

METABOLISMO DEI LIPIDI

Vengono conservati principalmente in cellule specializzate: gli adipociti. Da queste cellule i lipidi passano nel circolo sanguigno per diffusione passiva secondo gradiente di concentrazione.

I triacilgliceroli (trigliceridi), i fosfolipidi e il colesterolo vengono trasportati dal sangue ai tessuti di utilizzo sotto forma di *chilomicroni e/o lipoproteine*

I *chilomicroni* sono particelle lipoproteiche contenenti i grassi (trigliceridi) che provengono dalla dieta (**lipidi esogeni**). Si formano in seguito alla digestione dei grassi e dopo l'assorbimento intestinale. Vengono trasportati ai diversi tessuti attraverso il circolo venoso.

Quasi tutte le *lipoproteine* invece vengono sintetizzate a livello epatico e la loro funzione è quella di trasportare ai tessuti i lipidi sintetizzati a livello epatico (**lipidi endogeni**).

Digestione dei lipidi ed assorbimento

La digestione dei lipidi alimentari (90% sono trigliceridi) ed il loro assorbimento avviene a livello intestinale.

Questi processi coinvolgono sia enzimi (lipasi pancreatici) sia sostanze emulsionanti (sali biliari).

La lipasi pancreatica idrolizza i legami esterei dei trigliceridi, portando alla formazione di acidi grassi liberi e glicerolo, nonché di mono- e diacil-glicerolo. Agisce all'interfaccia tra lipide ed acqua.

Queste sostanze vengono emulsionate dai sali biliari, derivati del colesterolo sintetizzati dal fegato, ed assorbite dalla mucosa intestinale, anche grazie all'azione di specifiche proteine.

I sali biliari rappresentano inoltre l'unico modo che le cellule epatiche utilizzano per eliminare l'eccesso di colesterolo.

Trasporto dei lipidi (1): *chilomicroni*

Gli acidi grassi assorbiti dalla mucosa intestinale, vengono prima riconvertiti in triacilgliceroli e poi impacchettati nei *chilomicroni*, particelle lipoproteiche che vengono rilasciate nel circolo sanguigno venoso e che contengono anche colesterolo.

Arrivati ai tessuti di utilizzo (muscolo scheletrico e tessuto adiposo), i trigliceridi contenuti nei chilomicroni vengono idrolizzati dall'enzima extracellulare *lipoproteina lipasi*.

Gli acidi grassi che si liberano, vengono assorbiti ed utilizzati dalle cellule, mentre i *chilomicroni residui* (ricchi di colesterolo) vengono trasportati al fegato.

I *chilomicroni* quindi trasportano ai muscoli e al tessuto adiposo i trigliceridi e trasportano al fegato il colesterolo entrambi provenienti dalla dieta.

Trasporto dei lipidi (2): *lipoproteine*

Le lipoproteine si possono classificare in base alla loro densità, misurabile attraverso la loro velocità di sedimentazione.

VLDL: Very Low Density Lipoproteins

LDL: Low Density Lipoproteins

HDL: High Density Lipoproteins

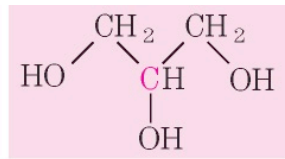
Maggiore il contenuto di grassi, minore la densità.

Le lipoproteine sono in genere costituite da un nucleo di lipidi non polari, circondato da un unico strato di lipidi anfipatici (fosfolipidi e colesterolo) a contatto con la porzione proteica (apolipoproteine).

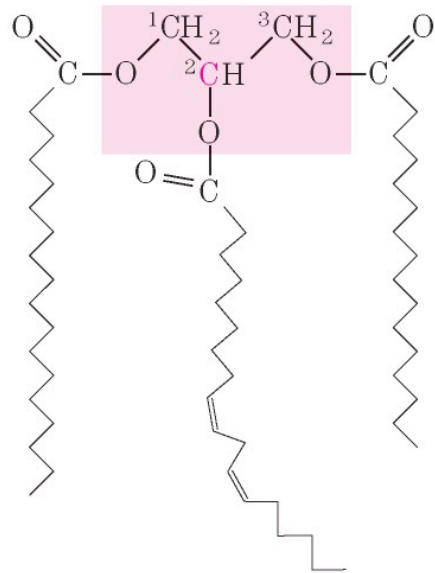
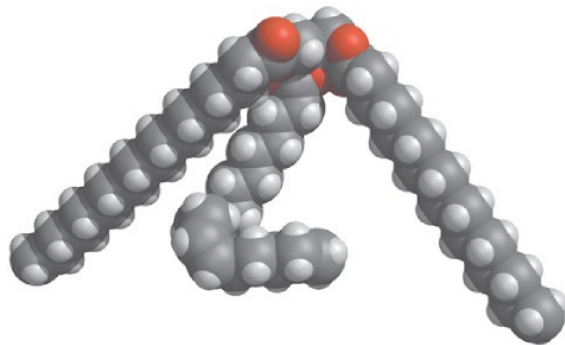
Le LDL derivano dalle VLDL in seguito al rilascio degli acidi grassi o dei mono-acilgliceroli ai tessuti.

Le HDL hanno una funzione opposta, trasportando però il colesterolo dai tessuti al fegato.

CATABOLISMO DEGLI ACIDI GRASSI



Glicerolo



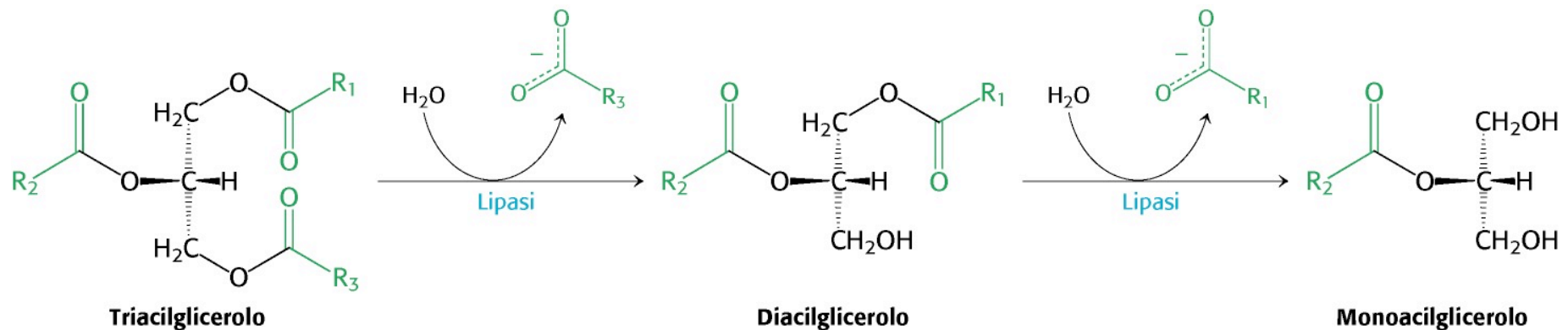
1-Stearil,2-linoleil,3-palmitil glicerolo,
un triacilglicerolo misto



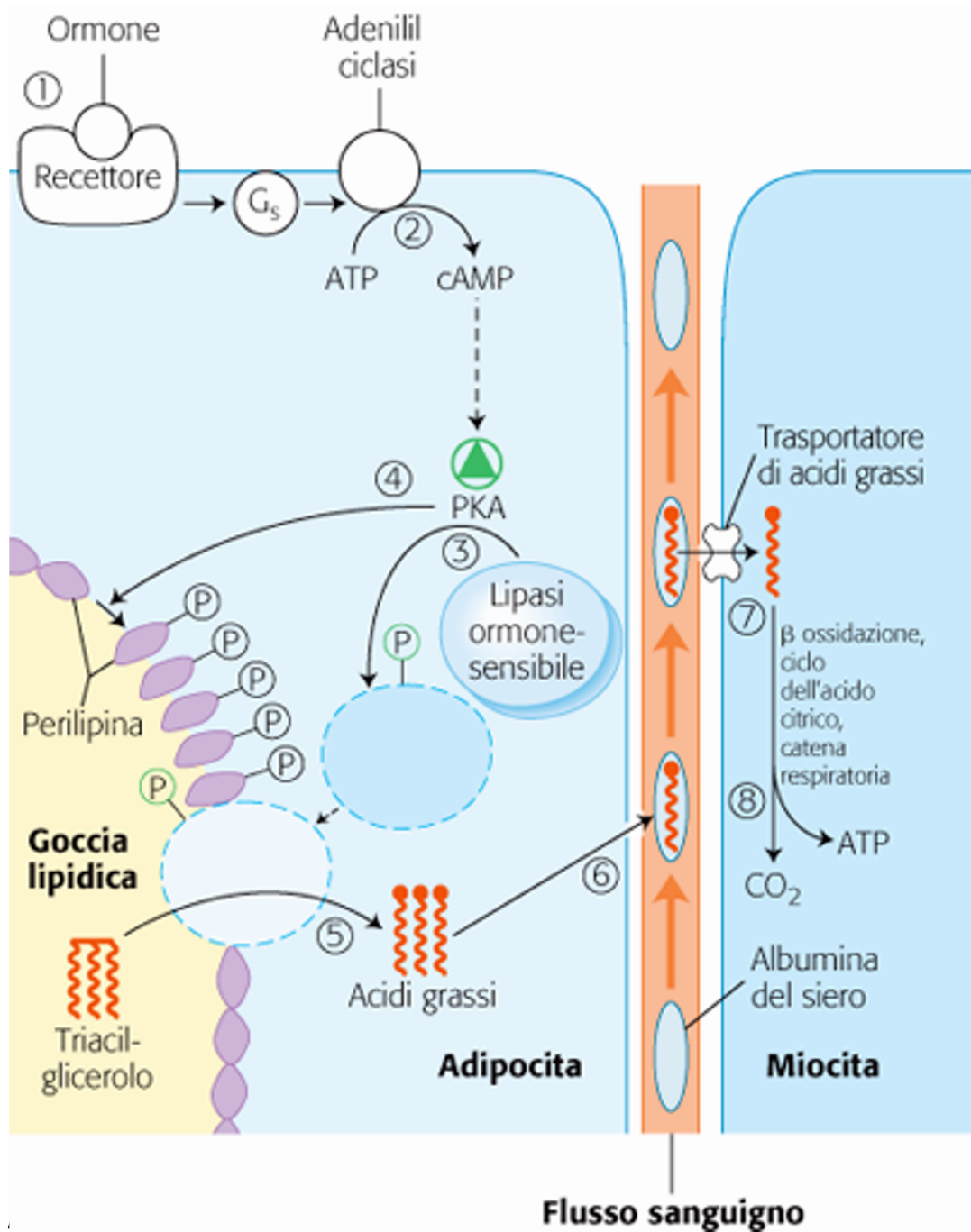
Fotografia al microscopio
elettronico di un adipocita

L'utilizzo degli acidi grassi come combustibili avviene in tre fasi

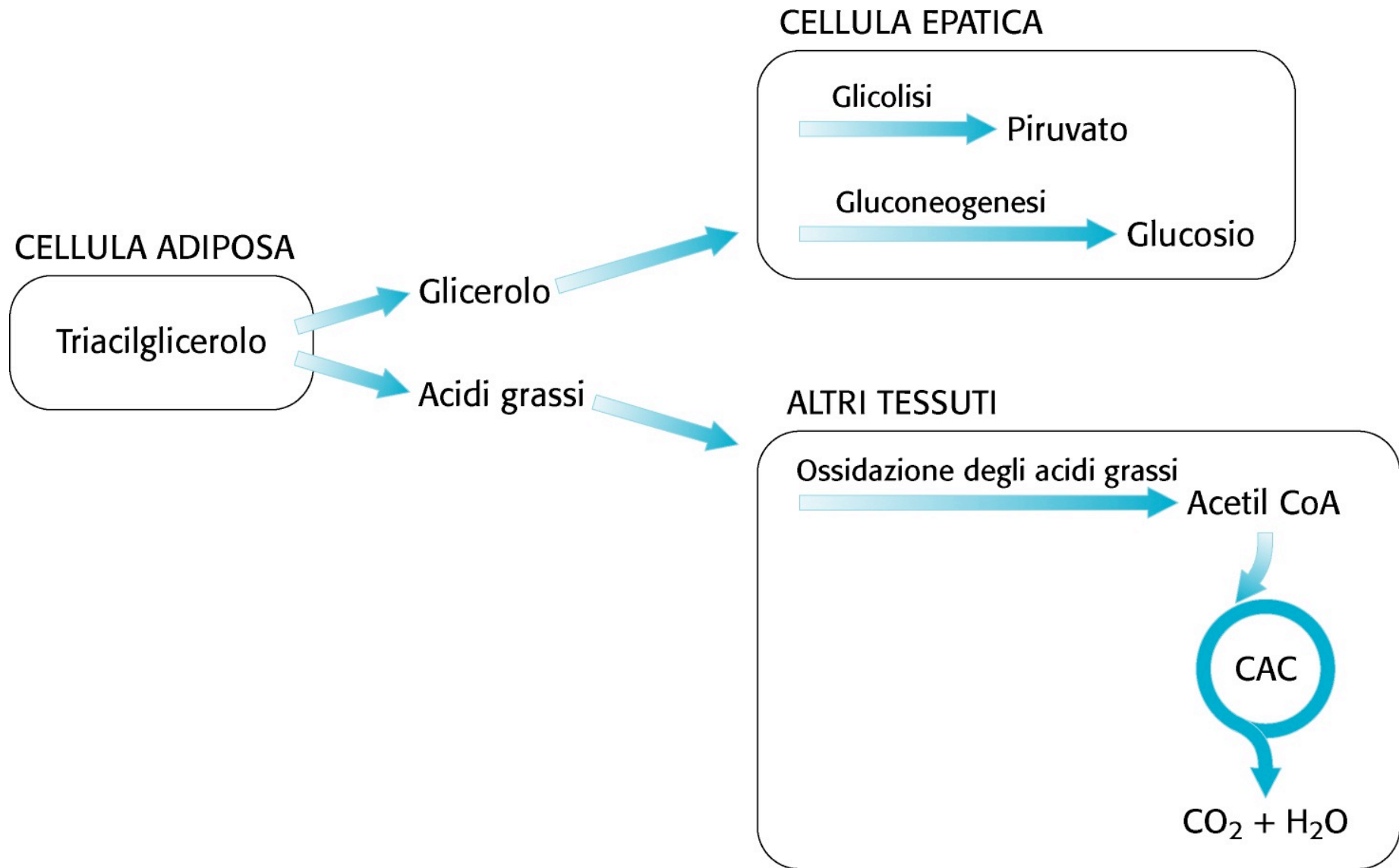
- 1) Mobilizzazione dei lipidi dal tessuto adiposo ai tessuti periferici: idrolisi dei trigliceridi in glicerolo ed acidi grassi ad opera delle lipasi
- 2) Attivazione e trasporto nei mitocondri
- 3) Degradazione mediante la beta-ossidazione

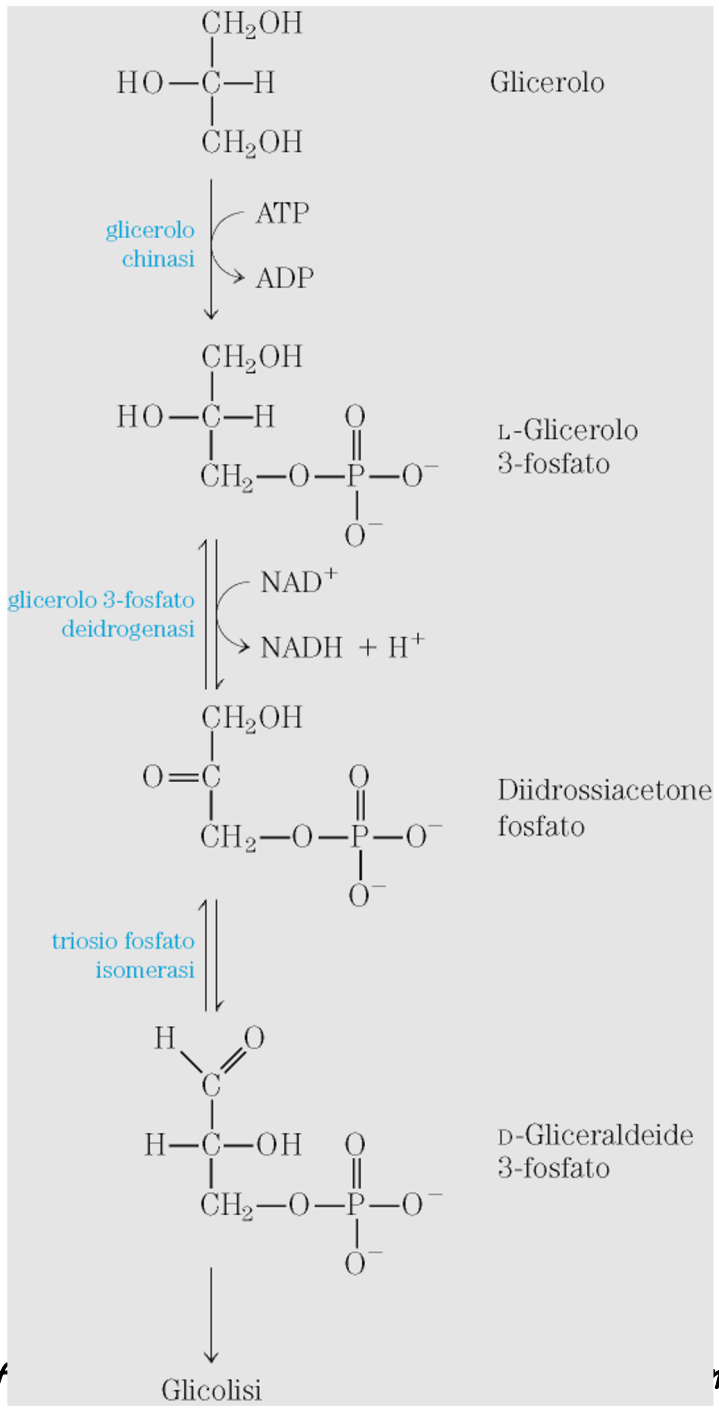


Mobilizzazione dei triacilgliceroli



Mobilizzazione dei triacilgliceroli





Destino del glicerolo

Catabolismo degli acidi grassi

Avviene nella matrice mitocondriale, mediante un processo detto di “ β -ossidazione” che consiste di 4 reazioni che si ripetono ciclicamente.

La β -ossidazione porta alla formazione di:

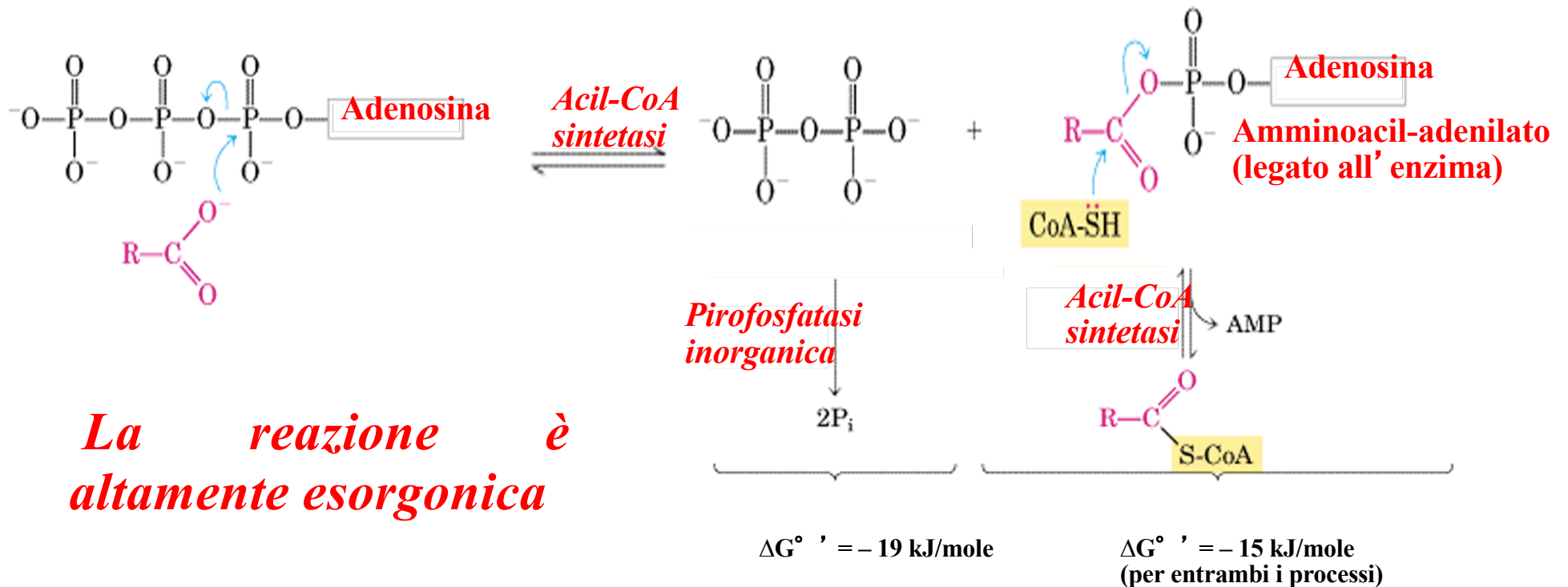
- **acetil-CoA** e coenzimi ridotti (**NADH e FADH₂**).

La β -ossidazione è preceduta da:

- una tappa di attivazione dell'acido grasso (formazione di Acil-CoA) che avviene nel citoplasma;
- trasporto dell'Acil-CoA nel mitocondrio, mediante un trasportatore specifico

Attivazione dell'acido grasso: formazione di Acil-CoA

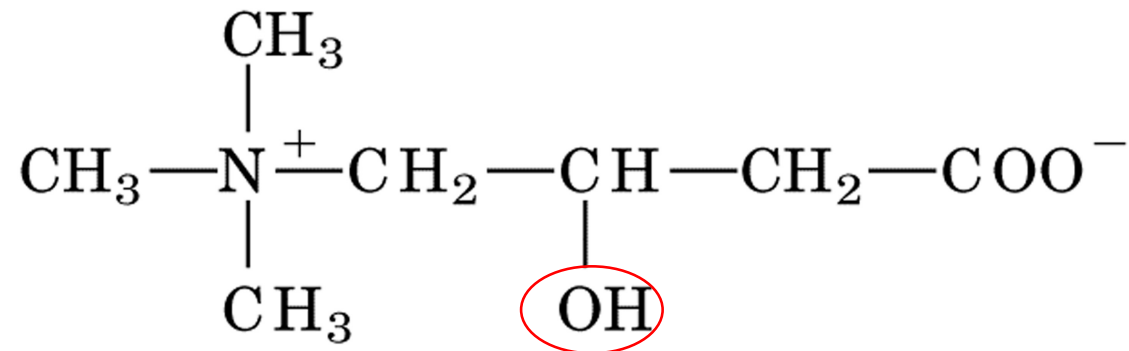
La reazione avviene nel citoplasma ed è catalizzata dall'enzima *Acil-CoA sintetasi*, associato al reticolo endoplasmatico rugoso o alla membrana mitocondriale esterna. E' consumato ATP



La reazione è altamente esergonica

La carnitina

Gli acidi grassi attivati vengono trasportati attraverso la membrana mitocondriale mediante un trasportatore particolare la carnitina.

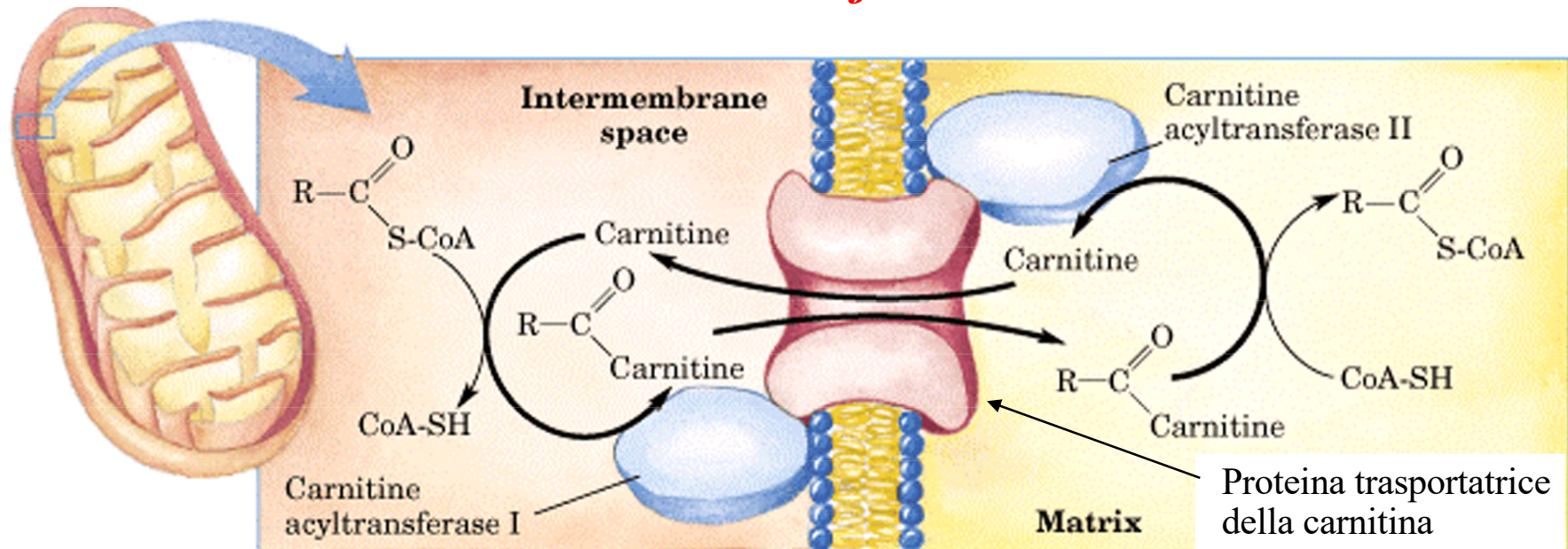


Gli acili provenienti dagli acidi grassi attivati si legano alla carnitina mediante un legame estereo al gruppo -OH.

La reazione è catalizzata dall'enzima *carnitina-acil-trasferasi di tipo I*, un enzima citoplasmatico.

L'Acil-carnitina così formata viene trasportata attraverso la membrana da una proteina trasportatrice specifica della carnitina.

L'Acil-carnitina viene ritrasformata in Acil-CoA e carnitina nel mitocondrio dalla *carnitina acil-trasferasi II*.



La carnitina viene ritrasportata nel citoplasma dalla stessa proteina trasportatrice specifica della carnitina.

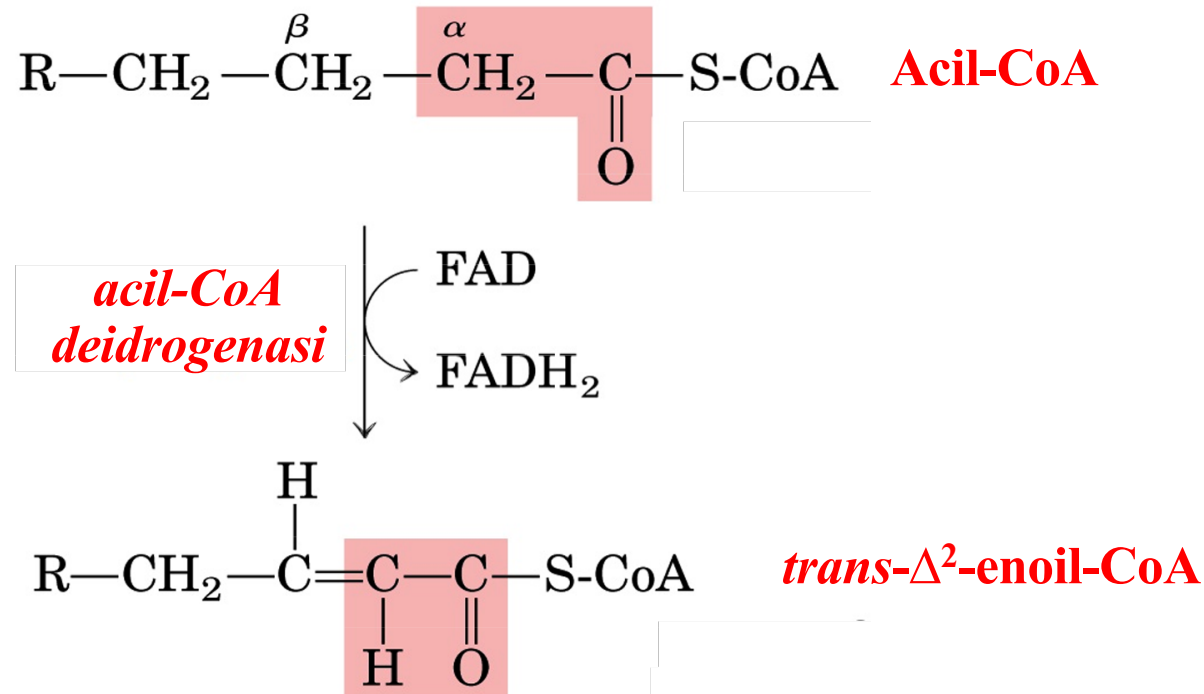
Catabolismo degli acidi grassi: la β -ossidazione

La β -ossidazione è un processo ciclico di quattro reazioni in cui la molecola di acido grasso viene ridotta di due atomi di carbonio per ogni ciclo con formazione di:

- Acetil-CoA**
- FADH₂**
- NADH**

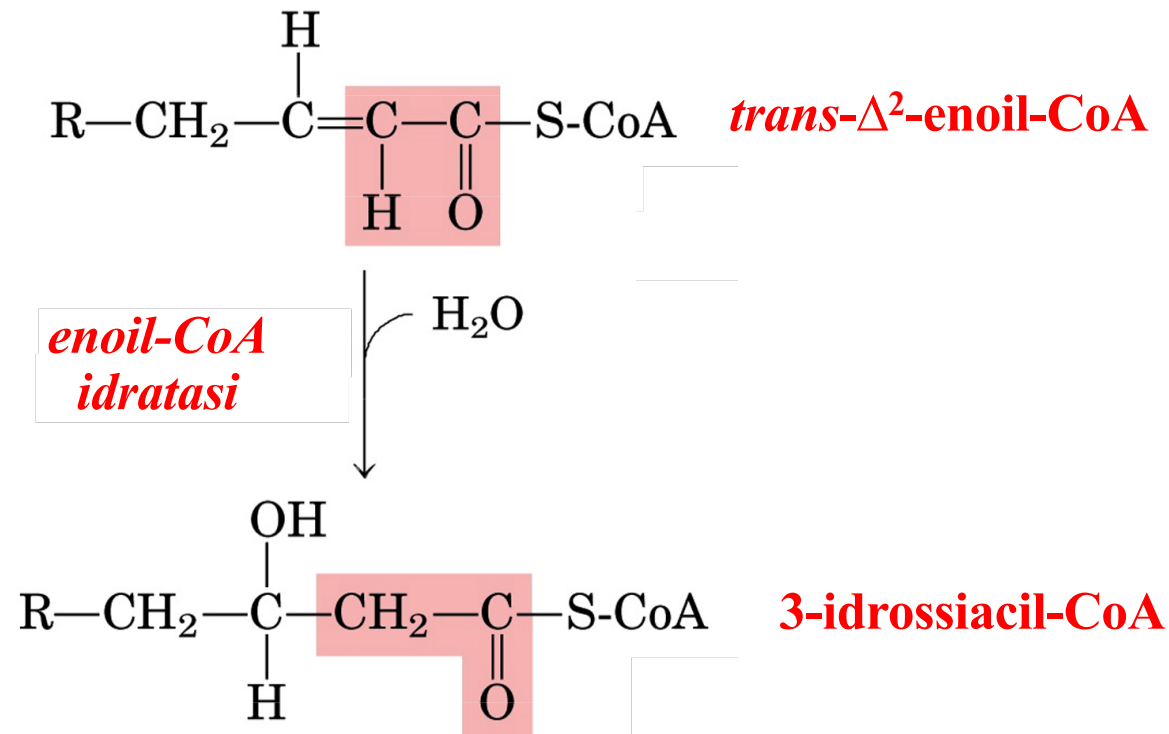
Reazione 1 della β -ossidazione: *Acil-CoA deidrogenasi*

Catalizza la formazione di un doppio legame attraverso una deidrogenazione tra il carbonio α e β dell'Acil-CoA. Gli atomi di idrogeno e gli equivalenti riducenti vengono trasferiti al FAD.



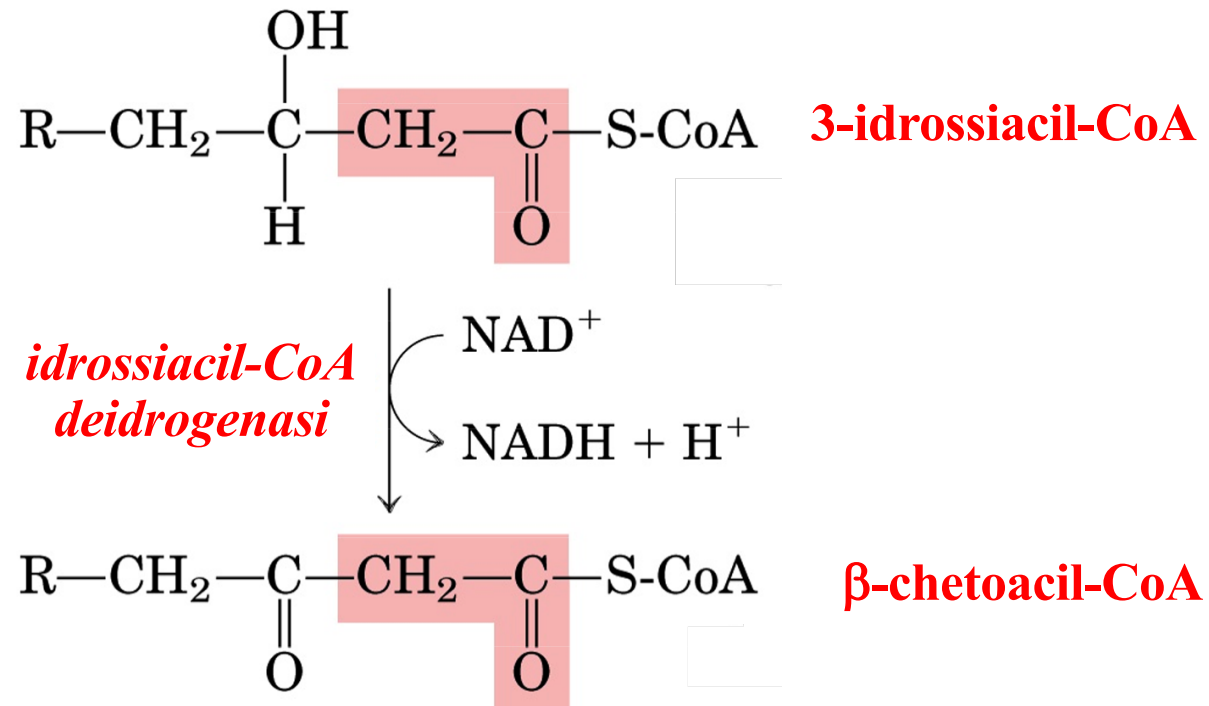
Reazione 2 della β -ossidazione: *enoil-CoA idratasi*

Catalizza l'idratazione del doppio legame dell'enoil-CoA.



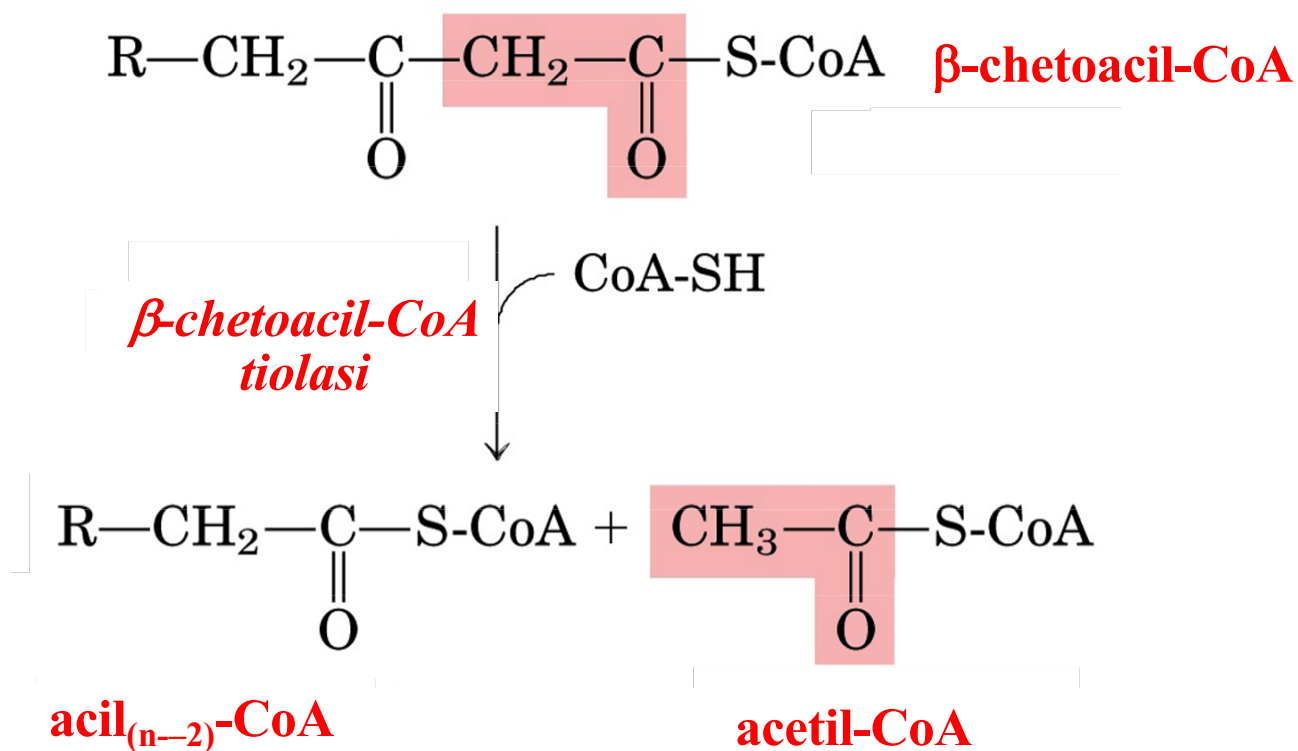
Reazione 3 della β -ossidazione: *idrossiacil-CoA deidrogenasi*

Catalizza la deidrogenazione NAD^+ dipendente dell'idrossiacil-CoA. Si ha la produzione di una molecola di NADH.



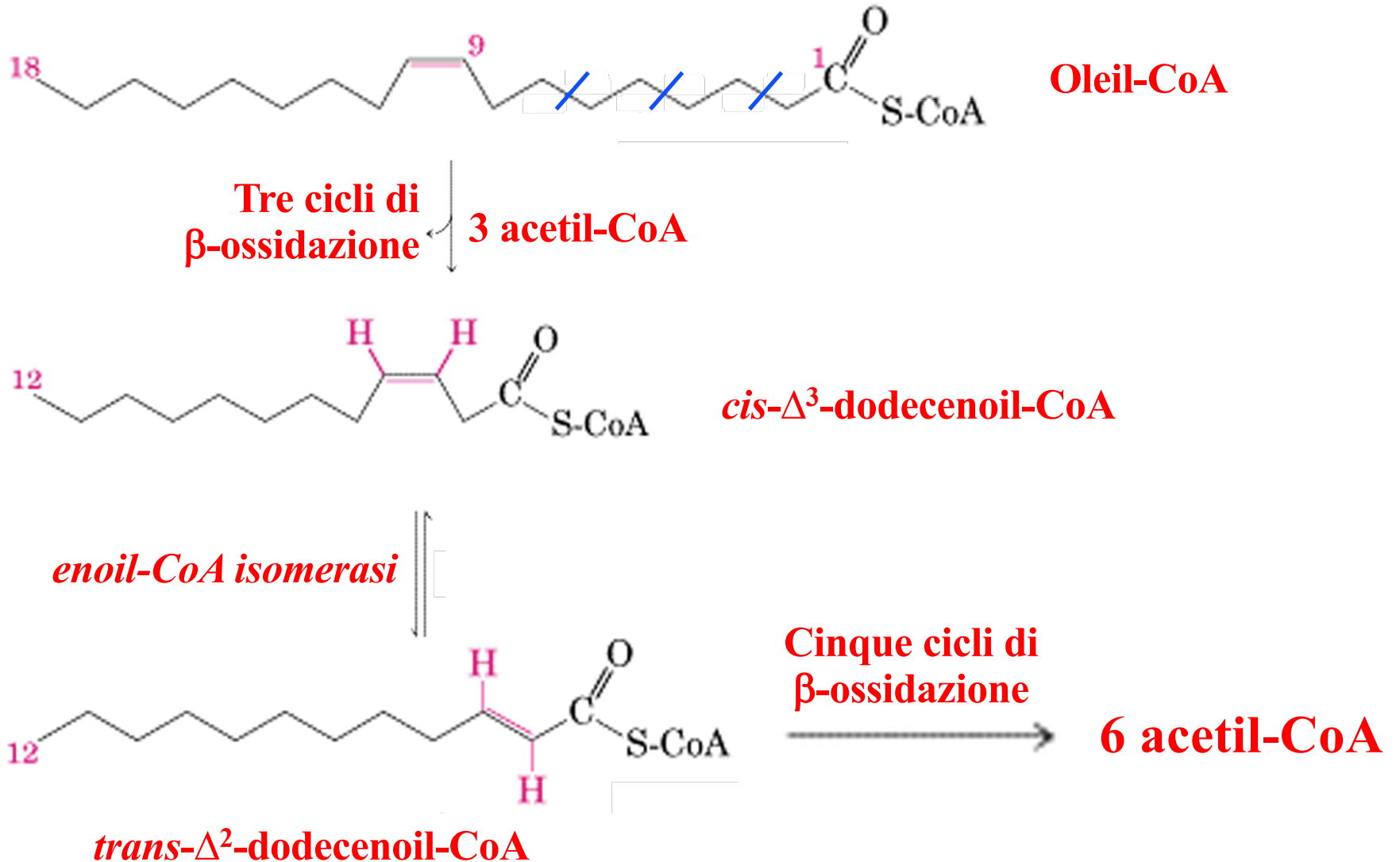
Reazione 4 della β -ossidazione: β -chetoacil-CoA tiolasi

Catalizza la scissione del legame $C\alpha - C\beta$ con produzione di Acetil-CoA ed un Acil-CoA ridotto di due atomi di carbonio.



Ossidazione degli acidi grassi insaturi

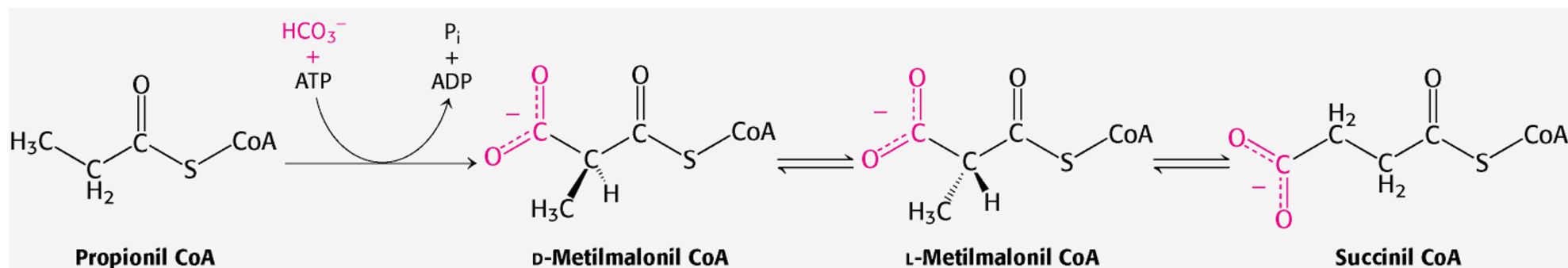
Il caso dell'acido oleico (C18)



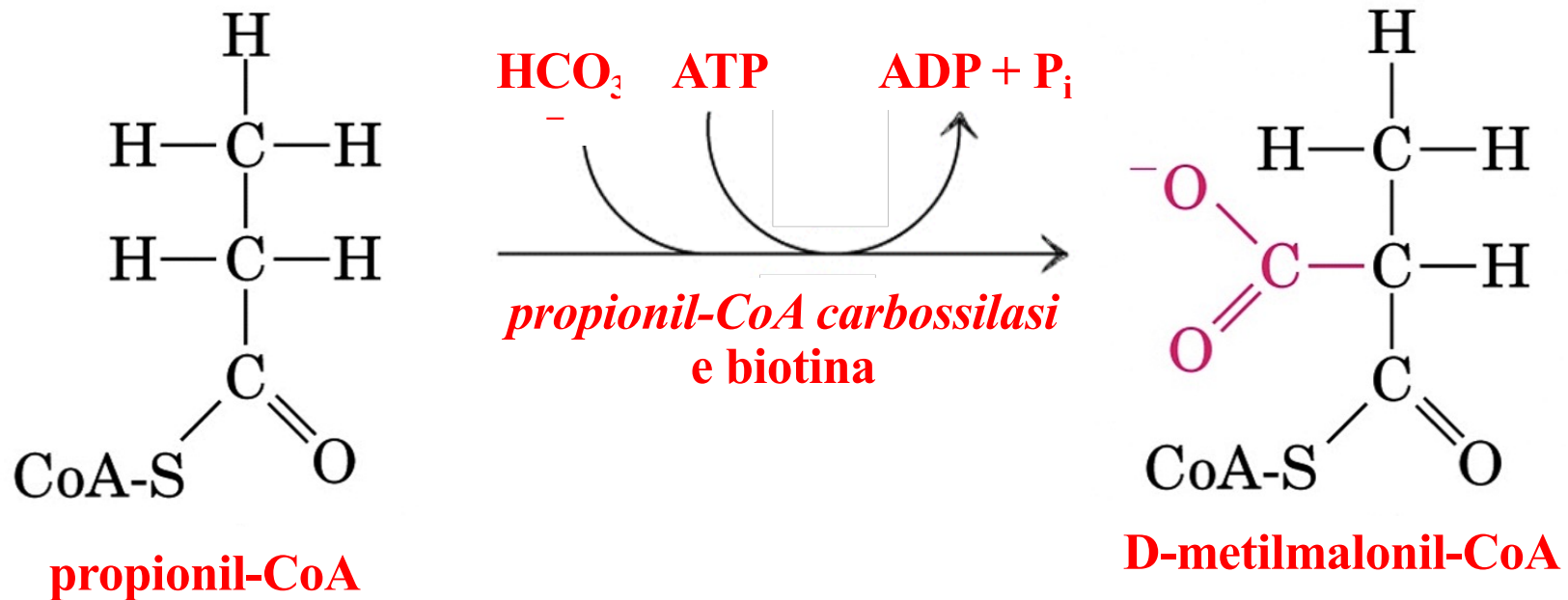
Ossidazione degli acidi grassi a catena dispari

In questi casi, il prodotto dell'ultimo ciclo della β -ossidazione è il Propionil-CoA in cui un acile a tre atomi di carbonio è legato al Coenzima A.

Il Propionil-CoA viene trasformato in Succinil-CoA, un intermedio del ciclo di Krebs, mediante tre reazioni.



Reazione 1: *propionil-CoA carbossilasi*.



Reazione 2: *metilmalonil-CoA racemasi*.

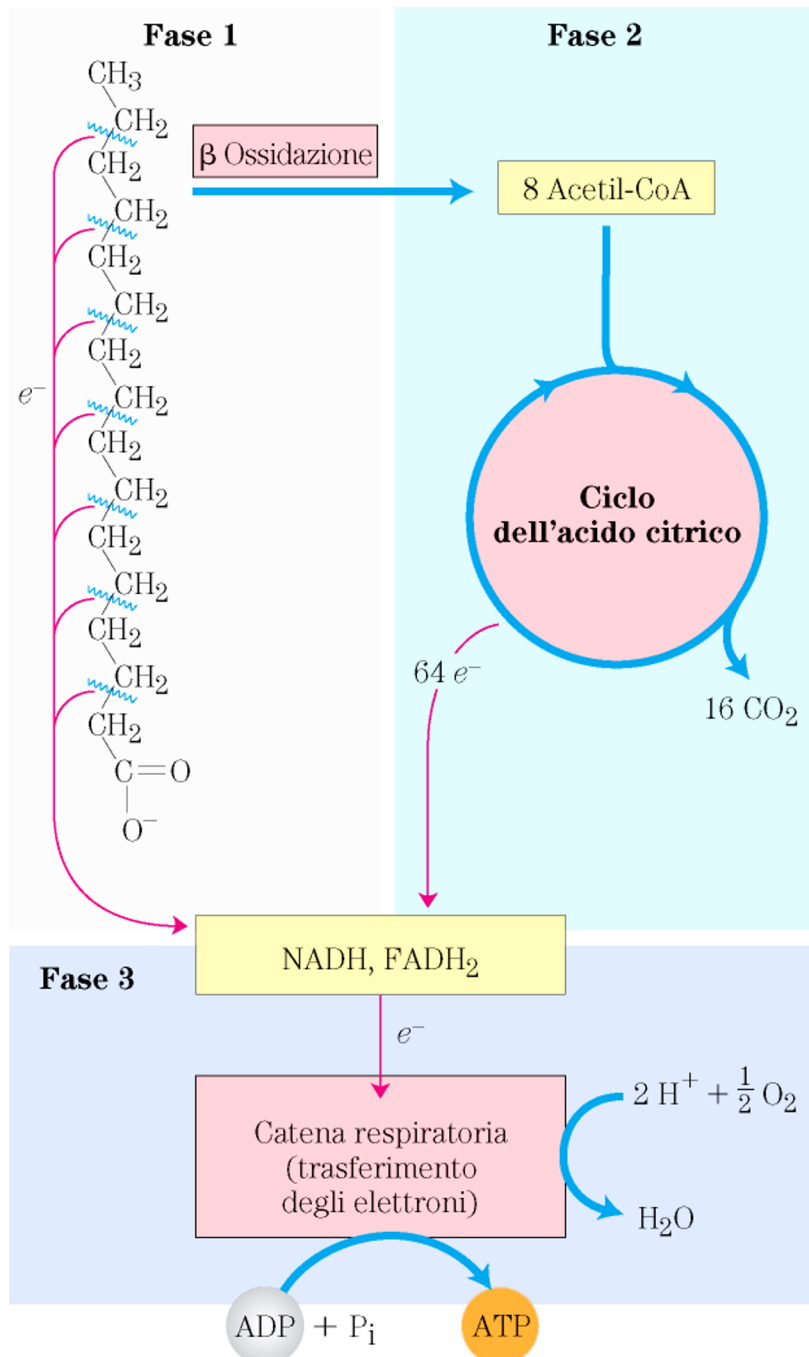


Reazione 3: *metilmalonil-CoA mutasi*.



L'enzima *metilmalonil-CoA mutasi*. Utilizza come gruppo prostetico un derivato della **vitamina B12 o cobalammina, una vitamina contenente cobalto (Co^{3+})** non sintetizzabile dal organismo umano. L'apporto di questa vitamina, prodotta solo da alcuni batteri, viene assicurata con la dieta.

Questo gruppo prostetico (anche come coenzima B12) viene utilizzato in tutte le reazioni in cui gli enzimi catalizzano una trasposizione vicinale di gruppi funzionali.



Fasi dell'ossidazione degli acidi grassi

Bilancio energetico della beta ossidazione degli acidi grassi

I prodotti della β -ossidazione degli acidi grassi sono Acetil-CoA e coenzimi ridotti (NADH e FADH₂). Questi composti possono portare alla formazione di ATP se proseguono il loro catabolismo nel ciclo di Krebs e nella fosforilazione ossidativa.

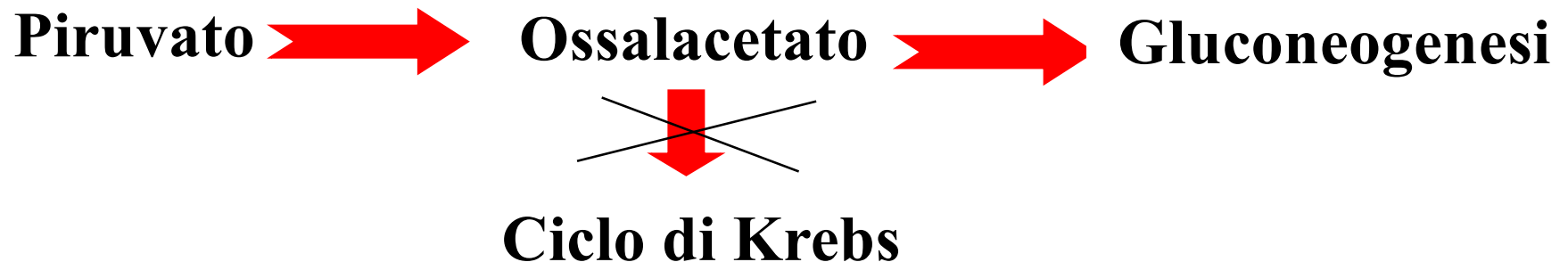
Il numero massimo di molecole di ATP che possono essere prodotte dalla ossidazione dipende dal numero di atomi di carbonio dell'acido grasso e dalla eventuale presenza di doppi legami. Per esempio dall'acido palmitico (satturo, C16) in seguito a 7 cicli di β -ossidazione si può ottenere:

8 Acetil-CoA	$\xrightarrow{\text{C. Krebs}}$	24 NADH + 8 FADH ₂ + 8 GTP	
		60 ATP + 12 ATP + 8 ATP	80,0 ATP
7 NADH	$\xrightarrow{\text{Fosforilazione ossidativa}}$		17,5 ATP
7 FADH ₂	$\xrightarrow{\text{Fosforilazione ossidativa}}$		10,5 ATP
Attivazione iniziale	$\xrightarrow{\quad\quad\quad}$		- 2,0 ATP
		Totale	106,0 ATP

“I grassi bruciano al fuoco dei carboidrati”

Quando i carboidrati non sono disponibili (condizione di digiuno prolungato o stato diabetico), predomina la degradazione degli acidi grassi.

In queste condizioni, la concentrazione di ossalacetato diminuisce e quindi l'Acetil CoA non può entrare nel ciclo di Krebs



Chetogenesi

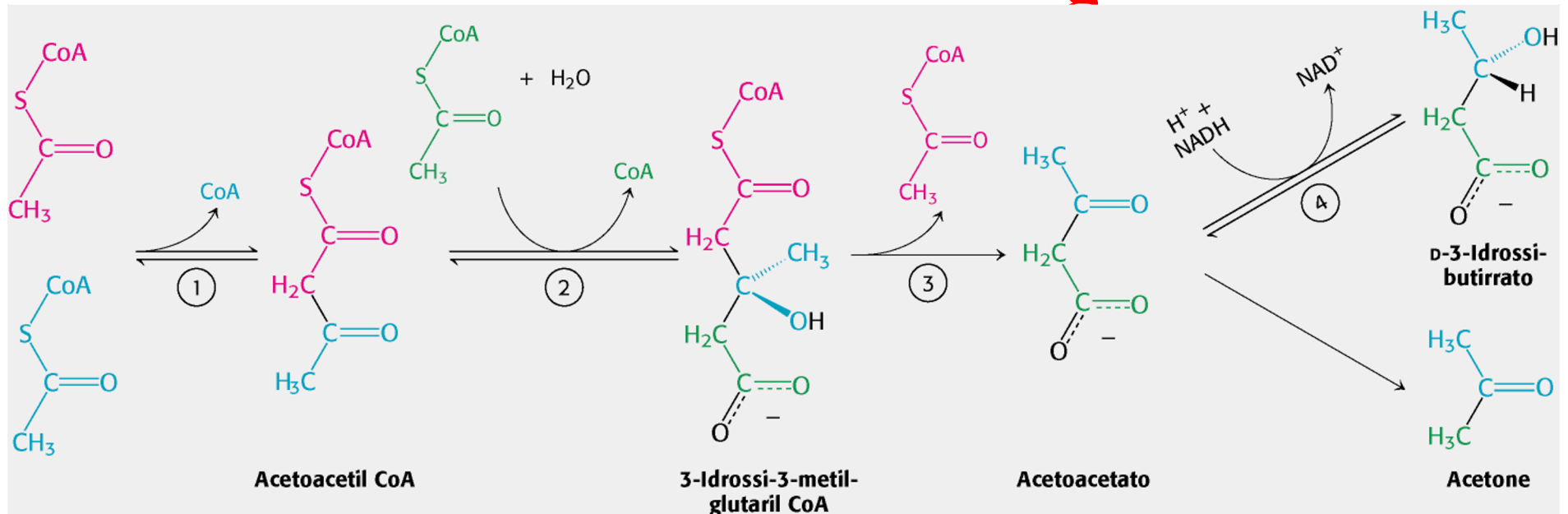
L'acetil-CoA prodotto dalla ossidazione degli acidi grassi può essere utilizzato anche per la produzione dei cosiddetti **corpi chetonici (acetoacetato, β -idrossibutirrato e acetone)**.

Questo processo, definito **chetogenesi**, avviene nelle cellule epatiche.

I corpi chetonici costituiscono importanti carburanti metabolici per cervello, cuore e muscoli, quando l'apporto di glucosio si riduce.

La chetogenesi si verifica anche in condizioni di accumulo di Acetil-CoA (eccesso della dieta, condizioni patologiche, ecc.).

Le reazioni della chetogenesi



- Enzimi:** 1) 3-chetotilasi (reazione inversa della tiolisi della β -ossidazione)
2) idrossimetilglutaril CoA sintasi
3) enzima di scissione dell'idrossimetilglutaril CoA
4) D-3-idrossibutirrato deidrogenasi

L'acetoacetato decarbossila spontaneamente o mediante l'enzima acetoacetato decarbossilasi formando **acetone, volatile, che è eliminato attraverso la respirazione.**

I corpi chetonici sono un importante combustibile per alcuni tessuti

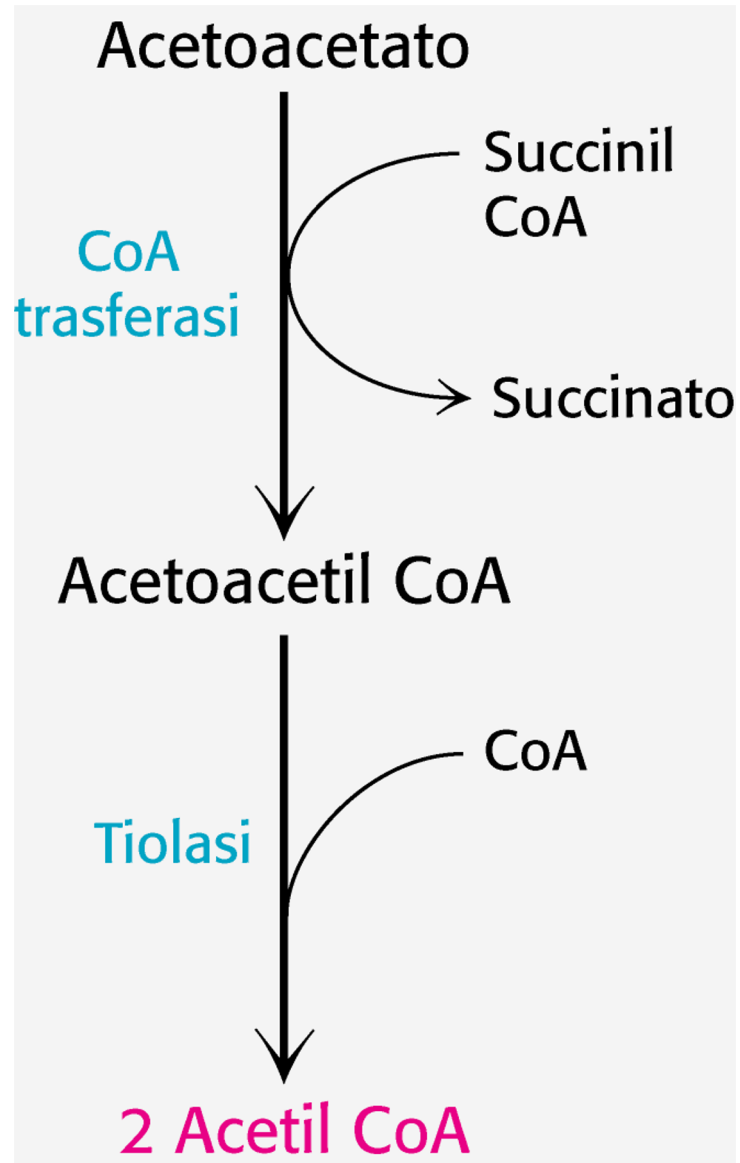
I corpi chetonici diffondono dai mitocondri del fegato al sangue dove raggiungono i tessuti periferici

Il cuore, il muscolo e la corteccia renale preferiscono l'acetoacetato al glucosio

Al contrario, il cervello ed i globuli rossi preferiscono il glucosio se è disponibile, ma in condizione di digiuno o di diabete, il cervello si adatta ad utilizzare l'acetoacetato.

Nel digiuno prolungato, il 75 % della richiesta energetica è soddisfatta dai corpi chetonici

Utilizzo dell'acetoacetato



L'acetoacetato e il β -idrossibutirrato rilasciati dal fegato raggiungono i tessuti periferici dove sono riconvertiti in due molecole di acetil-CoA che poi entrano nel ciclo di Krebs.

Nella prima reazione l'acetoacetato è attivato tramite trasferimento del CoA dal Succinil CoA.

Nella seconda reazione, l'acetoacetil CoA è scisso in 2 molecole di Acetil CoA da una tiolasi.

I corpi chetonici possono essere considerati come una forma idrosolubile e trasportabile di unità acetiliche.

L'acetoacetato svolge anche un ruolo di regolazione, infatti, quando raggiunge una concentrazione ematica elevata, determina una diminuzione della velocità di lipolisi nel tessuto adiposo.

Elevate concentrazioni di corpi chetonici che si riscontrano in alcune patologie possono condurre a morte, es. chetosi diabetica

(I corpi chetonici sono acidi moderatamente forti, per cui un loro accumulo provoca acidosi)

La chetosi diabetica si manifesta quando l'insulina è assente

