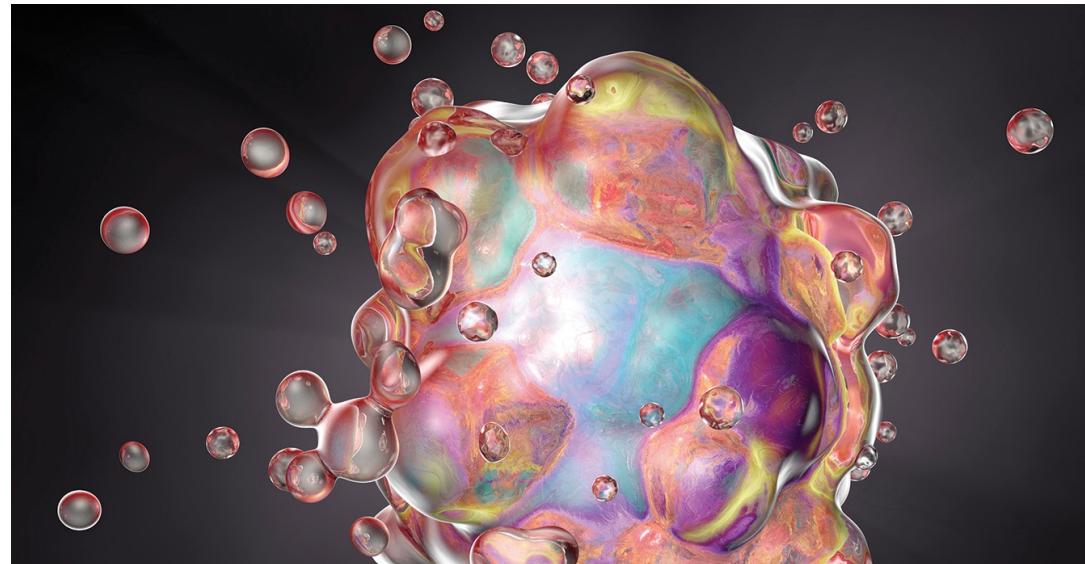
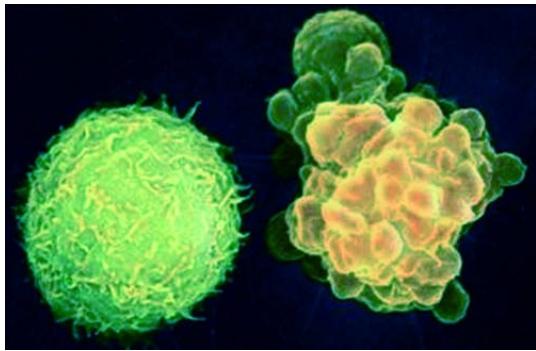


Codice OPIS 2025-26

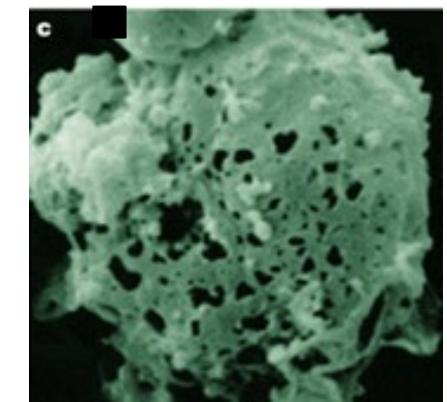
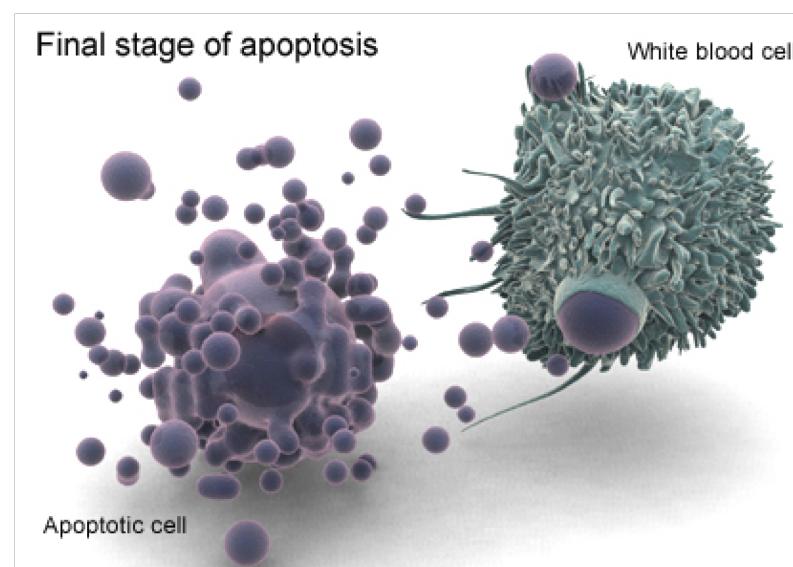
**KFFIQ8DY**

**MECCANISMI CELLULARI E MOLECOLARI  
DELLA RISPOSTA IMMUNE (1047783)**

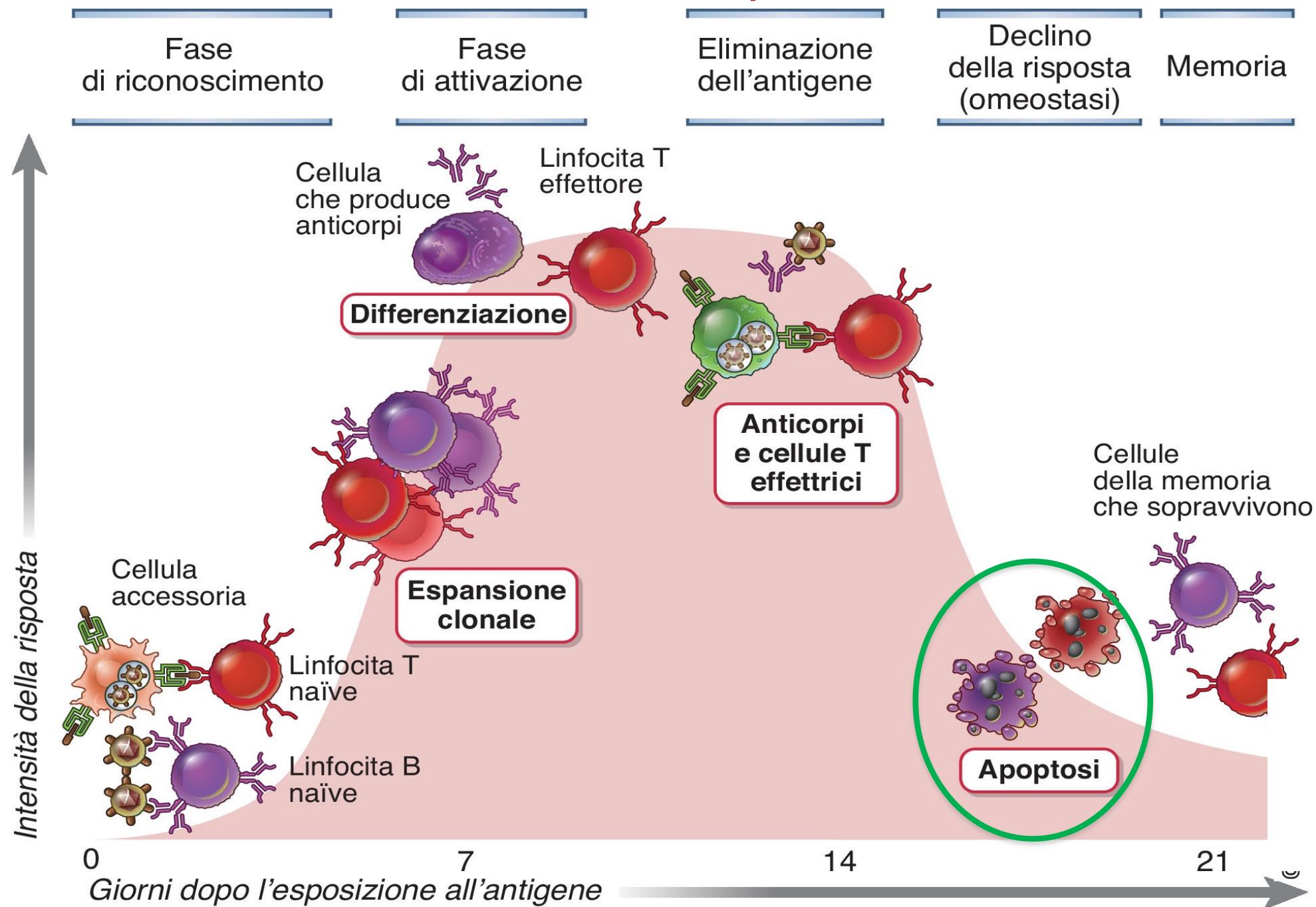
**SCIENZE BIOLOGICHE (30857)**



## Sistema immunitario e morte cellulare

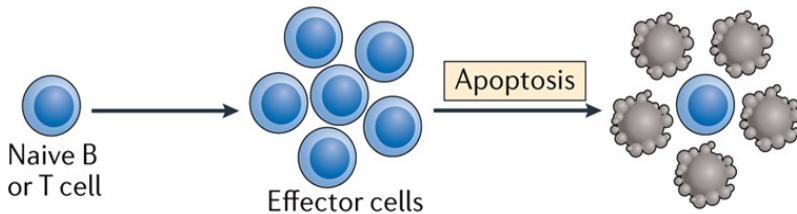


# Fase di declino delle risposte linfocitarie

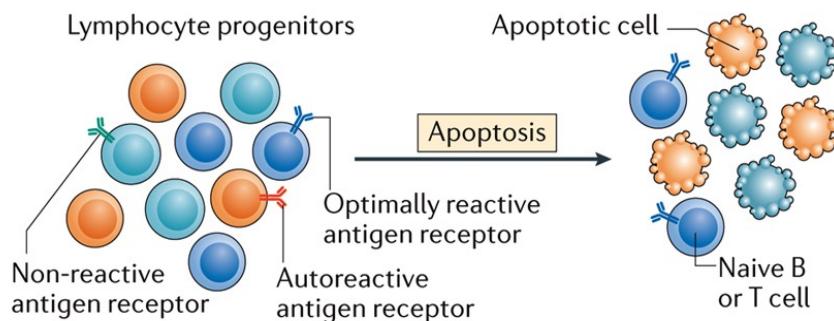


# Morte cellulare nei processi immunologici

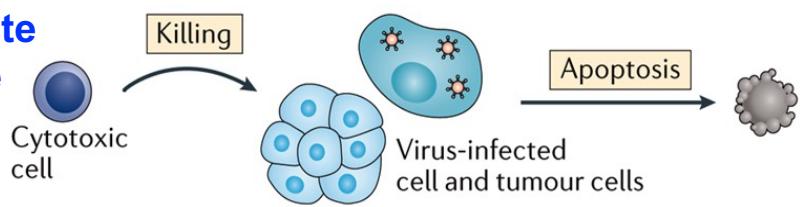
## a Contrazione delle cellule effettive



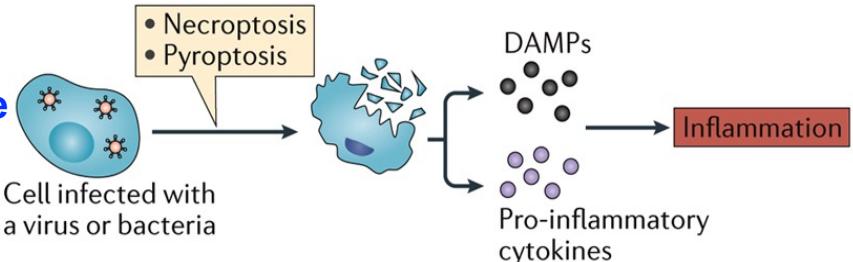
## b Sviluppo linfocitario



## c Eliminazione di cellule infettate o trasformate mediante apoptosi



## d Eliminazione di cellule infettate mediante necrosi



**a** Quando i linfociti naïve incontrano i patogeni, proliferano e vengono attivati per combatterli. Questi linfociti attivati moriranno successivamente dopo la rimozione degli agenti patogeni. Una situazione simile si può riscontrare con i neutrofili durante l'infiammazione (non mostrata). Cioè, quando il nostro organismo è infettato da batteri, le popolazioni di neutrofili si espandono e i neutrofili vengono attivati per fagocitare i batteri, ma subiscono rapidamente apoptosi una volta eliminata l'infezione.

**b** Durante lo sviluppo dei linfociti, un gran numero di progenitori linfocitari che esprime recettori per l'antigene con elevata affinità per gli autoantigeni o che non vede gli antigeni viene eliminato per apoptosi. I linfociti che sopravvivono a questa fase di sviluppo vanno in periferia e formano i compartimenti dei linfociti T e B naïve.

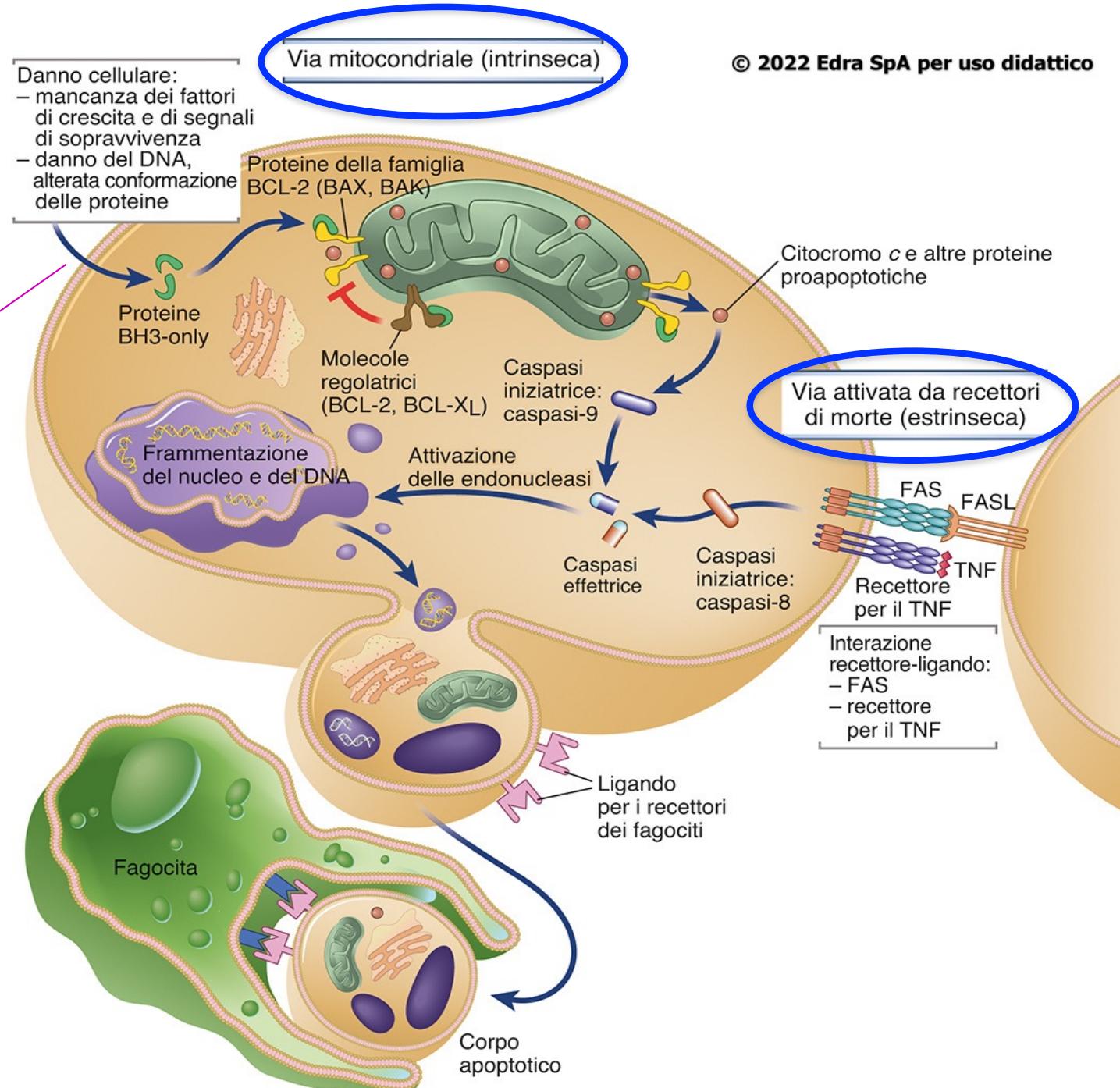
**c** I linfociti T citotossici e le cellule natural killer riconoscono le cellule tumorali infettate da virus, infettate da batteri e trasformate e inducono queste cellule a morire per apoptosi.

**d** Le cellule infettate dai batteri, in particolare i fagociti, spesso vanno incontro a necrosi per impedire ai batteri di proliferare ulteriormente all'interno della cellula. A differenza dell'apoptosi, la necrosi è una forma infiammatoria di morte cellulare e può portare a un'ulteriore infiammazione dei tessuti. DAMP, pattern molecolari associati al danno.

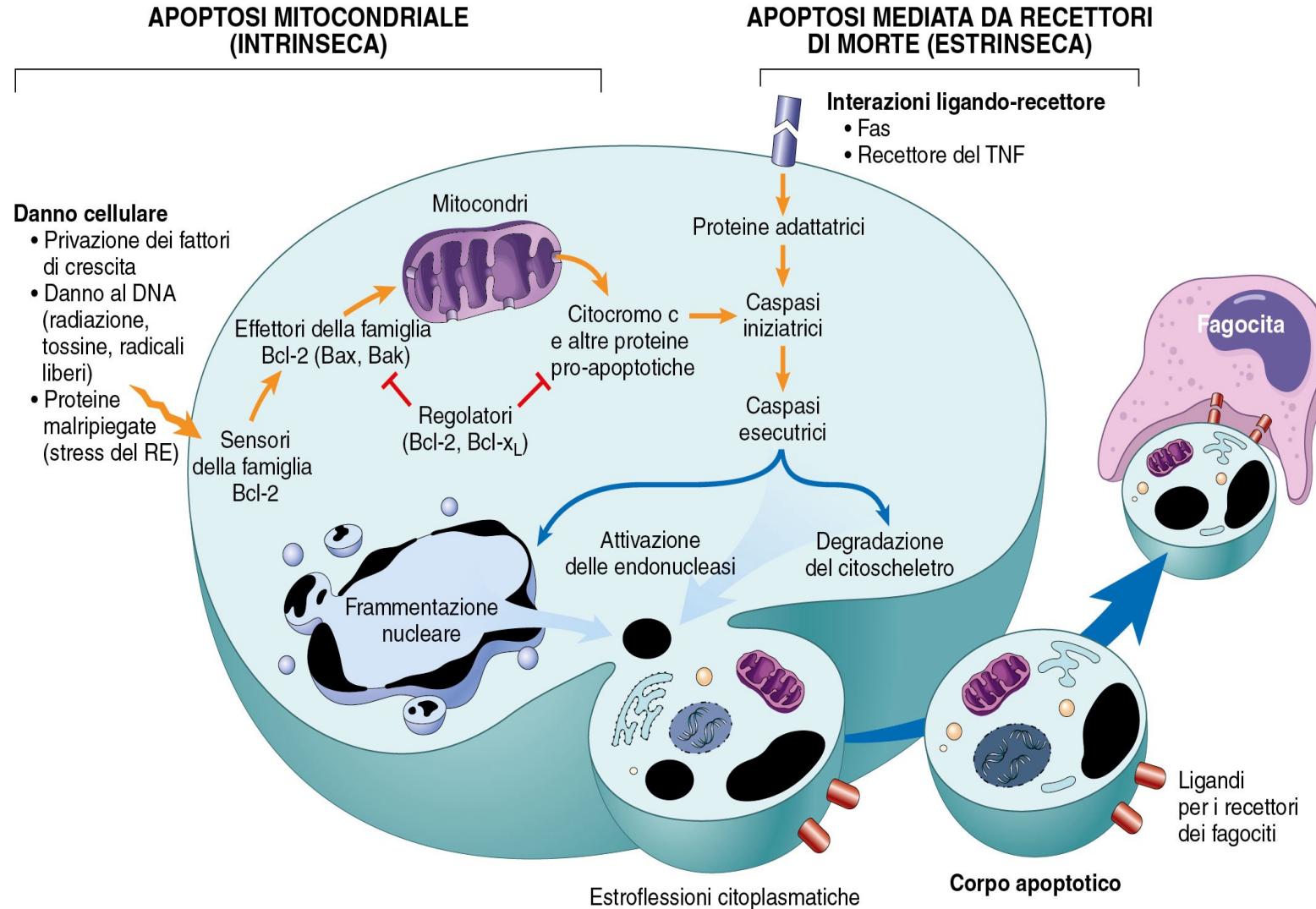
# Fase di contrazione della risposta linfocitaria

Mancanza di:  
-Antigene  
-Costimolazione  
-citochine (IL2)

Espressione di  
recettori costimolatori  
inibitori  
-CTLA4  
-PD1

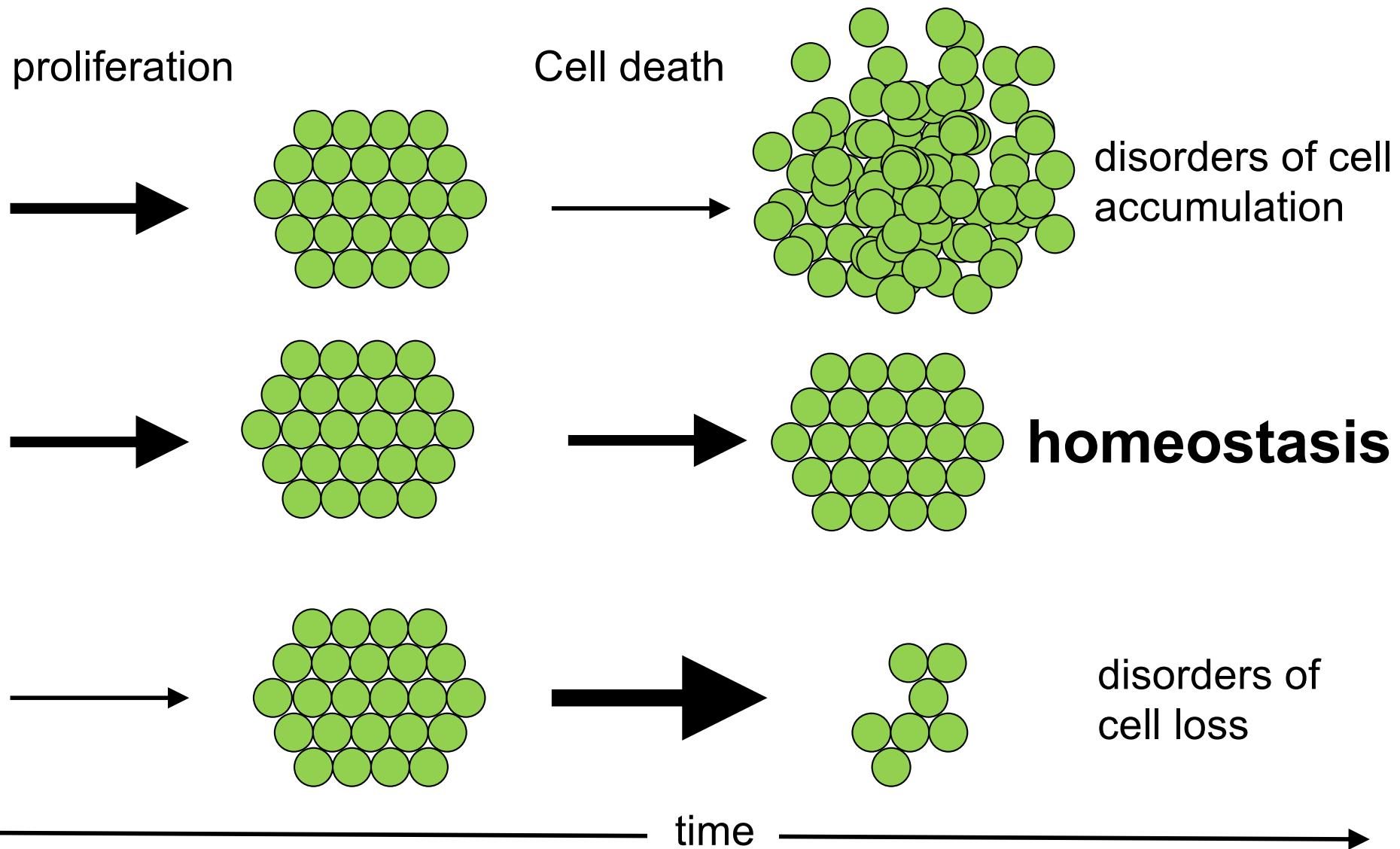


# Vie intrinseca ed estrinseca dell'apoptosi

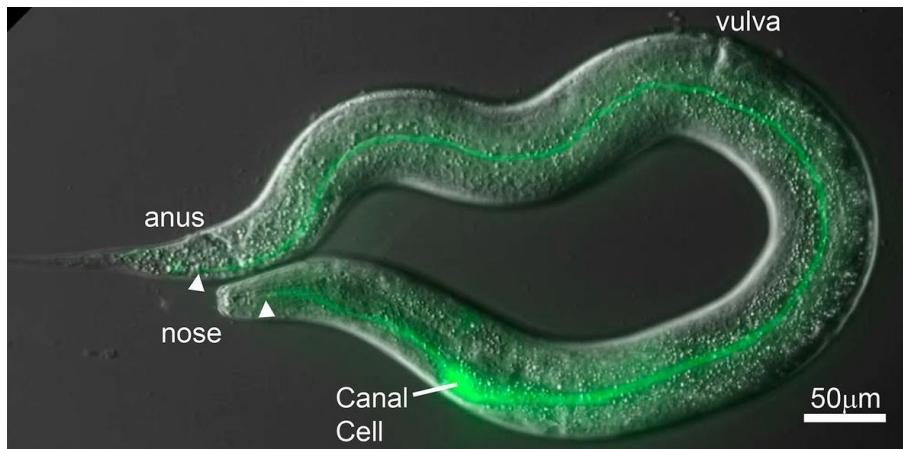


Meccanismi di apoptosi. Le due vie di induzione dell'apoptosi differiscono nei meccanismi di attivazione e regolazione, ma convergono nell'attivazione delle caspasi. Nella via mitocondriale, lo sbilanciamento nelle proteine della famiglia Bcl-2, che regolano la permeabilità mitocondriale, causa la fuoriuscita di varie sostanze dai mitocondri, attivando le caspasi. Nell'apoptosi indotta dai recettori di morte, l'attivazione di recettori presenti sulla membrana plasmatica induce il reclutamento di proteine adattatrici per assemblare complessi che trasducono segnali di morte, attivando le caspasi, con lo stesso risultato finale.

# Cell proliferation = cell death → homeostasis



# *Caenorhabditis elegans*: modello di studio per l'apoptosi



AB		MS		E		C		D		P4
Ectoderm	Nervous system	mesoderm	muscle	gut	endoderm	misc		muscle		germ cells
survivors	606	252	34	47	20					variable
deaths	116	14	0	1	0					variable

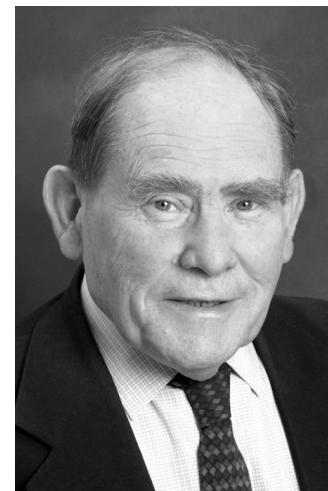
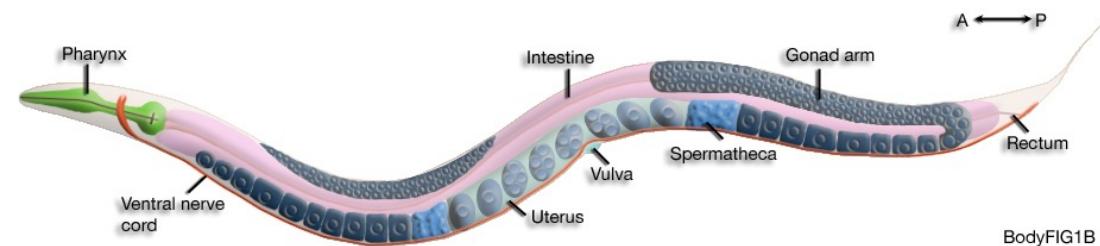
CED-4



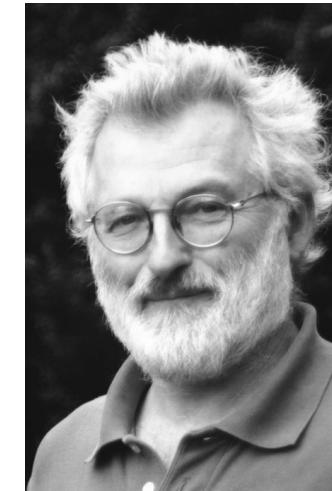
CED-3



apoptosis



Brenner S,

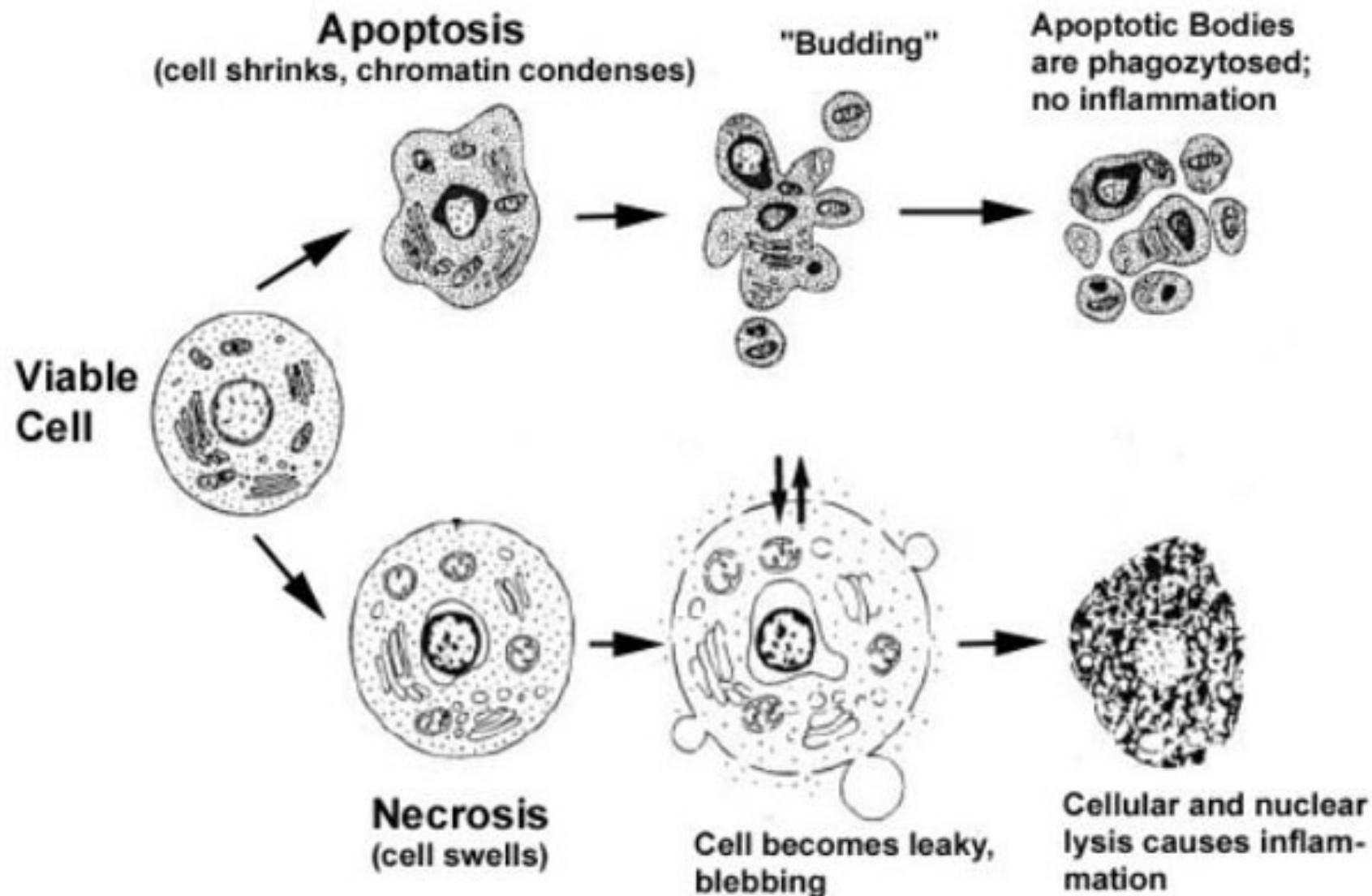


Sulston J,

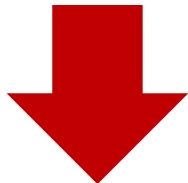


Horvitz HR  
Nobel prize in Physiology or Medicine (2002)

## Modificazioni morfologiche di una cellula apoptotica e di una cellula necrotica



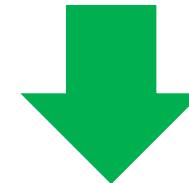
# APOPTOSI



Processo **attivo** caratterizzato da collasso delle strutture cellulari per digestione proteolitica selettiva con:

- aumento della densità cellulare
- disintegrazione del citoscheletro
- frammentazione del genoma
- formazione di corpi apoptotici
- **assenza di infiammazione** riducendo il danno tissutale

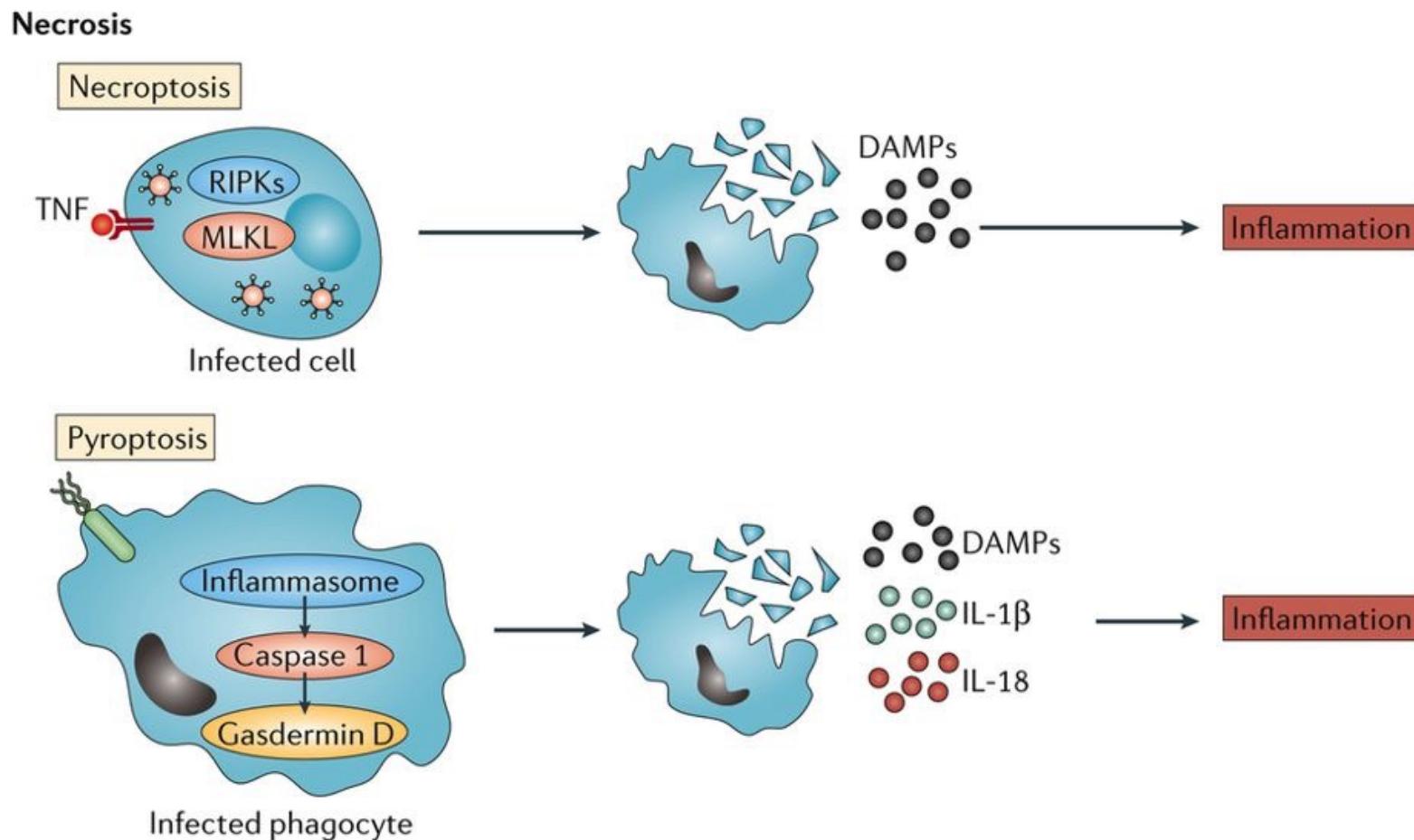
# NECROSI



Processo accidentale indotto da lesioni/trauma e caratterizzato da:

- aumento del volume cellulare
- rottura delle membrane degli organelli e membrana plasmatica
- rilascio del contenuto cellulare nello spazio esterno
- **induzione di infiammazione**

# Necroptosi e Piroptosi: forme di necrosi



Nature Reviews | Immunology

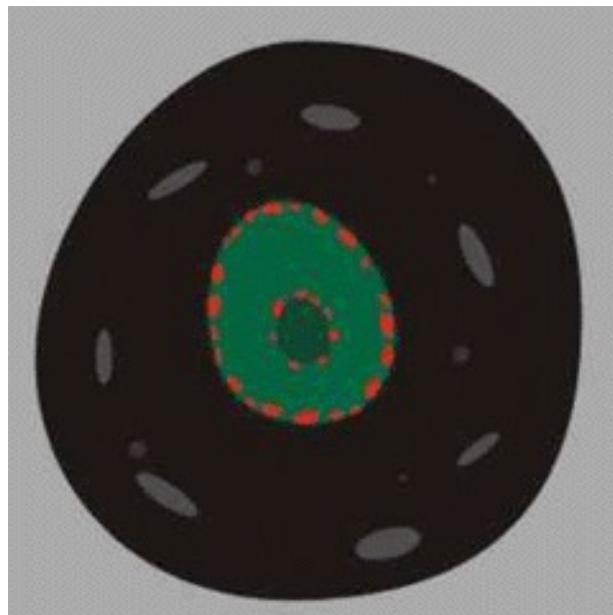
Bacteria-infected cells, particularly phagocytes, often undergo necrosis to prevent bacteria from proliferating further inside the cell. Unlike apoptosis, necrosis is an inflammatory form of cell death and can lead to further tissue inflammation. DAMPs, damage-associated molecular patterns.

# Apoptosi

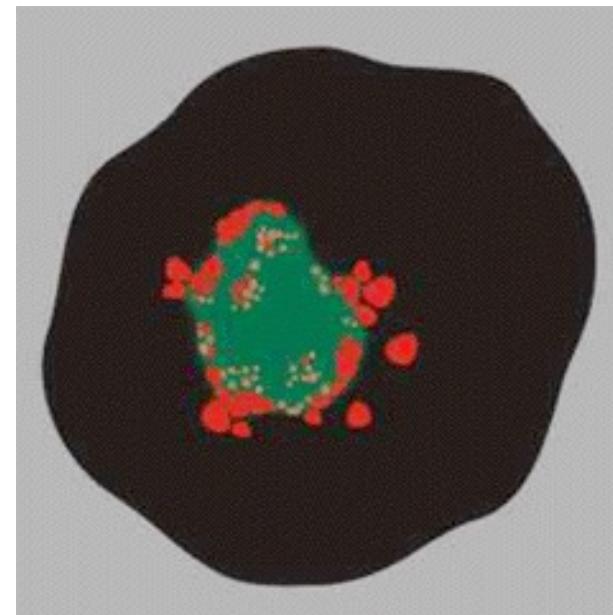
- L'apoptosi è un processo attivo e altamente controllato che gioca un ruolo importante nello sviluppo degli organismi multicellulari e nella regolazione della popolazione cellulare nei tessuti in condizioni fisiologiche e patologiche.
- Il termine fu introdotto nel 1972 da Kerr, Currie e Wyllie per descrivere una serie di modificazioni morfologiche che accompagnavano la morte cellulare in diversi tessuti.
- La parola ha origini greche e indica “caduta” (riferita a quella delle foglie o dei petali dei fiori). Il termine è stato scelto perchè sottolinea che tale forma di morte cellulare è un meccanismo naturale, necessario e caratteristico del ciclo vitale degli organismi.
- Gli stimoli includono il signaling innescato dai recettori della superficie cellulare, mancanza di fattore di crescita, ipossia, danno al DNA, infezioni virali, agenti chemioterapici
- Meccanismo coinvolto in molti eventi fisiologici: embriogenesi, differenziazione, omeostasi, invecchiamento, rimozione di cellule difettose e/o dannose
- Alterazioni del processo causano una varietà di disturbi patologici: malattie neurodegenerative, immunodeficienza, malattie autoimmuni e cancro

## Schematic view of a nucleus in a cell undergoing apoptosis

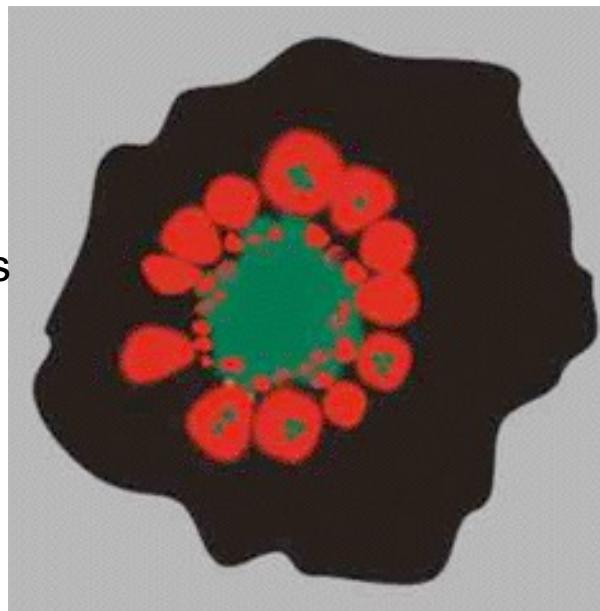
Healthy



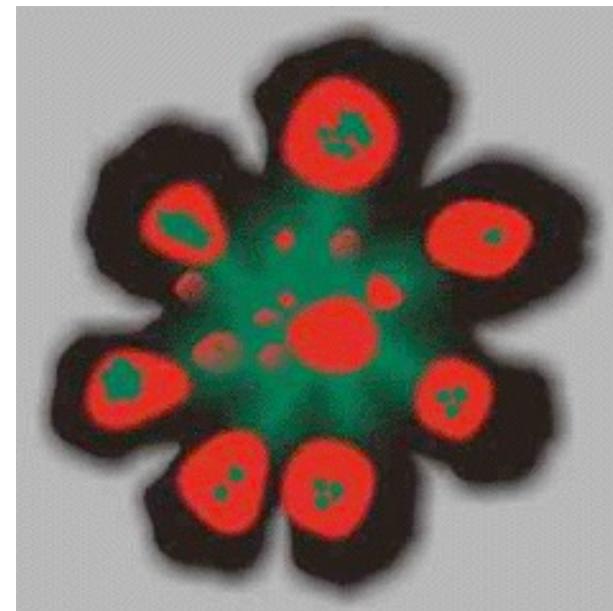
Early apoptosis



Advanced apoptosis



Late apoptosis



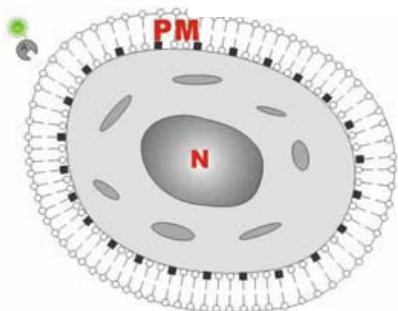
# Caratteristiche biochimiche dell'apoptosi

- **Esposizione della fosfatidilserina sulla superficie cellulare**
- **Frammentazione endonucleosomica del DNA genomico**
- **Taglio proteolitico del citoscheletro e delle proteine nucleari**

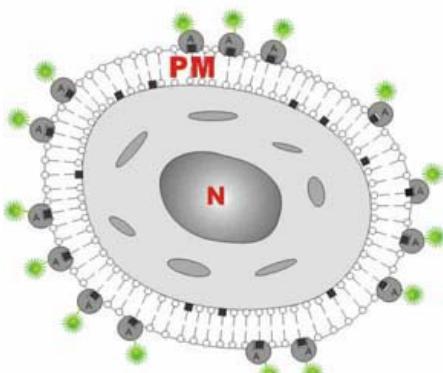
# Colorazione della membrana plasmatica con annessina V come metodo di rilevazione di eventi apoptotici precoci

## Annessina V lega specificamente la fosfatidilserina

- Phospholipid
- Phosphatidylserine
- A Annexin with a green fluorescent label



Normal, healthy cell



Apoptotic cell



membrane asymmetry

## Phosphatidylserine "Flip"

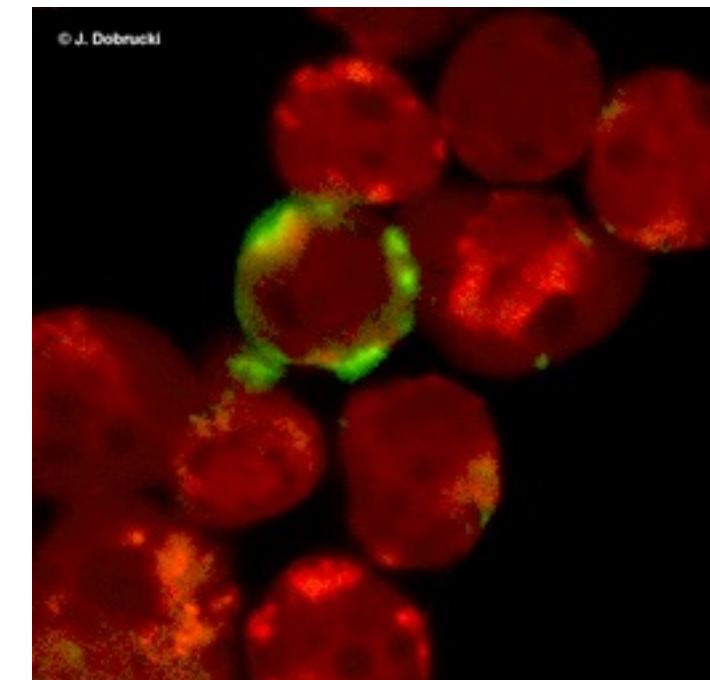
Scramblase(XKR8)

phosphatidylserine redistribution

before

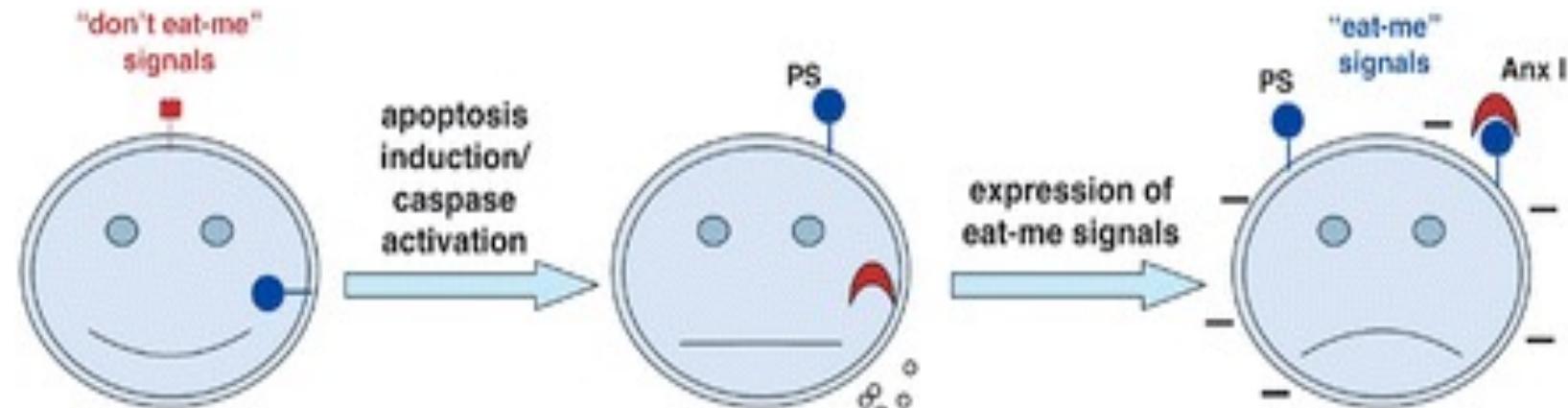
Apoptosis Induced  
Flippases  
(ATP11A, ATP11C)

after

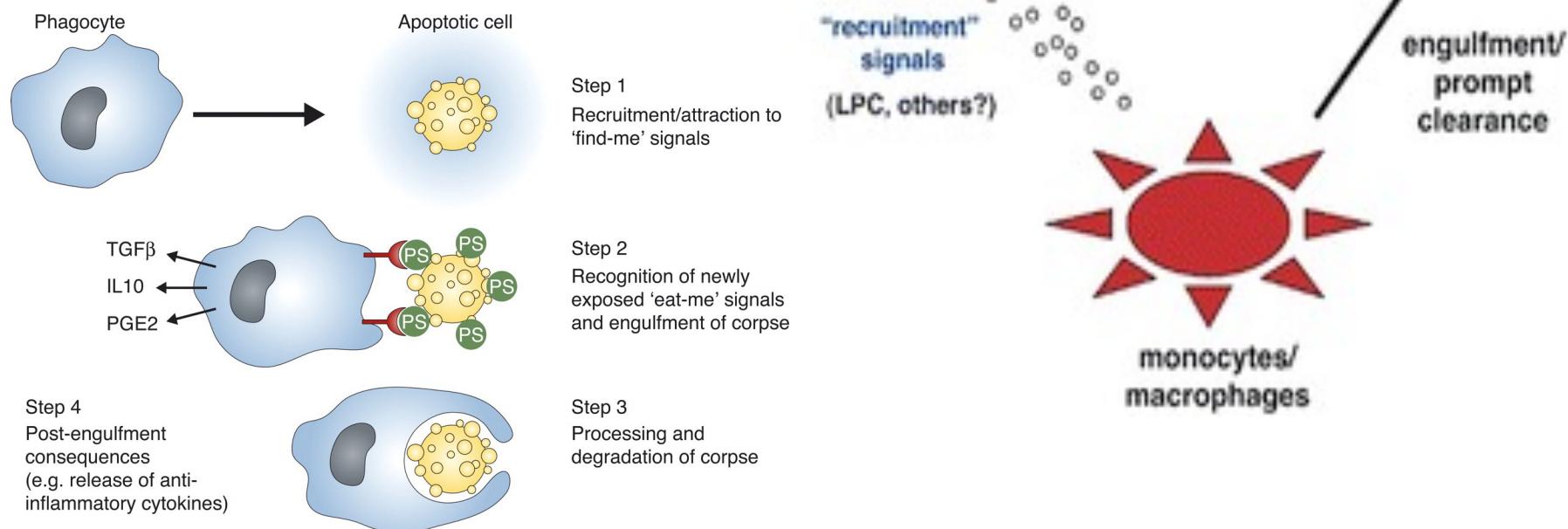


Colorazione con annessina V e ioduro di propidio per discriminare le cellule apoptotiche dalle cellule necrotiche

microscope image



## Eat me signals



Different steps involved in efficient apoptotic cell clearance. The find-me signals (such as low levels of nucleotides ATP and UTP, fractalkine, lysophosphatidylcholine, or sphingosine 1-phosphate) released by apoptotic cells help attract motile phagocytes to the proximity of the cell undergoing apoptosis. The phagocytes then use engulfment receptors on their surface to engage eat-me signals on apoptotic cells. For clarity, only the PtdSer on the apoptotic cells engaged by cognate receptors is depicted. Engagement of the engulfment receptors (linked to PtdSer recognition) has been shown to stimulate release of antiinflammatory cytokines such as TGF- $\beta$ , IL-10, and prosta- glandin E2 (PGE2). The intracellular signaling induced within the phagocyte by the ligand–receptor interactions leads to cyto- skeletal rearrangements and internalization of the dying cell. The phagocyte processes the engulfed corpse through a series of steps, and proper digestion seems to be important for continued uptake of other dying cells by phagocytes.

# Attivazione del processo apoptotico

## Pathway estrarinseco

Legame dei membri della famiglia del TNF:

-TNF; Linfotossina; FasL; TRAIL; etc  
ai rispettivi recettori  
-TNFR1; Fas; TRAILR; etc\*



Formazione del **DISC**  
(Death-Inducing Signaling Complex)  
dopo reclutamento di molecole  
adattatrici (es. **FADD** e **TRADD**) e  
delle pro-caspasi 8 (o 10)

“Stress or danger conditions”

## Pathway intrinseco



(sensori interni)

esempio **ATR; ATM** → **p53**



Propagazione del segnale attraverso i  
membri proapoptotici della famiglia Bcl-2  
(**Bid; Bad; Bax; Bak**)



Aumento della permeabilità della  
membrana mitocondriale esterna

rilascio di  
citocromo c

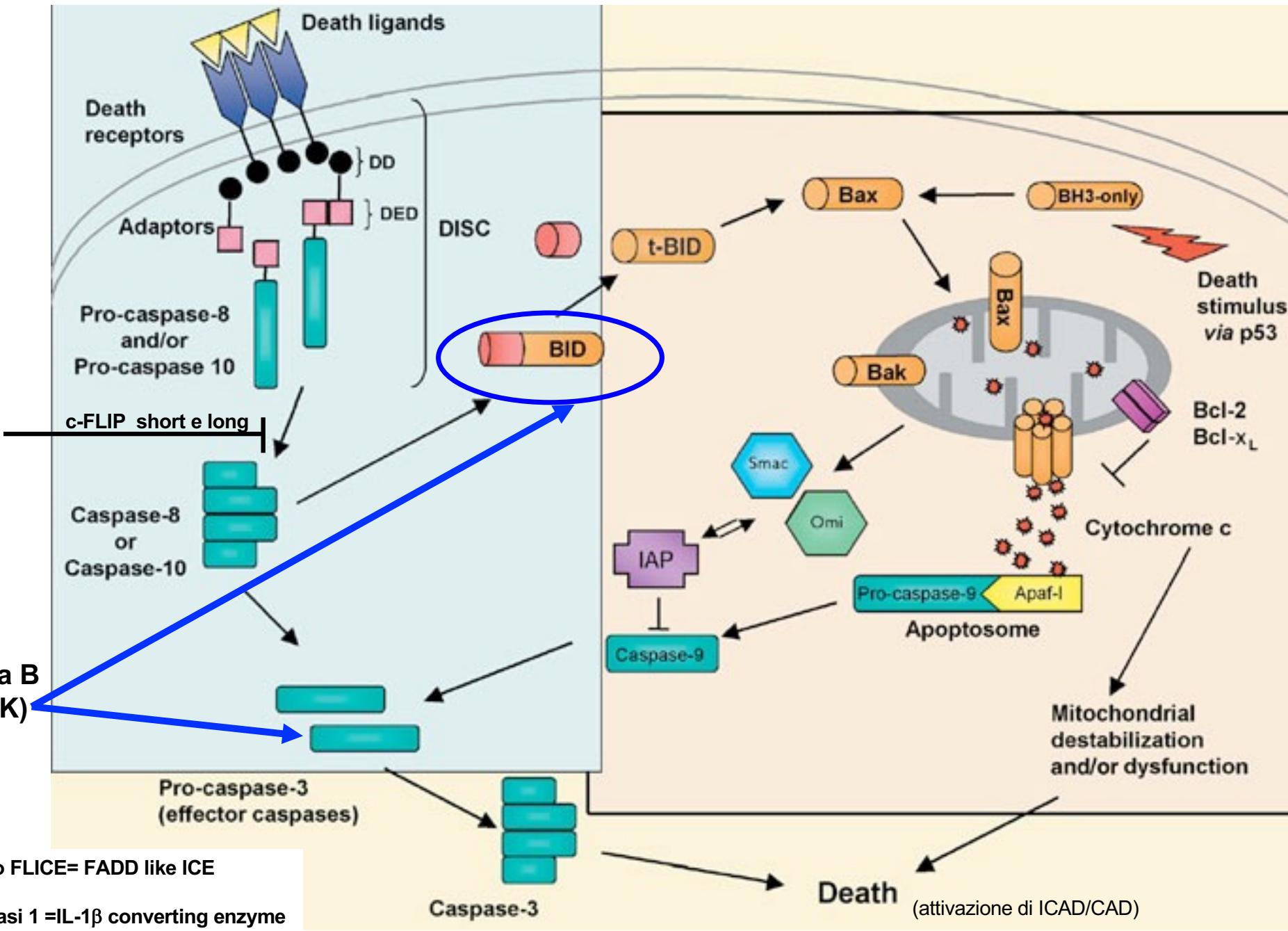


Attivazione delle caspasi iniziatrici  
e poi delle caspasi effettive

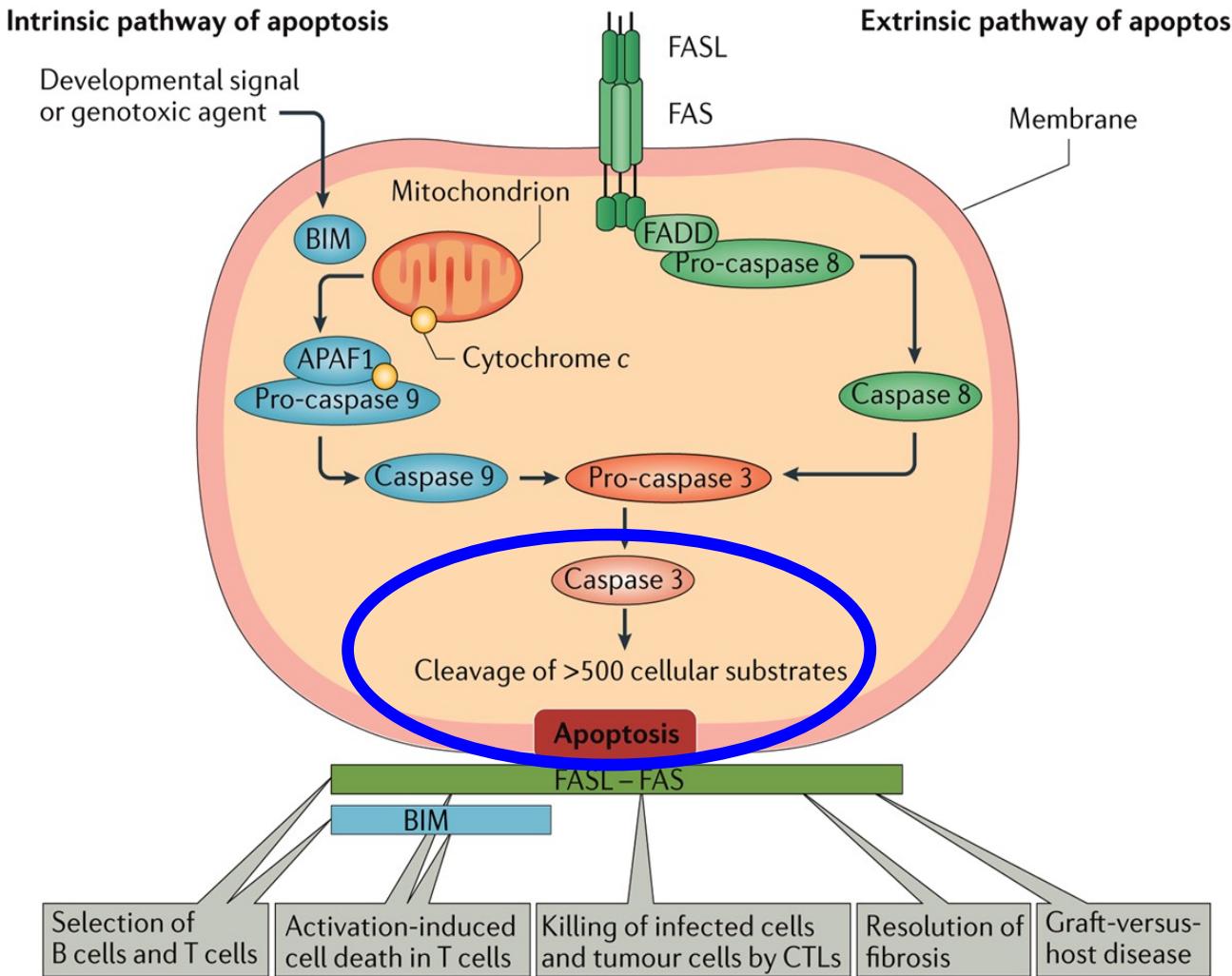
\* Death receptors:

- TNFR1
- Fas
- DR3
- TRAILR
- DR5
- DR6

# Pathways molecolari dell'apoptosi



# The two major apoptotic pathways



Nagata S and Tanaka M. 17: 333–340 (2017)

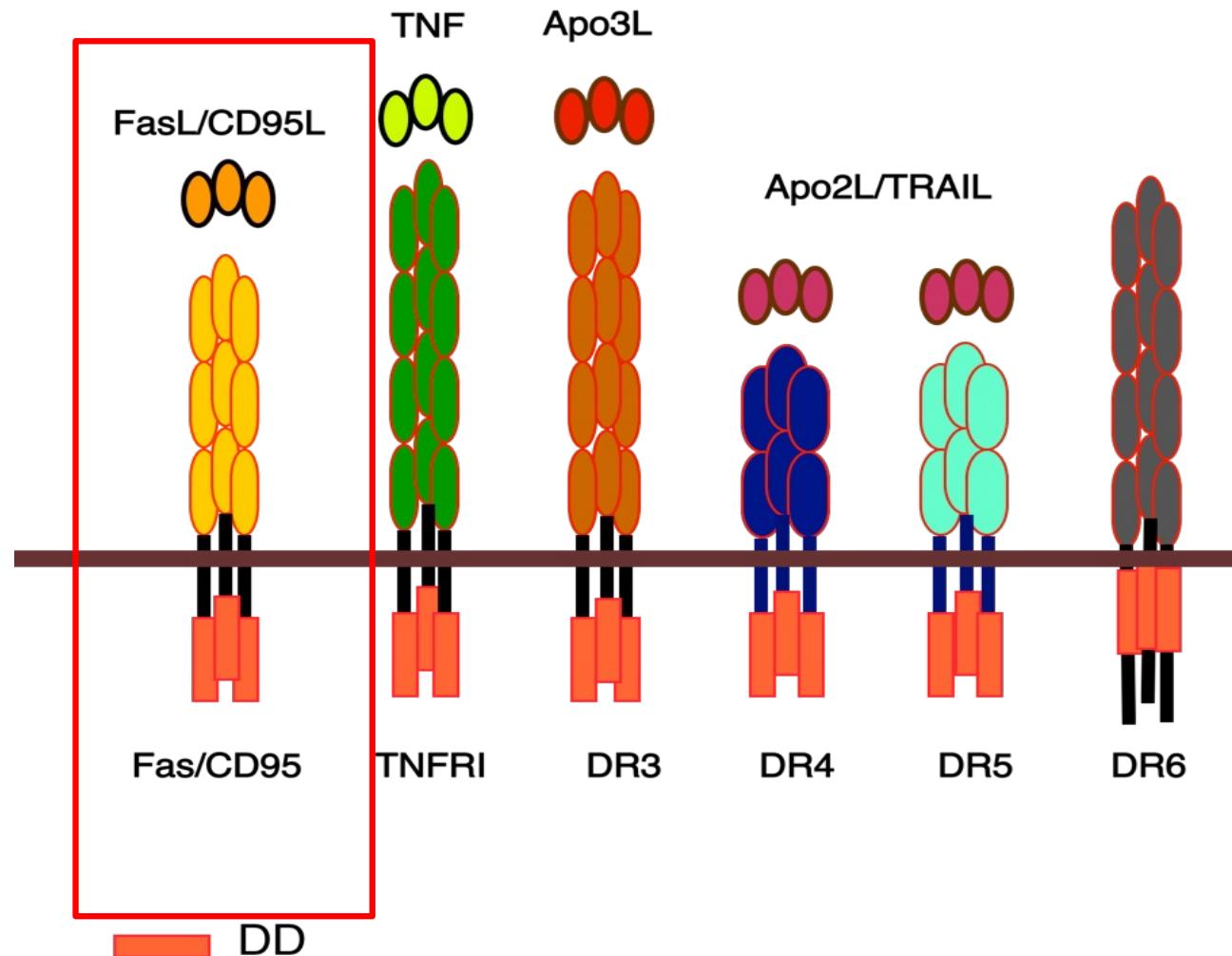
Nature Reviews | Immunology

**In the extrinsic pathway** of apoptosis, a death-inducing factor such as FAS ligand (FASL) binds its receptor (FAS) and recruits the adaptor FAS-associated death domain protein (FADD) and pro-caspase 8 to form the death-inducing signalling complex (DISC). The cleavage and activation of pro-caspase 8 in the DISC then activates a downstream caspase cascade that typically involves caspase 3.

**In the intrinsic pathway** of apoptosis, a developmental programme or genotoxic agent activates a B cell lymphoma 2 homology 3 (BH3)-only protein, such as BIM, which stimulates the release of cytochrome *c* from mitochondria. Cytochrome *c* promotes the assembly of the apoptosome, which is a heptameric complex that comprises apoptotic protease-activating factor 1 (APAF1), pro-caspase 9 and cytochrome *c*. Mature caspase 9 generated by the apoptosome then cleaves pro-caspase 3 to form mature active caspase 3.

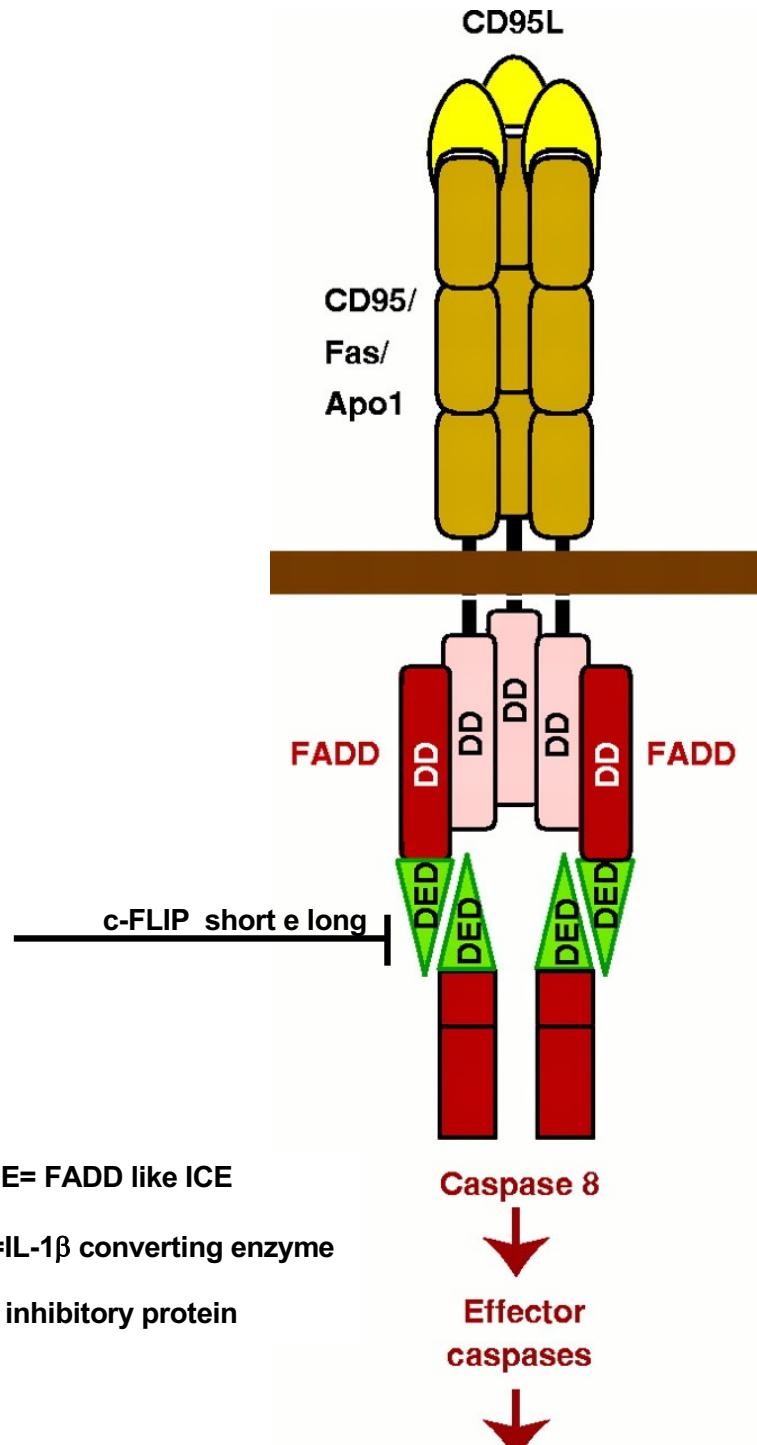
Thus, both the extrinsic and intrinsic apoptotic pathways lead to the activation of caspase 3, which cleaves more than **500 cytoplasmic proteins** to induce apoptotic cell death. The intrinsic and extrinsic pathways of apoptosis are involved in various immunological processes, including the selection of lymphocytes, activation-induced cell death in T cells, the killing of infected cells and tumour cells, the resolution of fibrosis and graft-versus-host disease. CTL, cytotoxic T lymphocyte.

# Recettori di morte



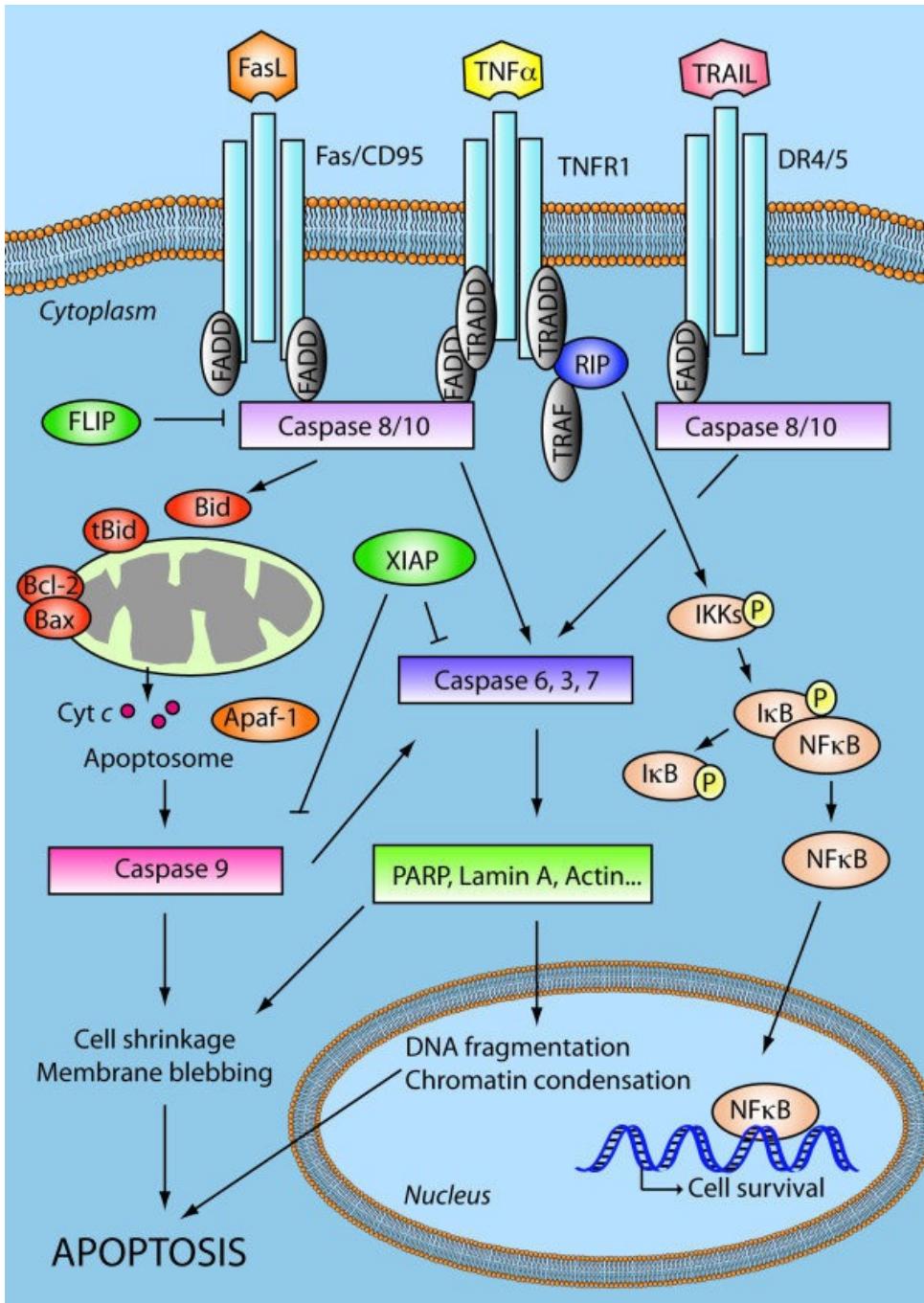
**Fas:** espresso da molti tipi cellulari in diversi tessuti

**FasL:** espresso da cellule Th1, CTL e NK



## Fas come esempio di recettore di morte “Death receptor”

- Segnali esterni inducono i recettori di morte (DR)
- per esempio: CD95 (Fas/Apo-1)
- Ogni trimero CD95L si lega a 3 CD95 portando al clustering DD.
- FADD (dominio di morte associato a Fas) si lega tramite il proprio DD
- L'oligomerizzazione della caspasi 8 guida l'attivazione attraverso l'autoscissione
- La caspasi 8 attiva quindi le caspasi effettive a valle
- Inizio dell'apoptosi



# Apoptosis Signalling network

The **extrinsic apoptosis pathway** is activated upon ligand binding to death receptors (TNFR1, Fas/CD95, DR4/5).

This results in activation of a caspase cascade and eventually cleavage of both cytoplasmic and nuclear substrates.

TNFR1 may promote survival signalling through activation of NFκB.

The intrinsic pathway involves release of apoptotic proteins from the mitochondria, formation of the apoptosome and subsequently caspase activation. Members of the BCL-2 protein family are involved in regulation of the intrinsic apoptotic pathway.

The extrinsic and the intrinsic pathways converge in a caspase cascade that results in cellular shrinkage, DNA fragmentation and eventually apoptosis.

Tumour necrosis factor receptor (TNFR), Tumour necrosis related apoptosis-inducing ligand (TRAIL), TNFR type 1-associated death domain protein (TRADD), Death receptor (DR), Fas-associated protein with death domain (FADD), TNFR associated factor (TRAF), Receptor interacting protein (RIP), FLICE-like inhibitory protein (FLIP), X-linked inhibitor of apoptosis protein (XIAP), Nuclear factor kappa-light-chain-enhancer of activated B cells (NFκB), Inhibitor of κB (IκB), IκB kinases (IKKs), cytochrome c (Cyt c), Apoptotic protease activating factor 1 (Apaf-1).

# Malattie autoimmuni umane a tratto mendeliano: le ALPS

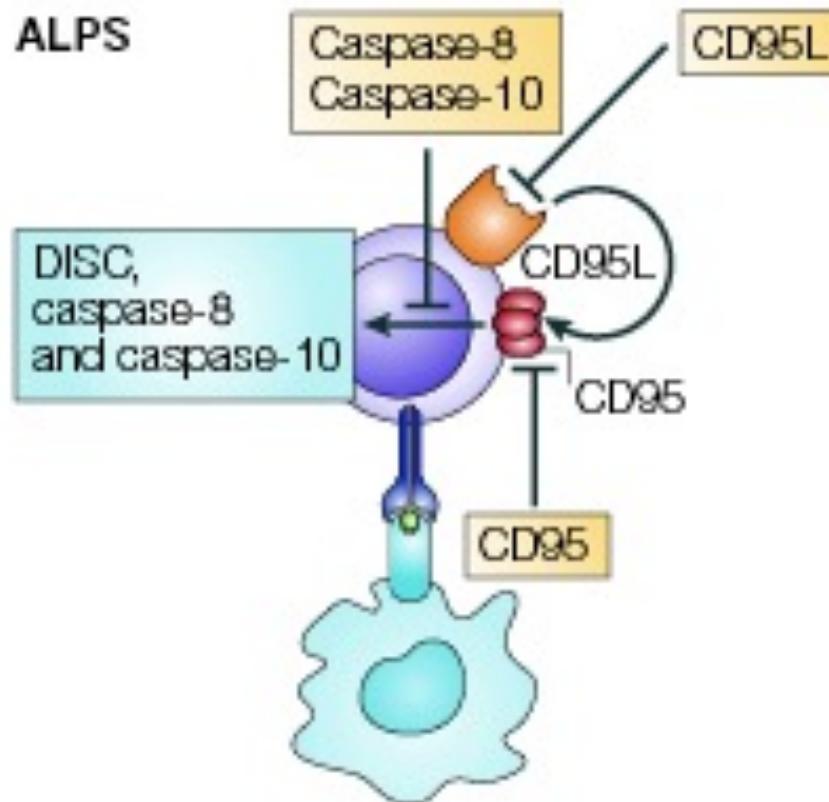
(sindrome linfoproliferativa autoimmune)

Causate da  
mutazioni di:

Fas

FasL

Caspasi 8 o 10

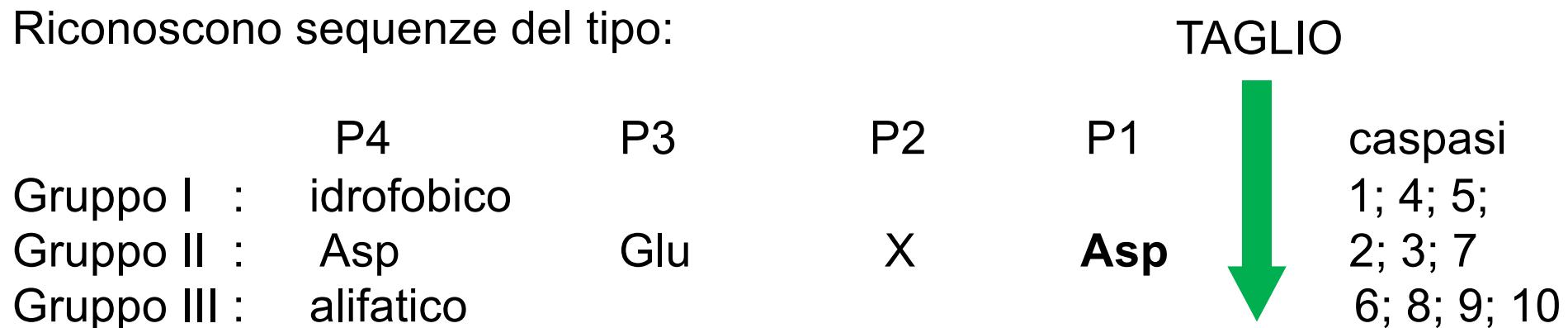


ALPS1a	Autoimmunity, hypergammaglobulinaemia, lymphoproliferation, and excessive numbers of CD3 <sup>+</sup> CD4 <sup>-</sup> CD8 <sup>-</sup> αβ-TCR <sup>+</sup> T cells	10q24.1	CD95 (heterozygous, germ line) CD95 (heterozygous, somatic)
ALPS1b	Autoimmunity, hypergammaglobulinaemia, lymphoproliferation, and excessive numbers of CD3 <sup>+</sup> CD4 <sup>-</sup> CD8 <sup>-</sup> αβ-TCR <sup>+</sup> T cells	1q23	CD95L
ALPS2	Autoimmunity, hypergammaglobulinaemia, lymphoproliferation, and excessive numbers of CD3 <sup>+</sup> CD4 <sup>-</sup> CD8 <sup>-</sup> αβ-TCR <sup>+</sup> T cells	2q33-2q34	CASP8 CASP10

# Caspasi: esecutori centrali del programma di morte

sono proteasi cisteiniche altamente conservate  
(distinte in **iniziatrici**/attivatrici e **effettrici**/esecutrici)  
13 membri identificati nell'uomo

Riconoscono sequenze del tipo:



sono raggruppate per specificità del substrato, similitudine di sequenza e omologia strutturale

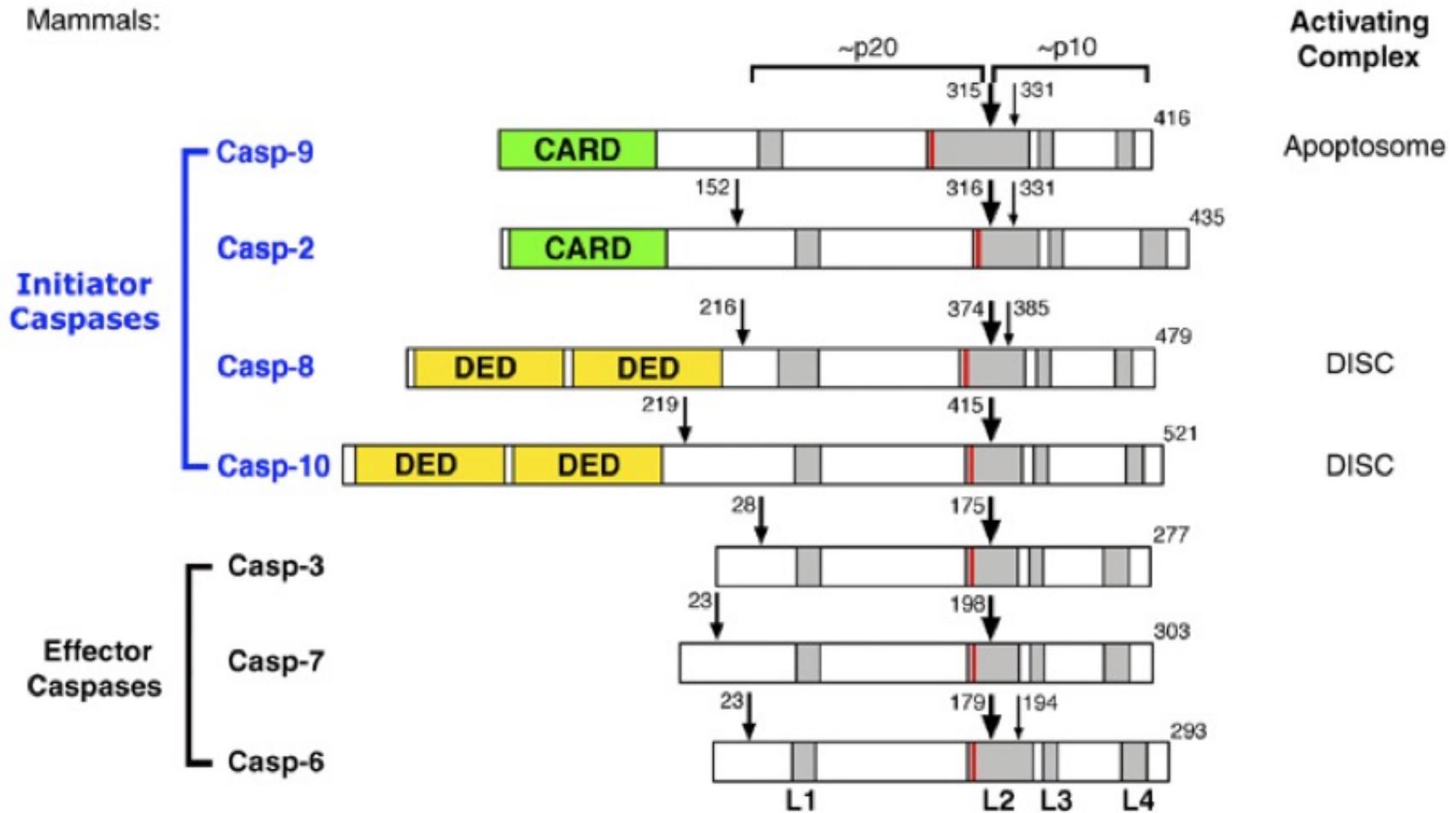
Sono sintetizzate come zimogeni (precursori inattivi) composti da tre domini:



La forma matura è un eterotetramero p20/p10 + p20/p10

# Caspasi apoptotiche

Mammals:

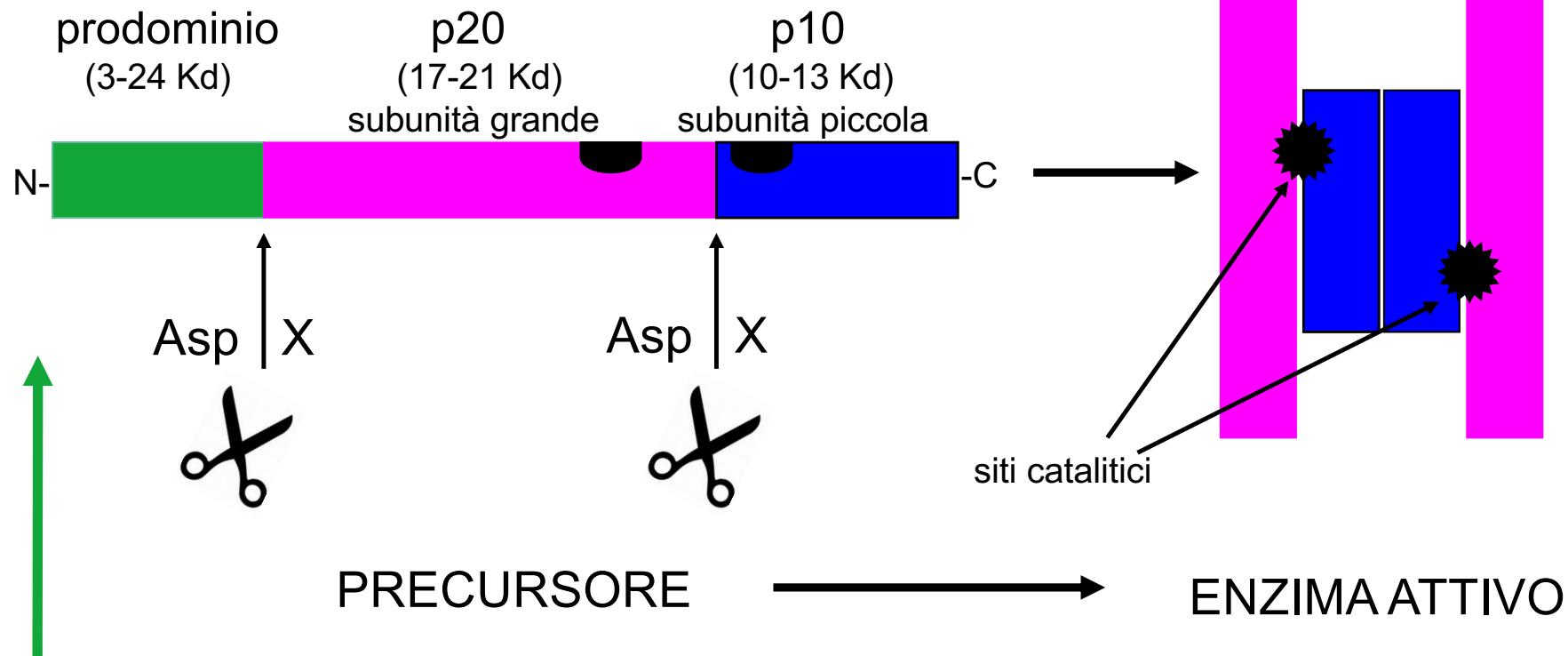
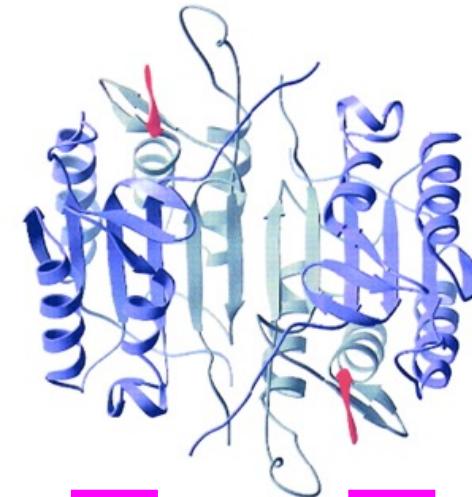


**Caspasi iniziatrici: Casp-9, Casp-2, Casp-8 e Casp-10**

**Caspasi effettivi: Casp-3, 6 e 7**

Domini di reclutamento all'N-terminale delle caspasi iniziatrici: **CARD** e **DED**

# Attivazione delle caspasi

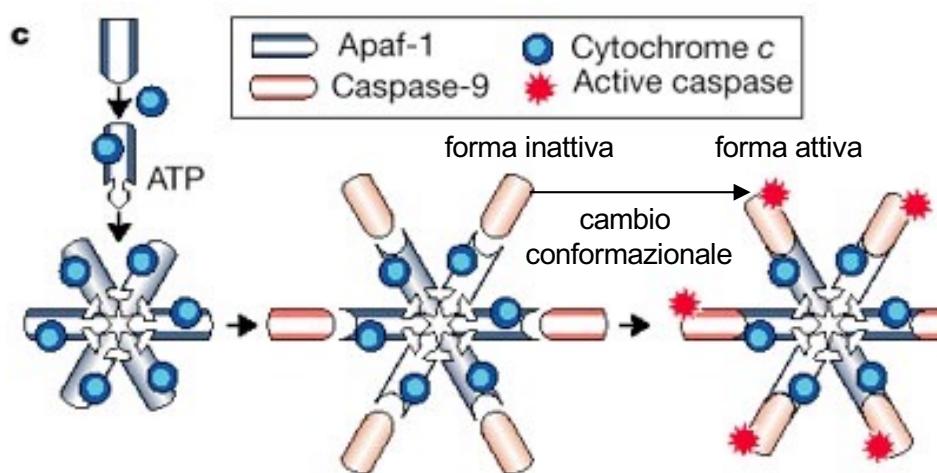
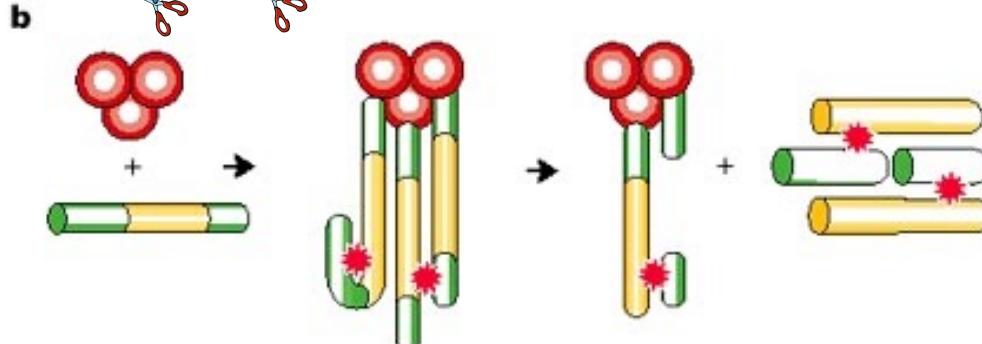
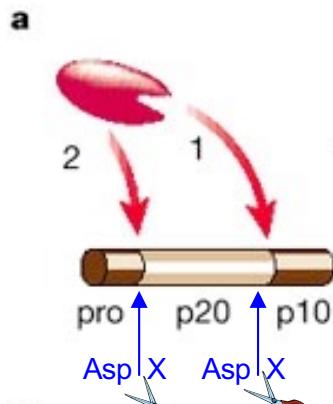


Modulo di reclutamento per l'interazione proteina-proteina

**DED**=death effector domain (caspasi 8 e 10)

**CARD**=caspase activation and recruitment domain (caspasi 2 e 9)

# Meccanismi di attivazione delle caspasi



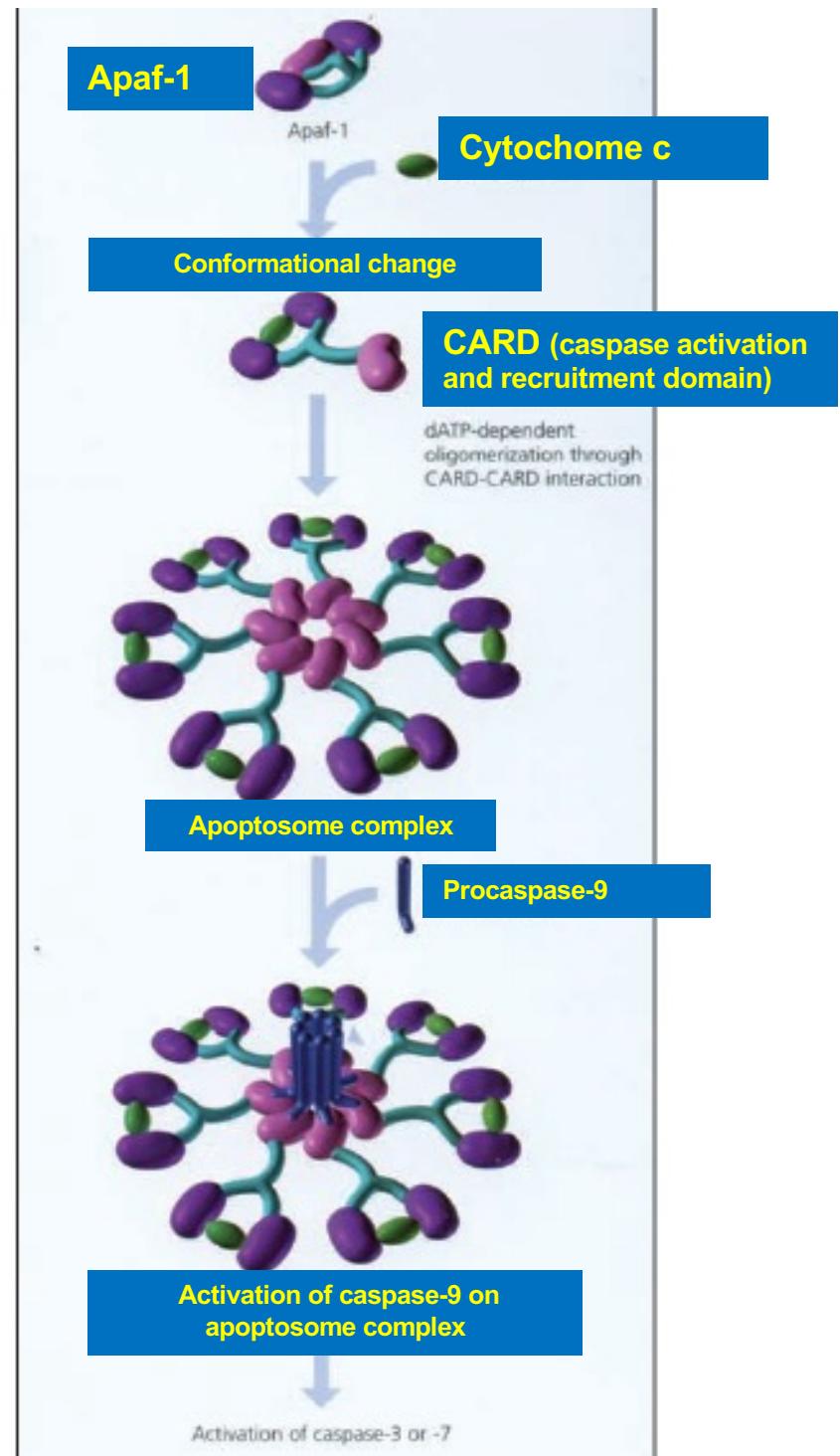
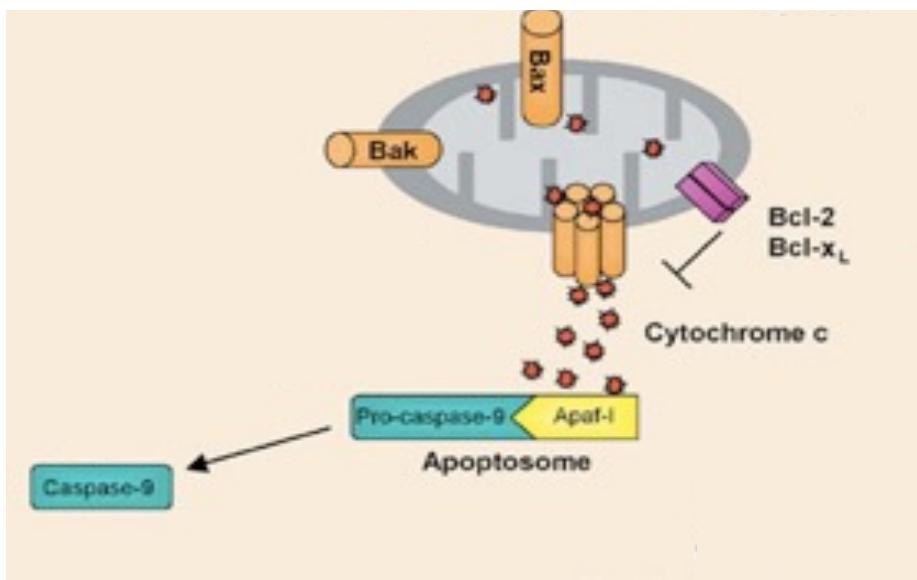
**a)** Proteolisi da parte di caspasi o granzimi B (anche autocatalitica): meccanismo di attivazione delle caspasi effettive 3, 6, 7

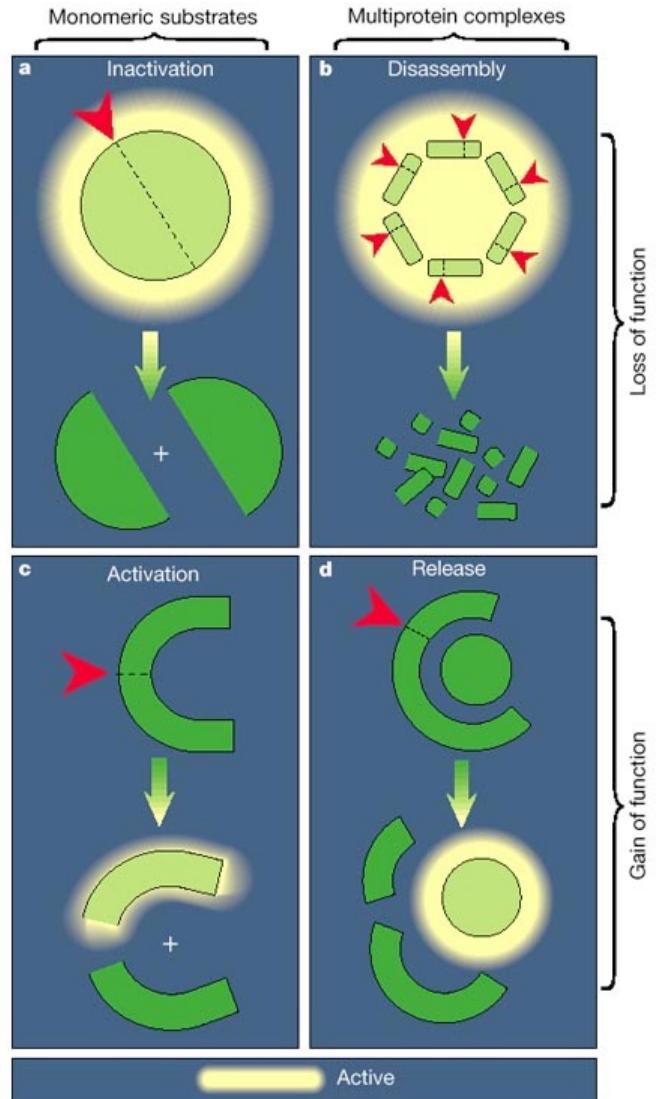
**b)** Attivazione autocatalitica: meccanismo delle caspasi 8 e 2

**c)** Formazione di un oloenzima: meccanismo di attivazione della caspasi 9

# Processo di formazione dell'apoptosoma ed attivazione della caspasi 9

- Il citocromo c rilasciato dal mitocondrio lega il monomero APAF1 nel citosol, portando alla sua oligomerizzazione in una struttura eptamerica simile a una ruota chiamata apoptosoma
- L'apoptosoma recluta e attiva la procaspasi 9
- La caspasi 9 successivamente attiva la caspasi 3 e 7





## Esiti dell'azione delle caspasi: attivazione o inattivazione

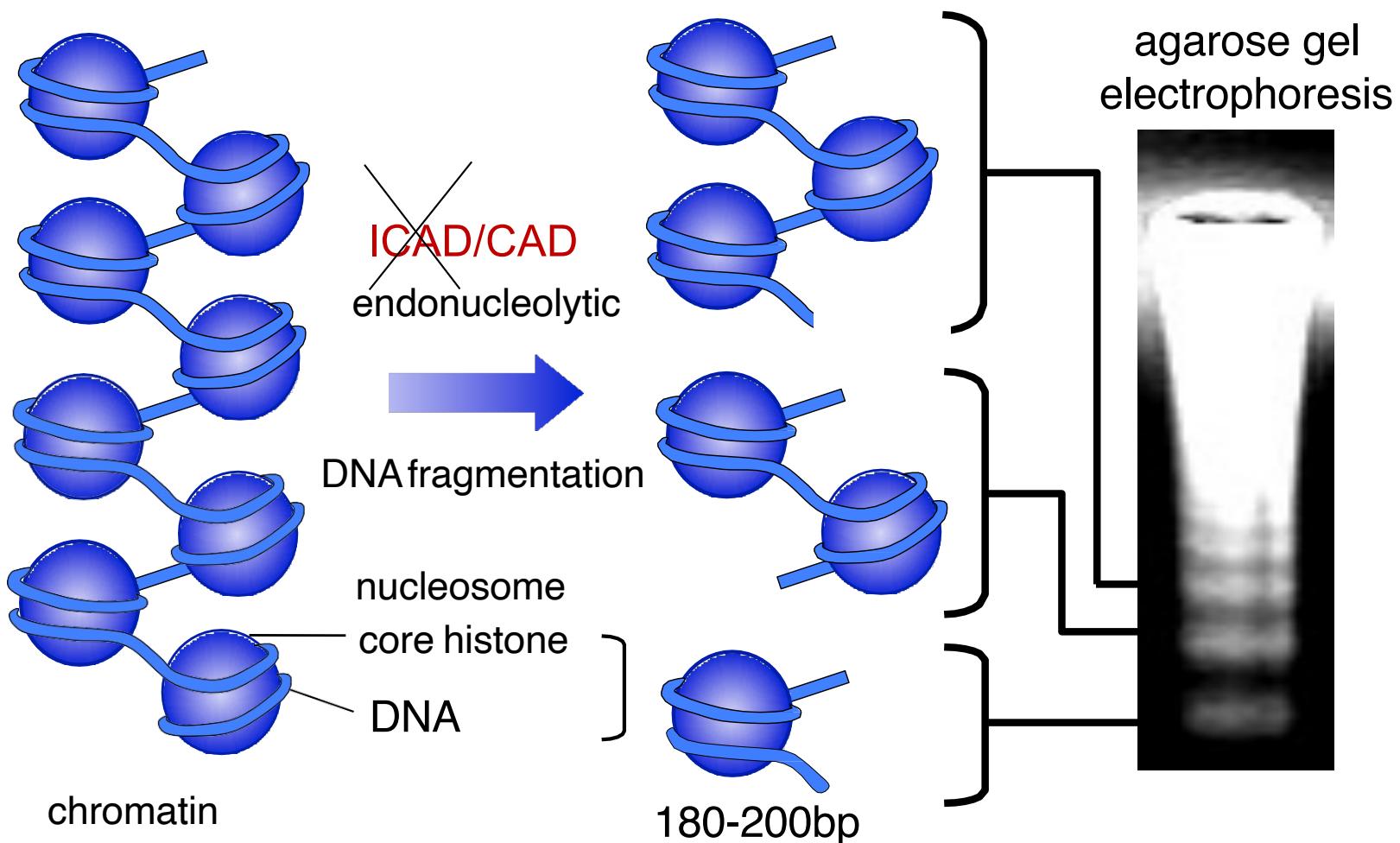
La scissione proteolitica da parte delle caspasi può portare a risultati diversi, a seconda della natura del substrato e dell'esatta posizione del sito di scissione nella sequenza primaria. Il risultato più semplice, e probabilmente più frequente, è la perdita di attività biologica (pannelli a, b nella figura sottostante). I substrati delle caspasi spaziano da enzimi a singola catena polipeptidica (ad esempio, la **poly ADP-ribose polymerase**) a strutture macromolecolari complesse (ad esempio, la **nuclear lamin network**). Anche una proteolisi limitata da parte delle caspasi può comportare un aumento di attività biologica (c, d). In alcuni casi (ad esempio, **Bcl-2 or Bcl-xL**), i prodotti scissi antagonizzano la proteina a lunghezza intera (forme dominanti-negative). In altri casi, la rimozione di domini o subunità inibitorie determina un aumento dell'attività biologica (ad esempio, **Bid** e **CAD/ICAD**).

Le caspasi 2, 3, 6, 7, 8, 9, 10 sono coinvolte principalmente nell'apoptosi.

Le caspasi 1, 4, 5, 13, 14 hanno come ruolo primario l'elaborazione delle citochine durante l'infiammazione e la morte cellulare proinfiammatoria.

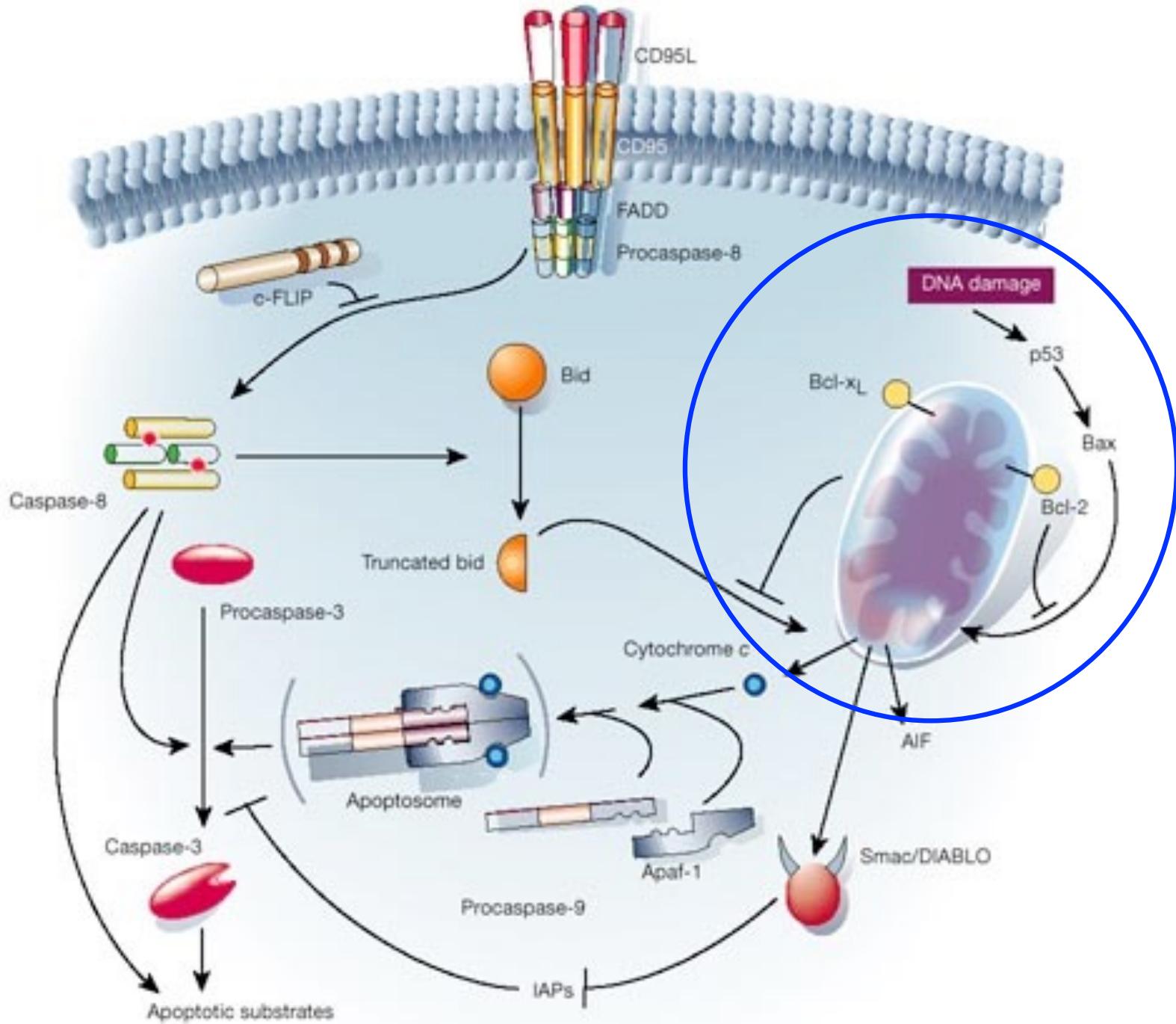
## Taglio del DNA nelle regioni inter-nucleosomali

Il DNA viene visualizzato come un ladder di 180-200 bp a causa della scissione del DNA nelle regioni tra i nucleosomi



Il taglio del DNA è effettuato da CAD (Caspase-activated DNase) dopo rimozione (taglio) del suo inibitore ICAD da parte della caspase 3

# I due pathway dell'apoptosi



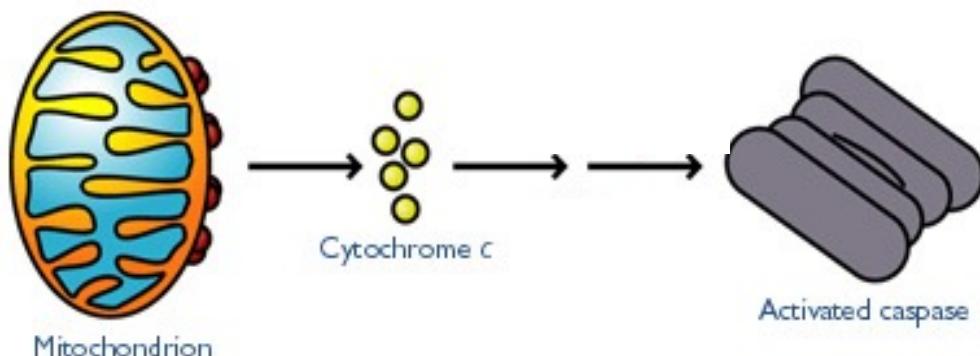
## Via mitocondriale della cascata apoptotica

viene solitamente attivata in risposta a stress cellulare (danno al DNA, stress ossidativo e ipossia)



I mitocondri contengono fattori pro-apoptotici come il citocromo c (cyt c) e AIF (fattore che induce l'apoptosi).

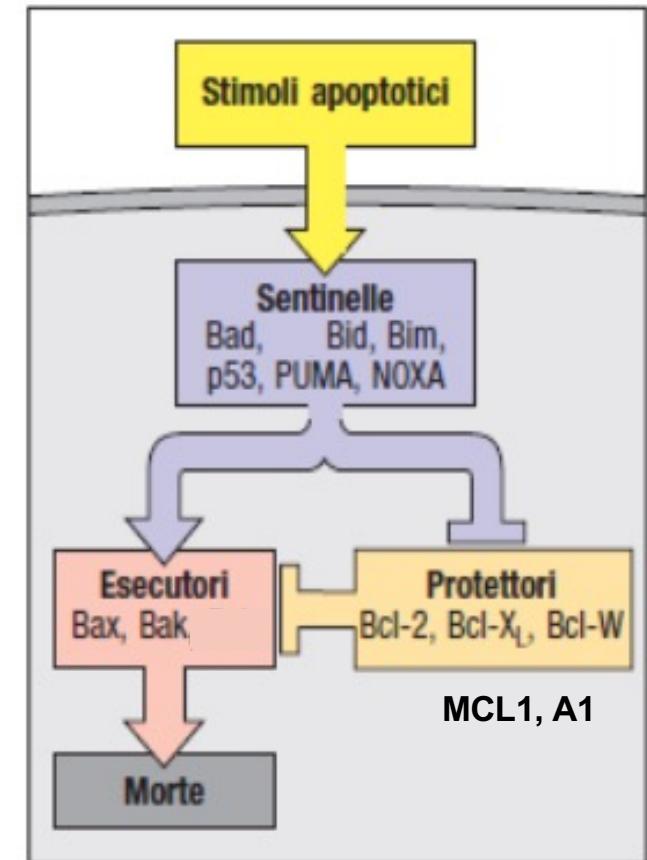
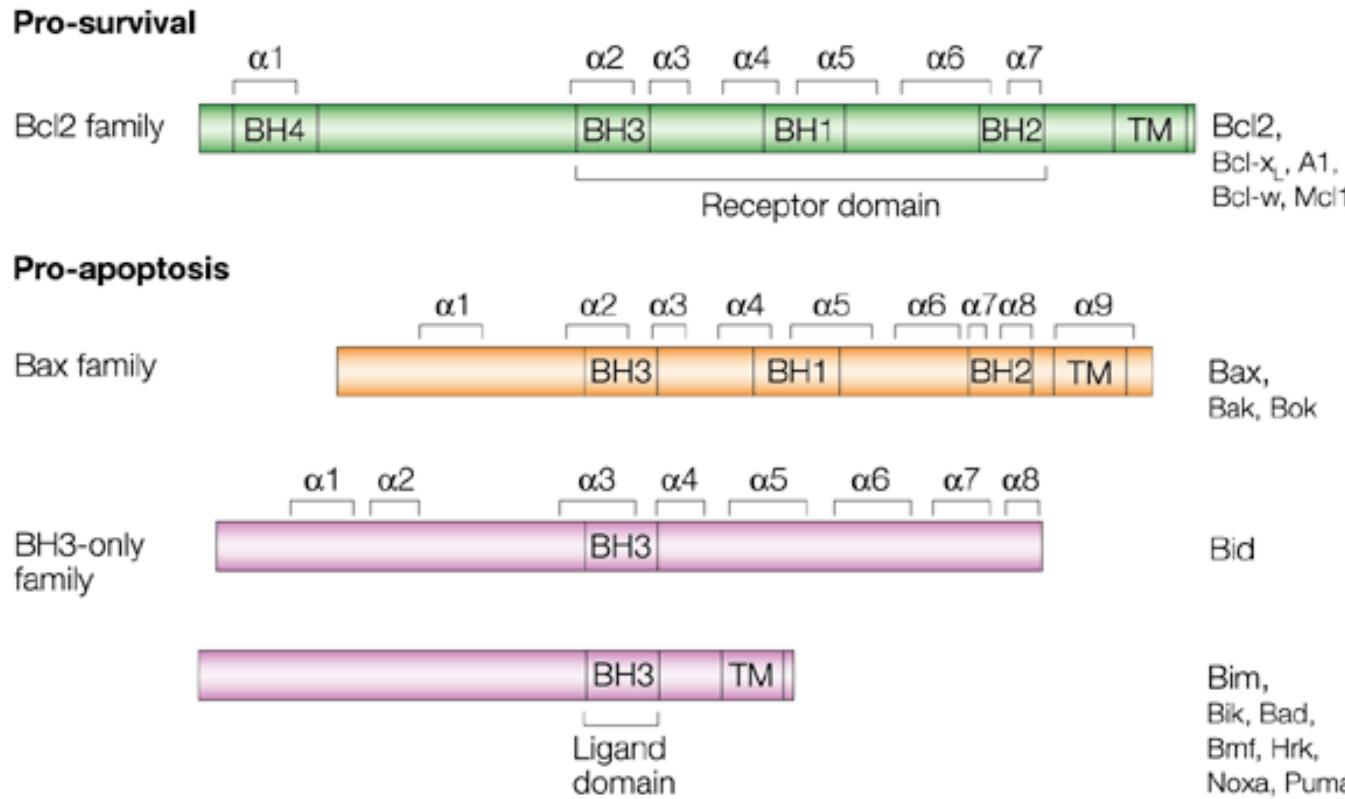
Questi sono innocui quando sono sequestrati in modo sicuro all'interno dei mitocondri ma attivano la cascata delle caspasi una volta rilasciati nel citosol.



Nel citosol **il citocromo C** si lega ad Apaf-1 (Apoptosis Activation Factor-1) permettendo l'attivazione della procaspasi 9 → **caspasi 9** attiva, in seguito alla formazione dell'apoptosoma

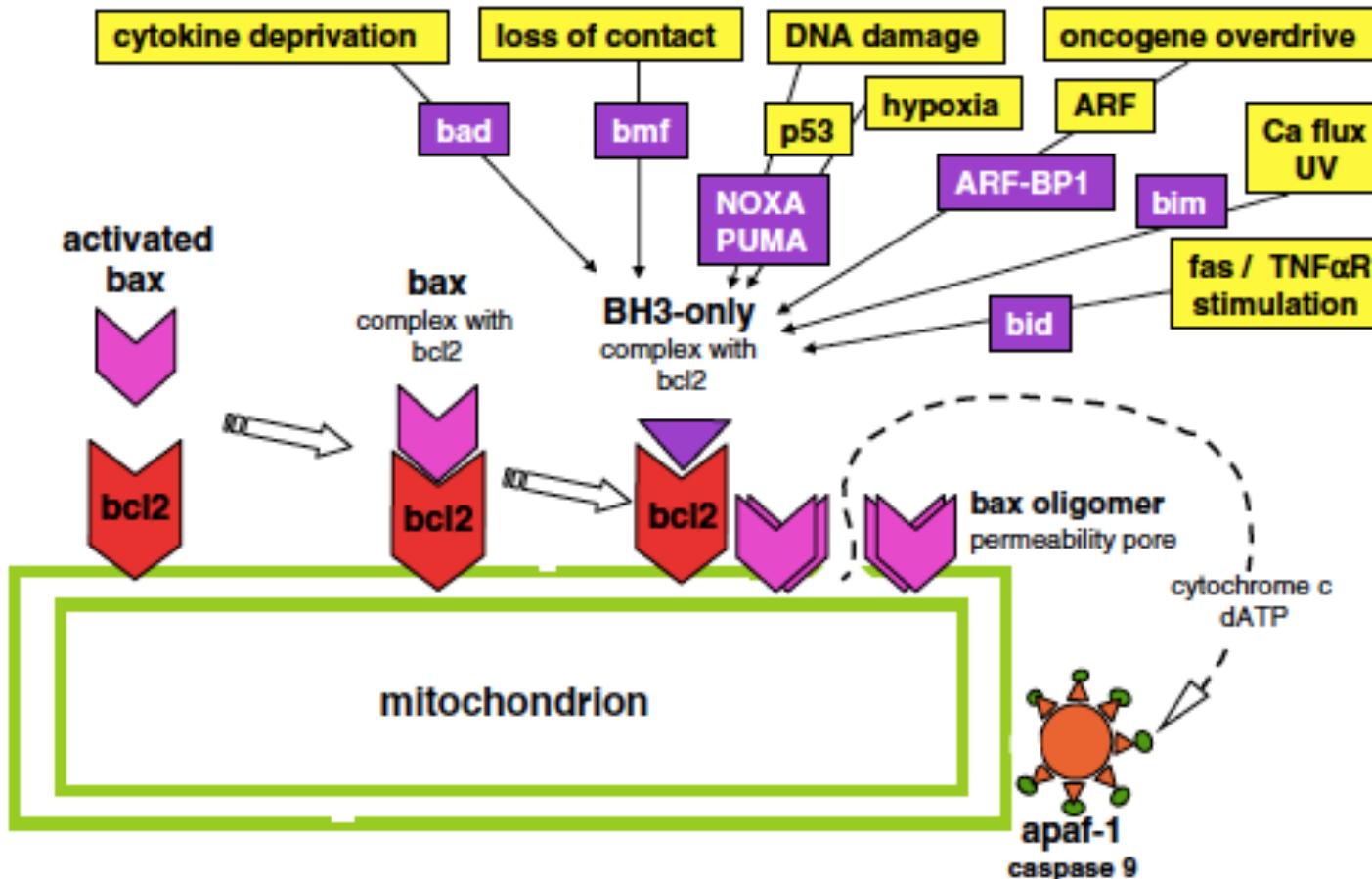
# Membri della famiglia Bcl-2

sono proteine chiave che regolano la via intrinseca dell'apoptosi, controllando il rilascio di fattori pro-apoptotici dal mitocondrio



**Bcl-2** e **Bak** sono sempre legati alla membrana mitocondriale; gli altri membri passano dal citosol (forme inattive) alla membrana mitocondriale (forme attive). Le proteine "BH3 only" si attivano per proteolisi, defosforilazione ed altri meccanismi.

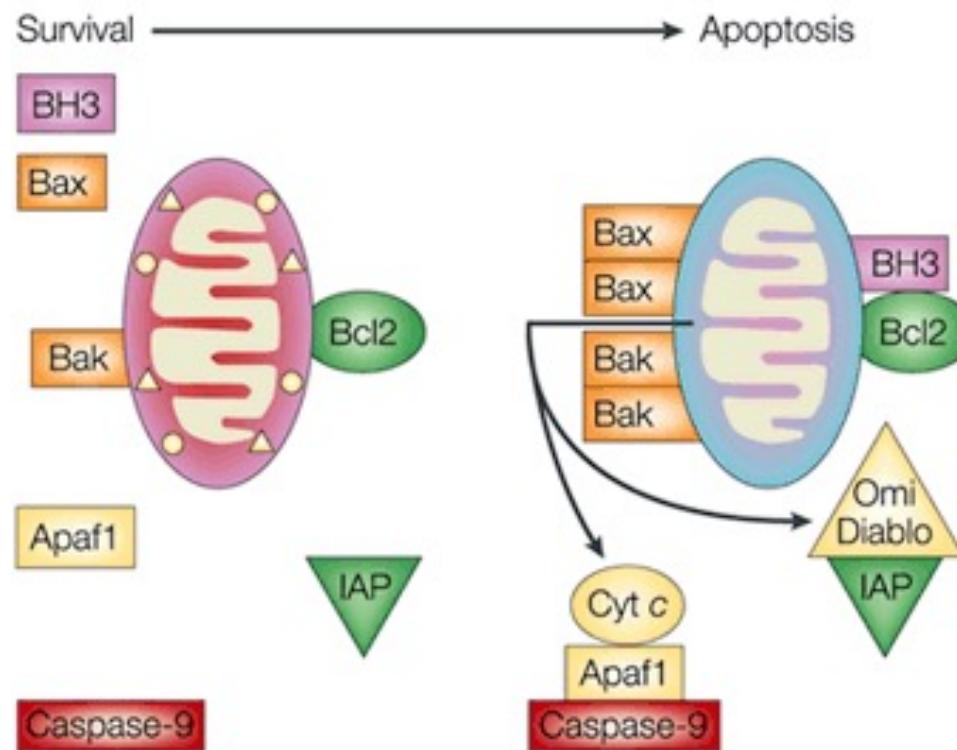
# Interazione tra membri della famiglia BCL2



Diagrammatic representation of the interaction of BH3-only members of the BCL2 family with the bax/bak-BCL2/BCL<sub>XL</sub> complexes on mitochondrial membranes, relative to a variety of injury stimuli

# L'integrità mitocondriale è controllata dai membri della famiglia Bcl-2

## b Mammals: mitochondrial integrity model



Membri pro-apoptotici:

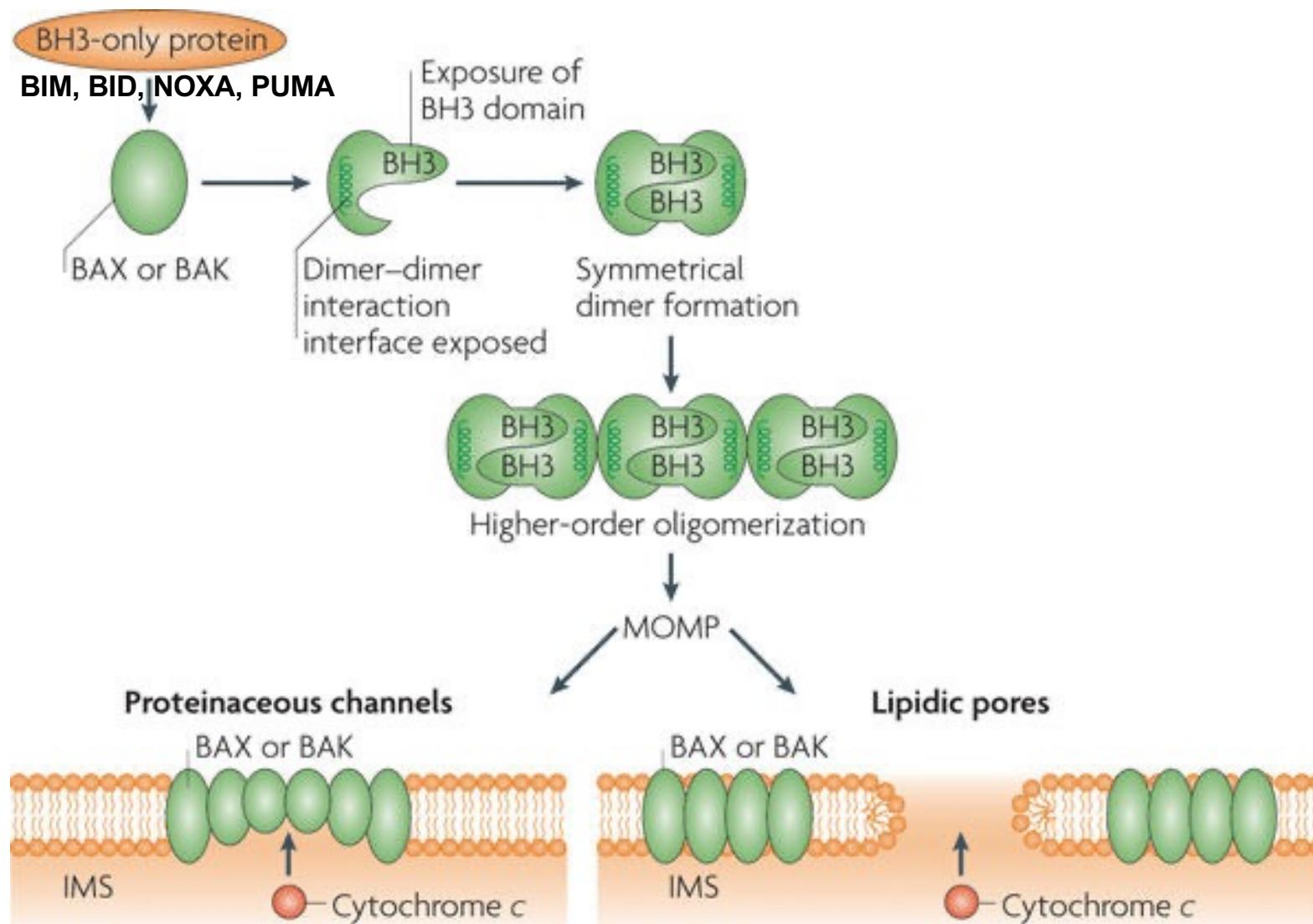
**Bax e Bak** (effettori/esecutori)

Bid, Bim e Puma (attivatori diretti)

Bad, BIK, BMF, Noxa  
("sensitizer"/derepressori)

Bcl2 and its anti-apoptotic homologues guard mitochondrial membrane integrity until neutralized by a BH3-only protein. Bax and Bak then form homo-oligomers within the mitochondrial membrane, resulting in the release of cytochrome c, which activates Apaf1, allowing it to bind to and activate caspase-9. Other pro-apoptotic molecules that exit the mitochondria include Omi and Diablo, which antagonize inhibitor of apoptosis proteins (IAPs). Protein complexes are shown as juxtaposed boxes or triangles. Apaf1, apoptotic protease-activating factor 1; cyt c, cytochrome c.

# Oligomerizzazione di BAX o BAK



# Ruolo dei membri della famiglia Bcl-2 nella permeabilizzazione della membrana del mitocondrio: possibili meccanismi

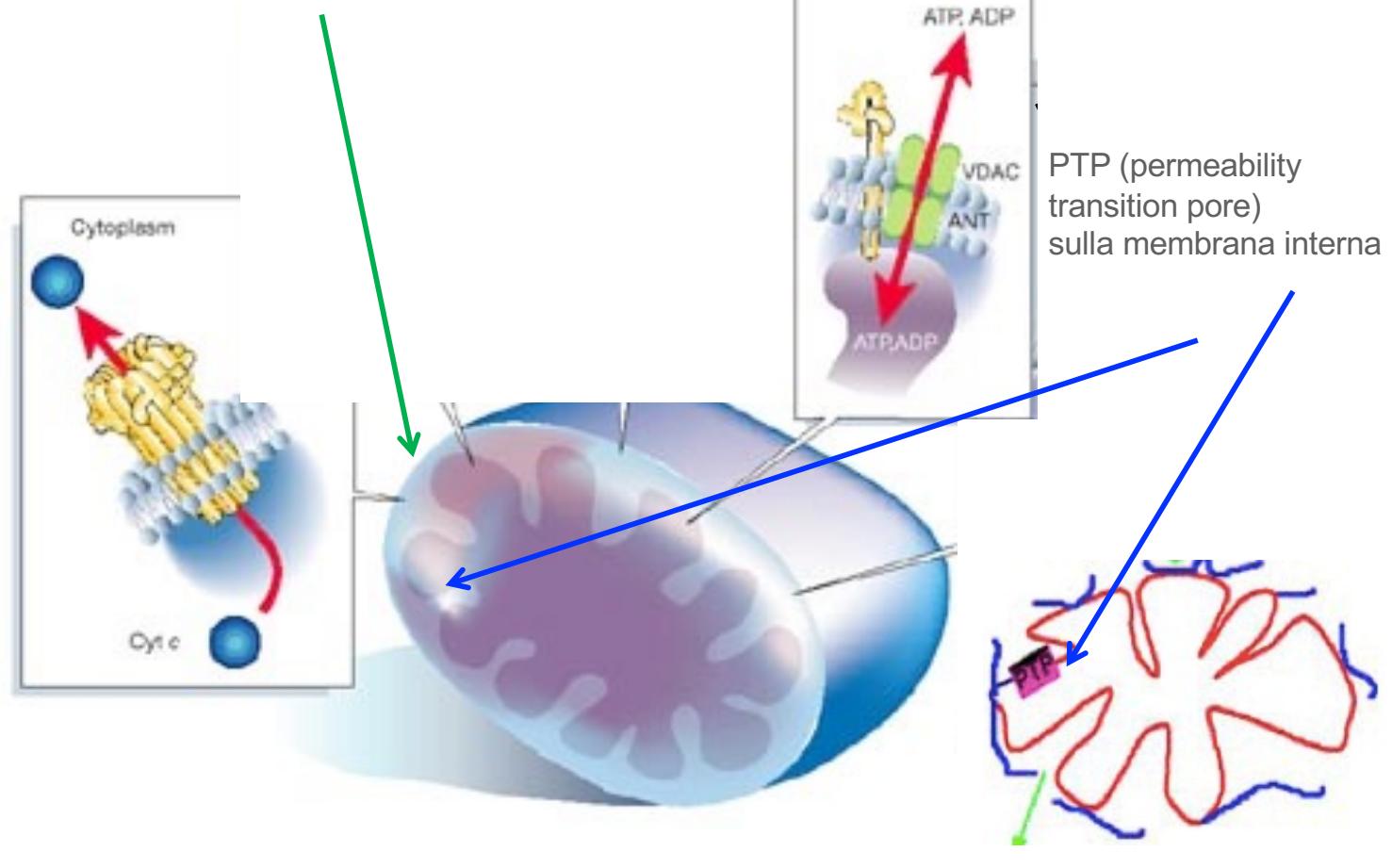
Canali mitocondriali coinvolti nella transizione della permeabilità della membrana del mitocondrio (MPT):

MAC (mitochondrial apoptosis-induced channel) sulla membrana esterna

Bax e Bak  
oligomerizzano formando  
il **MAC** un poro/canale  
attraverso cui fuoriesce il  
Citocromo c e gli altri  
fattori proapoptotici

La formazione del **MAC**  
è inibita da Bcl-2

Bcl2 e gli altri membri antiapoptotici  
interagiscono e bloccano alcune proteine  
del PTP quali ad es. VDAC (voltage  
dependent anion channel)  
Bax e Bak si associano a componenti del  
PTP dopo una sua persistente apertura



# Rilascio di citocromo C

