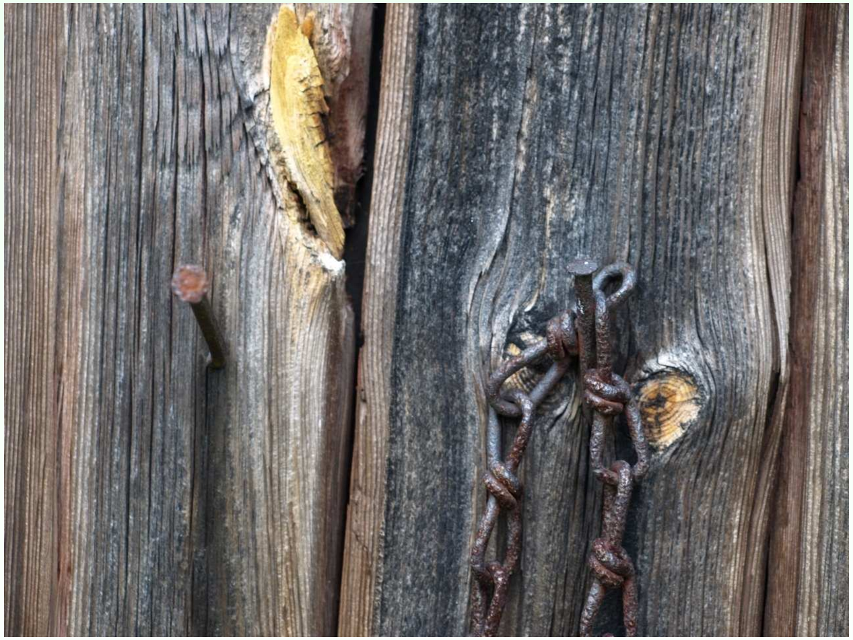
Määrätty integraali

Hannu Lehto
Lahden Lyseon lukio

Osa I: Porrassumma ja pinta-ala

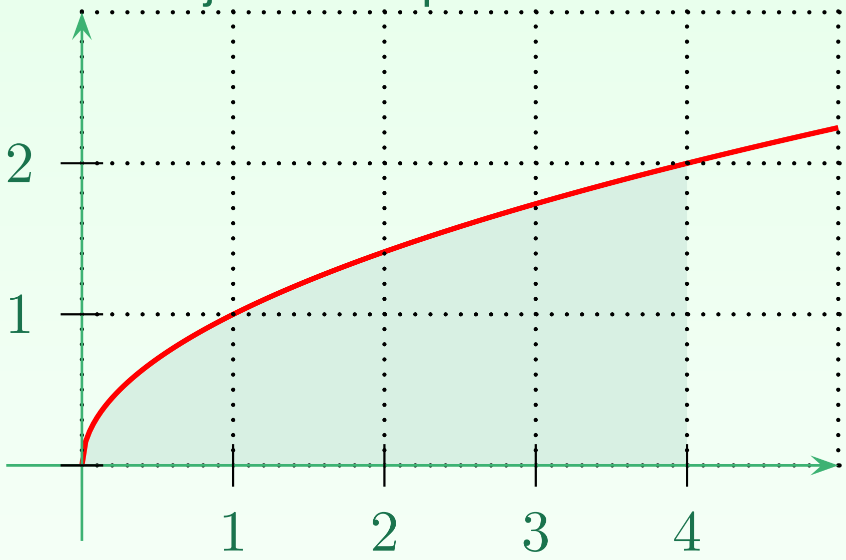


Esimerkki

Esimerkki. Arvioi (approksimoi) käyrän $y = \sqrt{x}$, x-akselin ja suoran $x = 4$ rajoittaman pinnan ala.

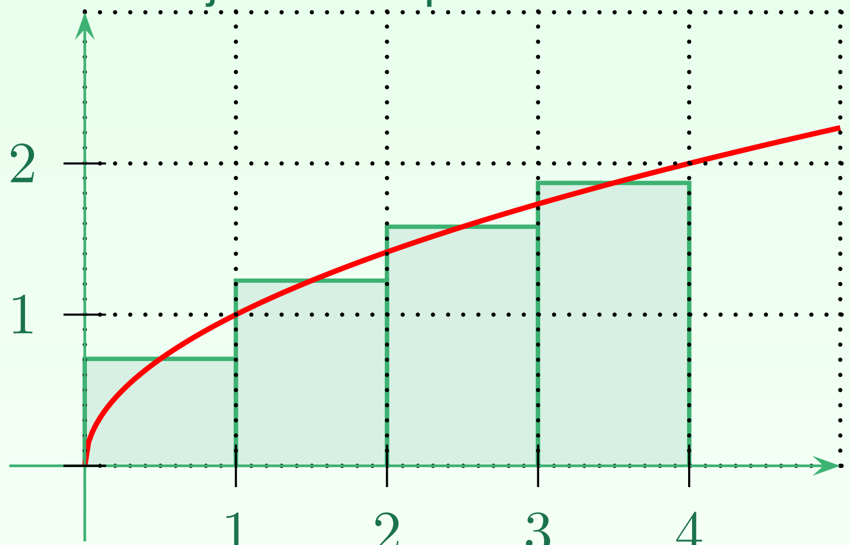
Esimerkki

Esimerkki. Arvioi (approksimoi) käyrän $y = \sqrt{x}$, x-akselin ja suoran $x = 4$ rajoittaman pinnan ala.



Esimerkki

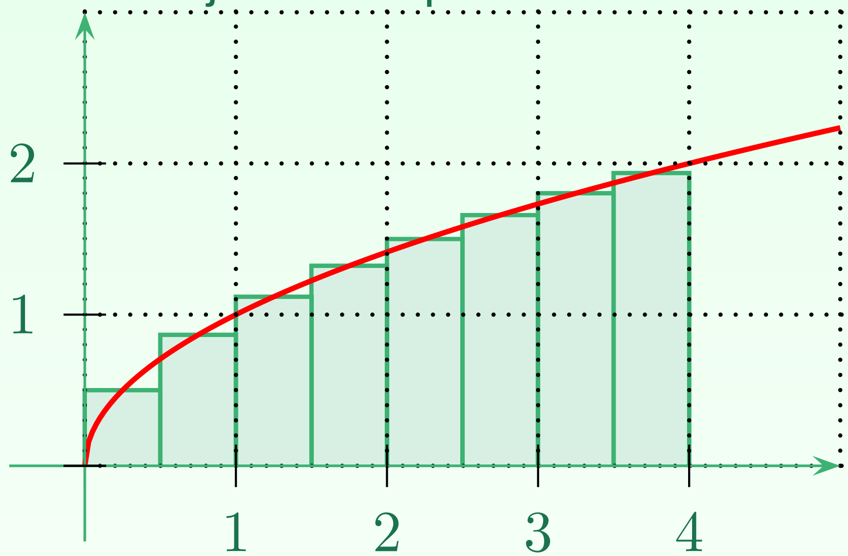
Esimerkki. Arvioi (approksimoi) käyrän $y = \sqrt{x}$, x-akselin ja suoran $x = 4$ rajoittaman pinnan ala.



Porrassumma $S_4 = 1 \cdot \sqrt{\frac{1}{2}} + 1 \cdot \sqrt{\frac{3}{2}} + 1 \cdot \sqrt{\frac{5}{2}} + 1 \cdot \sqrt{\frac{7}{2}} \approx 5,384$ on alan likiarvo. Miten likiarvoa voidaan parantaa?

Esimerkki

Esimerkki. Arvioi (approksimoi) käyrän $y = \sqrt{x}$, x-akselin ja suoran $x = 4$ rajoittaman pinnan ala.

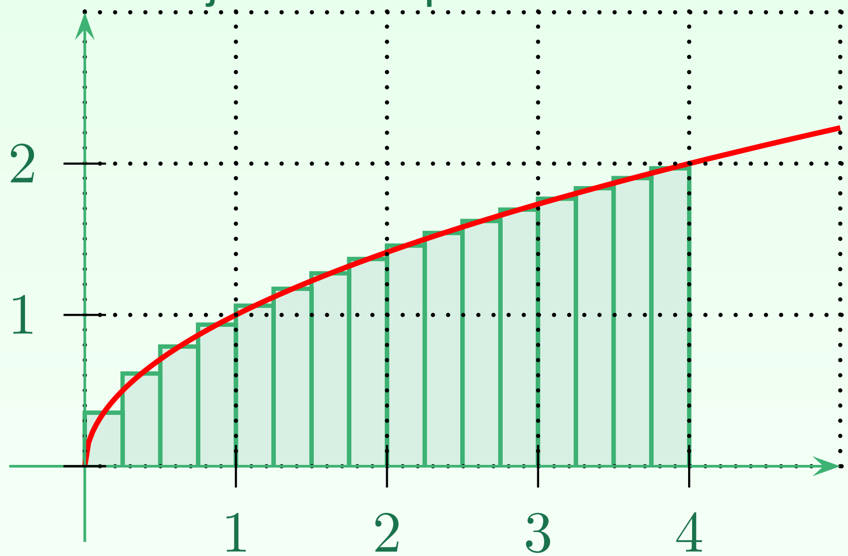


Porrassummat (jakovälien lukumäärä on n)

n	S_n
4	5,384
8	5,352

Esimerkki

Esimerkki. Arvioi (approksimoi) käyrän $y = \sqrt{x}$, x-akselin ja suoran $x = 4$ rajoittaman pinnan ala.

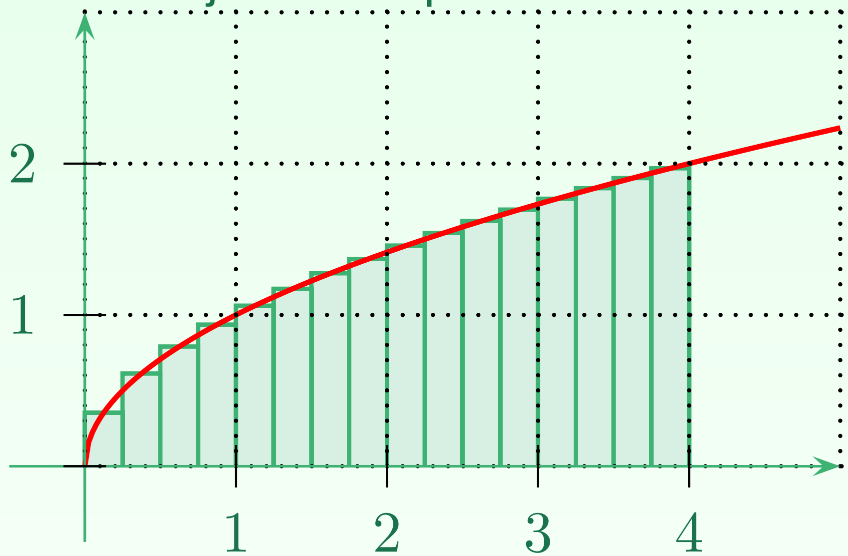


Porrassummat (jakovälien lukumäärä on n)

n	S_n
4	5,384
8	5,352
16	5,340

Esimerkki

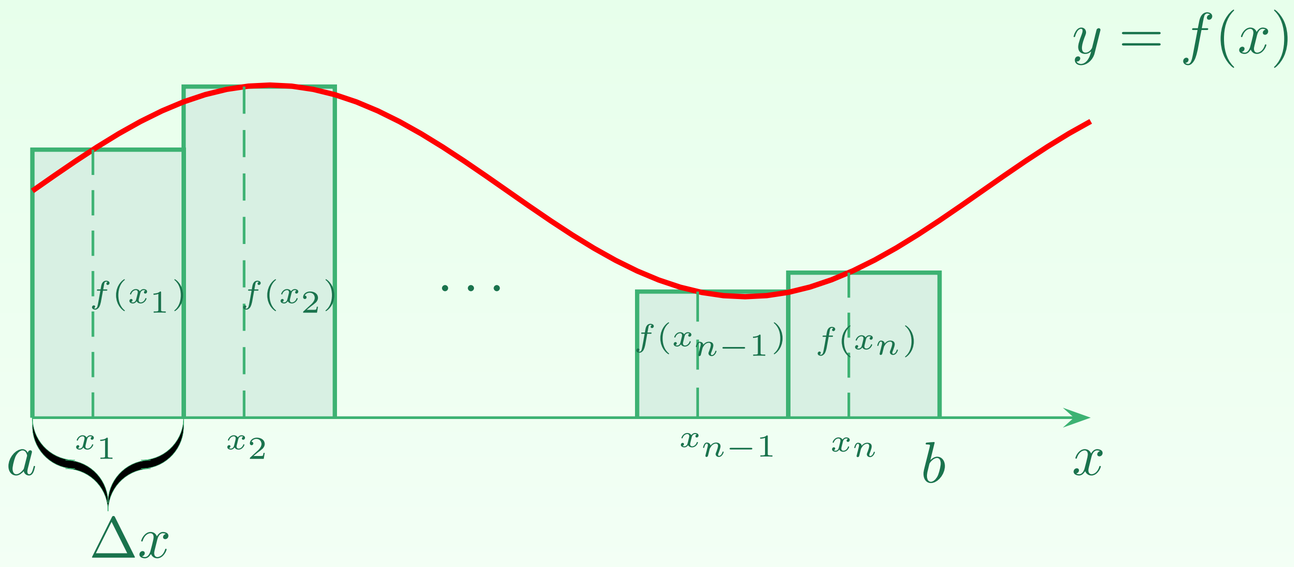
Esimerkki. Arvioi (approksimoi) käyrän $y = \sqrt{x}$, x-akselin ja suoran $x = 4$ rajoittaman pinnan ala.



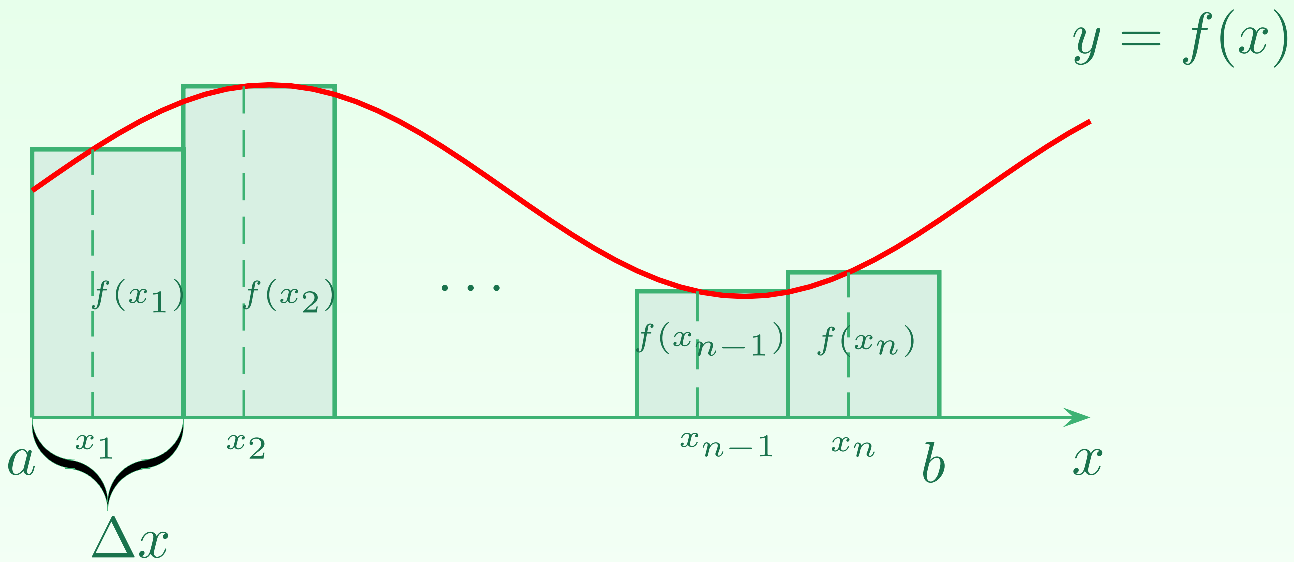
Porrassummat (jakovälien lukumäärä on n)

n	S_n
4	5,384
8	5,352
16	5,340
$\downarrow$	$\downarrow$
∞	Pinta-ala

Porrassumma yli välin $[a, b]$

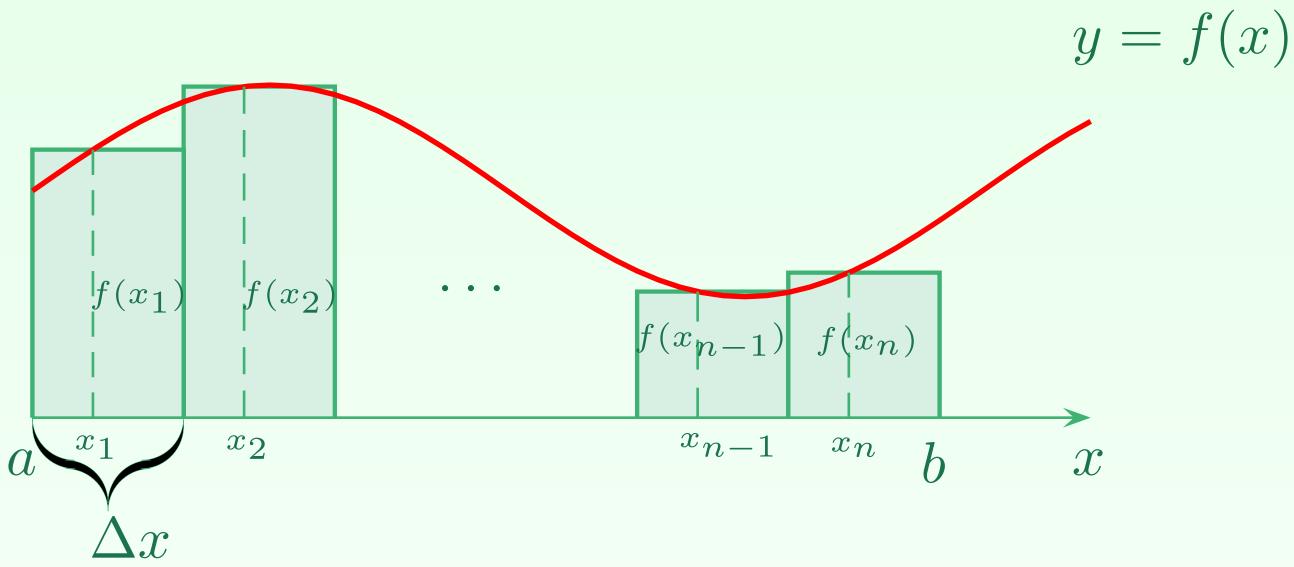


Porrassumma yli välin $[a, b]$



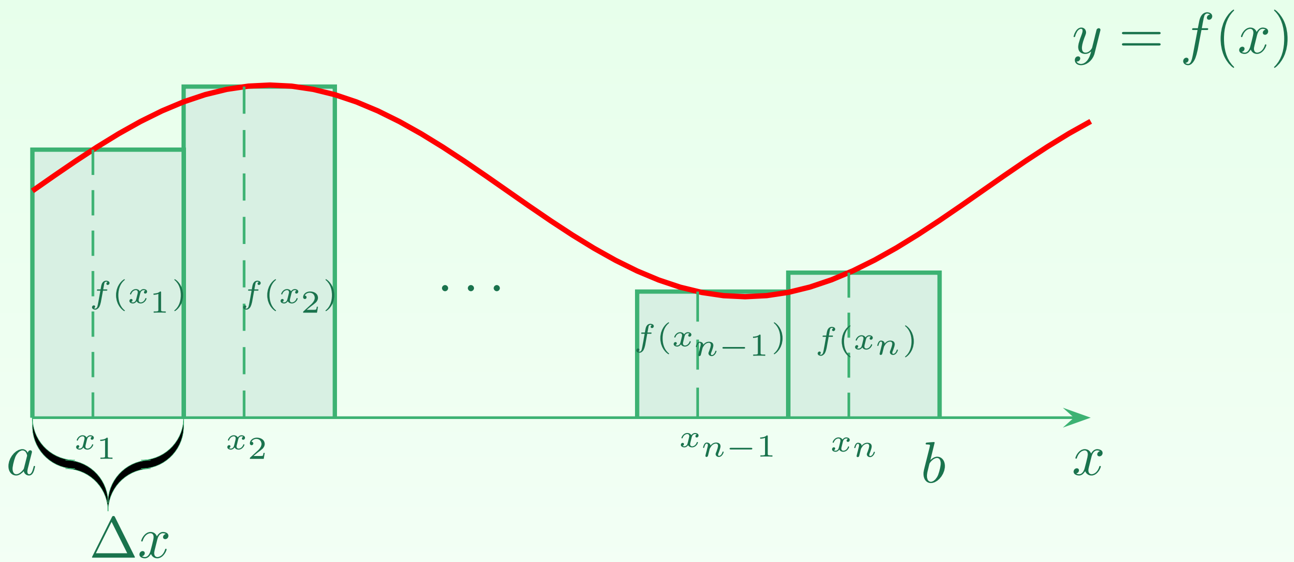
- Funktio f on määritelty välillä $[a, b]$.

Porrassumma yli välin $[a, b]$



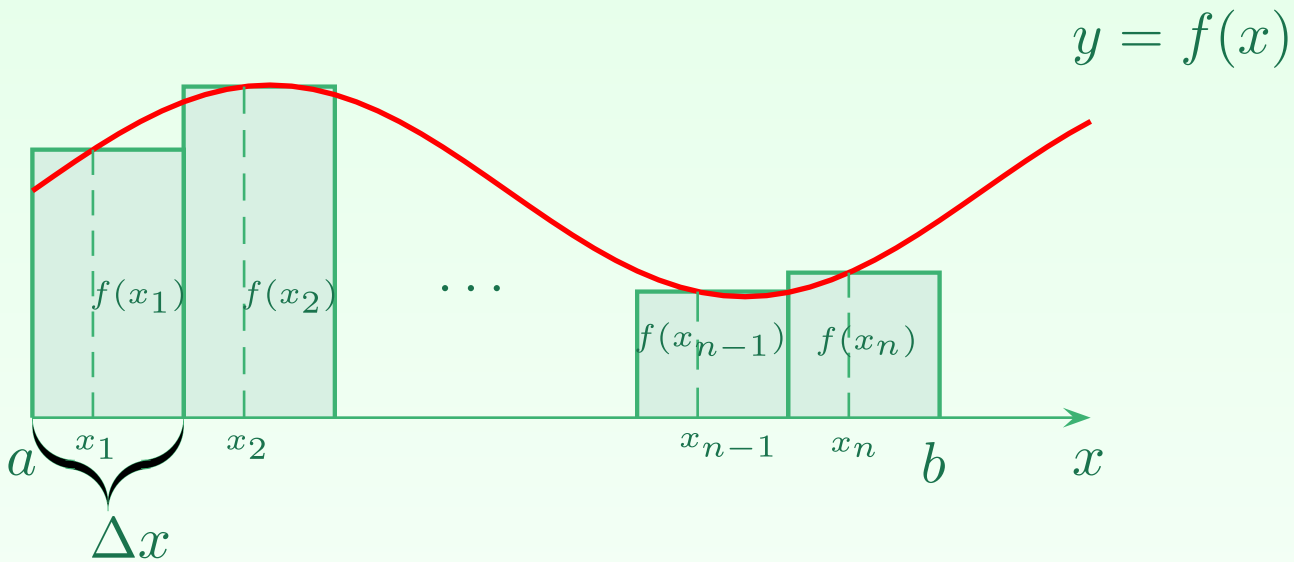
- Funktio f on määritelty välillä $[a, b]$.
- Väli jaetaan n:ään yhtä pitkään osaan, jolloin $\Delta x = \dfrac{b-a}{n}$.

Porrassumma yli välin $[a,b]$



- Funktio f on määritelty välillä $[a,b]$.
- Väli jaetaan n:ään yhtä pitkään osaan, jolloin $\Delta x = \dfrac{b-a}{n}$.
- $x_1, x_2, \cdots, x_{n-1}, x_n$ ovat vastaavien jakovälien pisteitä.

Porrassumma yli välin $[a, b]$

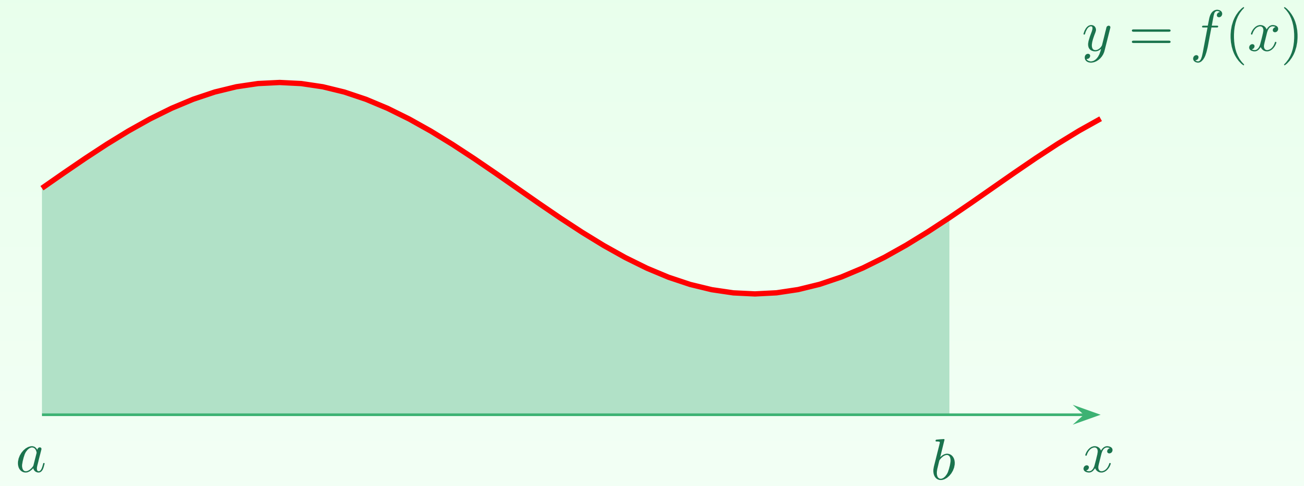


- Funktio f on määritelty välillä $[a, b]$.
- Väli jaetaan n:ään yhtä pitkään osaan, jolloin $\Delta x = \dfrac{b-a}{n}$.
- $x_1, x_2, \cdots, x_{n-1}, x_n$ ovat vastaavien jakovälien pisteitä.
- *Porrassumma* on

$$\begin{aligned} S_n &= f(x_1)\Delta x + f(x_2)\Delta x + \ldots + f(x_{n-1})\Delta x + f(x_n)\Delta x \\ &= \sum_{i=1}^{n} f(x_i)\Delta x \end{aligned}$$

Pinta-ala

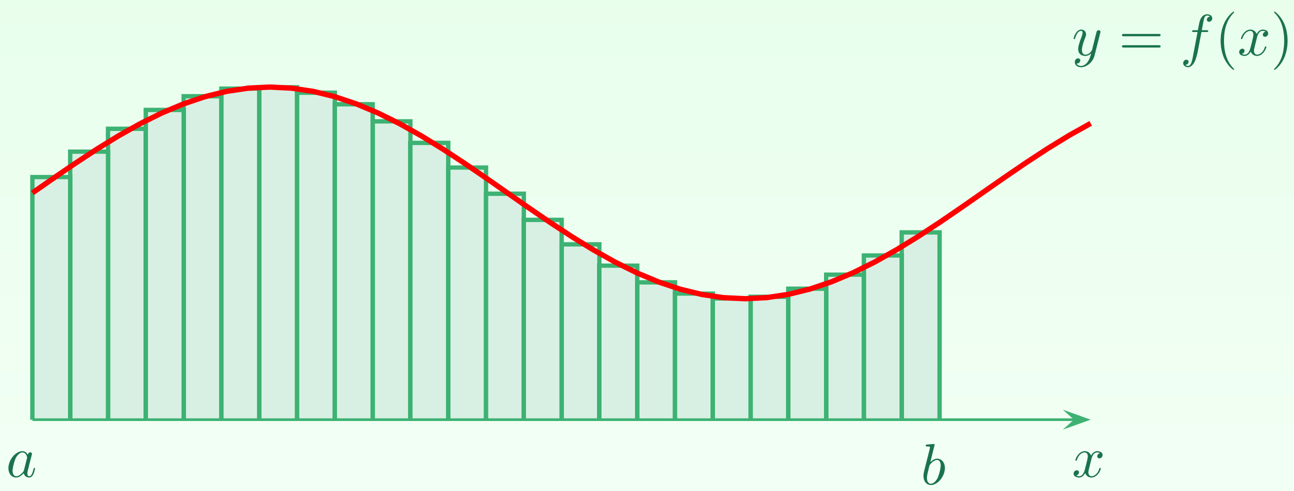
Olkoon funktio f on jatkuva ja epänegatiivinen välillä $[a, b]$.



Silloin kuvassa olevan pinnan ala on

Pinta-ala

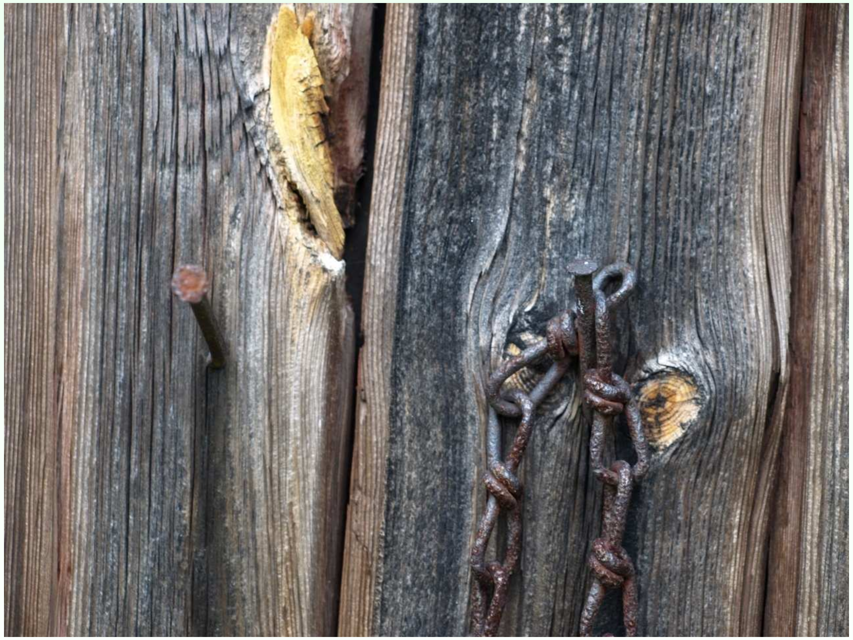
Olkoon funktio f on jatkuva ja epänegatiivinen välillä $[a, b]$.



Silloin kuvassa olevan pinnan ala on porrassummien raja-arvo, kun jakovälien lukumäärä n lähestyy ääretöntä, ts.

$$A = lim_{n\to\infty} \sum_{i=1}^{n} f(x_i)\Delta x.$$

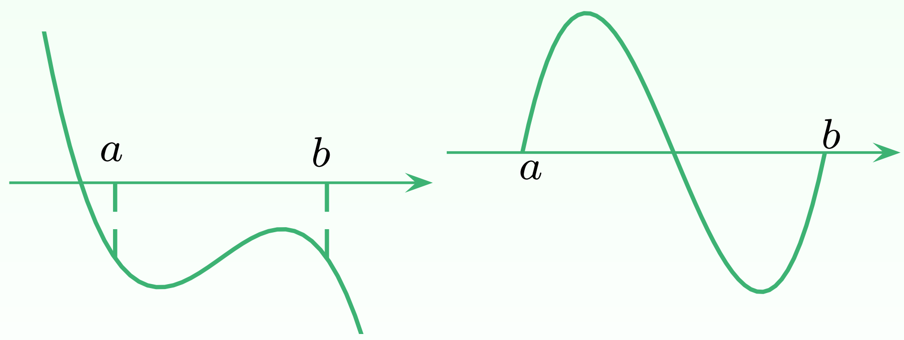
Osa II: Määrätty integraali



Määritelmä

Määritelmä 1. Olkoon funktio f jatkuva välillä $[a, b]$. Funktion f *määrätty integraali* $\int_a^b f(x)dx$ välillä $[a, b]$ on porrassumman raja-arvo, kun jakovälien lukumäärä lähestyy ääretöntä.

Mitä voidaan päätellä integraalista $\int_a^b f(x)dx$ seuraavissa tapauksissa?



Kertymäfunktio

Olkoon f jatkuva. Funktio

$$K_a(x) = \int_a^x f(t)dt, \text{ missä } a \text{ on vakio ja } x > a,$$

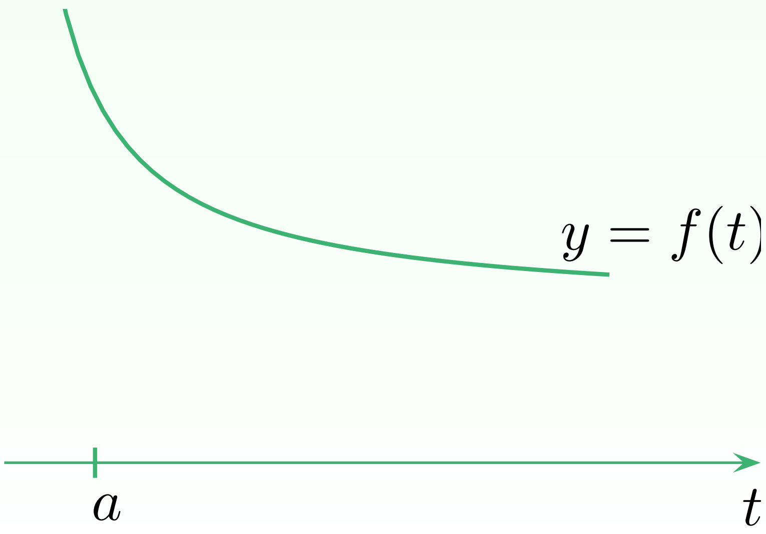
on *kertymäfunktio* kohdassa a. Lisäksi $K_a(a) = \int_a^a f(t)dt = 0$

Kertymäfunktio

Olkoon f jatkuva. Funktio

$$K_a(x) = \int_a^x f(t)dt, \text{ missä } a \text{ on vakio ja } x > a,$$

on *kertymäfunktio* kohdassa a. Lisäksi $K_a(a) = \int_a^a f(t)dt = 0$

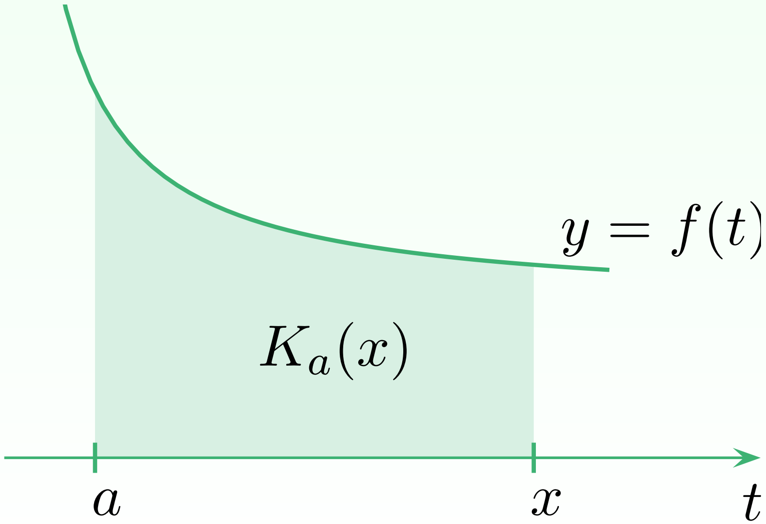


Kertymäfunktio

Olkoon f jatkuva. Funktio

$$K_a(x) = \int_a^x f(t)dt, \text{ missä } a \text{ on vakio ja } x > a,$$

on *kertymäfunktio* kohdassa a. Lisäksi $K_a(a) = \int_a^a f(t)dt = 0$



Kertymäfunktion derivaatta

Lause 1.

$$K_a'(x) = D\int_a^x f(t)dt = f(x)$$

Todistus. Katso oppikirjasta MT10 s.59–60. □

Kertymäfunktion derivaatta

Lause 1.

$$K_a'(x) = D\int_a^x f(t)dt = f(x)$$

Todistus. Katso oppikirjasta MT10 s.59–60. □

Kertymäfunktio $K_a(x)$ on siis eräs funktion $f(x)$ integraalifunktio.

Määrätyn integraalin ja integraalifunktion yhteys

Lause 2. [1] *Olkoon $F(x)$ jokin välillä $[a,b]$ määritellyn jatkuvan funktion $f(x)$ integraalifunktio. Silloin on*

$$\boxed{\int_a^b f(x)dx = F(b) - F(a).}$$

Määrätyn integraalin ja integraalifunktion yhteys

Lause 2. [1] *Olkoon* $F(x)$ *jokin välillä* $[a,b]$ *määritellyn jatkuvan funktion* $f(x)$ *integraalifunktio. Silloin on*

$$\boxed{\int_a^b f(x)dx = F(b) - F(a).}$$

Todistus. $K_a(x) = F(x) + c$

Määrätyn integraalin ja integraalifunktion yhteys

Lause 2. [1] *Olkoon $F(x)$ jokin välillä $[a, b]$ määritellyn jatkuvan funktion $f(x)$ integraalifunktio. Silloin on*

$$\boxed{\int_a^b f(x)dx = F(b) - F(a).}$$

Todistus. $K_a(x) = F(x) + c$

Koska $K_a(a) = 0$,

Määrätyn integraalin ja integraalifunktion yhteys

Lause 2. [1] *Olkoon* $F(x)$ *jokin välillä* $[a,b]$ *määritellyn jatkuvan funktion* $f(x)$ *integraalifunktio. Silloin on*

$$\boxed{\int_a^b f(x)dx = F(b) - F(a).}$$

Todistus. $K_a(x) = F(x) + c$
Koska $K_a(a) = 0$,niin $F(a) + c = 0$,

Määrätyn integraalin ja integraalifunktion yhteys

Lause 2. [1] *Olkoon $F(x)$ jokin välillä $[a,b]$ määritellyn jatkuvan funktion $f(x)$ integraalifunktio. Silloin on*

$$\boxed{\int_a^b f(x)dx = F(b) - F(a).}$$

Todistus. $K_a(x) = F(x) + c$
Koska $K_a(a) = 0$,niin $F(a) + c = 0$,joten $-F(a) = c$.

Määrätyn integraalin ja integraalifunktion yhteys

Lause 2. [1] *Olkoon $F(x)$ jokin välillä $[a, b]$ määritellyn jatkuvan funktion $f(x)$ integraalifunktio. Silloin on*

$$\boxed{\int_a^b f(x)dx = F(b) - F(a).}$$

Todistus. $K_a(x) = F(x) + c$

Koska $K_a(a) = 0$,niin $F(a) + c = 0$,joten $-F(a) = c$.

$K_a(b) = F(b) + c$,

Määrätyn integraalin ja integraalifunktion yhteys

Lause 2. [1] *Olkoon $F(x)$ jokin välillä $[a, b]$ määritellyn jatkuvan funktion $f(x)$ integraalifunktio. Silloin on*

$$\boxed{\int_a^b f(x)dx = F(b) - F(a).}$$

Todistus. $K_a(x) = F(x) + c$
Koska $K_a(a) = 0$,niin $F(a) + c = 0$,joten $-F(a) = c$.
$K_a(b) = F(b) + c$, joten $\int_a^b f(x)dx = K_a(b) = F(b) - F(a)$. $\square$

Määrätyn integraalin ja integraalifunktion yhteys

Lause 2. [1] *Olkoon $F(x)$ jokin välillä $[a, b]$ määritellyn jatkuvan funktion $f(x)$ integraalifunktio. Silloin on*

$$\boxed{\int_a^b f(x)dx = F(b) - F(a).}$$

Todistus. $K_a(x) = F(x) + c$

Koska $K_a(a) = 0$,niin $F(a) + c = 0$,joten $-F(a) = c$.

$K_a(b) = F(b) + c$, joten $\int_a^b f(x)dx = K_a(b) = F(b) - F(a)$. □

Merkintä: $\int_a^b f(x)dx = \Big/_a^b F(x) = F(b) - F(a)$

[1] Lauseet 1 ja 2 muodostavat analyysin peruslauseen. Siitä saa lisätietoa esimerkiksi Solmu-lehden artikkelista.

Määrätyn integraalin ominaisuuksia

1. $\int_a^b cf(x)dx = c\int_a^b f(x)dx$ (vakion siirtosääntö)

Määrätyn integraalin ominaisuuksia

1. $\int_a^b cf(x)dx = c\int_a^b f(x)dx$ (vakion siirtosääntö)

2. $\int_a^b (f(x)+g(x))\,dx = \int_a^b f(x)dx + \int_a^b g(x)dx$

Määrätyn integraalin ominaisuuksia

1. $\int_a^b cf(x)dx = c\int_a^b f(x)dx$ (vakion siirtosääntö)

2. $\int_a^b \left(f(x)+g(x)\right)dx = \int_a^b f(x)dx + \int_a^b g(x)dx$

3. $\int_a^a f(x)dx =$

Määrätyn integraalin ominaisuuksia

1. $\int\limits_a^b cf(x)dx = c\int\limits_a^b f(x)dx$ (vakion siirtosääntö)

2. $\int\limits_a^b (f(x)+g(x))\,dx = \int\limits_a^b f(x)dx + \int\limits_a^b g(x)dx$

3. $\int\limits_a^a f(x)dx = 0$

Osa I: Porrassumma ja pinta-ala
Osa II: Määrätty integraali
- Määritelmä
- Kertymäfunktio
- Kertymäfunktion derivaatta
- Määrätyn integraalin ja integraalifunktion yhteys
- Määrätyn integraalin ominaisuuksia

Osa III: Pinta-aloja
Osa IV: Tilavuuksia

Määrätyn integraalin ominaisuuksia

1. $\int_a^b cf(x)dx = c\int_a^b f(x)dx$ (vakion siirtosääntö)

2. $\int_a^b (f(x)+g(x))\,dx = \int_a^b f(x)dx + \int_a^b g(x)dx$

3. $\int_a^a f(x)dx = 0$

4. $\int_a^b f(x)dx = -\int_b^a f(x)dx$

Määrätyn integraalin ominaisuuksia

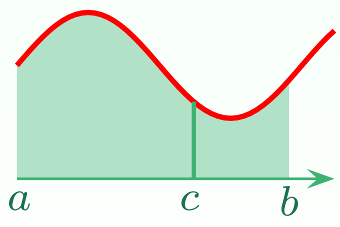
1. $\int_a^b cf(x)dx = c\int_a^b f(x)dx$ (vakion siirtosääntö)

2. $\int_a^b (f(x)+g(x))\,dx = \int_a^b f(x)dx + \int_a^b g(x)dx$

3. $\int_a^a f(x)dx = 0$

4. $\int_a^b f(x)dx = -\int_b^a f(x)dx$

5. $\int_a^b f(x)dx = \int_a^c f(x)dx + \int_c^b f(x)dx$ (paloittain integrointi)

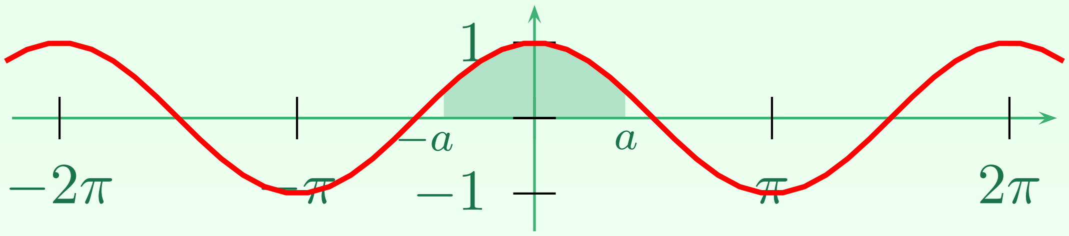


Määrätyn integraalin ominaisuuksia

6. Jos f on parillinen, ts. $f(-x) = f(x)$,

Määrätyn integraalin ominaisuuksia

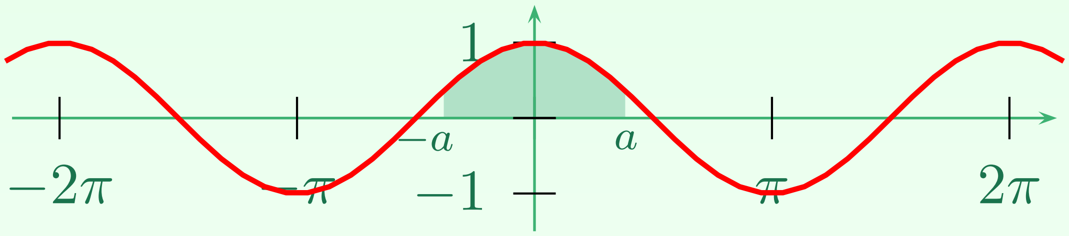
6. Jos f on parillinen, ts. $f(-x) = f(x)$,



Kuva 1: Funktio $y = cosx$ on esimerkki parillisesta funktiosta

Määrätyn integraalin ominaisuuksia

6. Jos f on parillinen, ts. $f(-x) = f(x)$,

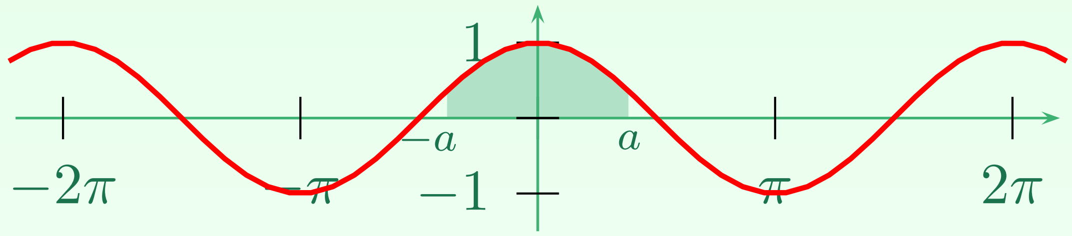


Kuva 1: Funktio $y = cosx$ on esimerkki parillisesta funktiosta

niin $\int\limits_{-a}^{a} f(x)dx =$

Määrätyn integraalin ominaisuuksia

6. Jos f on parillinen, ts. $f(-x) = f(x)$,



Kuva 1: Funktio $y = cosx$ on esimerkki parillisesta funktiosta

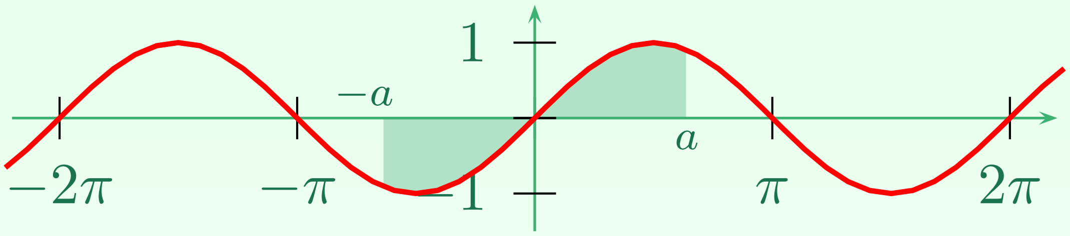
niin $\int\limits_{-a}^{a} f(x)dx = 2\int\limits_{0}^{a} f(x)dx.$

Määrätyn integraalin ominaisuuksia

7. Jos f on pariton, ts. $f(-x) = -f(x)$,

Määrätyn integraalin ominaisuuksia

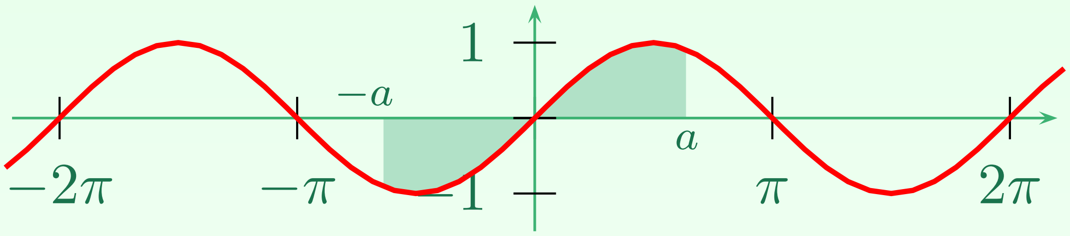
7. Jos f on pariton, ts. $f(-x) = -f(x)$,



Kuva 2: Funktio $y = sinx$ on esimerkki parittomasta funktiosta

Määrätyn integraalin ominaisuuksia

7. Jos f on pariton, ts. $f(-x) = -f(x)$,

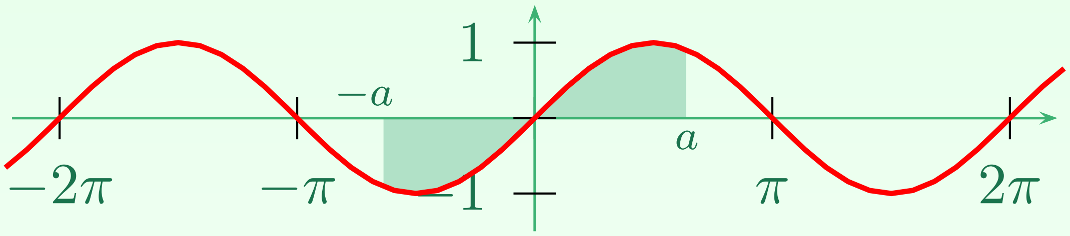


Kuva 2: Funktio $y = sinx$ on esimerkki parittomasta funktiosta

niin $\int_{-a}^{a} f(x)dx =$

Määrätyn integraalin ominaisuuksia

7. Jos f on pariton, ts. $f(-x) = -f(x)$,



Kuva 2: Funktio $y = sinx$ on esimerkki parittomasta funktiosta

niin $\int_{-a}^{a} f(x)dx = 0$.

Määrätyn integraalin ominaisuuksia

8. Osittaisintegrointi

$$\int_a^b f'(x)g(x)dx = \Big/_a^b f(x)g(x) - \int_a^b f(x)g'(x)dx$$

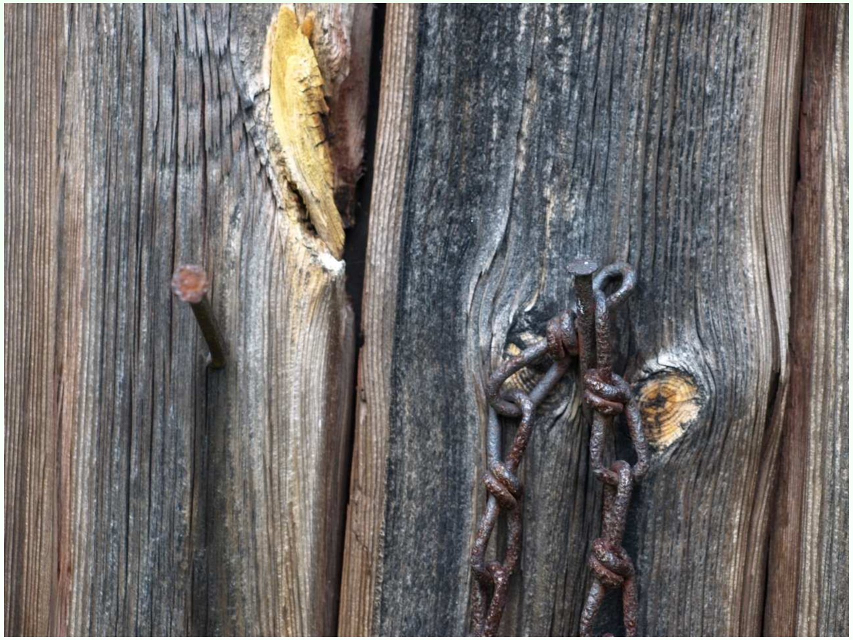
Määrätyn integraalin ominaisuuksia

8. Osittaisintegrointi

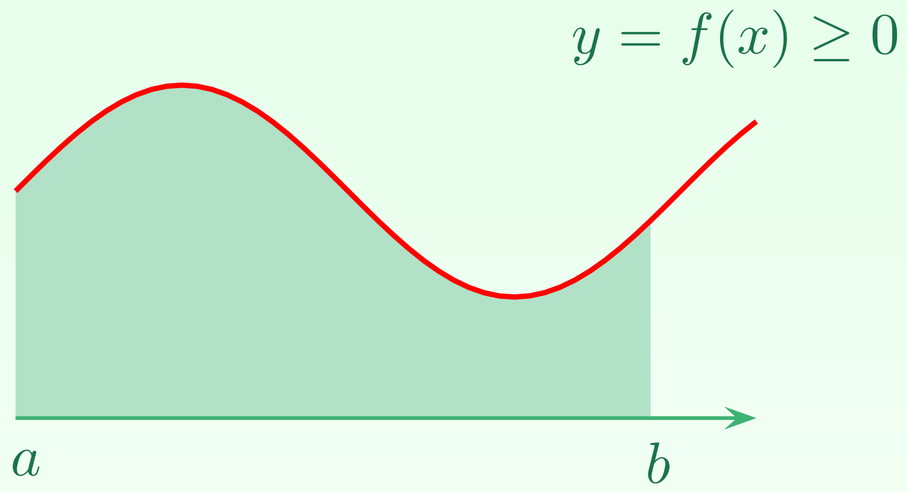
$$\int_a^b f'(x)g(x)dx = \Big/_{\!a}^{\!b} f(x)g(x) - \int_a^b f(x)g'(x)dx$$

Esimerkki. $\displaystyle\int_0^1 xe^x dx$

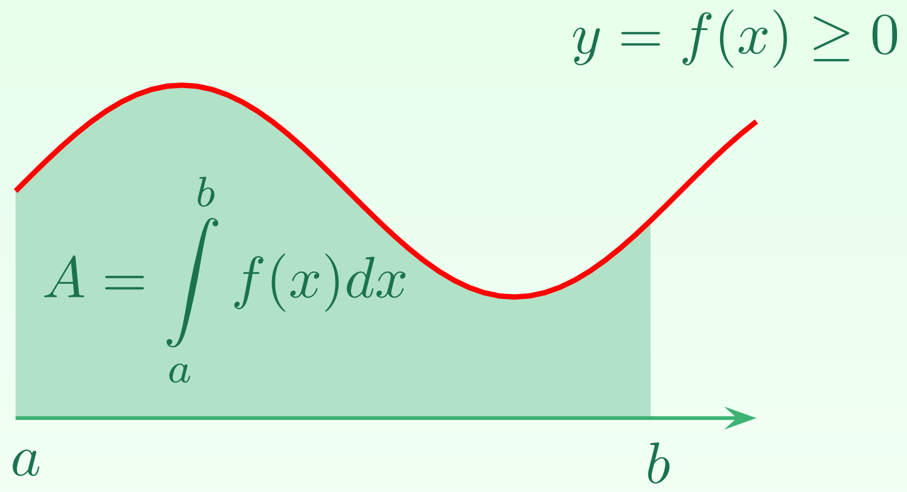
Osa III: Pinta-aloja



Käyrän ja x-akselin välinen ala

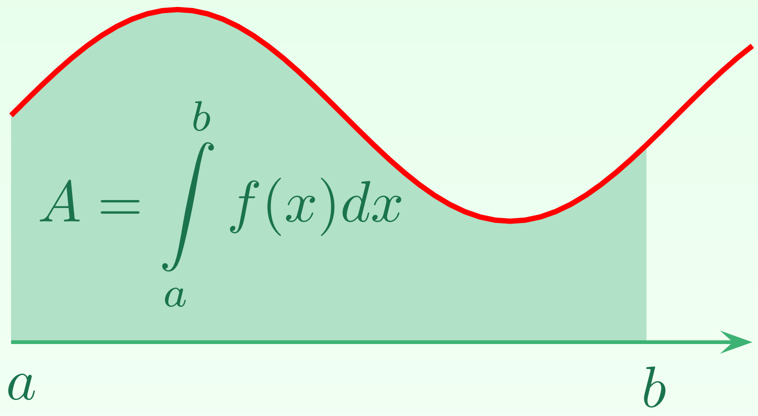


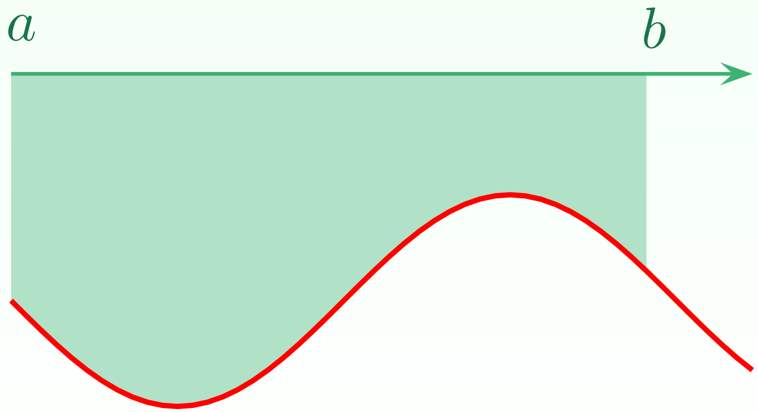
Käyrän ja x-akselin välinen ala



Käyrän ja x-akselin välinen ala

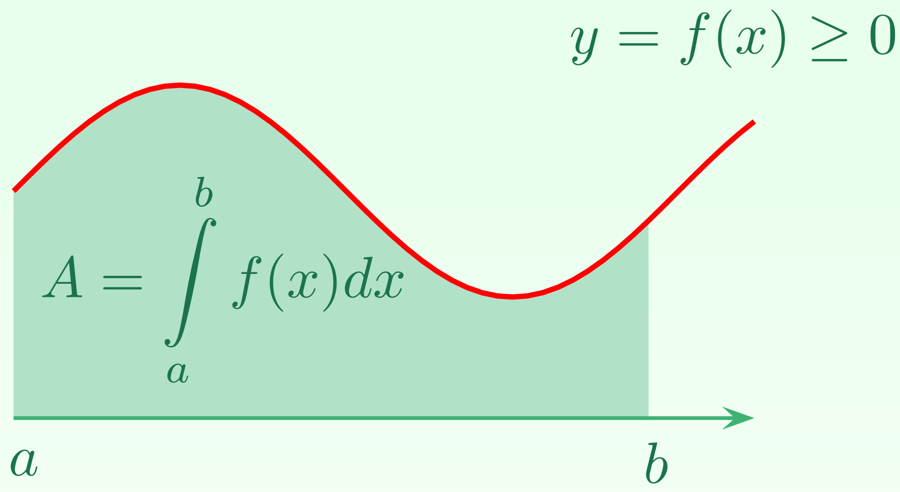
$$y = f(x) \geq 0$$

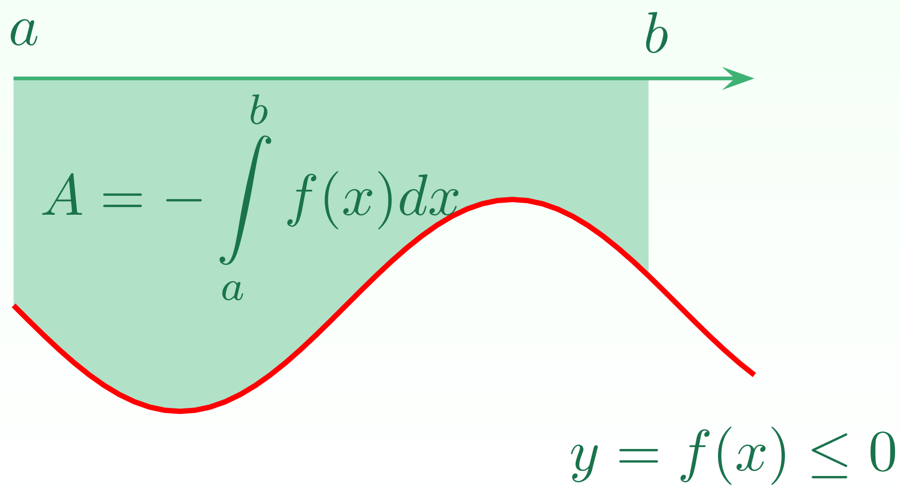




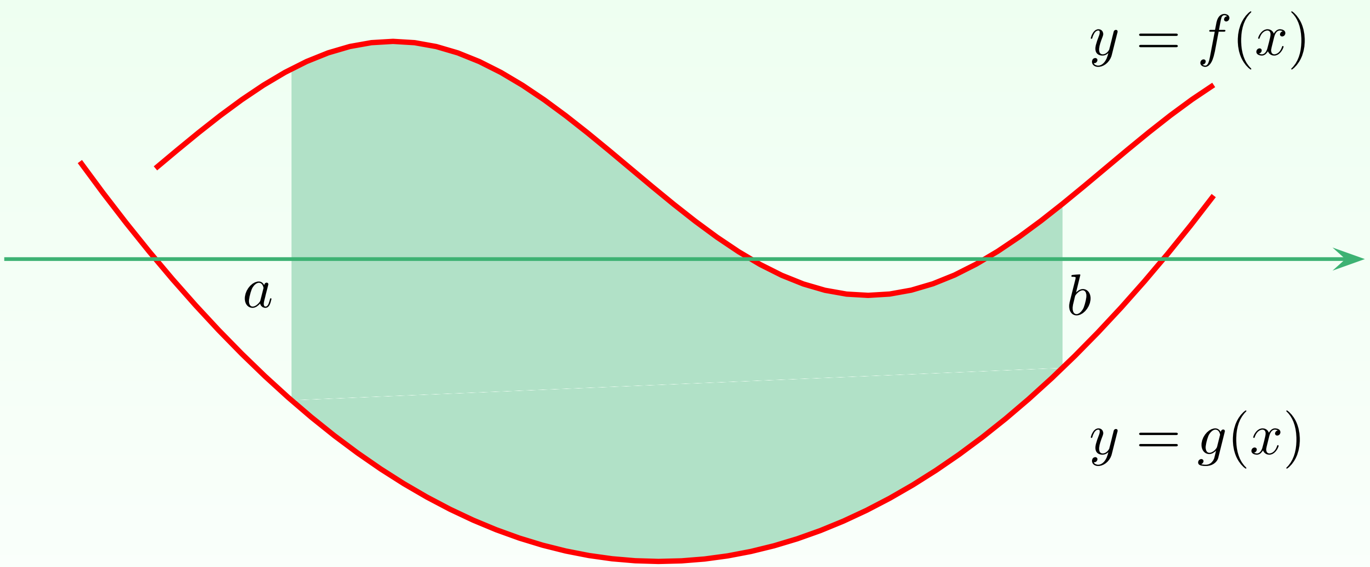
$$y = f(x) \leq 0$$

Käyrän ja x-akselin välinen ala

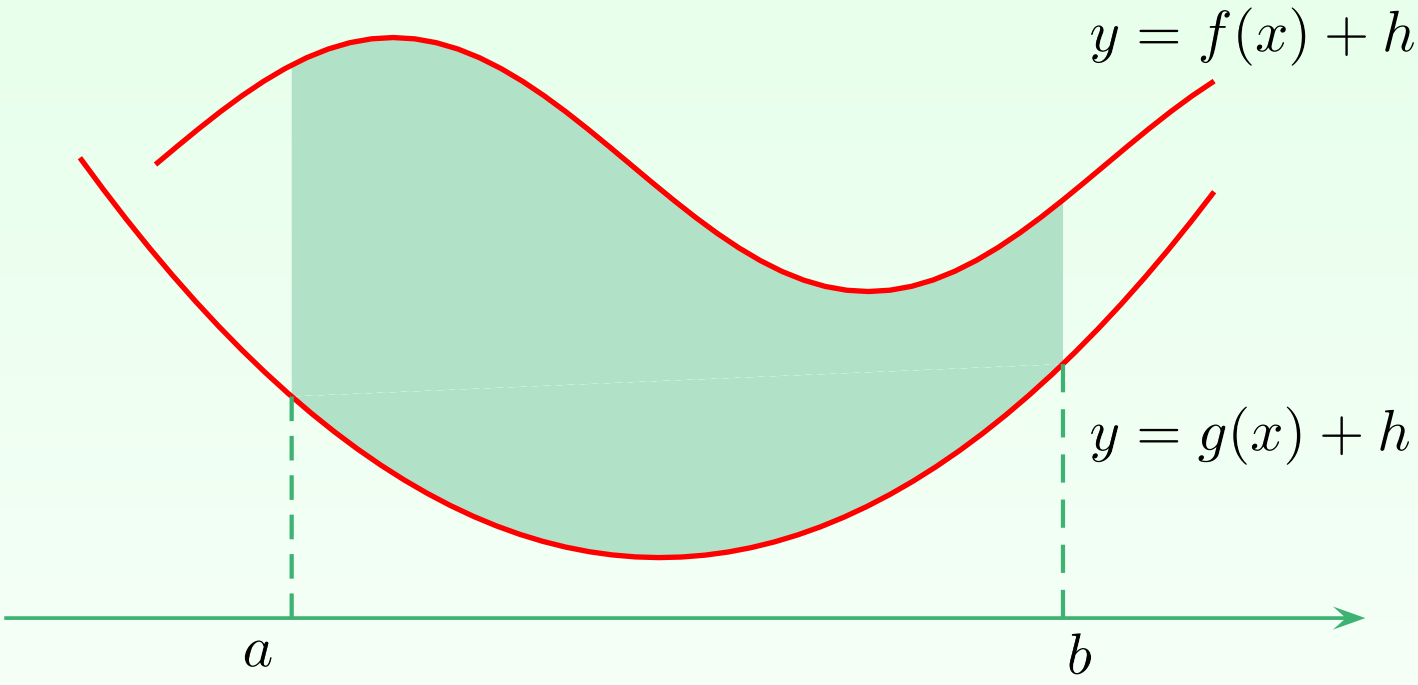




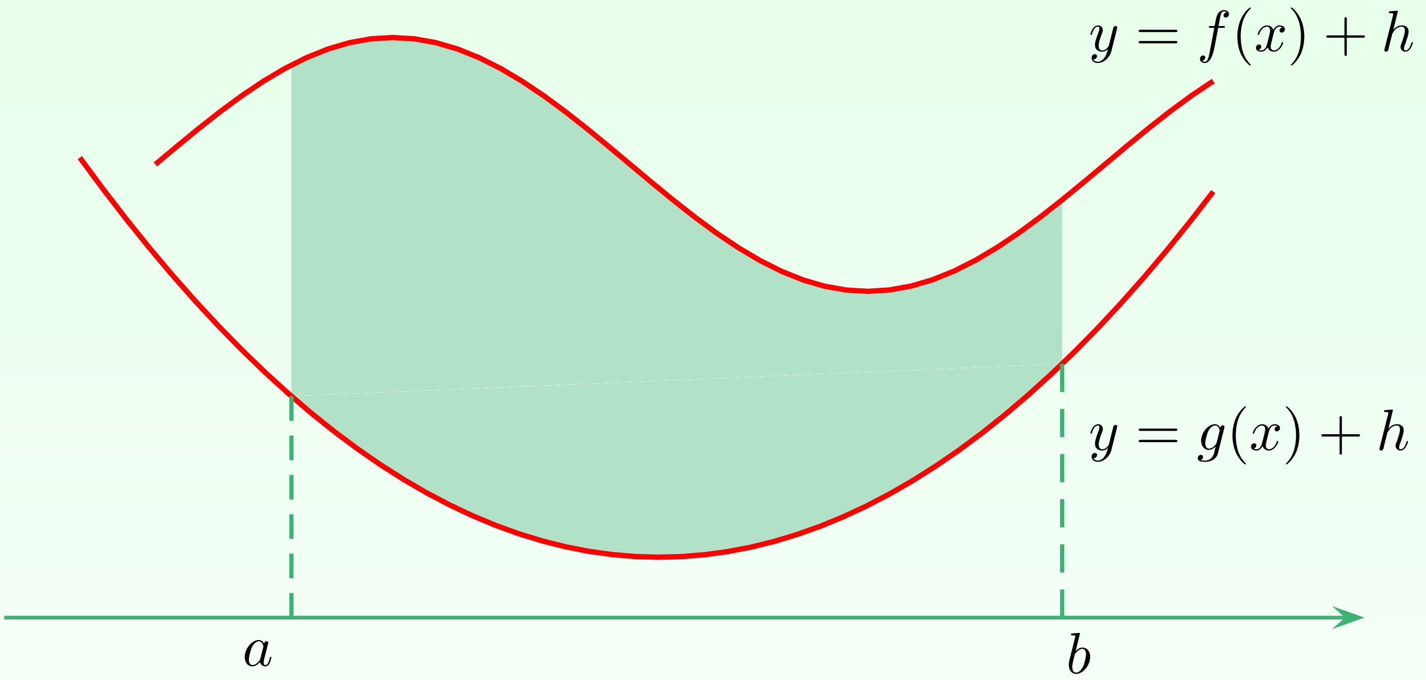
Kahden käyrän välinen ala



Kahden käyrän välinen ala

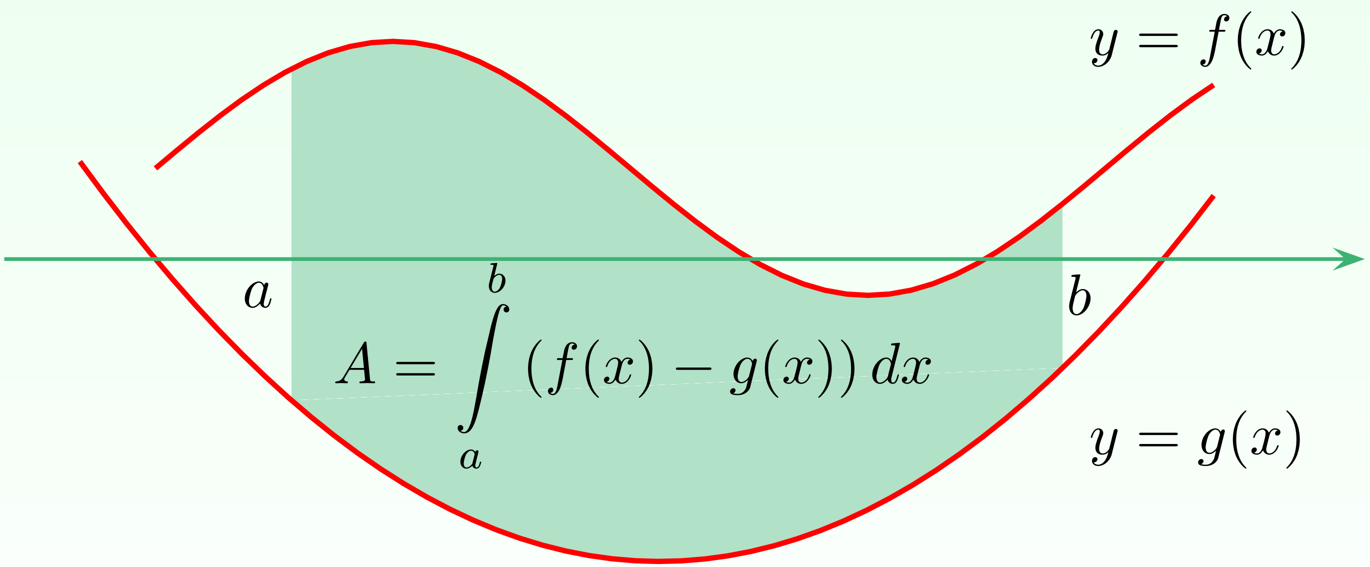


Kahden käyrän välinen ala

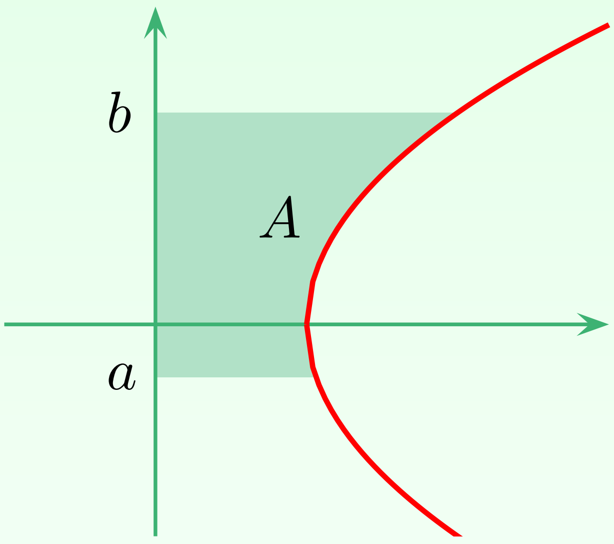


$$A = \int_a^b (f(x) + h)dx - \int_a^b (g(x) + h)dx = \int_a^b (f(x) - g(x))dx$$

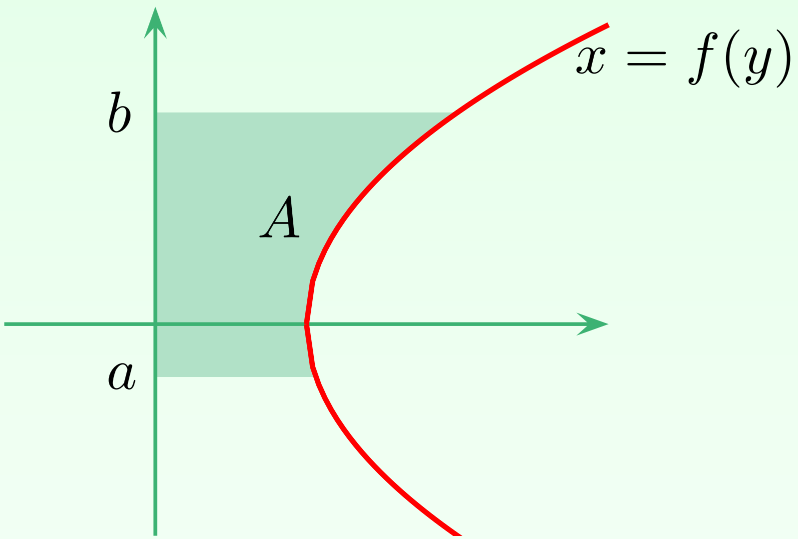
Kahden käyrän välinen ala



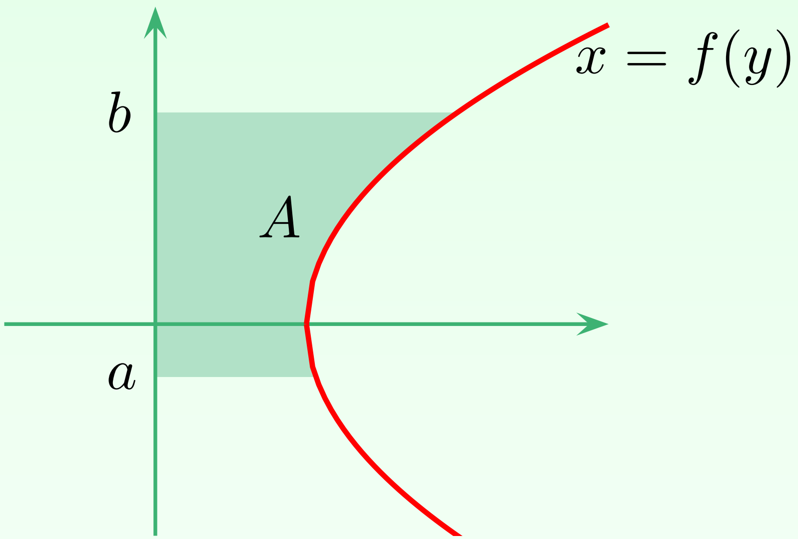
Käyrän ja y-akselin välinen ala



Käyrän ja y-akselin välinen ala

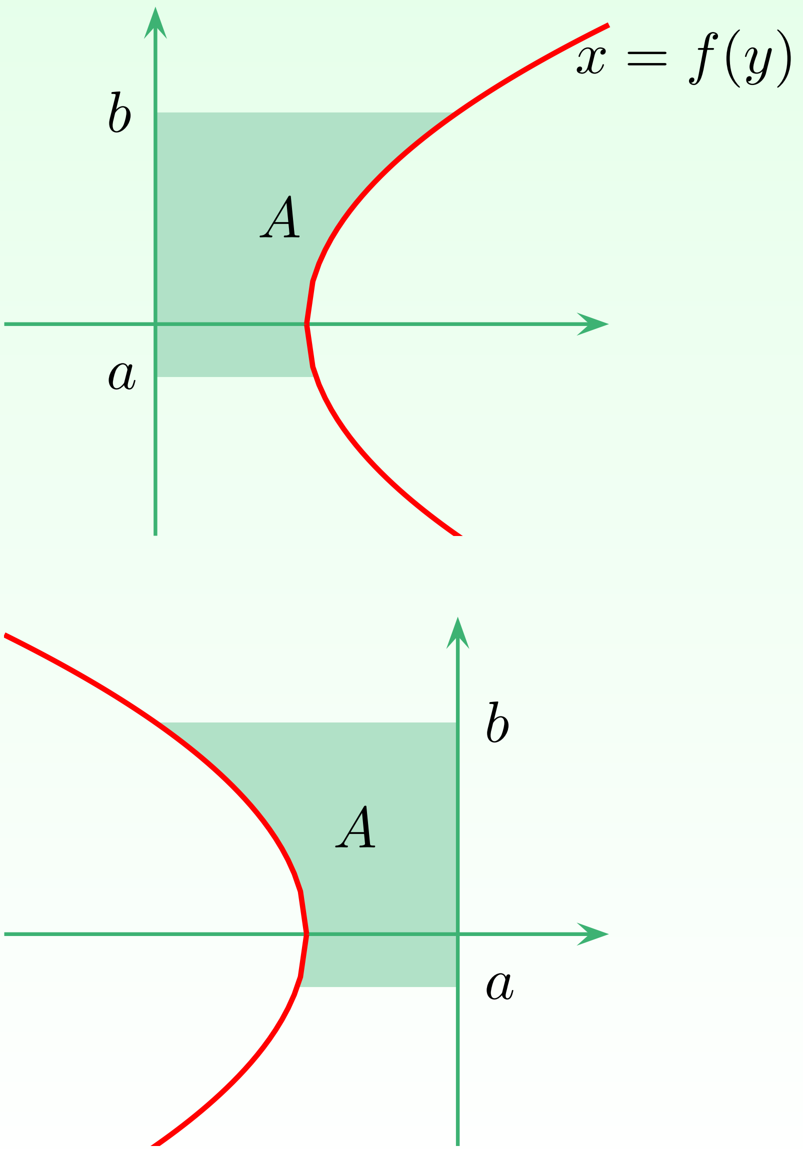


Käyrän ja y-akselin välinen ala



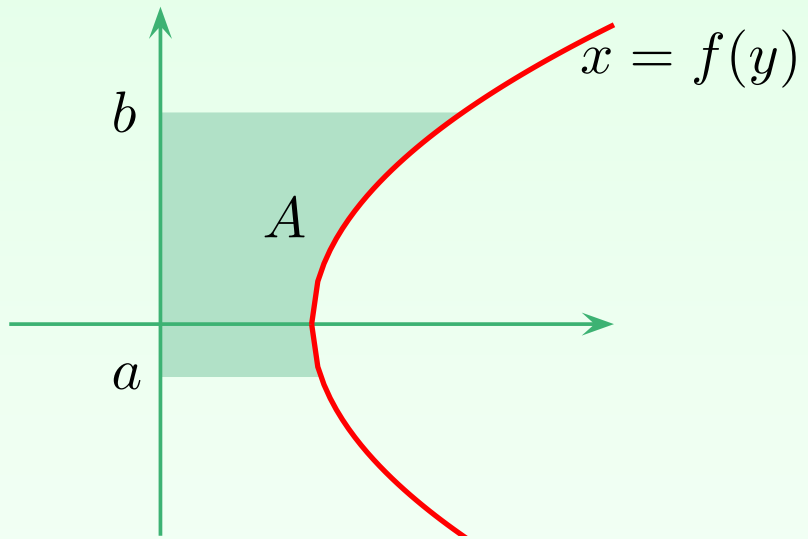
$$A = \int_a^b f(y)dy$$

Käyrän ja y-akselin välinen ala

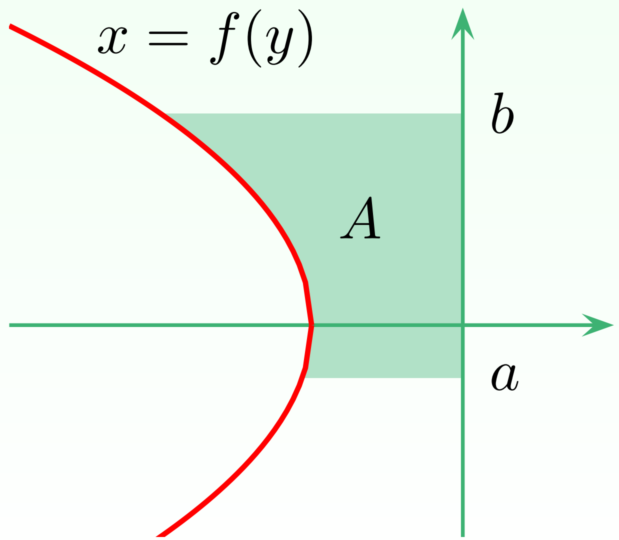


$$A = \int_a^b f(y)dy$$

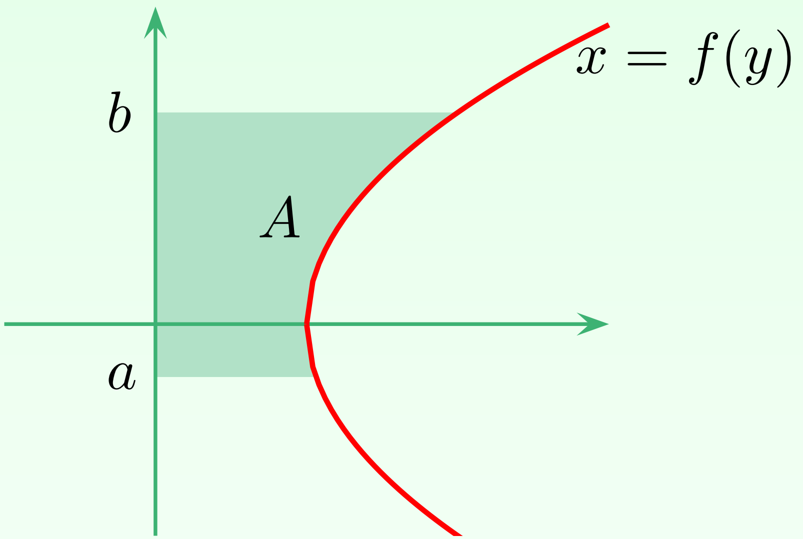
Käyrän ja y-akselin välinen ala



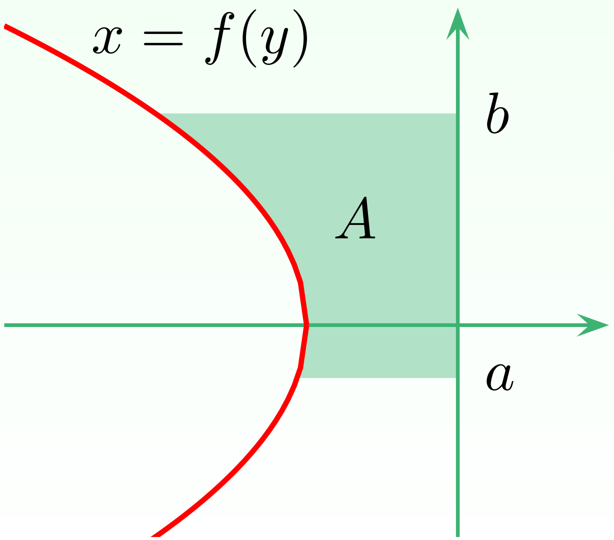
$$A = \int_a^b f(y)dy$$



Käyrän ja y-akselin välinen ala



$$A = \int_a^b f(y)dy$$

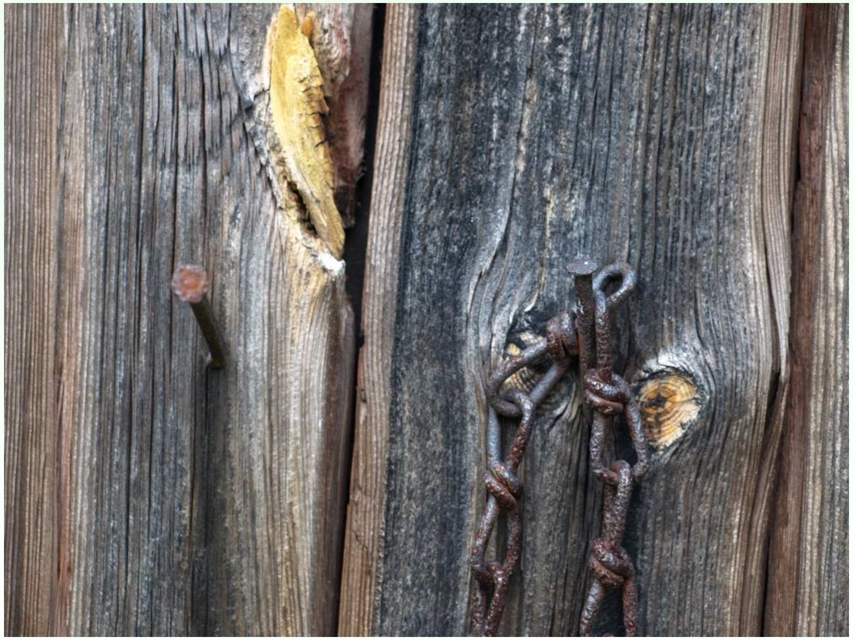


$$A = -\int_a^b f(y)dy$$

Esimerkki

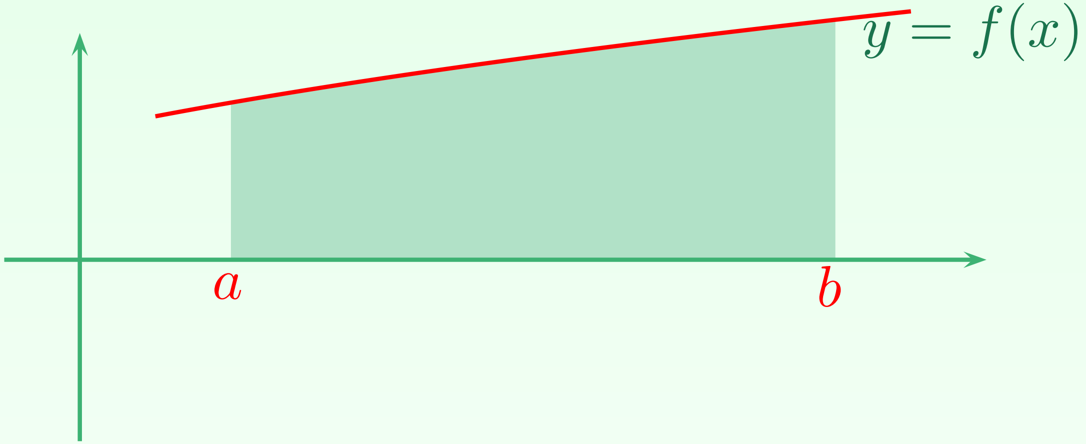
Laske käyrän $y = x^3$, y-akselin ja suoran $y = 2$ rajoittaman pinnan ala.

Osa IV: Tilavuuksia



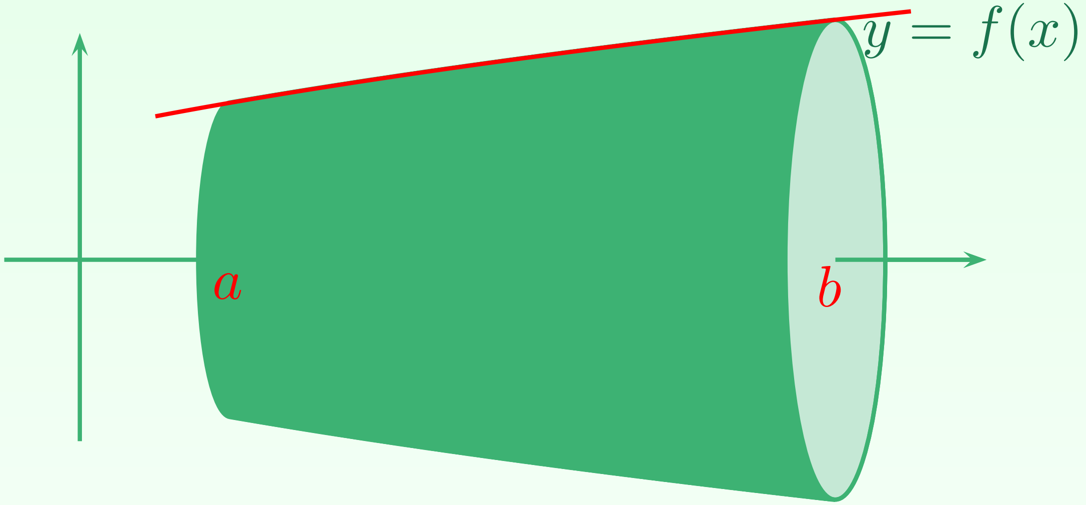
Pyörähdysakselina x-akseli

Funktio f on jatkuva välillä $[a, b]$. Alue pyörähtää *x-akselin* ympäri.



Pyörähdysakselina x-akseli

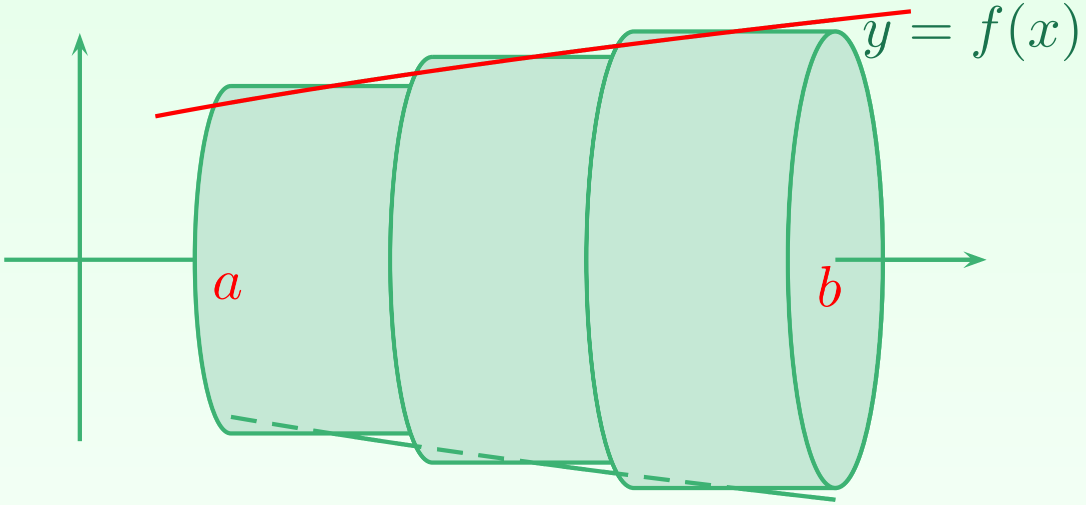
Funktio f on jatkuva välillä $[a, b]$.



Mikä on pyörähdyskappaleen tilavuus?

Pyörähdysakselina x-akseli

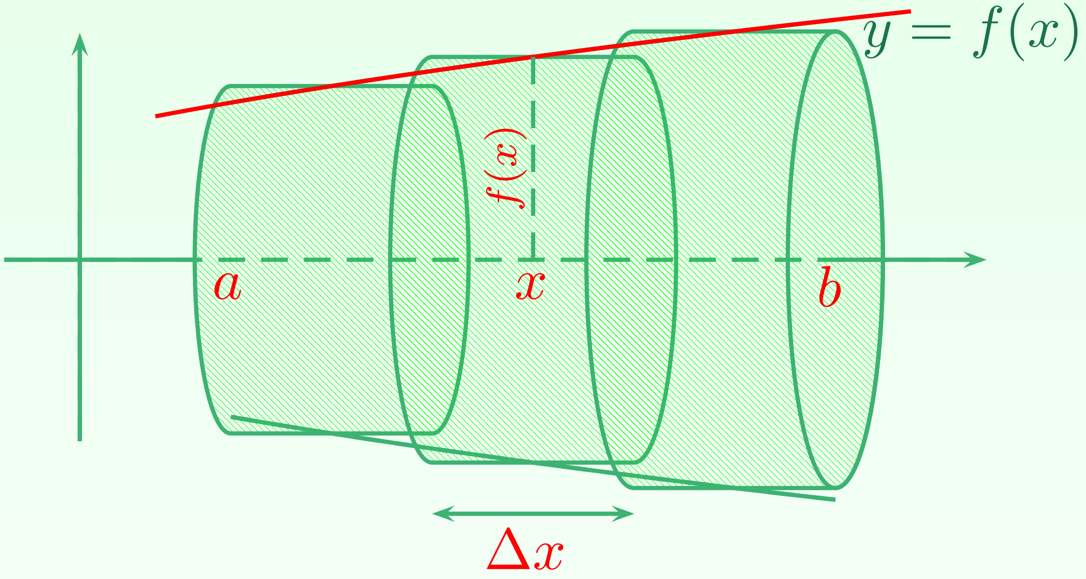
Funktio f on jatkuva välillä $[a, b]$.



Tilavuuden likiarvo on suorien ympyräpohjaisten lieriöiden tilavuuksien summa. Likiarvo paranee lisäämällä lieriöiden määrää.

Pyörähdysakselina x-akseli

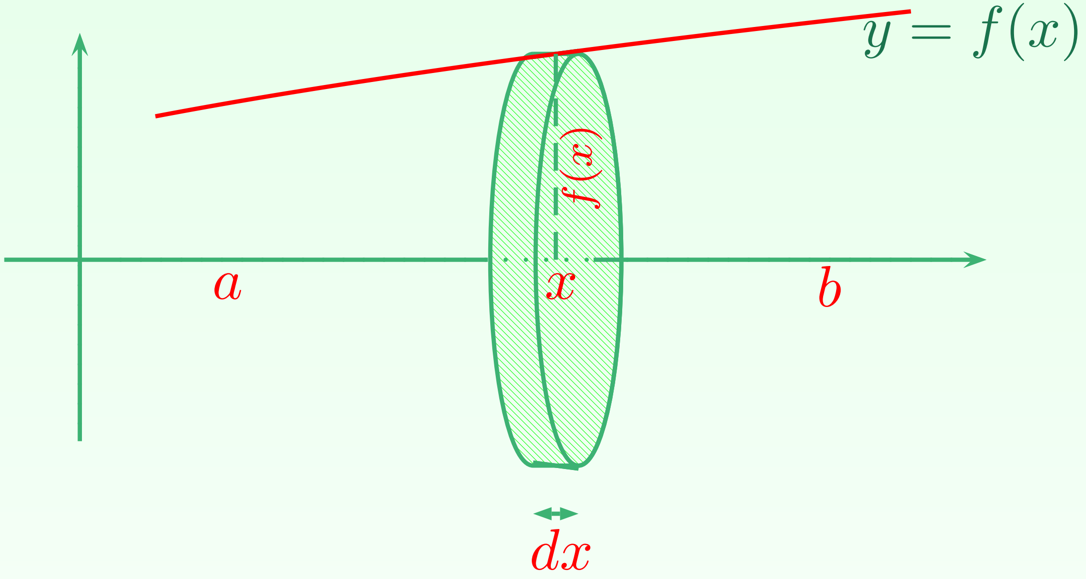
Funktio f on jatkuva välillä $[a, b]$.



Lieriön tilavuus on $\Delta V = \pi f(x)^2 \Delta x$.

Pyörähdysakselina x-akseli

Funktio f on jatkuva välillä $[a, b]$.

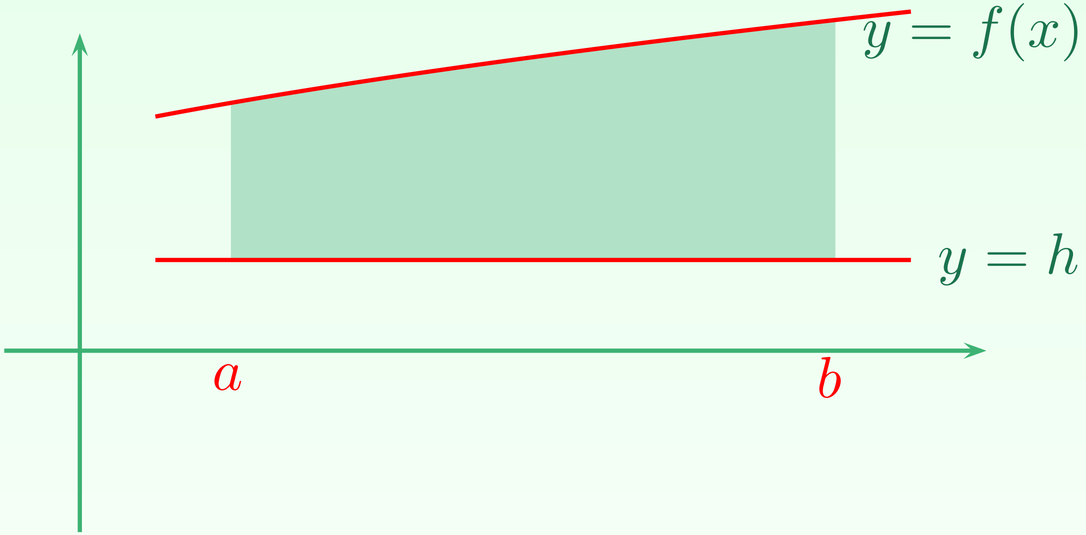


Kun $\Delta x \to 0$, saadaan ”äärettömän pieni” pituusalkio dx ja tätä vastaava ”äärettömän pieni” tilavuusalkio $dV = \pi f(x)^2 dx$. Laskemalla yhteen ”äärettömän monta äärettömän pientä” tilavuusalkiota väliltä $[a, b]$ saadaan pyörähdyskappaleen tilavuus

$$\boxed{V = \int_a^b dV = \pi \int_a^b f(x)^2 dx}$$

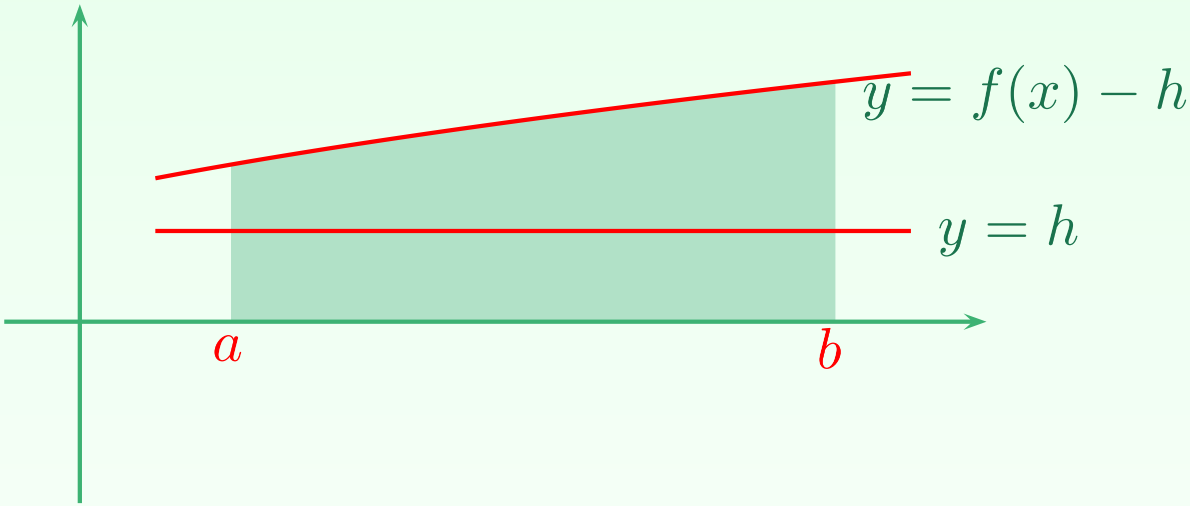
Pyörähdysakselina suora $y = h$

Funktio f on jatkuva välillä $[a, b]$. Alue pyörähtää *suoran* $y = h$ ympäri.



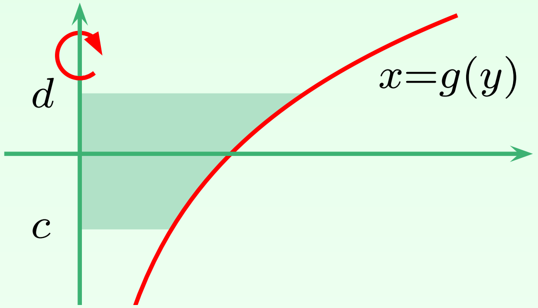
Pyörähdysakselina suora $y = h$

Funktio f on jatkuva välillä $[a, b]$. Alue pyörähtää *suoran* $y = h$ ympäri.



$$V = \pi \int_a^b (f(x) - h)^2 \, dx$$

Pyörähdysakselina y-akseli



$$V = \pi \int_c^d g(y)^2 dy$$

Esimerkki. Käyrän $y = \sqrt{x}$ ja suorien $y = 2$ ja $x = 0$ rajaama alue pyörähtää y-akselin ympäri. Laske tilavuus.