Bi8940 Developmental biology
Lesson 9

Morphogenesis

Jan Hejátko

Laboratory of Molecular Plant Physiology,
Department of Functional Genomics and Proteomics,
Masaryk University,
Brno, Czech Republic
hejatko@sci.muni.cz, www.sci.muni.cz/FGP/

EVROPSKÁ UNIE

MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ, MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Tato prezentace je spolufinancována Evropským sociálním fondem a státním rozpočtem České republiky

Outline of Lesson 9

Morphogenesis

- Morphogenesis in animals
  - Changes in the cell adhesion, protrusion and motility
  - Extracellular matrix regulators of morphogenesis
  - Specificity of cell aggregations and its molecular determinants
  - Morphogenic manoeuvres
  - Changes in the cell motility and tissue interactions during organogenesis

- Morphogenesis in plants
  - Introducing leaf development as an example of morphogenesis in plants
  - The role of oriented cell division and its relative distribution
    - Regulation of cell division by TCP and boundary genes
    - Auxin-regulated positional information for cell division
    - *KNOX* and boundary genes in the leaf complexity

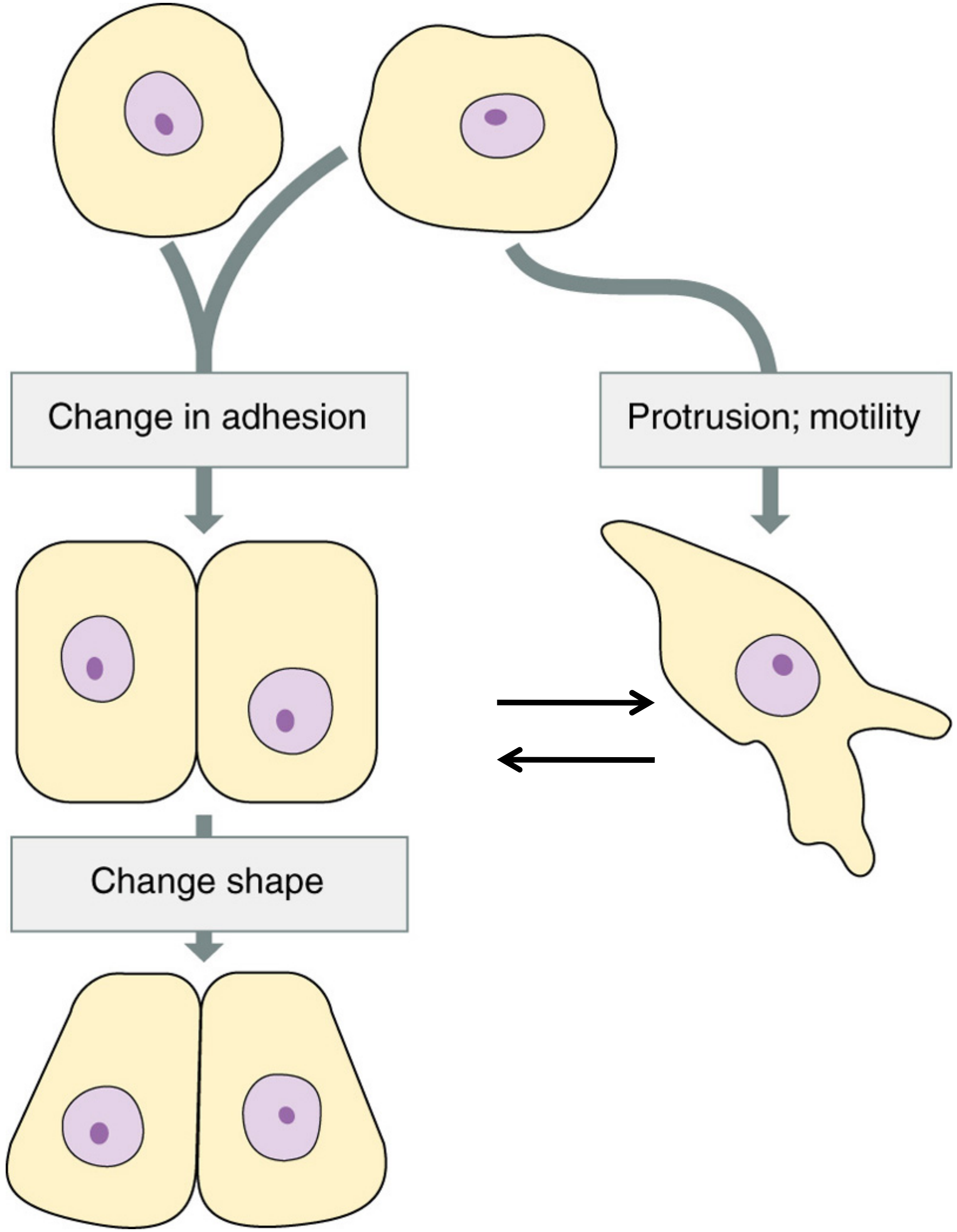
EVROPSKÁ UNIE
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ, MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY
OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost
INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ
Tato prezentace je spolufinancována Evropským sociálním fondem a státním rozpočtem České republiky

Outline of Lesson 9

Morphogenesis

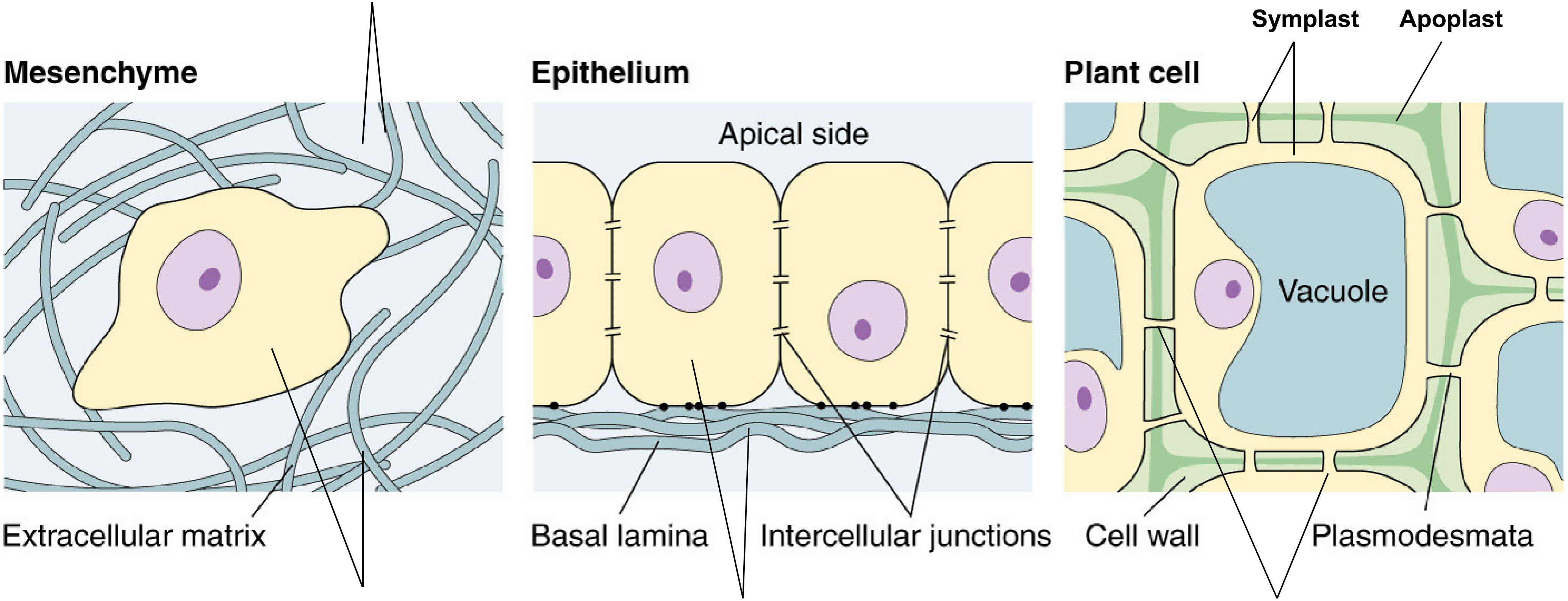
- Morphogenesis in animals
  - Changes in the cell adhesion, protrusion and motility

EVROPSKÁ UNIE
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ, MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY
OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost
INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ
Tato prezentace je spolufinancována Evropským sociálním fondem a státním rozpočtem České republiky



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ
Tato prezentace je spolufinancována
Evropským sociálním fondem
a státním rozpočtem České republiky

Extracellular matrix
- Colllagen
- Proteoglycans
- Glycoproteins
- Signalling molecules



Interactions with extracellular matrix

Cell-to-cell communication and interactions with basal lamina

Cell-to-cell communication and interactions with extracellular space

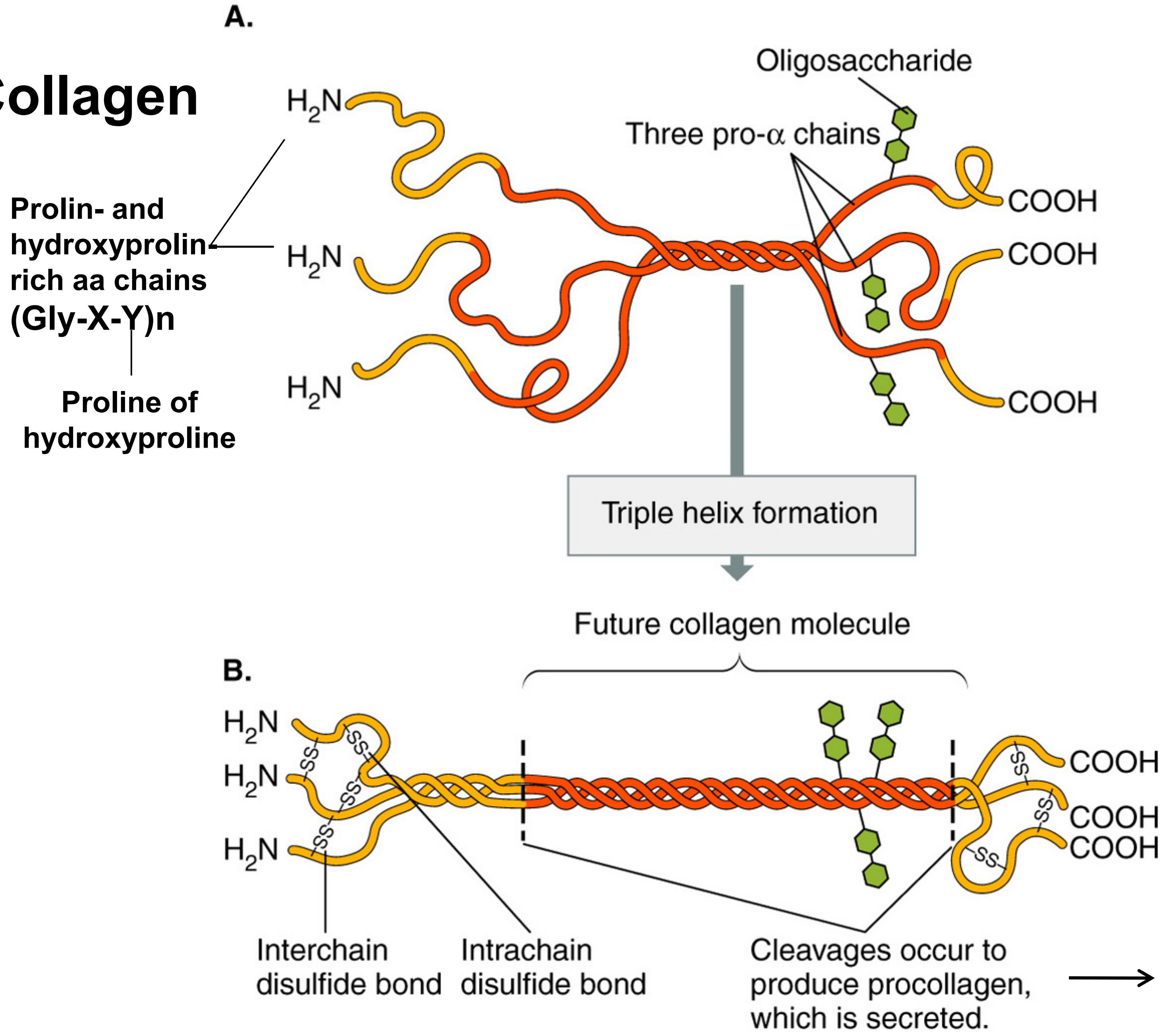
EVROPSKÁ UNIE
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ, MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY
OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost
UNIVERSITAS MASARYKIANA BRUNENSIS
INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ
Tato prezentace je spolufinancována Evropským sociálním fondem a státním rozpočtem České republiky

Outline of Lesson 9

Morphogenesis

- Morphogenesis in animals
  - Changes in the cell adhesion, protrusion and motility
  - Extracellular matrix regulators of morphogenesis

Collagen



Cell-environment-dependent regulation

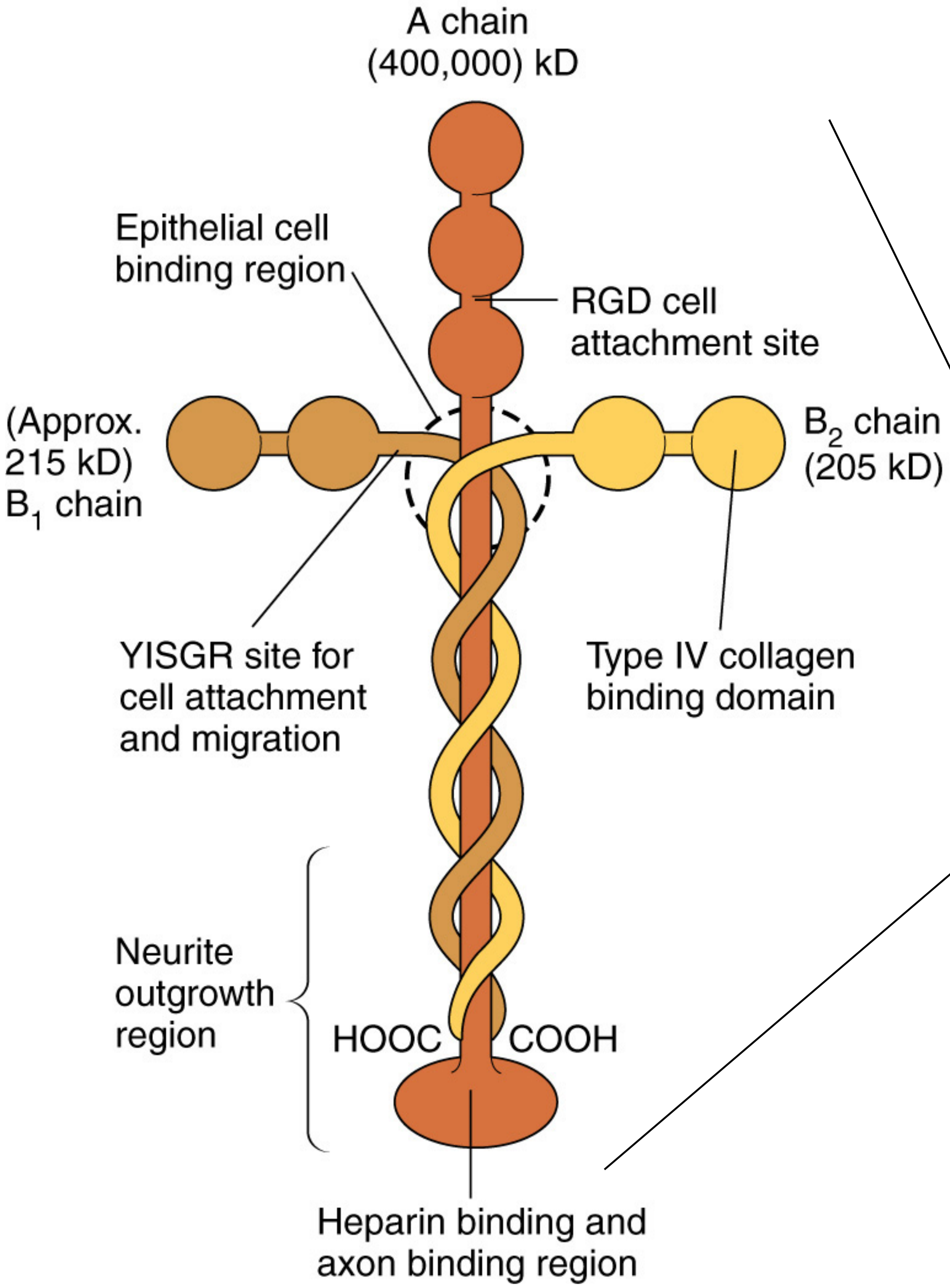
Final assembly in the extracellular space

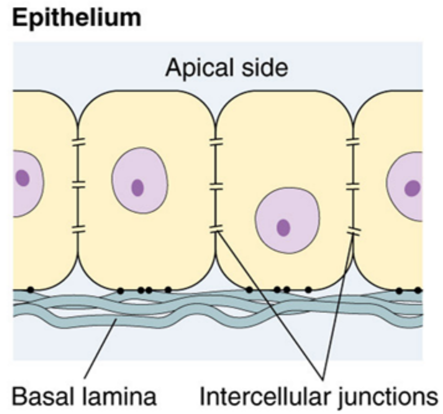
EVROPSKÁ UNIE
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ, MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY
OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost
INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ
Tato prezentace je spolufinancována Evropským sociálním fondem a státním rozpočtem České republiky

Table 12.1 The Major Types of Collagen

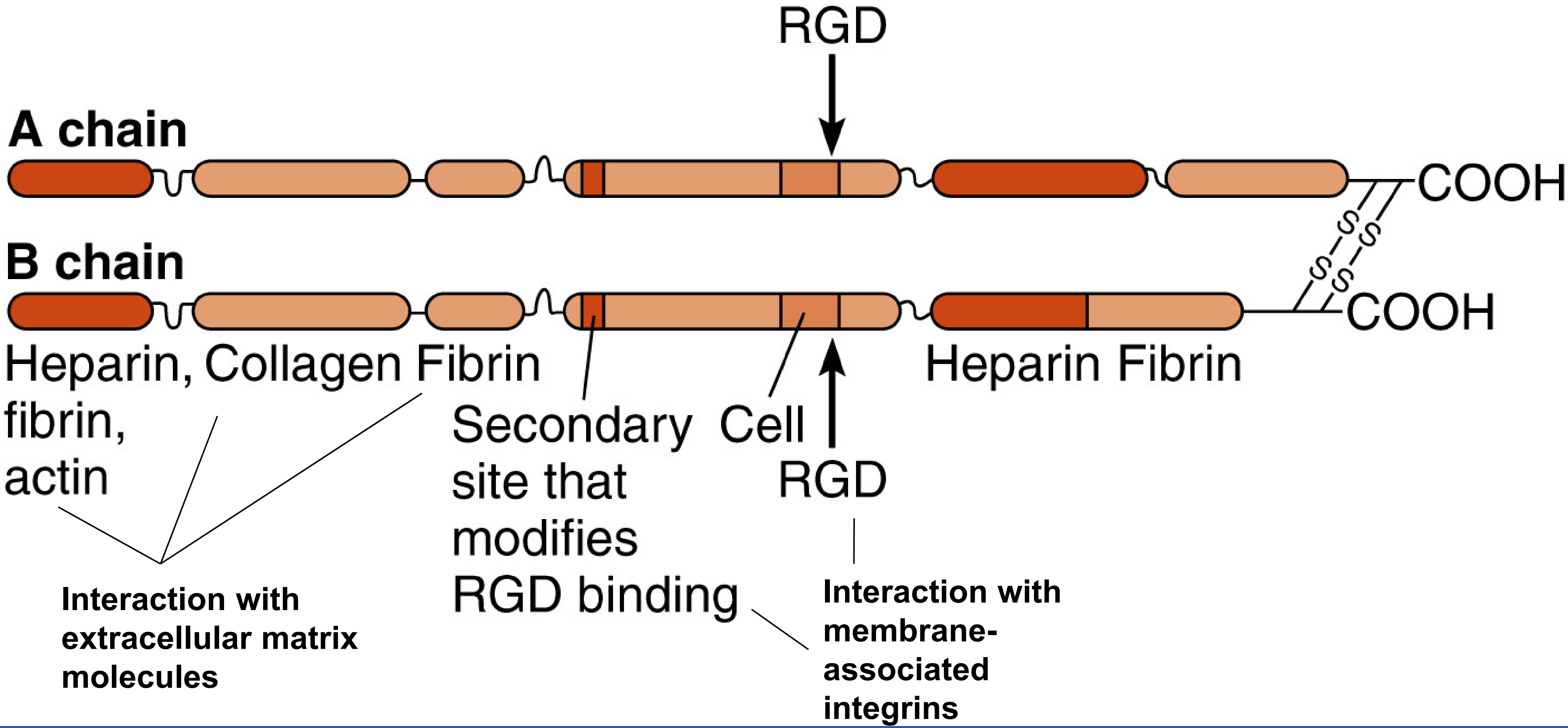
Type	Class	Chain Composition[a]	Kinds of Tissues
I	Fibrillar	$2[\alpha_1(I)] + 1[\alpha_2(I)]$	90% of total: skin, bone, cornea, ligaments
II	Fibrillar	$3[\alpha_1(II)]$	Cartilage
III	Fibrillar	$3[\alpha_1(III)]$	Skin, blood vessels, found with type I
IV	Network	$2[\alpha_1(IV)] + 1[\alpha_2(IV)]$	Basal lamina

Laminin


A chain
(400,000) kD
Epithelial cell
binding region
RGD cell
attachment site
(Approx.
215 kD)
B1 chain
B2 chain
(205 kD)
YISGR site for
cell attachment
and migration
Type IV collagen
binding domain
Neurite
outgrowth
region
HOOC
COOH
Heparin binding and
axon binding region


Epithelium
Apical side
Basal lamina
Intercellular junctions

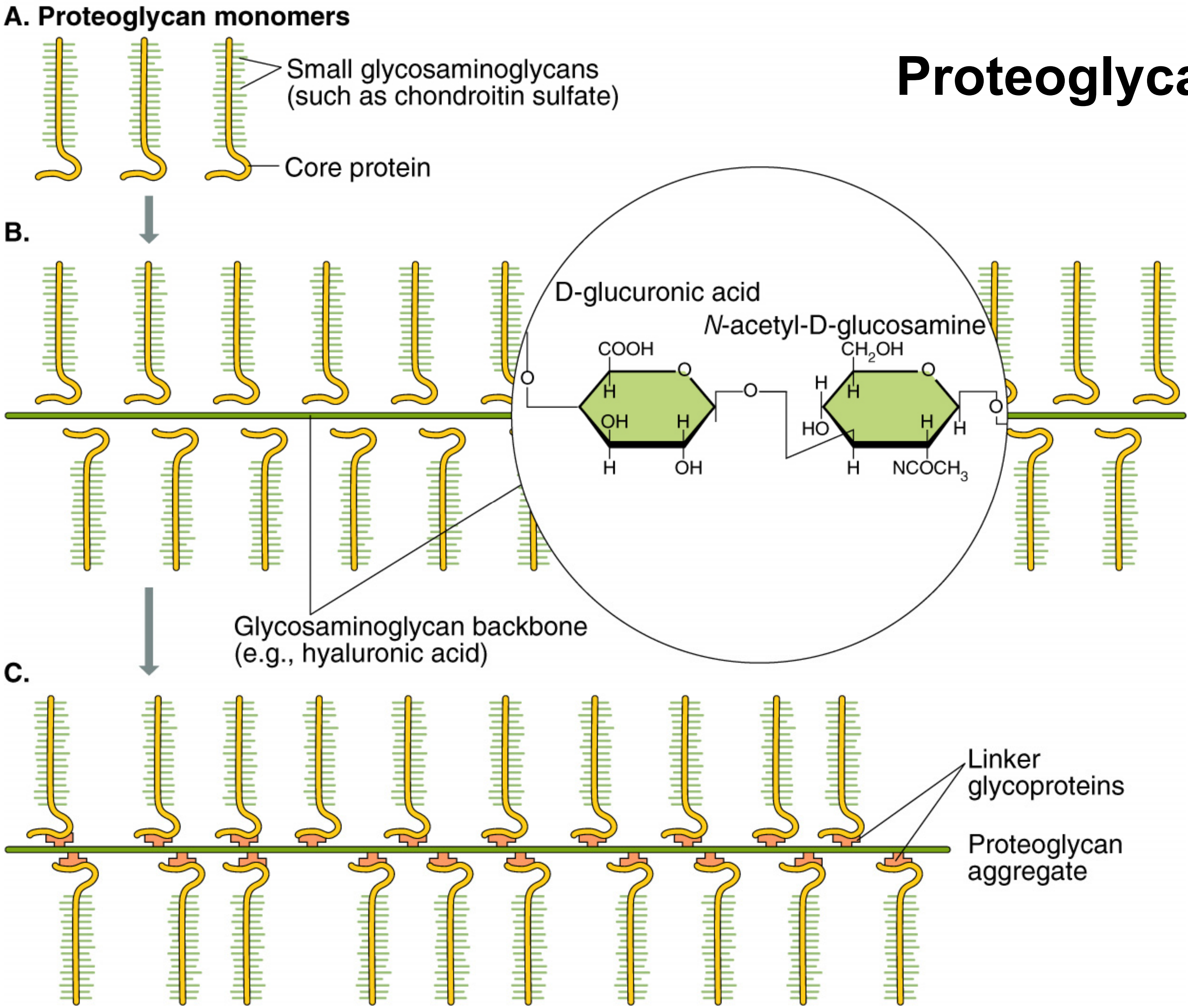
Fibronectin

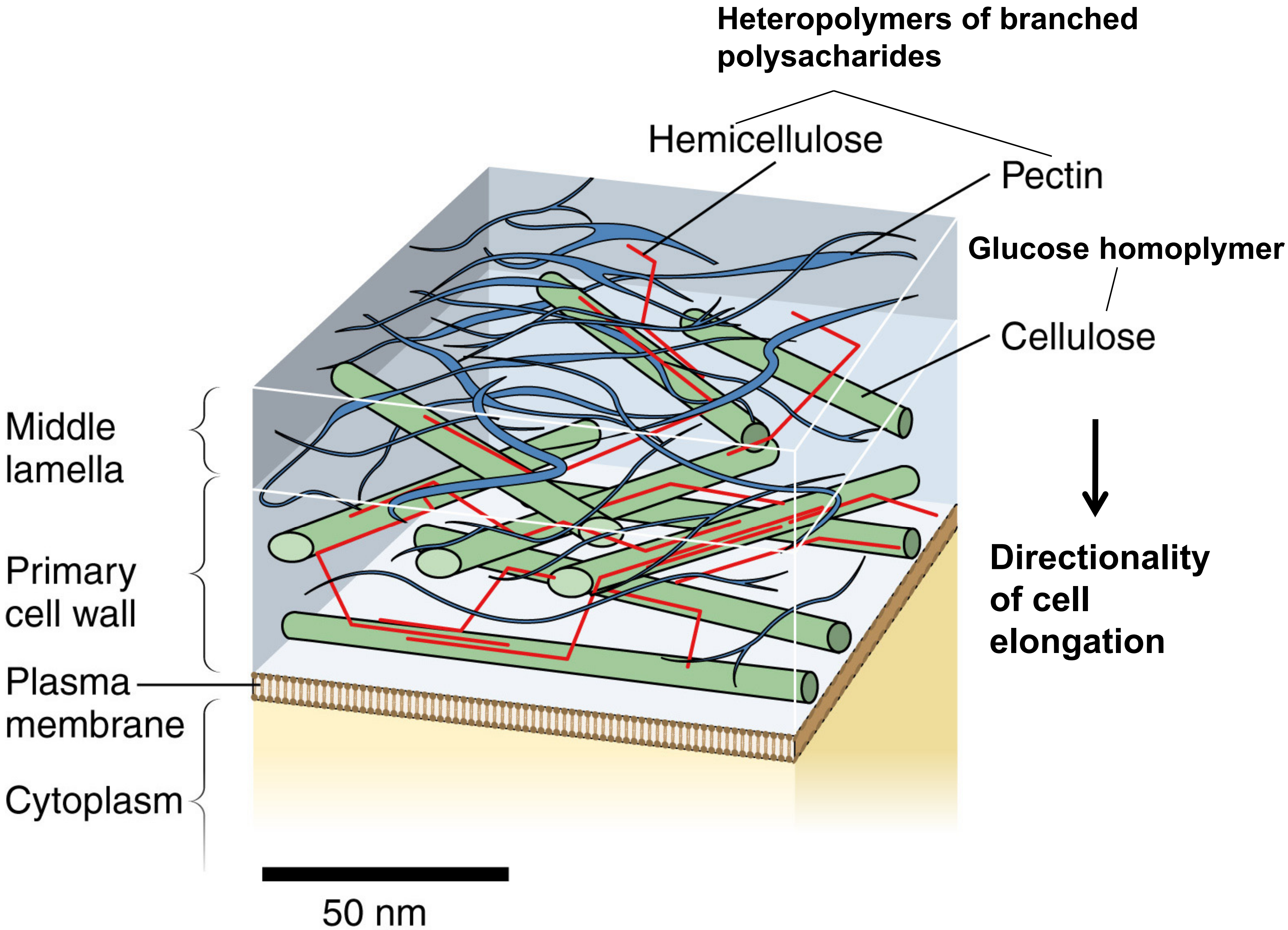


INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Tato prezentace je spolufinancována
Evropským sociálním fondem
a státním rozpočtem České republiky

Proteoglycans



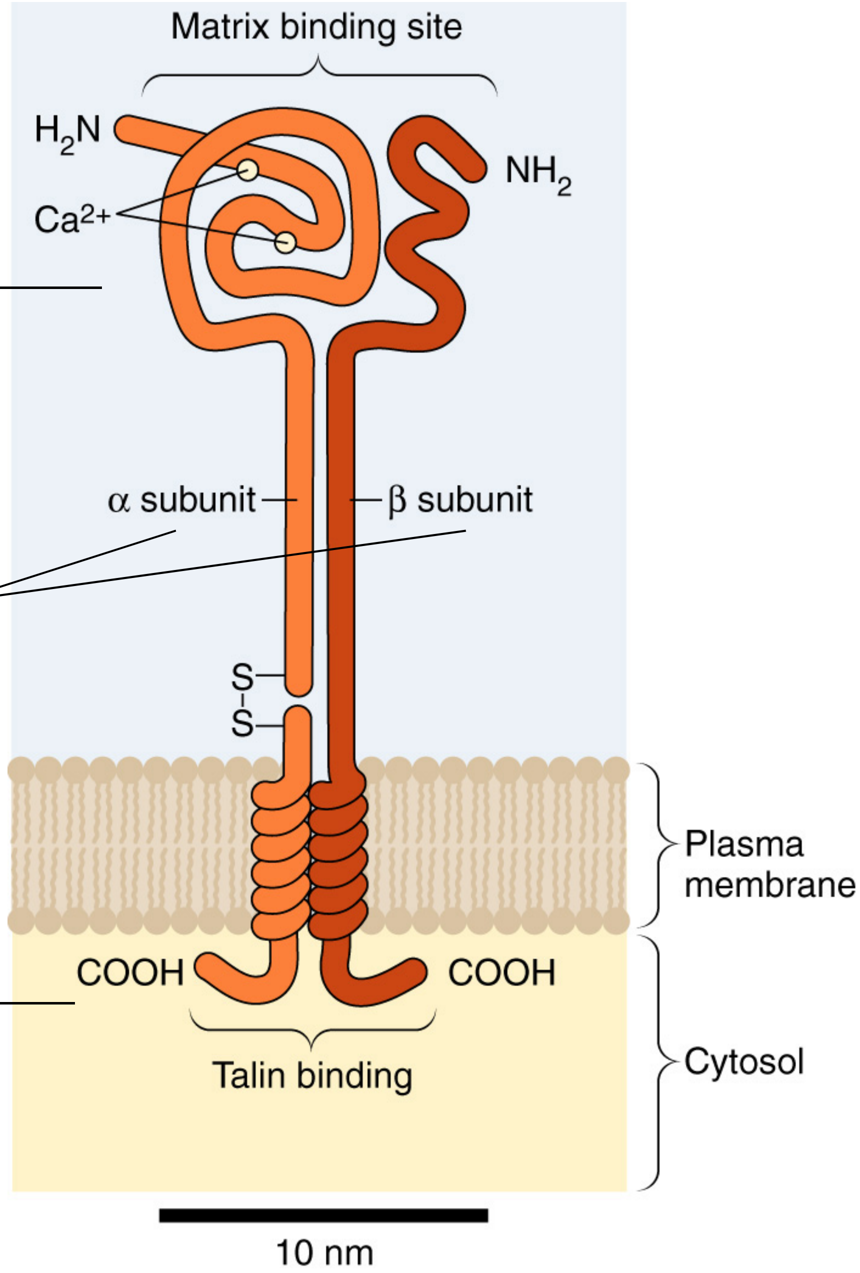

Heteropolymers of branched polysacharides
Hemicellulose
Pectin
Glucose homoplymer
Cellulose
Middle lamella
Primary cell wall
Plasma membrane
Cytoplasm
Directionality of cell elongation
50 nm

Integrins

Interaction with extracellular matrix molecules

Encoded by gene families

Interaction with internal proteins, e.g. cytoskeleton



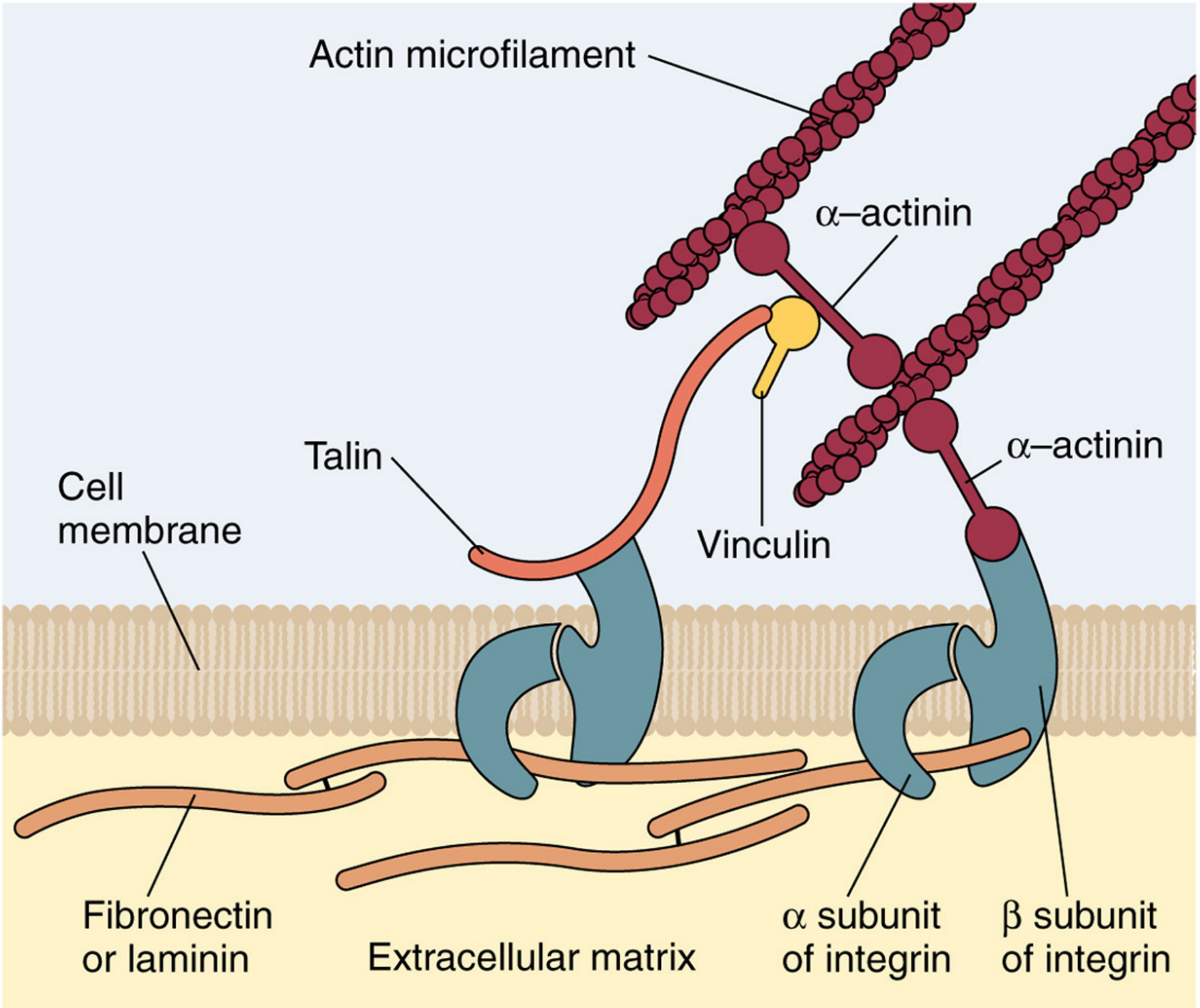
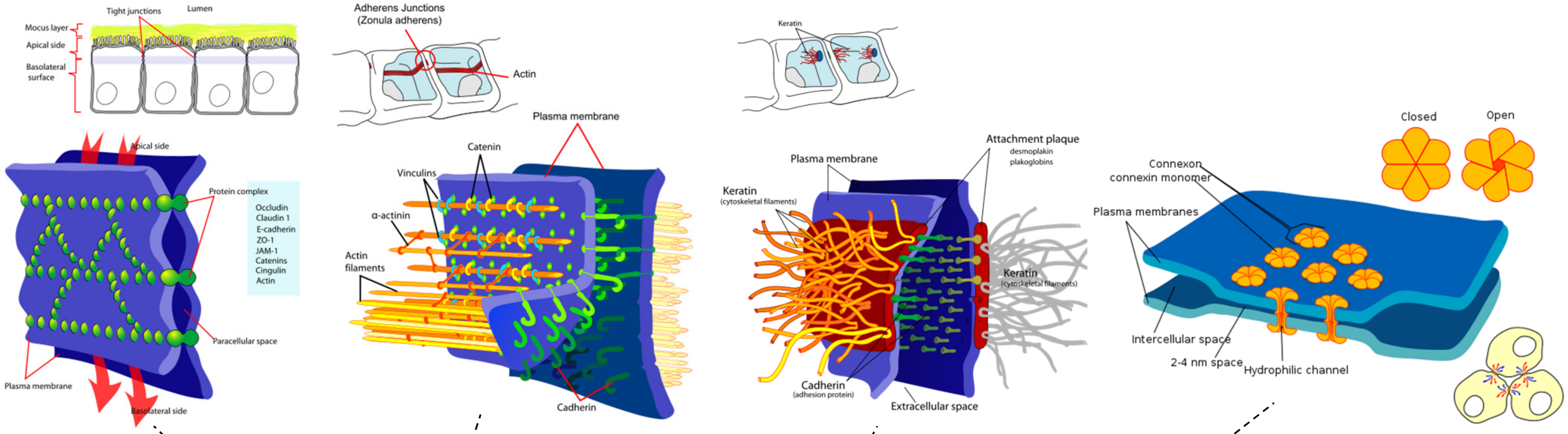
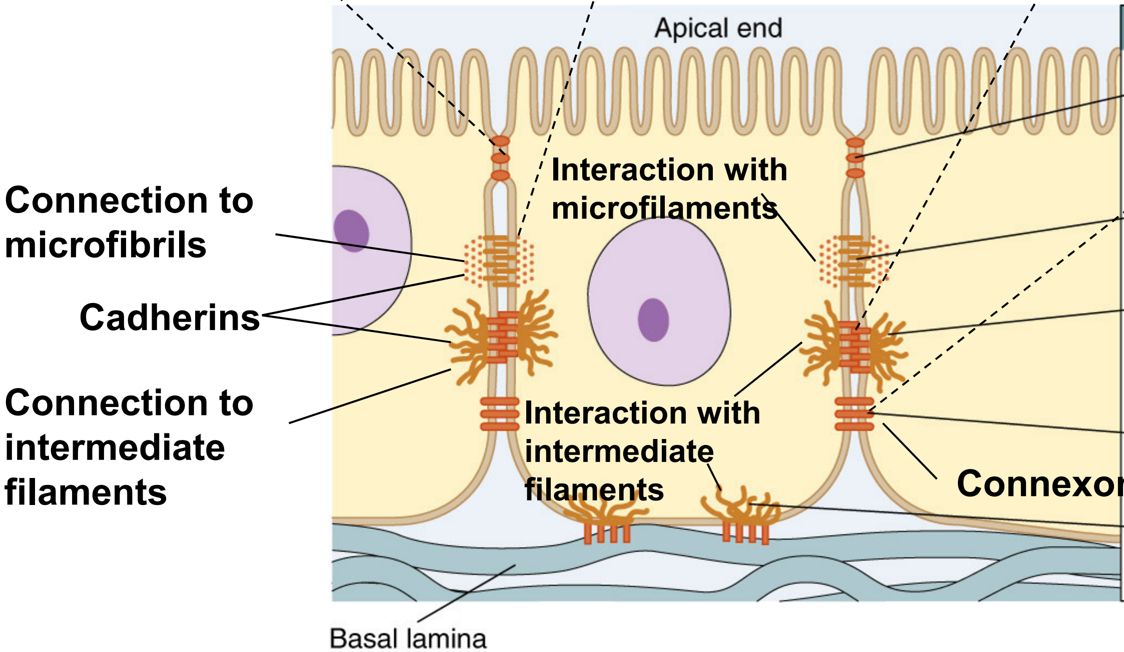

Actin microfilament
α–actinin
α–actinin
Talin
Cell
membrane
Vinculin
Fibronectin
or laminin
Extracellular matrix
α subunit
of integrin
β subunit
of integrin

TABLE 12.2 SOME LIGANDS OF INTEGRIN DIMERS

Major β Subunit	Ligand of Integrin Dimer Subunits	Types of α Subunits
β_1	Collagen	1, 2, 3
	Laminin	1, 2, 3, 6
	Fibronectin	3, 4, 5, V
β_2	I-CAM	2L, 2M
	Fibrinogen	2M
β_3	Fibrinogen	V, 2b
	Fibronectin	V, 2b
β_4	Basal lamina	6

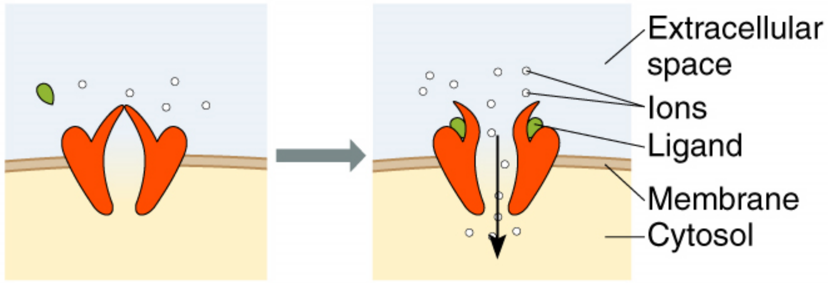




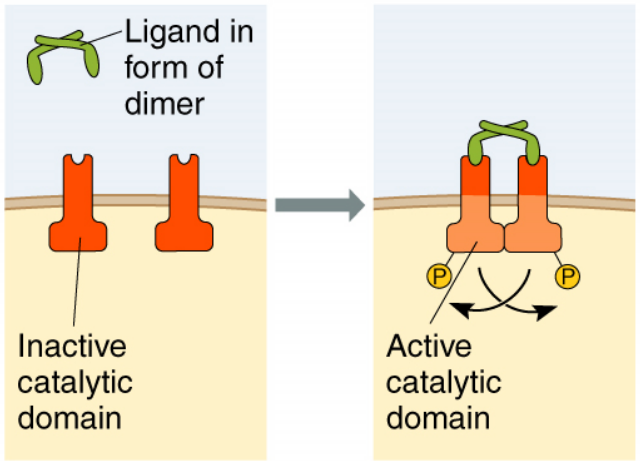
Kind of junction	Function
Tight	Seals neighboring cells together in an epithelial sheet to prevent leakage of molecules between them
Adherens	Joins an actin bundle in one cell to a similar bundle in a neighboring cell
Desmosome	Anchors the tough intermediate filaments in one cell to those in a neighboring cell
Gap	Allows passage of small water-soluble ions and molecules between cells
Hemidesmosome	Anchors intermediate filaments in a cell to the basal lamina

EVROPSKÁ UNIE
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ, MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY
OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost
INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ
Tato prezentace je spolufinancována Evropským sociálním fondem a státním rozpočtem České republiky

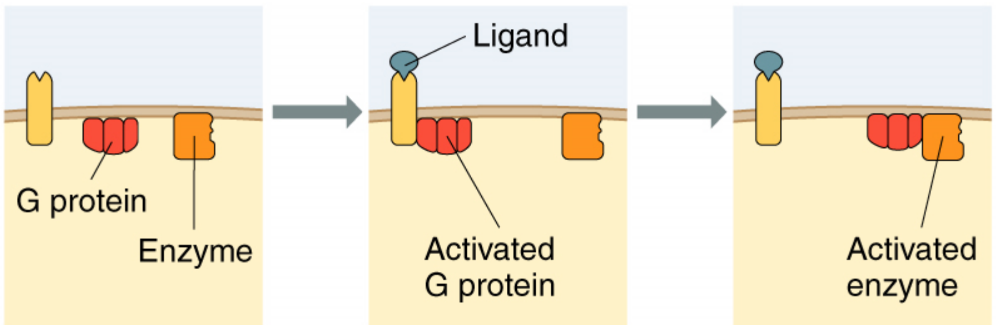
A. Ion-channel-linked receptor



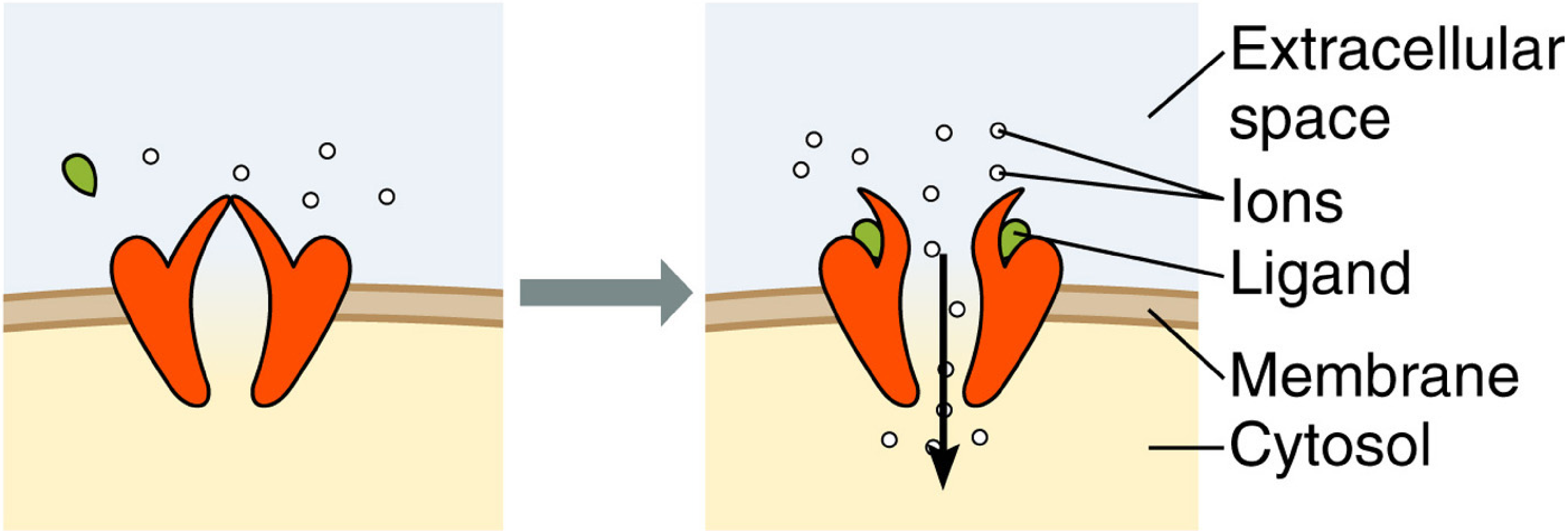
B. Enzyme-linked receptors



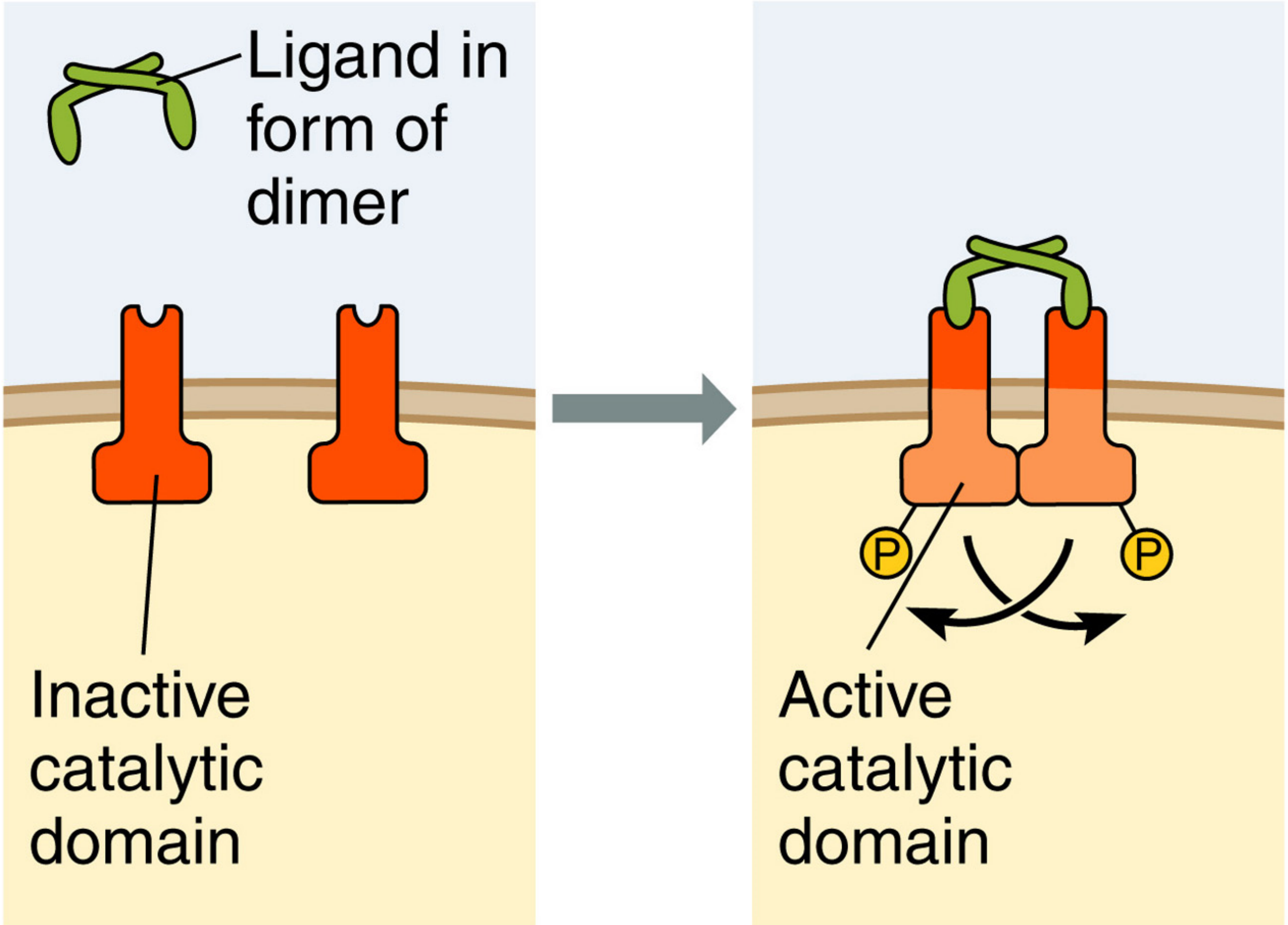
C. G protein-linked receptor



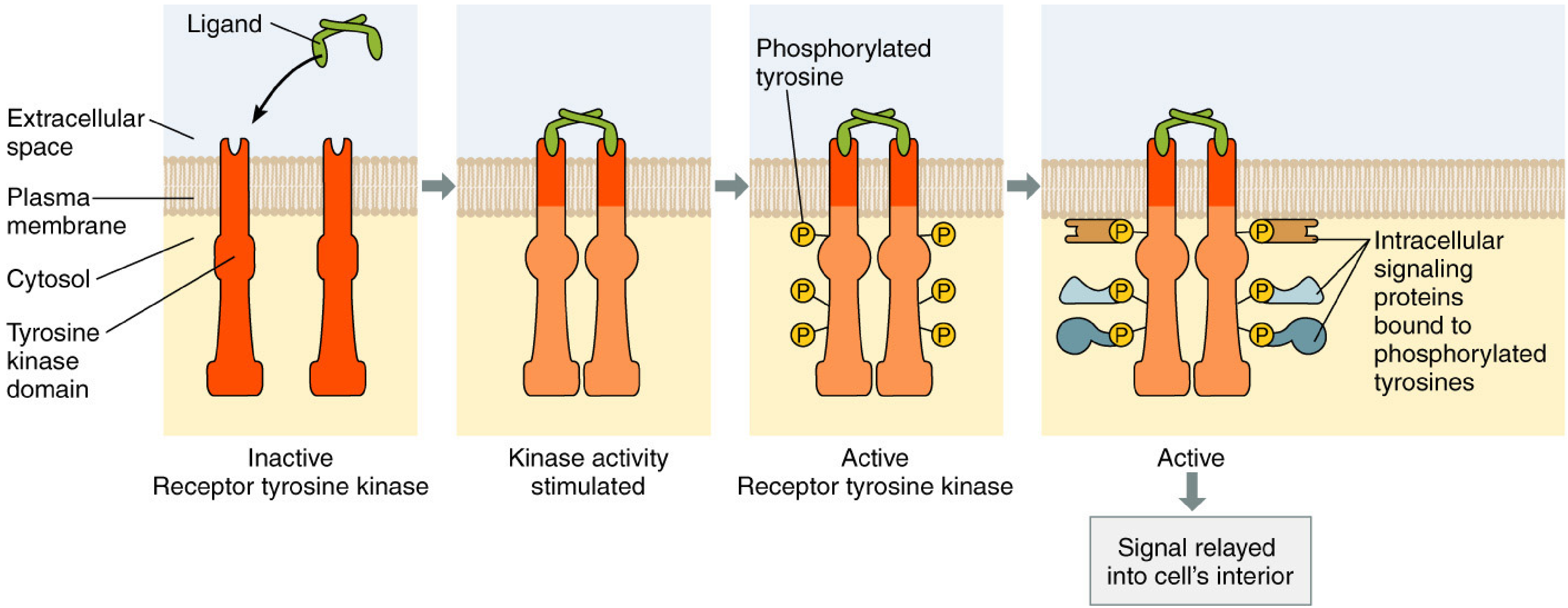
A. Ion-channel-linked receptor



B. Enzyme-linked receptors

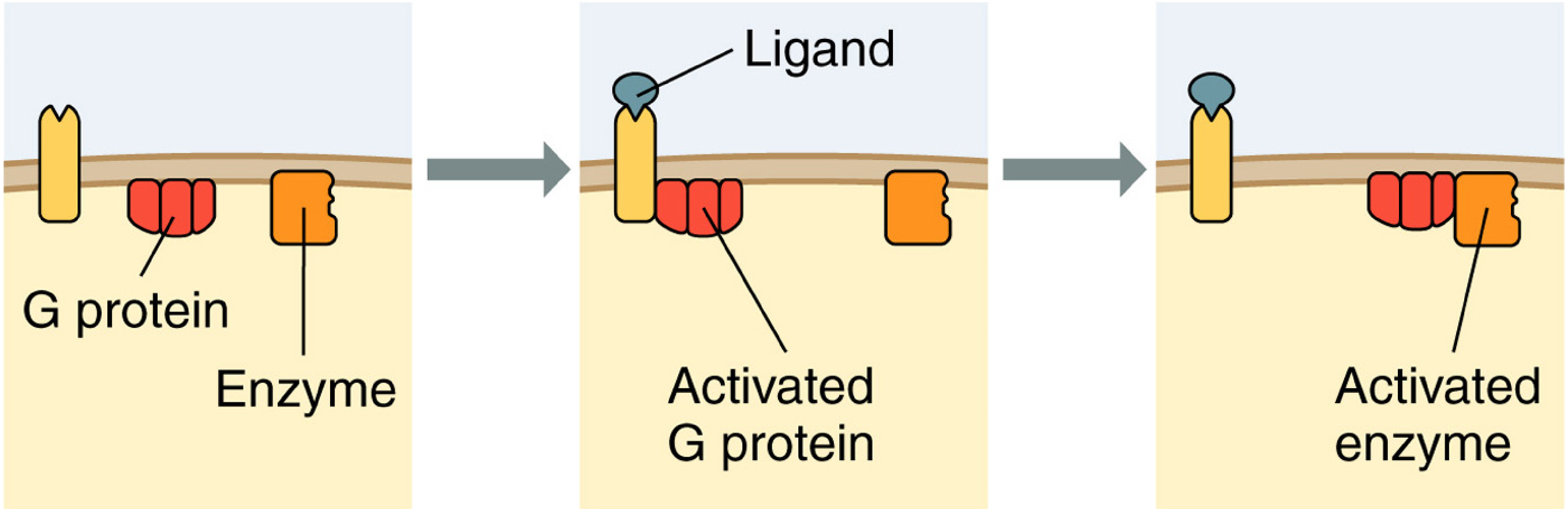


INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ
Tato prezentace je spolufinancována Evropským sociálním fondem a státním rozpočtem České republiky



EVROPSKÁ UNIE
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ, MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY
OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost
INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ
Tato prezentace je spolufinancována Evropským sociálním fondem a státním rozpočtem České republiky

C. G protein-linked receptor

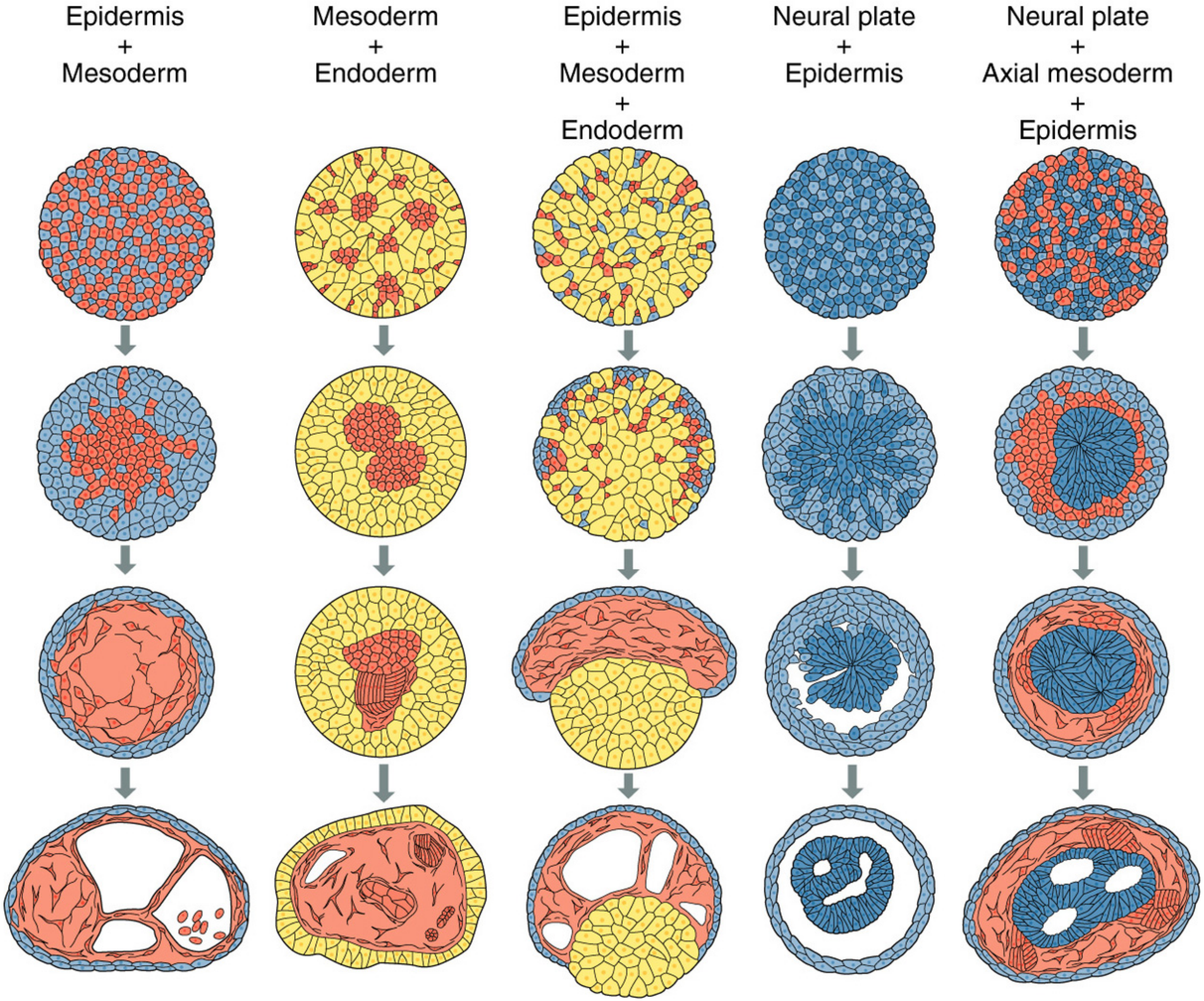


EVROPSKÁ UNIE
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ, MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY
OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost
INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ
Tato prezentace je spolufinancována
Evropským sociálním fondem
a státním rozpočtem České republiky

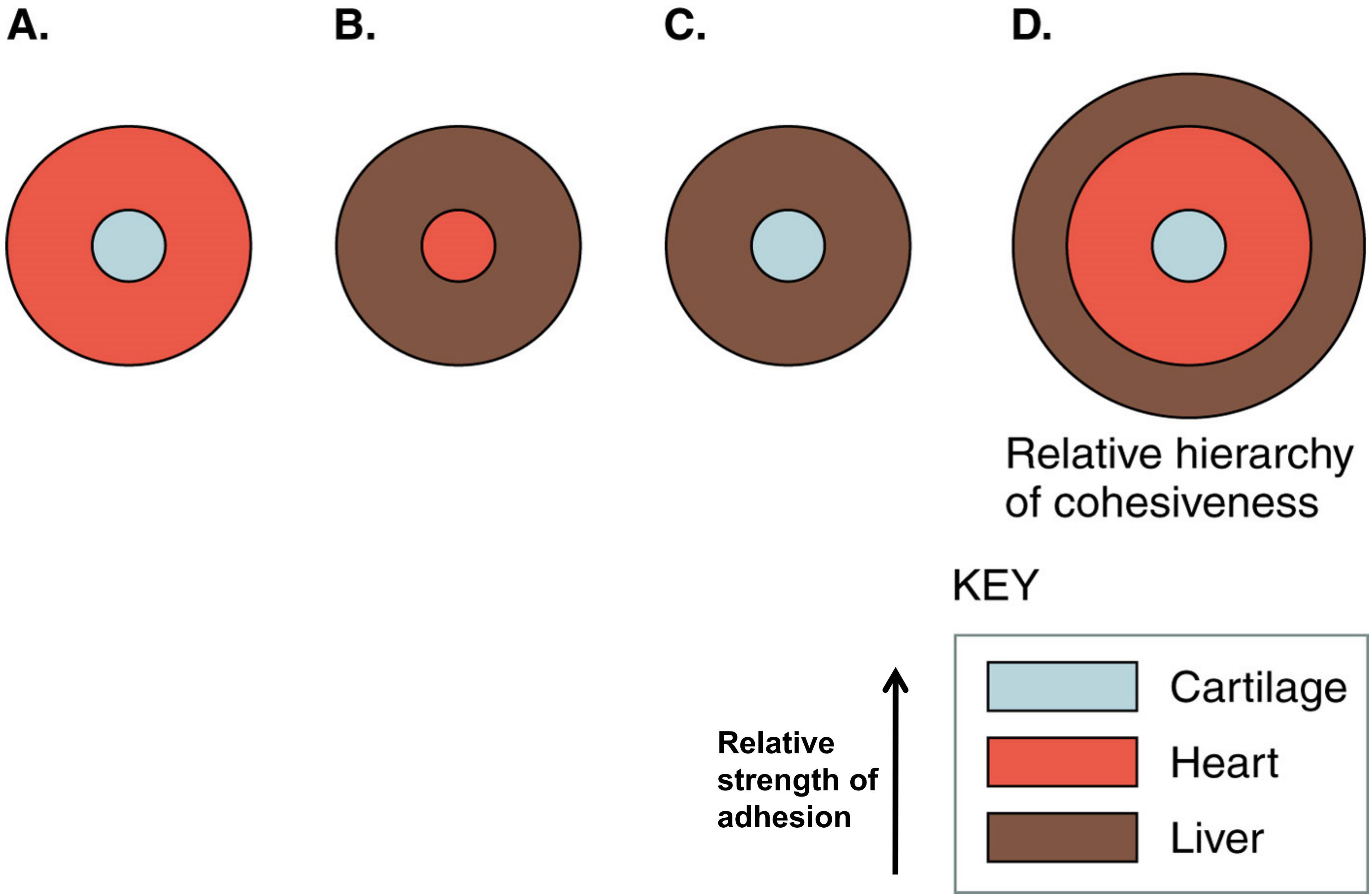
Outline of Lesson 9

Morphogenesis

- Morphogenesis in animals
  - Changes in the cell adhesion, protrusion and motility
  - Extracellular matrix regulators of morphogenesis
  - Specificity of cell aggregations and its molecular determinants



EVROPSKÁ UNIE
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ, MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY
OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost
INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ
Tato prezentace je spolufinancována Evropským sociálním fondem a státním rozpočtem České republiky

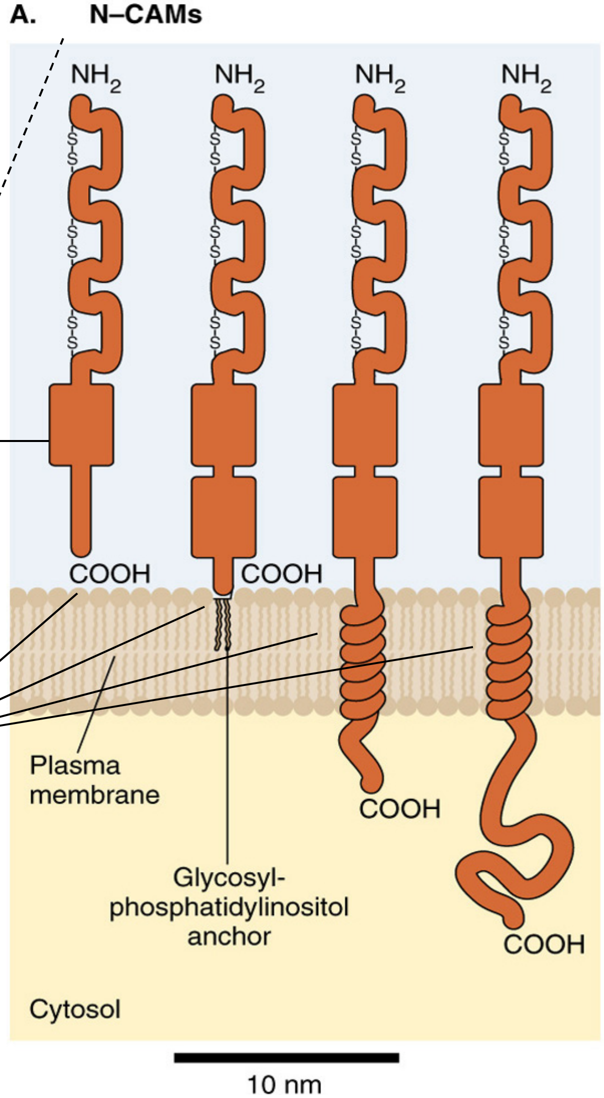

A.
B.
C.
D.
Relative hierarchy of cohesiveness
KEY
Cartilage
Heart
Liver
Relative strength of adhesion

Cell Adhesion Molecules (CAMs)   Cadherins

- Homophilic heterophilic
- With or without Ca2+
- Membrane-bound or free

5 looped extracellular domains in total (Ig-like)

Different subtypes of CAMs



- Homophilic
- Ca2+-dependent
- Mebrane-bound
- Tissue specific
- Part of the adherens and desmosome junctions

Ca2+ binding domains

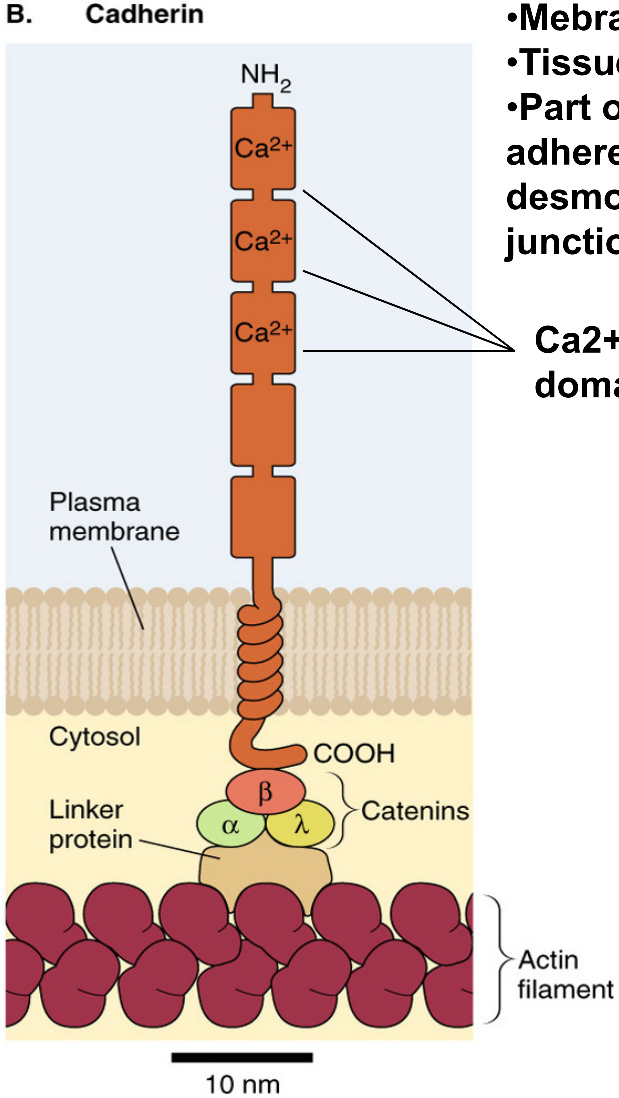
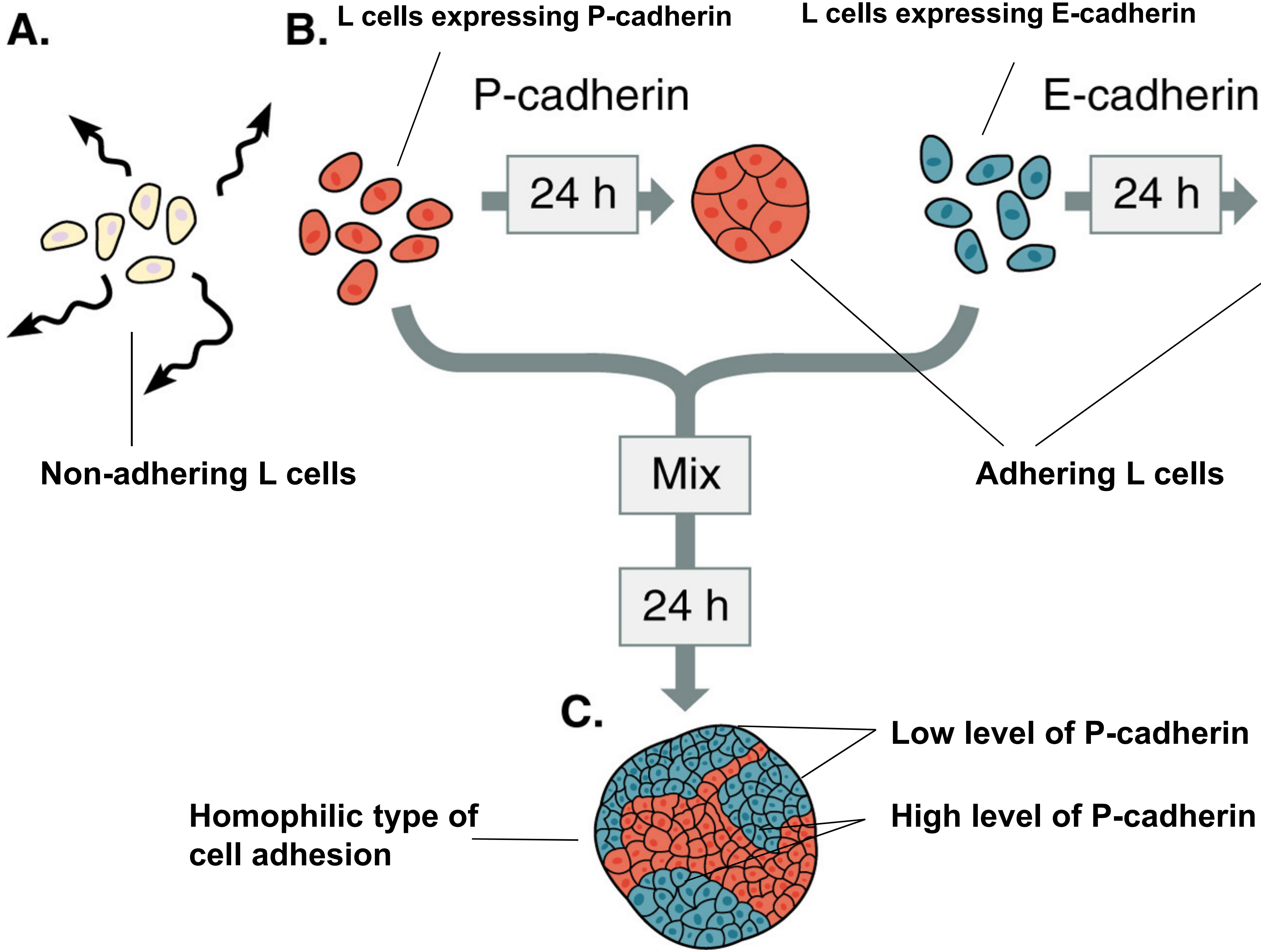


TABLE 12.3 TYPES OF CELL ADHESION MOLECULES

Class of Molecule (Synonyms)	Binding Mechanism	Ion Dependence	Examples
N-CAM	Homophilic	No	Neural plate
Ng-CAM	Heterophilic	No	Nervous system
I-CAM	Heterophilic	No	Endothelial cells
L-CAM (E-cadherin, uvomorulin)	Homophilic	Ca^{2+}	Blastomeres
A-CAM	Homophilic	Ca^{2+}	Mesoderm, lens, muscle
P-cadherin	Homophilic	Ca^{2+}	Endoderm, placenta
N-cadherin	Homophilic	Ca^{2+}	Central nervous system
EP-cadherin (C-cadherin)	Homophilic	Ca^{2+}	Cleavage stage blastomeres
Integrins	Heterophilic	Varies	Extracellular matrix



EVROPSKÁ UNIE
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ, MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY
OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost
INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ
Tato prezentace je spolufinancována Evropským sociálním fondem a státním rozpočtem České republiky

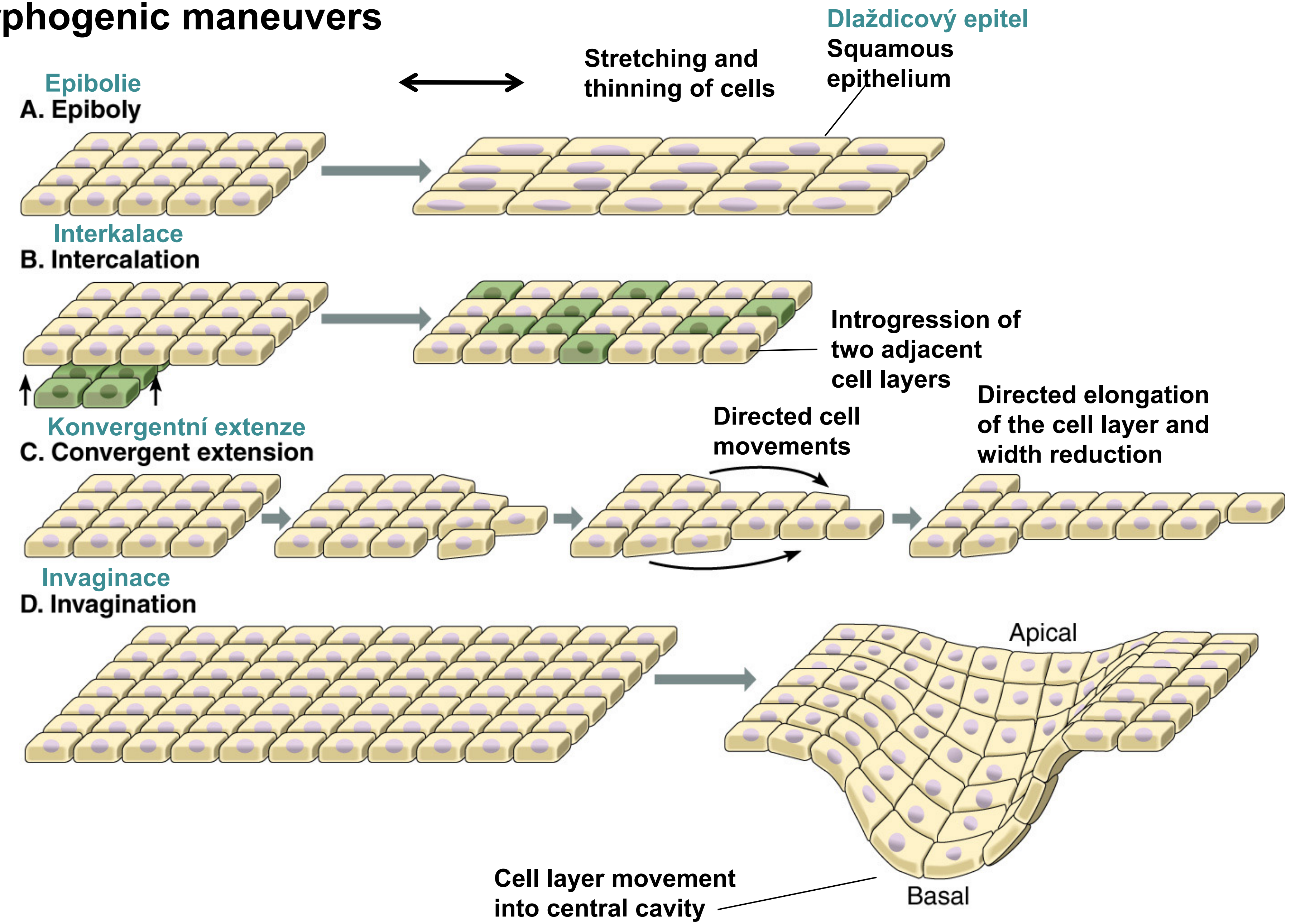
Outline of Lesson 9

Morphogenesis

- Morphogenesis in animals
  - Changes in the cell adhesion, protrusion and motility
  - Extracellular matrix regulators of morphogenesis
  - Specificity of cell aggregations and its molecular determinants
  - Morphogenic manoeuvres

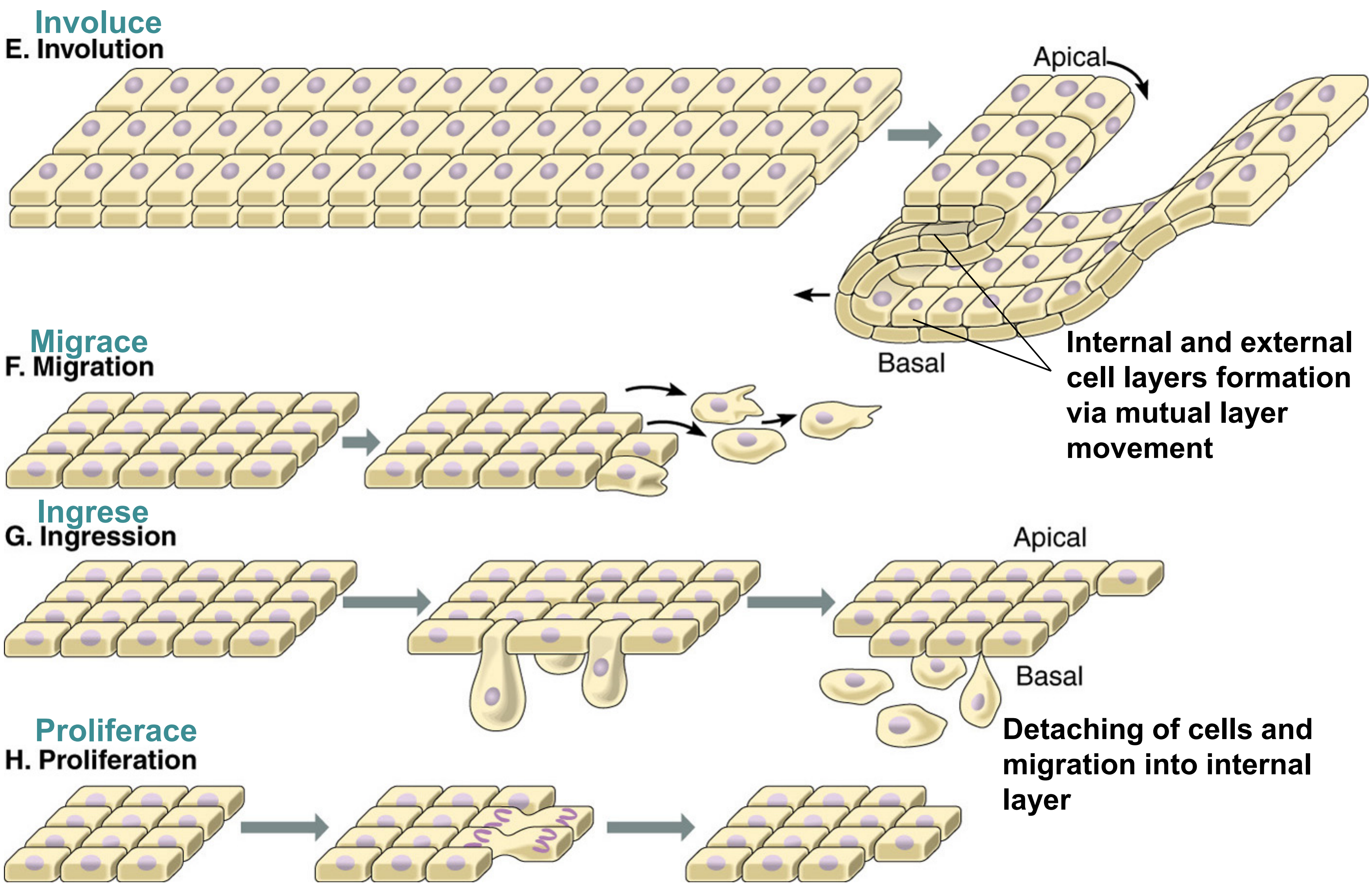
EVROPSKÁ UNIE
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ, MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY
OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost
INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ
Tato prezentace je spolufinancována Evropským sociálním fondem a státním rozpočtem České republiky

Morphogenic maneuvers



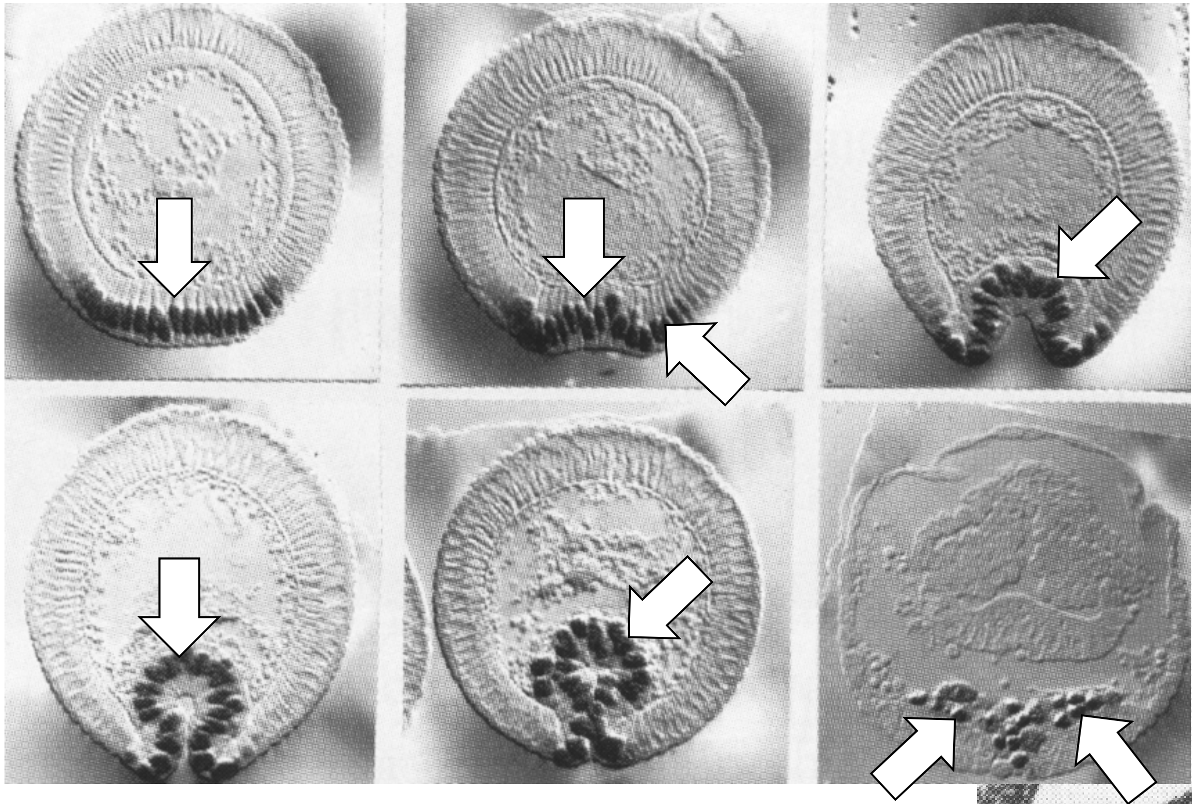
EVROPSKÁ UNIE
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ, MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY
OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost
INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ
Tato prezentace je spolufinancována Evropským sociálním fondem a státním rozpočtem České republiky

Morphogenic maneuvers

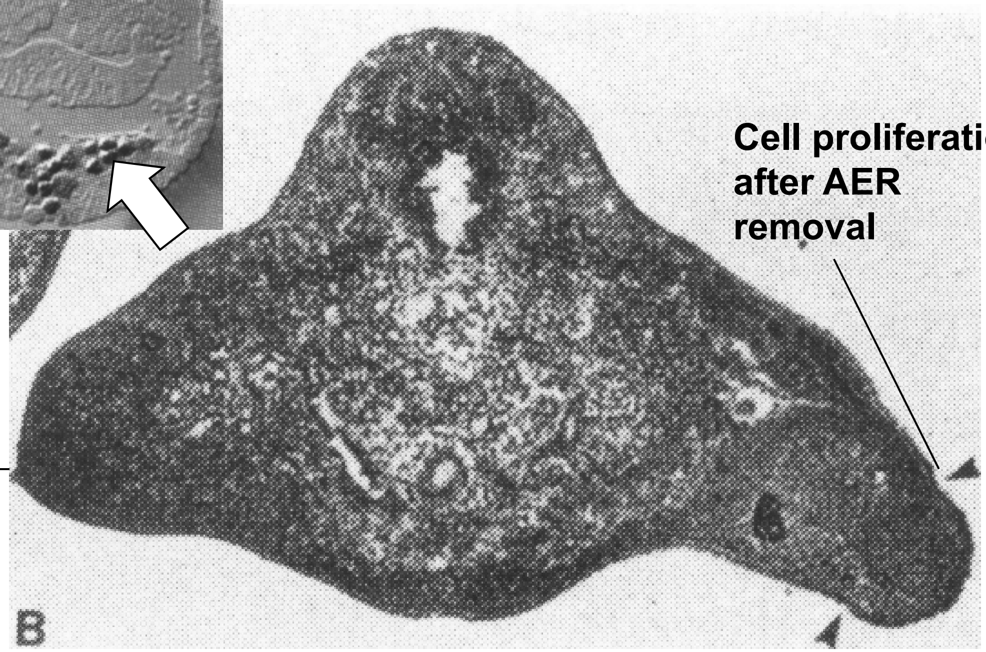


EVROPSKÁ UNIE
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ, MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY
OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost
INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ
Tato prezentace je spolufinancována Evropským sociálním fondem a státním rozpočtem České republiky

TWIST localization during neural furrow formation in *Drosophila*



Regulation of cell proliferation by AER in mouse



Cell proliferation after AER removal

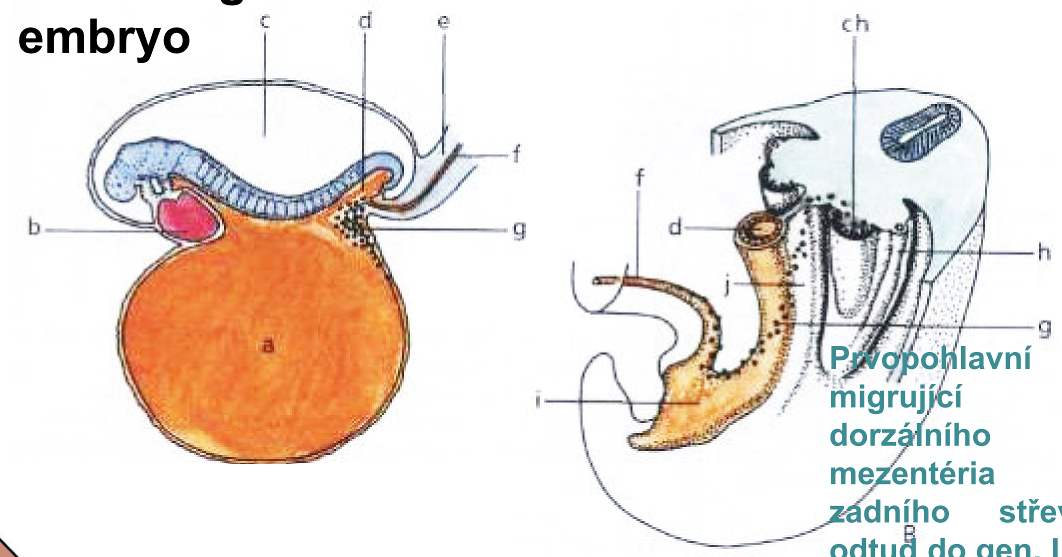
AER

Outline of Lesson 9

Morphogenesis

- Morphogenesis in animals
  - Changes in the cell adhesion, protrusion and motility
  - Extracellular matrix regulators of morphogenesis
  - Specificity of cell aggregations and its molecular determinants
  - Morphogenic manoeuvres
  - Changes in the cell motility and tissue interactions during organogenesis

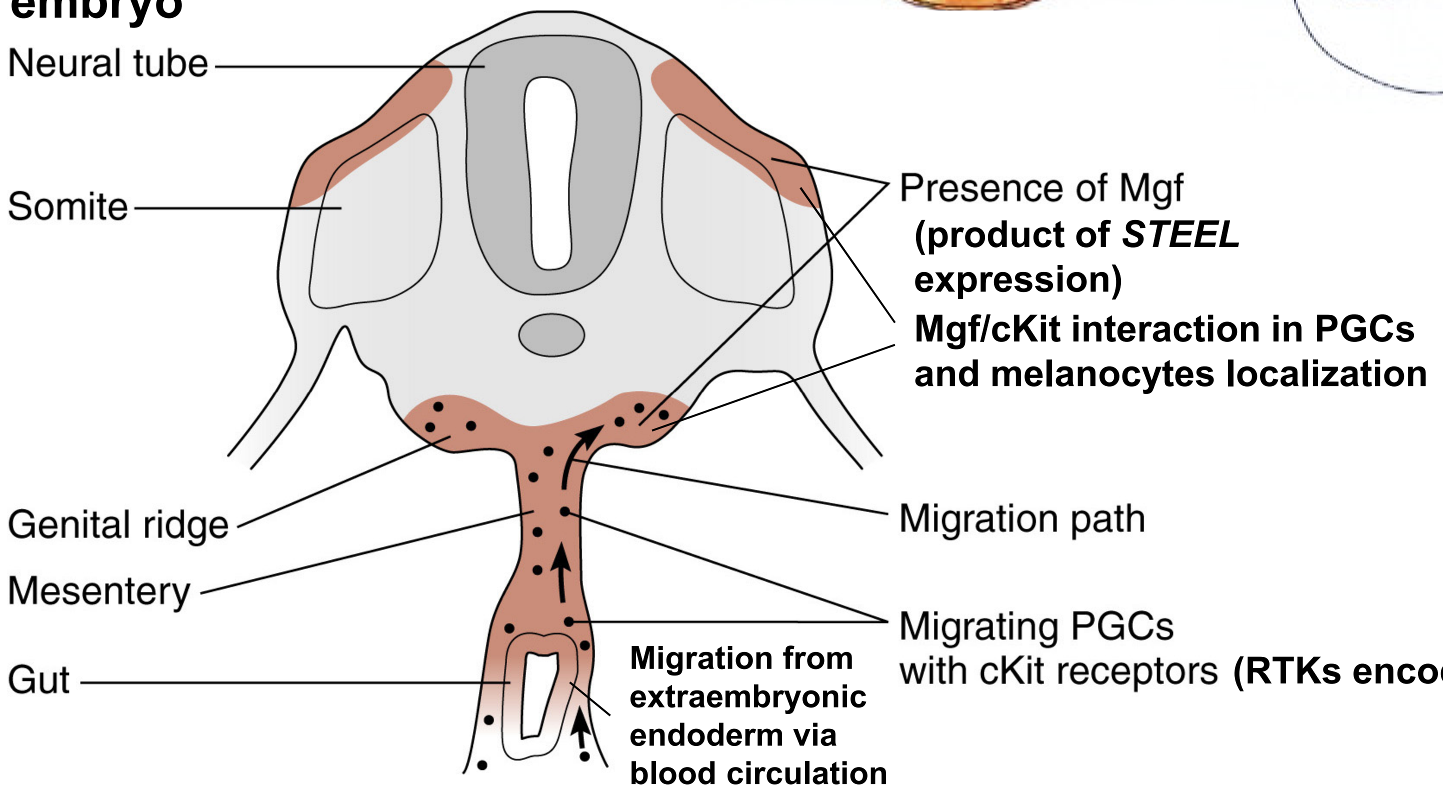
PGCs migration in human embryo



Prvopohlavní buňky migrující podél dorzálního mezentéria do zadního střeva a odtud do gen. Lišty

PGCs migrating along the dorzal mesentery into the hindgut and from there into the genital ridge.

PGCs migration in chicken embryo



Vacek, *Embryologie* (2006)

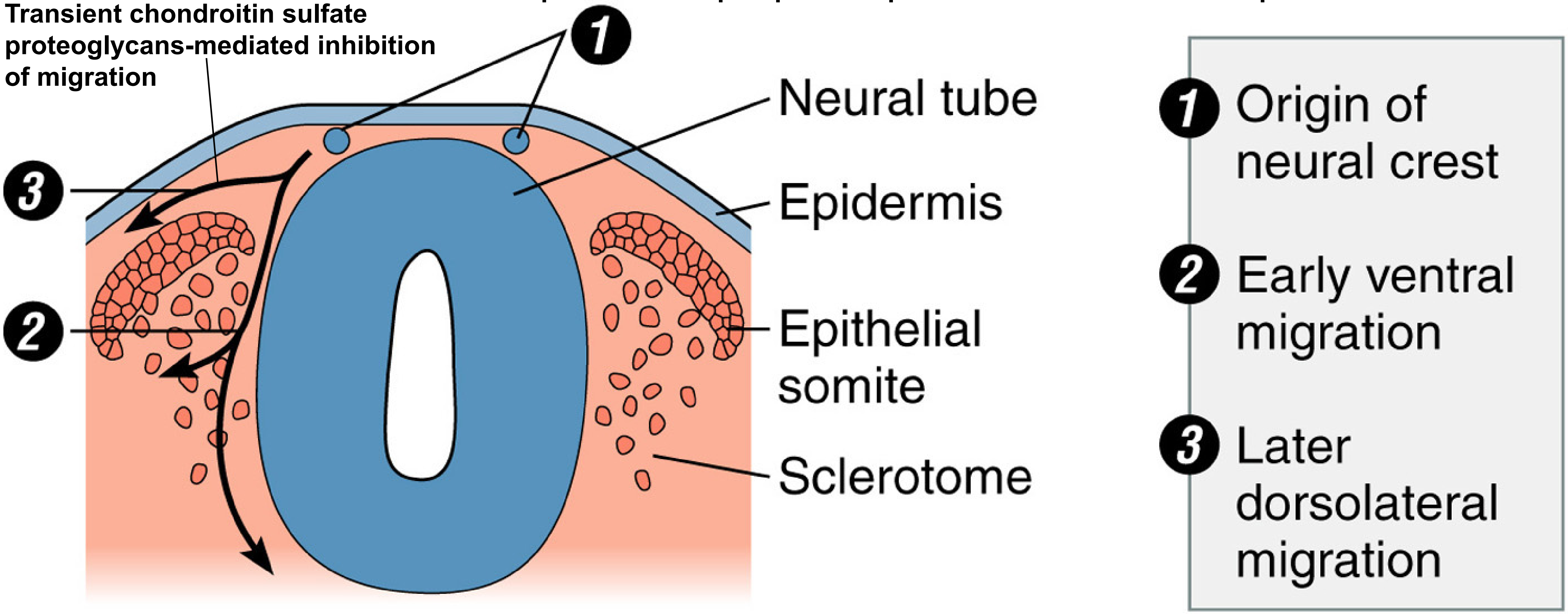
Neural crest cells migration

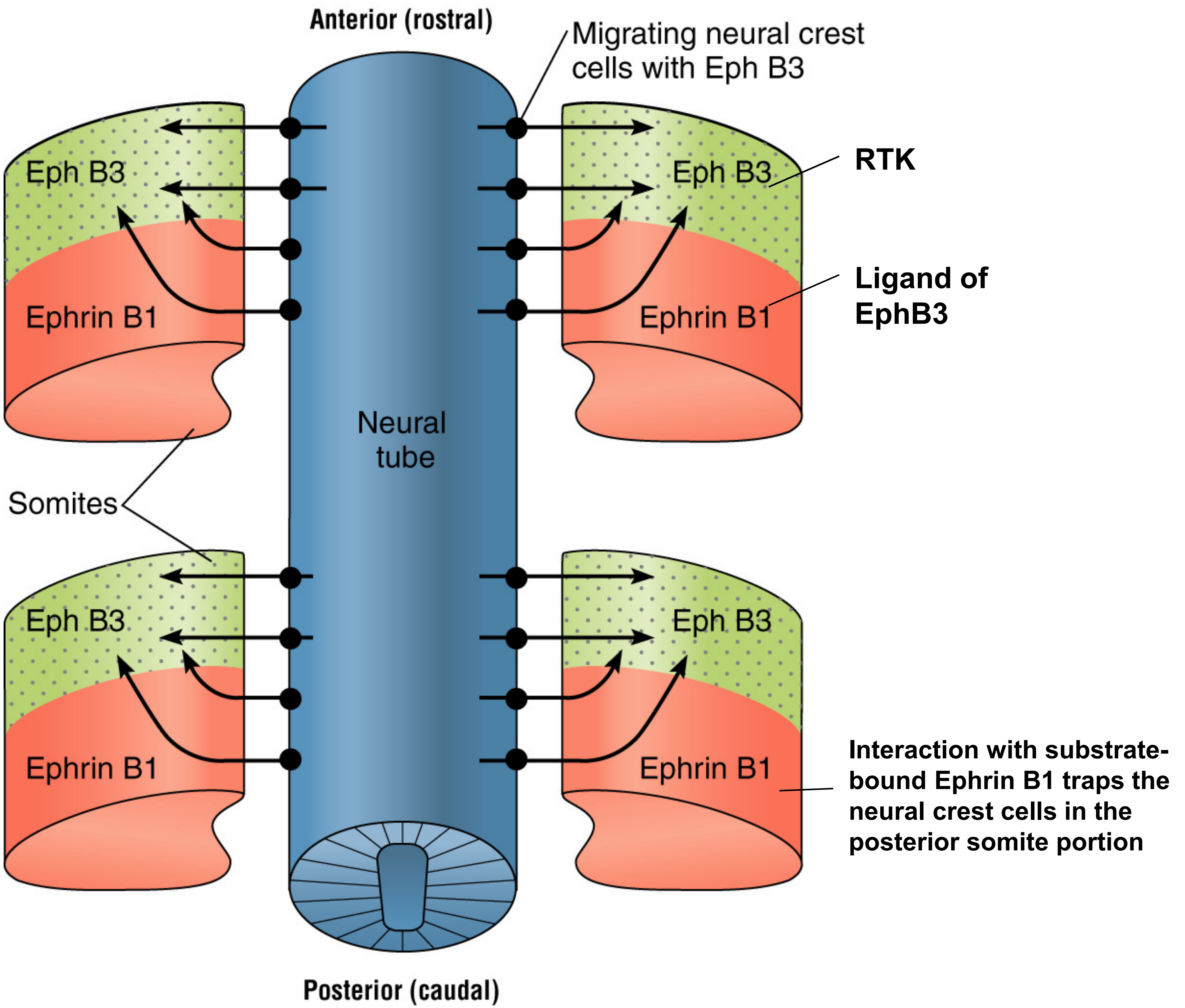
↓ adhesivity and ↑ migration

↑

Stimulation of neural crest formation via BMP4 production in prospective epidermis → Reduction of N- and E-cadherins and N-CAM production

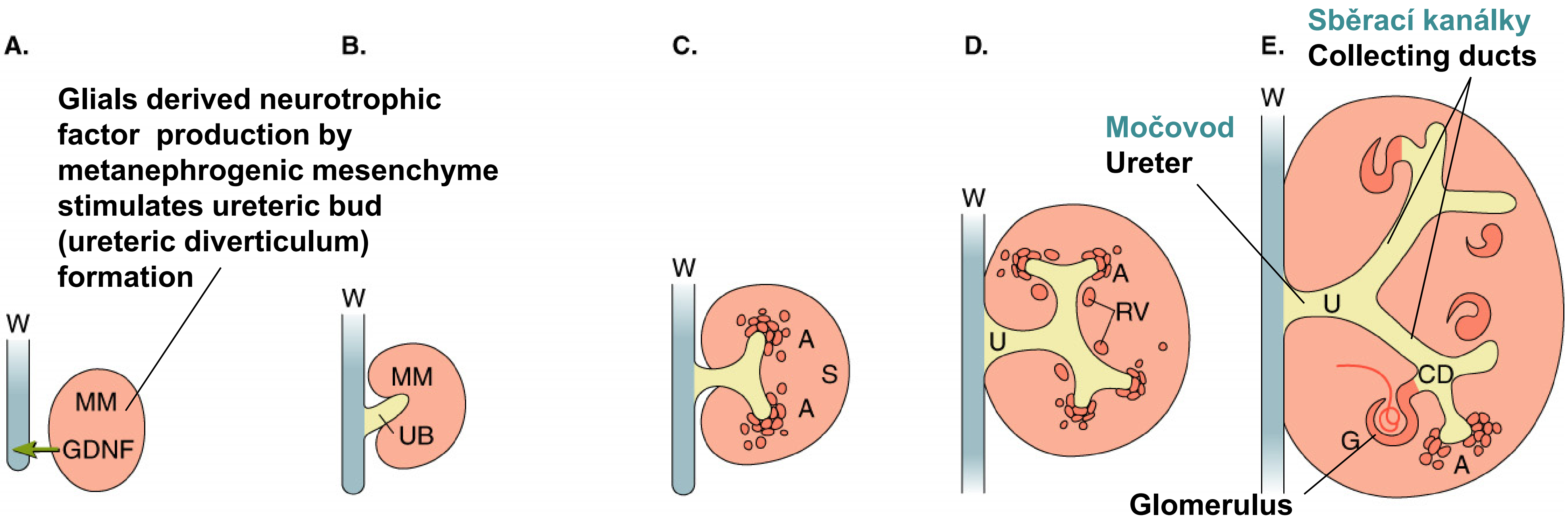
Transient chondroitin sulfate proteoglycans-mediated inhibition of migration





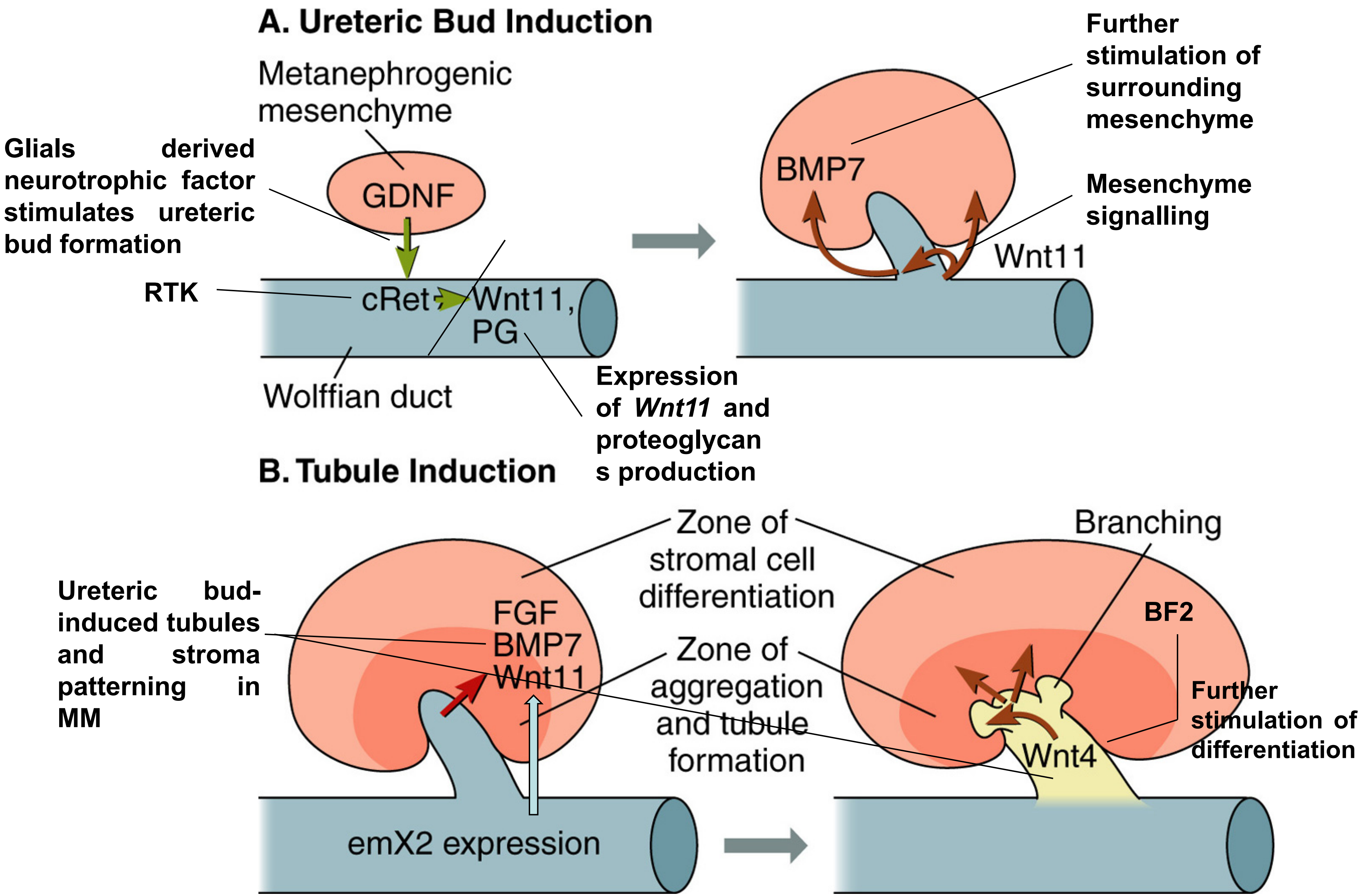
EVROPSKÁ UNIE
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ, MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY
OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost
INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ
Tato prezentace je spolufinancována Evropským sociálním fondem a státním rozpočtem České republiky

Kidney development



1. Wolffian duct elongation; GDNF secretion
2. Ureteric bud evagination; Mesenchymal cell response (proteoglycans, Wnt11)
3. Ureteric bud branching; mesenchymal cell aggregation; stromal cell formation
4. Renal vesicle formation; continued branching and aggregation
5. Epithelial differentiation and tubulogenesis; vascularization of glomeruli; continued branching and aggregation

EVROPSKÁ UNIE
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ, MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY
OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost
INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ
Tato prezentace je spolufinancována Evropským sociálním fondem a státním rozpočtem České republiky


A. Ureteric Bud Induction
Metanephrogenic mesenchyme
GDNF
Glials derived neurotrophic factor stimulates ureteric bud formation
RTK
cRet
Wnt11, PG
Wolffian duct
Expression of *Wnt11* and proteoglycans production
Further stimulation of surrounding mesenchyme
BMP7
Mesenchyme signalling
Wnt11
B. Tubule Induction
Zone of stromal cell differentiation
Branching
Ureteric bud-induced tubules and stroma patterning in MM
FGF
BMP7
Wnt11
Zone of aggregation and tubule formation
BF2
Further stimulation of differentiation
Wnt4
emX2 expression

Outline of Lesson 9

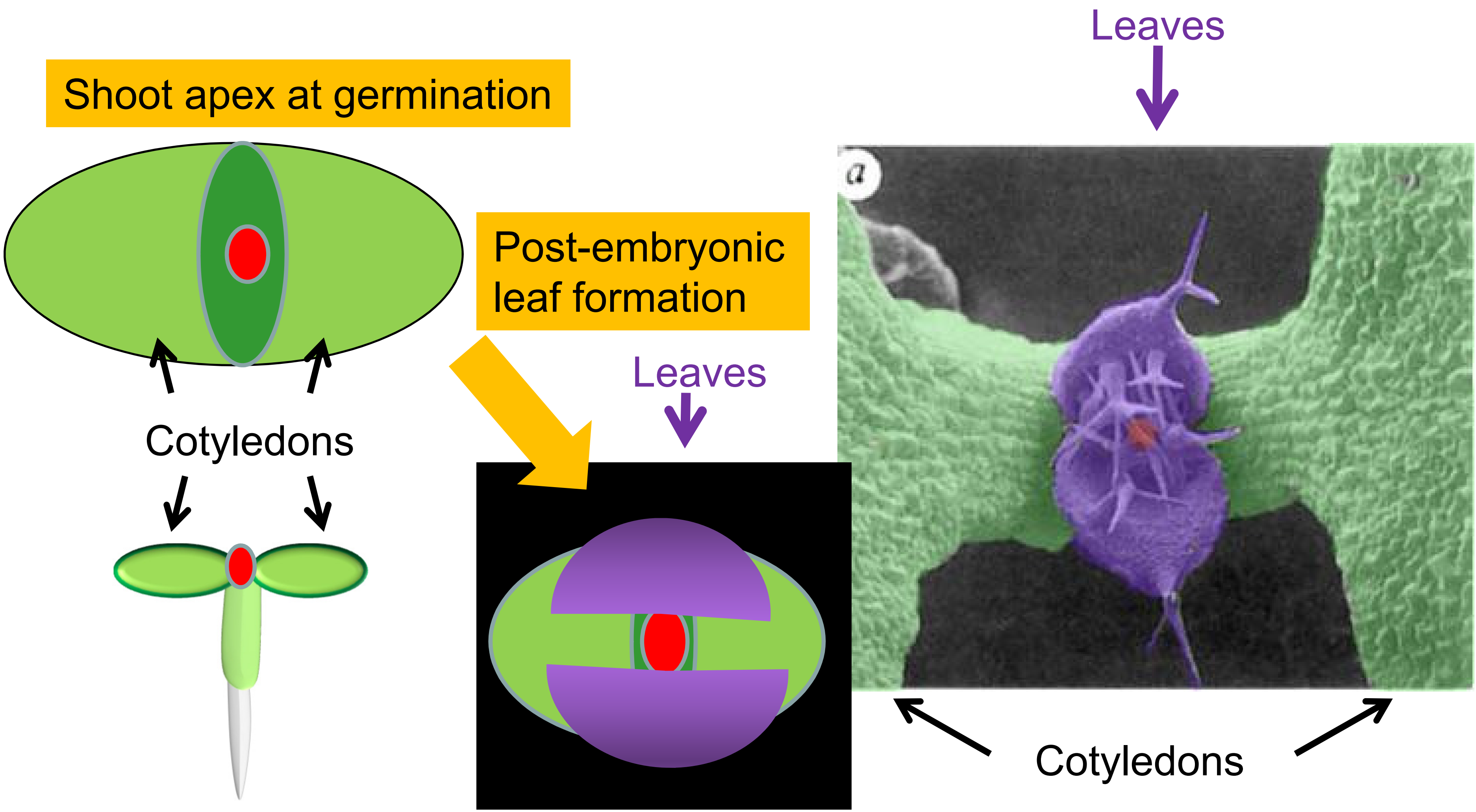
Morphogenesis

- Morphogenesis in animals
  - Changes in the cell adhesion, protrusion and motility
  - Extracellular matrix regulators of morphogenesis
  - Specificity of cell aggregations and its molecular determinants
  - Morphogenic manoeuvres
  - Changes in the cell motility and tissue interactions during organogenesis

- Morphogenesis in plants
  - Introducing leaf development as an example of morphogenesis in plants

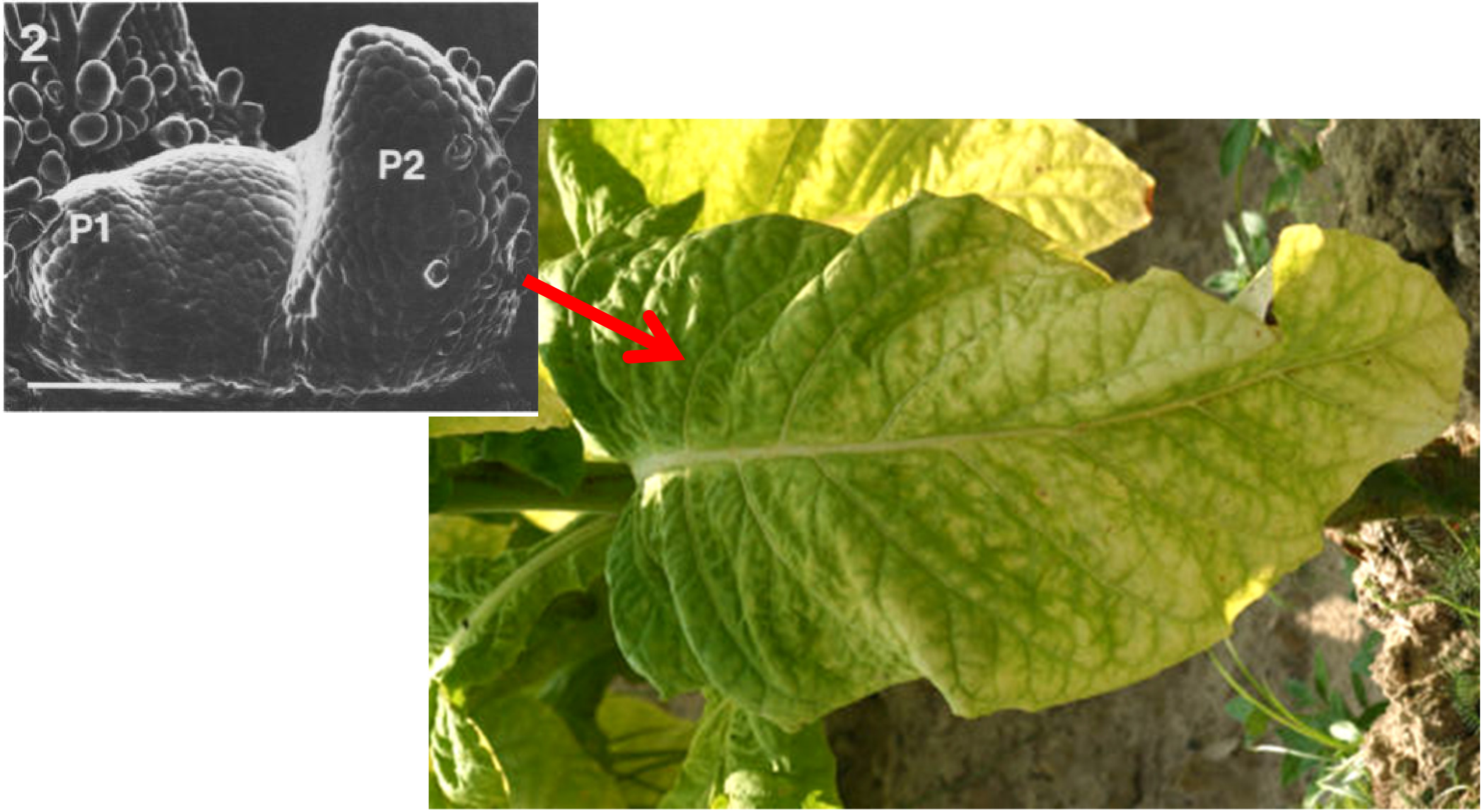
EVROPSKÁ UNIE
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ, MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY
OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost
INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ
Tato prezentace je spolufinancována Evropským sociálním fondem a státním rozpočtem České republiky

Origin of leaves

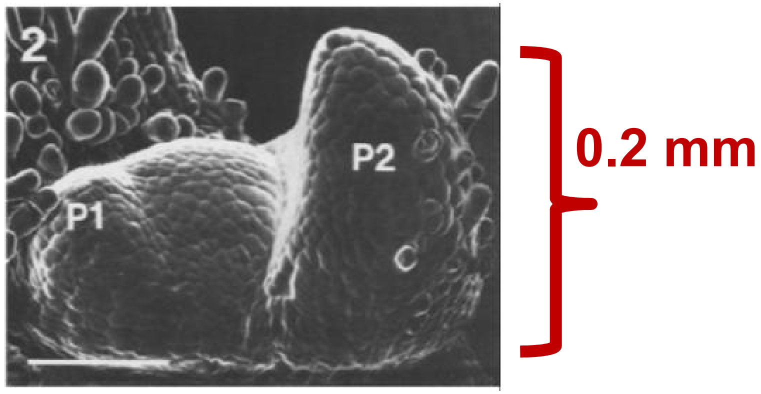


Reprinted by permission from Macmillan Publishers, Ltd: NATURE. Long, J.A., Moan, E.I., Medford, J.I., and Barton, M.K. (1996) A member of the KNOTTED class of homeodomain proteins encoded by the *STM* gene of *Arabidopsis*. Nature 379: 66-69.

How does a leaf primordium become a leaf?



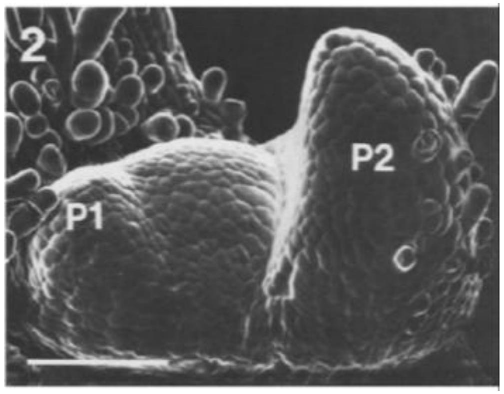
How does a leaf primordium become a leaf?



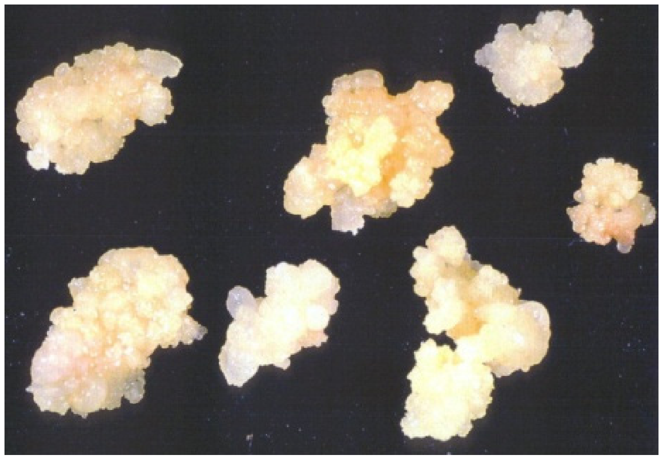
GROWTH

The leaf primordium increases in length ~ 2500 fold by cell division and cell expansion.

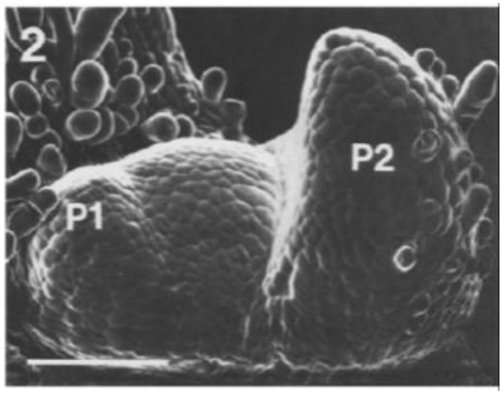
How does a leaf primordium become a leaf?



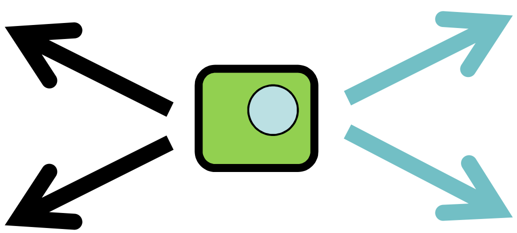
But unregulated growth doesn't make a leaf, it makes an undifferentiated tissue called callus



How does a leaf primordium become a leaf?



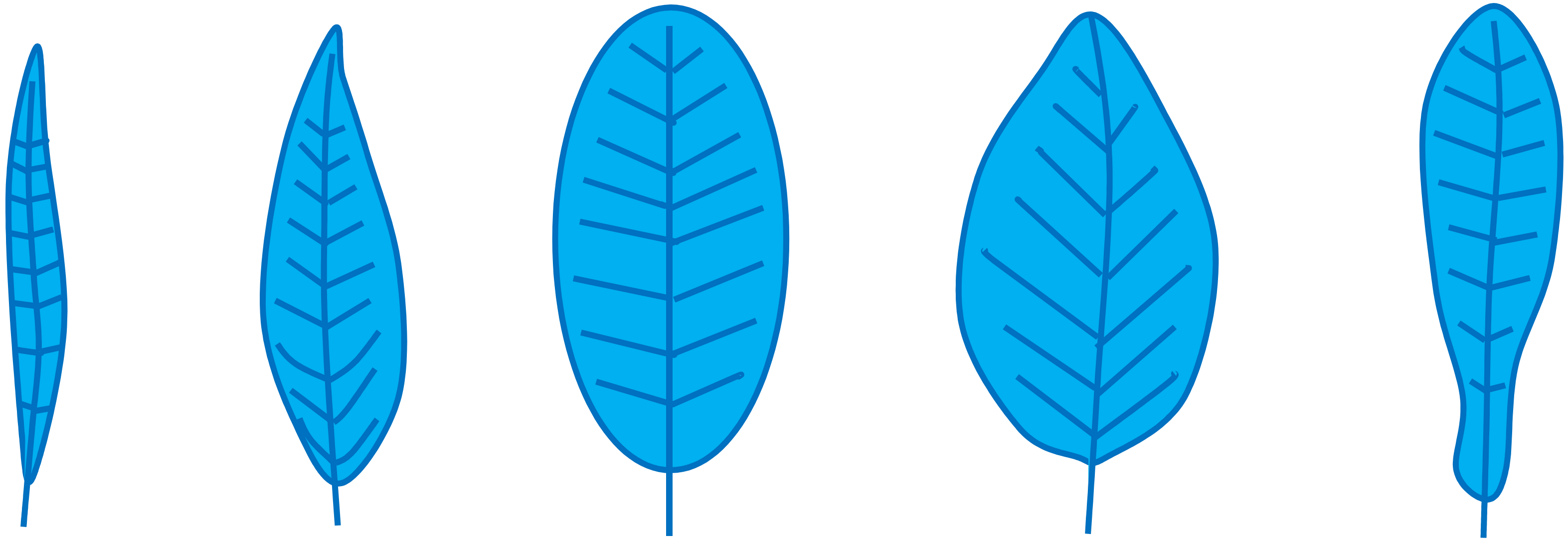
To make a leaf, each cell in the primordium must divide, grow and differentiate in a controlled way.



EVROPSKÁ UNIE
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ, MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY
OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost
INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ
Tato prezentace je spolufinancována Evropským sociálním fondem a státním rozpočtem České republiky

- Leaf diversity
- What determines leaf size and shape?
- What determines if a leaf is simple or compound?
- What controls cell differentiation?

Leaf forms



Podlouhlý
Linear

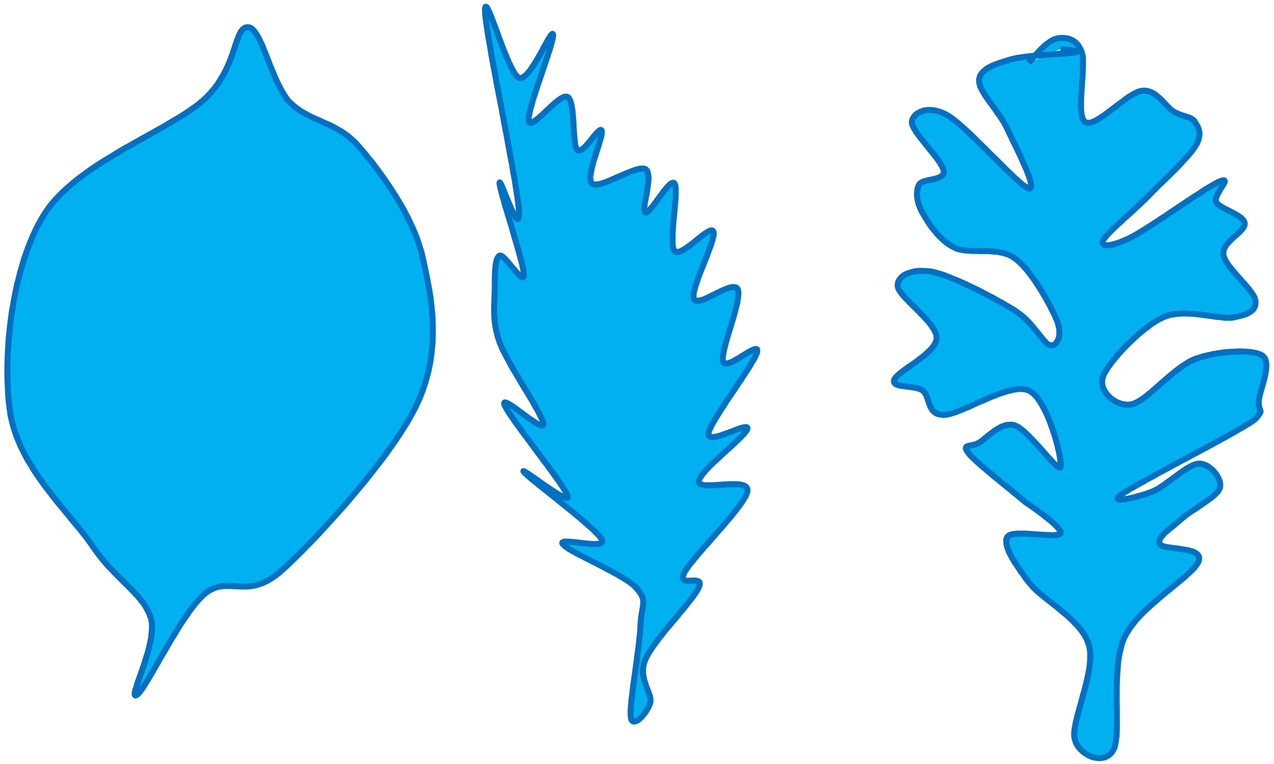
Kopinatý
Lanceolate

Eliptický
Elliptical

Vejčitý
Ovate

Kopistovitý
Spatulate

Leaf forms



Hladký
Smooth

Laločnatý
Serrated

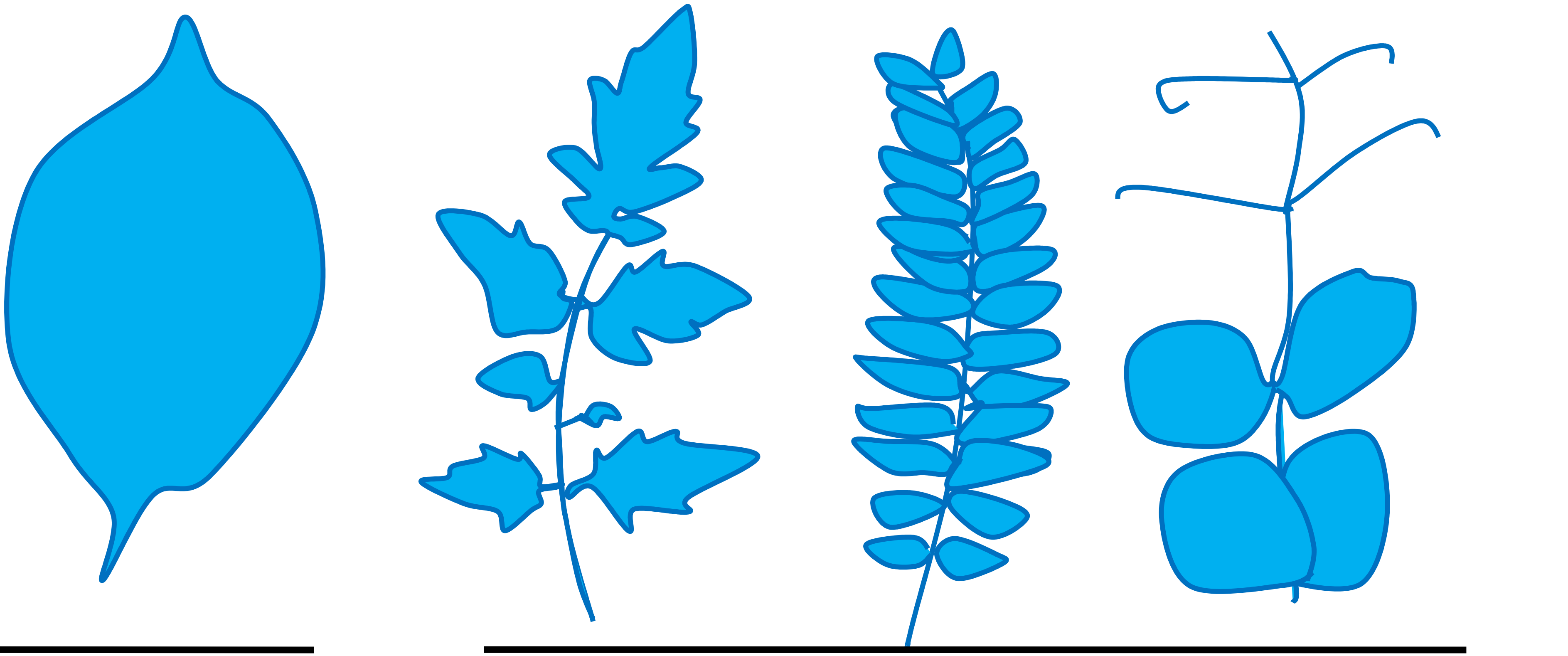
Dílný/Sečný
Lobed

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

EVROPSKÁ UNIE
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ, MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY
OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost

Tato prezentace je spolufinancována
Evropským sociálním fondem
a státním rozpočtem České republiky

Leaf forms



Jednoduchý
Simple

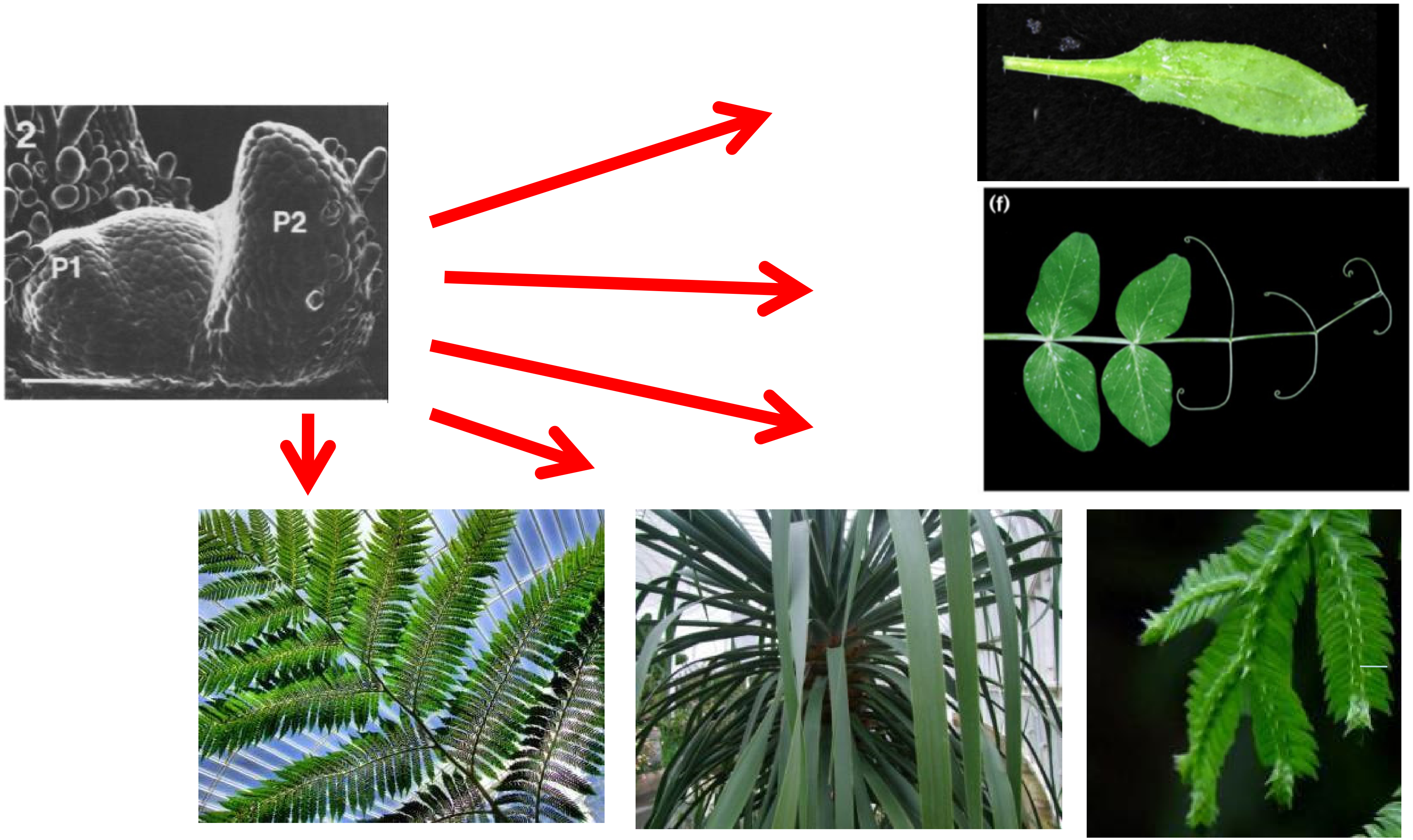
Složený
Compound

Outline of Lesson 9

Morphogenesis

- Morphogenesis in animals
  - Changes in the cell adhesion, protrusion and motility
  - Extracellular matrix regulators of morphogenesis
  - Specificity of cell aggregations and its molecular determinants
  - Morphogenic manoeuvres
  - Changes in the cell motility and tissue interactions during organogenesis
- Morphogenesis in plants
  - Introducing leaf development as an example of morphogenesis in plants
  - The role of oriented cell division and its relative distribution

What determines the size and shape of a leaf?



Size is determined by growth. Shape is determined by differential growth

Uniform growth →

Differential growth →

Image credit: From Lewis Carroll's *Alice in Wonderland* (1865), illustrated by John Tenniel, from The Victorian Web.

What determines the size and shape of a leaf?

- Total number of cell division cycles
- Relative distribution of cell divisions
- Relative timing of cell cycle arrest
- Presence or absence of leaflets

Reprinted by permission from Macmillan Publishers, Ltd: NATURE 425: 257-263. Palatnik, J.F., Allen, E., Wu, X., Schommer, C., Schwab, R., Carrington, J.C., and Weigel, D. Control of leaf morphogenesis by microRNAs. Copyright (2003).

Increasing the number of cell divisions increases leaf size

ant-1 WT ANT-OX

→ Increasing number of cell cycles in developing leaf

ANT

↓

CYCD3

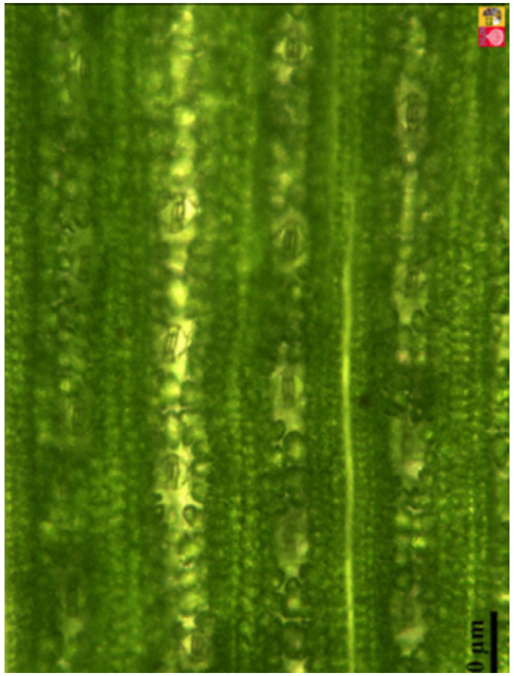
↓

Cell division

Mizukami, Y., and Fischer, R.L. Plant organ size control: *AINTEGUMENTA* regulates growth and cell numbers during organogenesis. PNAS 97:942-947. Copyright (2000) National Academy of Sciences, U.S.A.

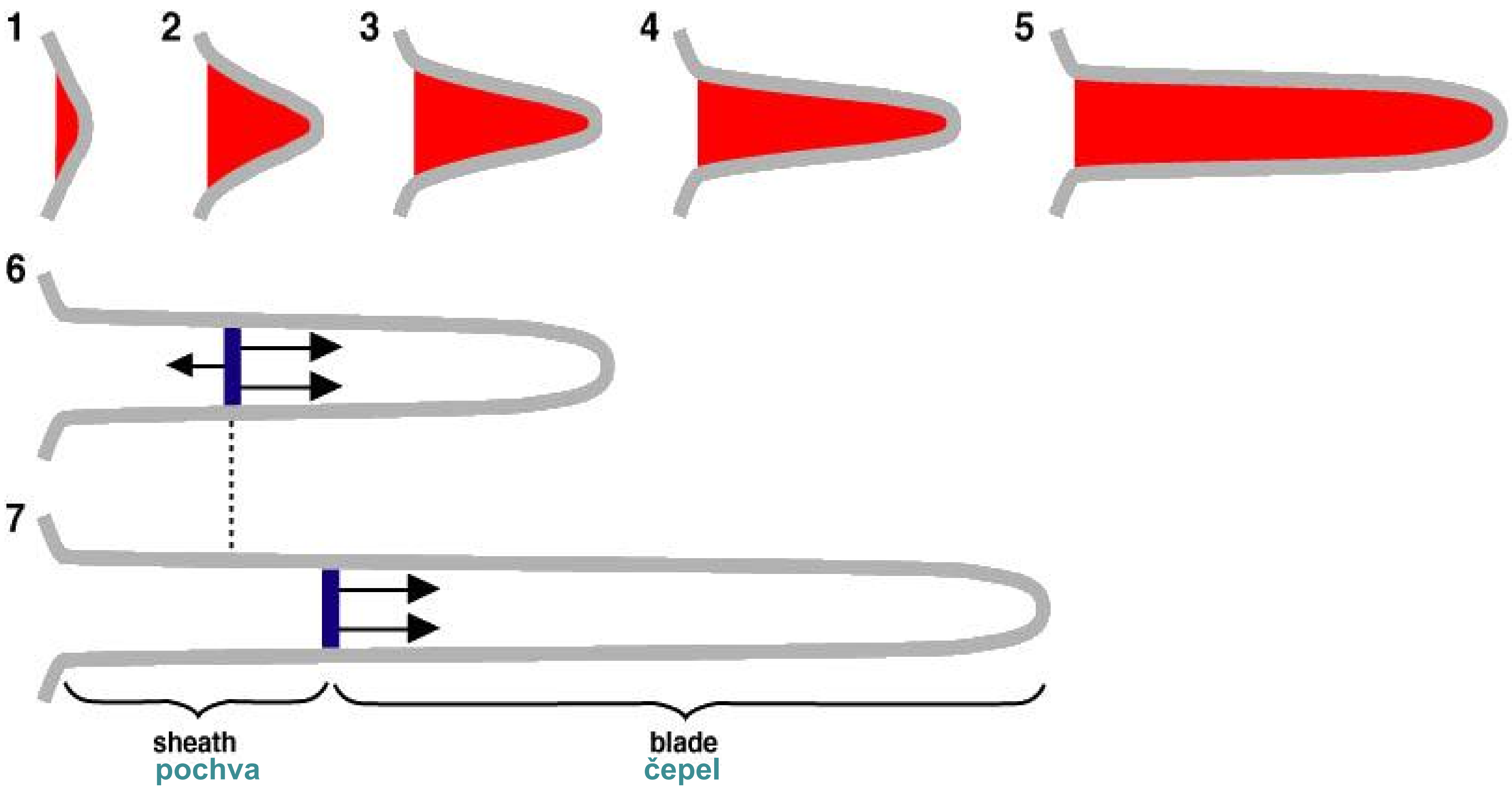
EVROPSKÁ UNIE esf MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ, MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost UNIVERSITAS MASARYKIANA BRUNENSIS
INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ
Tato prezentace je spolufinancována Evropským sociálním fondem a státním rozpočtem České republiky

Patterns of cell divisions (and expansion) determine leaf shape



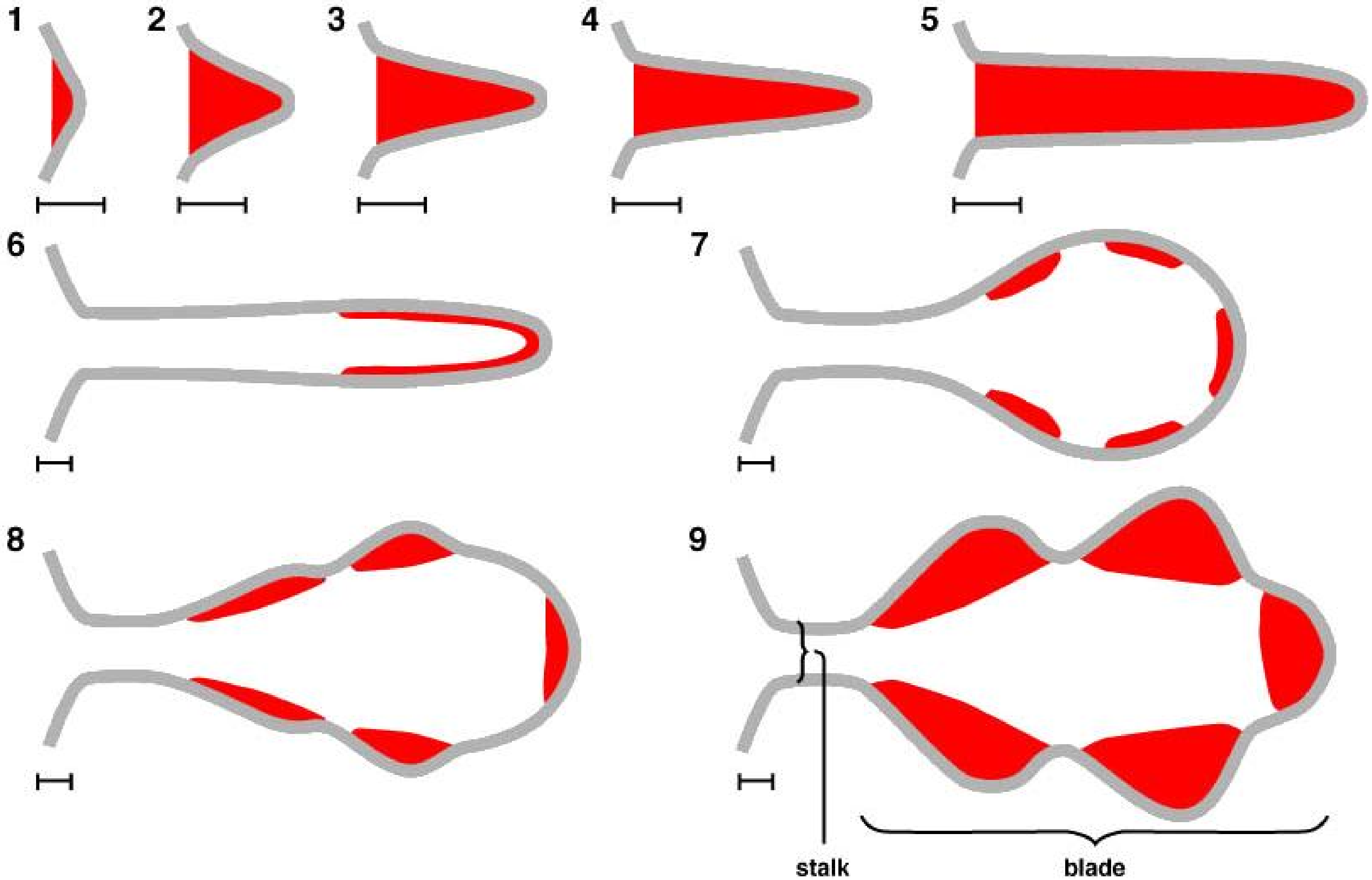
Monocot leaves are elongated and strap-like, with parallel sides and veins

Monocot leaves grow linearly



[Image](#) courtesy of J. Derksen, J. Hiddink and E.S. Pierson Copyright Radboud University Nijmegen

Leaf growth in dicots

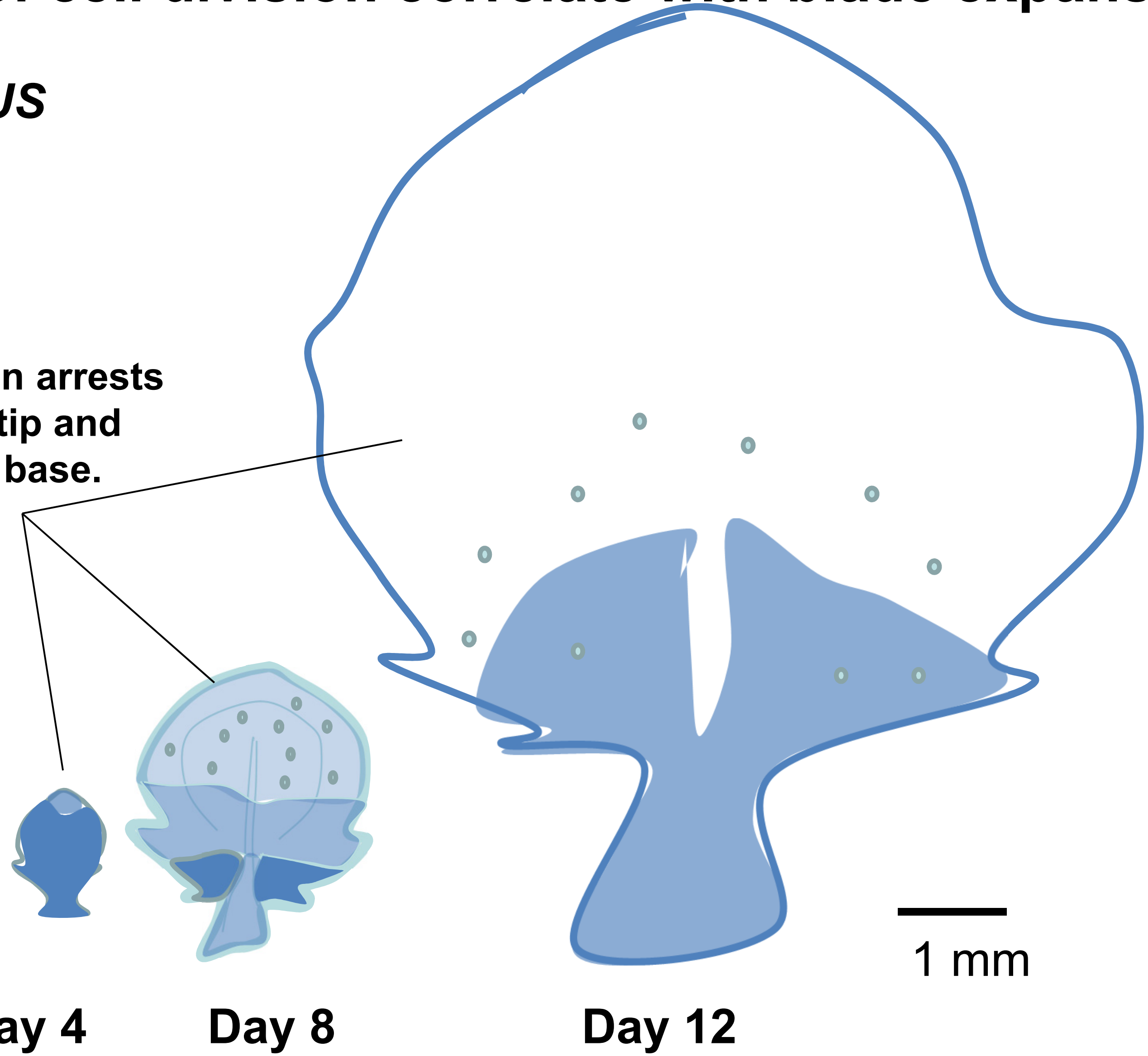


[Image](#) courtesy of J. Derksen, J. Hiddink and E.S. Pierson Copyright Radboud University Nijmegen

Patterns of cell division correlate with blade expansion

ProCYC:GUS

Cell division arrests first at the tip and later at the base.



Redrawn from Donnelly et al., (1999) Dev Biol 215: 407-419.

Outline of Lesson 9

Morphogenesis

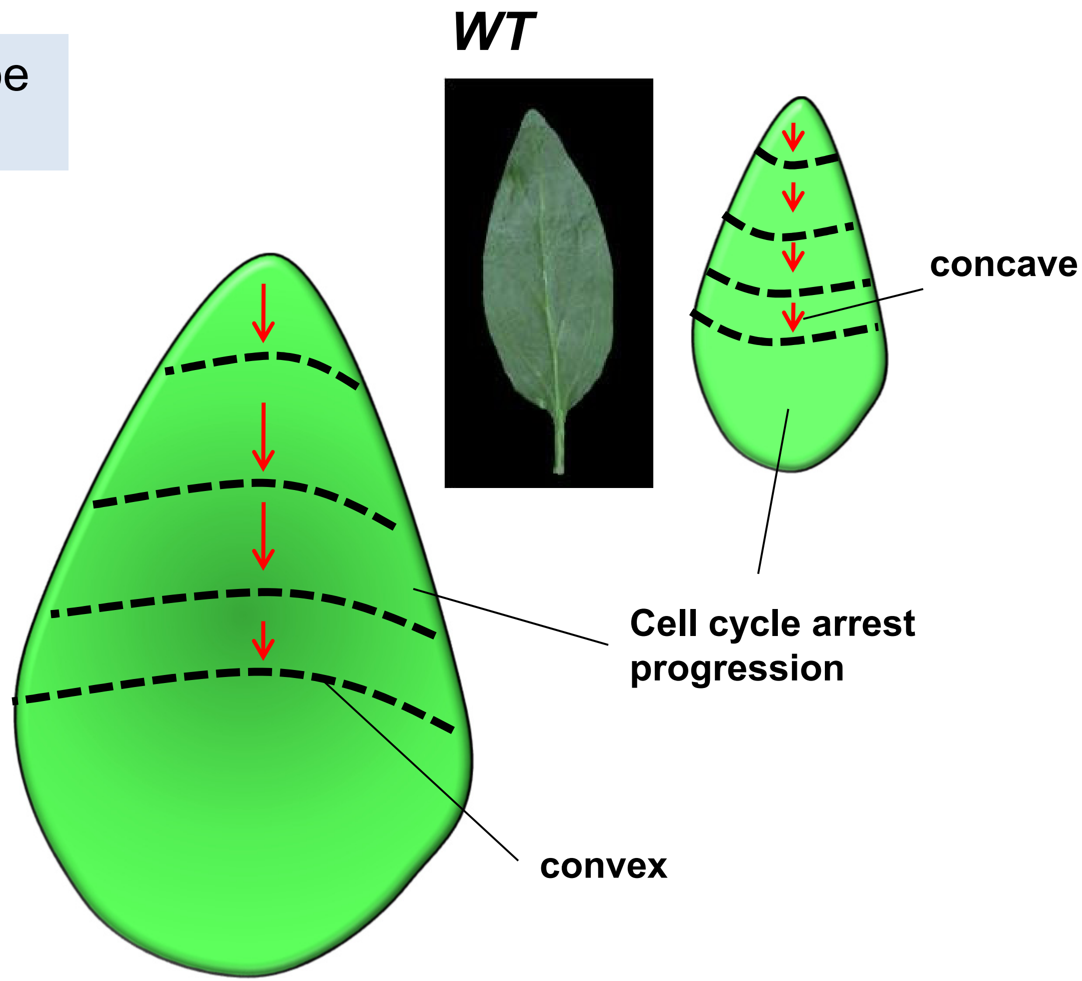
- Morphogenesis in animals
  - Changes in the cell adhesion, protrusion and motility
  - Extracellular matrix regulators of morphogenesis
  - Specificity of cell aggregations and its molecular determinants
  - Morphogenic manoeuvres
  - Changes in the cell motility and tissue interactions during organogenesis
- Morphogenesis in plants
  - Introducing leaf development as an example of morphogenesis in plants
  - The role of oriented cell division and its relative distribution
    - Regulation of cell division by TCP and boundary genes

EVROPSKÁ UNIE
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ, MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY
OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost
UNIVERSITAS MASARYKIANA BRUNENSIS
INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ
Tato prezentace je spolufinancována Evropským sociálním fondem a státním rozpočtem České republiky

Altering the pattern of cell divisions alters leaf shape

CINCINNATA (*CIN*) encodes a TCP-type transcription factor

cincinnata (cin)



Crawford, B.C.W., Nath, U., Carpenter, R., and Coen, E.S. (2004) *CINCINNATA* controls both cell differentiation and growth in petal lobes and leaves of *Antirrhinum*. Plant Physiol. 135: 244253.

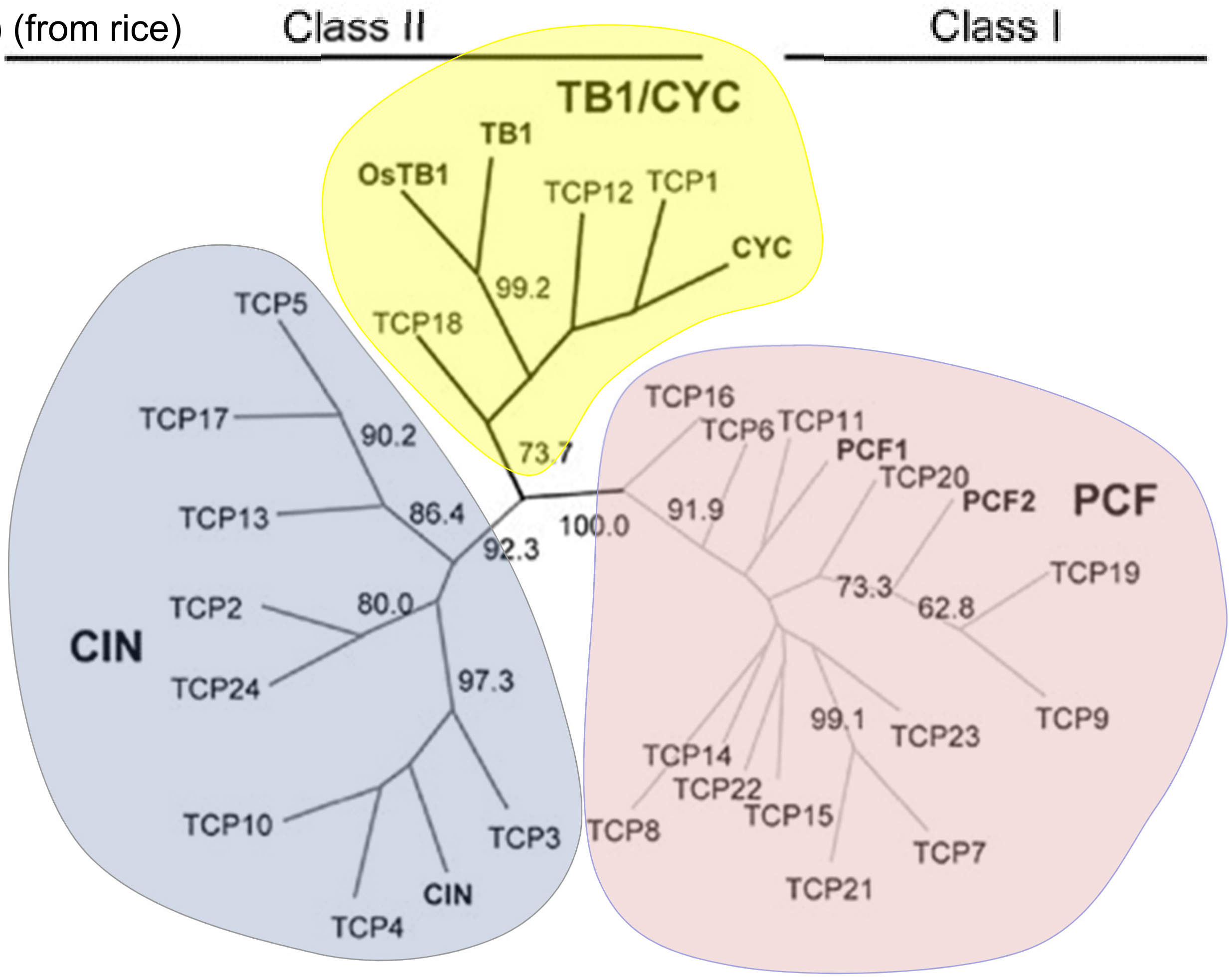
TCP genes

- ***T**EOSINTE BRANCHED1* (*TB1*) (from maize),
- ***C**YCLOIDEA* (*CYC*) (from *Antirrhinum*), and
- ***P**ROLIFERATING CELL FACTOR* (*PCF*) (from rice)

Basic-helix-loop-helix TFs

↓

Cell division

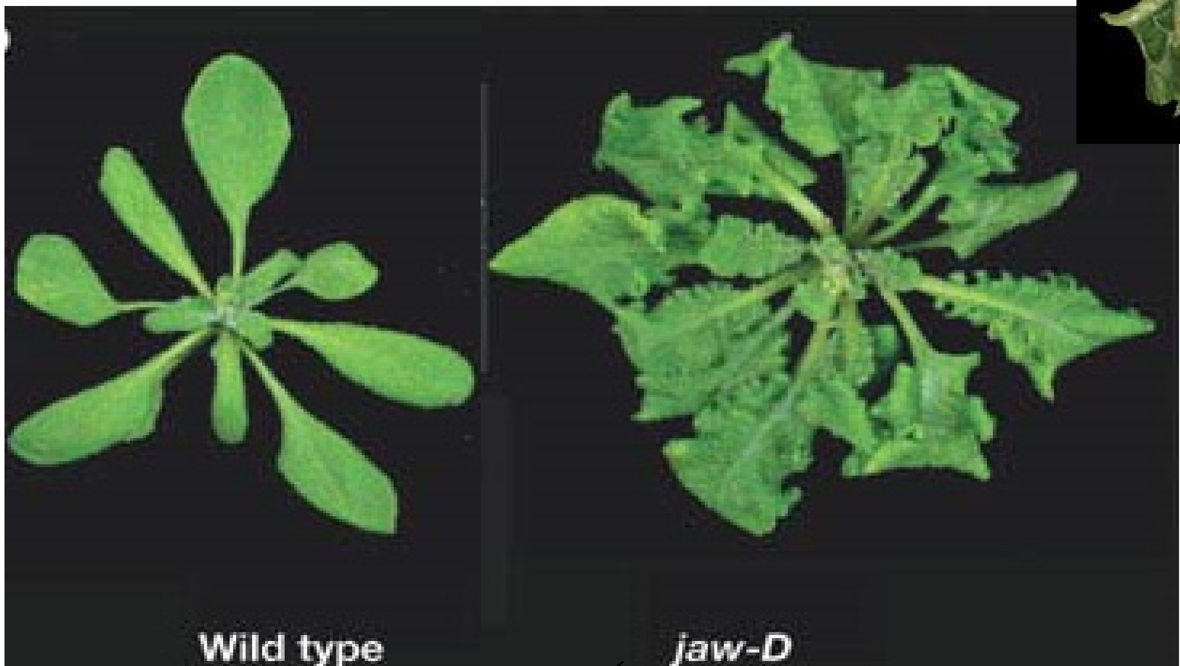


Aguilar-Martínez, J.A., Poza-Carrión, C., and Cubas, P. (2007) *Arabidopsis BRANCHED1* acts as an integrator of branching signals within axillary buds. Plant Cell 19:458-472.

Over-accumulation of a miRNA (miR-JAW, in the *jaw-D* mutant) causes a similar phenotype

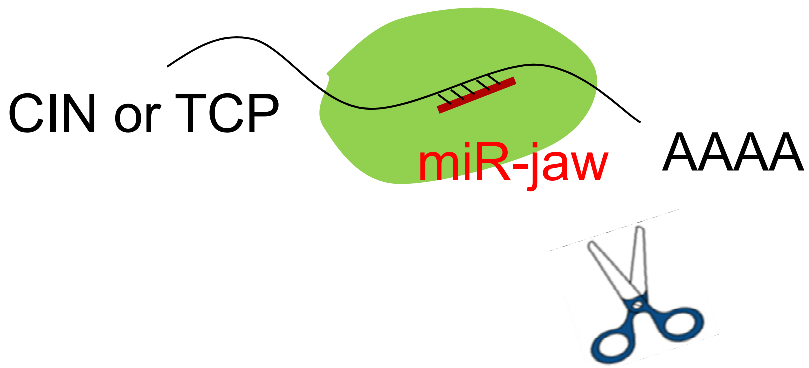
cin

WT ***Pro35S:miR-JAW***

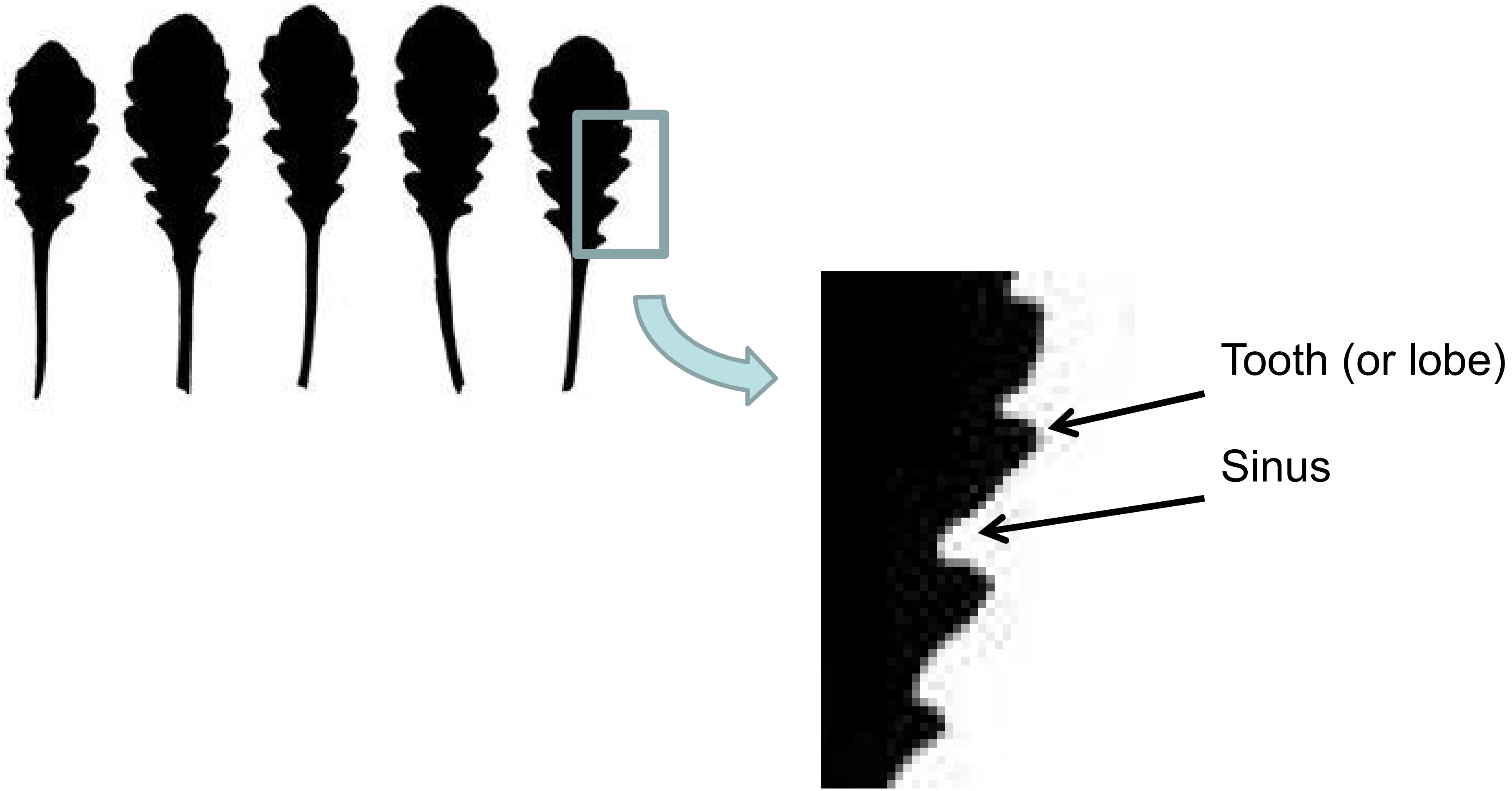


Phenocopy of *cincinnata*

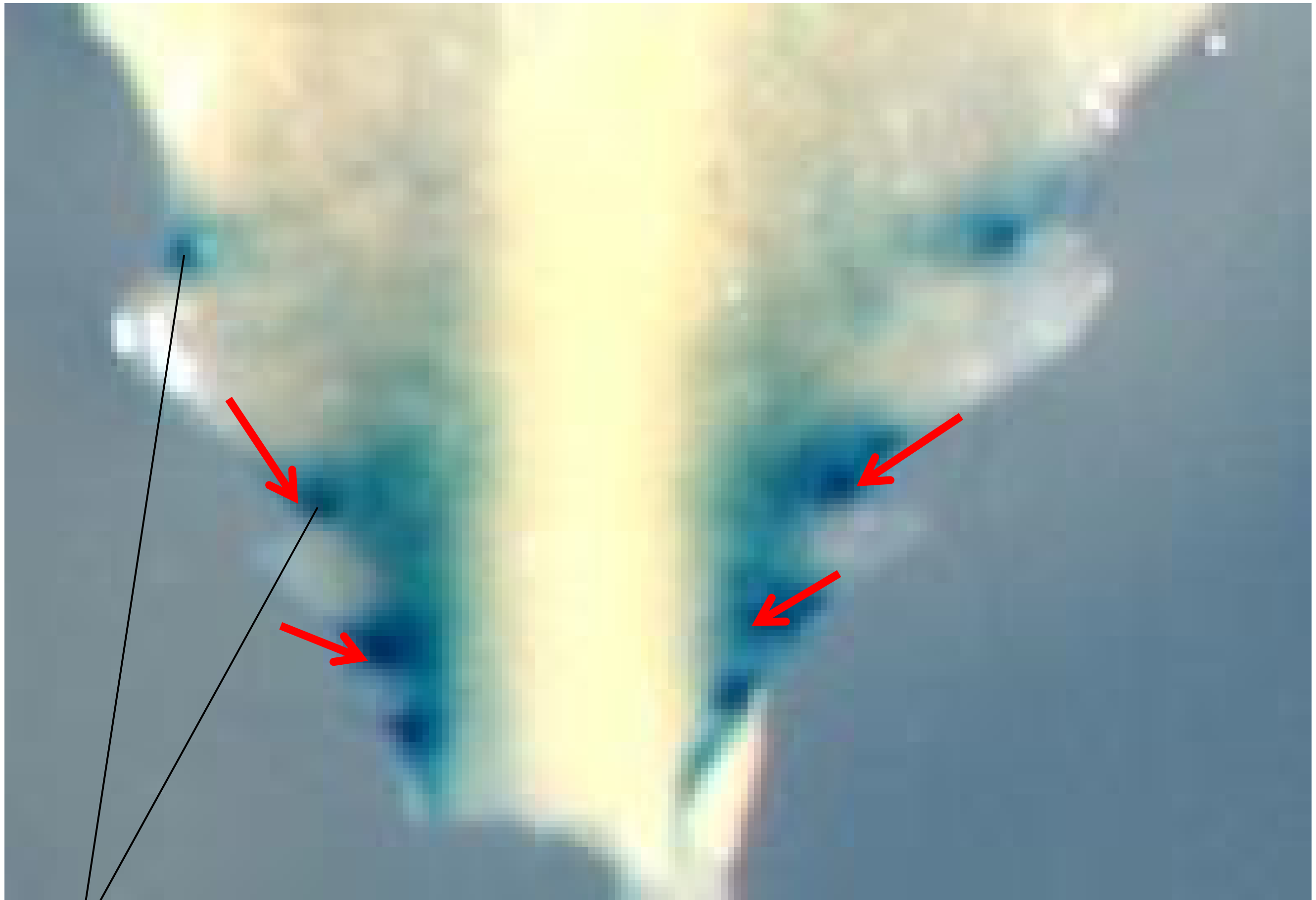
miR-jaw targets RNA from *TCP* genes (like *CIN*) for degradation



Control of cell divisions underlies growth of leaf margins



Control of cell divisions underlies growth of leaf margins



CUC2 **contributes to the formation of serrations**

ProCUC2 **:GUS**

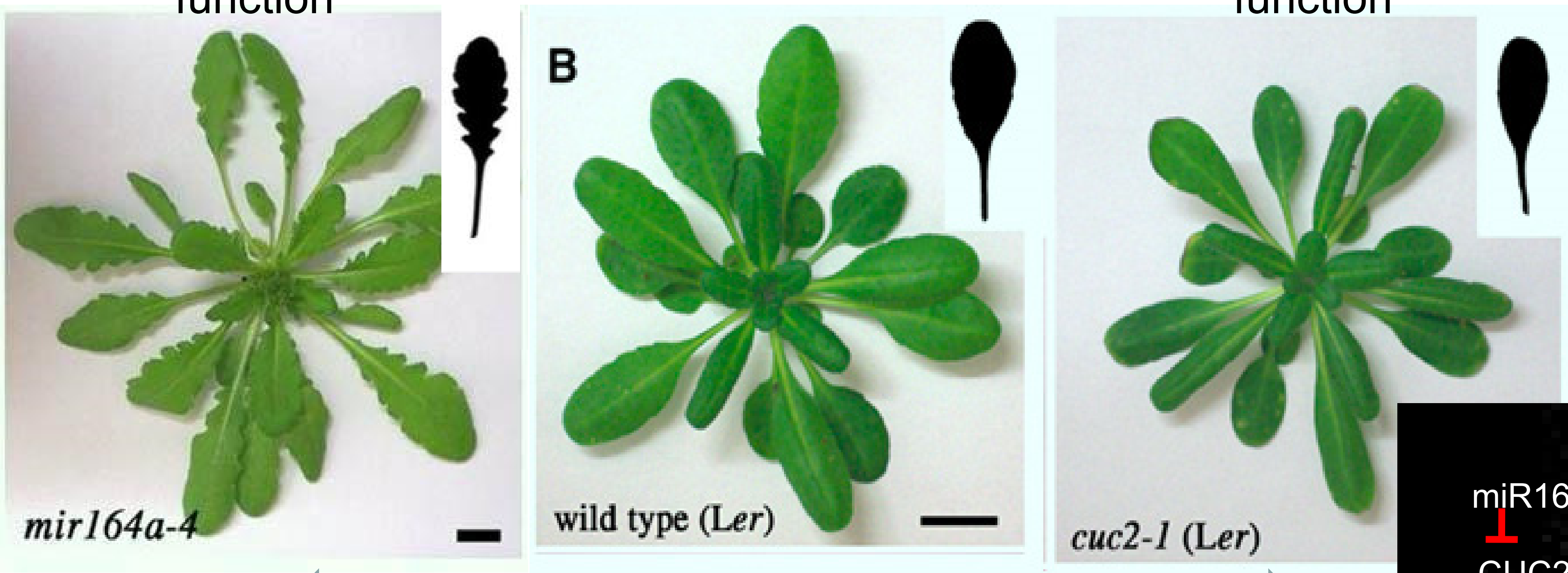
Nikovics, K., Blein, T., Peaucelle, A., Isida, T., Morin, H., Aida, M., and Laufs, P. (2006) The balance between the *MIR164A* and *CUC2* genes controls leaf margin serration in Arabidopsis. Plant Cell 18: 2929-2945.

EVROPSKÁ UNIE
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ, MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY
OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost
INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ
Tato prezentace je spolufinancována Evropským sociálním fondem a státním rozpočtem České republiky

CUC2 expression is controlled by *miR164*

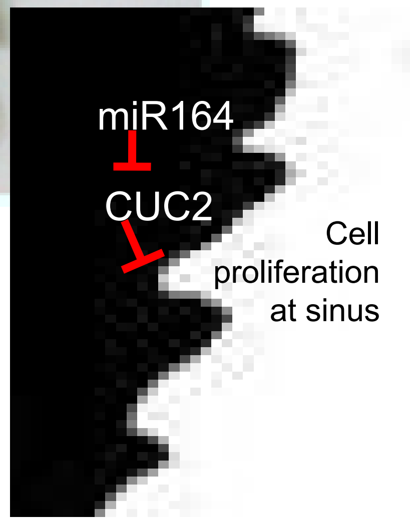
Loss of miR164 function

Loss of *CUC2* function



More serrated

Less serrated



Nikovics, K., Blein, T., Peaucelle, A., Isida, T., Morin, H., Aida, M., and Laufs, P. (2006) The balance between the *MIR164A* and *CUC2* genes controls leaf margin serration in Arabidopsis. Plant Cell 18: 2929-2945.

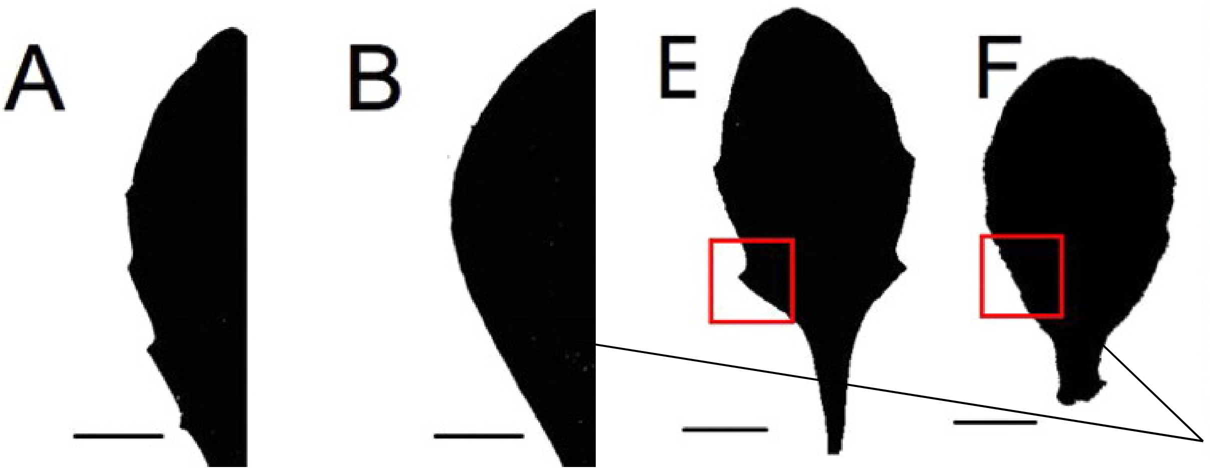
Outline of Lesson 9

Morphogenesis

- Morphogenesis in animals
  - Changes in the cell adhesion, protrusion and motility
  - Extracellular matrix regulators of morphogenesis
  - Specificity of cell aggregations and its molecular determinants
  - Morphogenic manoeuvres
  - Changes in the cell motility and tissue interactions during organogenesis

- Morphogenesis in plants
  - Introducing leaf development as an example of morphogenesis in plants
  - The role of oriented cell division and its relative distribution
    - Regulation of cell division by TCP and boundary genes
    - Auxin-regulated positional information for cell division

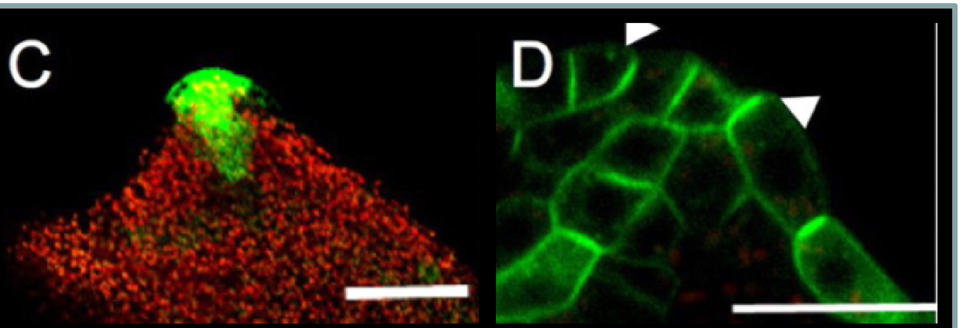
A local auxin maximum specifies the outgrowths of the leaf margin



Wild-type *pin1* Control NPA treated

Interfering with auxin transport results in smooth-margined leaves

PIN1 orientation produces an auxin maximum at the serration tip

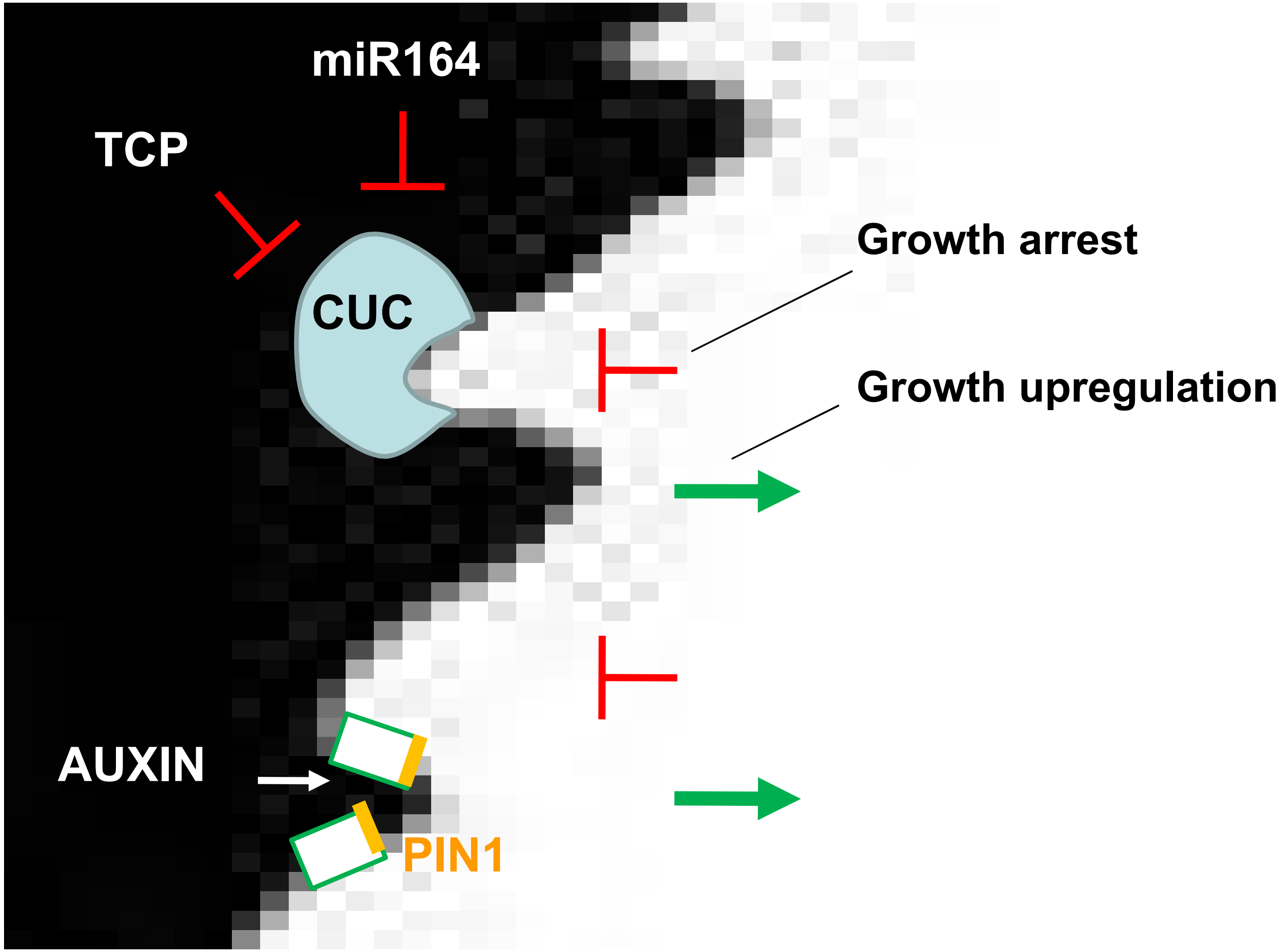


DR5pro:GFP PIN-GFP

Reproduced with permission Hay, A., Barkoulas, M., and Tsiantis, M. (2006) ASYMMETRIC LEAVES1 and auxin activities converge to repress *BREVIPEDICELLUS* expression and promote leaf development in *Arabidopsis*. Development 133, 3955-3961.

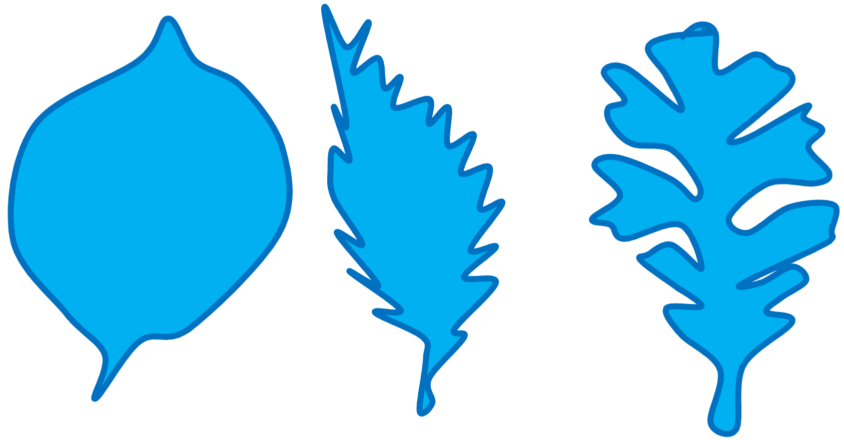
EVROPSKÁ UNIE
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ, MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY
OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost
UNIVERSITAS MASARYKIANA BRUNENSIS
INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ
Tato prezentace je spolufinancována Evropským sociálním fondem a státním rozpočtem České republiky

Summary - Control of leaf margin shape

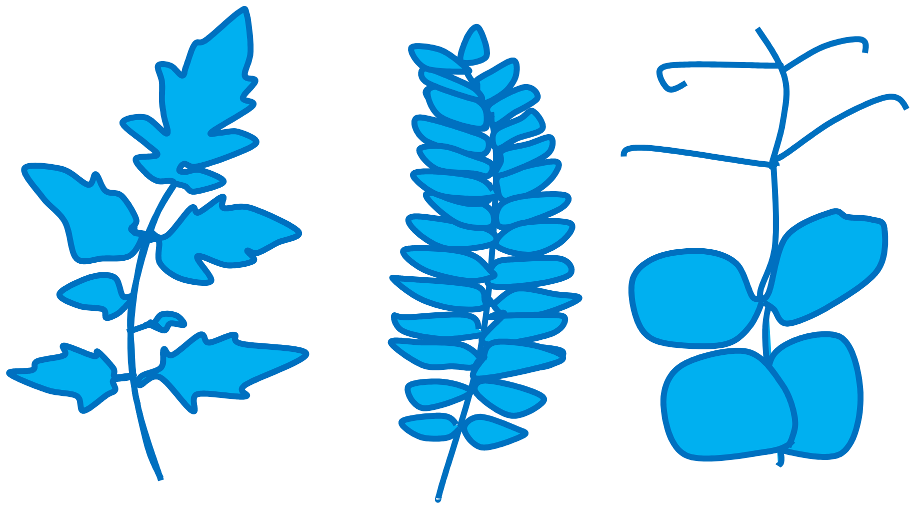


What determines if a leaf is simple or compound?

Simple



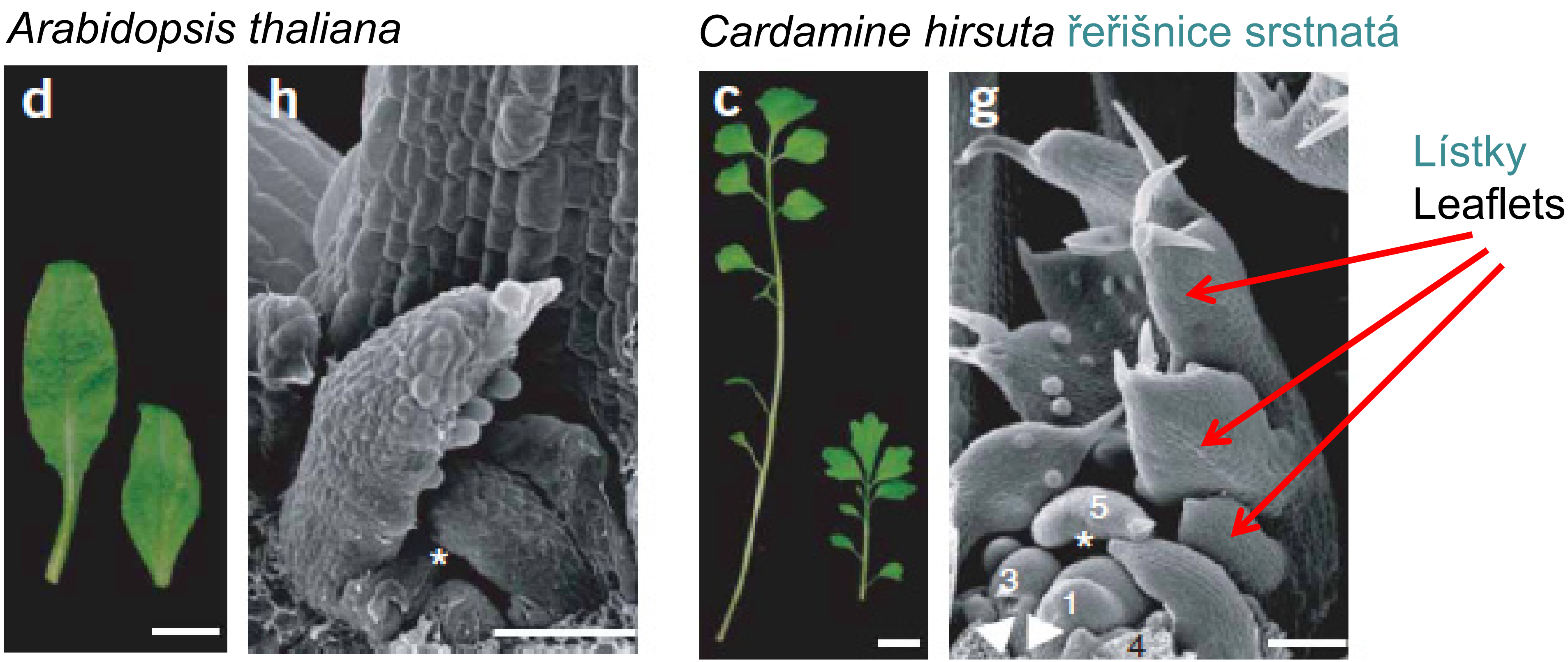
Compound



Redrawn from Champagne, C., and Sinha, N. (2004). Development 131:4401-4412

EVROPSKÁ UNIE
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ, MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY
OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost
UNIVERSITAS MASARYKIANA BRUNENSIS
INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ
Tato prezentace je spolufinancována
Evropským sociálním fondem
a státním rozpočtem České republiky

Cardamine hirsuta is closely related to *Arabidopsis thaliana* but has compound leaves

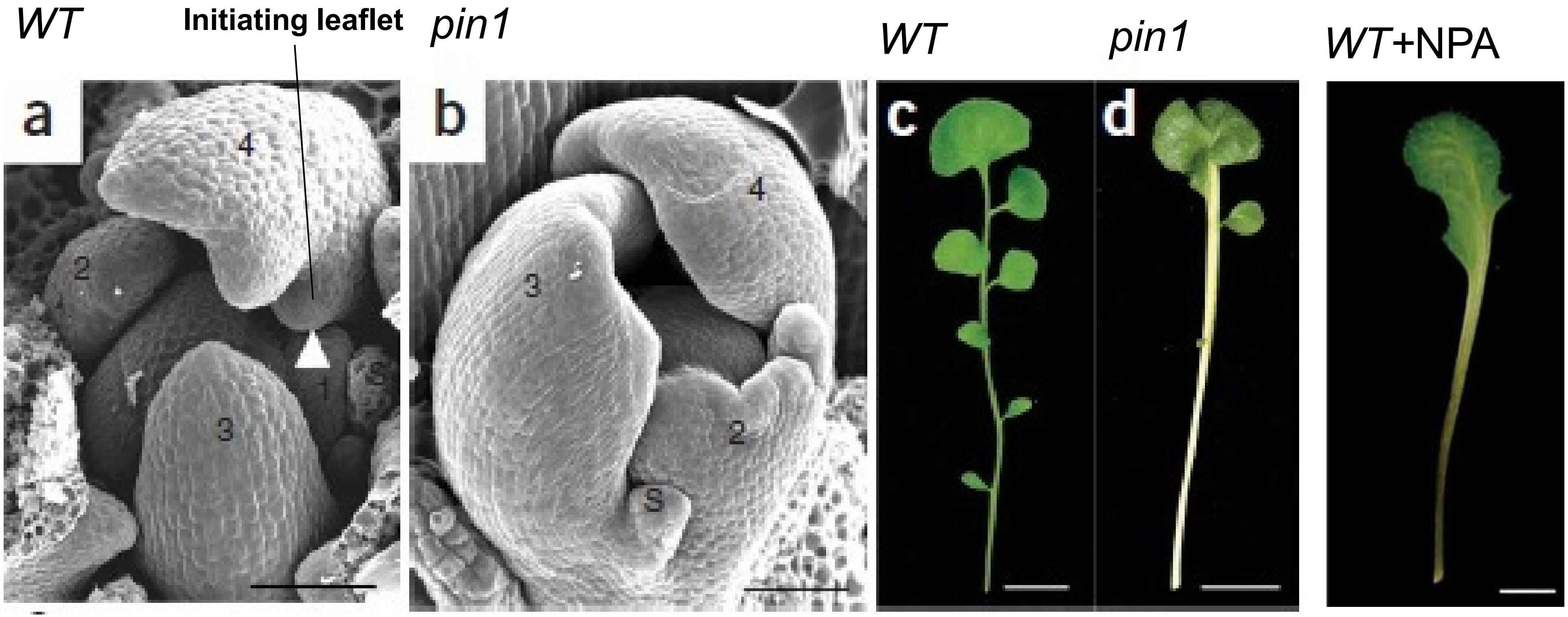


Reprinted by permission from Macmillan Publishers, Ltd: NATURE GENETICS 38: 942-947. Hay, A., and Tsiantis, M.The genetic basis for differences in leaf form between *Arabidopsis thaliana* and its wild relative *Cardamine hirsuta*. Copyright (2006).

EVROPSKÁ UNIE
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ, MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY
OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost
INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ
Tato prezentace je spolufinancována Evropským sociálním fondem a státním rozpočtem České republiky

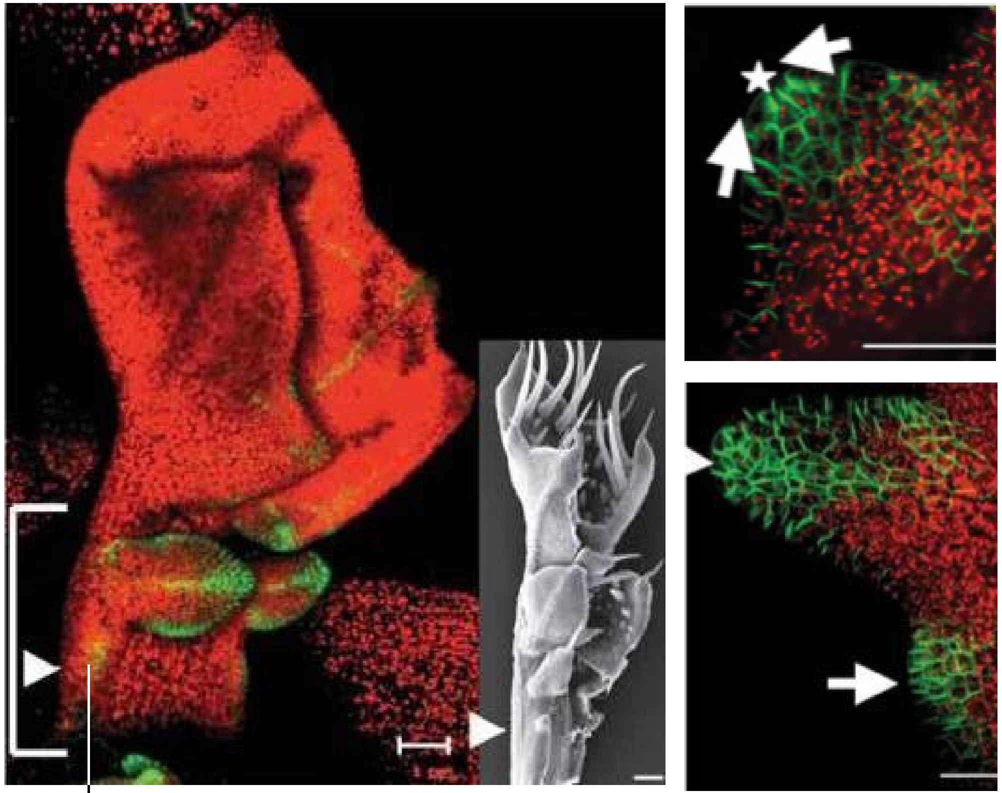
Polar auxin transport is necessary for compound leaf formation

Cardamine hirsuta



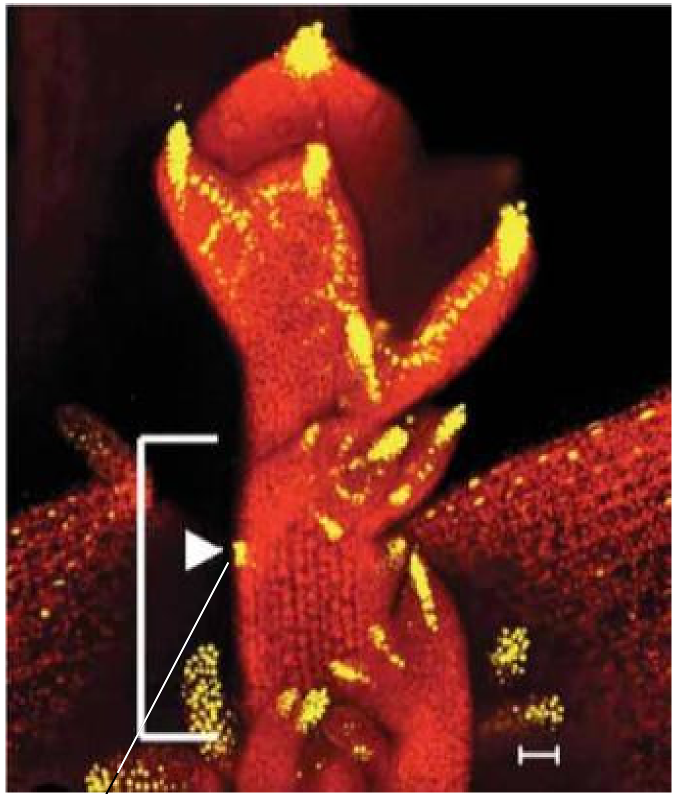
A PIN1-generated auxin maximum precedes leaflet formation

ProPIN1:PIN1-GFP



PIN1 expression in the prospective leaflet position

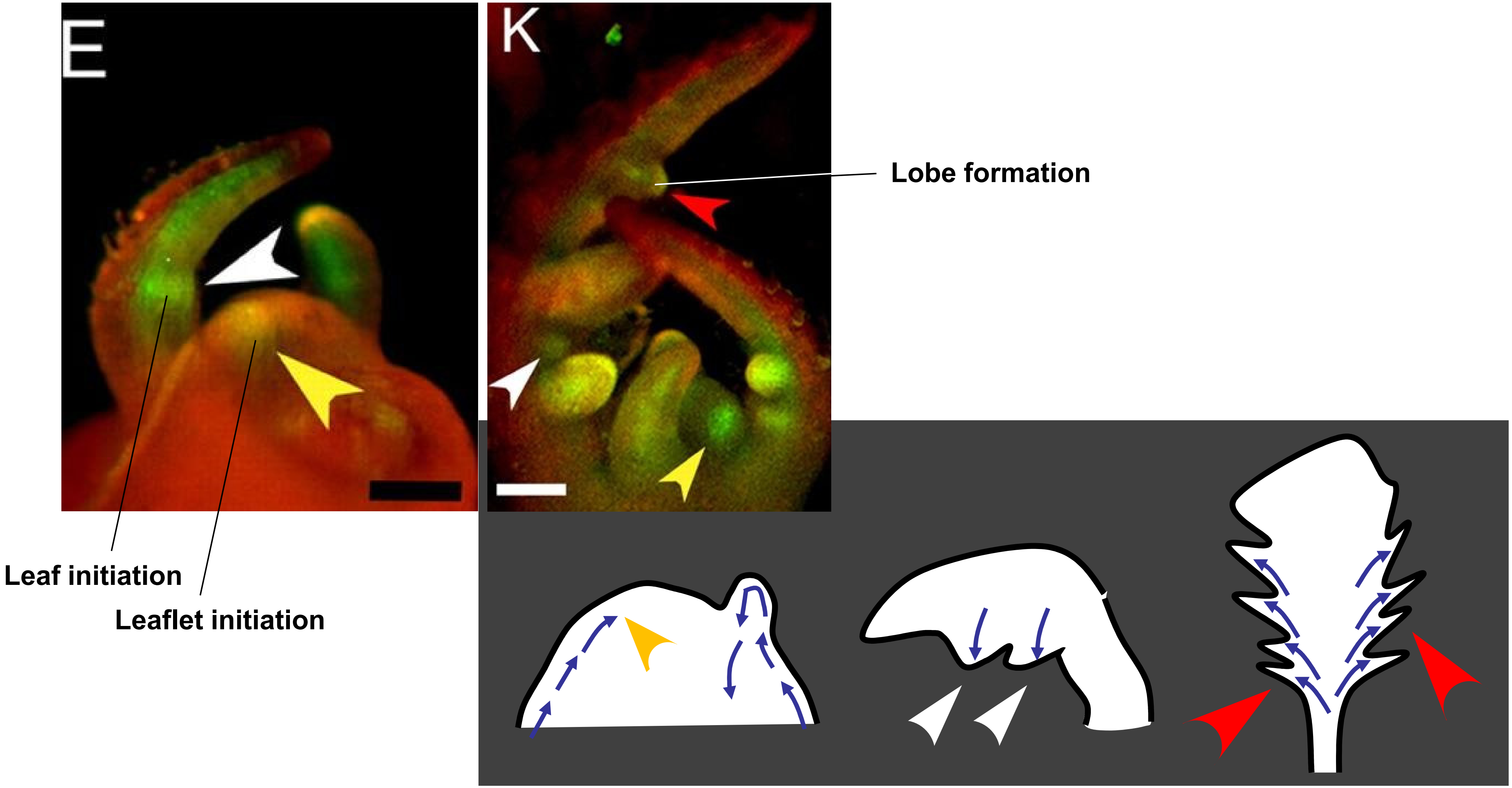
DR5:YFP



Auxin accumulation in the prospective leaflet position

EVROPSKÁ UNIE
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ, MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY
OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost
INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ
Tato prezentace je spolufinancována Evropským sociálním fondem a státním rozpočtem České republiky

Auxin has a recurring role in leaf development



Koenig, D., Bayer, E., Kang, J., Kuhlemeier, C., and Sinha, N. (2009) Auxin patterns *Solanum lycopersicum* leaf morphogenesis. Development **136**: 2997-3006.

Outline of Lesson 9

Morphogenesis

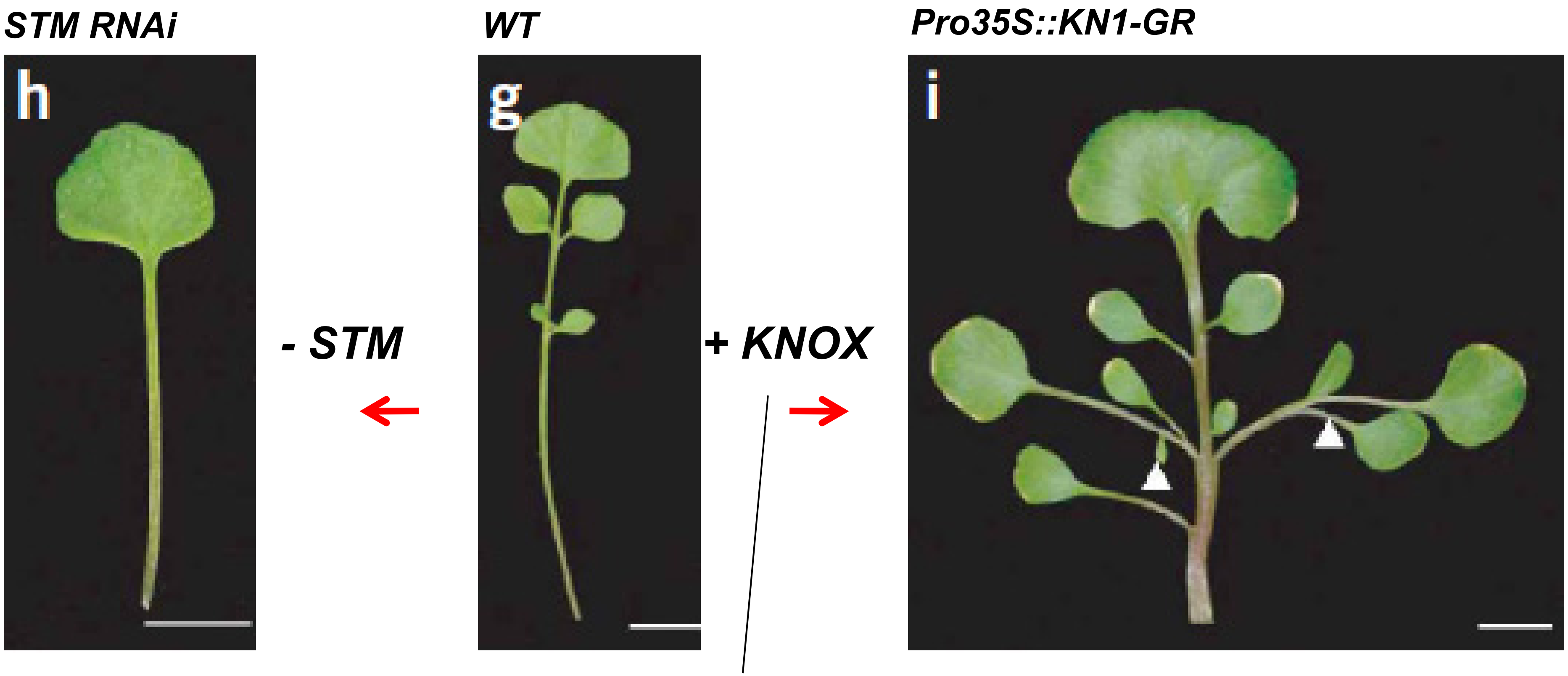
- Morphogenesis in animals
  - Changes in the cell adhesion, protrusion and motility
  - Extracellular matrix regulators of morphogenesis
  - Specificity of cell aggregations and its molecular determinants
  - Morphogenic manoeuvres
  - Changes in the cell motility and tissue interactions during organogenesis

- Morphogenesis in plants
  - Introducing leaf development as an example of morphogenesis in plants
  - The role of oriented cell division and its relative distribution
    - Regulation of cell division by TCP and boundary genes
    - Auxin-regulated positional information for cell division
    - *KNOX* and boundary genes in the leaf complexity

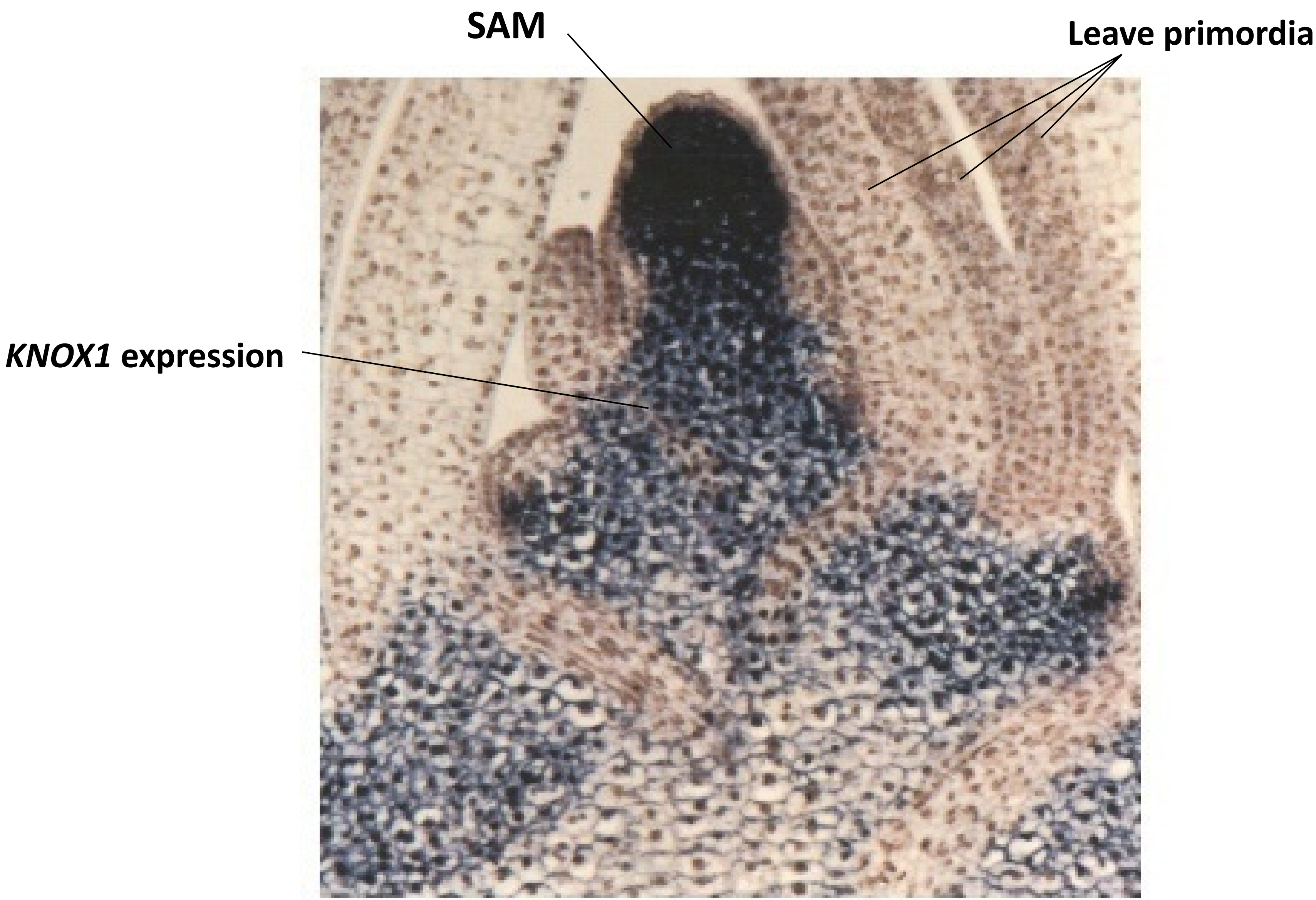
EVROPSKÁ UNIE
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ, MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY
OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost
INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ
Tato prezentace je spolufinancována Evropským sociálním fondem a státním rozpočtem České republiky

Expression of *KNOX1* transcription factor gene correlates with leaf complexity

Cardamine hirsuta



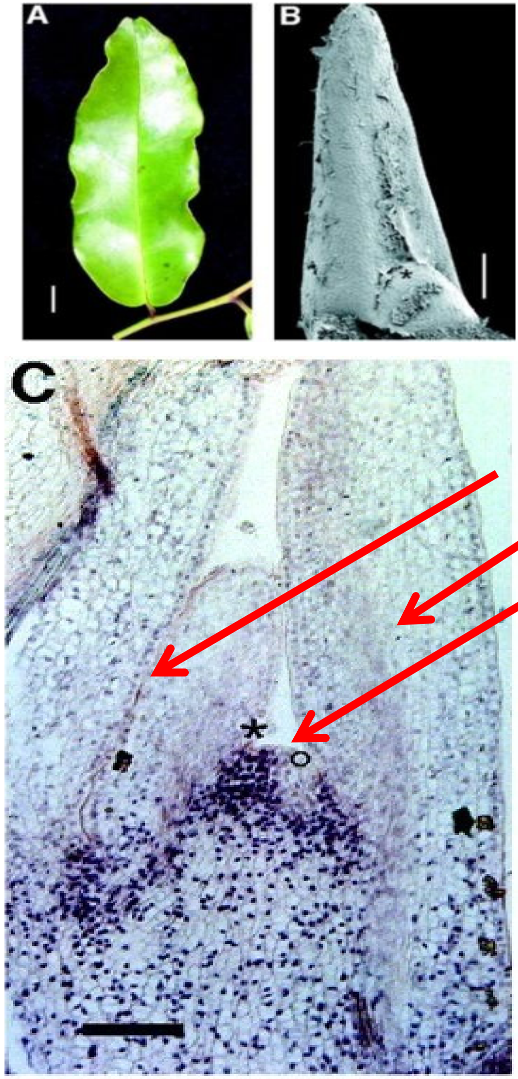
WT **KNOTTED-like homeobox TFs**



Jackson, D., Veit, B., and Hake, S. (1994) Expression of maize KNOTTED1 related homeobox genes in the shoot apical meristem predicts patterns of morphogenesis in the vegetative shoot. Development 120: 405–413. Reproduced with permission.

In plants with <u>compound</u> leaves, *KNOX1* expression turns back on in primordia

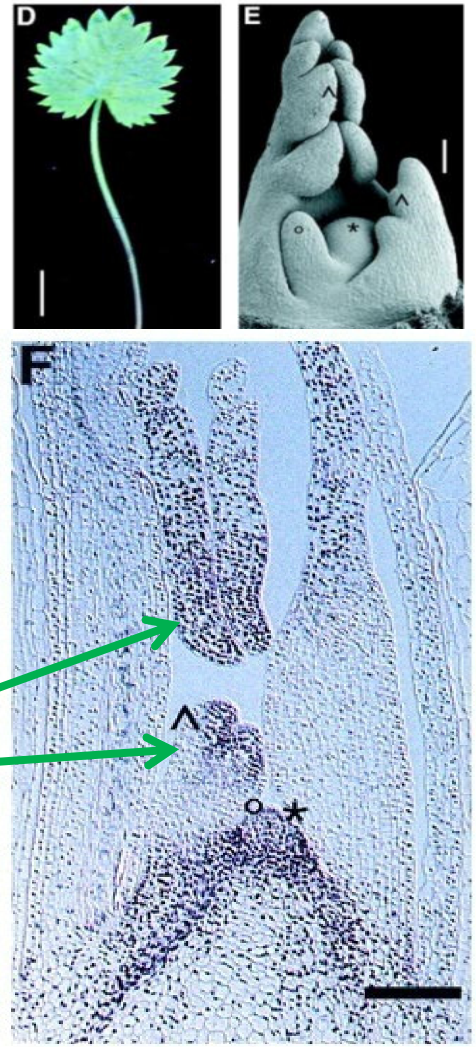
Simple leaf



KNOX1 OFFin leaves

Amborella trichopoda

Compound leaf



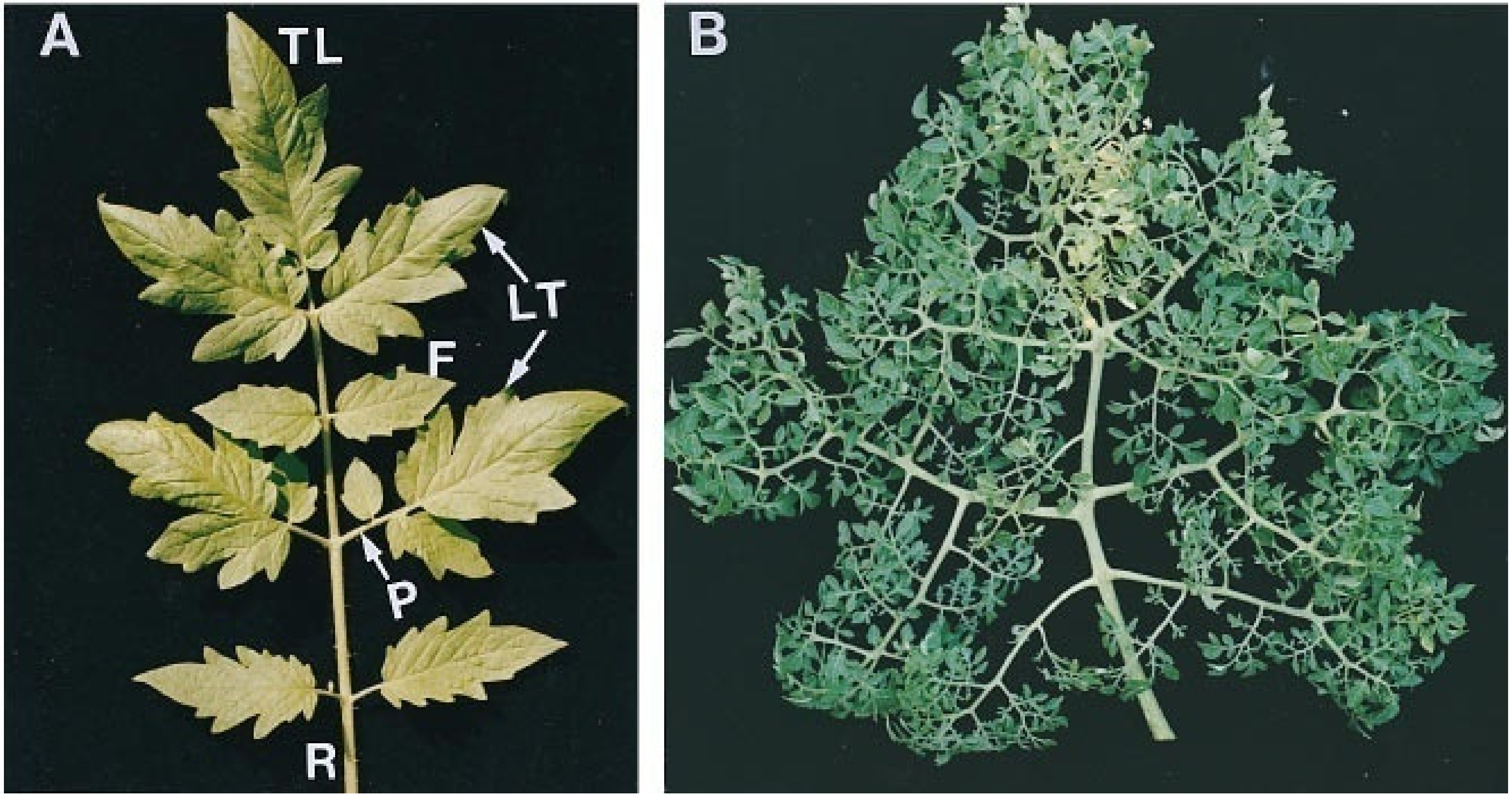
KNOX1 ON in leaves

Pimpinella anisum anýz vonný

From Bharathan, G., Goliber, T.E., Moore, C., Kessler, S., Pham T., and Sinha, N.R. (2002) Homologies in leaf form inferred from *KNOXI* gene expression during development. Science 296: 1858-1860. Reprinted with permission from AAAS.

EVROPSKÁ UNIE
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ, MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY
OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost
UNIVERSITAS MASARYKIANA BRUNENSIS
INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ
Tato prezentace je spolufinancována Evropským sociálním fondem a státním rozpočtem České republiky

Tomato

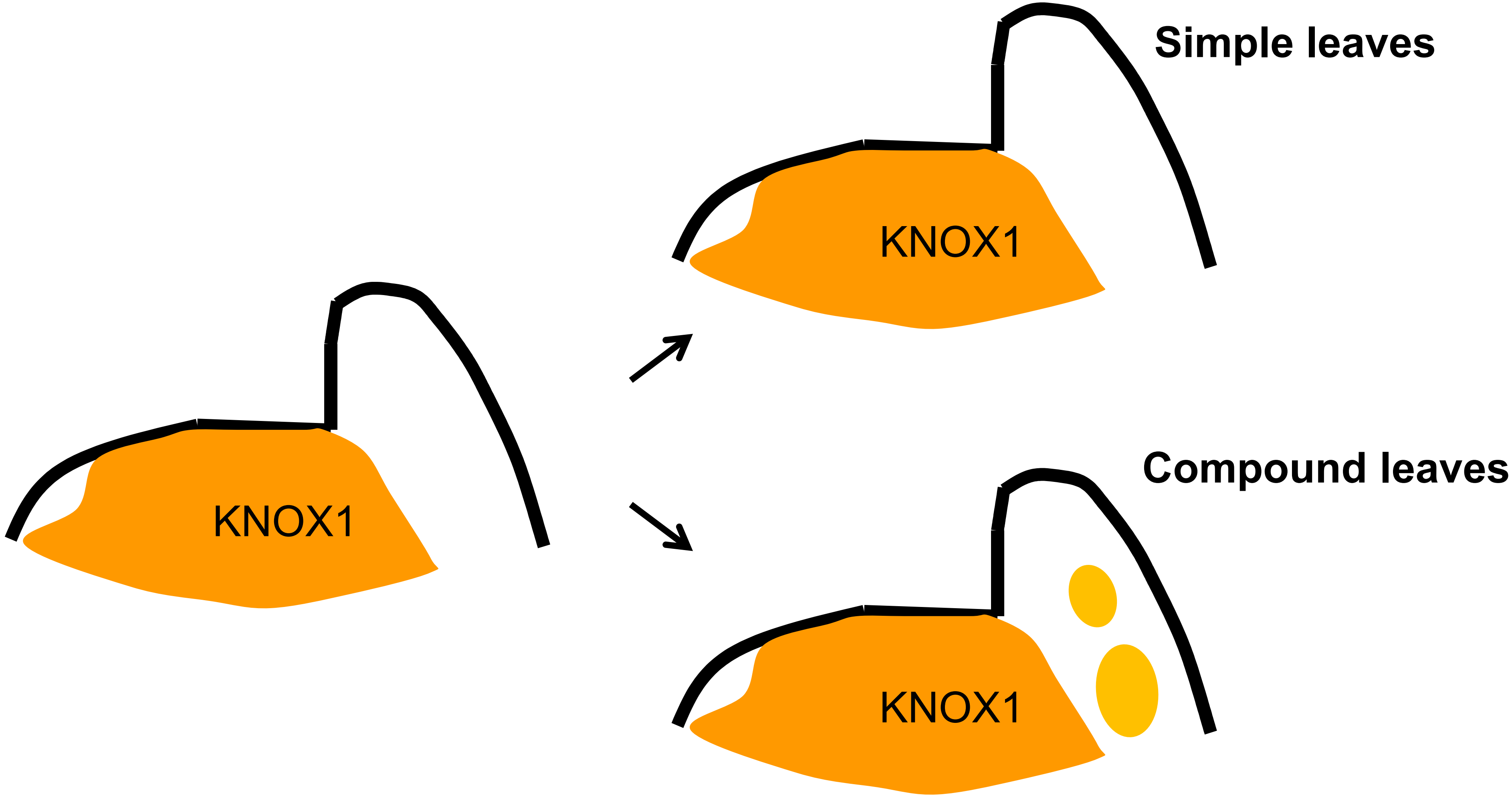


WT

Pro35S:KNOTTED1

Homeobox TF gene from maize

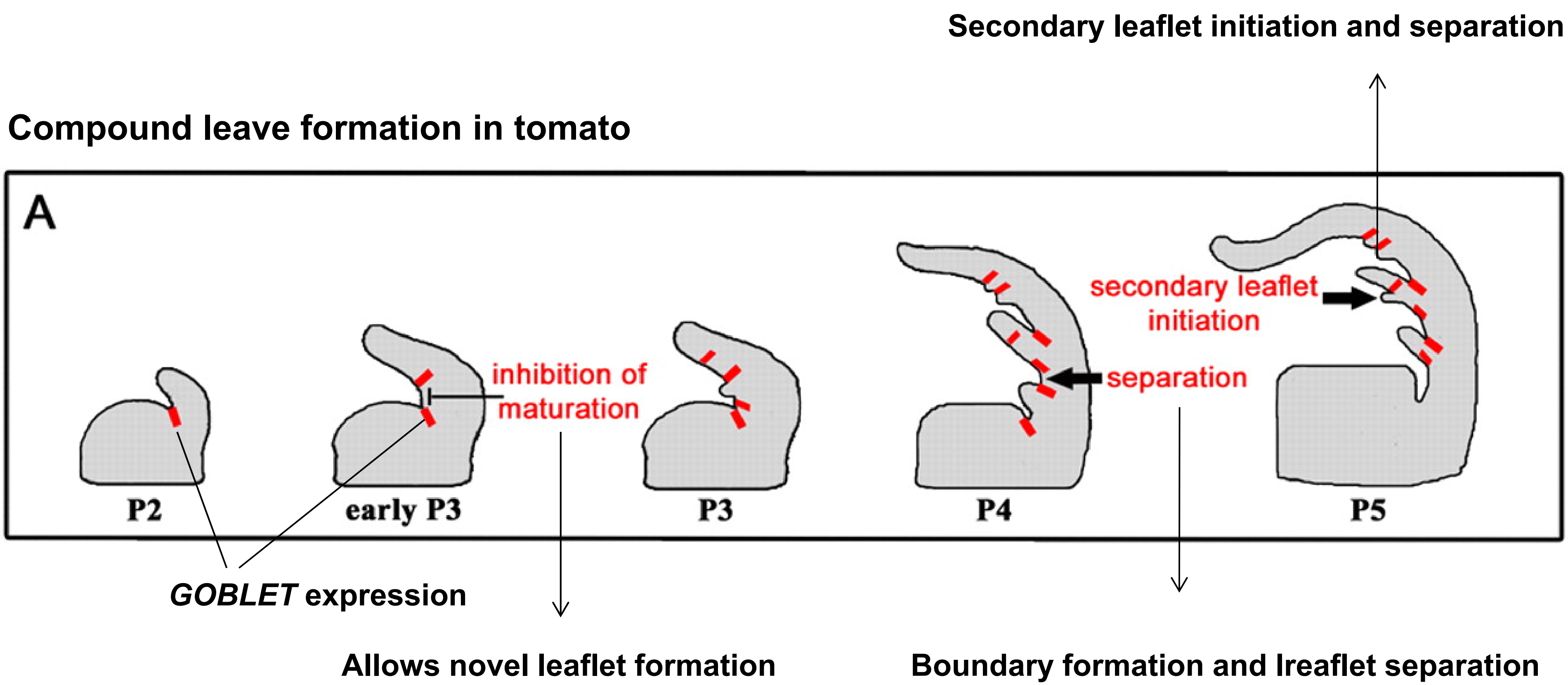
KNOX1 genes have a recurring role in leaf development



Geny rozhraní

Boundary genes have a recurring role in leaf development

Compound leave formation in tomato



Berger, Y., Harpaz-Saad, S., Brand, A., Melnik, H., Sirding, N., Alvarez, J.P., Zinder, M., Samach, A., Eshed, Y., and Ori, N. (2009) The NAC-domain transcription factor GOBLET specifies leaflet boundaries in compound tomato leaves *Development* 136, 823-832. Reproduced with permission.

Key Concepts

Morphogenesis

- In animals, **regulated cell motility** and **adhesion** is necessary for **proper morphogenesis**
- The **interaction between cells** and **surrounding environment** is critical for the changes in **adhesion** and/or **cell motility**
- Presence of specific **interacting molecules** and **their quantity** allows **formation of self-organizing system** based on the **selective cellular adhesiveness**
- **Cellular interactions** and **signalling** are critical for **proper organogenesis**
- **Morphogenesis in plants** is regulated by **direction** and **localization** of **cell division** and **cell elongation**
- Auxin-provided **positional information** and **spatial-specific** regulated **gene expression** are involved in the **modulation** of **cell division** and **organ** (leaf) **patterning**

EVROPSKÁ UNIE
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ, MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY
OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost
INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ
Tato prezentace je spolufinancována Evropským sociálním fondem a státním rozpočtem České republiky