$e_3 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} = |10\rangle \Rightarrow q_1 = 1 \Rightarrow CNOT(e_3) = |11\rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

ולכן בטור השלישי במטריצה כתבנו

$$\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

### פעולה חלקית

מה קורה כשמפעילים פעולה על  $k$  קיוביטים מתוך  $n$ ?

$$\sum_{j_1 \dots j_n \in \{0,1\}} \alpha_{j_1 \dots j_n} |j_1 \dots j_n\rangle \mapsto \sum_{j_1 \dots j_n \in \{0,1\}} \alpha_{j_1 \dots j_n} U(|j_1 \dots j_k\rangle) \otimes |j_{k+1} \dots j_n\rangle$$

כלומר נניח ויש לנו שלושה קיוביטים בסופרפוזיציה

$$q_1 q_2 q_3 = \alpha_{000}|000\rangle + \alpha_{001}|001\rangle + \alpha_{010}|010\rangle + \alpha_{011}|011\rangle$$

$$+ \alpha_{100}|100\rangle + \alpha_{101}|101\rangle + \alpha_{110}|110\rangle + \alpha_{111}|111\rangle$$

ונפעיל שער  $CNOT$  על שני הקיוביטים הראשונים ( $q_1 q_2$  כלומר אם  $q_1 = 1$  נהפוך את  $q_2$ ) כל שנעשה הוא להפעיל את הפעולה על המצבים הקלאסיים וההשלכה על הסופרפוזיציה תנבע מהלינאריות. כלומר נקבל

$$CNOT(q_1 q_2) q_3 = \alpha_{000}|000\rangle + \alpha_{001}|001\rangle + \alpha_{010}|010\rangle + \alpha_{011}|011\rangle$$

$$+ \alpha_{100}|110\rangle + \alpha_{101}|111\rangle + \alpha_{110}|100\rangle + \alpha_{111}|101\rangle$$

$$= \alpha_{000}|000\rangle + \alpha_{001}|001\rangle + \alpha_{010}|010\rangle + \alpha_{011}|011\rangle$$

$$+ \alpha_{110}|100\rangle + \alpha_{111}|101\rangle + \alpha_{100}|110\rangle + \alpha_{101}|111\rangle$$

**דוגמה:** נתחיל משני קיוביטים במצב הקלאסי  $q_1, q_2 = |00\rangle$

נפעיל שער  $H$  על  $q_1$  נקבל

$$H(q_1) \otimes q_2 = \left( \frac{1}{\sqrt{2}}|0\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}}|1\rangle \right) \otimes |0\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}|00\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}}|10\rangle$$

עכשיו נעפיל שער  $CNOT$  על שני הקיוביטים

$$\frac{1}{\sqrt{2}}CNOT(|00\rangle) + \frac{1}{\sqrt{2}}CNOT(|10\rangle) = \frac{1}{\sqrt{2}}|00\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}}|11\rangle$$

וקבילנו את הקיוביטים שהיינו צריכים לצורך ניסוי  $EPR$

חשוב לשים לב שהתחלנו מקיוביטים במצב קלאסי (וכמובן לא שזור) וסיימנו עם סופרפוזיציה של קיוביטים שזורים.

איך אנו יודעים שהם שזורים?

1. לפי תוצאות מדידה - אם נמדוד קיוביט אחד זה ישפיע על המצב של הקיוביט השני.

2. אם הם לא היו שזורים היה היינו יכולים לבטא את הסופרפוזיציה כמכפלה טנזורית כלומר

$$\frac{1}{\sqrt{2}}|00\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}}|11\rangle = (\alpha_0|0\rangle + \alpha_1|1\rangle) \otimes (\beta_0|0\rangle + \beta_1|1\rangle)$$

וזה לא אפשרי (אם ננס להפתוח את המכפלה ולהשוות מקדמים נקבל מערכת משוואות ב-4 נעלמים שאין לה פתרון)

### טלפוטציה קוונטית

לאנסטסיה יש קיוביט  $q_1 - 1$  בסופרפוזיציה  $\alpha_0|0\rangle + \alpha_1|1\rangle$  לא ידועה. היא רוצה לשלוח את הקיוביט לבוריס (ליתר דיוק היא רוצה להביא למצב שלבוריס יהיה העתק זהה של הקיוביט הזה).

הבנה: אנסטסיה ובוריס מייצרים זוג קיוביטים כמו בניסוי  $EPR$   $q_2 q_3 = \frac{1}{\sqrt{2}}|00\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}}|11\rangle$  המצב המשותף (אם מסופים את הקיוביט  $q_1$  של אנסטסיה ומסתכלים על שלושתם כעל סופרפוזיציה משותפת)

$$(q_1 q_2 q_3) = (\alpha_0|0\rangle + \alpha_1|1\rangle) \otimes \left( \frac{1}{\sqrt{2}}|00\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}}|11\rangle \right)$$