

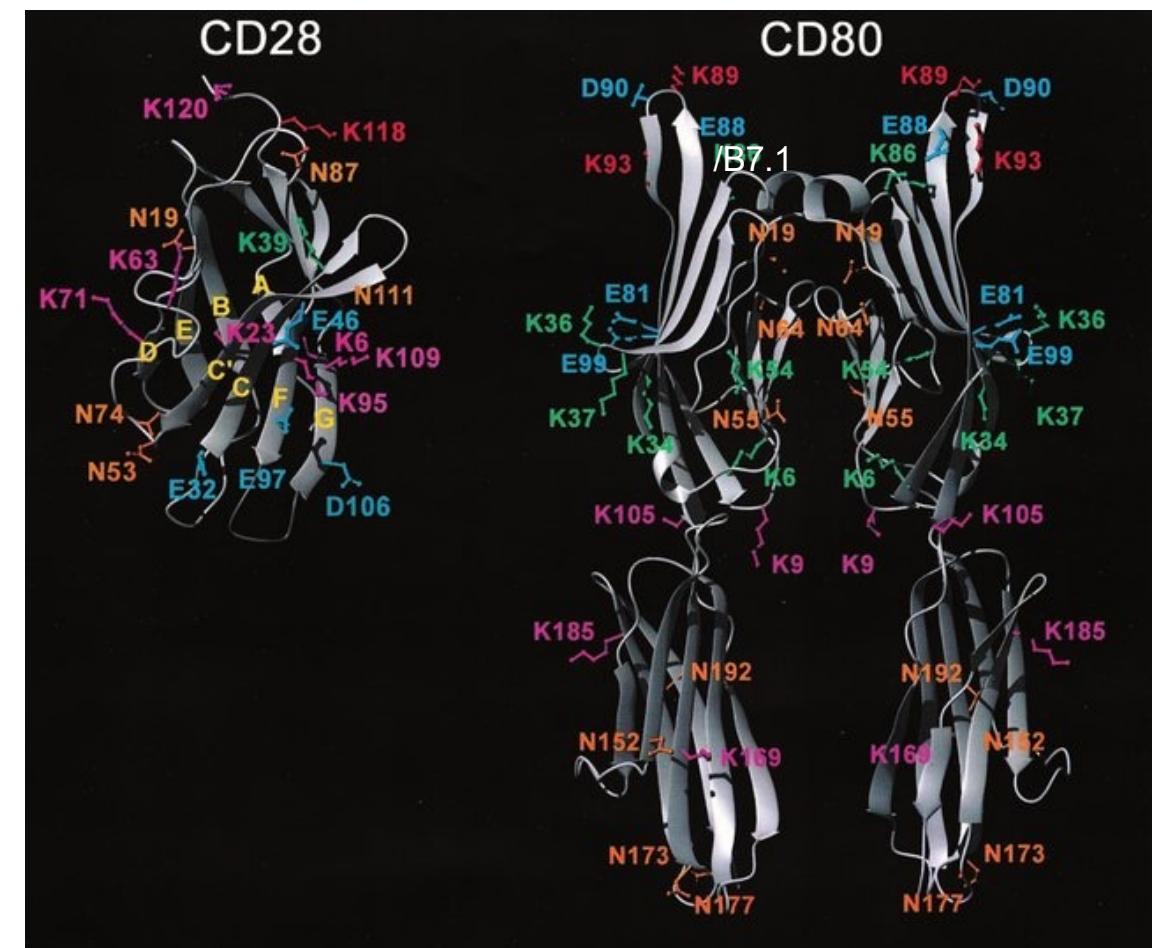
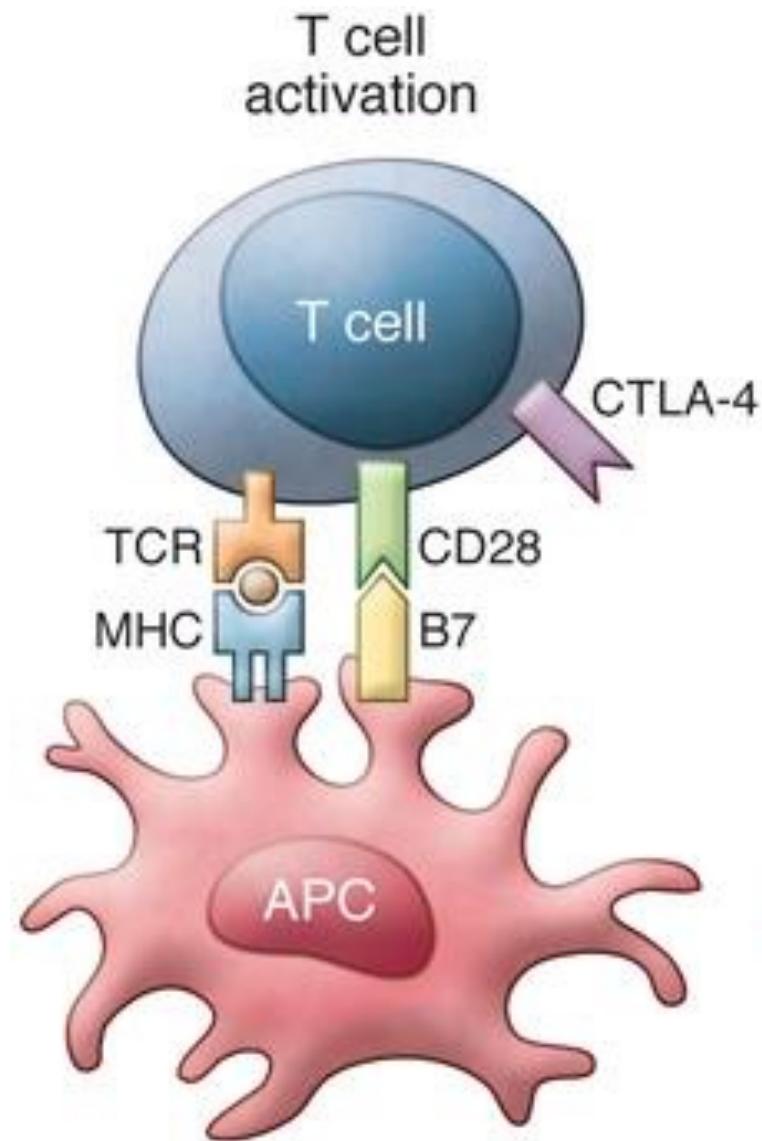
Codice OPIS 2025-26

KFFIQ8DY

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

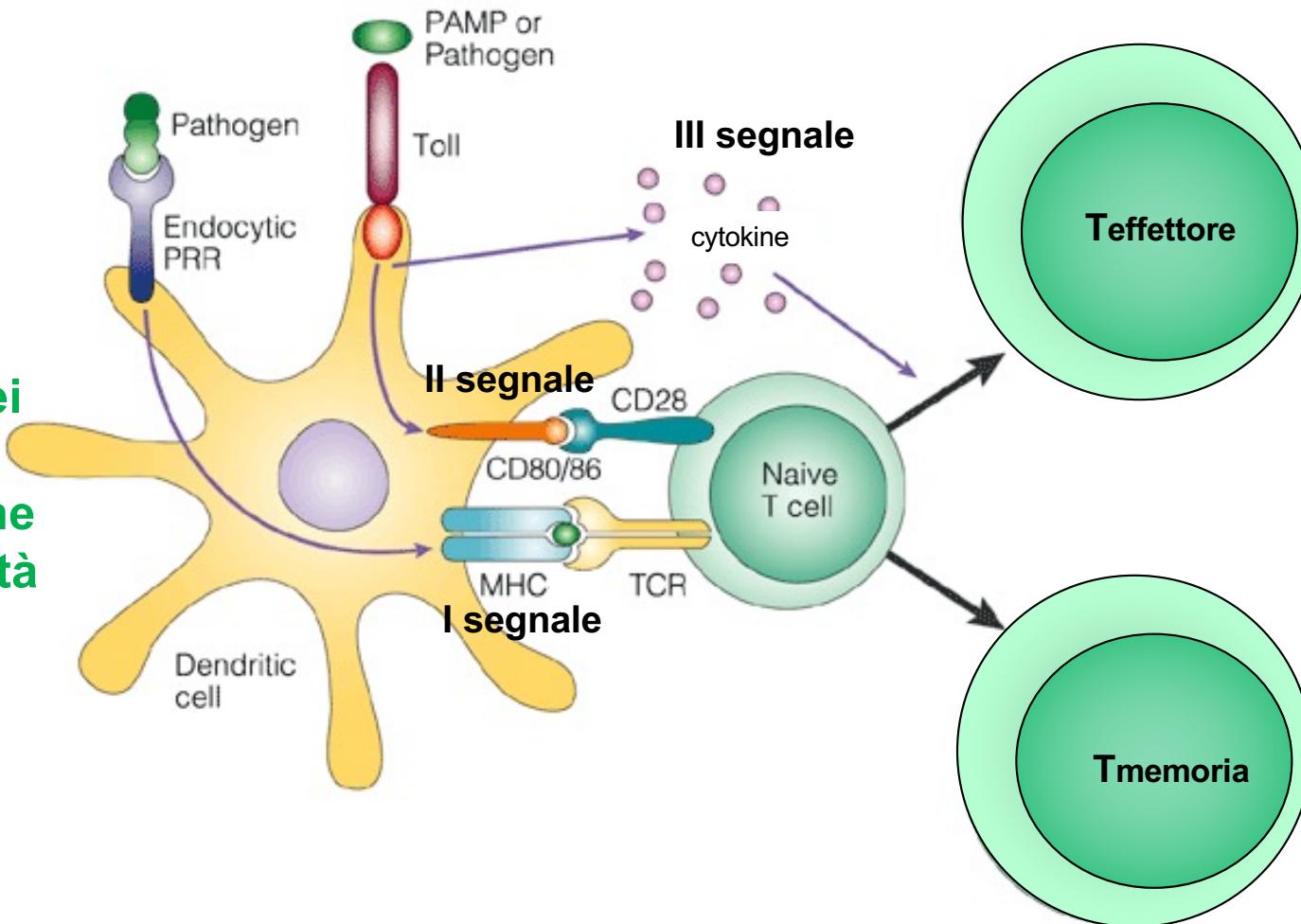
SCIENZE BIOLOGICHE (30857)

Molecole e vie di costimolazione



Riconoscimento dell'antigene da parte dei linfociti T naive

Ruolo degli adiuvanti nei vaccini (stimolazione dell'immunità innata)

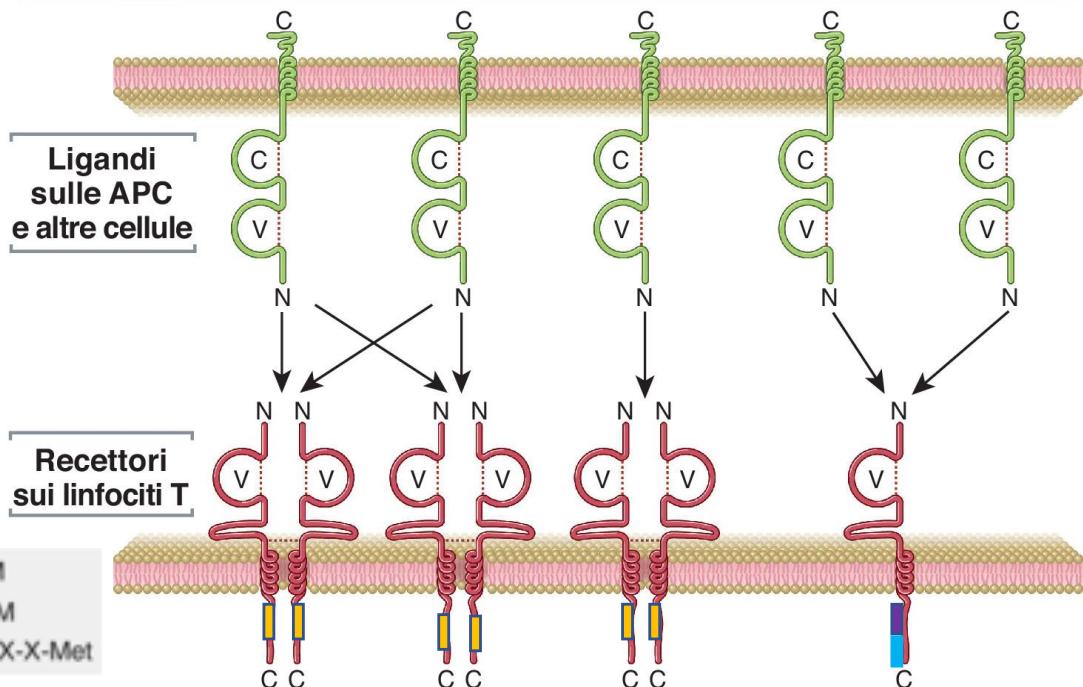


- **Tre segnali** servono ad un linfociti T naive per l'attivazione, proliferazione e differenziamento in linfocita T effettore e della memoria.
- L'assenza del secondo segnale (per mancata attivazione dell'immunità innata/infiammazione) determina **anergia** (mancata responsività funzionale).

Membri delle famiglie CD28 e B7

Molecole Costimolatorie/ (coinibitorie)

Espressione	DC; macrofagi, linfociti B	DC; macrofagi, linfociti B, altre cellule	DC; macrofagi, linfociti B; cellule endoteliali epiteliali e tumorali (solo PD-L1)		
Nome	B7-1 (CD80)	B7-2 (CD86)	ICOS-L (CD275)	PD-L1 (B7-H1, CD274)	PD-L2 (B7-DC, CD273)



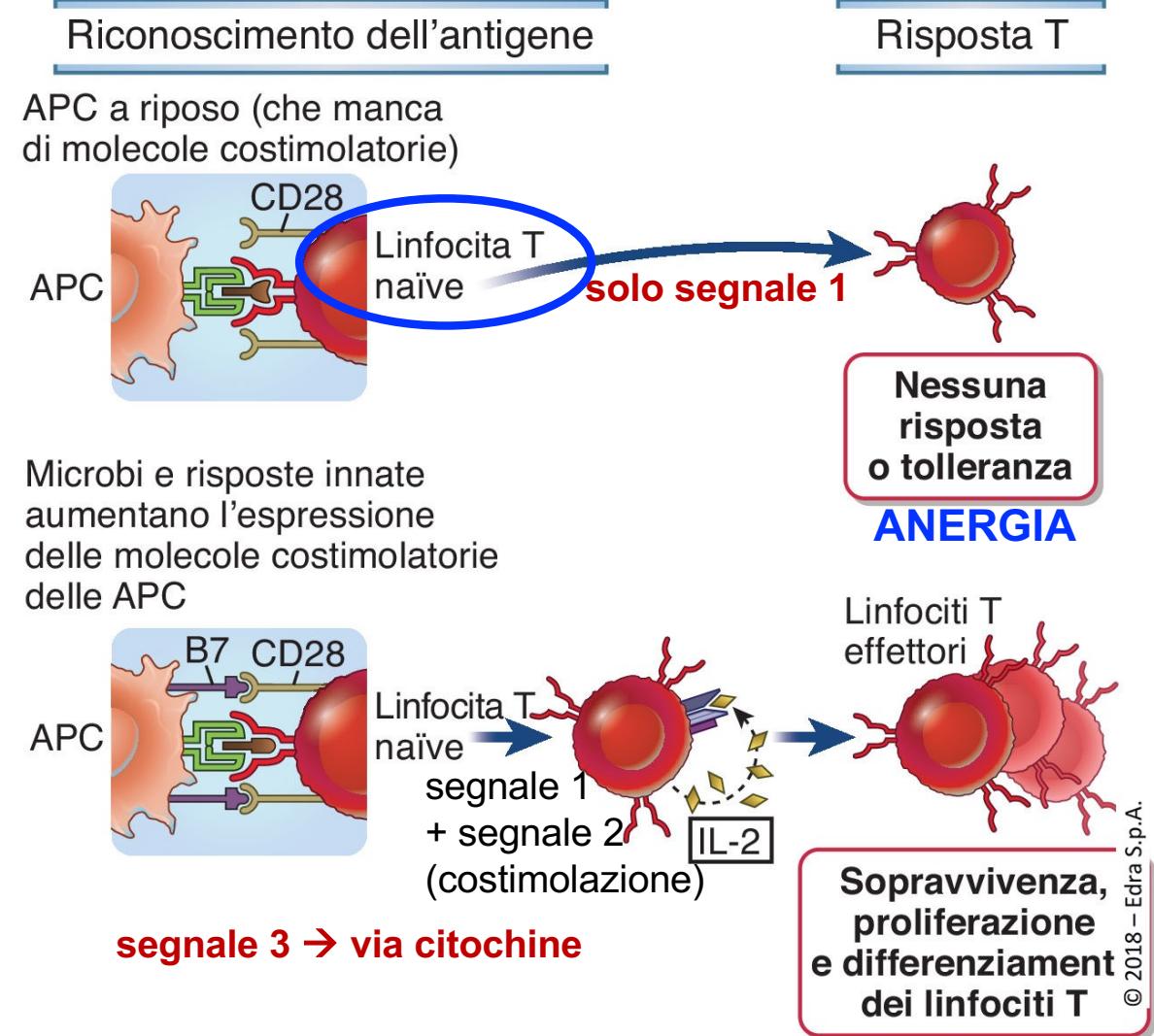
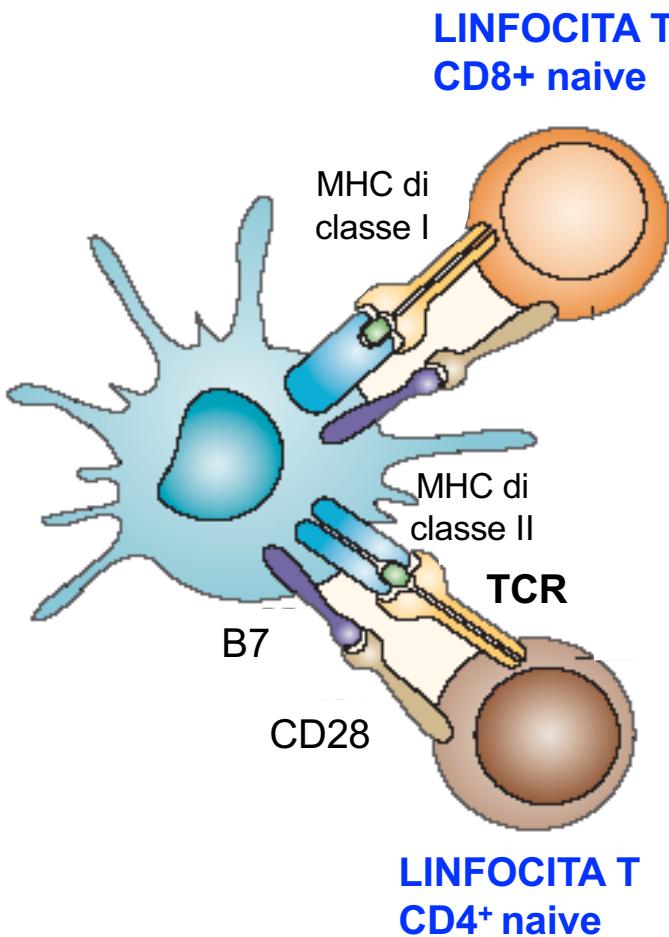
Recettori Costimolatori/ (coinibitori)

Nome	CD28	CTLA-4	ICOS	PD-1
Espressione sui linfociti T	Linfociti T naïve	Linfociti T regolatori e T linfociti attivati	Linfociti T attivati; linfociti T helper follicolari (T_{FH})	Linfociti T attivati
Funzione principale	Attivazione linfociti T naïve; attivazione della risposta immunitaria	Inibizione attivazione linfociti T	Generazione di linfociti T helper follicolari	Recettore inibitorio

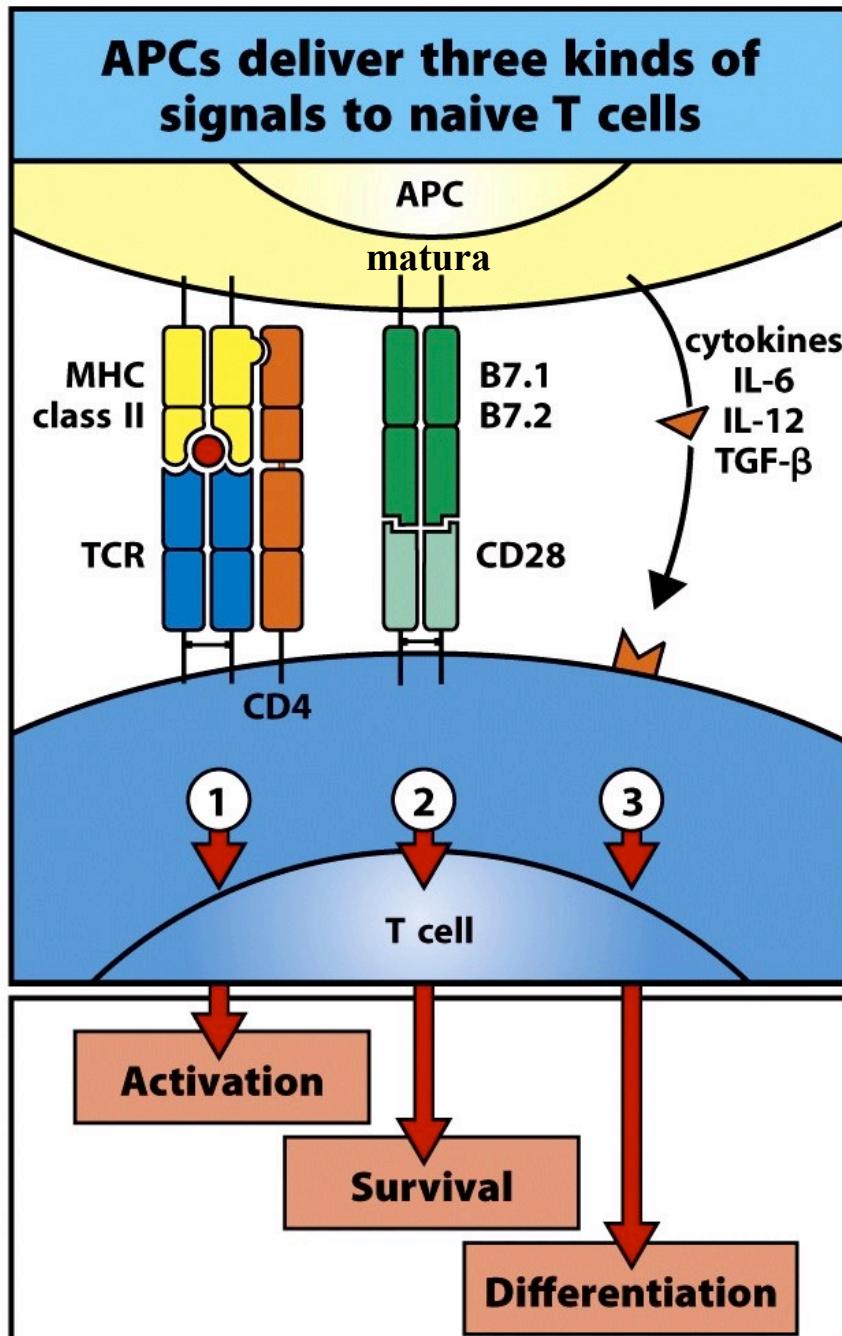
Membri della famiglia CD28

Tipo cellulare	Molecole costimolatorie (B7-1 e B7-2)
Cellule dendritiche	Costitutiva: aumenta con maturazione, IFN- γ e CD40/CD40L
Macrfagi	Indotta da TLR, IFN- γ e CD40/CD40L
Linfociti B	Indotta da CD40/CD40L (linfociti T) e BCR
Cellule endoteliali	Bassa; forse inducibile
Cellule epiteliali	Nessuna

CD28 ed il modello dei “due segnali”

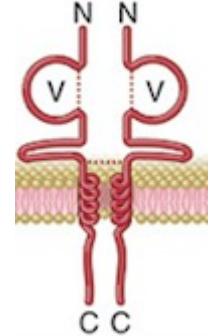


Segnali che attivano i linfociti T naive

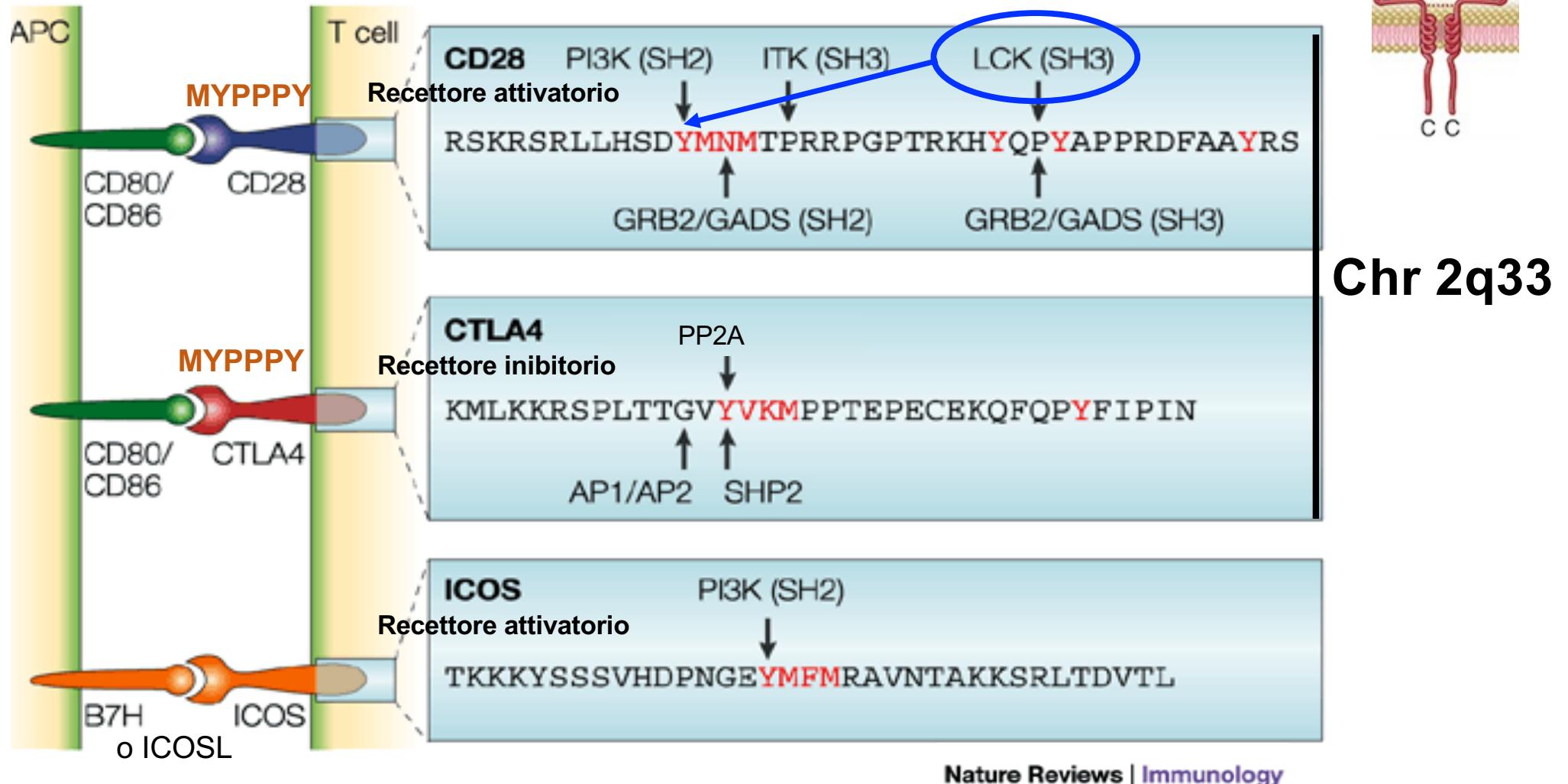


1. Riconoscimento dell'antigene (segnale 1)
2. Costimolazione (segnale 2)
3. Citochine (segnale 3)

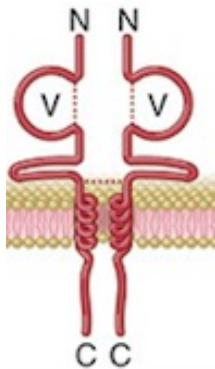
Sono segnali necessari per indurre proliferazione dei linfociti T naive e differenziamento in linfociti T effettori e di memoria



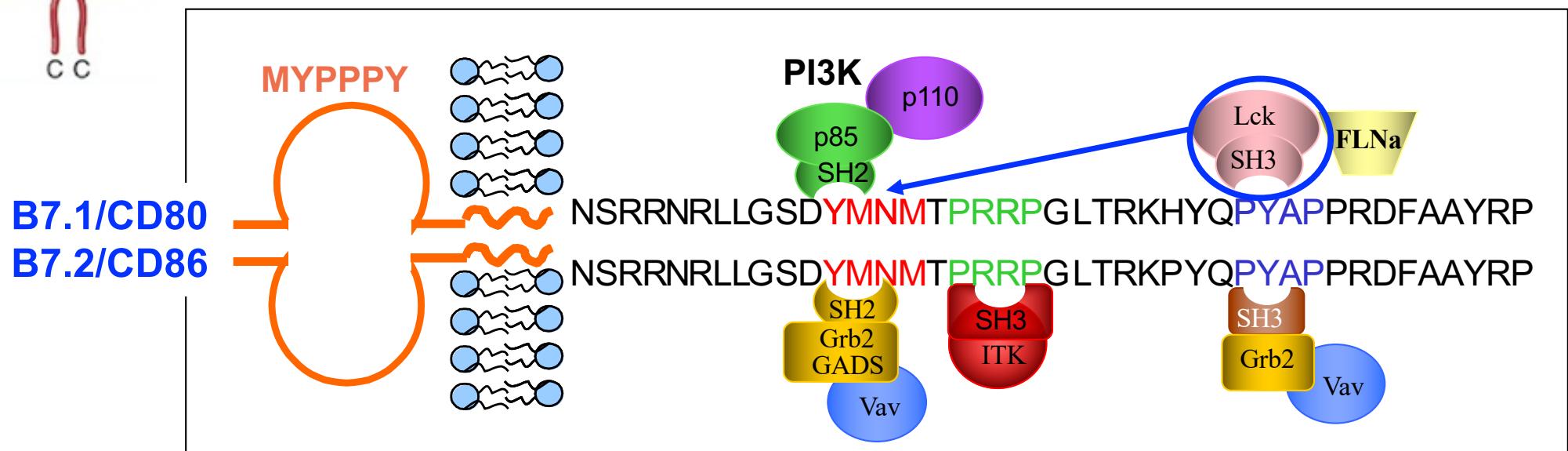
Comparazione tra CD28, CTLA4 e ICOS



MYPPPY: sequenza consenso presente nel dominio extracellulare del **CD28** e **CTLA4** coinvolta nell'interazione con B7.1 (CD80) e B7.2 (CD86)



Struttura della molecola CD28



CD28 recluta:

Class 1A PI3K: che fosforila PIP2 generando PIP3 che funge da sito di legame per il dominio PH di **PLC γ** , **Itk** e per **PDK1** e **Akt** con attivazione di quest'ultimo.

Vav1: GEF per Rac1 (attivazione JNK) e Cdc42 (polimerizzazione actina)

FLNA (filamina A): coadiuva la polimerizzazione dell'actina e la stabilizza

Effetti della co-stimolazione mediata da CD28

- **Rimodellamento del citoscheletro di actina** (tramite attivazione di **Vav**) e sua stabilizzazione ad opera della filamina
- **Attivazione PI3K/AKT**: regolazione crescita, metabolismo e inibizione dell'apoptosi (over-espressione di Bcl-X_L e di Bcl-2; repressione dell'espressione geni pro-apoptotici)
- **Attivazione selettiva di NF-κB** (blocco dell'anergia e espressione di citochine)
- Potenziamento di **NF-AT, AP1, NF-κB** (espressione di IL-2 e CD25, IFN γ , IL-4 etc)

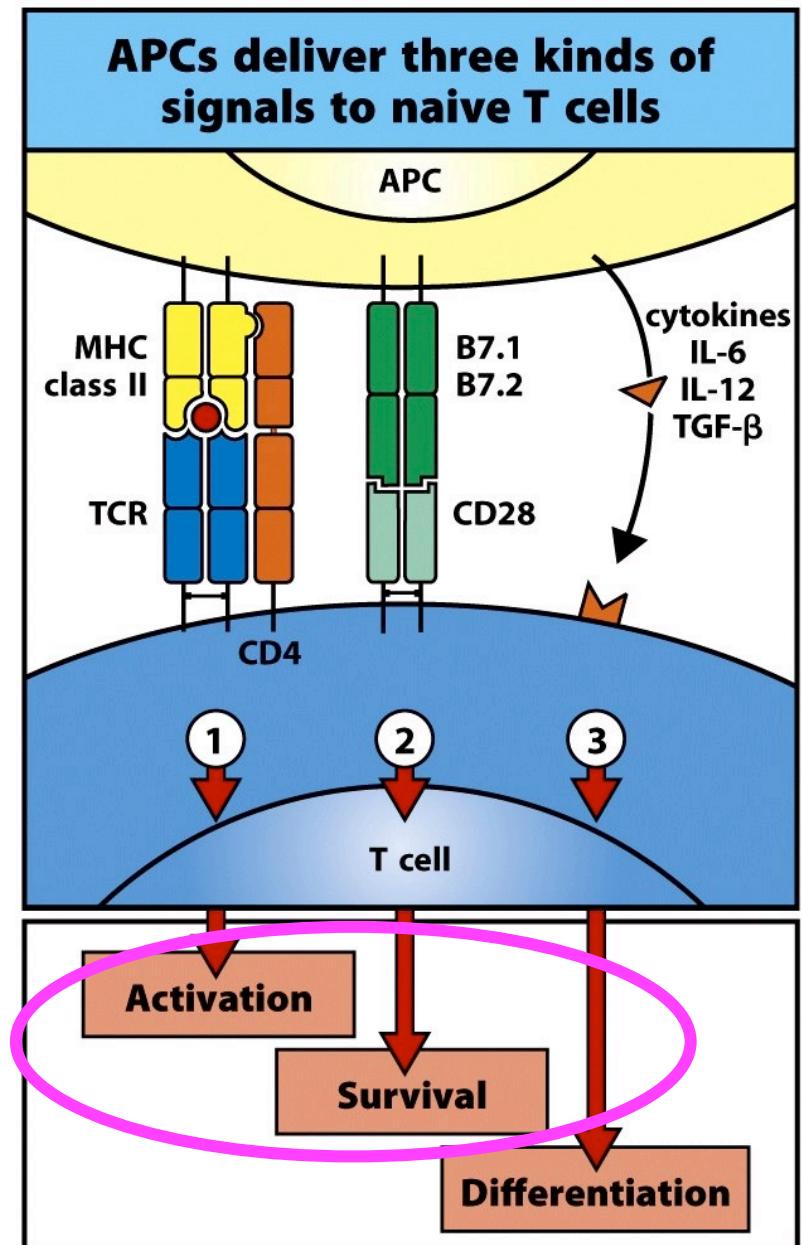
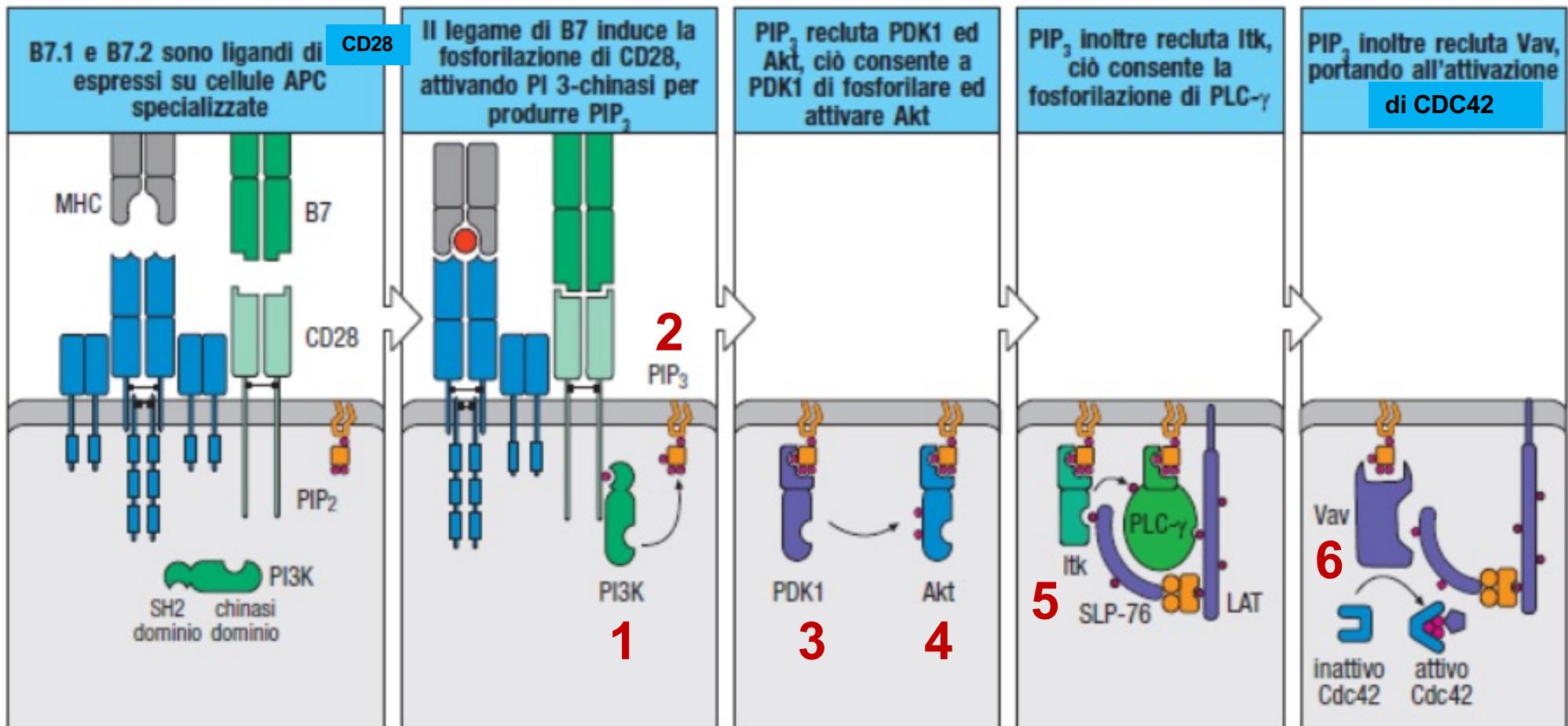


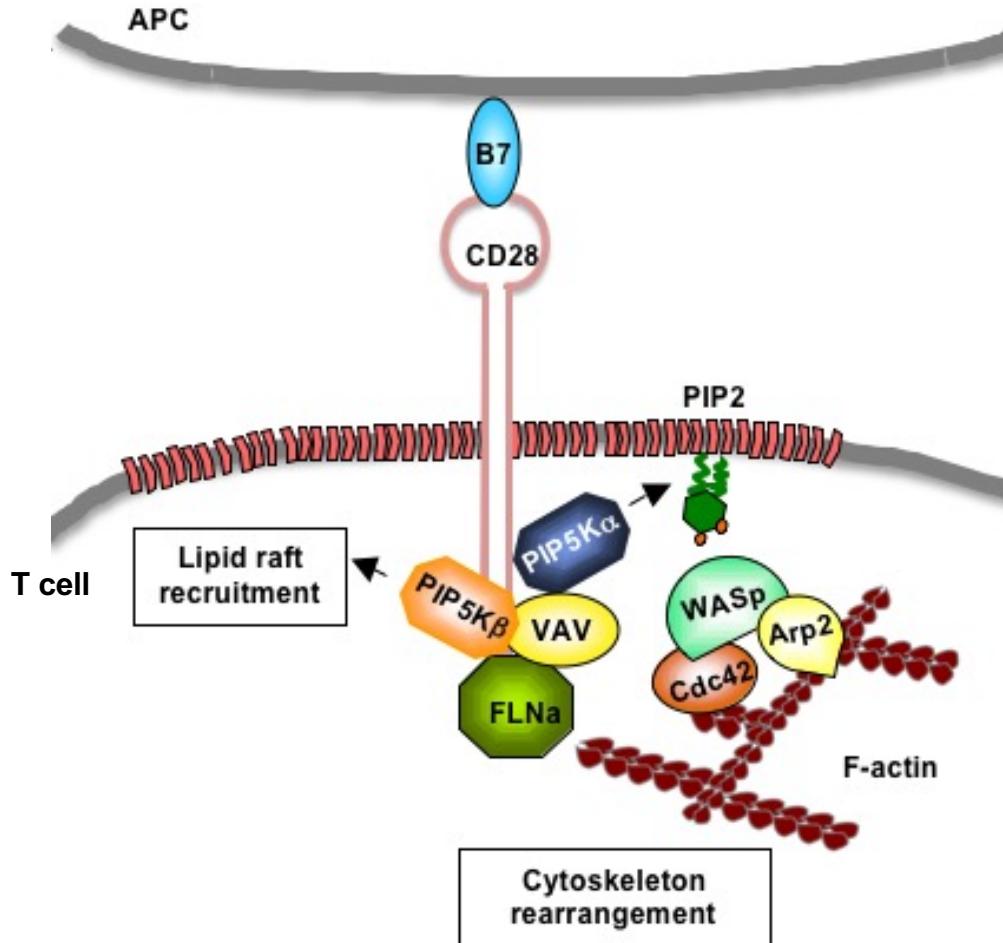
Figure 8-19 Immunobiology, 7ed. (© Garland Science 2008)

CD28 trasduce segnali che potenziano le vie di trasduzione del segnale indotte via TCR



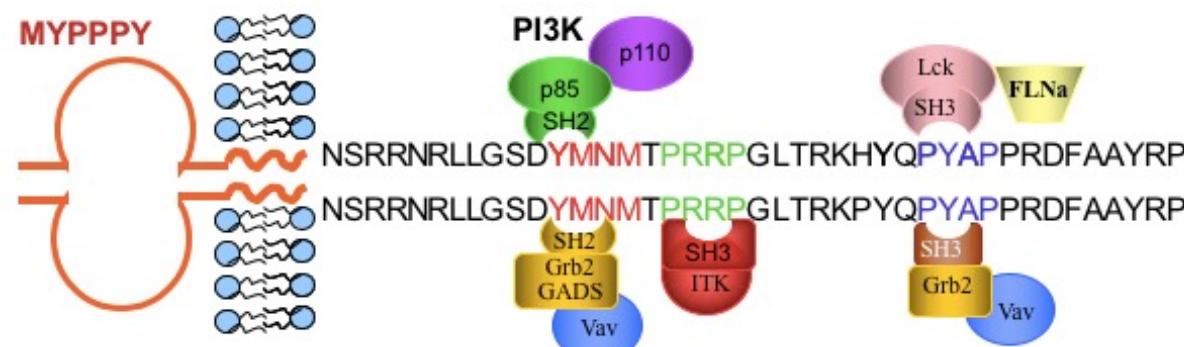
I ligandi di CD28 ovvero CD80 e CD86 sono espressi solo su cellule specializzate presentanti l'antigene. L'impegno di CD28 induce la sua fosforilazione in tirosina che attiva la **(1) PI3K** con successiva produzione di **(2) PIP3** da PIP₂ che recluta diversi enzimi tramite il loro dominio PH portandoli insieme ai loro substrati nella membrana. PIP3 recluta la proteina chinasi-fosfoinositide dipendente **(PDK1) (3)** che fosforila la protein chinasi **Akt (4)** che viene attivata e induce sopravvivenza cellulare e stimola il metabolismo cellulare. Inoltre, il reclutamento della chinasi **Itk (5)** sulla membrana è fondamentale per la piena attivazione di **PLC γ** . PIP3 recluta anche **VAV (6)** portando all'attivazione di CDC42 e inducendo polimerizzazione dell'actina.

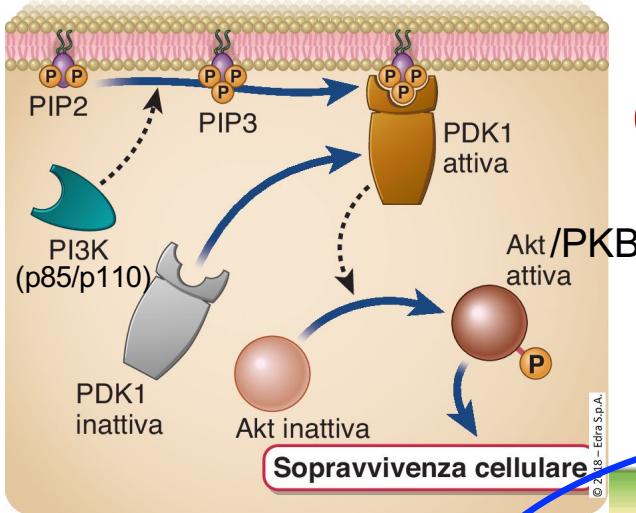
CD28 e riarrangiamento del citoscheletro



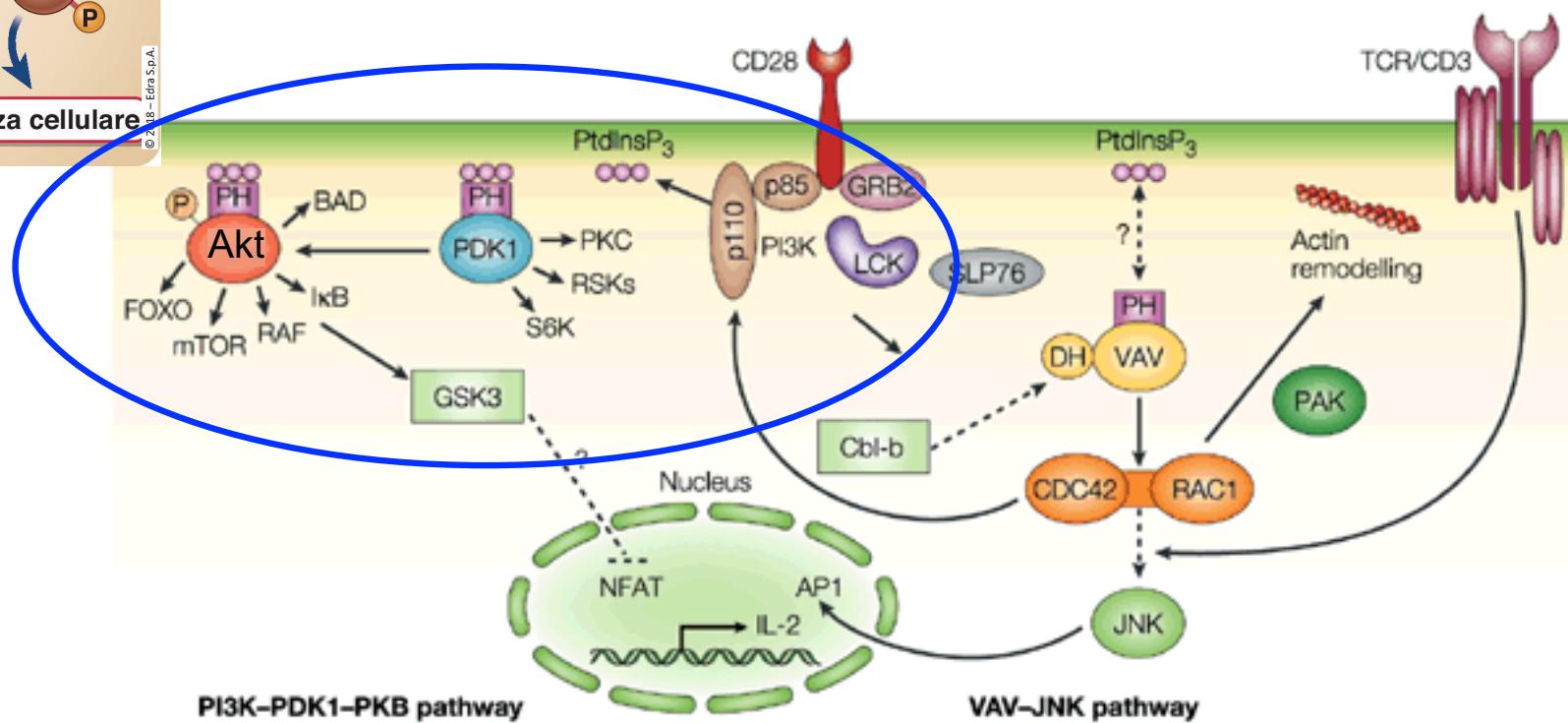
- Dopo interazione con B7, CD28 si lega a **Vav1** (probabilmente attraverso Grb2 e pYMNM) e si associa a **PIP5K**.
- PIP5K** genera PIP2 che favorisce **il reclutamento di WASP**.
- Vav1 attiva Cdc42 che lega WASP che una volta attivato lega Arp2/3 inducendo così la polimerizzazione e la riorganizzazione del citoscheletro di actina.
- La sequenza c-terminale di CD28 PYAP ricca di proline, si lega alla **filamina A** (FLNa) una "actin-binding protein" che stabilizza l'actina.

Struttura di CD28





CD28 e attivazione PI3K/Akt pathway

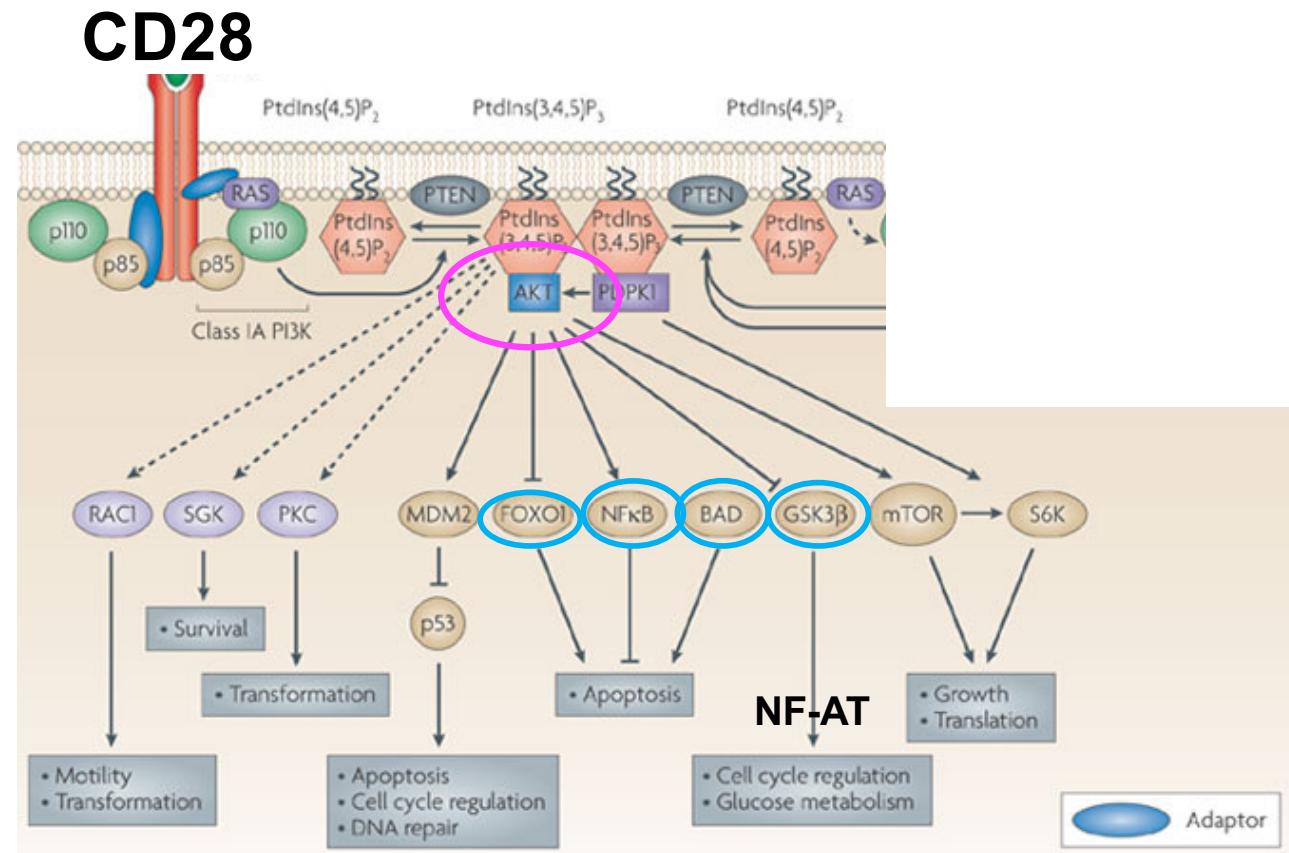


Dopo interazione del CD28 con il B7, l'**YMNM** fosforilato in tirosina si lega al dominio **SH2 della subunità regolatoria p85 PI3K di classe 1A** attivandola → fosforilazione di PIP2 con produzione di PIP3.
 PDK1 e Akt(PKB) si legano a PIP3 → attivazione della via di segnalazione di Akt e mTOR.

Effetti di CD28 dipendenti da PI3K/Akt

1. Inattivazione di GSK3 mediata da Akt. GSK3 (*glicogeno sintasi chinasi 3*) fosforila NF-AT favorendone il suo sequestramento nel citosol e impedendo la traslocazione nel nucleo. Akt fosforila GSK3 sui residui Ser (residuo 9 per GSK3 β e residuo 21 per GSK3 α), e la inattiva permettendo che NF-AT traslochi nel nucleo inducendo la trascrizione dei geni bersaglio.

2. Akt regola il metabolismo cellulare. La transizione da una cellula T a riposo a una cellula T effettrice richiede un **aumento della glicolisi** per fornire energia e per l'attivazione. Akt fosforila diversi enzimi della via glicolitica e ne potenzia l'attività. Inoltre mTORC1 migliora la glicolisi.

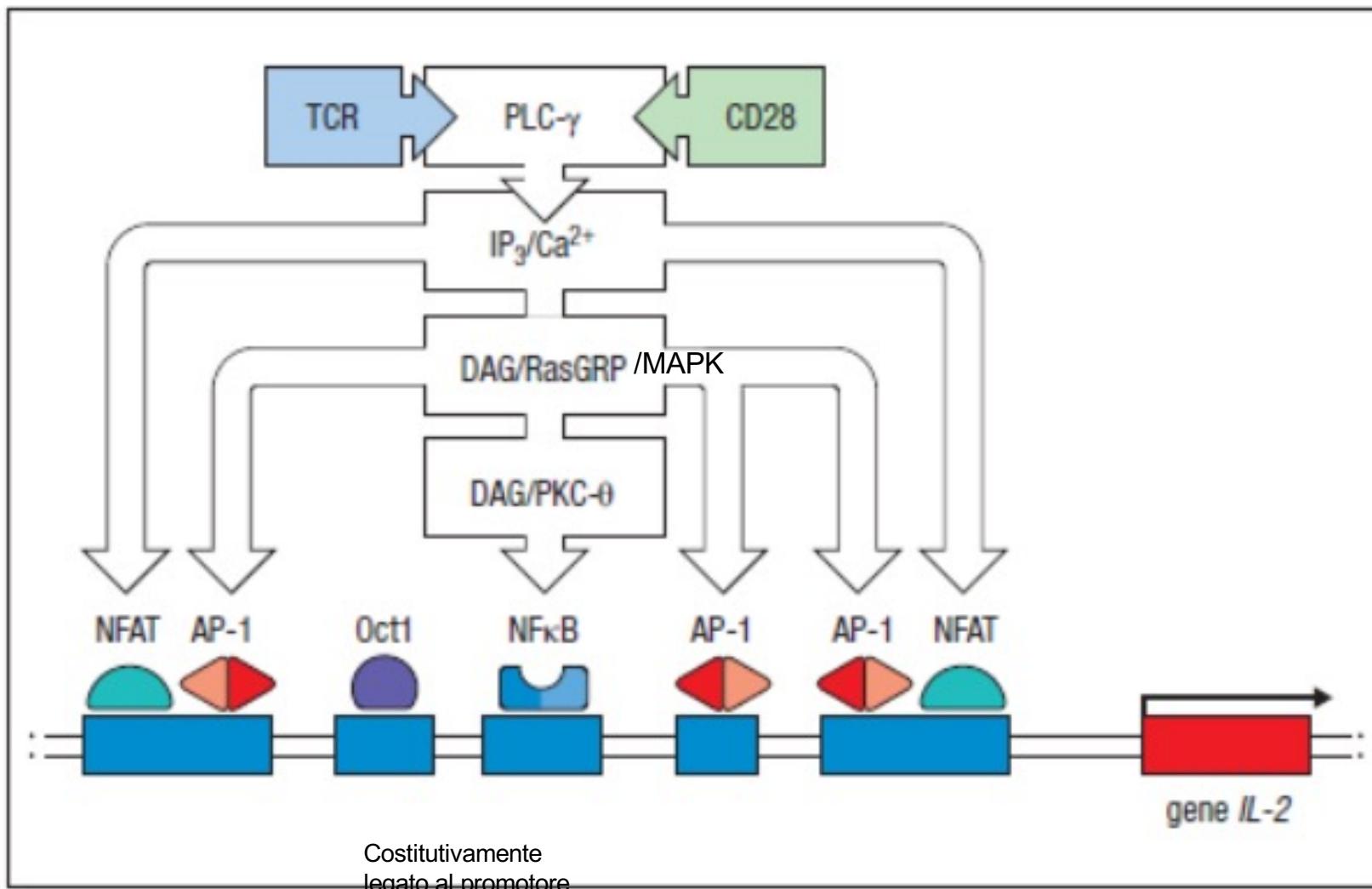


3. Protezione dall'apoptosi mediata da PI3K/Akt. Akt fosforila e inattiva i fattori di trascrizione pro-apoptotici della famiglia **FOXO** (FOXO 1 induce la trascrizione di diversi fattori pro-apoptotici della famiglia Bcl-2). Akt reduce l'attivazione della caspasi-8, della proteina pro-apoptotica BID (BH3-interacting domain death agonist) e della caspasi-3.

Nature Reviews | Drug Discovery

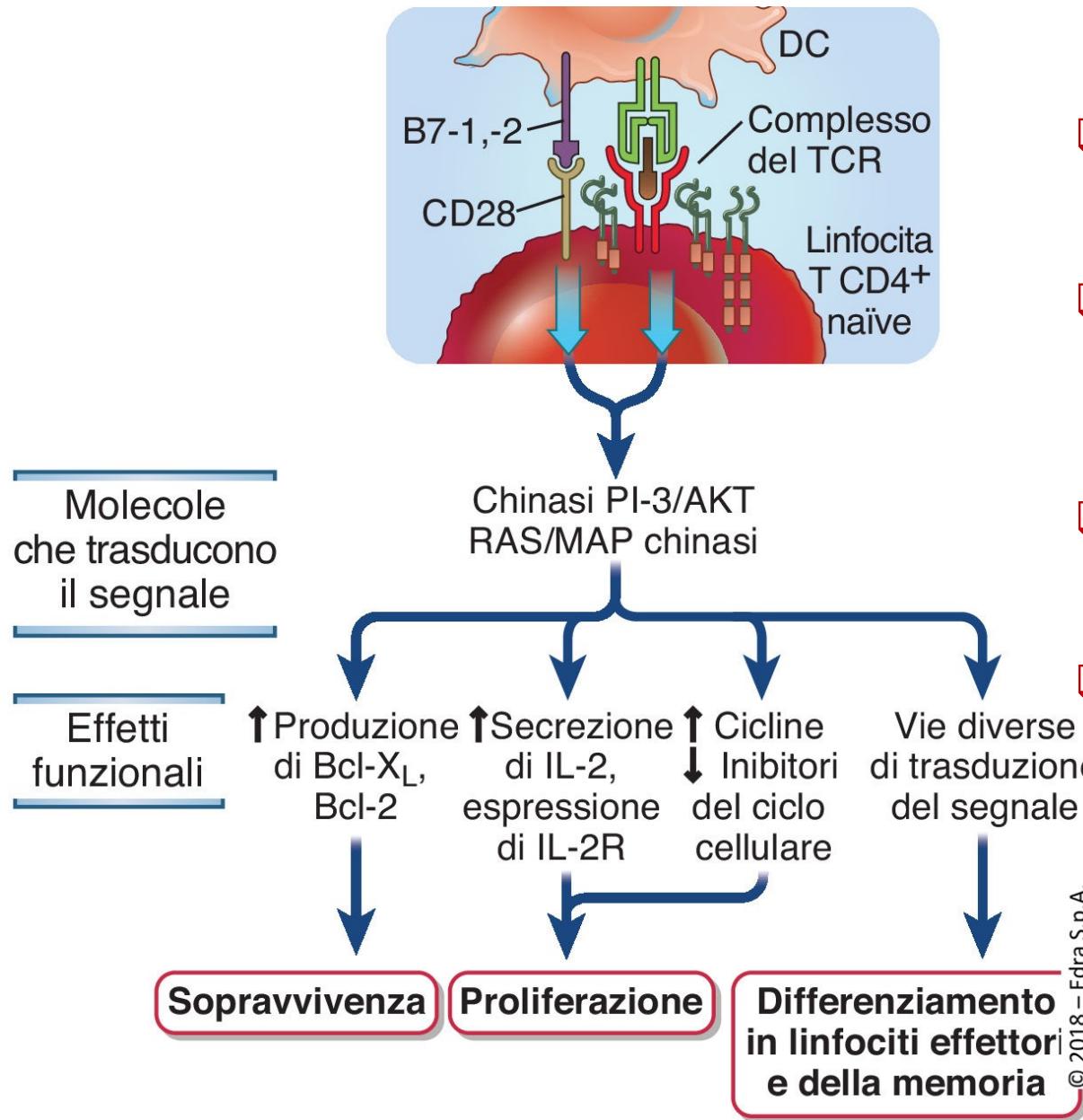
4. Akt favorisce l'attivazione di NF-κB

Sinergia delle vie di trasduzione tramite TCR e CD28 sul promotore del gene di IL2

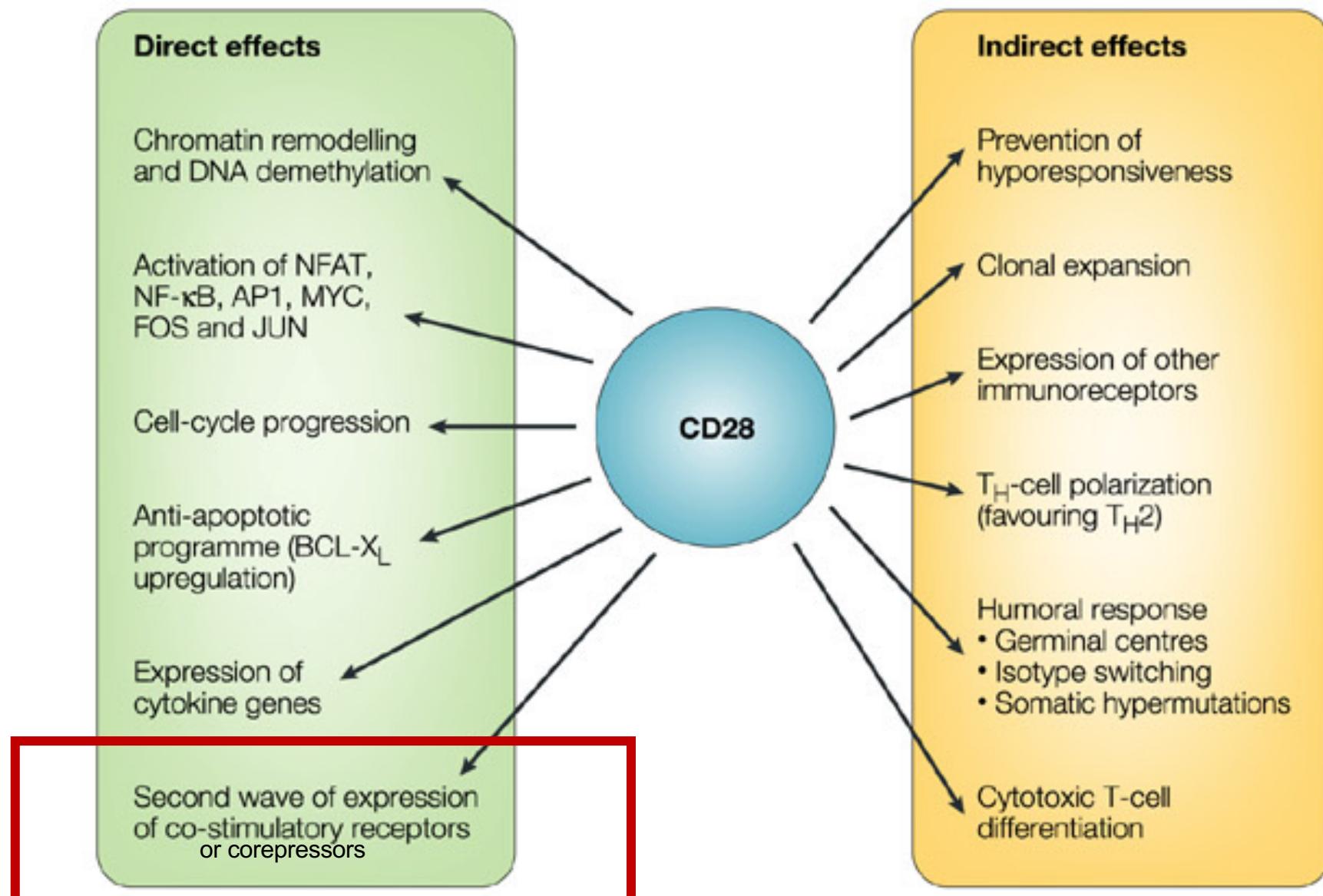


**Potenziamento di NF-AT, NFκB, AP1 e MAPK
(espressione di IL-2 e CD25, IFN- γ , IL-4, altro)**

La stimolazione del CD28 potenzia i segnali di attivazione indotti dal signaling del TCR



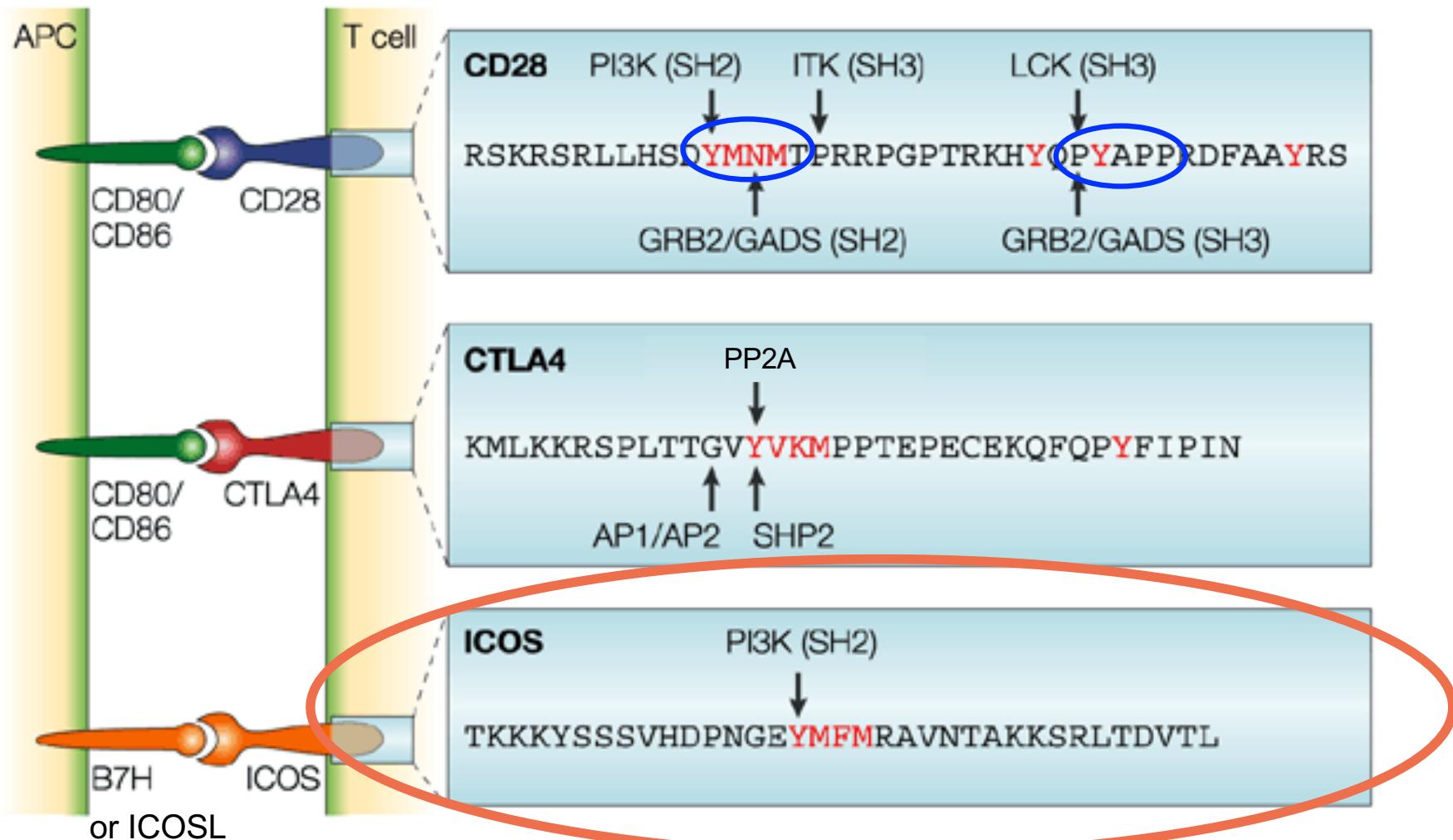
- Aumento dell'espressione delle proteine anti-apoptotiche
- Aumento della produzione di citochine e dell'espressione dei recettori per citochine
- Stimolazione della proliferazione cellulare
- Attivazione del differenziamento cellulare



ICOS, CTLA4 e PD-1

Nature Reviews | Immunology

Recettore costimolatorio ICOS (Inducible T-cell COStimulator)



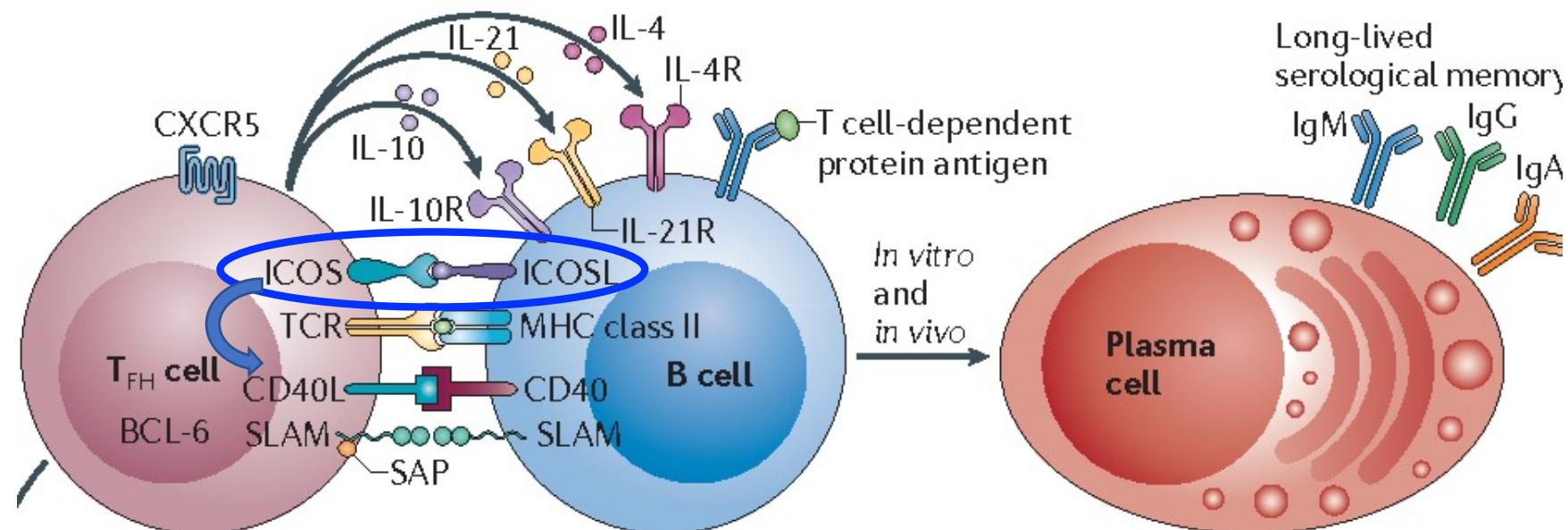
CD28 possiede il motivo **YMNM**

ICOS possiede il motivo **YMFM** che non lega Grb2 e non ha il motivo **PYAPP**

Nature Reviews | Immunology

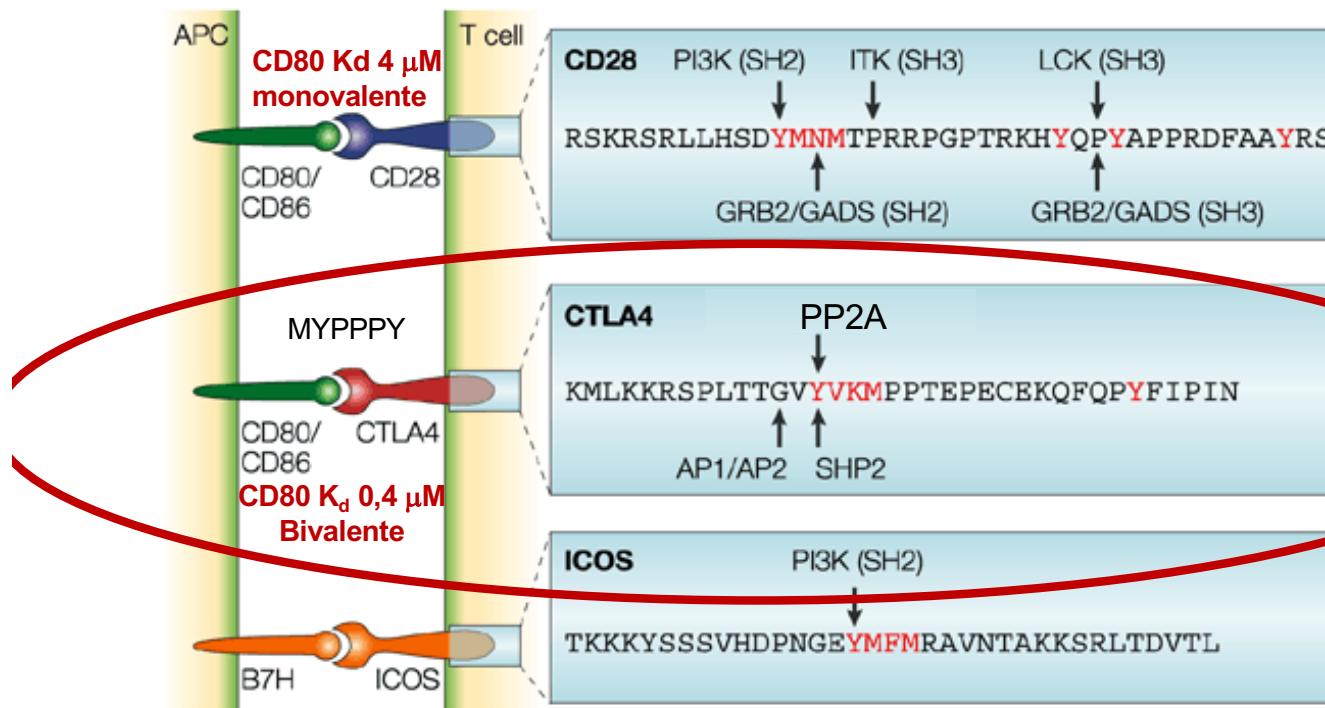
Effetti della co-stimolazione da parte di ICOS

- Espresso solo su linfociti T attivati
- Come il CD28 attiva la PI3K/AKT (grazie al motivo **YMF**M) ma non attiva MAPK, NF- κ B e non induce IL-2
- Implicato nella regolazione delle funzioni dei linfociti T helper follicolari (T_{fh}), una popolazione di linfociti Th che nel centro germinativo del follicolo aiuta i linfociti B a differenziarsi in plasmacellule a lunga sopravvivenza che producono anticorpi ad alta affinità
- Potenzia l'espressione di CD40L sui linfociti, favorendo il differenziamento dei linfociti B in plasmacellule attraverso il legame CD40-CD40L



CTLA4:

Recettore co-inibitorio



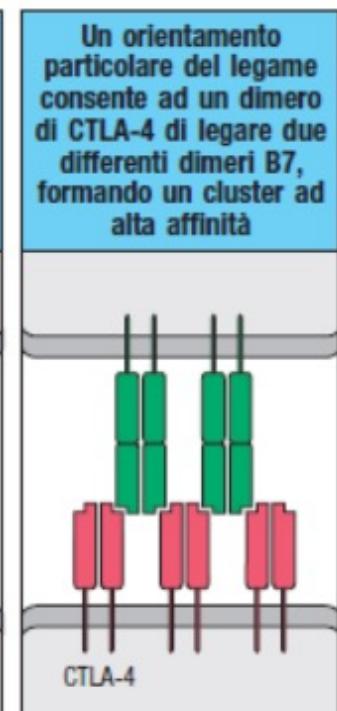
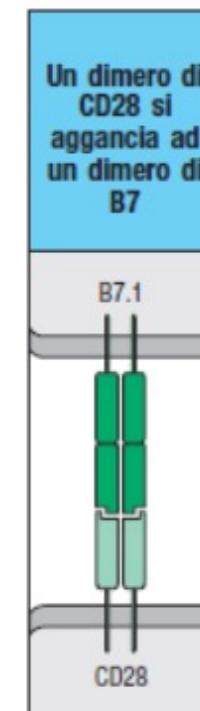
PP2A: Ser/Thr fosfatasi

SHP2: Tirozin fosfatasi

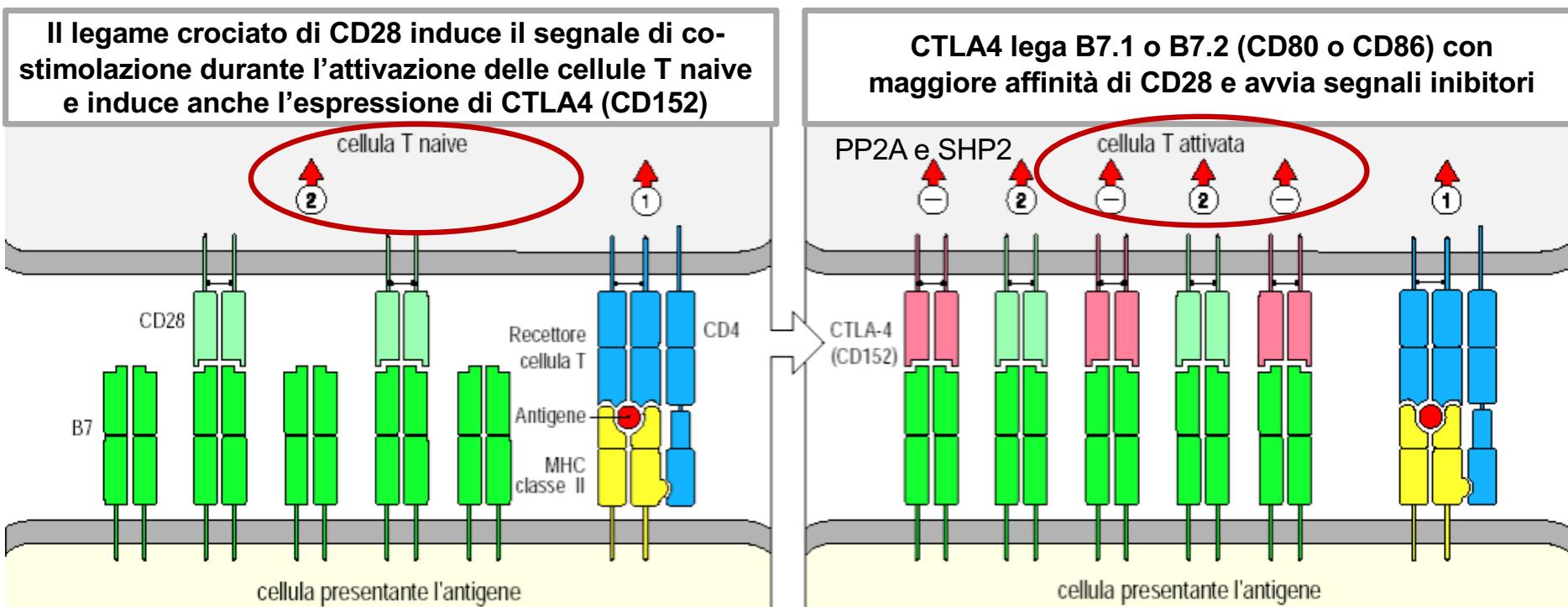
CTLA4 = Cytotoxic T-Lymphocyte Antigen 4

Nature Reviews | Immunology

CTLA-4 ha un'affinità maggiore per B7 rispetto al CD28 e lo impegnă in un orientamento multivalente

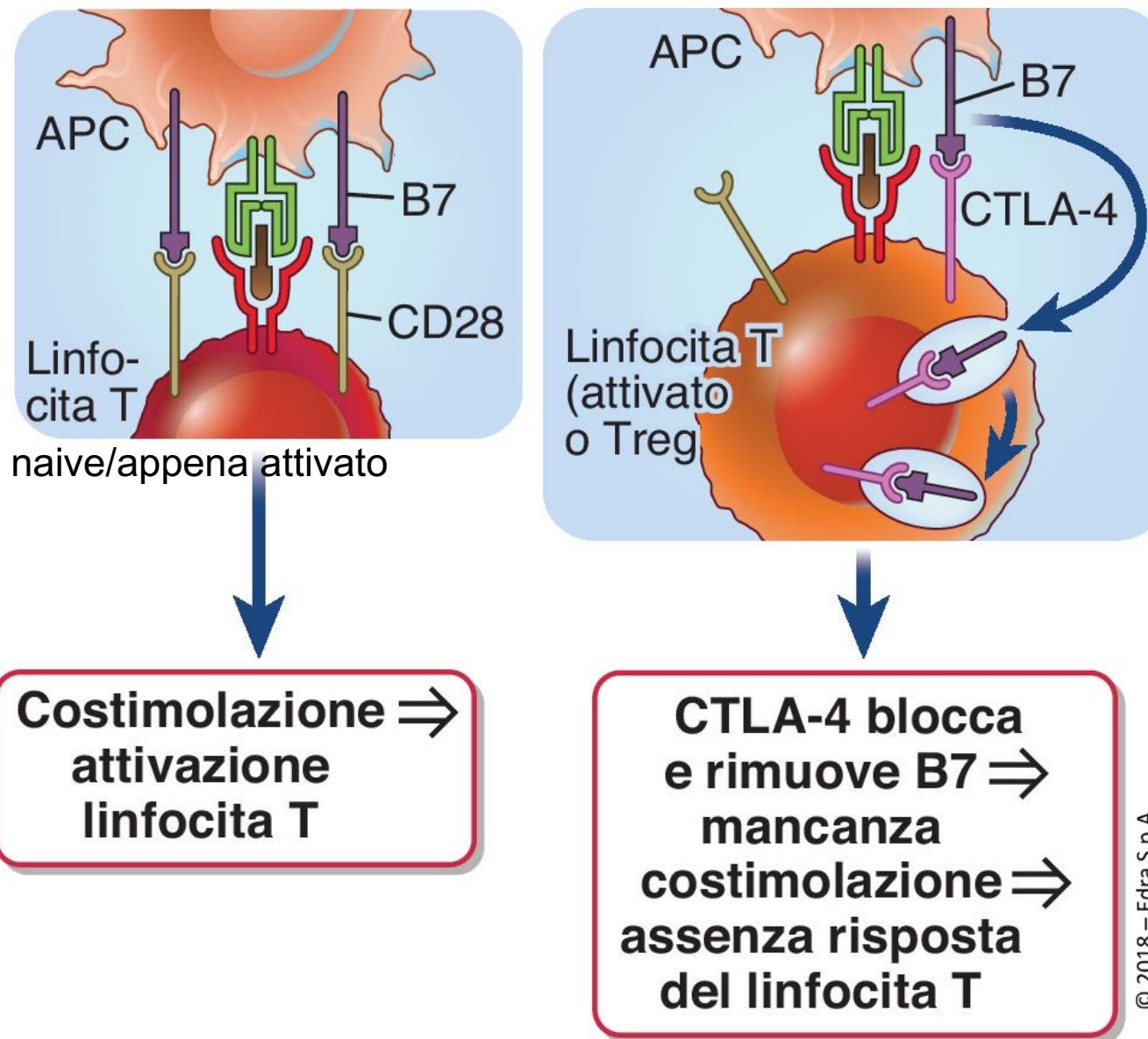


CTLA4 (recettore inibitorio) è espresso dai linfociti T attivati da TCR/CD28 ed ha un effetto opposto a quello di CD28

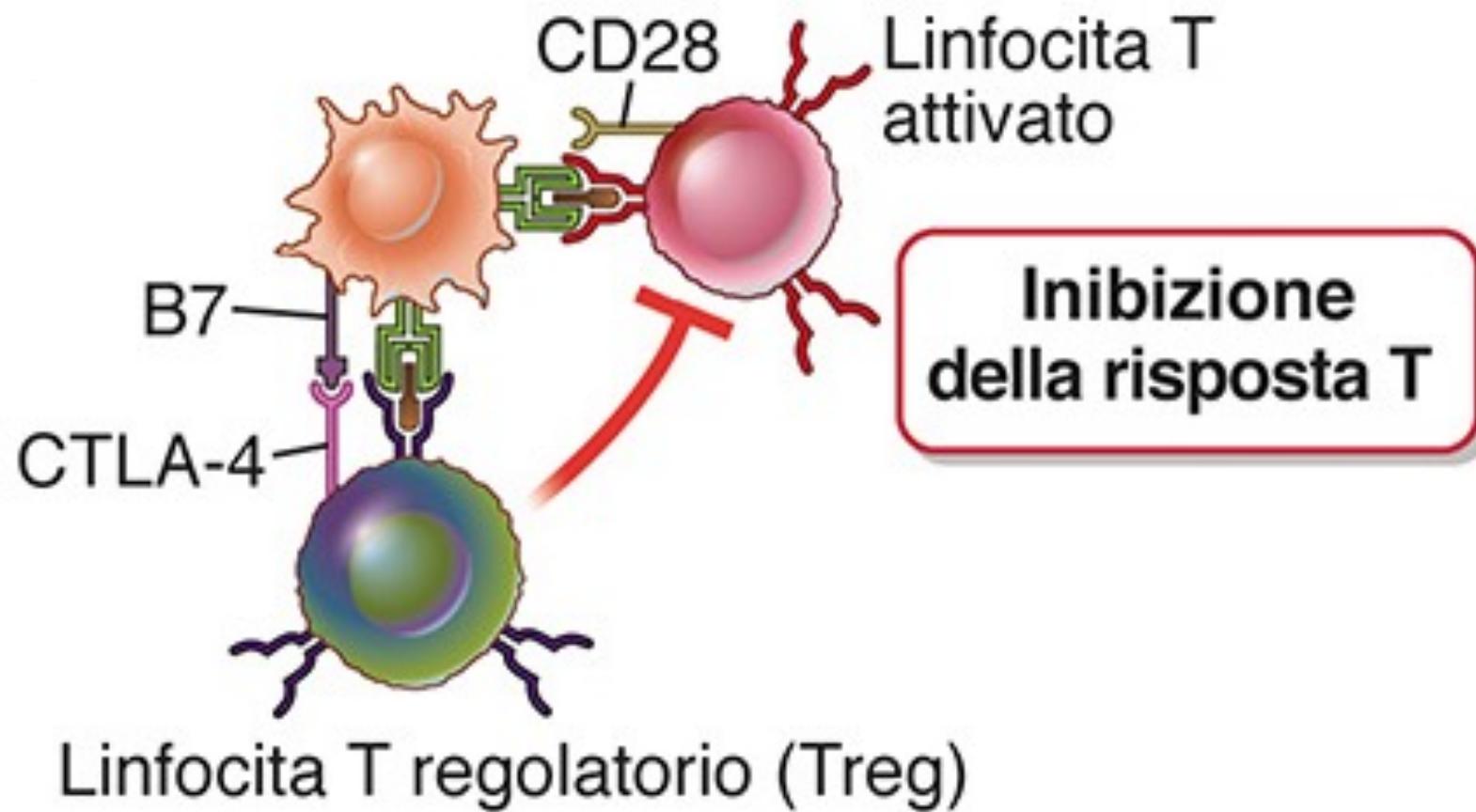


L'espressione a livello proteico di CTLA-4 è rilevabile sulla superficie dei linfociti T 24-48 ore dopo attivazione.

Effetti funzionali del recettore inibitorio CTLA4



CTLA4 è espresso costitutivamente dai linfociti Treg



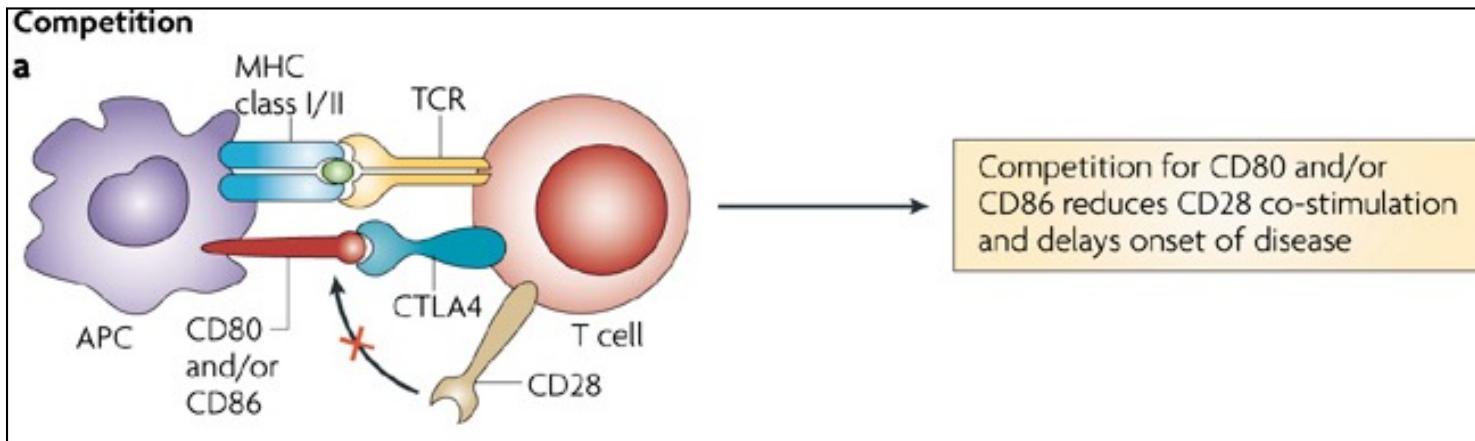
Effetti dell'espressione di CTLA4

- espresso dai linfociti T attivati da TCR/CD28 (dai T-memory) e costitutivamente dai Treg, una sottopolazione di linfociti T CD4⁺ che sopprime la risposta immune.
- Protezione contro malattie autoimmuni (tolleranza periferica): topi knockout per CTLA4 sviluppano una sindrome linfoproliferativa fatale (infiltrazione e distruzione di organi e tessuti; morte entro le 3 sett).
- Nel 2014 è stata identificata nell'uomo una patologia autoimmune a trasmissione mendeliana causata da mutazioni in eterozigosi di CTLA4 (CHAI= CTLA4 haploinsufficiency with autoimmune infiltration).

Regola negativamente la risposta immunitaria, spegnendo le vie di segnalazione mediate da TCR e CD28 mediante due possibili meccanismi:

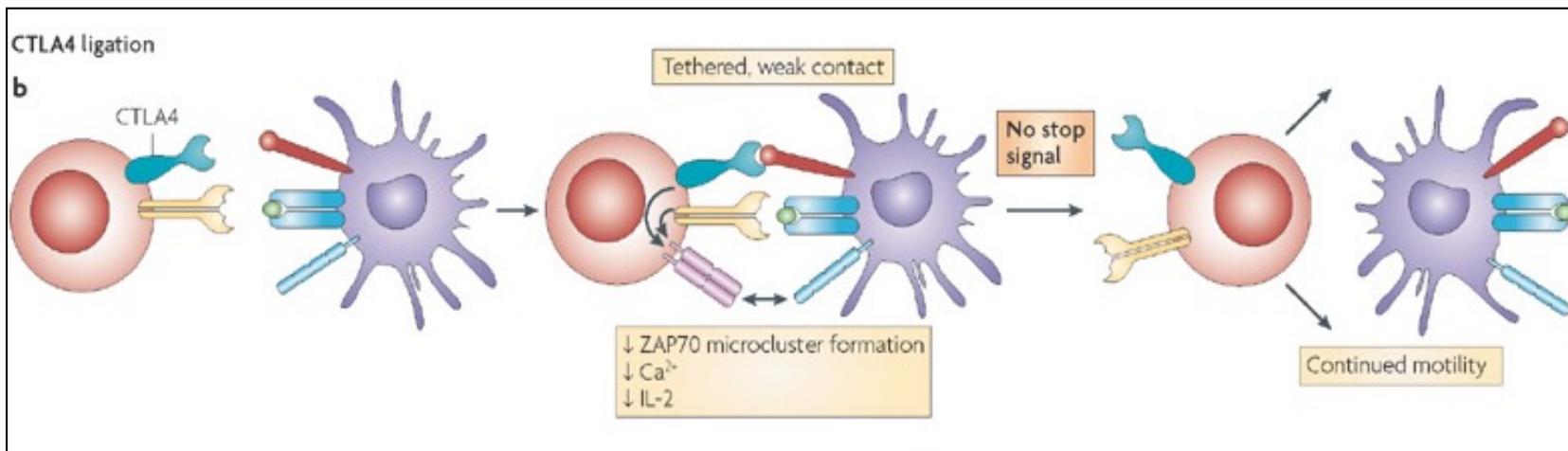
1. **Competizione:** l'alta avidità del legame tra CTLA4 e B7 crea forte competizione del legame di CD28 con B7.
2. **Interferenza con il signalling e la formazione dei rafts lipidici:** il motivo YVKM fosforilato recluta le fosfatasi PP2A e SHP2, che defosforilano le molecole coinvolte nella trasduzione del segnale (Zap70, LAT, Vav)

1. Inibizione mediata da CTLA-4: competizione con CD28



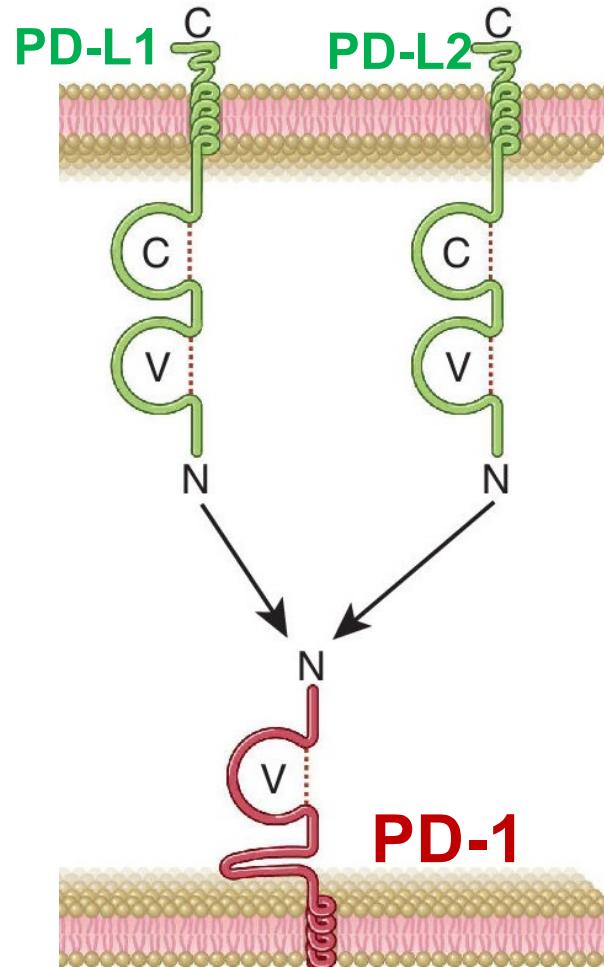
La maggiore affinità di CTLA4 per B7.1/B7.2 sequestra le molecole B7. Assenza di co-stimulazione CD28 → inibizione del TCR signalling

2. Inibizione mediata da CTLA-4: interferenza con il TCR/CD28 signalling



Totale defosforilazione dei substrati e MAPK

YVKM lega due fosfatasi: **SHP2** (SH2-domain-containing protein **tirosina fosfatasi 2**) e la **serin-treonin fosfatasi PP2A**. Entrambe defosforilano componenti necessari per la segnalazione. La differenza principale è che SHP2 ha come bersaglio i residui di fosfotirosina, mentre PP2A defosforila i residui di serina e treonina.

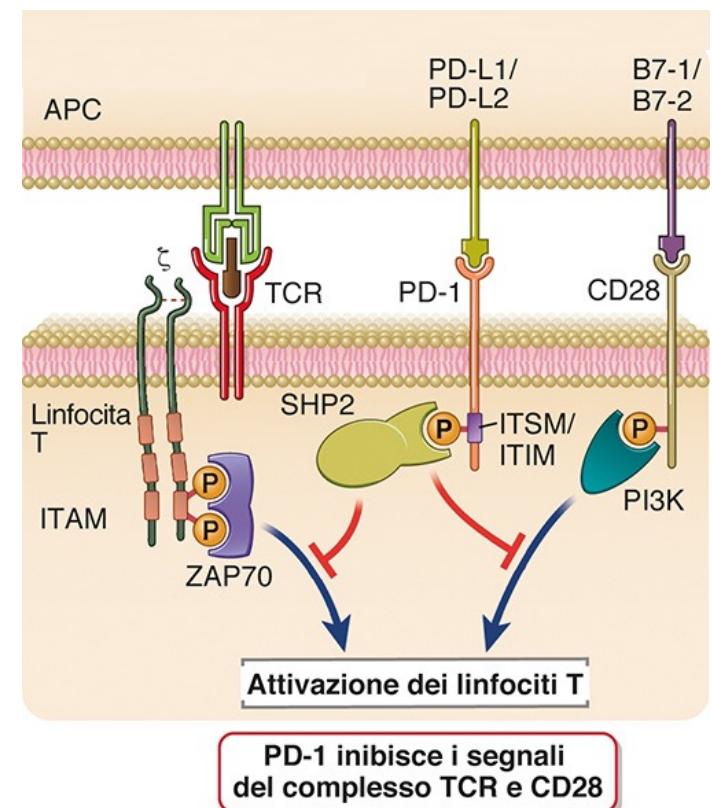
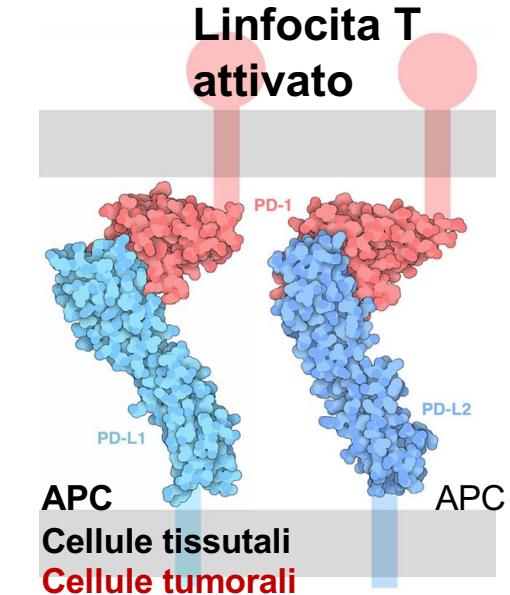


PD-1: recettore inibitorio

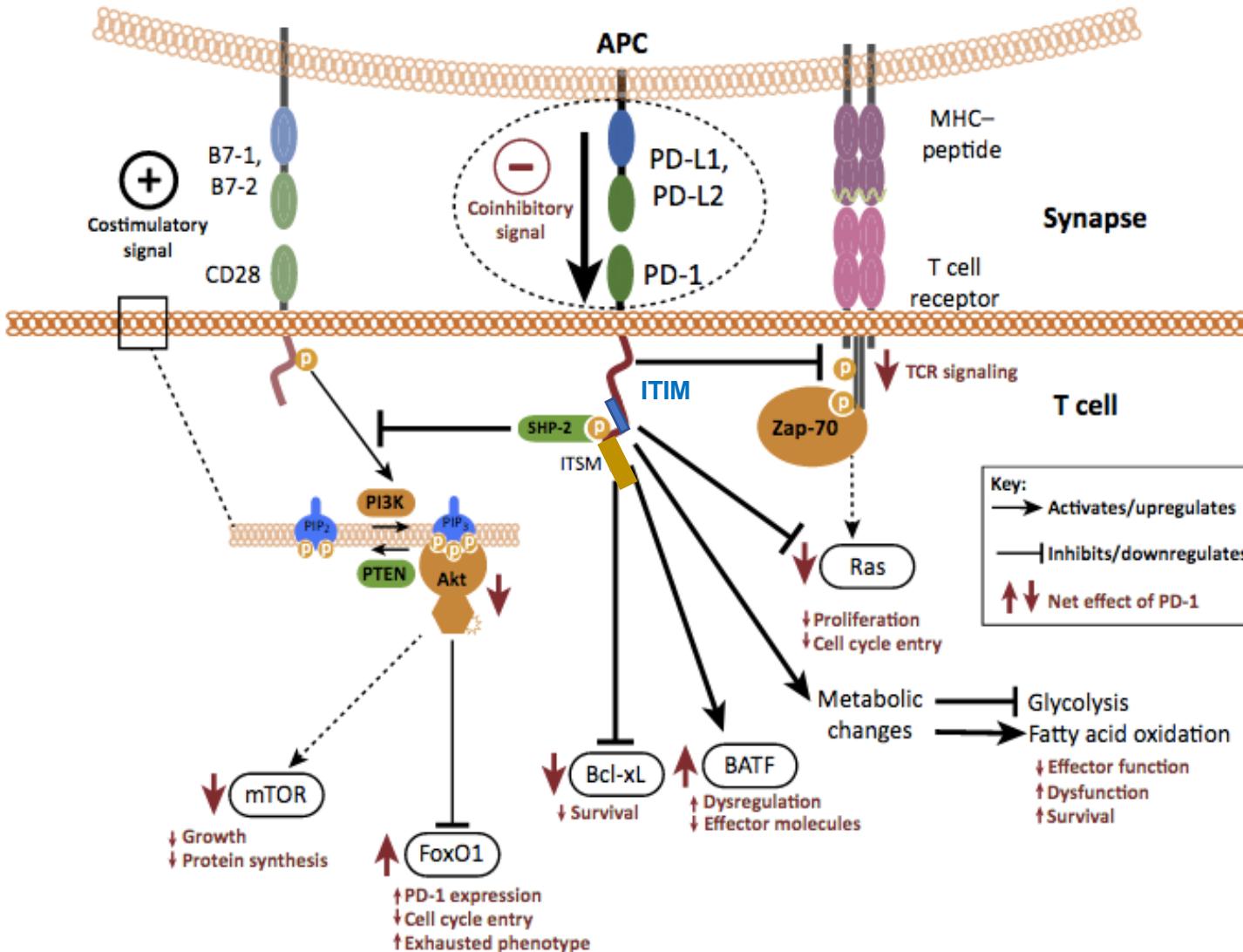
- **PD-1**, recettore inibitorio espresso sui linfociti effettori attivati in presenza di infezioni croniche persistenti o tumori, che riconosce i ligandi **PD-L1** e **PD-L2**
- **PD-L1** espresso su APC e cellule tissutali
- **PD-L2** è espresso solo sulle APC

- Stimolazione di PD-1 porta all'inattivazione dei linfociti T

I tumori evadono la risposta immune adattativa esprimendo PD-L1 (cancer immune evasion)



PD-1 inhibitory signaling



Effetti:

Diminuisce la proliferazione cellulare, la sopravvivenza, la sintesi proteica, le funzioni effettive, cambia il metabolismo e la cellula T acquisisce un fenotipo "exhausted".

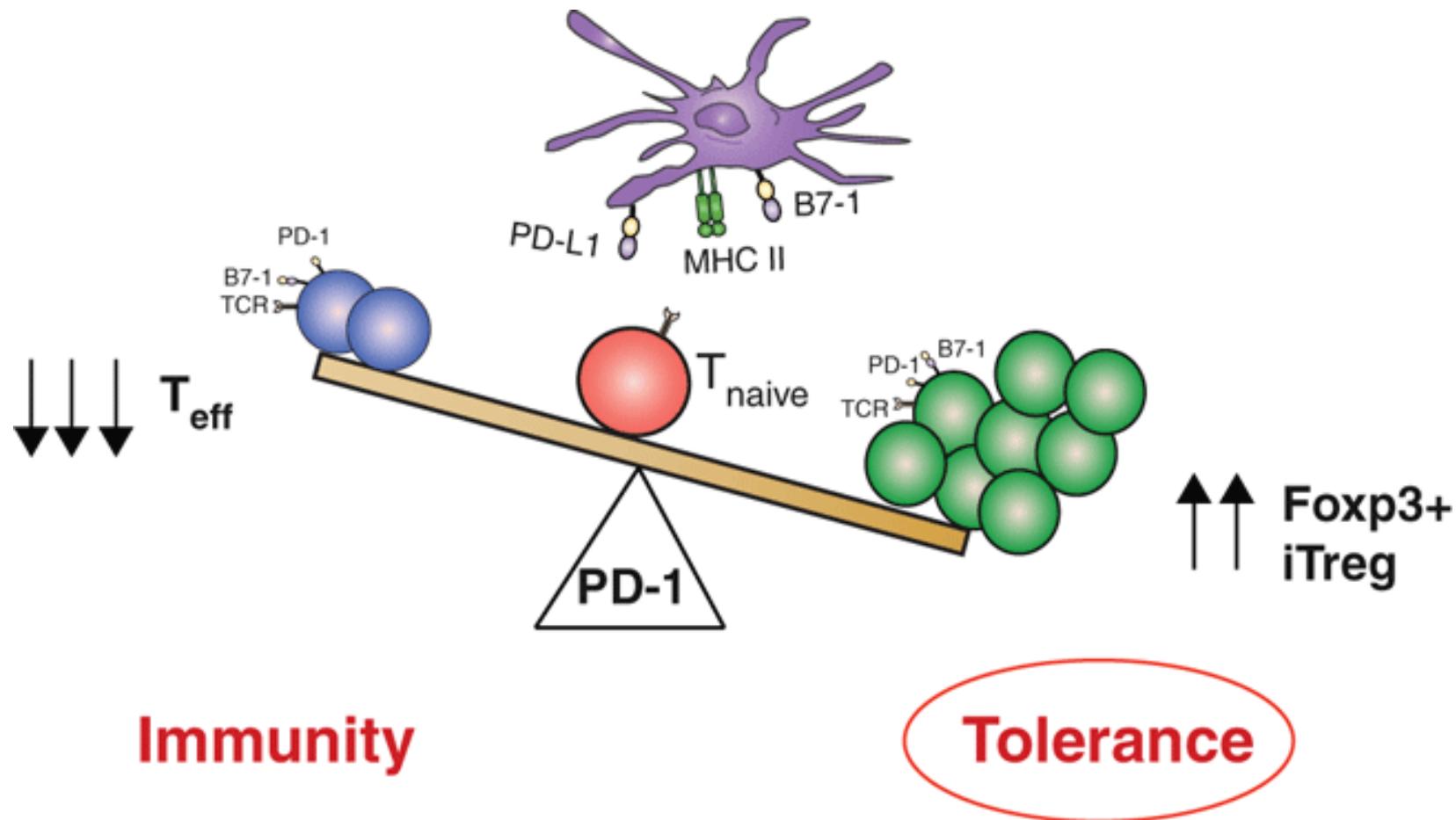
TRENDS in Pharmacological Sciences

ITSM = immunoreceptor tyrosine-based switch motif (motivo interruttore)

ITIM e ITSM :

- Reclutamento della **tirosin fosfatasi (SHP2)**
- Inibizione del **signaling del TCR e del pathway di PI3K**

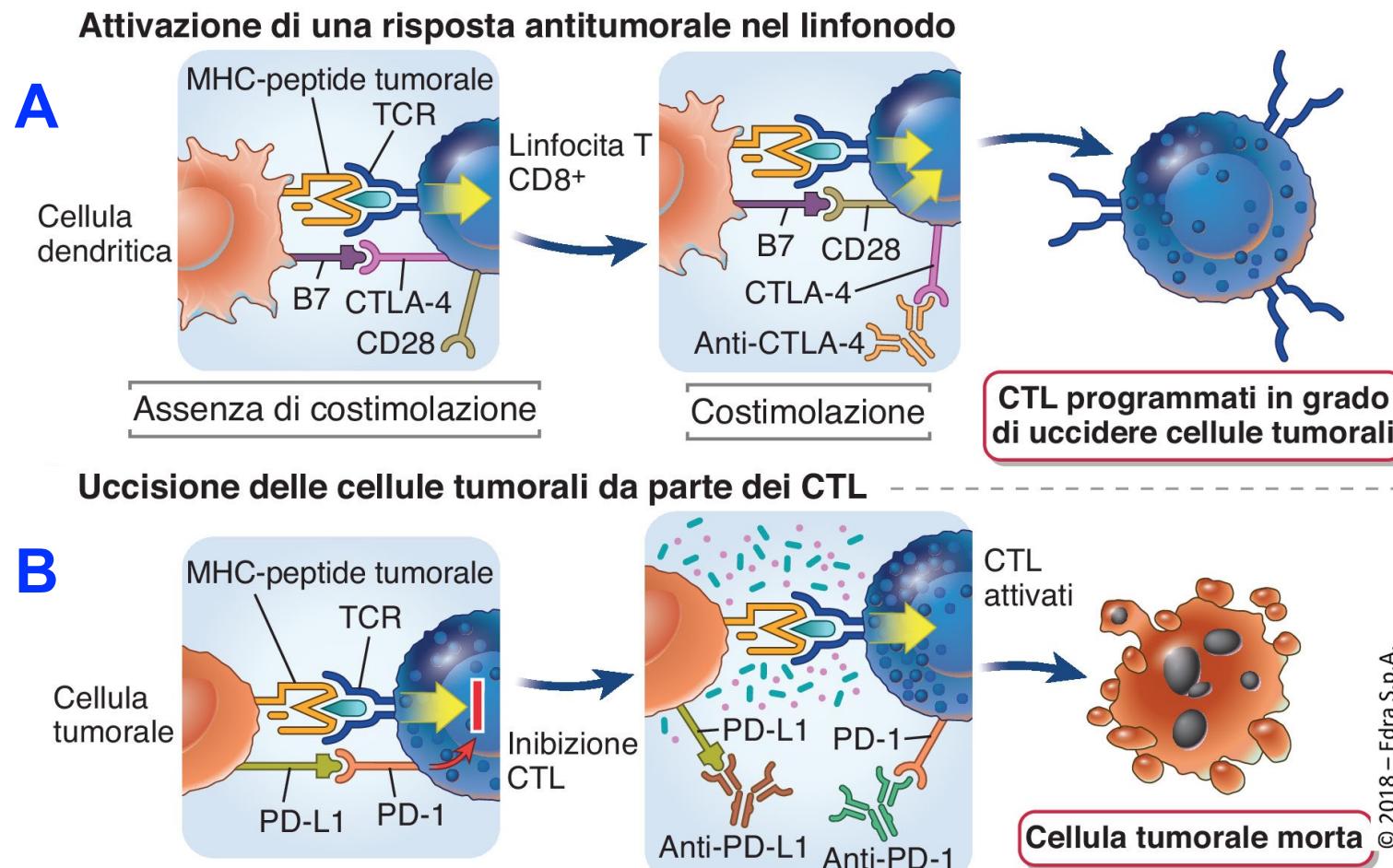
Ruolo di PD1 nella tolleranza



PD1 e **CTLA4** sono entrambi **"punti di controllo"** (immune checkpoints) delle risposte immunitarie ma presentano anche differenze importanti (ruolo complementare):

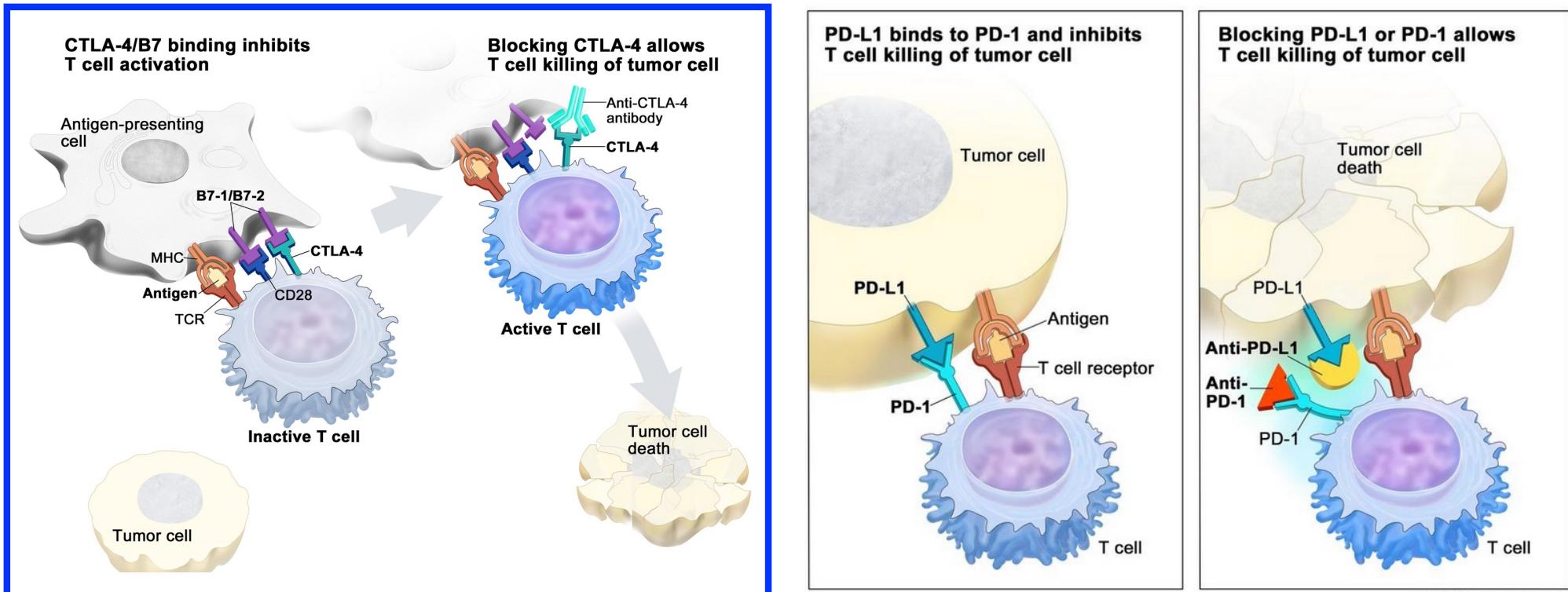
1. Modelli murini mostrano che le deficienze di **PD1** inducono patologie autoimmuni molto meno severe di quelle causate da inattivazione di **CTLA4**.
2. **CTLA4** regola l'attivazione iniziale dei linfociti T negli organi linfoidi secondari mentre **PD1** è deputato principalmente a spegnere le risposte dei linfociti T effettori (soprattutto linfociti T CD8+) nei tessuti periferici.

Blocco dei checkpoints immunologici nell'immunoterapia dei tumori



I pazienti neoplastici presentano spesso una risposta cellulare T inefficace verso i tumori a causa dell'aumentata espressione di CTLA4 e PD1, sulla superficie delle cellule T e l'espressione del PDL1 sulle cellule tumorali. **Anticorpi anti-CTLA4 (A), anti-PD1 o anti-PDL1 (B) bloccanti** sono altamente specifici per trattare diversi tipi di tumori in stadio avanzato, rimuovendo l'inibizione dei linfociti T tumore-specifici. Gli anticorpi anti-CTLA4 funzionano bloccando CTLA4 sui linfociti T effettori e sui linfociti T regolatori (Treg).

Immune checkpoint inhibitors nell'immunoterapia dei tumori



Farmaco biologico= anticorpo anti-CTLA-4 antibodies
Agiscono sia sui linfociti T effettori sia sui linfociti Treg

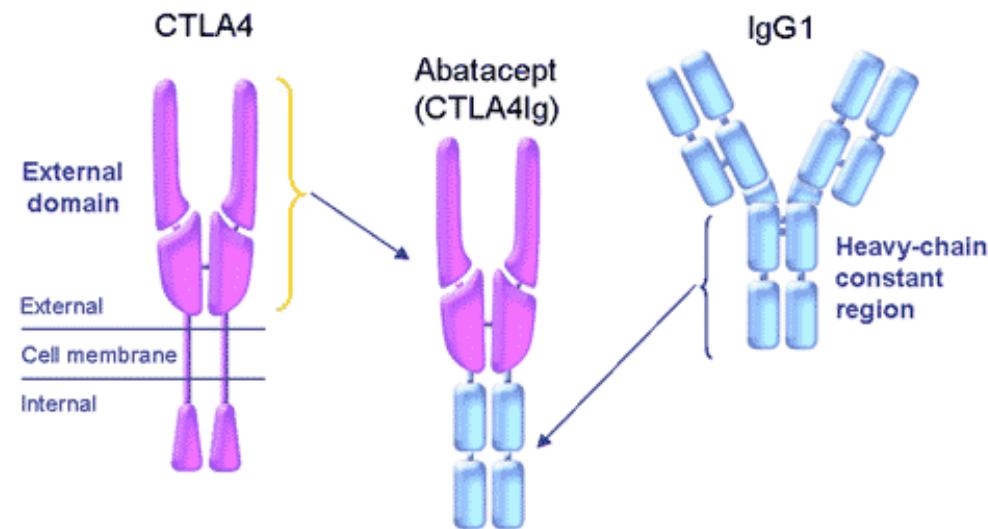
Farmaco biologico =
anticorpo anti-PD1 or anti-PDL1

Un tipo di farmaco che blocca le proteine chiamate checkpoint prodotte da alcuni tipi di cellule del sistema immunitario, come i linfociti T, e da alcune cellule tumorali. Questi checkpoint aiutano a impedire che le risposte immunitarie siano troppo intense e talvolta possono impedire ai linfociti T di uccidere le cellule tumorali. Quando questi checkpoint vengono bloccati, i linfociti T possono uccidere più efficacemente le cellule tumorali. Esempi di proteine checkpoint presenti sui linfociti T o sulle cellule tumorali includono **PD-1/PD-L1** e **CTLA-4/B7-1/B7-2**.

Gli inibitori dei checkpoint immunitari sono utilizzati per trattare il cancro.

Nelle patologie autoimmuni si vuole invece potenziare l'azione degli immunocheck points per attenuare l'attivazione dei linfociti T

Uso del farmaco biologico Abatacept
CTLA4Ig nella cura di patologie reumatiche (Artrite reumatoide);
Il farmaco è una molecola chimerica costituita da CTLA4 solubile fuso al dominio Fc di IgG1



Abatacept modula selettivamente l'attivazione dei linfociti T mimando l'azione di CTLA4 (si lega a CD80/CD86 prevenendo il binding con CD28)

