

Induktivismens återkomst?

eller snarare

relationen mellan experiment och hypotesbildning
inom modern (molekylär)biologi

MNXA09, Februari 2015

Henrik Jönsson

Beräkningsbiologi & biologisk fysik
Institutionen för astronomi och teoretisk fysik
henrik@thep.lu.se

Sainsbury Laboratory
University of Cambridge

THE SAINSBURY
LABORATORY
UNIVERSITY OF CAMBRIDGE



LUNDS UNIVERSITET

relationen mellan experiment och
hypotesbildning inom modern molekylärbiologi

och

var kommer matematisk beskrivning
och tekniska framsteg in?

exempel från modern molekylärbiologi

<http://www.thep.lu.se/~henrik/mnxa09/>

Föreläsninganteckningar:

- [Henrik Jönsson](#)

Generella böcker:

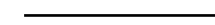
- *Science Rules: A Historical Introduction to Scientific Methods*
Peter Achinstein
[Johns Hopkins University Press, (2004)]
- *An Introduction to Scientific Research*
E Bright Wilson
[Dover Publications, (1991)]
- *Representing and Intervening: Introductory Topics in the Philosophy of Natural Science*
Ian Hacking
[Cambridge University Press, (1983)]
- *A historical introduction to the philosophy of science*
John Loose
[Oxford University Press, (2001)]

Relaterat till föreläsningar och diskussionsämnen:

- *Dialogues on two new sciences*
Galileo Galilei
[New York: The Macmillan Company, (1914)]
Från [The online library of liberty](#).
- *Discourse on the Method of Rightly Conducting One's Reason and of Seeking Truth*
Rene Descartes
Från [Project Gutenberg](#)

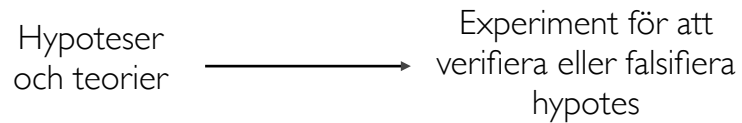
Introduktion, induktiv metod

Objektiv
datainsamling



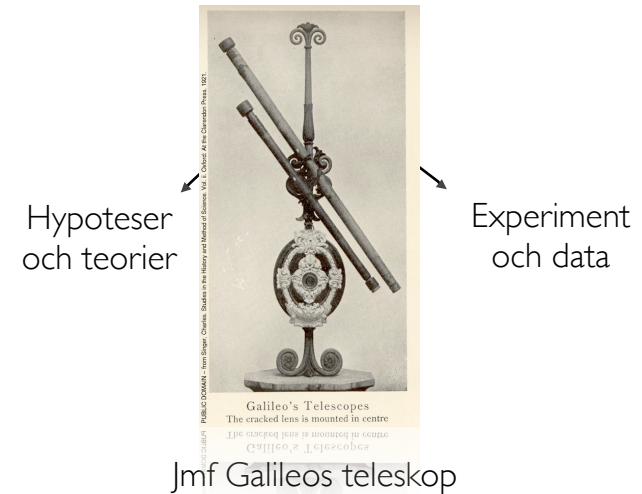
Hypoteser
och teorier

Intro, hypotetisk-deduktiv metod



Falsifikationism: fokusera på att falsifiera hypoteser

Introduktion, tekniska framsteg

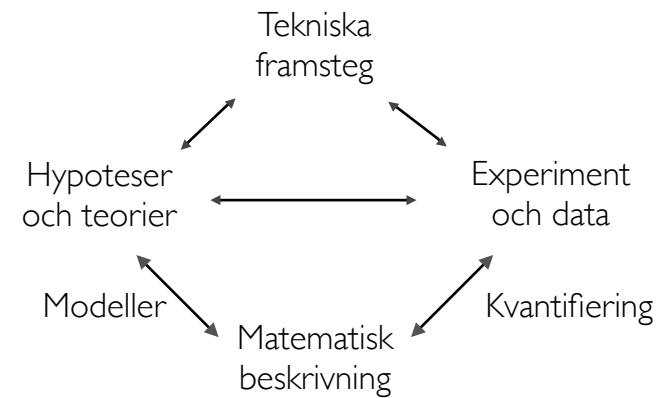


“eine Wissenschaft, aber nicht Wissenschaft”

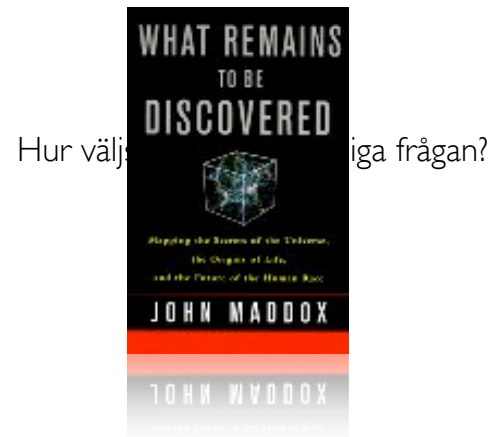
Immanuel Kant

Kriteriet för äkta vetenskap ligger i dess relation till matematiken

Introduktion, matematisk beskrivning

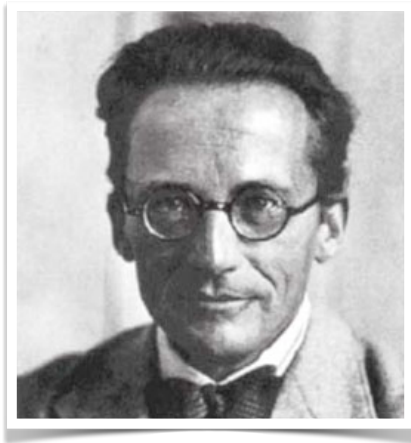


Men kanske viktigast av allt...



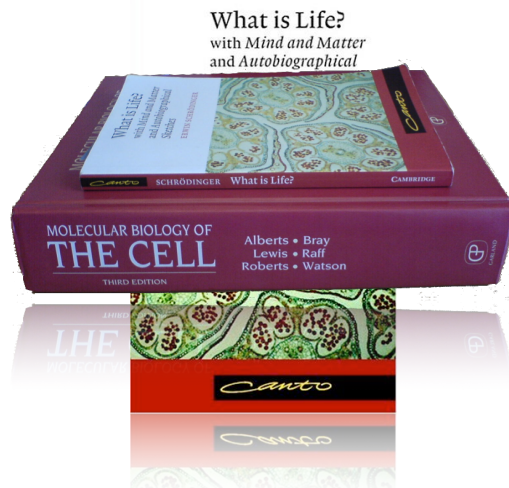
Dagens program

- Biologisk bakgrund
- Tekniska framsteg
- Matematisk beskrivning
- Vetenskapsteoretisk bakgrund
- Exempel 1, Artificiella neuronätverk
- Exempel 2, Systembiologimodellering
- Sammanfattning



What is life?

What is life?



Många frågor i en...

SCIENCE'S COMPASS



SPECIAL ESSAY

The Seven Pillars of Life

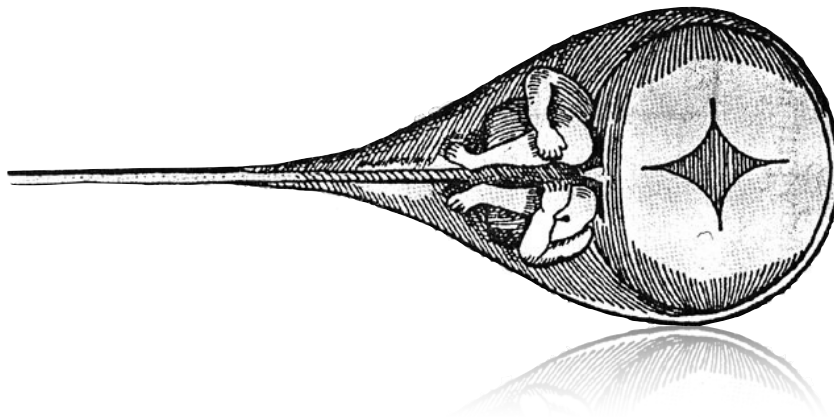
Daniel E. Koshland Jr.

TOWARD A MATHEMATICAL DEFINITION OF "LIFE"

In R. D. Levine and M. Tribus, *The Maximum Entropy Formalism*, MIT Press, 1979, pp. 477–498

Gregory J. Chaitin

Livets beståndsdelar

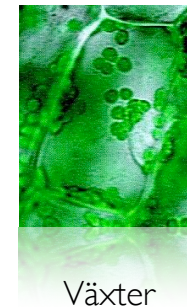


N. Hartsoecker (1695)

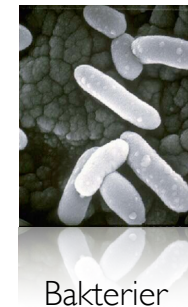
Celler, livets rum



Djur



Växter

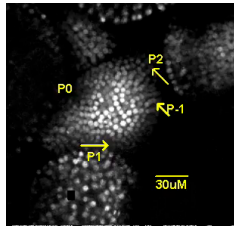


Bakterier

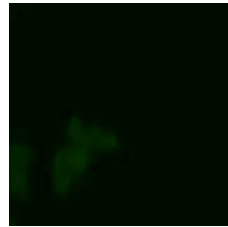
Celler, livets dynamiska rum



Djur

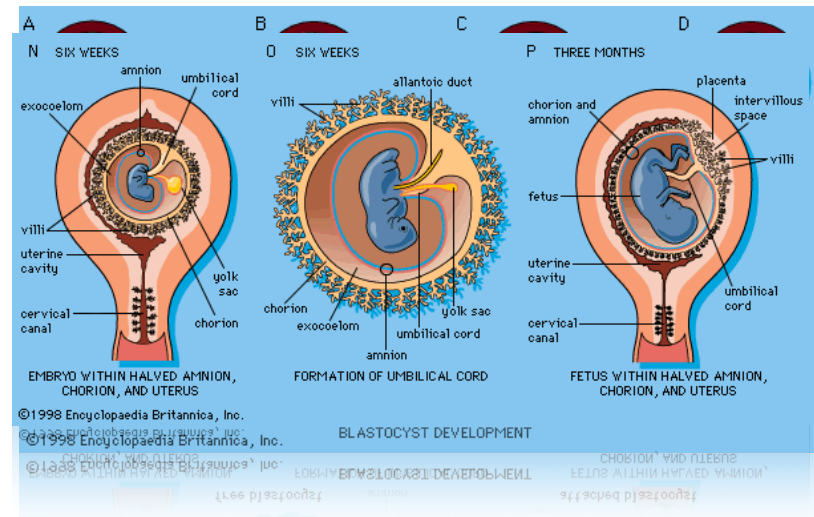


Växter

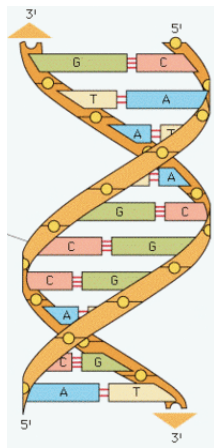
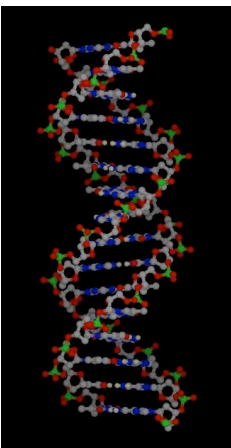


Bakterier

Hur går det till?

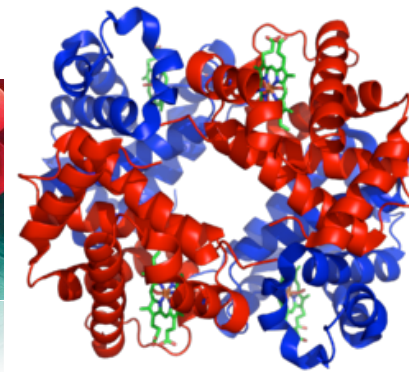
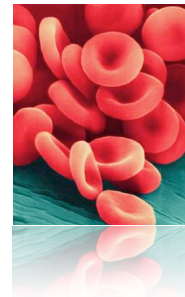


DNA, ritningen



30000 gener
5 miljarder bp
2 meter

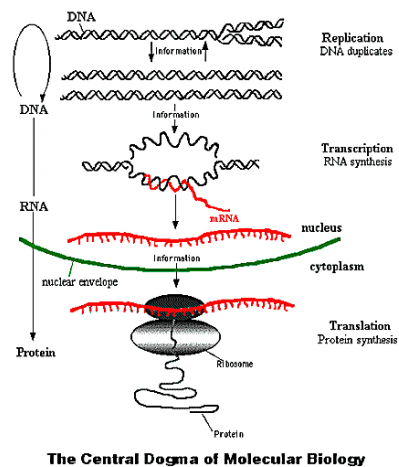
Proteiner, funktionen



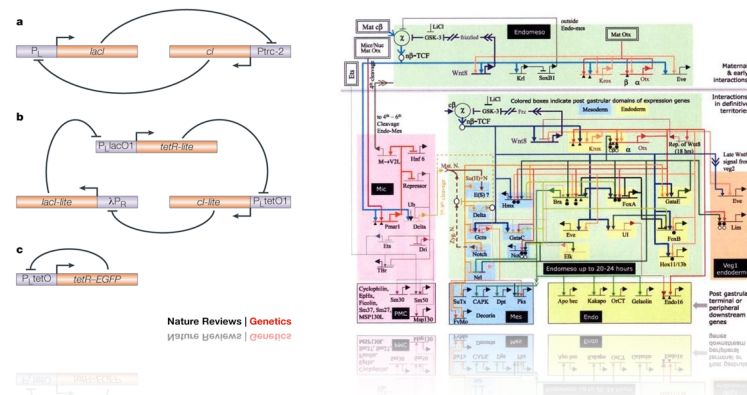
exempel
hemoglobin
binder syre

långa sekvenser av aminosyror
3D strukturen bestämmer funktion

Molekylärbiologins centrala dogma

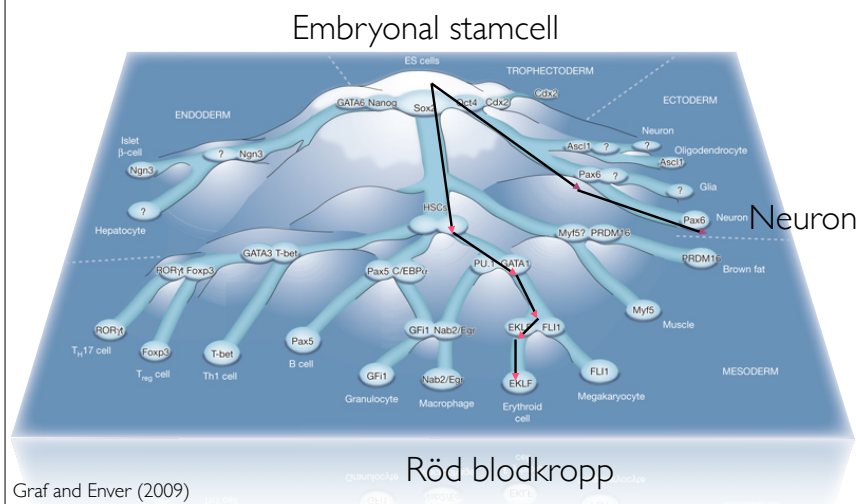


Reglering av gener

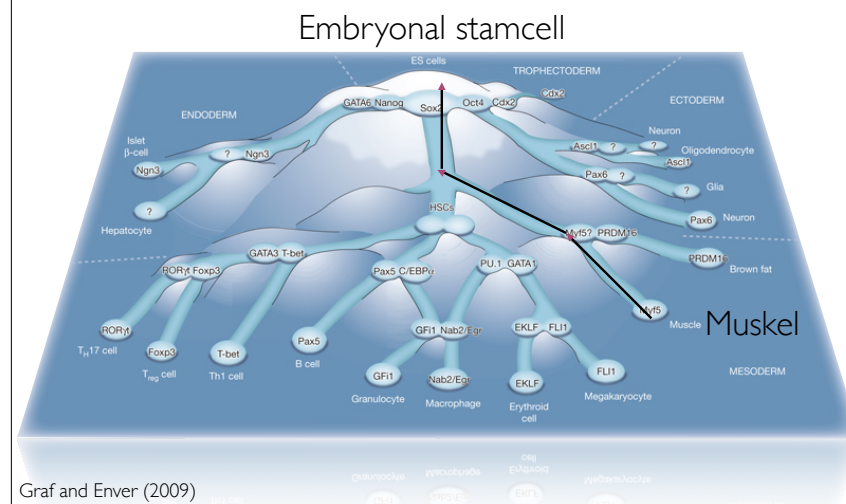


Eric Davidson

Vad bestämmer en stamcells öde

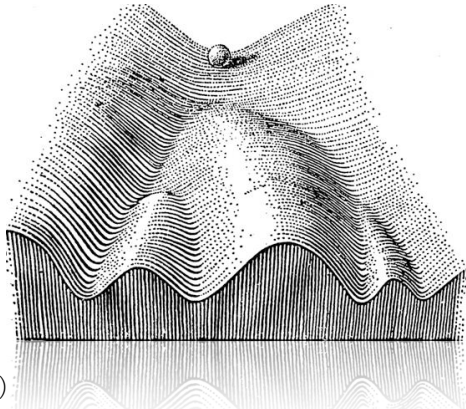


...och hur omprogrammerar man en mogen cell till något annat?



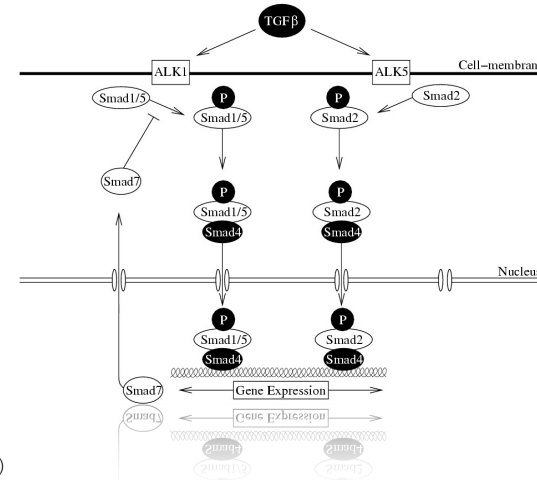
problem!

Potential kan inte formuleras matematiskt



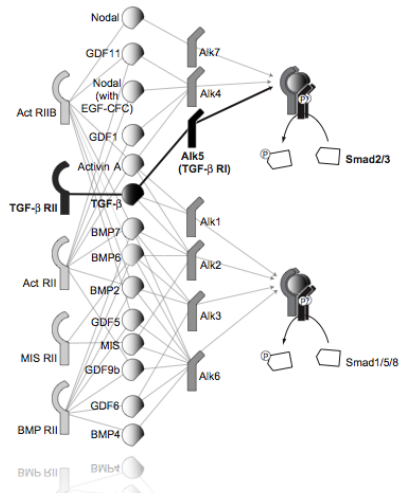
Waddington (1940)

Signaling mellan celler

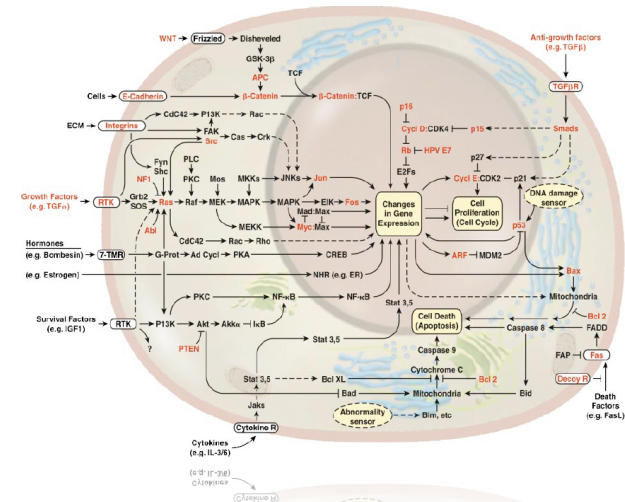


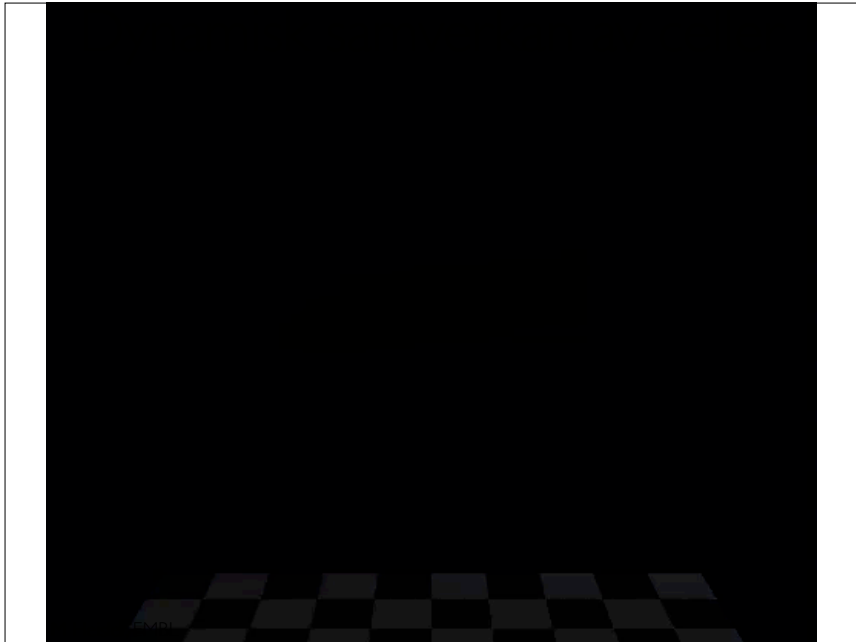
Melke et al (2008)

Signaling mellan celler

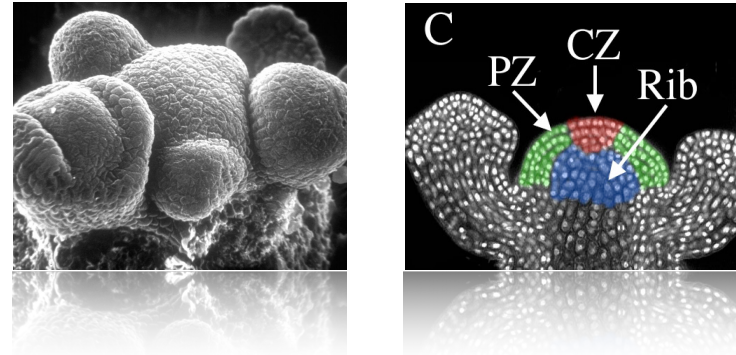


Signaling mellan celler



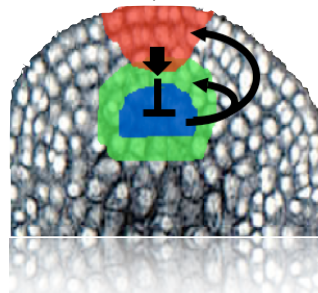


Skottets stamcells nich



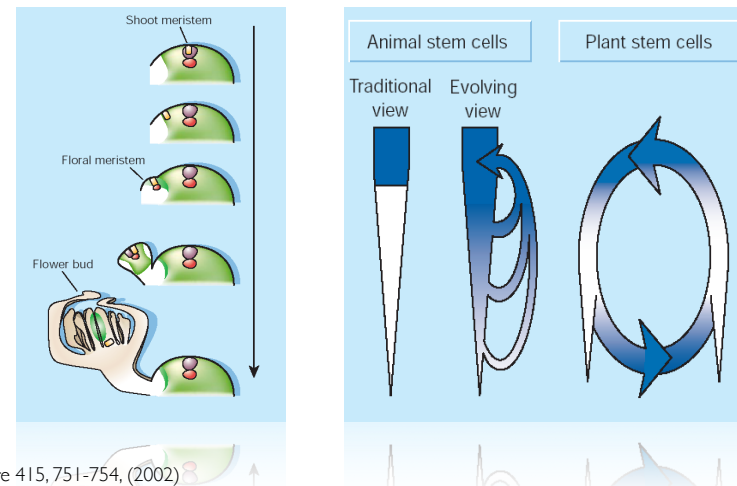
Stamcellsreglering i skottet

- CLV3 markerar stamceller och WUS 'definerar' organiserande center
- WUS aktiverar CLV3 (stamceller)
- CLV3/CLV1 trycker ner WUS



- CLV3 extracellulär peptid
- CLV1 receptor
- WUS transkriptionsfaktor

Växtceller mycket kapabla



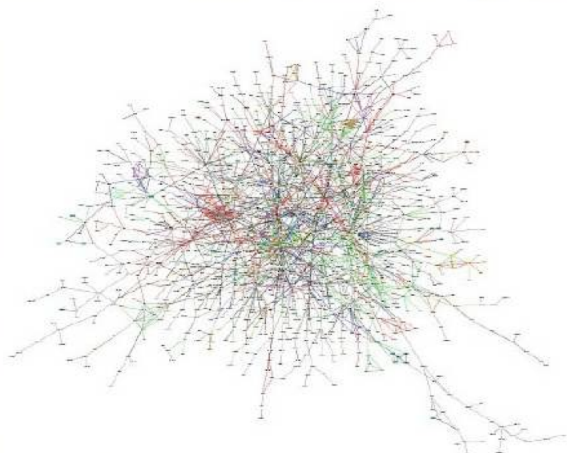
växter VS djur...



Sammanfattning, organismer styrs av

- Gener som reglerar varandra
- Signalmolekyler som transporteras mellan celler
- Komplicerade växelverknningar

Komplexiteten stor



Protein-protein växelverknningar i jäst

Komplexiteten stor

Ordning kan uppkomma ur komplexiteten

Paradigmskifte för biologi? (mm?)

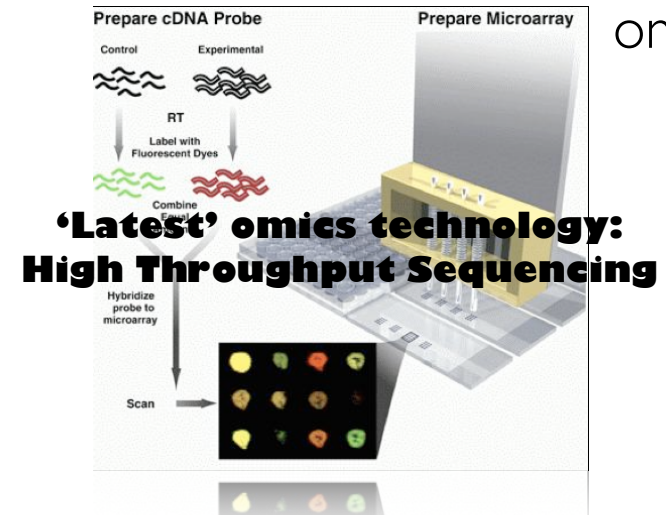
S Kauffman, *At home in the universe*

jmf S Wolfram, *A new kind of science*

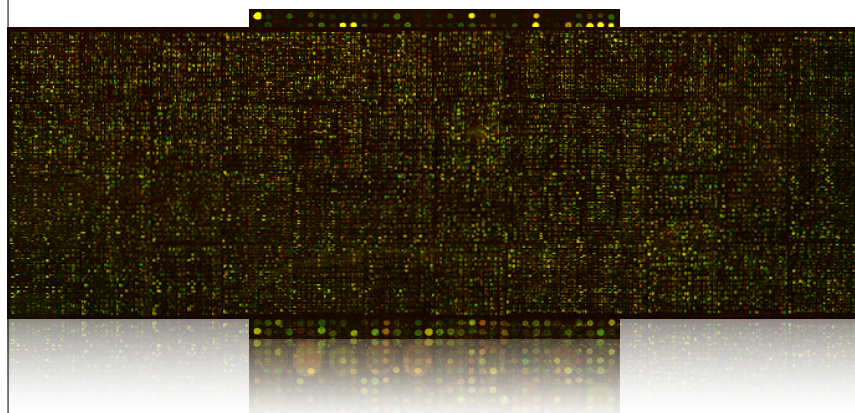
Tekniska framsteg

- Biologisk bakgrund
- **Tekniska framsteg**
- Matematisk beskrivning
- Vetenskapsteoretisk bakgrund
- Exempel 1, Artificiella neuronnätverk
- Exempel 2, Systembiologimodellering
- Sammanfattning

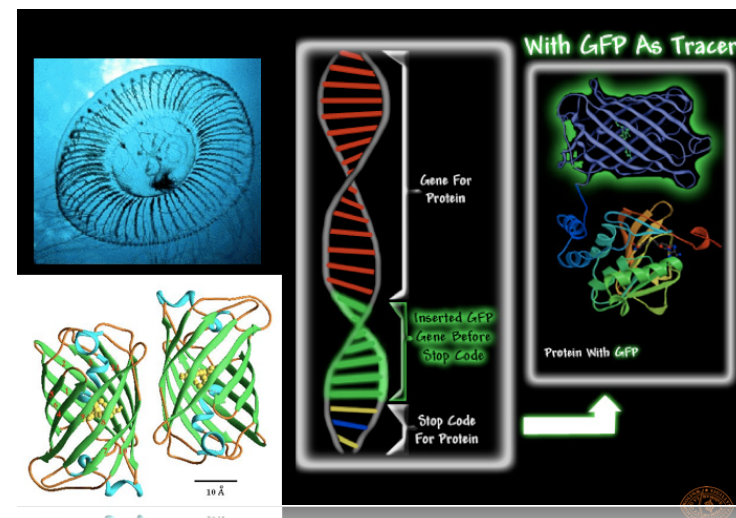
Tekniska framsteg del I omics



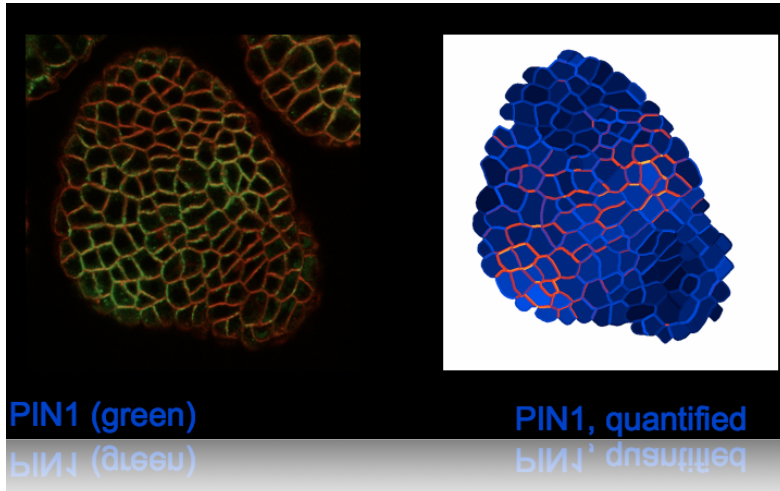
Tekniska framsteg del I omics



Tekniska framsteg, del2:GFP

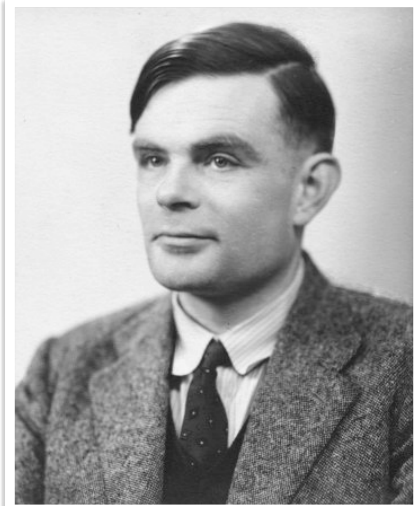


Tekniska framsteg, del2:GFP



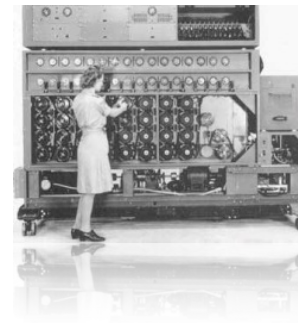
Matematisk beskrivning

- Biologisk bakgrund
- Tekniska framsteg
- **Matematisk beskrivning**
- Vetenskapsteoretisk bakgrund
- Exempel 1, Artificiella neuronnätverk
- Exempel 2, Systembiologimodellering
- Sammanfattning



Alan Turing

Alan Turing



Alan Turing

M.W.
 What you do this
 about to have a look
 to make the library
 etc.

Hollymeade
 Adlington Rd
 Wilmslow,

Our new machine is to start arriving on Monday. I am hoping
 as one of the first jobs to do something about 'critical
 embryology'. In particular I think one can account for the
 appearance of Fibonacci numbers in connection with fir-cones.

Yours,

A.M. Turing



THE CHEMICAL BASIS OF MORPHOGENESIS

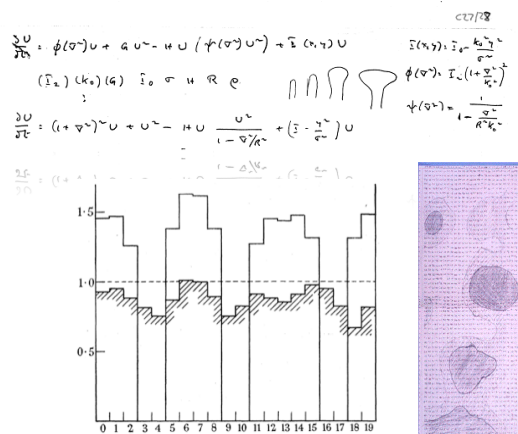
By A. M. TURING, F.R.S. *University of Manchester*

(Received 9 November 1951—Revised 15 March 1952)

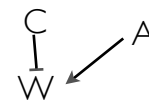
THE CHEMICAL BASIS OF MORPHOGENESIS

By A. M. TURING, F.R.S. *University of Manchester*

(Received 9 November 1951—Revised 15 March 1952)



model definition



transkription

degradering

$$\frac{d[W]}{dt} = \frac{V_{max} K_C^n [A]^n}{(K_C^n + [C]^n)(K_A^n + [A]^n)} - k[W]$$

$$\frac{d[W_s]}{dt} = k_1[W] - k_2[W_s] + D\nabla^2[W_s]$$

protein

diffusion

Matematisk modell av stamcellreglering

$$\frac{d[C]}{dt} = V_c \frac{[a1c]^n}{k_{a1c/C}^n + [a1c]^n} \frac{[w]^n}{k_{w/C}^n + [w]^n} - g_c[C]$$

$$\frac{d[c]}{dt} = P_c[C] - g_c[c] + D_c \Delta[c]$$

$$\frac{d[W]}{dt} = V_w \frac{[a2]^n}{k_{a2/W}^n + [a2]^n} \frac{k_{c/W}^n}{k_{c/W}^n + [c]^n} \frac{k_{w/W}^n}{k_{w/W}^n + [w]^n} - g_w[W]$$

$$\frac{d[w]}{dt} = P_w[W] - g_w[w] + D_w \Delta[w]$$

$$\frac{d[K]}{dt} = V_k \frac{[a1k]^n}{k_{a1k/K}^n + [a1k]^n} \frac{k_{w/K}^n}{k_{w/K}^n + [w]^n} - g_k[K]$$

$$\frac{d[a1c]}{dt} = P_{a1c}[A1] - g_{a1c}[a1c] + D_{a1c} \Delta[a1c]$$

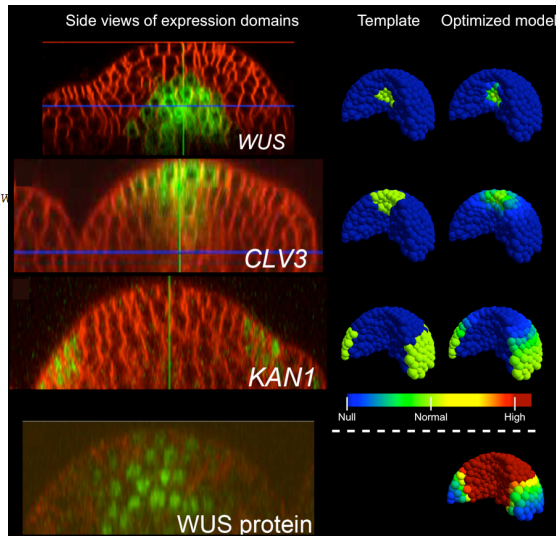
$$\frac{d[a1k]}{dt} = P_{a1k}[A1] - g_{a1k}[a1k] + D_{a1k} \Delta[a1k]$$

$$\frac{d[a2]}{dt} = P_{a2}[A2] - g_{a2}[a2] + D_{a2} \Delta[a2]$$

$$\frac{\partial \psi}{\partial t} = \mathcal{L} \psi - \mathcal{R} \psi + \mathcal{D} \nabla^2 \psi$$

$$\frac{\partial \psi}{\partial t} = \mathcal{L} \psi - \mathcal{R} \psi + \mathcal{D} \nabla^2 \psi$$

$$\frac{\partial \psi}{\partial t} = \mathcal{L} \psi - \mathcal{R} \psi + \mathcal{D} \nabla^2 \psi$$



Yadav, Gruel et al (2013)

Vetenskapsteoretiska bakgrunden

- Biologisk bakgrund
- Tekniska framsteg
- Matematisk beskrivning
- **Vetenskapsteoretisk bakgrund**
- Exempel 1, Artificiella neuronnätverk
- Exempel 2, Systembiologimodellering
- Sammanfattning

Vetenskapsteoretiska bakgrunden

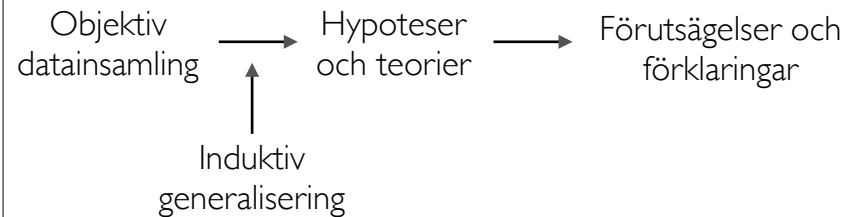
Chalmers, kapitel 1-6

Idealbild av vetenskap

- Vetenskaplig kunskap är bevisad
 - Vetenskapliga teorier är rigoröst härledda från experimentella fakta
 - Vetenskap är objektiv
- Vetenskaplig kunskap är pålitlig för den är objektivt bevisad

Naiv induktivism

- Försök till att formalisera idealbilden av vetenskap



Jmf Chalmers regnbågeexempel

Induktiv generalisering

Tillåten om:

- Antal mätningar stort
- Utförda vid varierande betingelser
- Inga experiment i konflikt med teorin

Induktion, problem

Objektiva mätningar

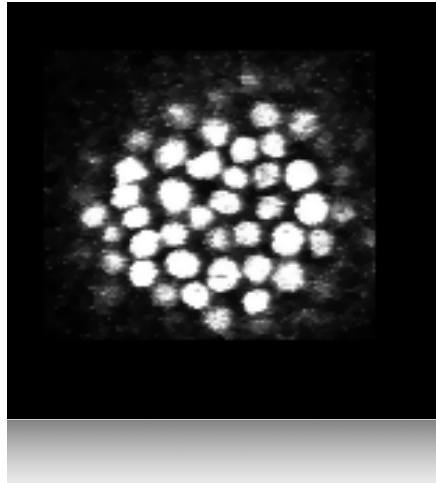
- (uttalanden om) mätningar förutsätter någon teori
- T ex val av mätta variabler

Subjektivitet minimeras med kvantitativa mätningar (jmf Chalmers röntgenstudent)

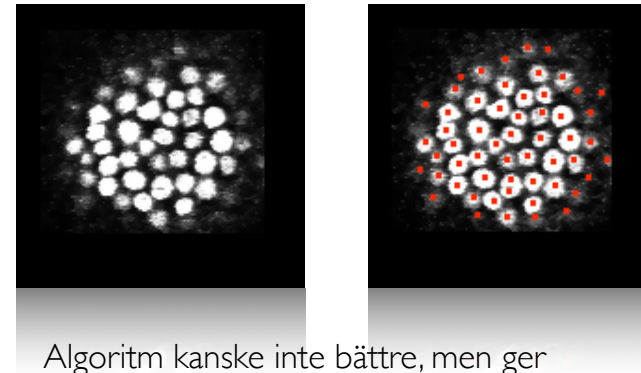
Kvantitativ data

- Objektiv
- Beteende precist beskrivet
- Experiment jämförbara
- Direkt jämförbar med matematiska modeller

Exempel, hur många celler?

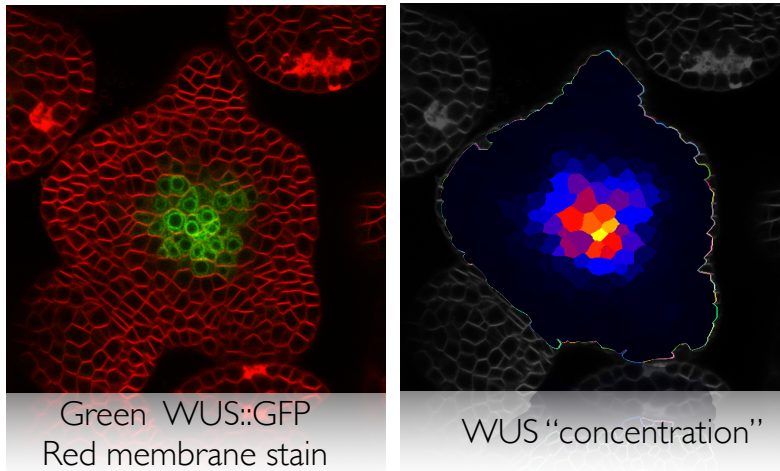


Exempel, hur många celler?



Algoritm kanske inte bättre, men ger konsistent reproducerbart (56) resultat!

Exempel 2, hur mycket WUS?



Green WUS::GFP
Red membrane stain

WUS "concentration"

Falsifikationism, utgångspunkter

- Observationer föregås av teori (hypoteser)
- Teorier kan inte verifieras som sanna från observationer
- Vetenskap utvecklas genom 'trial and error' och bäst möjliga (tillgängliga) teori överlever

Falsifikationism

Hypotetisk-deduktiv metod



Falsifikationism, falsifierbarhet

- Vetenskapliga hypoteser måste vara tydliga - jmf politiker
- Precisa hypoteser bättre
 - $F = m a$
 - en kropps acceleration påverkas av krafter

Matematisk beskrivning ger precision

Exempel 1, cancer/ANN

- Biologisk bakgrund
- Tekniska framsteg
- Matematisk beskrivning
- Vetenskapsteoretisk bakgrund
- **Exempel 1, Artificiella neuronätverk**
- Exempel 2, Systembiologimodellering
- Sammanfattning

“Klassisk” molekylärbiologi

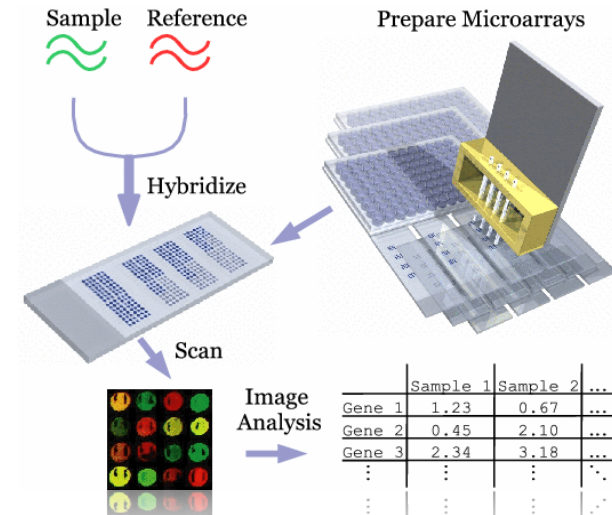
- Gen -> protein -> funktion
- Hypotes: gen A orsakar cancer
- Verifierbar/falsifierbar i experiment

- Framgångsrik metod (hypotetisk-deduktiv)
- Kan också ge mekanism
- Även möjligt att få fram inbördes relationer mellan gener

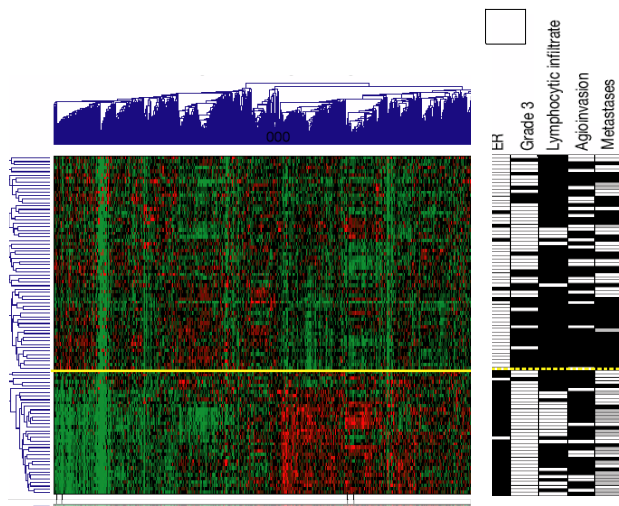
“Klassisk” molekylärbiologi

- Hypotes: gen A orsakar cancer
- (Verifierbar/falsifierbar i experiment)
- Problem med komplexitet
- 30000 gener!
- 30000x29999 ~ 10⁹ par av gener
- Osv...

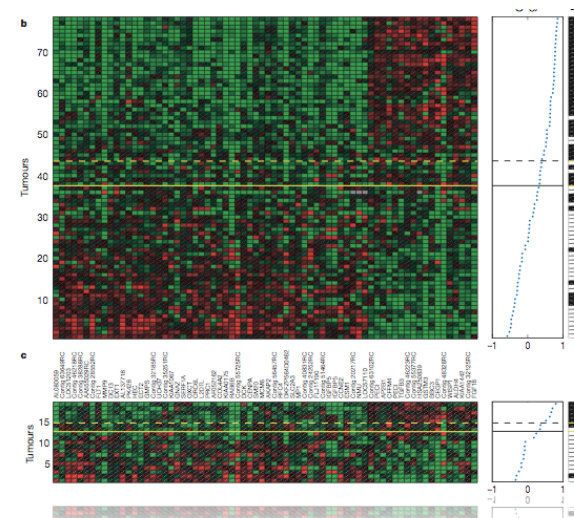
Lösning, mät allt utan specifik hypotes



Samla statistik från kända fall



Identifiera viktiga regler/gener



Gene expression profiling predicts clinical outcome of breast cancer

Van 't Veer et al., Nature 415, 530-536 (2002)

97 tumörer

46 utvecklade metastaser inom 5 år

70-gens expression-profil gav prognos-värde

Hur?

Artificiella neuronät

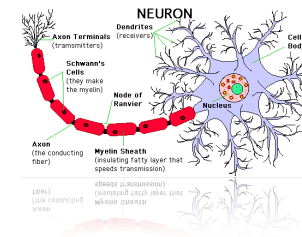
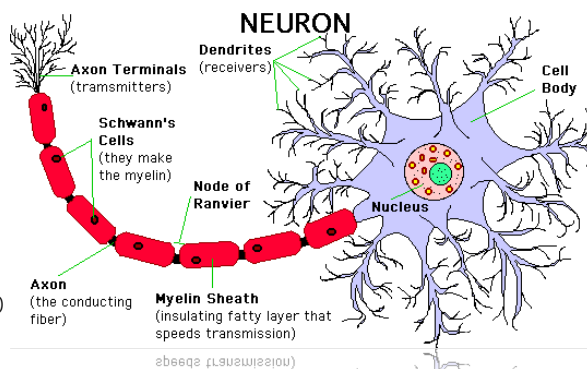
Matematisk induktivism?

Riktiga neuronät

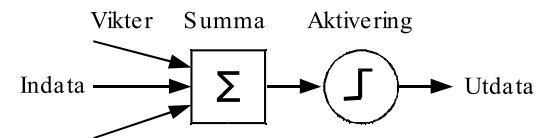


~1,000,000,000,000
neuroner

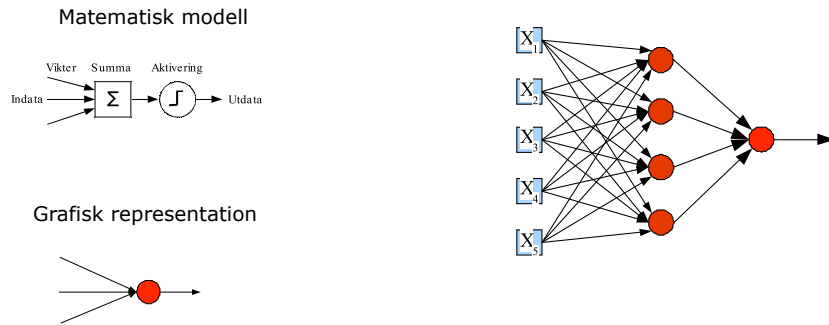
~1,000,000,000,000,000
kopplingar



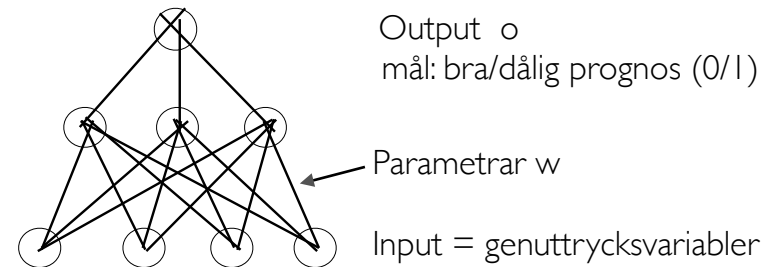
Artificiell förenkling



Koppla ihop flera neuroner till ett större nätverk

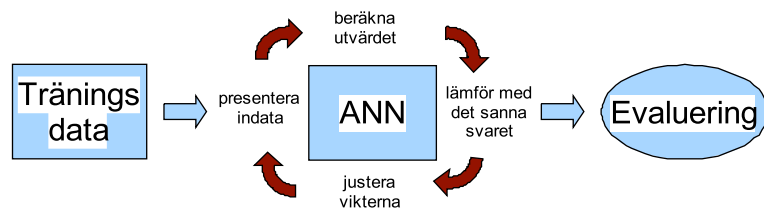


Artificiella neuronnätverk

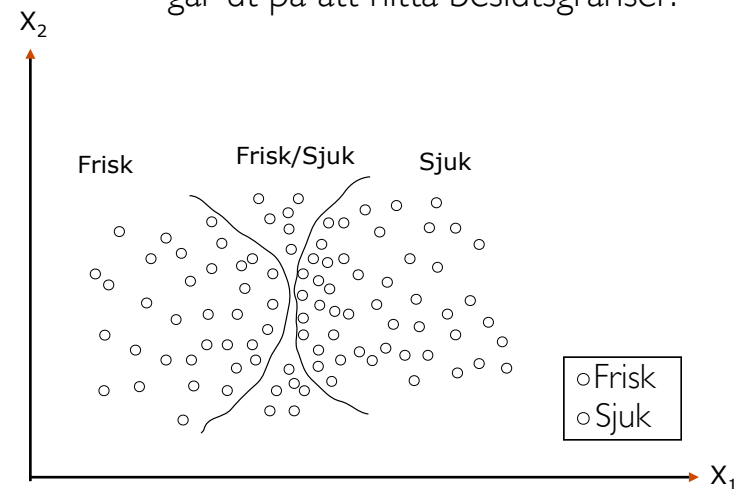


Justera parametrar w så att modell output o stämmer med måldata

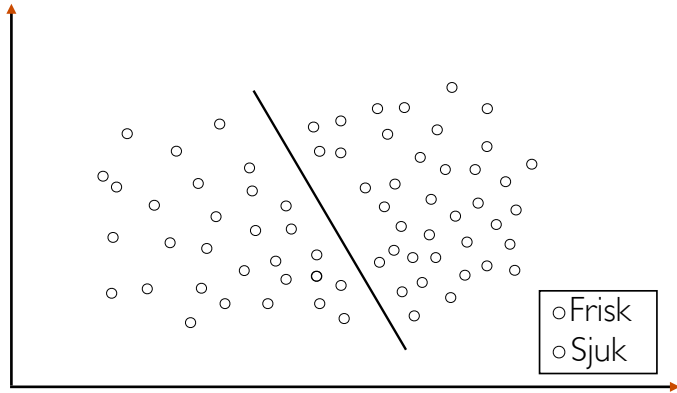
Träning av ANN är en iterativ process!



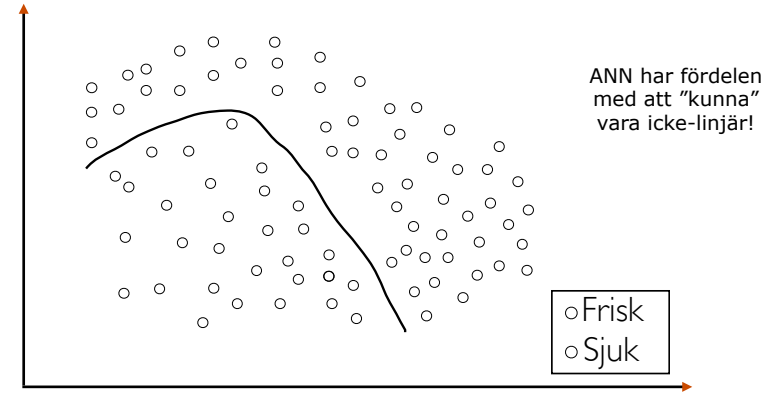
Maskininlärning för klassificering går ut på att hitta beslutsgränser!



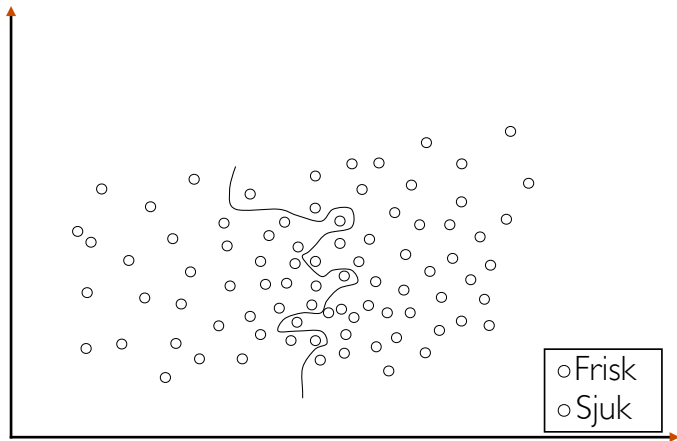
Linjära beslutsgränser!



Icke-linjära beslutsgränser!



Dålig generalisering (överinlärning)



Induktiv metod

- Mät alla gener
- -> generera "hypoteser" via statistik (träning)
- -> Prediktioner för nya mätningar (test)

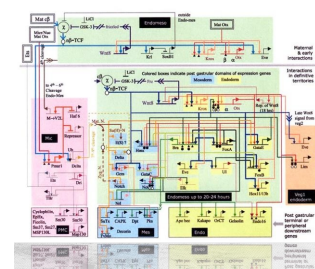
- Utnyttjar komplexiteten
- Prediktioner inte samma som hypoteser
- Inte alltid lättverifierade hypoteser
- Ingen mekanistisk förklaring

Exempel 2, systembiologi

- Biologisk bakgrund
- Tekniska framsteg
- Matematisk beskrivning
- Vetenskapsteoretisk bakgrund
- Exempel 1, Artificiella neuronnätverk
- **Exempel 2, Systembiologimodellering**
- Sammanfattning

Ingenjörsperspektiv

Wright brothers
O(100) komponenter



Cellens molekyler
växlar enligt
liknande principer

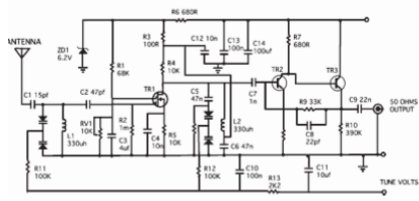
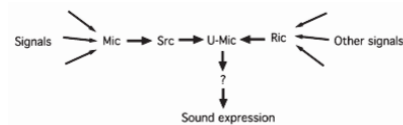
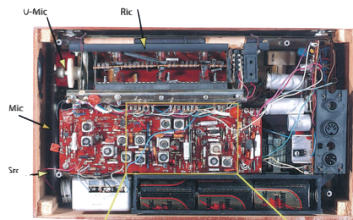


Boeing 747
O(10^7) komponenter



- Kontrollsystem(återkopplingar)
- Moduler
- Redundanta system

Kan en biolog laga en radio?

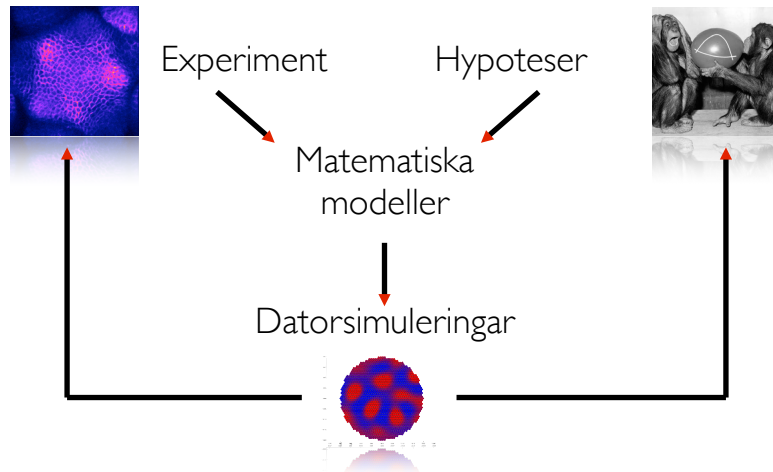


Yuri Lazebnik, Cancer Cell (2002)

“Klassisk” molekylärbiologi

- Slå ut gener slumpvis
- Påverkar cancer?
- Identifiera gen och definiera hypotes
- Problem med komplexitet
- 30000 gener!
- Genen påverkar tillsammans med andra gener i dynamiskt nätverk

Systembiologi, metoden



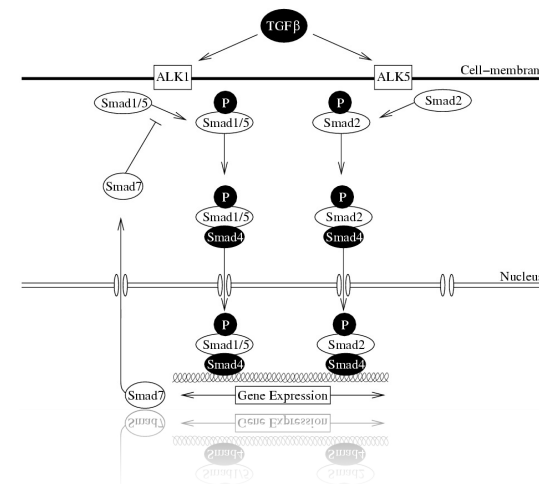
Skapa matematisk modell

- Hypoteser precist definierade
- Alla antaganden beskrivna (även utelämnade faktorer/gener)
- Genererar kvantitativa förutsägelser
- Kan "förklara" ointuitiva beteenden
- Varierade betingelser (väl)definierat

Kan modellen förklara data?

- Möjligt att verifiera/falsifiera
- Verifiering vid JA svar
- Lätt att utöka tester för verifiering
- Svårare att falsifiera

Exempel, TGF-beta



Exempel, TGF-beta

\emptyset	$\frac{p_0}{p_0 p_1}$	ALK1 (1)	\emptyset	$\frac{p_2}{p_2 p_3}$	Smad1 (9)
\emptyset	$\frac{p_4}{p_4 p_5}$	Smad4 (2)	\emptyset	$\frac{p_6}{p_6 p_7}$	Smad2 (10)
\emptyset	$\frac{p_8}{p_8 p_9}$	ALK5 (3)	\emptyset	$\frac{p_{514N}}{(p_{11}, p_{12})}$	Smad7 (11)
TGFβ + ALK1	$\frac{p_{13}}{p_{14}}$	TA1 (4)	Smad1	$\frac{p_{71}}{(p_{15}, p_{16})}$	PSmad1 (12)
PSmad1 + Smad4	$\frac{p_{18}}{p_{19}}$	PS14 (5)	Smad2	$\frac{p_{75}}{(p_{22}, p_{23})}$	PSmad2 (13)
TGFβ + ALK5	$\frac{p_{20}}{p_{21}}$	TA5 (6)	PSmad2 + Smad4	$\frac{p_{25}}{p_{26}}$	PS24 (14)
P _A + TA1	$\frac{p_{27}}{p_{28}}$	TA1P (7)	PS14	$\frac{p_{29}}{k_{30}}$	PS14N (15)
P _B + TA5	$\frac{p_{31}}{p_{32}}$	TA2P (8)			
P _B + LV2	$\frac{p_{37}}{p_{38}}$	LV2P (9)			

Exempel, TGF-beta

$$\begin{aligned} \frac{dA_1}{dt} &= p_0(1 - p_1 A_1) - p_{13} T_\beta A_1 + p_{14} T_1 & \frac{dP_2}{dt} &= \frac{p_{22} T_1 S_2}{p_{23} + S_2} - p_{24} P_2 - p_{25} P_2 S_4 + k_{17} P_{26} \\ \frac{dS_1}{dt} &= p_2(1 - p_3 S_1) - \frac{p_{15} T_1 S_1}{p_{16} + S_1} + p_{17} P_1 & \frac{dP_{24}}{dt} &= p_{25} P_2 S_4 - p_{26} P_{24} \\ \frac{dS_4}{dt} &= p_4(1 - p_5 S_4) - p_{18} P_1 S_4 + p_{19} P_{14} - & \frac{dT_1}{dt} &= p_{13} T_\beta A_1 - p_{14} T_1 - \\ & & & \frac{p_{25} P_2 S_4 + p_{26} P_{24}}{p_{27} S_7 P_{P1} T_1 + p_{28} T_{1P}} \\ \frac{dS_2}{dt} &= p_6(1 - p_7 S_2) - \frac{p_{22} T_1 S_2}{p_{23} + S_2} + p_{24} P_2 & \frac{dT_5}{dt} &= p_{20} T_\beta A_5 - p_{21} T_5 - \\ & & & \frac{p_{31} S_7 P_{P2} T_5 + p_{32} T_{5P}}{p_{31} S_7 P_{P2} T_5 + p_{32} T_{5P}} \\ \frac{dA_5}{dt} &= p_8(1 - p_9 A_5) - p_{20} T_\beta A_5 + p_{21} T_5 & \frac{dP_A}{dt} &= -p_{27} S_7 P_A T_1 + p_{28} T_{1P} \\ \frac{dS_7}{dt} &= \frac{p_{11} P_{14}}{p_{12} + P_{14}} - p_{10} S_7 & \frac{dP_B}{dt} &= -p_{31} S_7 P_B T_1 + p_{32} T_{1P} \\ \frac{dP_1}{dt} &= \frac{p_{15} T_1 S_1}{p_{16} + S_1} - p_{17} P_1 - p_{18} P_1 S_4 + p_{19} P_{14} & \frac{dT_{1P}}{dt} &= p_{27} S_7 P_A T_1 - p_{28} T_{1P} \\ \frac{dP_{14}}{dt} &= p_{18} P_1 S_4 - p_{19} P_{14} - p_{29} P_{14} + p_{30} P_{14N} & \frac{dT_{5P}}{dt} &= p_{31} S_7 P_B T_5 - p_{32} T_{5P} \\ \frac{dP_{14N}}{dt} &= p_{29} P_{14} - p_{30} P_{14N} & & \end{aligned}$$

Kan modellen förklara data?

- Falsifiering kräver att parameterrymden har undersökts (olika parametrar ger olika beteende).
- Kräver kanske uttömmande av ekvationer.
- Jämför enkel falsifiering (hitta svart svan).

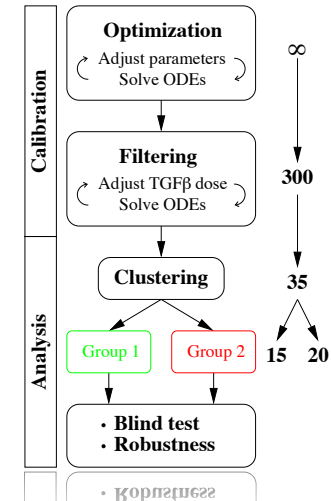
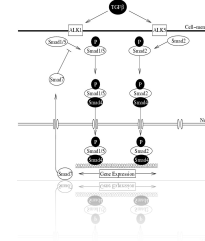
Problem för modeller

- Biologiska organismer inte designade av ingenjörer
- Underliggande mekanismer inte alltid kända
- Parametervärden oftast inte kända
- Även om hypoteser formaliseras finns det ett oändligt antal att testa...
- Modellen förenkling: hur kan en modell av det okända utvärderas?

Induktiv modellering

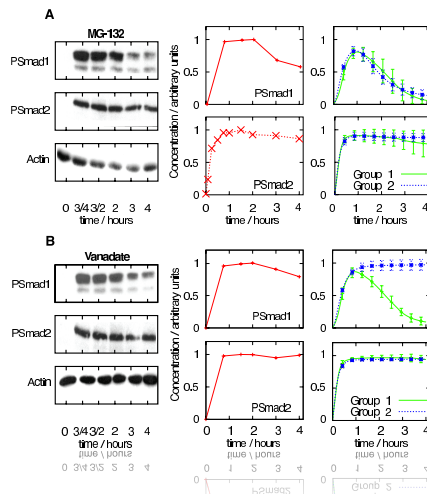
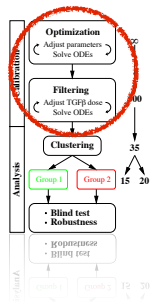
- Utgå från uppmätt data (t ex koncentrationdynamik)
- Välj ut modeller mot hur bra de förutsäger data
- Kan identifiera parametervärden
- Kan också identifiera växelverkningar (nya hypoteser)

Induktiv modellering, TGFbeta



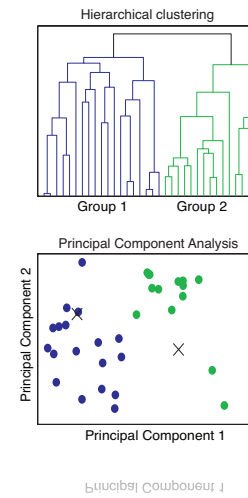
Melke et al (2006)

Generera modeller som följer data



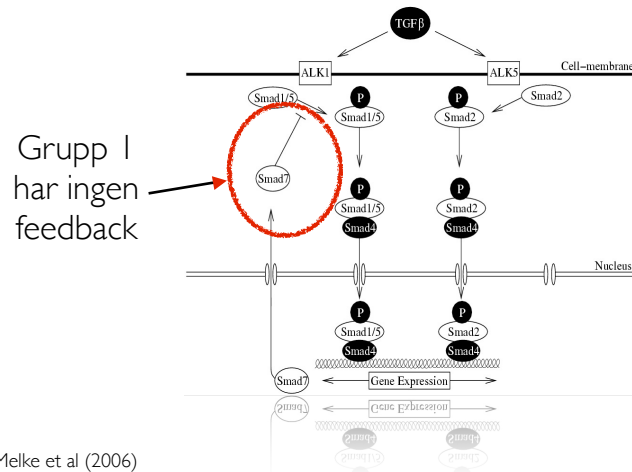
Melke et al (2006)

Gruppera genererade modeller

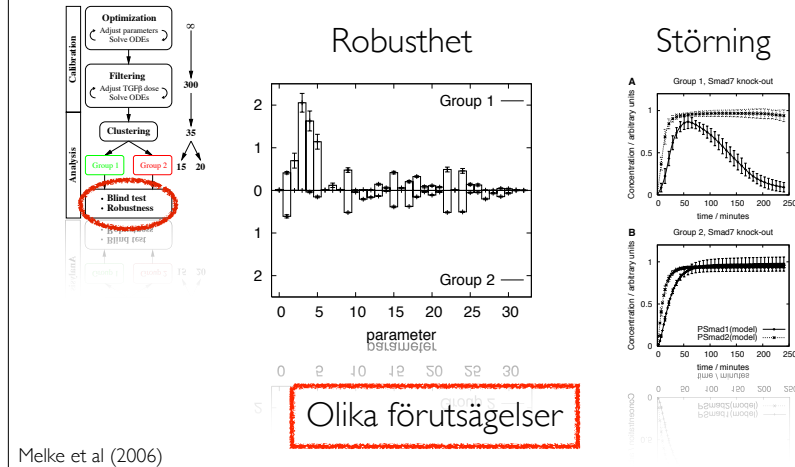


Melke et al (2006)

Analysera de olika modellerna



Analysera de olika modellerna

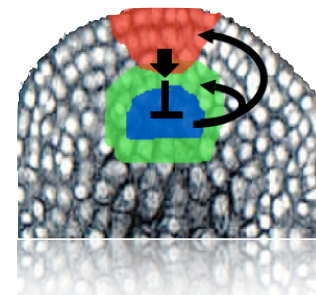


Induktiv modellering sammanfattning

- Utgår från data för att generera modell
- Genererar konkreta hypoteser
- Genererar konkreta förutsägelser
- Hur mycket datorkraft behövs?

Stamcellsreglering i skottet

- CLV3 markerar stamceller och WUS definierar en 'niche'
- WUS aktiverar CLV3 (stamceller)
- CLV3/CLV1 inaktiverar WUS

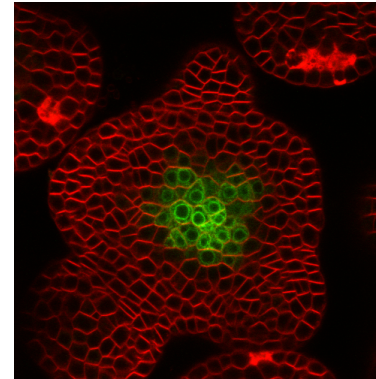


- CLV3 extracellulär peptid
- CLV1 receptor
- WUS transkriptionsfaktor

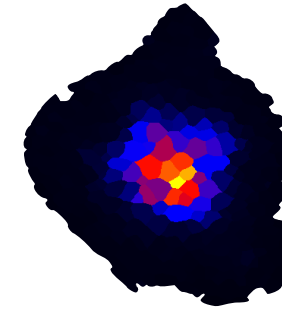
Nätverk formaliserat i modeller

$$\begin{aligned} \frac{dW}{dt} &= -d_W W + V_{maxW} \frac{A^n}{K_{W,1}^n + A^n} \frac{K_{W,2}^n}{K_{W,2}^n + Y^n} \cdot \frac{K_{W,3}^n}{K_{W,3}^n + kS^n} \\ \frac{dCLV3}{dt} &= -d_{CLV3} CLV3 + V_{maxCLV3} \cdot \frac{K_{CLV3,1}^n}{K_{CLV3,1}^n + kS^n} \cdot \frac{wS_a^n}{K_{CLV3,2}^n + wS_a^n} \\ \frac{dKAN}{dt} &= -d_{KAN} KAN + V_{maxKAN} \cdot \frac{K_{KAN,1}^n}{K_{KAN,1}^n + wS_i^n} \frac{K_{KAN,2}^n}{K_{KAN,2}^n + Y^n} \\ \frac{dkS}{dt} &= k_{kS} KAN - d_{kS} kS + D_{kS} \Delta kS \\ \frac{dwS_a}{dt} &= k_{wS_a} W - d_{wS_a} wS_a + D_{wS_a} \Delta wS_a \\ \frac{dwS_i}{dt} &= k_{wS_i} W - d_{wS_i} wS_i + D_{wS_i} \Delta wS_i \\ \frac{dY}{dt} &= k_Y CLV3 - d_Y Y + D_Y \Delta Y \\ \frac{dA}{dt} &= a - (b + \beta)A + cA^2 B - dA + D_a \Delta A \\ \frac{dB}{dt} &= bA - cA^2 B + D_b \Delta B \end{aligned}$$

Kvantitativ experimentell templat



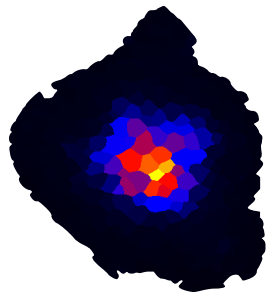
Grön WUS::GFP
Röd membranmarkör



WUS "koncentration"

WUS simulering

Cellvolym, väggareor och grannskap från templat



Templat

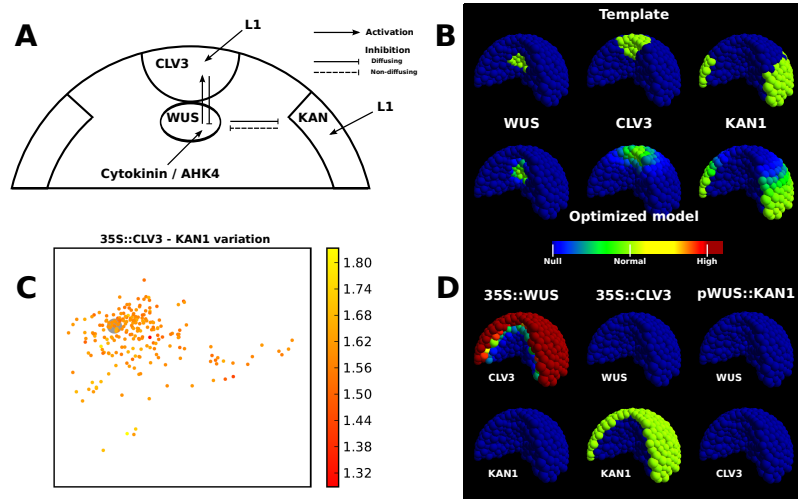


Simulering

Metod, i praktiken (i detta fall)

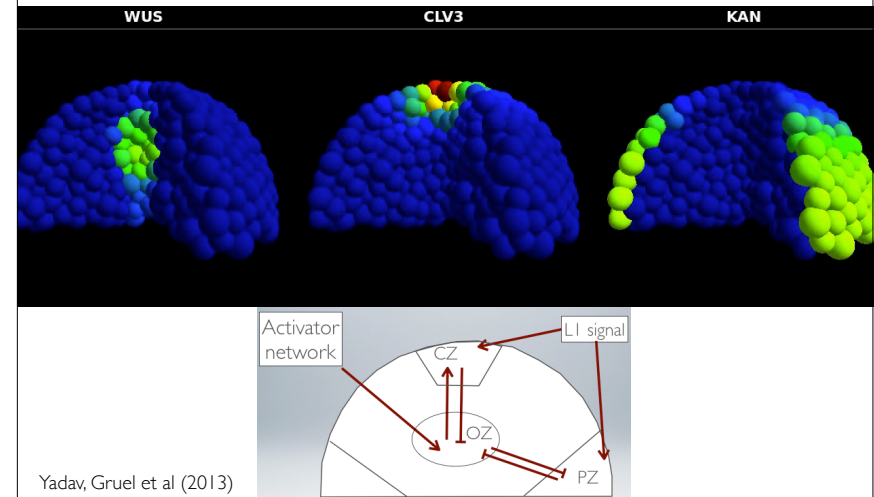
- Hypoteser beskrivna i matematik
- Få (två) modeller, en verifierad (för tillfället), en falsifierad (för alltid?)
- Typisk hypotetisk-deduktiv metod, fast med matematik

Datadriven modellering



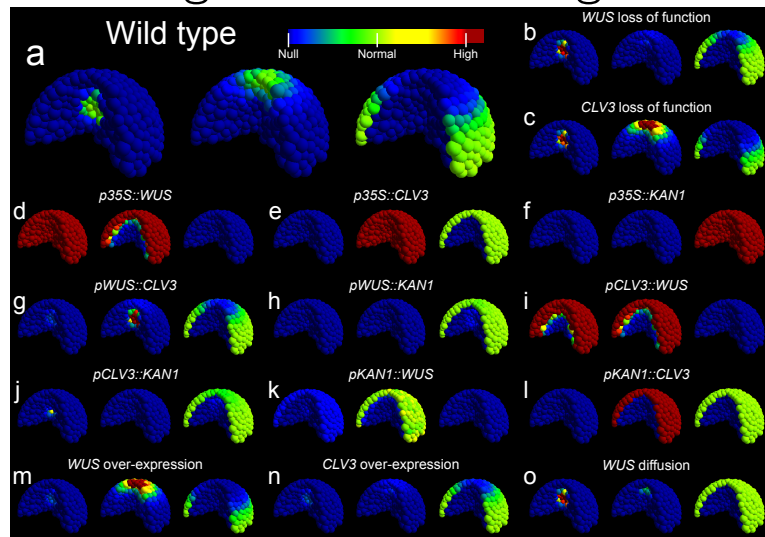
Yadav, Gruel et al (2013)

växande växt



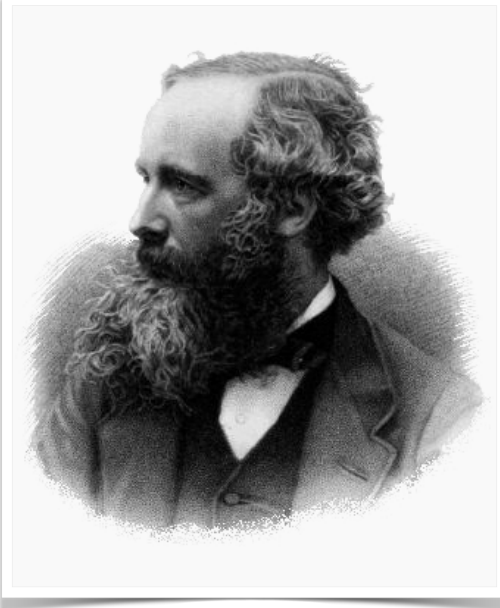
Yadav, Gruel et al (2013)

Många modellförutsägelser

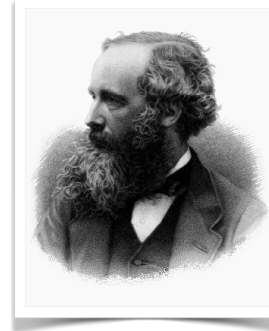


Yadav, Gruel et al (2013)

När är vi nöjda med modellen?



Maxwell om att utvärdera modeller av icke observerbara enheter



Oberoende indikationer och enkelhet

Förklaring av kända fenomen

Teoretiska förutsägelser

Olösta problem

March 4, 1875]

NATURE

ON THE DYNAMICAL EVIDENCE OF THE
MOLECULAR CONSTITUTION OF BODIES*

WHEN any phenomenon can be described as an example of

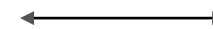
Of all hypotheses as to the constitution of matter, the most warrantable which assumes material systems, and proposes to

Sammanfattning

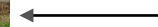
- Biologisk bakgrund
- Tekniska framsteg
- Matematisk beskrivning
- Vetenskapsteoretisk bakgrund
- Exempel 1, Artificiella neuronnätverk
- Exempel 2, Systembiologimodellering
- **Sammanfattning**

Sammanfattning

Hypoteser
och teorier



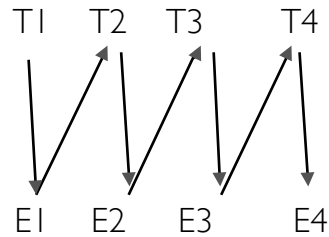
Experiment
och data



Kanske inte så viktigt vilket som kommer först.

Sammanfattning

Hypoteser
och teorier



← Matematisk
beskrivning

Experiment
och data



Tekniska
framsteg

Växelverkan viktig!

Sammanfattning

Kvantitativ data ger objektivitet
(möjligt genom tekniska framsteg)

Matematisk formulering ger distinkta hypoteser, också
om vad som antas och utelämnas

Komplexiteten gör falsifikation svår

Mängden kvantitativ data gör att 'induktiva' algoritmer
kan vara användbara/nödvändiga