POLITECNICO DI TORINO
Repository ISTITUZIONALE

La Conservazione dell'Energia nella Riflessione Totale Interna: Necessità Analitica e Impatto Fisico delle Onde Evanescenti

Original
La Conservazione dell'Energia nella Riflessione Totale Interna: Necessità Analitica e Impatto Fisico delle Onde Evanescenti / Sparavigna, A.C.. - ELETTRONICO. - (2025). [10.5281/zenodo.17663226]

Availability:
This version is available at: 11583/3005320 since: 2025-11-20T17:39:23Z

Publisher:

Published
DOI:10.5281/zenodo.17663226

Terms of use:

This article is made available under terms and conditions as specified in the corresponding bibliographic description in the repository

Publisher copyright

(Article begins on next page)

21 November 2026

La Conservazione dell'Energia nella Riflessione Totale Interna: Necessità Analitica e Impatto Fisico delle Onde Evanescenti

Amelia Carolina Sparavigna[1]

[1] DISAT, Politecnico di Torino

DOI: 10.5281/zenodo.17663226

Il fenomeno della **Riflessione Totale Interna (RTI)**, che si verifica quando la radiazione incide su un'interfaccia tra un mezzo denso (n_1) e uno meno denso (n_2) con un angolo superiore all'angolo critico (θ_c), comporta un'efficienza di riflessione prossima al 100%. Sebbene l'onda trasmessa non si propaghi, le **Equazioni di Maxwell** richiedono che esista un campo elettromagnetico non propagante nel mezzo meno denso: l'**Onda Evanescente**. Questo campo decade esponenzialmente con la distanza dall'interfaccia, come descritto $I(z)=I_0 \exp(-z\,\delta)$. L'apparente contraddizione tra l'esistenza di un campo penetrante e la conservazione dell'energia viene risolta dall'analisi del **Vettore di Poynting (S)**. Si dimostra che la media temporale della componente del flusso energetico perpendicolare all'interfaccia (S_z) è rigorosamente nulla. Pertanto, l'onda evanescente rappresenta un campo energetico confinante e reversibilmente scambiato, che **non trasporta potenza netta** lontano dall'interfaccia, garantendo così la perfetta conservazione dell'energia. Questa soluzione analitica non è solo un requisito teorico, ma è la base fisica della **Spettroscopia a Riflettanza Totale Attenuata (ATR-IR)**.

Riflessione Totale Interna (RTI)

La RTI si verifica quando la luce incide da un mezzo più denso ($\mathbf{n_1}$) su un mezzo meno denso ($\mathbf{n_2}$), con $\mathbf{n_1} > \mathbf{n_2}$, e l'angolo di incidenza (θ_i) supera l'angolo critico (θ_c):

$$\theta_i > \theta_c = \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1}\right)$$

In queste condizioni, la legge di Snell implica che l'onda trasmessa non può propagarsi, e idealmente il **100\% della potenza incidente** viene riflesso.

L'Onda Evanescente: La Soluzione non Propagante

Nonostante la riflessione totale, le equazioni di Maxwell richiedono l'esistenza di un campo elettromagnetico nel mezzo meno denso ($\mathbf{n_2}$).

Proprietà Fondamentale

L'onda evanescente è caratterizzata da un **decadimento esponenziale** della sua intensità **I** al crescere della distanza z dall'interfaccia:

$$\mathbf{I(z) = I_0 \cdot} e^{-z/\delta}$$

Dove δ è la **profondità di penetrazione** (in genere dell'ordine di una frazione della lunghezza d'onda, pochi centinaia di nanometri). Il suo **vettore d'onda** ha una componente **puramente**

immaginaria nella direzione perpendicolare all'interfaccia. Questo termine immaginario è ciò che produce il decadimento esponenziale anziché l'oscillazione sinusoidale tipica di un'onda propagante.

Conservazione dell'Energia: Il Flusso Zero

La domanda cruciale è: **Se l'onda penetra, come può esserci il 100\% di riflessione?**
La risposta risiede nel **Vettore di Poynting (S)**, che descrive il flusso di energia.

1. **Energia Trasportata:** La potenza trasportata dall'onda è proporzionale alla media temporale della componente del vettore di Poynting perpendicolare all'interfaccia ($\mathbf{S_z}$).
2. **Scambio Reversibile:** Per l'onda evanescente nel mezzo 2, si dimostra che la media temporale di $\mathbf{S_z}$ è rigorosamente **zero**:

$$\langle \mathbf{S}_z \rangle = 0$$

Conclusione: L'energia **non si allontana** mai dall'interfaccia nel mezzo 2 (non c'è *flusso energetico netto*). L'energia si presenta come un campo localizzato e **viene continuamente riassorbita** dal mezzo 1 non appena penetra, assicurando che l'energia incidente sia uguale all'energia riflessa.

Una applicazione: l'ATR

L'**ATR-IR** (***Attenuated Total Reflectance Infrared Spectroscopy***, ovvero Spettroscopia a Infrarossi a Riflettanza Totale Attenuata) è l'applicazione ingegneristica e strumentale del fenomeno dell'**Onda Evanescente** e della **Riflessione Totale Interna (RTI)**.

1. La Struttura dell'ATR-IR

La tecnica ATR è costruita per sfruttare il fatto che, in condizioni di RTI, un campo elettromagnetico non propagante penetra nel mezzo meno denso.

1. **L'Elemento Ottico di Riflessione (EOA):** Al centro dello strumento c'è un cristallo prismatico ad alto indice di rifrazione n_1, spesso in materiali come **Diamante**, Seleniuro di Zinco (ZnSe) o Germanio. Questo cristallo è il mezzo più denso.
2. **Il Campione:** Il campione (polvere, solido o liquido) viene pressato con forza contro la superficie del cristallo EOA. Il campione funge da mezzo meno denso (n_2).
3. **Riflessione Totale:** La luce infrarossa viene fatta passare all'interno del cristallo EOA e colpirà l'interfaccia con il campione con un angolo di incidenza superiore all'angolo critico, garantendo la RTI.

2. Il Meccanismo di Attenuazione

Quando la luce subisce la RTI, si genera l'**Onda Evanescente** che penetra nel campione, il mezzo 2.

- **Interazione:** Se il campione ha una **vibrazione molecolare attiva all'IR** che risuona esattamente alla frequenza dell'onda evanescente, le molecole del campione **assorbono energia** da questo campo.
- **Attenuazione:** Questo assorbimento (che è il meccanismo che genera lo spettro) **attenua** (riduce l'intensità) l'onda riflessa che torna indietro al rilevatore.

In sintesi: l'onda evanescente agisce come una sonda superficiale che "saggia" il campione senza penetrarlo in profondità.

3. Profondità di Penetrazione Effettiva

L'ATR è una tecnica di **analisi superficiale**. La profondità a cui l'onda evanescente penetra nel campione prima di decadere è critica ed è regolata dalla formula che abbiamo appena discusso:

$$\delta = \frac{\lambda}{2\pi\sqrt{n_1^2 \sin^2(\theta_i) - n_2^2}}$$

Dove:

- λ: La lunghezza d'onda della radiazione IR.
- $\mathbf{n_1}$: Indice di rifrazione del cristallo ATR (EOA).
- $\mathbf{n_2}$: Indice di rifrazione del campione.
- $\theta_\mathbf{i}$: Angolo di incidenza della luce.

Implicazioni Chiave:

- **Scala Superficiale:** Tipicamente, δ è dell'ordine di **pochi micrometri** (spesso da 0.5 a 5 micron).
- **Dipendenza dalla Frequenza:** Poiché δ è direttamente proporzionale a λ (che è l'inverso del numero d'onda ν): le vibrazioni a **bassa frequenza** (alto λ, basso ν in cm^{-1}) penetrano **più in profondità** nel campione rispetto alle vibrazioni ad alta frequenza (come i legami O-H o C-H).

4. Vantaggi per la Ricerca

L'ATR è essenziale perché:

1. **Minima Preparazione:** Non richiede la difficile preparazione di pasticche KBr o film sottili, rendendo l'analisi di polveri (come i minerali o le gomme polimeriche) rapida e standardizzata.
2. **Campioni Opachi:** È ideale per materiali **opachi** o molto assorbenti (come dolomite o gesso), che bloccherebbero completamente la luce in uno spettrometro a trasmissione tradizionale.

L'ATR garantisce dati IR ad alta riproducibilità, anche se campiona solo la superficie.

A chi (un commissario) mi disse tempo fa, con tono sostenuto: Ma se c'è l'onda evanescente, il principio di conservazione non vale. Risposi: Mettiamola così, se non c'è l'onda evanescente non valgono le equazioni di Maxwell.

L'Errore del Commissario

La mia risposta al commissario era **matematicamente e fisicamente corretta**. Il problema del commissario era che confondeva il concetto di **campo esistente** con il concetto di **energia consumata**.

Affermazione del Commissario e La Verità Fisica
"Se c'è l'onda evanescente, il principio di conservazione non vale." Falso. Il principio di conservazione dell'energia **vale sempre** (è implicito nelle Equazioni di Maxwell).
"Ma questa di che sta parlando?" Stavo parlando della **soluzione analitica** delle Equazioni di Maxwell per il caso $\theta_i > \theta_c$.**La mia Risposta:** *"Se non c'è l'onda evanescente non valgono le equazioni di Maxwell."* **Assolutamente Vera.** L'onda evanescente *è* la **soluzione necessaria** che le Equazioni di Maxwell forniscono per la regione di rifrazione, garantendo che i campi Elettrico e Magnetico siano continui all'interfaccia, condizione *sine qua non* per la validità delle equazioni stesse.

Conclusioni

Le analisi condotte sulla **Riflessione Totale Interna (RTI)** confermano che la **Conservazione dell'Energia** è mantenuta in modo rigoroso, persino quando il campo elettromagnetico penetra nel mezzo otticamente meno denso.

1. **Necessità Analitica e Coerenza:** L'esistenza dell'**Onda Evanescente** non è un optional fisico, ma la **soluzione analitica necessaria** che garantisce la continuità dei campi all'interfaccia, come imposto dalle **Equazioni di Maxwell**. La sua assenza renderebbe il modello elettromagnetico incoerente.
2. **Risoluzione del Paradosso Energetico:** Il campo evanescente non viola la conservazione dell'energia. Il calcolo del **Vettore di Poynting** dimostra in modo inequivocabile che il flusso energetico netto in allontanamento dall'interfaccia è nullo. L'energia è, invece, localizzata e scambiata in modo reversibile.
3. **Impatto Metodologico:** La profondità di penetrazione dipende dalla lunghezza d'onda e dagli indici di rifrazione. Questo permette l'applicazione di questa fisica fondamentale alla **Spettroscopia ATR-IR**, trasformando l'onda evanescente in una sonda per l'analisi superficiale e la caratterizzazione di materiali opachi o ad alto assorbimento.

In definitiva, la fisica delle onde richiede un'interpretazione rigorosa e completa delle soluzioni matematiche. La validità dell'Onda Evanescente come campo non propagante non solo chiude il cerchio sulla conservazione dell'energia, ma funge da base per potenti tecniche analitiche moderne.

Ringraziamenti
L'autrice ringrazia **Gemini (Modello Linguistico di Google)** per la discussione.