

lab3841

we make electronic things



lab3841

Autore



- Studente di Ingegneria Informatica presso il Politecnico di Torino
- Tirocinante presso lab3841 nel periodo estivo 2024
- **Contatti:**
 - teddematteo03@gmail.com
 - s307688@studenti.polito.it

PRS10

Rubidium Frequency Standard



Legenda

- Panoramica sugli oscillatori
- Panoramica su PRS10
 - Introduzione teorica
 - Descrizione del Frequency Lock-Loop (FLL)
 - Descrizione del 1PPS Lock-Loop (PLL)



Panoramica sugli oscillatori

Oscillatori a quarzo, atomici, LC/RC



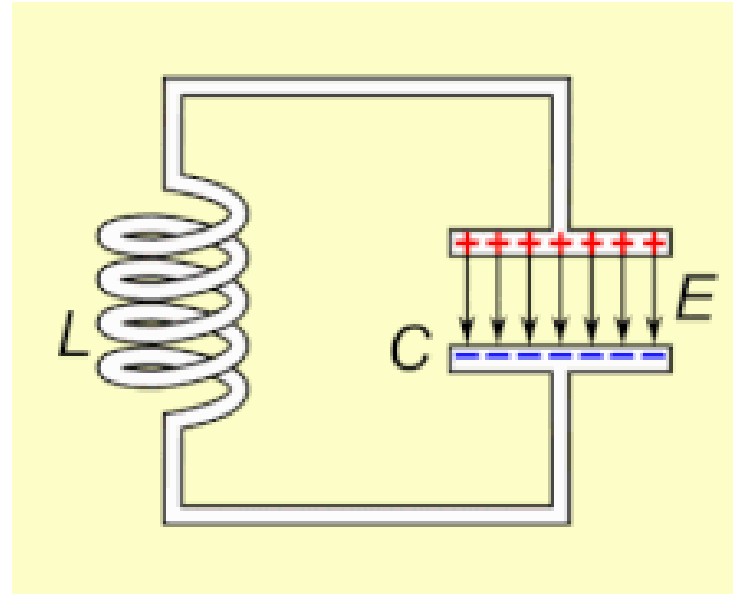
Oscillatori

- Gli **oscillatori** sono dispositivi in grado di **generare un segnale periodico**. Essi si distinguono sulla base di vari parametri, quali:
 - **Accuratezza**: un oscillatore si dice «**accurato**» quando la sua **frequenza effettiva si avvicina a quella desiderata**
 - **Precisione**: un oscillatore si dice «**preciso**» quando è in grado di produrre lo **stesso risultato nelle stesse condizioni fisiche** (pressione, temperatura, ecc...)
 - **Stabilità**: è la capacità di un oscillatore di **mantenere una frequenza costante nel tempo**. Può essere stabilità a lungo termine (giorni/mesi) o a breve termine (secondi/minuti)



Oscillatori RC e LC

- Sfruttano circuiti composti da **resistenze e condensatori** (RC) o **induttori e condensatori** (LC)
- Sono tra gli **oscillatori** più semplici ed **economici**, ma non offrono precisione, accuratezza e stabilità buona rispetto agli altri oscillatori



Oscillatori al quarzo

- Sfruttano la **vibrazione prodotta da un cristallo di quarzo** quando viene applicata una determinata tensione. La frequenza dipende da vari parametri, quali il «**taglio**» del quarzo
- L'**accuratezza** di un oscillatore a quarzo può essere facilmente **compromessa da un minimo cambio di temperatura**



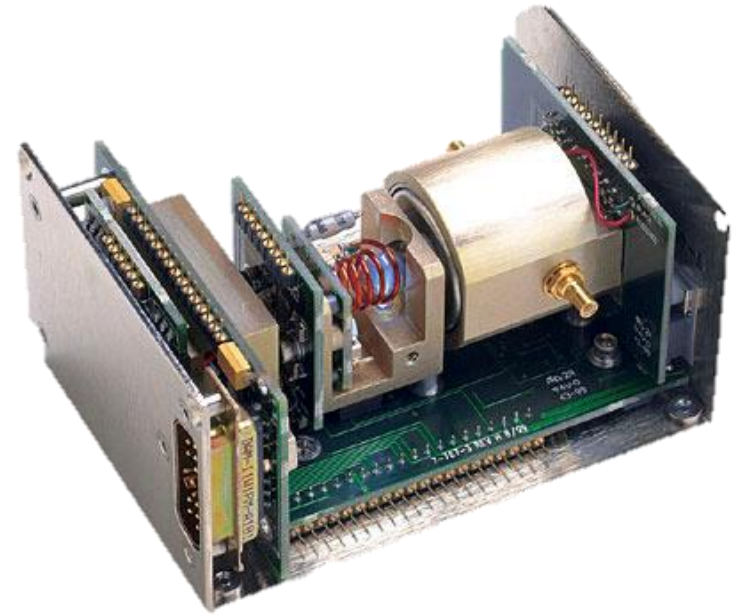
Oscillatori al quarzo «in forno» (OCXO)

- Applicando una temperatura costante ad un oscillatore al quarzo (tramite un forno) si può ottenere un miglioramento della sua accuratezza e della sua stabilità a breve termine
- La stabilità a lungo termine può invece essere compromessa da altri fattori, come l'invecchiamento del cristallo



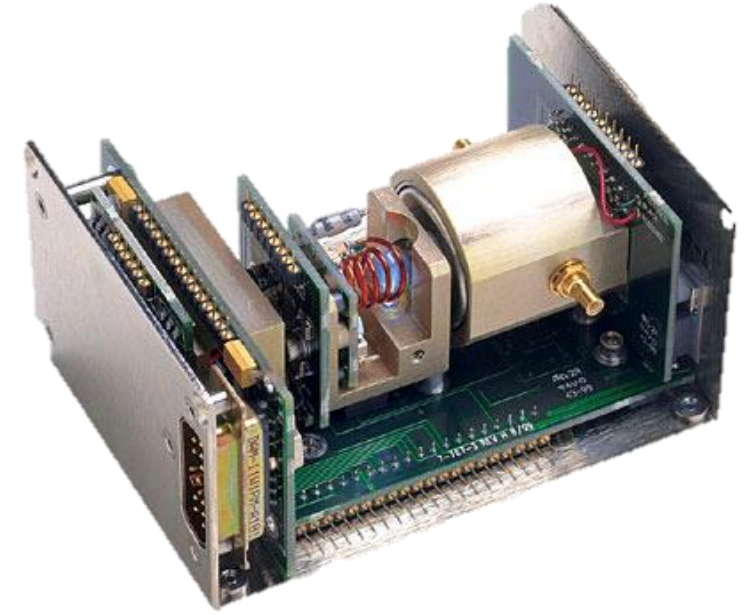
Oscillatori atomici

- Gli oscillatori atomici sfruttano la **frequenza di transizione di alcuni atomi** (come il rubidio e il cesio) per generare una **frequenza** che è estremamente **precisa, accurata e stabile** nel tempo
- Gli oscillatori atomici godono, infatti, di una **stabilità a lungo termine migliore** rispetto ai classici oscillatori al quarzo



Oscillatori: applicazioni

- Gli oscillatori trovano una naturale applicazione in moltissimi settori:
 - Misurazione del tempo
 - Telecomunicazioni
 - Generazione segnali di informazione
 - Sincronizzazione di reti
 - Geolocalizzazione (GNSS)
 - Elaborazione digitale
 - Clock per processori e microcontrollori



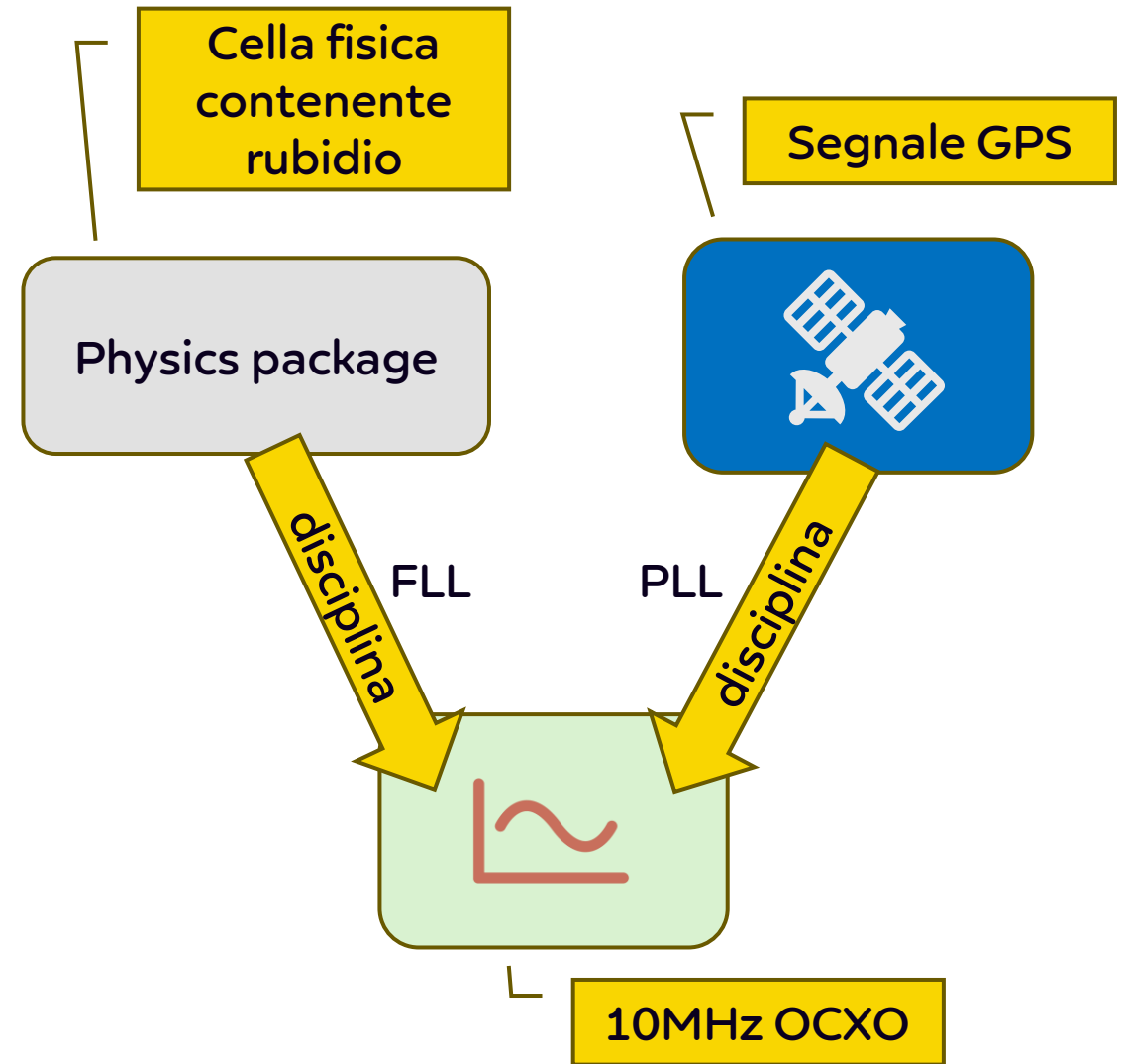
Panoramica su PRS10

Caratteristiche tecniche, FLL, PLL, ...



PRS10

- L'oscillatore PRS10 è un **oscillatore atomico a rubidio** a **bassissimo rumore**, in grado di generare una frequenza a **10MHz**. La frequenza è generata da un **OCXO a 10MHz**, **disciplinato** proprio dalla frequenza di **transizione del rubidio**
- Questo meccanismo rende il **PRS10** un **oscillatore ad altissima accuratezza**, che può essere sfruttata nella sincronizzazione in rete e come base nei frequenzimetri
- Per aumentare ulteriormente la stabilità a lungo termine, il **PRS10** può essere **disciplinato da un segnale esterno** (come quello del GNSS)



Rubidio (Rb)



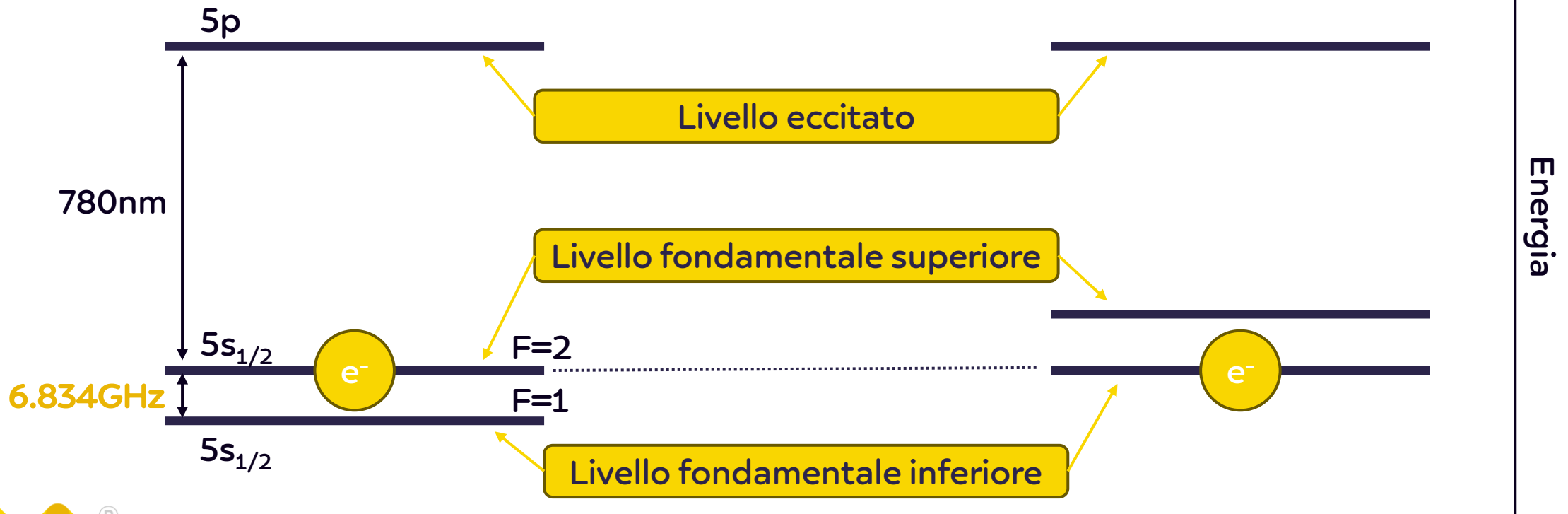
- Il **rubidio**, come tutti i metalli alcalini, presenta **un solo elettrone** nel livello elettronico più esterno
- Questo elettrone può trovarsi allo **stato fondamentale** (livello 5s), ma se eccitato con la giusta quantità di energia, può saltare al **livello energetico successivo** (livello 5p)
- Il rubidio presenta inoltre due isotopi, **Rb85** e **Rb87**, con abbondanza rispettivamente del 78% e 22%



Rubidio Rb87 e Rb85

- Rubidio **Rb87**

- Rubidio **Rb85**



Discharge lamp



Isotopic filter



RF Synthesizer



Resonance cell



Magnetic field

Photocell



PRS10

Cella fisica

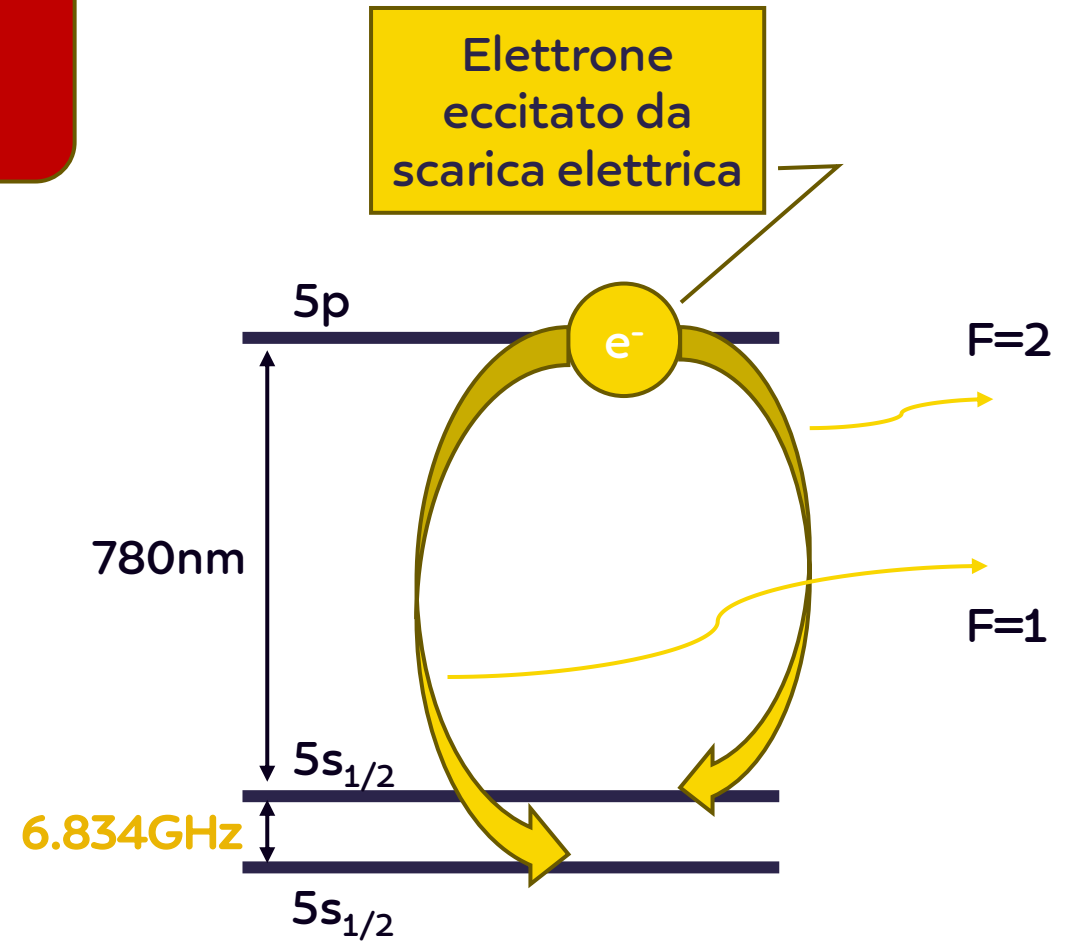


lab3841

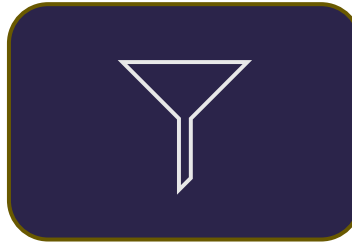
Discharge lamp



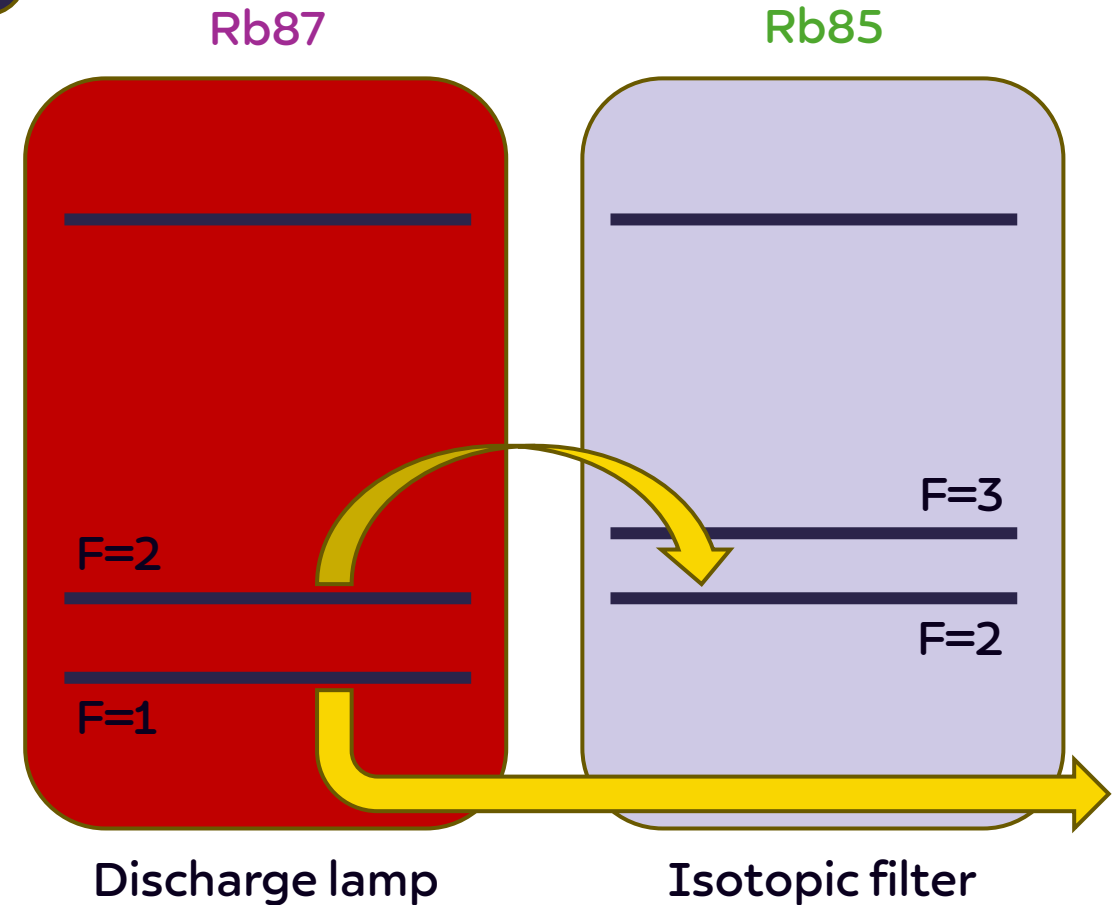
- La lampada a scarico Rb87 è costituita da un tubo di vetro contenente una piccola quantità di rubidio. Applicando una scarica elettrica agli elettrodi, gli atomi vengono portati allo stato eccitato. Tornando allo stato fondamentale, gli atomi di rubidio emettono luce a due lunghezze d'onda specifiche, corrispondenti ai due stati fondamentali



Isotopic filter



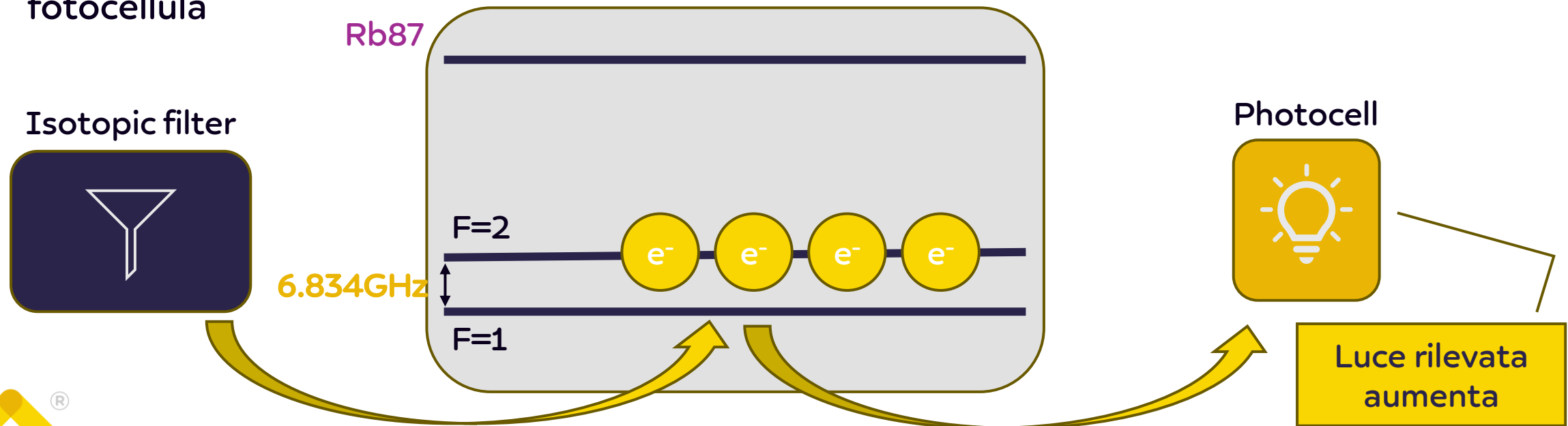
- La luce proveniente dalla lampada a scarico viene successivamente filtrata attraverso un **filtro isotopico**, costituito da un **vapore di Rb85**. Esso andrà ad assorbire le **lunghezze d'onda corrispondenti al livello fondamentale superiore del Rb87**. Facendo in questo modo, alla cella di risonanza arriveranno solamente le **lunghezze d'onda corrispondenti al livello fondamentale inferiore del Rb87**



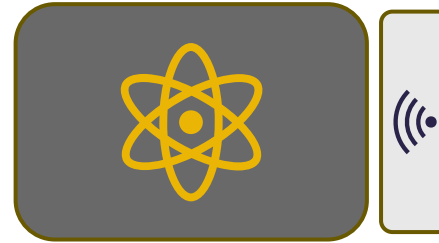
Resonance cell (1)



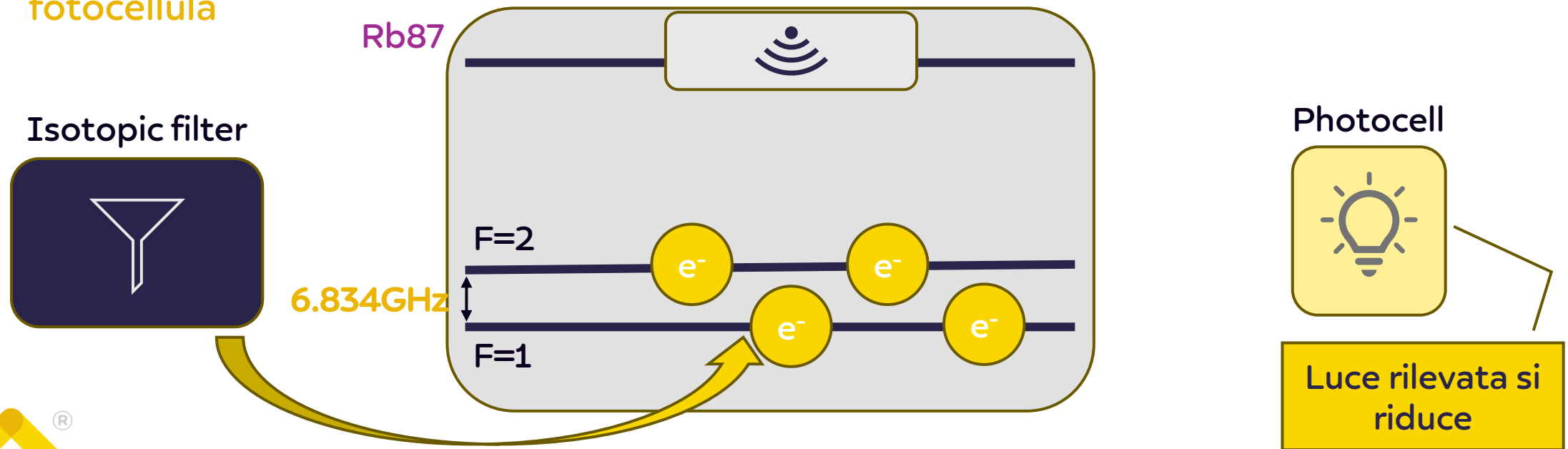
- All'interno della cella di risonanza troviamo nuovamente **atomi di Rb87**, in grado di **assorbire la frequenza restituita dal filtro isotopico**. A causa dell'effetto del **pompaggio ottico**, la popolazione di elettroni tenderà a muoversi nel **livello fondamentale superiore**, portando ad un **aumento** della luce rilevata dalla fotocellula



Resonance cell (2)



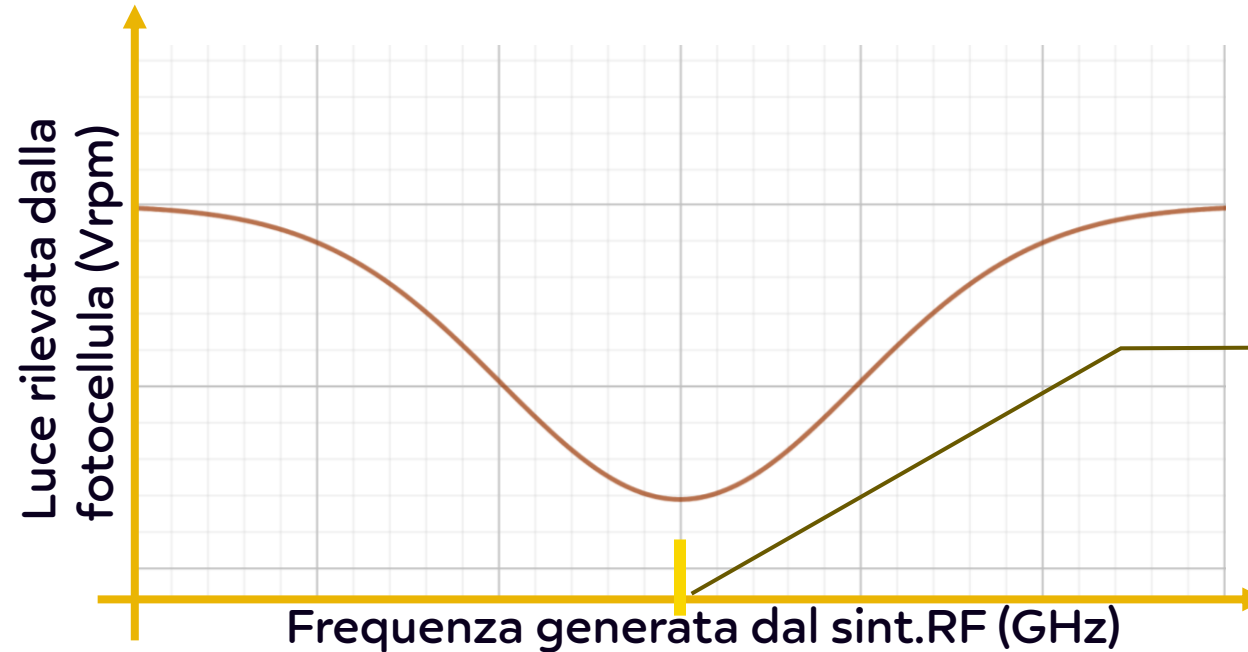
- Ma se invece applichiamo un campo di microonde esattamente alla frequenza di transizione, la popolazione tenderà a mescolarsi nei due livelli fondamentali. Siccome gli elettroni nel livello $F=1$ aumentano, essi potranno assorbire la frequenza corrispondente, portando ad una riduzione di luce rilevata dalla fotocellula



Photocell and RF Synthesizer (1)

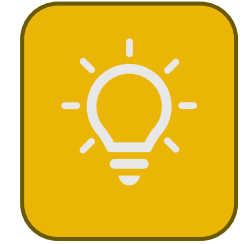


- Le microonde sono generate da un **sintetizzatore RF**. Riepilogando, quando la sua frequenza si discosta da quella di transizione del rubidio, **la luce rilevata dalla fotocellula aumenta**, mentre **quando corrisponde esattamente al suo valore (=6.834GHz) la luce rilevata dalla fotocellula è MINIMA**



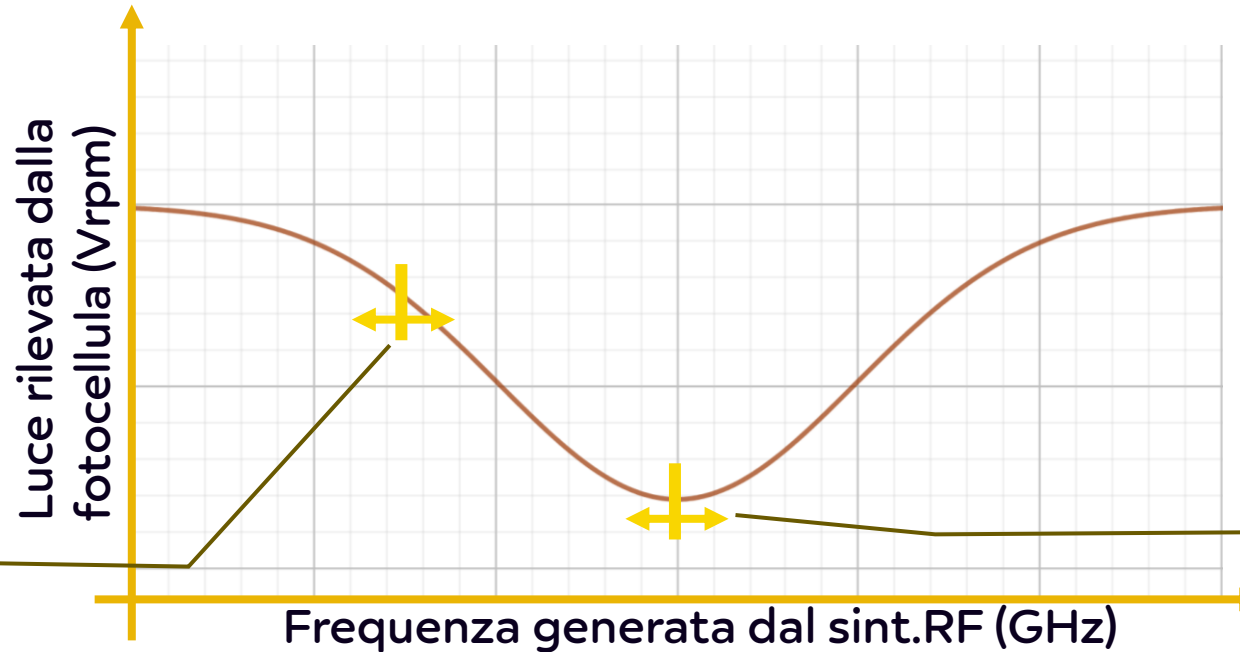
In corrispondenza di 6.834GHz il valore della luce rilevata è minimo

Photocell and RF Synthesizer (2)



- Ma come capire se la frequenza generata è minima? Per farlo la frequenza generata dal sintetizzatore RF viene fatta “oscillare” con una velocità di 70Hz (e un’ampiezza di 300Hz). Se la frequenza è centrata su quella di transizione, la fotocellula registrerà una componente di uscita in ac a 140Hz

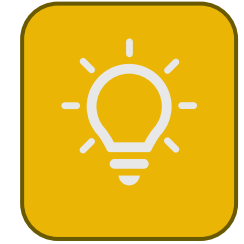
Se il sintetizzatore non è ben “centrato”, ogni secondo registreremo solo 70 variazioni (l’intensità registrata scende per poi risalire in ogni ciclo)



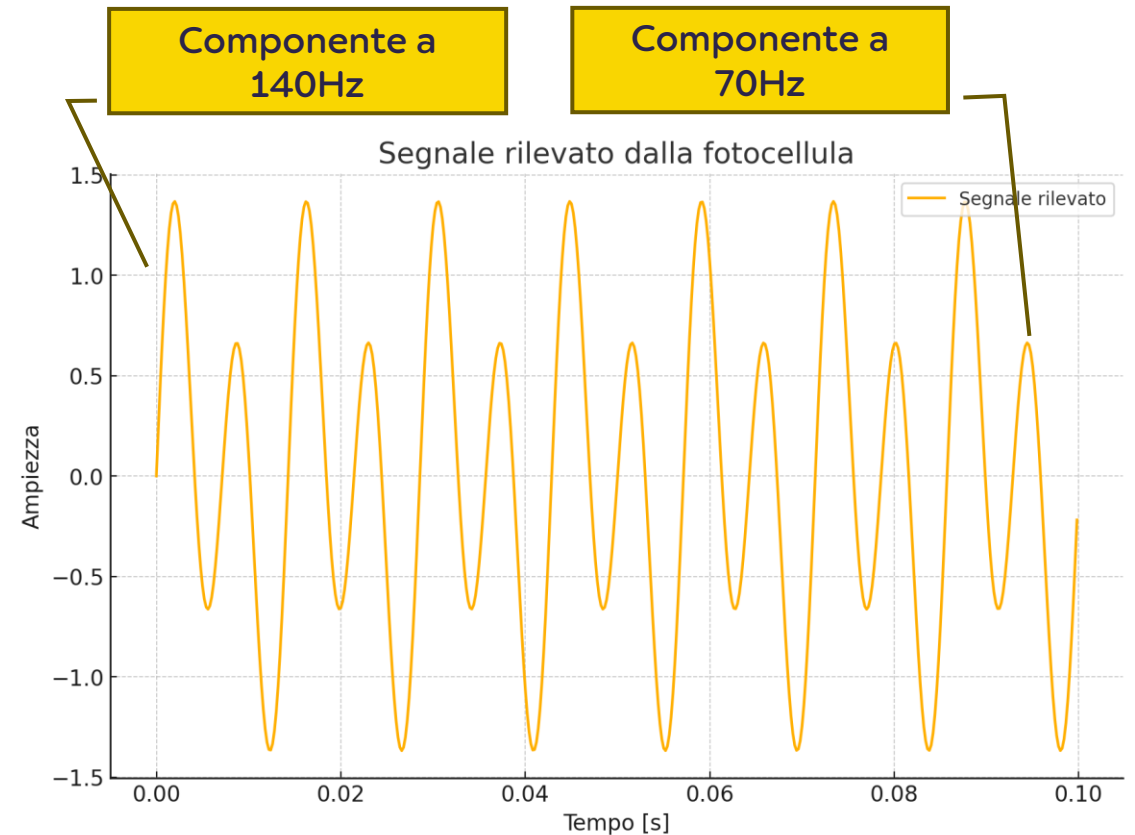
Se il sintetizzatore è ben “centrato”, ogni secondo si registreranno il doppio delle variazioni (l’intensità scende, risale, per poi riscendere e risalire in ogni ciclo). In output avremo una componente a 140Hz



Photocell and RF Synthesizer (3)



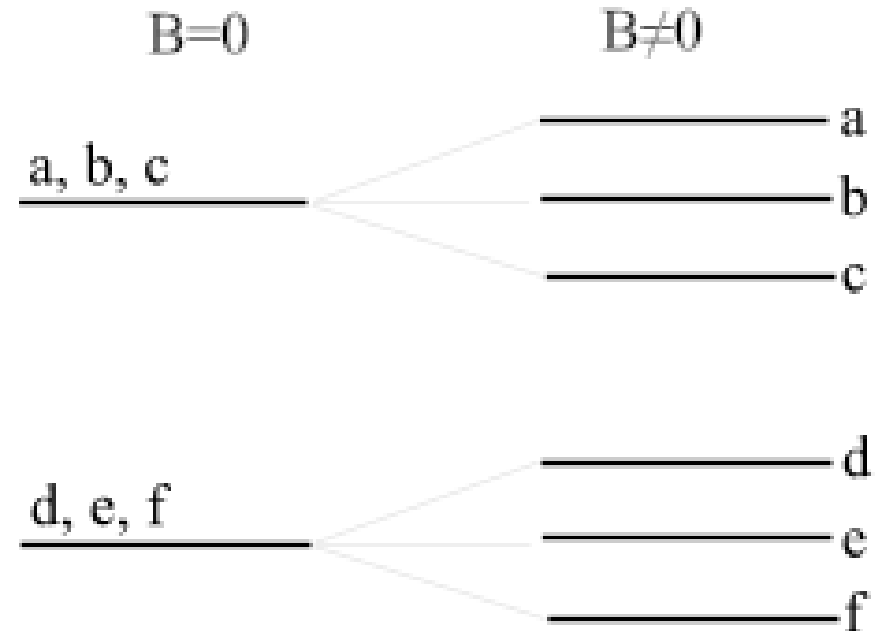
- L'ampiezza del segnale rilevato dalla fotocellula a 70Hz e a 140Hz, diventano, rispettivamente, una misura dell'errore e della forza del segnale di risonanza. Una riduzione significativa nell'ampiezza del segnale a 140Hz porterà l'orologio a correggere la frequenza generata dal sintetizzatore RF, in modo da riallinearla a quella di transizione del rubidio
- La frequenza a cui opera il sintetizzatore RF (=6.834GHz) diventa perciò il riferimento temporale che disciplinerà l'OCXO a 10MHz



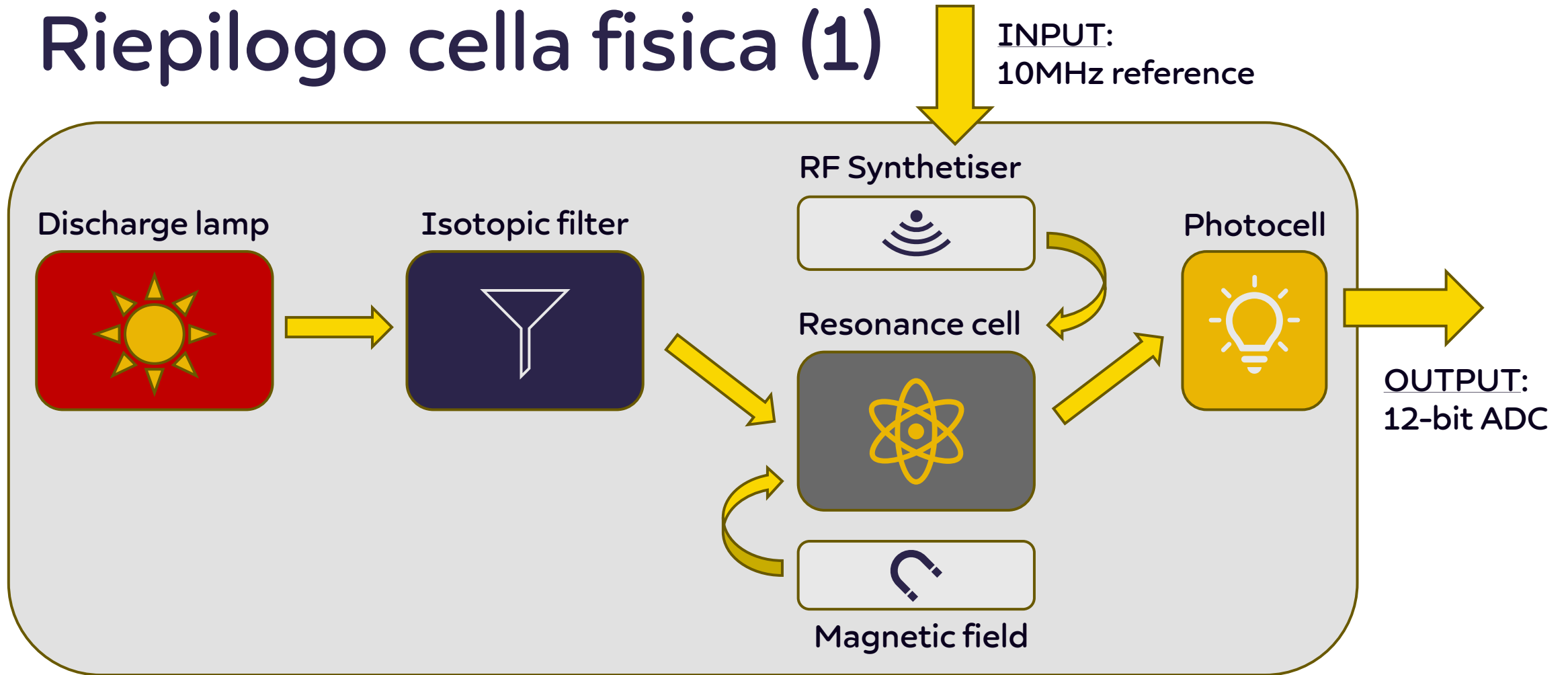
Magnetic field



- Un'altra componente chiave all'interno della cella fisica è il **campo magnetico generato tramite una bobina**
- La **corrente** all'interno della bobina viene **commutata con una frequenza di 5Hz**. Questo permette di ridurre l'azione di possibili campi magnetici esterni
- La variazione del campo magnetico, inoltre, consente di **calibrare la frequenza di transizione del rubidio**, a causa del cosiddetto Effetto Zeeman



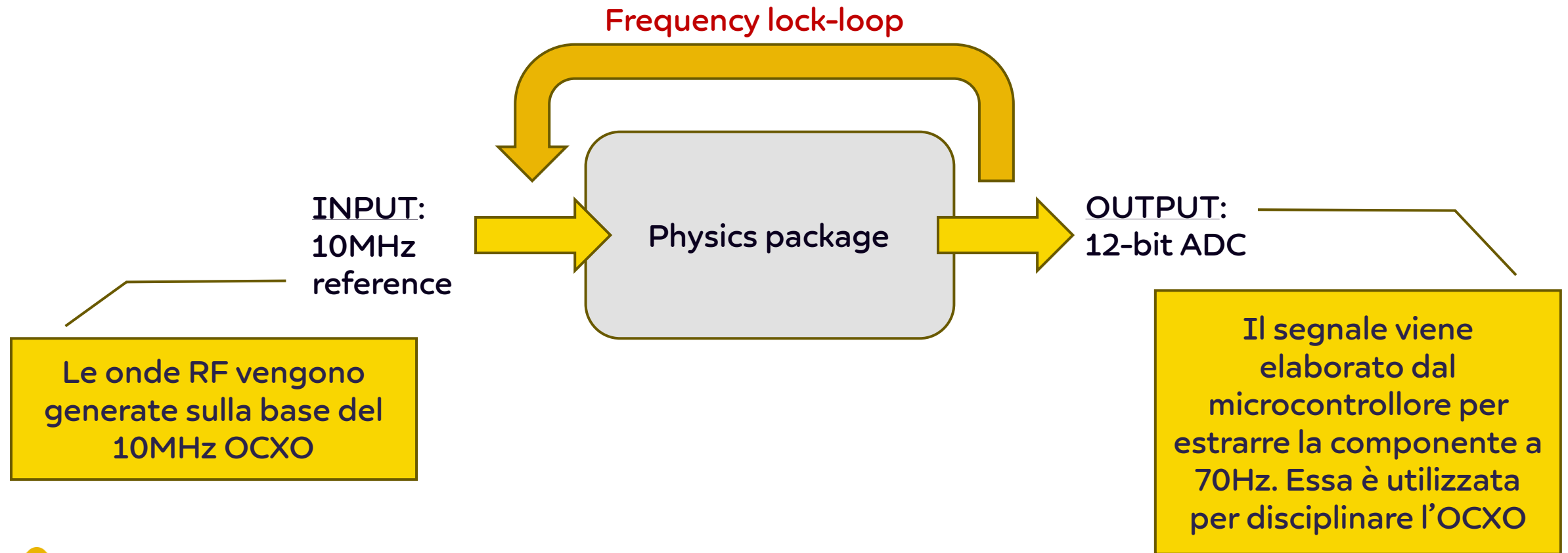
Riepilogo cella fisica (1)



Physics package

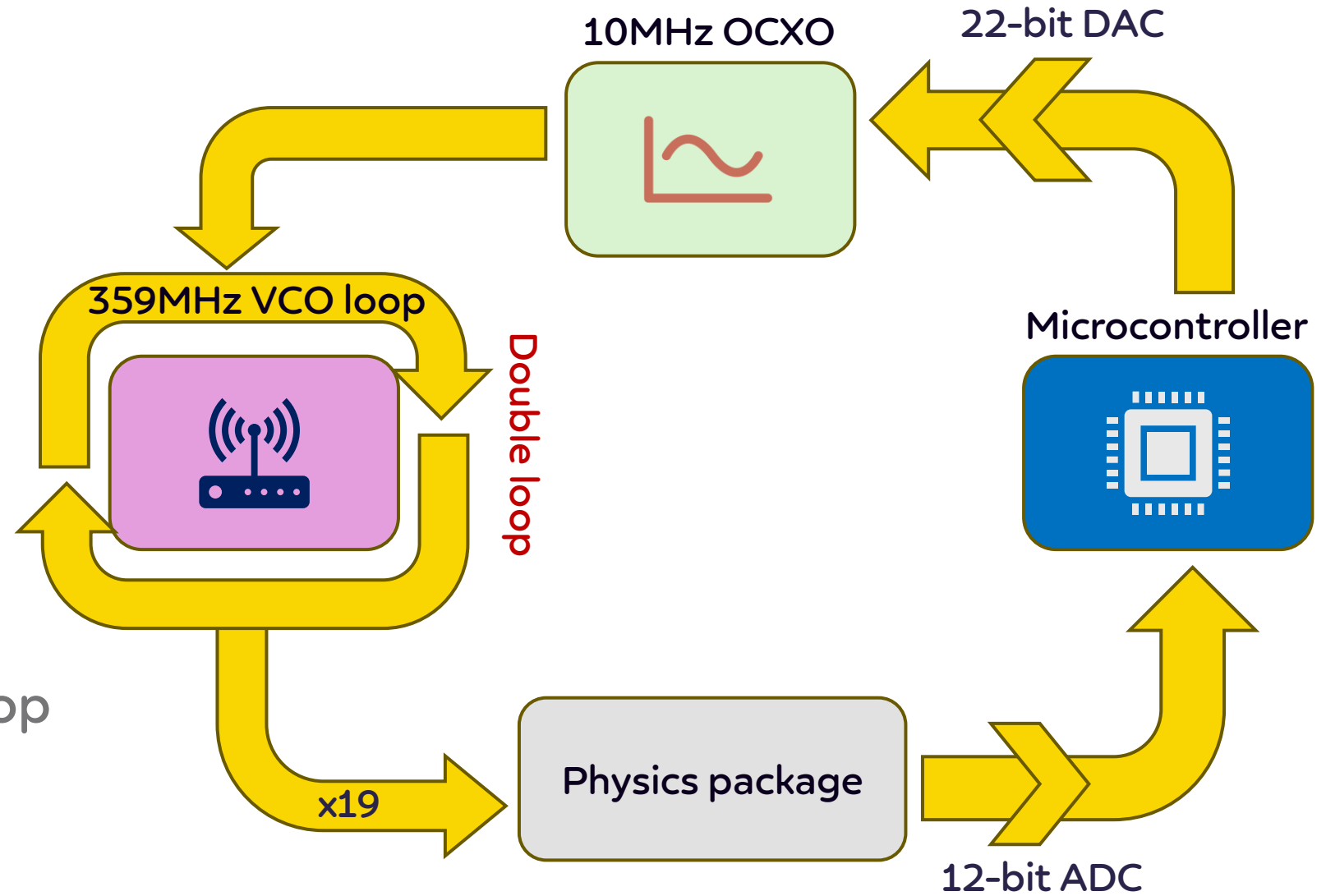


Riepilogo cella fisica (2)



PRS10

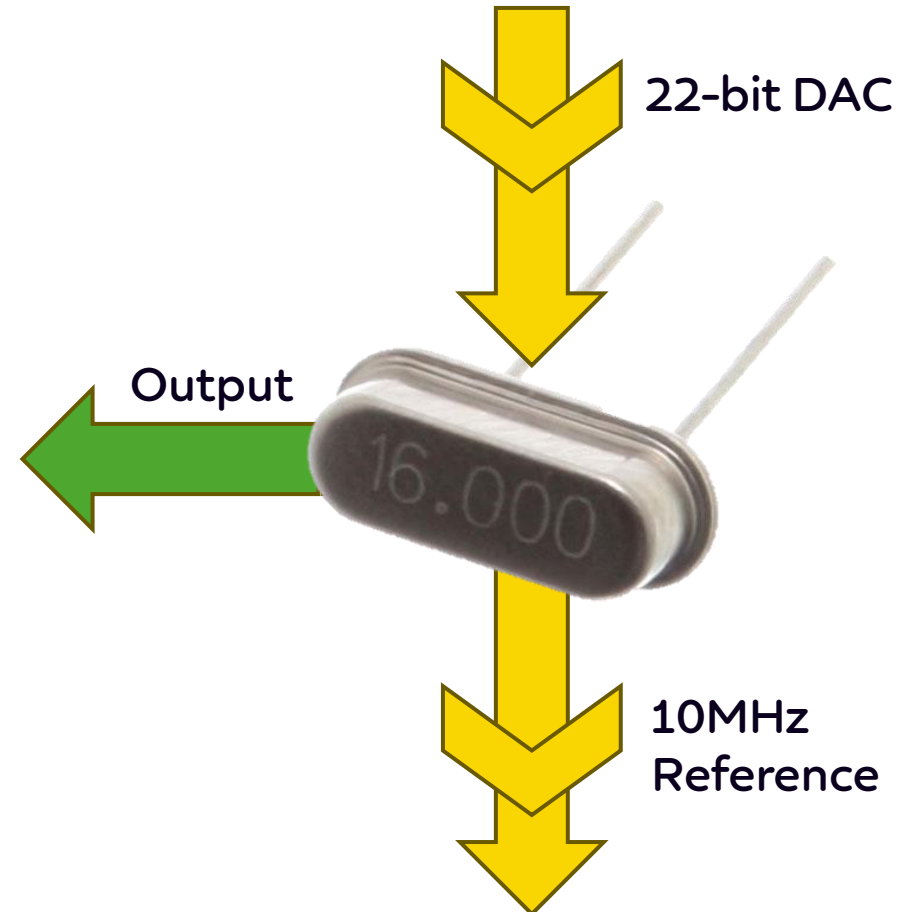
Frequency lock-loop



10MHz OCXO



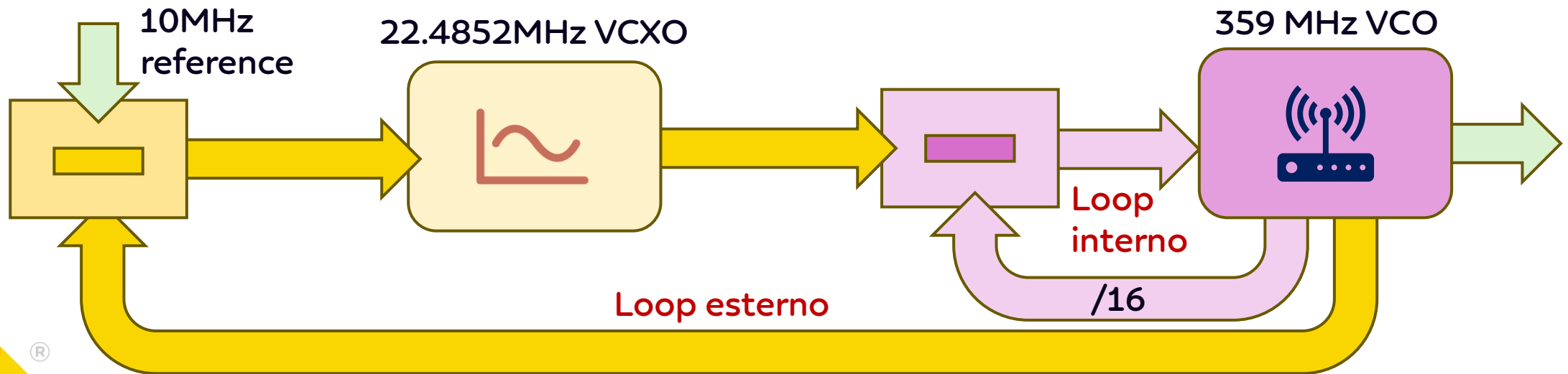
- La frequenza di output è in realtà generata da un **oscillatore al cristallo a 10MHz**
- L'oscillatore è comandato da un varactor che regola la **frequenza di oscillazione sulla base di un DAC a 22-bit**. Questi 22-bit consentono di regolare in maniera molto fine la frequenza generata. I 22-bit vengono direttamente **calcolati dalla CPU sulla base dell'errore della cella fisica**
- Questo consente di effettuare variazioni molto piccole, mantenendo un **basso rumore di fase**



359MHz VCO (1)



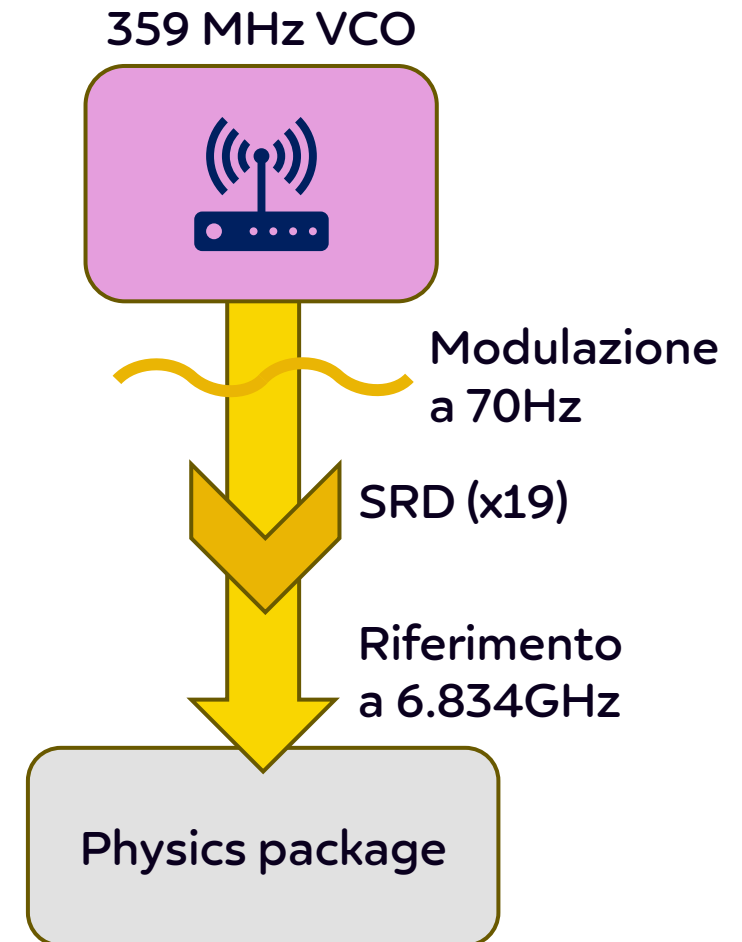
- Il riferimento a 10MHz è necessario per **disciplinare un VCO (oscillatore controllato da tensione) a 359MHz**. Il disciplinamento avviene con due loop, che coinvolgono un ulteriore oscillatore a cristallo. Il **loop interno** confronta la frequenza del VCO con quella del VCXO (ad una velocità molto alta). Il loop esterno, invece, confronta la frequenza del **VCO con quella del riferimento a 10MHz**



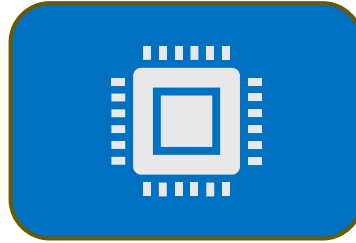
359MHz VCO (2)



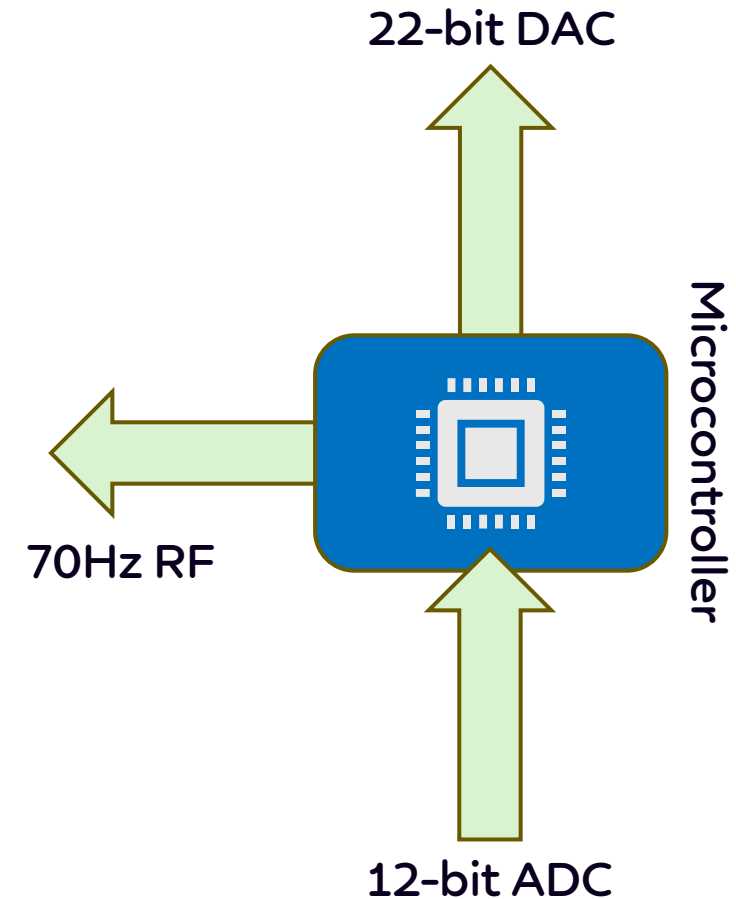
- Questo doppio loop consente di ottenere una **frequenza a 359MHz estremamente accurata** e con un basso rumore di fase
- Nel loop interno viene inoltre applicata la **modulazione di fase a 70Hz**, necessaria per verificare che il sintetizzatore di frequenza sia effettivamente allineato alla frequenza di transizione
- La frequenza di **359MHz viene moltiplicata per 19**, tramite un diodo a recupero di carica, portando il sintetizzatore di frequenza a un valore vicino a **6.834GHz**



Microcontroller



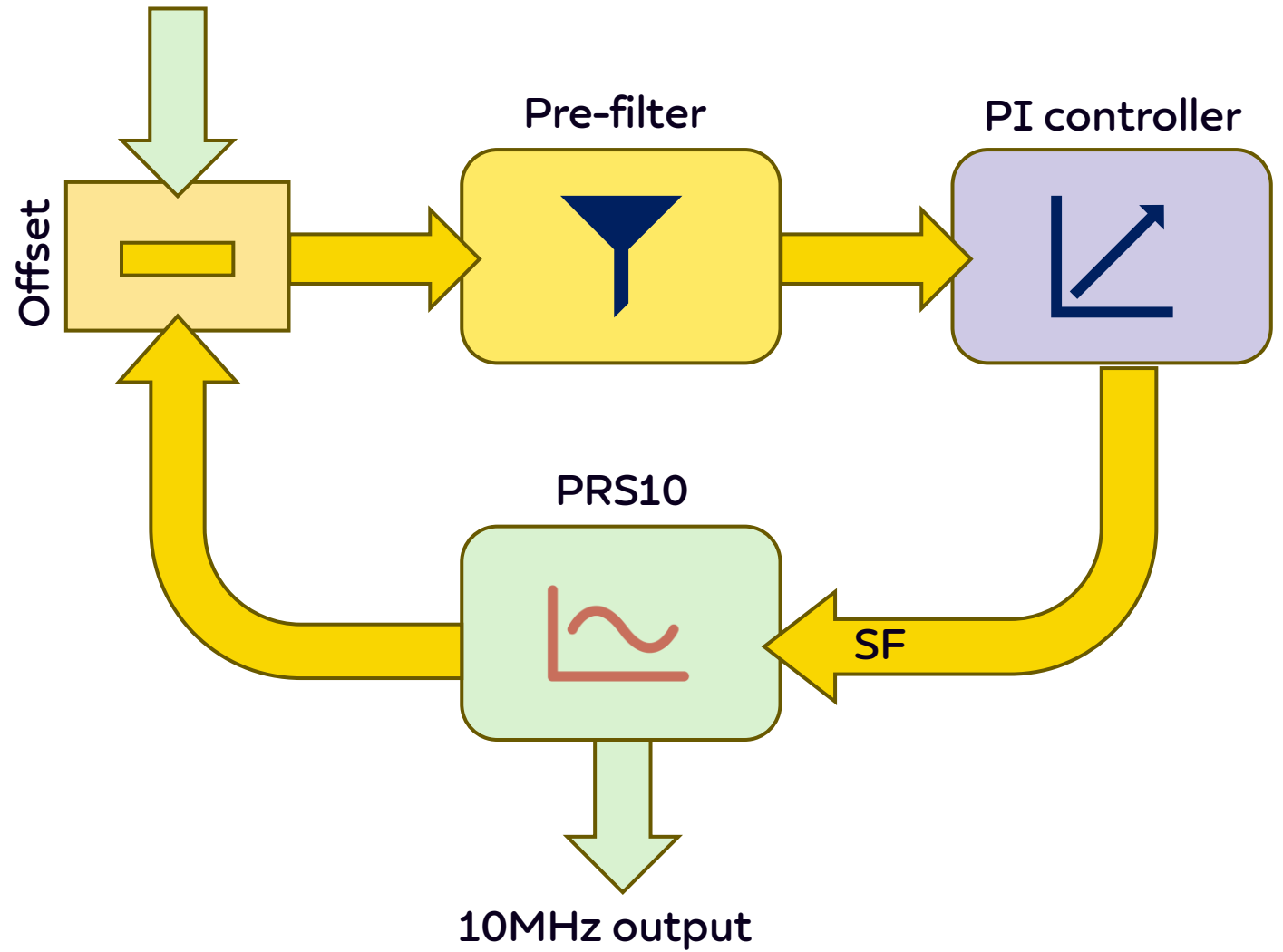
- Il microcontrollore è responsabile di generare la **modulazione di fase a 70Hz** (relativamente al sintetizzatore di frequenza)
- Elaborare il **segnale proveniente dalla fotocellula**, in modo da estrarre l'errore della cella fisica
- Trasformare l'errore rilevato in un segnale di 22-bit per la **regolazione dell'OCXO a 10MHz**



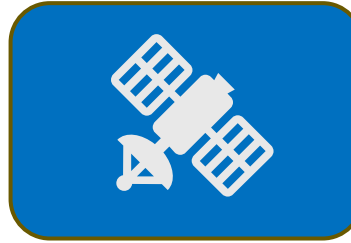
PRS10

1PPS lock-loop

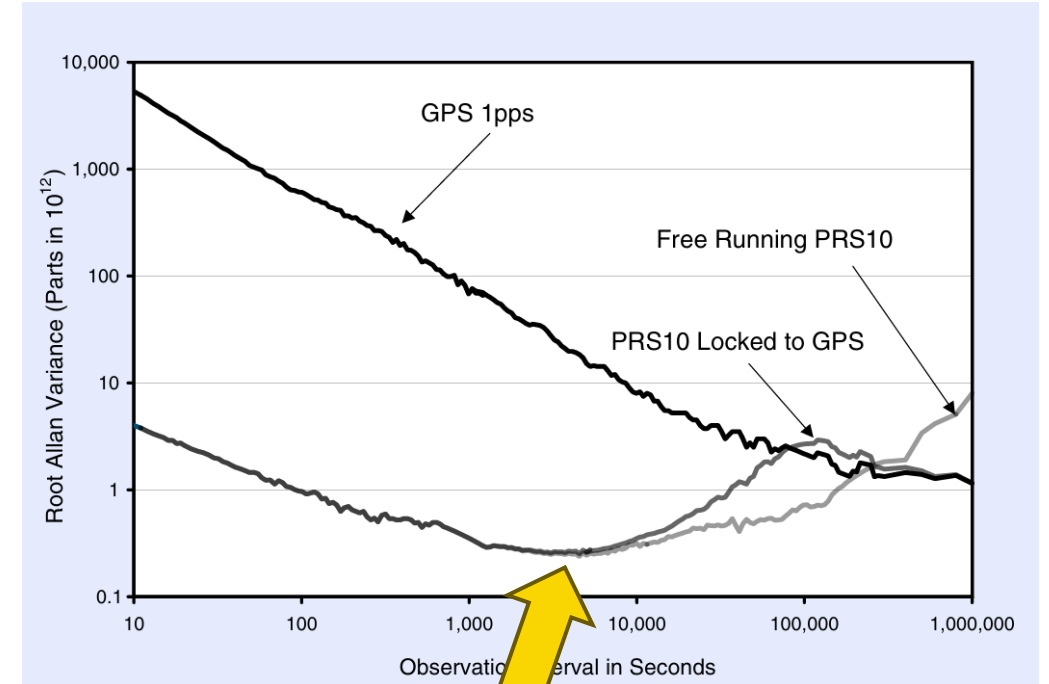
External 1PPS (GNSS)



1PPS lock-loop



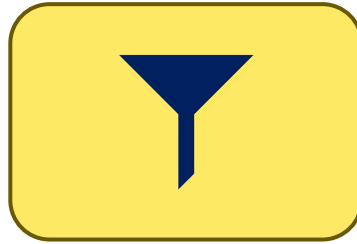
- Per migliorare la stabilità a lungo termine dello standard a rubidio (che può essere compromessa da invecchiamento, ad esempio), è possibile disciplinarlo tramite una sorgente con maggiore stabilità a lungo termine, come un ricevitore GNSS
- Il 1PPS lock-loop consente di calcolare l'offset tra l'impulso interno (proveniente dall'oscillatore a rubidio) e l'impulso esterno (proveniente dal GNSS) e applicare una correzione alla frequenza del PRS10



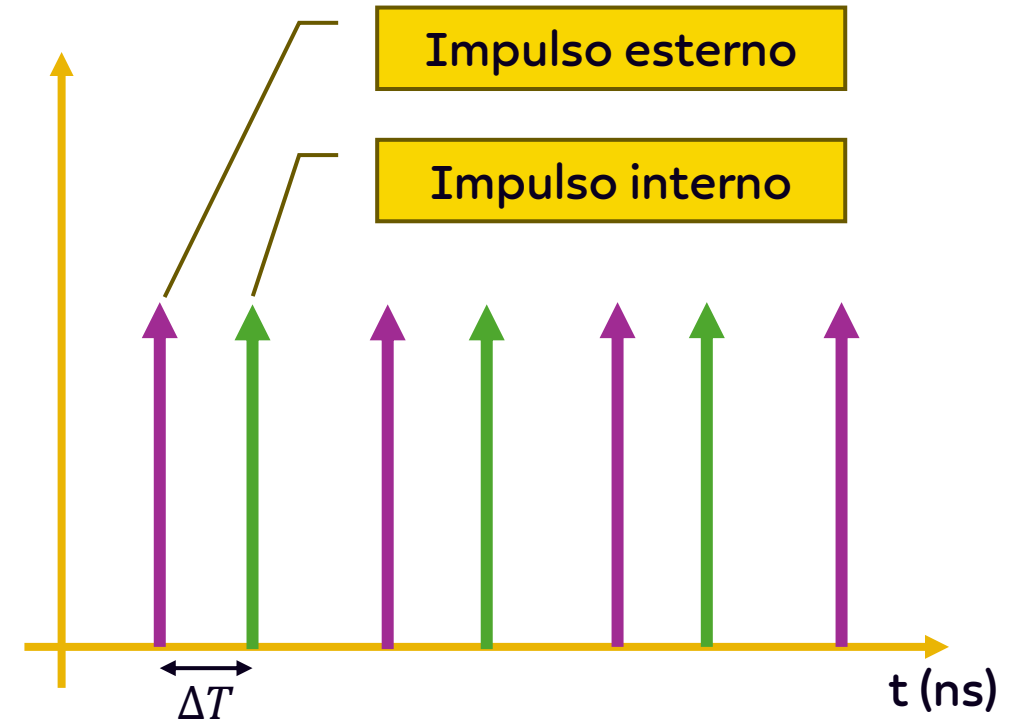
PRS10 inizia a perdere stabilità a lungo termine



Pre-filter



- Come si può notare dal grafico precedente, la **stabilità del segnale** associata a un sistema **GNSS** **aumenta esclusivamente con l'aumentare del tempo** di osservazione
- Siccome sistemi come il **GNSS** sono dotati di **grande stabilità a lungo termine**, ma non a breve termine, è necessaria **l'attivazione di un filtro passa basso**
- Questo filtro è in grado di **eliminare dal segnale tutte le variazioni** che avvengono nel **breve termine**, che possono essere causate da rumore

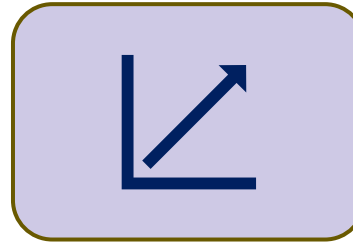


$$\overline{\Delta T(n)} = \left(1 - \frac{1}{\tau_3}\right) \overline{\Delta T(n-1)} + \left(\frac{1}{\tau_3}\right) \Delta T(n-1)$$

Correzione filtro



PI controller (1)



- La correzione della frequenza avviene attraverso il **controllo PI: controllo proporzionale-integrale**
- Il **guadagno proporzionale** consente di **correggere l'errore "corrente"**, mentre il **guadagno integrale** consente di **correggere l'errore accumulato nel tempo**
- La correzione della frequenza è data infatti dalla **somma di un termine integrale e di un termine proporzionale**

$$\Delta f(n) = Prop(n) + Int(n)$$

$$Prop(n) = -A_P \overline{\Delta T(n)} K_{det}$$

$$Int(n) = Int(n-1) - \left(\frac{\overline{\Delta T(n)}}{\tau_1} \right) K_{det}$$

$$\overline{\Delta T(n)} = \left(1 - \frac{1}{\tau_3} \right) \overline{\Delta T(n-1)} + \left(\frac{1}{\tau_3} \right) \Delta T(n-1)$$

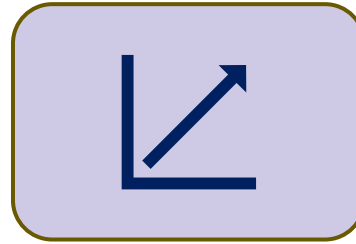
Filtro attivo

$$\overline{\Delta T(n)} = \Delta T(n-1)$$

Filtro non attivo



PI controller (2)



- Nelle equazioni a fianco compaiono alcuni termini rilevanti:

- τ_1 : determina la **costante di tempo naturale**, calcolata come

$$\tau_n = \sqrt{\tau_1 / K_{det} K_{vco}}$$

- A_P : anche chiamato “**guadagno proporzionale**” viene calcolato come

$$A_P = \frac{2\zeta}{\sqrt{K_{det} K_{vco} \tau_1}}$$

- K_{det}, K_{vco} : sono una **misura della sensibilità** (in ns/bit) del phase detector e del 1PPS output del PRS10

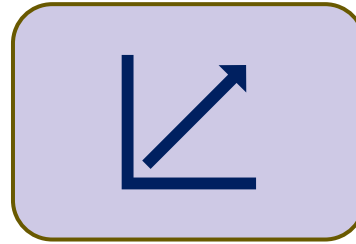
$$\Delta f(n) = Prop(n) + Int(n)$$

$$Prop(n) = -A_P \overline{\Delta T(n)} K_{det}$$

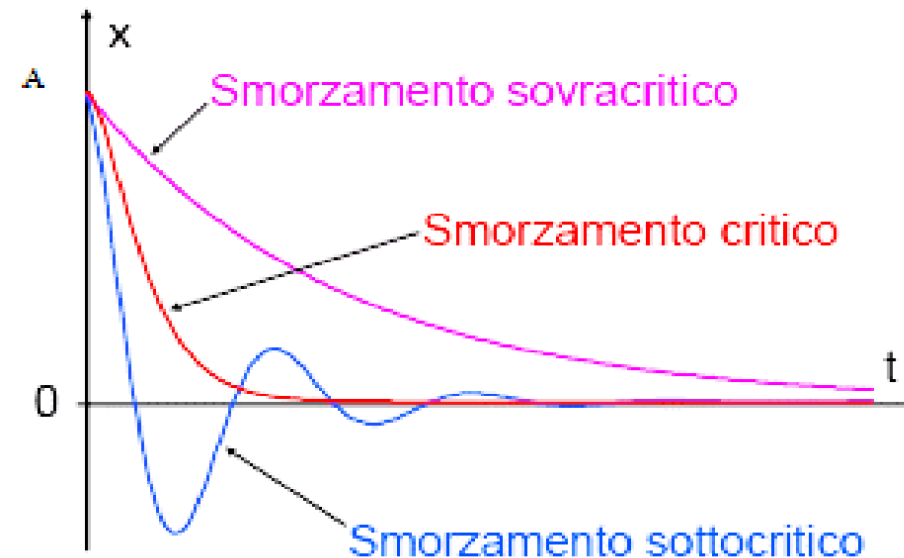
$$Int(n) = Int(n - 1) - \left(\frac{\overline{\Delta T(n)}}{\tau_1} \right) K_{det}$$

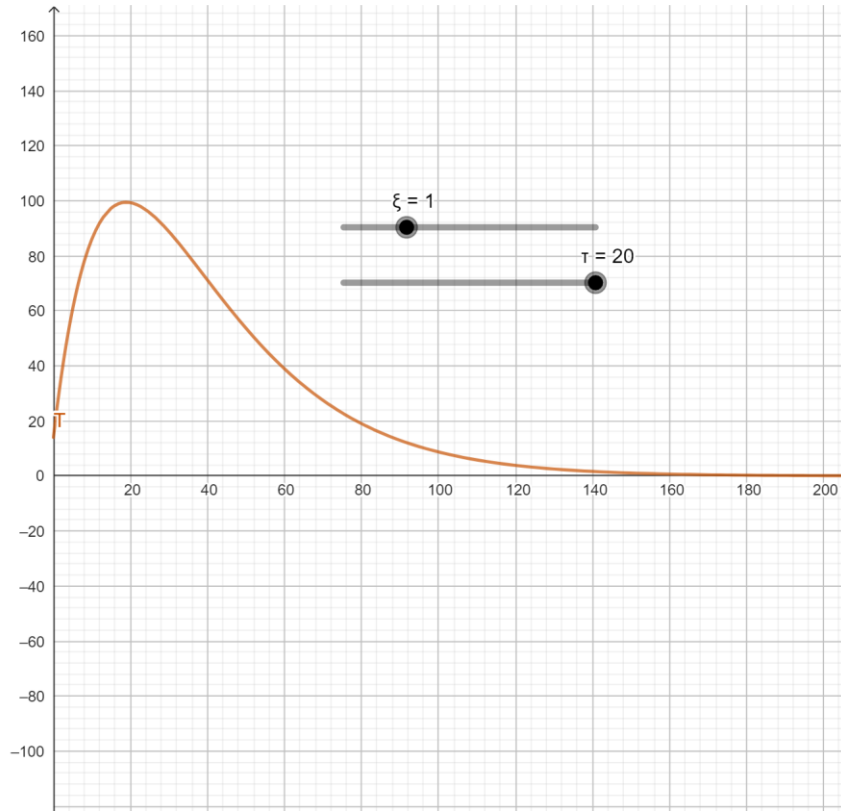


PI controller (3)

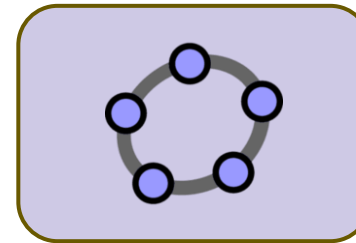


- τ_n : determina il tempo necessario al sistema per eliminare il 63.2% dell'errore
- ζ : (fattore di stabilità) determina come avviene la risposta del sistema quando viene rilevato un errore:
 - $\zeta < 1$: smorzamento sottocritico
 - $\zeta = 0$: smorzamento critico
 - $\zeta > 1$: smorzamento sovracritico



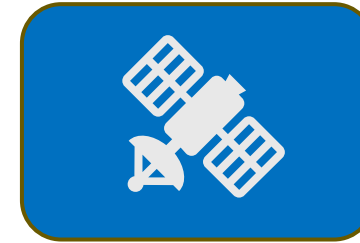


Applicazione interattiva per
visualizzazione dell'andamento del
time-tag al variare dello *stability*
factor e della *natural time*
constant



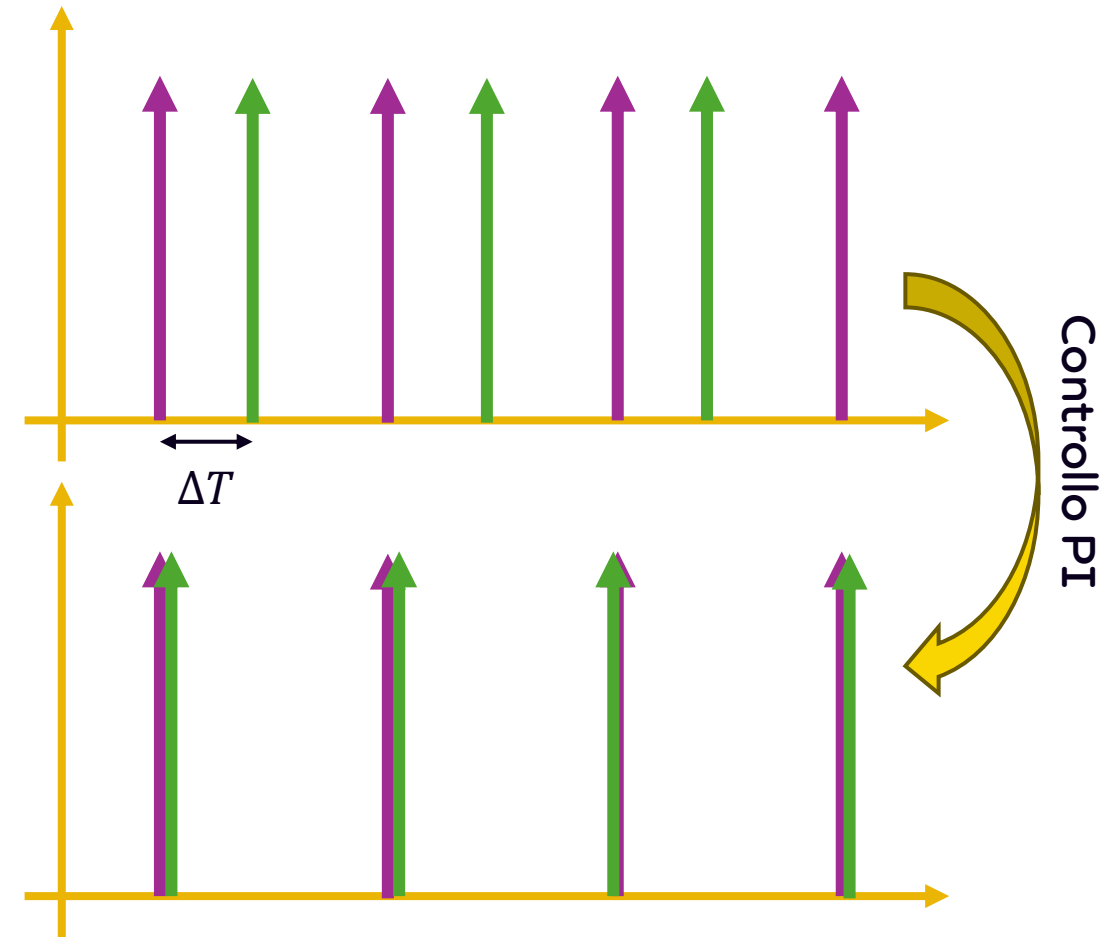
[Clicca qui](#)

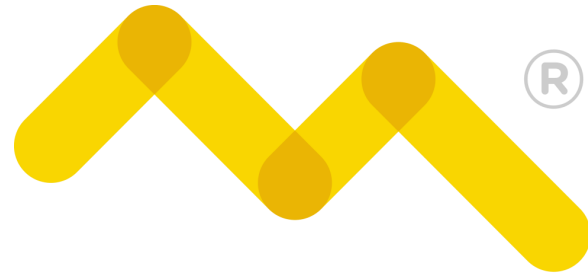
Riepilogo 1PPS lock-loop



- Il loop di condizionamento del PRS10 al GNSS opera in questo modo:

1. Innanzitutto **vengono rilevati 256 impulsi**. Se questi **256 impulsi sono “buoni”**, ovvero restano in un range pari a ± 2048 ns, allora si procede
2. Il PRS10 calibra il time-tag all'ultimo impulso ricevuto, portandolo a 0. Da qui inizia il **controllo proporzionale-integrale**, il quale, sulla base del fattore di stabilità e della costante di tempo, opera un **continuo aggiustamento sulla frequenza del PRS10**, in modo da condizionarlo al segnale esterno
3. Se vengono rilevati almeno **256 impulsi “cattivi”**, ovvero che variano improvvisamente di almeno 1024 ns, il **loop viene interrotto e riavviato**





lab3841

we make electronic things

Grazie per l'attenzione



lab3841