

# UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI FEDERICO II

FACOLTÀ DI SCIENZE MM. FF. NN.  
CORSO DI LAUREA TRIENNALE IN FISICA

TESI DI LAUREA TRIENNALE IN FISICA



## ESPERIENZE E PROPOSTE DIDATTICHE PER LO STUDIO DELLE ONDE ELETTROMAGNETICHE

*Relatore:*

E.Balzano

C.Minichini

*Candidata:*

Valeria Gelardi 567/669

— ANNO ACCADEMICO 2011/2012 —

## Indice

<b>1</b>	<b>PROBLEMI DIDATTICI</b>	<b>6</b>
1.1	Difficoltà e problemi riguardo le onde elettromagnetiche . . . .	6
1.2	Approcci didattici allo studio delle onde e dell'elettromagne- tismo . . . . .	7
<b>2</b>	<b>MICROONDE</b>	<b>12</b>
2.1	Caratteristiche . . . . .	12
2.2	Utilizzi, vantaggi e rischi . . . . .	13
<b>3</b>	<b>GENERAZIONE E PROPAGAZIONE DI MICROONDE</b>	<b>15</b>
3.1	Propagazione guidata . . . . .	15
3.2	Cavità Risonanti . . . . .	16
3.3	Generatori di microonde . . . . .	18
3.4	Antenne . . . . .	18
<b>4</b>	<b>CARATTERISTICHE E POSSIBILITA' ESPLORATIVE DEL- L'APPARATO SPERIMENTALE</b>	<b>22</b>
4.1	Trasmettitore, Ricevitore e studio del segnale . . . . .	23
4.2	Accessori . . . . .	29
4.3	Polarizzazione . . . . .	29
4.4	Determinazione dell'angolo di Brewster con luce e microonde	35

## INTRODUZIONE

Questo lavoro di tesi è uno studio sperimentale sull'insegnamento e apprendimento delle onde elettromagnetiche e in particolare sul comportamento delle microonde, sulle interazioni che queste hanno con la materia e sulla loro propagazione nello spazio.

Per farlo ci siamo serviti di un apparato di misura che lavora ad una frequenza fissata nel range delle microonde, grazie al quale abbiamo potuto eseguire esperimenti facilmente realizzabili e noti fin dalla scuola o dai primi anni universitari, soprattutto in corsi di laboratorio di Ottica.

Non ci si è posti il problema di trattare gli esperimenti in modo rigoroso da un punto di vista quantitativo o di soffermarci eccessivamente sull'analisi degli errori ma è stato piuttosto preferito un approccio esplorativo e critico nei confronti della fenomenologia, cercando di capire le potenzialità e i vincoli dell'apparato sperimentale al fine di favorire una visione unitaria che consente di interpretare i risultati sperimentali nell'apprendimento di modelli e teorie. Il nostro scopo è stato quello di identificare similitudini e differenze nel trattare gli stessi fenomeni ad una scala diversa rispetto a quella ottica, evidenziando come i metodi di misura e le osservazioni siano diverse quando si lavora con una radiazione che, seppur non percepibile dal nostro occhio, presenta una lunghezza d'onda che permette di osservarne in modo più evidente il comportamento ondulatorio.

Questo ci ha portato a considerare criticamente i problemi didattici che sorgono nello studio del comportamento delle onde elettromagnetiche in generale.

Il primo capitolo tratta problemi didattici e affronta il problema della comprensione dei fenomeni ondulatori.

Si fa riferimento all'uso diffuso dello strumento didattico dell'analogia per facilitare la visualizzazione di alcuni fenomeni ma anche dei suoi lati insidiosi, che nella didattica portano spesso ad un'assimilazione errata di alcuni concetti teorici.

Si citano poi esempi su come il problema delle onde elettromagnetiche e il concetto di onda in generale venga affrontato in letteratura.

Si è posta attenzione alle lezioni di Feynman e della Fisica di Berkley, due importanti progetti sviluppatasi nello stesso periodo storico, l'inizio degli anni '60, in cui le nuove prospettive maturate in ambito scientifico e culturale pochi decenni prima resero necessario un rinnovamento del linguaggio della fisica.

Sono stati quindi evidenziati i caratteri comuni e le differenze tra questi due approcci didattici e il ruolo fondamentale che hanno svolto nell'evoluzione linguistica e concettuale della didattica.

Ci è sembrato interessante, a tal proposito, notare l'importanza che la Fisica di Berkley attribuisce al concetto di analogia e agli esperimenti "liberi", senza istruttore.

Nel secondo capitolo si introducono le caratteristiche principali delle microonde, si accenna ad alcuni degli svariati campi di applicazione e le interazioni che esse hanno con la nostra vita quotidiana, cercando di identificarne vantaggi ed eventuali rischi.

Nel terzo capitolo si descriveranno i caratteri fondamentali della propagazione delle microonde, in particolare verranno introdotte guide d'onda, cavità risonanti e antenne e verrà evidenziato il rapporto tra le caratteristiche di tali oggetti e quelle dei campi che vi interagiscono.

Il quarto capitolo tratta la parte sperimentale del lavoro. L'apparato a microonde è stato descritto in modo da non indicare semplicemente dettagli tecnici ma cercando di studiare come le caratteristiche fisiche degli oggetti che lo costituiscono sia legata alle sue possibilità sperimentali, alle libertà e alle limitazioni nell'eseguire una misura, alla maggiore o minore comprensione dei fenomeni osservati in microonde rispetto al caso ottico.

Sono presenti inoltre spunti sulle esperienze possibili usando gli oggetti a disposizione dell'apparato o altri reperibili facilmente al di fuori del contesto didattico.

Al fine di ragionare sul modo di interpretare fisicamente gli aspetti fenomenologici di un esperimento, è stata posta particolare attenzione allo studio del fenomeno di polarizzazione.

Sarà chiaro che tale esperienza ci mostra un risultato controintuitivo che stimola a chiedersi su cosa basiamo la nostra previsione di un esperimento. Viene illustrato in generale il concetto di polarizzazione dal punto di vista teorico ed è poi descritta la sua realizzazione nel caso delle microonde. Quello che è il polaroid in ottica qui è semplicemente una griglia di lamine metalliche spesse pochi millimetri. Le dimensioni lineari "a misura d'uomo" ci permettono dunque di controllare come stiamo operando sugli oggetti e quali modifiche possono verificarsi nella risposta dell'apparato.

E' stato inoltre molto facile riprodurre il polarizzatore variandone le dimensioni e il materiale, usando fili più stretti attaccati ad una cornice di cartone, allo scopo di evidenziare eventuali differenze nel modo in cui le onde interagiscano con oggetti diversi.

E' chiaro come questa libertà "costruttiva" implichi la possibilità di variare in maniera controllata tanto le caratteristiche geometriche quanto quelle fisiche del sistema preso in considerazione.

Un'altra esperienza cui abbiamo dedicato particolare attenzione è la determinazione dell'angolo di Brewster per diversi materiali utilizzando prima un apparato ottico e poi quello a microonde.

Qui si introducono le relazioni di Fresnel e la legge di Snell che prevedono le caratteristiche di un'onda elettromagnetica interagente con l'interfaccia tra due dielettrici.

Ci accorgiamo che il procedimento di misura non è univoco per tutte le lunghezze d'onda e tutti gli apparati, e che lo stesso fenomeno può essere

osservato in modi diversi a seconda dei limiti e delle caratteristiche fisiche di ognuno.

# 1 PROBLEMI DIDATTICI

## 1.1 Difficoltà e problemi riguardo le onde elettromagnetiche

Il problema didattico riguardante le onde elettromagnetiche e in generale il concetto di onda è stato indagato a partire da esperienze di Ottica presenti nel percorso di uno studente ai primi anni di studi universitari o agli ultimi di scuole superiori.

Tipiche esperienze sono polarizzazione, riflessione e fenomeni di interferenza e diffrazione, alcune delle quali verranno discusse nel prossimo capitolo.

Si riscontra che nell'approccio a tali esperienze possono essere date spiegazioni incoerenti sia da parte di studenti "più anziani" sia da parte di docenti.

Un primo problema riguarda gli studenti universitari dei primi anni, per i quali si riscontrano errori concettuali comuni nel modo di interpretare correttamente il fenomeno fisico che c'è dietro l'applicazione di un modello matematico.

Anche quando non ci sono difficoltà nel padroneggiare il formalismo dell'elettromagnetismo e spesso sappiamo in anticipo cosa dobbiamo aspettarci dal risultato di un esperimento, non ci chiediamo come la sua realizzazione sia effettivamente possibile fisicamente.

Questo non ci rende totalmente padroni della teoria né autonomi nell'approccio con l'apparato sperimentale.

Un altro problema comune invece riguarda il concetto di onda.

Le onde descrivono una moltitudine di fenomeni fisici che si possono correlare mediante immagini e concetti comuni, nonostante siano apparentemente diversi. Cioè è possibile spesso comprendere un fenomeno ondulatorio usando analogie con un altro che ci sembra più vicino al nostro vissuto quotidiano. Il caso più comune nella nostra esperienza è quello di associare comportamenti e proprietà delle onde elettromagnetiche a quelli delle onde meccaniche in mezzi elastici. Degli esempi sono immaginare il campo elettrico o magnetico come una corda che vibra in modo trasversale alla direzione di propagazione o associare al fronte d'onda di un'onda elettromagnetica quello della superficie dell'acqua che si increspa quando un oggetto vi si immerge (figura 2).

L'analogia è dunque un potente strumento didattico ma può essere spesso fuorviante se applicata in modo inappropriato.

Facendo quest'associazione di idee incorriamo spesso in errori nella valutazione del ruolo che alcune grandezze, come ampiezza e lunghezza d'onda, hanno, ad esempio, nei fenomeni di polarizzazione e propagazione attraverso gli ostacoli.

Questa valutazione ci porta a fare previsioni sbagliate.

In letteratura numerosi studi, basati sui risultati di test e prove d'esame di studenti ai primi anni di università, hanno evidenziato difficoltà nella com-

comprensione di alcuni concetti di elettromagnetismo generate da errate analogie o confusioni nell'applicazione di diversi formalismi.

Uno studio del Physics Education Group dell'Università di Washington [3] condotto alla fine degli anni '90 e basato su colloqui con gli studenti, test di fine corso ed esperienze di laboratorio, ha evidenziato alcune difficoltà comuni negli studenti dei corsi di base tra cui:

- problemi nel riconoscere l'interdipendenza tra campo elettrico e magnetico nella propagazione di un'onda;
- errata interpretazione dei fenomeni di diffrazione e interferenza come interazioni "materiali" con le pareti degli ostacoli;
- idea della polarizzazione come possibilità o meno dell'onda di "passare attraverso" un filtro polarizzatore;
- confusione nel collegare in modo coerente aspetti geometrici e ondulatori nell'analisi di fenomeni ottici

Si è osservato che alcuni caratteri riscontrati in questo studio sono comuni in letteratura e hanno generato di volta in volta esigenze di modificare la struttura dei corsi o introdurre esperienze laboratoriali.

## **1.2 Approcci didattici allo studio delle onde e dell'elettromagnetismo**

I metodi utilizzati dalla University of Washington per ovviare ai problemi riscontrati fra numerosi studenti, sono stati sostanzialmente di assistenza ai corsi dei primi anni con "tutorial" da affiancare ai libri di testo consigliati. I tutorial consistevano in sessioni di esercitazioni sui concetti di elettromagnetismo risultati più critici nei sondaggi.

Durante tali sessioni gli studenti, divisi in piccoli gruppi, avevano la possibilità di confrontarsi sulle loro difficoltà e a queste seguivano compiti a casa per rinforzare gli argomenti trattati.

In aggiunta sono stati svolti seminari per insegnanti mirati a focalizzare i problemi da affrontare con maggior risalto all'interno del corso e semplificare la spiegazione del formalismo e della rappresentazione delle onde elettromagnetiche.

Il progetto che consisteva nell'implementazione dei tutorial, durato per tutto l'anno accademico, è stato seguito da test di uscita per gli studenti dei corsi di base e per studenti più anziani o laureati allo scopo di verificare il livello di preparazione.

È stato riscontrato che non sempre lo studio di materie avanzate rendesse necessariamente più profonda la comprensione dei concetti basilari ma l'esito dei "post-test" è stato comunque nettamente positivo con percentuali di risposte corrette decisamente più alte rispetto all'inizio.

In tabella 1 sono mostrati i dati sulle percentuali di risposte corrette ad un questionario somministrato agli studenti prima e dopo i tutorial sull'interpretazione della rappresentazione grafica di un'onda elettromagnetica che si propaga nel vuoto.

	Pre-test	Post-test
	N $\approx$ 1400	N $\approx$ 800
Risposte corrette	10 %	85%
Corretta argomentazione	NA <sup>c</sup>	55%
Sbagliate	80%	15%
Incomplete	5%	<5%

Tabella 1: Risultati dei questionari

Il lavoro della University of Washington ha registrato innegabilmente risultati positivi nel rendimento accademico dei suoi studenti.

Per rendere i risultati davvero utili ad una ricerca didattica, tale esperienza è stata condotta in numerose università e college dove si è potuto valutarne l'efficacia.

Il risultato interessante è che alcune difficoltà sono risultate comuni e le percentuali di successo dopo il progetto si sono rivelate molto simili a quelle della University of Washington

Tuttavia il rischio di un tale metodo è che si riveli spesso una guida alla facile risoluzione degli esercizi e che non risolva realmente problemi concettuali, seppur si proponga di farlo.

I risultati sono spesso ottenuti sulla base di domande che sono le stesse trattate nelle sessioni di lavoro, generando la possibilità di rispondere in modo mnemonico e non con un vero indipendente ragionamento.

Oltre a tali studi specifici, volti a migliorare il rendimento degli studenti in alcuni argomenti ben definiti, ricordiamo alcuni casi storici in cui la ricerca didattica ha portato all'esigenza di un vero rinnovamento nel modo di insegnare i concetti della fisica di base, di modificare il linguaggio e arricchire la didattica, aprendosi al contesto scientifico contemporaneo dell'epoca.

Fin dagli anni '60 del secolo scorso si è assistito soprattutto negli Stati Uniti a questa tendenza, dovuta ad una vera rivoluzione scientifica e culturale che la teoria della relatività, la meccanica quantistica e la fisica statistica avevano iniziato.

Risultava ormai necessario adeguarsi a un mondo che stava accelerando notevolmente i suoi ritmi di sviluppo tecnologico e ad una sempre maggiore preparazione matematica degli studenti. In questo contesto nascono le Lezioni di Fisica di Feynman e il corso della Fisica di Berkley.

Le caratteristiche peculiari sono l'aggiunta di argomenti moderni per favorire la curiosità e l'attenzione dello studente e l'uso di un linguaggio intuitivo e meno accademico, che ricorre spesso all'esperienza quotidiana e alle

analogie, che come già detto, rappresentano un fondamentale strumento di comprensione.

Sia le lezioni di Feynman che i volumi del corso di Fisica di Berkley hanno subito numerose variazioni, rivisitazioni e integrazioni negli anni per adeguarsi alle esigenze dello studente.

Sono inserite note per gli insegnanti, consigli su come affrontare i vari argomenti e esempi di esperimenti da svolgere per facilitarne la comprensione.

Trattiamo separatamente questi due approcci nello studio dell'Elettromagnetismo.

Le lezioni di Feynman, tenutesi al Caltech per studenti del primo e secondo anno di fisica nell'anno accademico '61-'62, si propongono di essere una "guida" di fisica di base, dal linguaggio il più semplice e colloquiale possibile, pur senza semplificare il modello matematico o il formalismo degli argomenti trattati.

Egli introduce le onde elettromagnetiche partendo dalla luce, riservandosi di non darne subito una definizione, ma descrivendo prima come si comporta "macroscopicamente", cioè in raggi che viaggiano in linea retta senza interferire tra loro.

È solo accennato, in principio, che essa occupa un piccolo intervallo di un ampio spettro dello stesso genere, le cui parti sono distinte da diversi valori di una quantità chiamata lunghezza d'onda.

Feynman sottolinea che la luce infatti non sembra affatto avere natura ondulatoria se vista "da molto lontano" o da "molto vicino", e che nel trattarla bisogna riferirsi a teorie diverse a seconda dell'approssimazione in cui ci poniamo: ottica geometrica, teoria della radiazione elettromagnetica o meccanica quantistica a seconda che la lunghezza d'onda e l'energia dei fotoni siano grandi o piccole rispetto alle dimensioni e alla sensibilità del dispositivo.

L'ottica geometrica giustifica le leggi della riflessione e della rifrazione e si basa sul principio di Fermat. L'elettromagnetismo è introdotto invece come la grande sintesi tra leggi del campo elettrico e magnetico e dell'ottica.

Feynman ci porta a riconoscere la luce come radiazione elettromagnetica indagando i fenomeni di interferenza prima da un punto di vista qualitativo e poi descrivendo il campo nei dettagli matematici (figura 1)

Esso appare come un'onda che si muove dalla sorgente verso l'esterno con energia e ampiezza che diminuiscono rispettivamente come l'inverso del quadrato e l'inverso della distanza man mano che ci si allontana dalla sorgente.

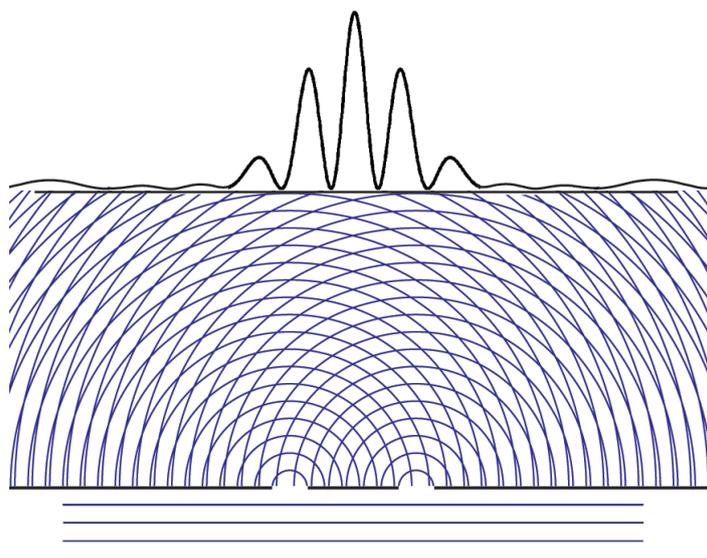


Figura 1: Fenomeno di interferenza

Riferendole al campo elettromagnetico, sono introdotte dunque le grandezze tipiche delle onde come la lunghezza d'onda, la fase, il vettore d'onda. Si passa poi a sottolineare il carattere vettoriale del campo elettrico che descrive la luce. Tale caratteristica è necessaria per descrivere il fenomeno della polarizzazione.

Feynman è molto attento a specificare che quando si parla di onde ci si riferisce a moltissimi contesti come sismologia, acustica, meccanica, idrodinamica. Alcune idee sui fenomeni ondulatori posso essere applicate alla luce così come a qualunque altro ramo della fisica.

Ad esempio le onde sono in relazione con i sistemi oscillanti e lo studio dell'oscillatore armonico ci è utile per studiare sistemi oscillanti di natura meccanica, elettrica e quantistica. Inoltre trattando fenomeni di interferenza (nello spazio e nel tempo) o di onde stazionarie, possiamo apprendere molti argomenti differenti nello stesso tempo.

Nonostante questo, ogni argomento riguardante fenomeni ondulatori è trattato separatamente, dalle onde sismiche, al suono, alle onde d'urto e superficiali.

Si ricorda che non tutte le onde sono uguali e se ci sono tante analogie, ci sono anche comportamenti profondamente diversi dovuti al particolare sistema di cui stiamo parlando.

La fisica di Berkley dedica un intero volume del suo corso a onde e oscillazioni. Lo scopo di tale volume è un'unificazione del linguaggio che riguarda fenomeni fisici anche molto diversi fra loro e un'attenzione all'insieme di concetti comuni che sono impliciti nell'uso della parola onda.

Il volume dunque non è strutturato in modo tale da affrontare fenomeni naturali diversi separatamente, piuttosto è diviso per “concetti fondamentali” e trattazioni matematiche diverse.

Ogni concetto è introdotto nel capitolo ed è successivamente illustrato per mezzo dell’applicazione a sistemi fisici diversi aventi una “similitudine geometrica”: corde, molle slinky, linee di trasmissione e tubi di cartone, fasci di luce.

Lo scopo è incoraggiare chi legge anche ad usare le analogie nell’ “azzardare una congettura” di fronte ad un sistema non ancora studiato ([7]).

Una parte importante della Fisica di Berkley consiste negli esperimenti per casa, illustrati dopo la spiegazione di ogni concetto e in cui non si richiede un’attrezzatura sofisticata o difficilmente reperibile.

Spesso in fase di sperimentazione, l’assenza di un istruttore che spieghi il significato della dimostrazione o risultati inattesi che non possono essere capiti la prima volta, che imponga quante volte l’esperimento debba essere ripetuto e con quale velocità, è solo un’opportunità per apprezzare davvero il fenomeno fisico.

L’idea di entrare in contatto con i fenomeni in modo intimo e libero senza limiti di tempo o schede di lavoro predefinite, è stato sposata anche in questo lavoro. Abbiamo cercato di interagire con l’apparato di misura in modo spesso qualitativo ed esplorativo, deviando dalle disposizioni del manuale e cercando di trovare spiegazioni a fenomeni inattesi, usando materiali diversi e riproducendo accessori dell’apparato con oggetti di uso quotidiano.

Figura 2: specchio d’acqua



## 2 MICROONDE

### 2.1 Caratteristiche

Le onde elettromagnetiche sono classificabili a seconda delle loro caratteristiche e del loro impiego nei vari campi della tecnica, in base alla lunghezza d'onda o anche alla frequenza, in quanto queste grandezze sono correlate secondo la seguente espressione:

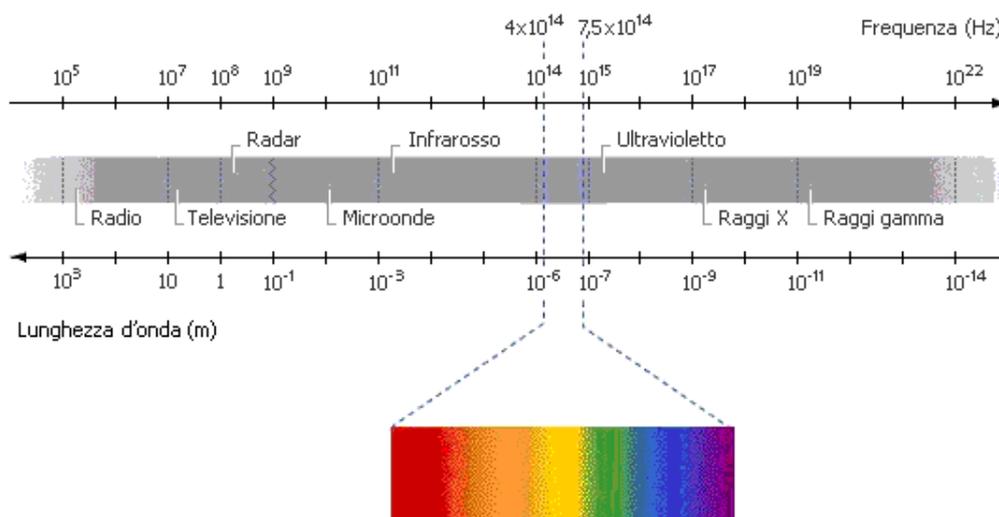
$$\lambda\nu = c$$

La classificazione delle onde elettromagnetiche fatta in base alla frequenza o alla lunghezza d'onda viene indicata col nome di SPETTRO ELETTROMAGNETICO (Figura 3).

Le microonde appartengono alla categoria delle radiazioni elettromagnetiche non ionizzanti e rappresentano la parte dello spettro compresa tra le frequenze di 300 MHz e 300 GHz, tra la banda delle onde radio e la radiazione infrarossa e corrispondenti a lunghezze d'onda tra 1mm e 1m.

In generale però il confine tra microonde e onde radio non è nettamente definito e si può parlare anche di microonde nello spettro compreso tra le UHF (Ultra High Frequencies) e le EHF (Extremely High Frequencies). Tali radiazioni possono essere trasmesse, riflesse e assorbite a seconda del materiale con cui interagiscono. Per alcuni materiali è possibile osservare una riflessione o una trasmissione totale, come ad esempio metallo e plastica rispettivamente, per altri solo in determinate percentuali.

Figura 3: Spettro Elettromagnetico



## 2.2 Utilizzi, vantaggi e rischi

A causa del diffuso impiego delle microonde nel campo delle comunicazioni, sono stati stipulati dei trattati internazionali che fissano le bande permesse per le altre applicazioni. È permesso quindi l'utilizzo, per scopi Industriali, Scientifici e Medici, delle sole frequenze di 433,92 2450 5800 e 24125 MHz che vengono per questo definite frequenze ISM.

I forni a microonde per uso domestico utilizzano la frequenza di 2450 MHz e il riscaldamento o cottura avviene per assorbimento di energia da parte delle molecole d'acqua che sono assimilabili a dipoli elettrici. All'interno del forno le riflessioni multiple sulle pareti generano onde stazionarie o modi normali che mettono in rotazione i dipoli generando urti e forze d'attrito tra essi con conseguente riscaldamento.

Importante caratteristica delle microonde inoltre, riguarda la loro propagazione nell'atmosfera.

A differenza delle onde di frequenza minore, esse non sono riflesse dagli strati ionizzanti della ionosfera e quindi possono attraversarla senza interferenze come accade invece per altre bande di frequenza (onde radio).

Questo rende possibili applicazioni nei settori delle telecomunicazioni terrestri e satellitari, le comunicazioni cellulari, la radioastronomia, il telerilevamento.

Le microonde, come tutte le radiazioni elettromagnetiche non ionizzanti, costituiscono per intensità e frequenze lo spettro a cui tutti gli individui che vivono in una società tecnologica sono esposti.

Fatta eccezione per lo stretto range del visibile ( $4 \times 10^{14}$ - $7,5 \times 10^{14}$  Hz), la presenza di questo ampio spettro di radiazioni che interagiscono con l'uomo e con gli oggetti che ci circondano, non è percepita dal nostro occhio né siamo provvisti di altri recettori o organi di senso specifici che ne avvertano la presenza.

Gli effetti prodotti da esse sul corpo umano sono quindi difficili da studiare e hanno alla base meccanismi di interazione dei campi elettromagnetici con la materia biologica considerata nella sua complessità strutturale e funzionale, a livello macroscopico e microscopico.

Su tali studi si basa anche la valutazione dei rischi e la protezione dalle microonde e lo studio sulle conseguenze ambientali che la diffusione di apparati e tecnologie che lavorano su tali frequenze potrebbe provocare. In particolare, nonostante le microonde siano largamente utilizzate fin dalla metà del Novecento, la loro pericolosità è ancora molto discussa e solo alcuni rischi sono ben documentati.

Nel nostro caso, abbiamo preso la semplice precauzione di non esporre direttamente gli occhi alla radiazione generata dal trasmettitore dell'apparato poiché è noto che la cornea dell'occhio corre il rischio di surriscaldarsi se colpita direttamente da microonde non essendo trasparente ad esse e l'esposizione continua può provocare dei danni permanenti.

Non ci soffermiamo oltre su rischi e conseguenze dei fenomeni elettromagnetici sul nostro quotidiano, ma è sembrato importante sottolineare l'importanza crescente della loro interazione con ciò che ci circonda.

## 3 GENERAZIONE E PROPAGAZIONE DI MICROONDE

Nel presente capitolo verrà posta attenzione al modo in cui è possibile generare microonde ad una data frequenza e farle propagare nello spazio senza che esse si disperdano lungo il cammino. Verranno perciò introdotti i concetti fondamentali di propagazione guidata, guide d'onda, cavità risonanti e antenne.

### 3.1 Propagazione guidata

Per poter effettuare un collegamento tra un generatore di segnale ed un dispositivo ricevente in modo che i campi elettromagnetici non si disperdano e si abbia il massimo trasferimento possibile di energia senza modificare l'informazione, si ricorre all'utilizzo di "strutture guidanti" che nel caso delle microonde chiamiamo guide d'onda. Esse devono soddisfare le seguenti caratteristiche:

- Direzione di propagazione privilegiata, lungo la quale l'energia è confinata;
- Minimizzazione delle attenuazioni in modo da avere una massimizzazione del trasferimento di informazione.

Le guide d'onda si presentano dunque come singoli conduttori cavi di sezione rettangolare o circolare contenenti aria o altro dielettrico gassoso o solido all'interno dei quali il campo elettromagnetico si propaga sotto opportune condizioni poste alle equazioni di Maxwell.

L'analisi di tale propagazione sarà fatta supponendo che il dielettrico sia ideale (ipotesi ragionevole se si tratti di aria) e che le pareti della guida abbiano conducibilità infinita. Ovviamente nessuna di queste due condizioni è verificata in un caso reale; tuttavia se le perdite sono ridotte, l'analisi può essere condotta con buona approssimazione.

La guida d'onda è un mezzo di trasmissione a banda stretta, esiste cioè una frequenza detta di *cutoff* al di sotto della quale non si ha trasmissione, e l'intervallo in cui la propagazione non assume caratteristiche dispersive è molto stretto. La propagazione avviene lungo la direzione di propagazione della guida stessa e per ogni frequenza di lavoro le configurazioni del campo, dette modi, sono caratterizzate da diverse modalità di trasmissione (TE, TM).

Dalla frequenza di cutoff si attiva il cosiddetto modo dominante entro il quale la guida funziona direttamente. A frequenze maggiori (modi superiori) inizia una propagazione dispersiva, con conseguente perdita di energia che non può essere recuperata poiché i dispositivi di ricezione del segnale sono di solito adattati su un solo modo.

### 3.2 Cavità Risonanti

Una cavità risonante è un volume chiuso da pareti perfettamente conduttrici in cui si eccita una configurazione di campo persistente nel tempo.

La persistenza è indefinita solo nel caso ideale in cui le pareti siano davvero perfettamente conduttrici, cosa che non accade mai nella realtà.

Le cavità risonanti costituiscono l'analogo, nella gamma delle microonde, dei circuiti RLC a componenti discreti.

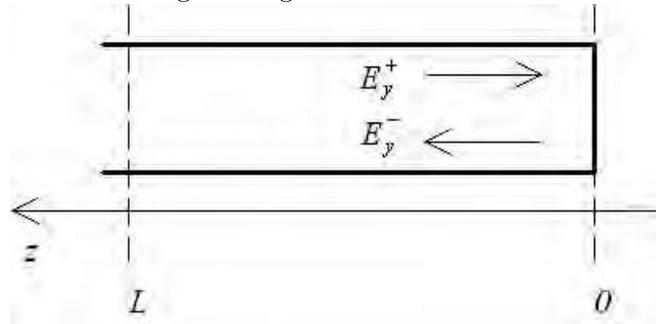
Esse si presentano come guide d'onda (pareti conduttrici, dielettrico perfetto, asse privilegiato di trasmissione) cortocircuitate ad un'estremità. Il campo elettrico generato da un apposito dispositivo si propaga lungo la guida e a causa del cortocircuito si avrà un'onda riflessa che in ogni punto si sovrappone a quella incidente. (figura4)

In particolare nel punto del cortocircuito (che possiamo fissare a  $z=0$  se  $z$  è l'asse di trasmissione), si avrà campo nullo e dunque un "nodo". Se cerchiamo altri punti in cui si verifichi questa condizione, vediamo che essi corrispondono alle  $z$  tali che :

$$z = \frac{m\lambda_g}{2}$$

dove  $m$  è un intero,  $\lambda_g$  lunghezza d'onda nella guida.

Figura 4: guida cortocircuitata



Se quindi mettiamo un altro corto circuito a un numero intero di mezze lunghezze d'onda di distanza dall'ascissa  $z = 0$ , otteniamo il risultato di intrappolare il modo in propagazione con lunghezza d'onda  $\lambda_g$  nella cavità formata chiudendo lo spezzone di guida con i due corti circuiti. In assenza di perdite dovute a dissipazioni interne o a prelievo di potenza da parte di carichi esterni, questo modo sarà in grado di autosostenersi e quindi permanere nella cavità per un tempo indefinito.

Tutto ciò vale una volta fissata la lunghezza d'onda in guida, e quindi la frequenza di lavoro.

Una volta fissata anche la sua sezione, la cavità potrà risuonare a tutte le frequenze per cui la sua lunghezza  $L$  è un multiplo intero di mezza lunghezza d'onda in guida.

Data la relazione tra la lunghezza d'onda in guida e quella in spazio libero:

$$\lambda_g = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_c}\right)^2}}$$

con  $\lambda_c$  = lunghezza d'onda di *cutoff*

e l'espressione precedente per le posizioni dei nodi, si ha:

$$L = \frac{m}{2} \frac{\lambda}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_c}\right)^2}} = \frac{mc}{2f} \frac{1}{\sqrt{f^2 - f_c^2}}$$

quindi:

$$f = \sqrt{\left(\frac{mc}{2L}\right)^2 + f_c^2}$$

Dalla formula per un generico modo  $(n,l)$  in guida rettangolare, sappiamo che la frequenza di cutoff è data da:

$$f_c^2 = \frac{c^2}{4} \left[ \left(\frac{n}{a}\right)^2 + \left(\frac{l}{b}\right)^2 \right]$$

e quindi:

$$f = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{m}{L}\right)^2 + \left(\frac{n}{a}\right)^2 + \left(\frac{l}{b}\right)^2}$$

Abbiamo dunque una triplice infinità di frequenze di risonanza, dipendenti dai parametri interi  $(m, n, l)$ .

Il modo che effettivamente si stabilirà nella cavità sarà quello per cui è massimo il *fattore di qualità*,  $Q$  :

$$Q = 2\pi \frac{\text{Energia media immagazzinata}}{\text{Energia persa per ciclo}}$$

Nel caso di una cavità, l'energia media immagazzinata sarà proporzionale al volume, mentre l'energia persa per ciclo sarà proporzionale alla superficie totale delle pareti. Per massimizzare il fattore di qualità bisognerà quindi massimizzare il rapporto tra volume e superficie.

Per sintonizzare la cavità, ovvero per variarne la frequenza di risonanza, si può ricorrere a un corto circuito mobile che scorrendo entro la guida ne modifica la lunghezza. Quanto detto finora vale anche per guide d'onda a sezione circolare, ma in generale le forme che possono avere le cavità sono varie.

### 3.3 Generatori di microonde

È possibile produrre microonde con tubi a vuoto o dispositivi a stato solido. I primi si basano sul movimento di elettroni nel vuoto sotto l'influenza di campi elettrici e magnetici statici di prova e includono tra gli altri Magnetron e Klystron.

Il Magnetron è impiegato in particolare nelle apparecchiature Radar e nei forni a microonde, dove la radiazione si propaga nella cavità risonante costituita dalle pareti metalliche del forno, riflettendosi sulle pareti e generando delle onde stazionarie.

I secondi si basano invece sulle proprietà dei semiconduttori e sono principalmente transistor a effetto di campo o diodi. Quest'ultimo è proprio il nostro caso. Il componente presente all'interno del trasmettitore è infatti un diodo Gunn, costituito da Arseniuro di Gallio (GaAs).

Per essere utilizzato come oscillatore esso sfrutta le caratteristiche di resistenza negativa del semiconduttore dovute al drogaggio di tipo n (eccesso di elettroni) a tre regioni, differente rispetto ai diodi tradizionali a giunzione p-n (figura 5).

Il diodo Gunn soddisfa requisiti come bassa impedenza, alimentazione a basso voltaggio e soprattutto stabilità della frequenza di oscillazione.

Quest'ultima viene determinata da una cavità risonante e può essere modificata variando le sue dimensioni.

Ulteriori vantaggi del diodo Gunn sono: funzionamento ad elevatissime frequenze, efficienza elevata, stabilità di frequenza poco dipendente dalla temperatura, ridotta potenza di rumore nelle modulazioni FM.

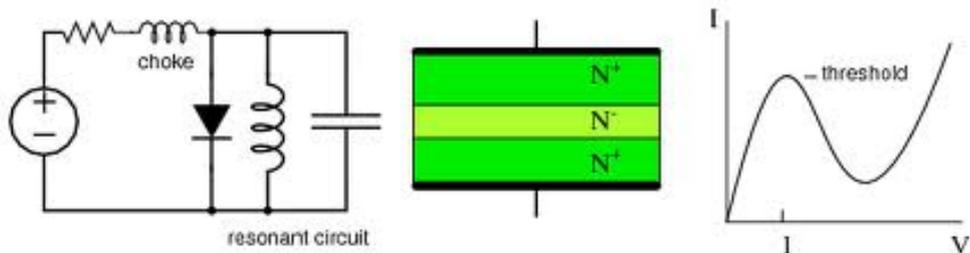


Figura 5: rappresentazione schematica del Diodo Gunn

### 3.4 Antenne

Le antenne si basano sul principio fisico dell'irradiazione e della ricezione elettromagnetica, cioè della trasduzione elettrica/elettromagnetica e viceversa: gli elettroni eccitati oscillano producendo correnti elettriche alternate e irradiano onde elettromagnetiche; viceversa un'onda elettromagnetica che incide su un conduttore produce a sua volta una corrente sul conduttore stesso ovvero generando un segnale elettrico nell'antenna.

Dunque hanno il duplice compito di trasmissione e ricezione del segnale.

Sebbene in linea teorica qualunque oggetto elettricamente conduttore possa comportarsi da antenna (sia in trasmissione se elettricamente alimentato che in ricezione), il fenomeno di trasduzione proprio dell'antenna è 'rilevante' solo per forme e dimensioni ben precise dell'oggetto irradiante.

Le caratteristiche geometriche di un'antenna ne definiscono le prestazioni e conseguentemente destinazione d'uso (trasmissione o ricezione), a sua volta dipendente dalla particolare applicazione di radiocomunicazione desiderata. Questo dà conto della grande varietà di antenne che la tecnologia consente di realizzare: così un'antenna omnidirezionale per onde medie sarà costruttivamente del tutto differente da un'antenna direttiva per microonde. Nelle antenne a microonde si distingue una sorgente primaria, in cui le grandezze caratterizzanti la propagazione guidata, ossia correnti e tensioni, sono trasformate, rispettivamente, in campi magnetici ed elettrici, e una sorgente secondaria, che è una superficie entro la quale si realizza una distribuzione di campo tale da dare all'antenna guadagno e direttività desiderati.

Il *guadagno* è una funzione della frequenza di lavoro e della geometria dell'antenna. Il guadagno di una antenna è misurato per confronto tra l'antenna considerata (idealmente) e un'antenna isotropa (cioè perfettamente omnidirezionale).

È quindi dato dalla capacità dell'antenna di concentrare il campo elettromagnetico in una certa direzione, ed è solitamente misurato nella direzione in cui l'antenna ha la massima emissione o ricezione, come un numero adimensionale (guadagno massimo), altrimenti esso è una funzione delle coordinate polari sferiche.

In questo caso il guadagno è definito come una funzione della direzione di osservazione, ma con il termine guadagno si intende comunemente il guadagno massimo ovvero il massimo di tale funzione nella direzione di massimo. Il prodotto del guadagno per la potenza trasmessa è un parametro noto come EIRP.

La *direttività* di un'antenna in una certa direzione è definita invece come il rapporto tra l'intensità di radiazione irradiata in tale direzione e la potenza totale irradiata su tutte le direzioni.

La differenza con il guadagno è che quest'ultimo al denominatore presenta la potenza totale in ingresso all'antenna che è solo in parte irradiata e in parte dissipata dal conduttore dell'antenna stessa. Anche la direttività è definita come una funzione della direzione di osservazione anche se comunemente è intesa come il valore di tale funzione in corrispondenza della direzione di massimo.

Direttività e guadagno determinano la forma del diagramma di radiazione, che ci dà l'informazione visiva sulla densità del fascio di radiazione elettromagnetica rispetto alle varie direzioni (figura 6)

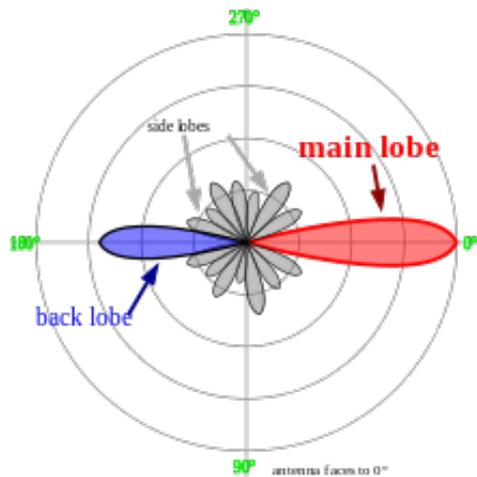


Figura 6: Diagramma di radiazione

Il campo elettromagnetico irradiato dall'antenna può essere valutato facendo ricorso al *Principio di Huygens*: data una superficie  $S$  su cui 'e presente una certa distribuzione di campo elettromagnetico, ogni areola elementare  $dS$  può essere vista come una sorgente puntiforme di onde sferiche. Il campo rilevato in un qualunque punto  $P$  dello spazio può essere visto come la risultante vettoriale di tutti i contributi dovuti alle singole areole.

In generale, a parte la direttività, lo scopo di un'antenna è quello di adattare l'impedenza caratteristica della linea che la alimenta all'impedenza caratteristica dello spazio libero.

Nel caso in cui la linea sia una guida d'onda come nel nostro caso, il tipo più semplice di antenna è a *tromba*, che poi è una guida lasciata aperta ma con una transizione graduale della sezione, in modo da conseguire l'adattamento con lo spazio libero. Esistono diversi tipi di antenna a tromba, a seconda della loro forma:

- Tromba piramidale acuta, che è quella del nostro apparato (figura7)
- Tromba piramidale sagomata
- Tromba settoriale
- Tromba conica in guida circolare

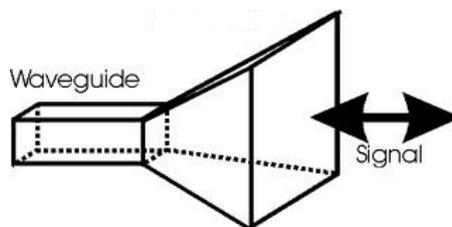


Figura 7: Antenna a tromba

Le forme diverse corrispondono a diversi adattamenti di impedenza e diverse frequenze di cutoff e si passa dall'una all'altra modificando uno degli assi o entrambi.

Per l'apparato della PASCO non è stato possibile avere delle stime del guadagno e della direttività.

Abbiamo potuto solo stimare la forma del diagramma di radiazione, quindi avere un'idea dei lobi principali e secondari in cui il fascio si divide, osservando la lettura sul ricevitore al variare dell'angolo di deviazione dall'asse della tromba del trasmettitore.

## 4 CARATTERISTICHE E POSSIBILITA' ESPLO- RATIVE DELL'APPARATO SPERIMENTALE

L'apparato a microonde utilizzato nel presente lavoro è il PASCO Scientific Model WA - 9314B.

Gli esperimenti che è possibile svolgere sono più o meno gli stessi di un apparato Ottico ma è evidente che lavorando ad una lunghezza d'onda di pochi cm (vari ordini di grandezza maggiore rispetto a quelle ottiche, del centinaio di nm), la scala dell'esperimento sia completamente stravolta.

Le variabili in gioco diventano ben visibili e misurabili e gli strumenti assai maneggevoli, facilmente riproducibili e non suscettibili alle piccole vibrazioni meccaniche che disturbano in genere un esperimento con supporti ottici.

Il vantaggio di lavorare in tali range di lunghezze d'onda è anche di poter usare anche oggetti di uso quotidiano per esplorare l'interazione delle microonde con altri materiali e di dimensioni lineari tali da riuscire a controllare le modifiche della geometria dell'apparato senza dover ricorrere a strumenti di alta precisione, permettendo di osservare facilmente la conseguente variazione dei fenomeni elettromagnetici che intervengono.

L'apparato sperimentale (figura 8) consta principalmente di un trasmettitore e un ricevitore posti su bracci di una scala millimetrata separati da un goniometro, in modo da poter misurare angoli e distanze relative tra essi.

Trasmettitore e ricevitore sono realizzati utilizzando elementi descritti nella teoria della propagazione delle microonde discussa in precedenza.

In più sono presenti supporti necessari per creare diverse configurazioni dell'apparato e accessori come materiali di prova per esaminarne proprietà di riflessione e polarizzazione nel range delle microonde e osservarne analogie e differenze rispetto alla luce.

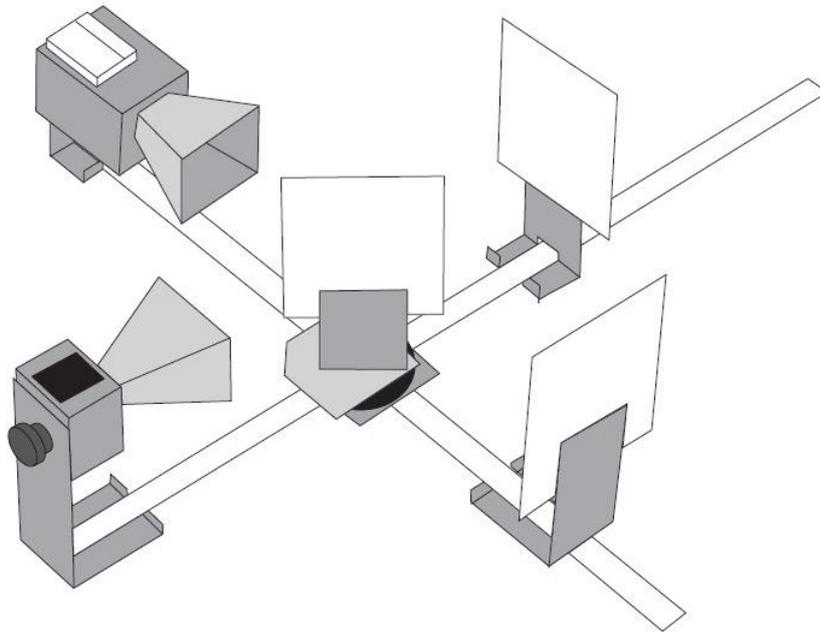


Figura 8: PASCO Microwave Optics System

#### 4.1 Trasmettitore, Ricevitore e studio del segnale

Il trasmettitore (figura 9) crea il segnale a microonde e lo mantiene costante. Al suo interno è presente un diodo Gunn che, come descritto in precedenza, funge da oscillatore e che è inserito in una cavità risonante a sezione rettangolare di dimensioni tali da mantenere in oscillazione onde stazionarie a 10,525 GHz. Fornisce in output 15 mW di radiazione coerente polarizzata linearmente lungo l'asse del diodo e di lunghezza d'onda pari a 2,85 cm.

Subito dopo il sistema diodo-cavità è presente una guida d'onda anch'essa a sezione rettangolare che si collega ad un'antenna metallica a tromba piramidale acuta la quale dirige l'output in modo da creare un forte fascio centrato sull'asse dell'antenna stessa.

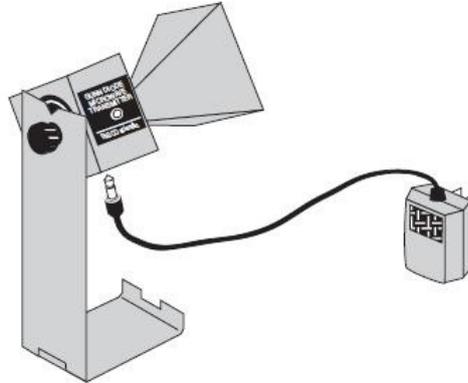


Figura 9: Trasmettitore

Il fascio è intercettato dall'antenna a tromba del ricevitore (figura 12), identica a quella del trasmettitore.

Le trombe non raccolgono tutta la radiazione incidente ma si comportano come riflettori parziali e grazie alle riflessioni multiple tra trasmettitore e ricevitore creano onde stazionarie (figura 10).

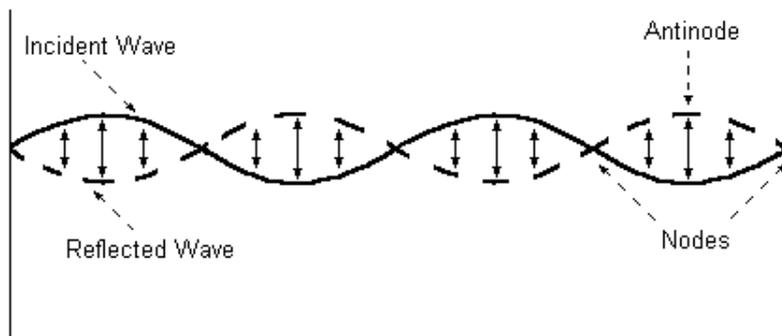


Figura 10: Standing Wave

Possiamo sfruttare così la distanza nota tra due nodi successivi di  $\frac{\lambda}{2}$  per ottenere facilmente la misura della lunghezza d'onda della radiazione, e successivamente usarla per effettuare misure dell'indice di rifrazione di un liquido o di un dielettrico e verificare le leggi sull'interferenza e diffrazione.

Ugualmente al trasmettitore, nel ricevitore è presente una guida d'onda a sezione rettangolare che si collega ad una cavità risonante a 10,525 GHz in cui è inserito un diodo Schottky che si comporta come un resistore non lineare e funge da rivelatore.

Lo strumento opera una trasduzione in intensità di corrente pressoché proporzionale all'intensità della radiazione incidente, ma lo stesso manuale in-

dica che se ne osserva una dipendenza in parte anche dall'ampiezza della radiazione stessa.

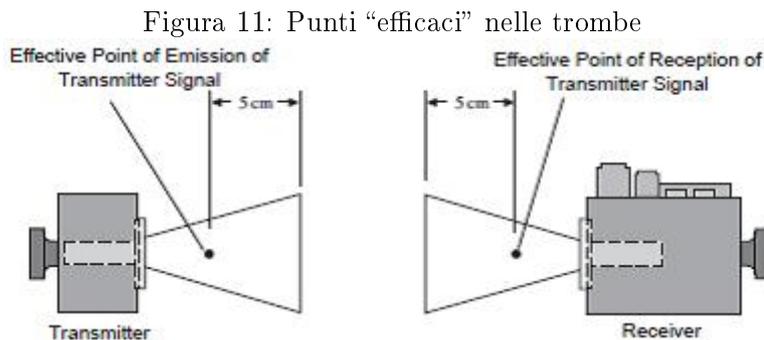
Risulta interessante verificare questa doppia dipendenza osservando la risposta del ricevitore a distanze diverse dal trasmettitore.

Compatibilmente con l'approssimazione di onda sferica, la dipendenza dalla sola ampiezza evidenzerebbe in lettura un andamento proporzionale all'inverso della distanza, mentre per l'intensità un andamento proporzionale all'inverso del quadrato della distanza.

Abbiamo riportato quindi la risposta del ricevitore a varie distanze  $R$  dal trasmettitore, da 25 cm a 95 cm con step di 10 cm, misurate tra due "punti efficaci" di emissione del segnale, situati a 5 cm dall'apertura della tromba (figura 11).

Le misure effettuate sono riportate adimensionalmente e indicate con  $L$ .

L'apparato infatti è pensato principalmente per realizzare esperienze a fini didattici e l'interesse è registrare variazioni relative delle grandezze in gioco. Sono stati calcolati i prodotti della lettura sia per la distanza sia per il quadrato della distanza corrispondente.



La risposta dell'apparato risulta essere non esattamente proporzionale né all'intensità né all'ampiezza dell'onda incidente (come si può notare in tabella 2), ma ci fornirà un valore intermedio fra questi.

R ( $\pm 0,1$ cm)	L ( $\pm 0,02$ )	L x R (cm)	$\Delta(LxR)$ (cm)	L x R <sup>2</sup> (x10 <sup>2</sup> cm <sup>2</sup> )	$\Delta(LxR^2)$ (x10 <sup>2</sup> cm <sup>2</sup> )
25,0	1,00	25,0	0,6	6,25	0,18
30,0	1,00	30,0	0,7	9,00	0,2
35,0	0,78	27,3	0,8	9,6	0,3
40,0	0,80	32,0	0,9	12,8	0,4
45,0	0,52	23,4	1,0	10,5	0,5
50,0	0,56	28,0	1,1	14,2	0,6
55,0	0,48	26,4	1,1	14,5	0,7
60,0	0,40	24,0	1,2	14,4	0,8
65,0	0,34	22,1	1,3	14,4	0,9
70,0	0,26	18,2	1,4	12,7	1,0
75,0	0,28	21,0	1,5	15,7	1,2
80,0	0,22	17,6	1,6	14,1	1,3
85,0	0,22	18,7	1,7	15,9	1,5
95,0	0,18	17,1	1,9	16,3	1,8

Tabella 2: Letture in funzione della distanza

Notiamo che la risposta varia in modo imprevedibile, oscillando man mano che la distanza diminuisce.

Come accennato in precedenza, questo è dovuto al fatto che le microonde formano onde stazionarie tra il trasmettitore e il ricevitore.

Il valore della lettura dipenderà quindi dal fatto di trovarsi in corrispondenza di un ventre o un nodo.

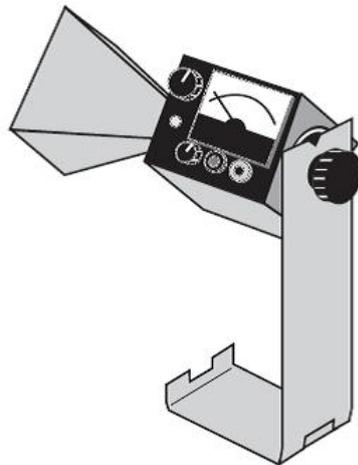


Figura 12: Ricevitore

Il diodo risponde solo alla componente dell'onda polarizzata lungo il suo asse,

producendo una tensione continua che varia circa con l'intensità del segnale e che dipende dall'orientazione del trasmettitore rispetto ad esso.

È dotato di amplificatore con 4 diversi range da 1X a 30X dove il primo si riferisce ad una sensibilità massima e il secondo ad una minima. Un regolatore permette di realizzare un aggiustamento fine del segnale in uscita. Sia trasmettitore che ricevitore sono dotati di un goniometro per misurare gli angoli di polarizzazione dell'uno rispetto all'altro. In questo modo è molto facile verificare la polarizzazione lineare delle microonde prodotte senza il bisogno di usare altri accessori.

Abbiamo riportato le letture sul ricevitore rispetto a variazioni angolari di  $10^\circ$  del suo asse di polarizzazione rispetto a quello del trasmettitore che è stato lasciato in posizione verticale.

Ricevitore e trasmettitore sono stati posti l'uno di fronte all'altro ad una distanza di 70 cm, misurata tra i due "punti efficaci".

Il range di amplificazione scelto è X10, che ci è sembrato adeguato alla distanza selezionata: in questo modo grazie all'aggiustamento fine ci siamo garantiti di essere a fondoscala in corrispondenza del segnale massimo .

La tabella seguente mostra un segnale massimo se i dispositivi sono allineati (angolo di  $0^\circ$ ) e minimo se essi hanno assi di trasmissione perpendicolari (angolo di  $90^\circ$ ).

$\theta_{ricevitore}(\pm 1^\circ)$	L( $\pm 0,02$ )
0	0,82
10	0,80
20	0,76
30	0,68
40	0,54
50	0,36
60	0,18
70	0,06
80	0,02
90	0,00

La *legge di Malus* prevede, per l'intensità in funzione dell'angolo tra gli assi di polarizzazione, un andamento del tipo descritto in eq. (1):

$$I = I_0 \cos^2 \theta \quad (1)$$

Dove  $\theta$  è l'angolo di deviazione dalla posizione di massima lettura (figura 13).

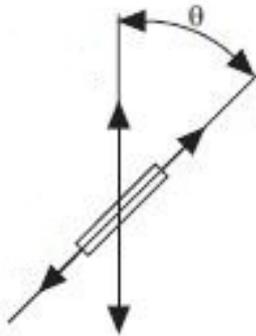


Figura 13: angolo di deviazione

Si nota (grafico in figura 14) che nonostante quanto discusso precedentemente riguardo l'ambiguità della lettura del ricevitore, i punti sperimentali sembrano ben adattarsi all'andamento previsto da tale legge (linea continua).

$R^2=0,992$ ; Parametro  $I_0 = 0,85$ ;  $\sigma_{I_0} = 0,015$

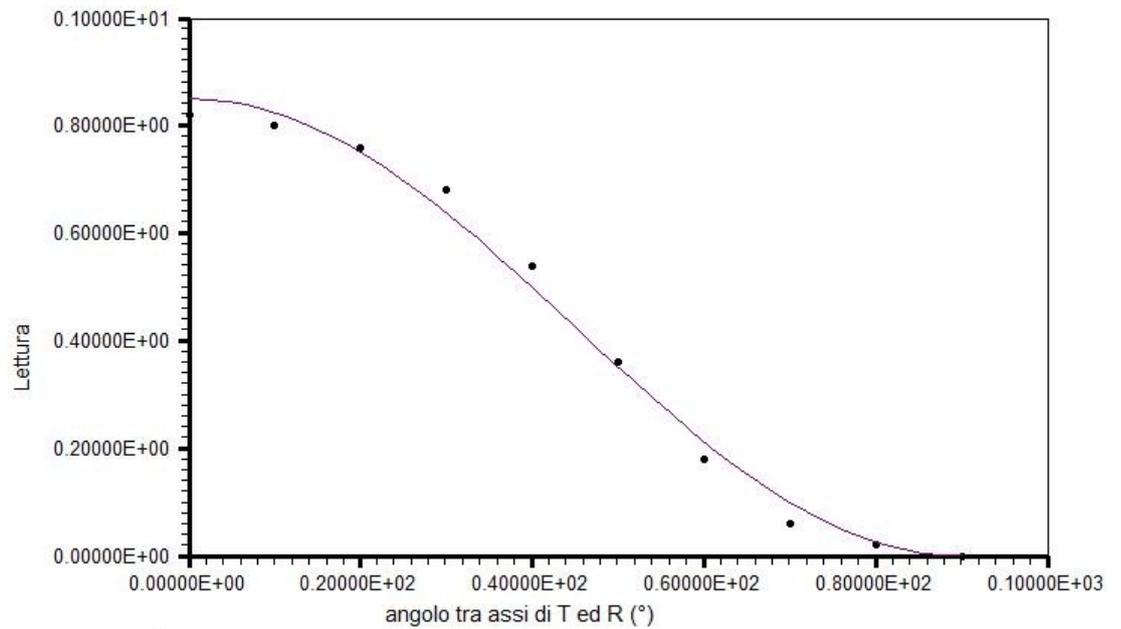


Figura 14: grafico delle letture in funzione degli angoli confrontato con la legge di Malus

Ricevitore e trasmettitore sono montati su supporti alti 18 centimetri che servono a diminuire le riflessioni dovute alla superficie del tavolo di lavoro.

## 4.2 Accessori

Come si è detto, gli accessori a disposizione dell'apparato citati qui di seguito sono funzionali all'esecuzione di una vasta gamma di esperienze.

Ogni esperienza sulle proprietà delle onde richiede la misura di angoli e distanze.

Tutti gli oggetti usati nelle esperienze saranno montati a tal scopo su un goniometro a due bracci millimetrati, uno dei quali mobile, che permette di individuare le loro posizioni relative durante le fasi delle esperienze.

Dei *bracci aggiuntivi* saranno utili in esperimenti come quello dello *specchio di Lloyd* che verificano l'interferenza fra componenti di radiazione inizialmente splittate e poi ricongiunte nel ricevitore.

*Supporti fissi e rotanti* e una tavola rotante permettono il posizionamento e lo spostamento di oggetti di materiali diversi nella determinazione ad esempio di indici di rifrazione, *angolo di Brewster* o nella realizzazione dell'interferometro di Michelson.

Utili per tali misure sono un pannello di polietilene di dimensioni 13x18x2,5 cm, una forma di prisma di Ethafoam (schiuma di polietilene) che è possibile riempire con il materiale che si desidera investigare, e varie lamine di materiali totalmente o parzialmente riflettenti nel range delle microonde.

Grazie a distanziatori di vari spessori è possibile riprodurre l'esperimento di interferenza da doppia fenditura, facendo attenzione a scegliere le dimensioni delle fenditure e la loro distanza reciproca.

Infine a nostra disposizione è presente un cubo di lattice con 100 sferette metalliche, funzionale all'esecuzione dell'esperimento sulla legge di Bragg.

Per effettuare esperimenti di polarizzazione è presente infine un *polarizzatore* (figura 16) che ci appare di forma e dimensioni insolite se pensiamo all'aspetto dei Polaroid negli esperimenti di Ottica.

Il nostro accessorio è infatti una griglia di lamine metalliche larghe 0,6 cm e spaziate di 0,6 cm fra loro per adattarsi alle lunghezze d'onda in gioco.

## 4.3 Polarizzazione

Alla polarizzazione abbiamo dedicato particolare attenzione poichè il trovarci a lavorare con microonde ci ha messo davanti all'esplorazione del fenomeno da un punto di vista più "fisico" rispetto a come viene affrontato in Ottica. Nell'ambito di esperimenti di ottica infatti non è possibile distinguere le caratteristiche geometriche e costruttive di oggetti e dispositivi utilizzati a causa della loro sofisticata tecnologia, dunque non sarebbe pensabile l'idea di volerli riprodurre con materiali di facile reperibilità.

In questo modo ci avviciniamo all'apparato in modo passivo e inconsapevole, almeno dal punto di vista pratico.

Il vantaggio è che possiamo avere misure molto più precise e ricavare un miglior accordo con il modello teorico, ma c'è il rischio di acquisire dei dati senza capire cosa stia accadendo realmente al sistema e perché sia possibile, con l'apparato a disposizione, dimostrare una certa legge.

Grazie all'uso delle microonde, che ci permettono di osservare con più chiarezza seppur in modo più rozzo e qualitativo il comportamento delle onde elettromagnetiche, abbiamo potuto meglio studiare e interpretare il fenomeno della polarizzazione.

Descriviamo di seguito l'esperimento e riportiamo le letture osservate.

Posizionati trasmettitore e ricevitore l'uno di fronte all'altro ad una distanza di 80 cm, si è posto tra essi un supporto a cui si è applicato il polarizzatore, come mostrato in figura 15.

I due dispositivi sono stati orientati entrambi con asse di polarizzazione verticale e si è registrata la lettura sul ricevitore in assenza di polarizzatore, risultata essere 0,76.

Si sono osservate le letture sul ricevitore per posizioni del polarizzatore a  $0^\circ$  (lamine verticali),  $45^\circ$  e  $90^\circ$  (lamine orizzontali).

Angolo lamina ( $\pm 1^\circ$ )	L ( $\pm 0,02$ )
0 (verticali)	0,00
45	0,36
90 (orizzontali)	0,95

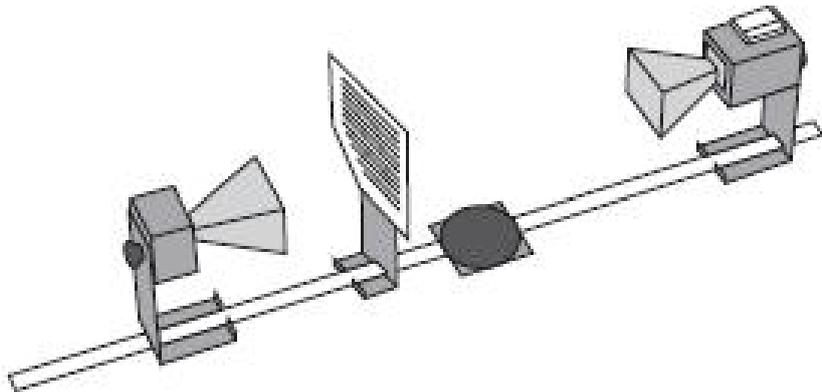


Figura 15: Setting

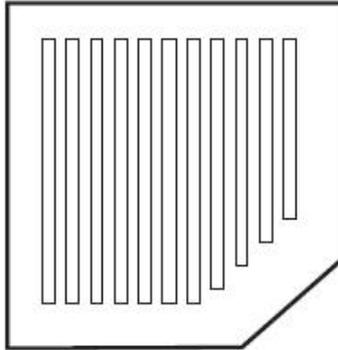


Figura 16: Polarizzatore

Si registra dunque un massimo del segnale se le lamine sono orientate *orizzontalmente* e un minimo se orientate *verticalmente* (figura 17).

Si arriva alla conclusione che la componente del campo elettrico oscillante parallelamente ai fili stessi viene “bloccata” mentre quella perpendicolare passa indisturbata.

E’ interessante notare che la lettura sul ricevitore quando i fili sono orizzontali risulta addirittura maggiore della lettura in assenza di polarizzatore.

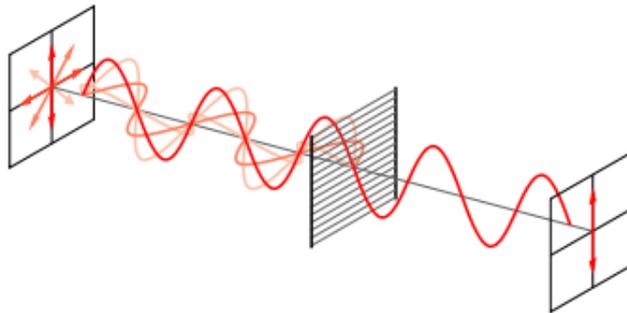


Figura 17: Polarizzazione

Ciò ci appare fortemente *controintuitivo*: si potrebbe immaginare che i fili disposti parallelamente all’asse di vibrazione del campo (angolo di  $0^\circ$ ), favoriscano il passaggio delle onde piuttosto che il contrario, così come è stato quando abbiamo verificato la polarizzazione nella trasmissione del segnale tra trasmettitore e ricevitore.

Per spiegarci questo fenomeno dobbiamo necessariamente studiare la fisica presente nella realizzazione del modello ideale di polarizzazione.

Abbiamo parlato di questo caso quando abbiamo discusso i problemi concettuali che possono generare le false analogie o l’apprendimento errato di una certa rappresentazione formale.

Il concetto di polarizzazione riguarda ogni processo in seguito al quale si manifesta una concentrazione di effetti verso particolari punti o in seguito al quale un corpo o un sistema di corpi presenta una polarità, ossia una proprietà che individua una orientazione privilegiata. In questo modo possiamo classificare diversi materiali in base alle loro proprietà di “selezionare” diverse direzioni privilegiate.

Abbiamo già sostenuto che spesso per “visualizzare” tali fenomeni ci si serve di analogie con il mondo meccanico senza nemmeno rendersene conto.

Nel caso della polarizzazione lineare, l’idea del campo elettrico oscillante in un piano perpendicolare alla direzione di propagazione è facilmente assimilabile a quella di una corda vibrante.

Sembra naturale immaginare che uno strumento che realizzi tale fenomeno, cioè un polarizzatore, dovrebbe presentare una configurazione fisica in cui si identifichi una direzione privilegiata.

Se pensassimo di avere una corda che vibra lungo un asse e una struttura a fenditure, ci si immagina di dover disporre tali fenditure parallelamente a tale asse in modo che essa possa continuare a vibrare indisturbata (fig. 18). In sostanza siamo portati a pensare che il polarizzatore agisca semplicemente da *filtro*.

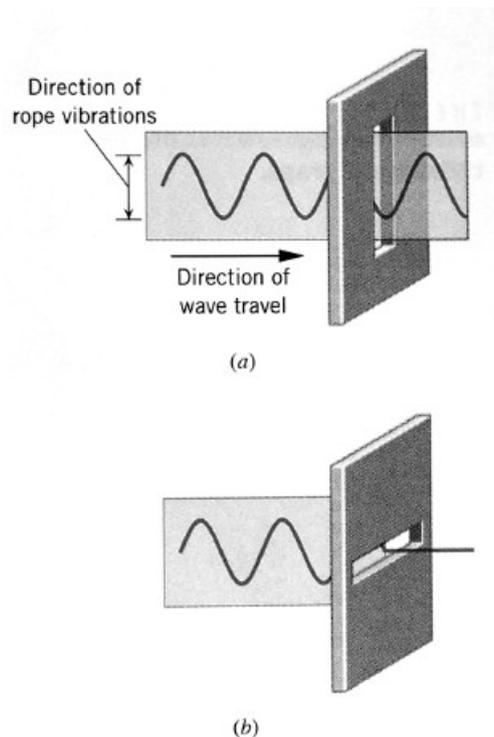


Figura 18: corda vibrante attraverso una fenditura

Questo ci porta fuori strada nel caso delle onde elettromagnetiche.

Non possiamo trascurare l'interazione profondamente diversa delle onde elettromagnetiche con i materiali e il diverso tipo di propagazione rispetto alle onde meccaniche.

D'altra parte il fatto che osserviamo un segnale maggiore quando il polarizzatore è perpendicolare alle lamine rispetto al caso in cui esso è rimosso, ci deve far riflettere.

Poniamoci nel caso di una qualunque griglia di fili metallici, che rispondono alla nostra esigenza di avere polarizzatore con caratteristiche fisiche che presentino una direzione privilegiata.

Supponiamo che polarizzata incida sulla griglia con un angolo qualunque fra direzione dei fili e asse di polarizzazione.

Se scomponiamo il vettore elettrico  $\mathbf{E}$  in una componente parallela ai fili  $E_l$  e una perpendicolare ad essi  $E_t$ , la prima produrrà una corrente mentre la seconda no. Infatti gli elettroni, eccitati dal campo incidente, sono liberi di muoversi solo lungo la direzione dei fili, che assumiamo di dimensioni lineari trascurabili.

A questo punto non è scontato spiegare come i fili della griglia si comportino fisicamente, cioè descrivere il fenomeno fisico dominante che determina il carattere di polarizzatore della griglia.

In letteratura non c'è una posizione univoca su questo punto.

Ci immaginiamo che parte dell'energia assorbita dal metallo si dissipi per effetto Joule e che sia questo a contribuire maggiormente ad esaurire la componente del campo elettrico  $E_l$  rendendo la direzione di  $E_t$  quella di massima propagazione. Questa è una parte del fenomeno che, secondo ad esempio Bobbio e Gatti [5], sarebbe l'unica rilevante.

Ma i fili della griglia percorsi da corrente si comportano come "antenne" che riemettono radiazione elettromagnetica alla stessa lunghezza d'onda della radiazione incidente e che si trova in opposizione di fase rispetto ad essa soddisfacendo il vincolo di campo elettrico nullo sulla superficie del metallo. La parte di radiazione riflessa forma con quella incidente un'onda stazionaria per cui il filo si trova in corrispondenza di un nodo, la parte riemessa in avanti invece interferisce distruttivamente con la componente di onda incidente parallela ai fili, annullandola.

Nel volume della Fisica di Berkley sulle onde si afferma che la riemissione è fondamentale per spiegare l'effetto della griglia sull'onda incidente e che l'effetto Joule quindi sarebbe solo secondario.

L'idea che la riemissione da parte della griglia debba avere un ruolo fondamentale ci è fornita da un altro esperimento che consiste nel sistemare questa volta gli assi di polarizzazione di trasmettitore e ricevitore perpendicolari tra loro.

A questo punto, in base alle osservazioni precedenti, nessun segnale arriva al ricevitore.

Dunque, se non ci fosse riemissione, anche mettendo tra i due il polarizzatore la situazione non dovrebbe cambiare.

Quello che si osserva invece è che posizionando il polarizzatore sul supporto ad un angolo di  $45^\circ$  rispetto ai due assi di polarizzazione incrociati, la lettura sul ricevitore risulta tutt'altro che nulla.

Anche Feynman fa menzione di questo caso per spiegare il comportamento dei polarizzatori, ma non si dilunga nel descrivere il fenomeno.

Evidentemente anche qui possiamo scomporre il fascio incidente in due componenti, una parallela e l'altra perpendicolare ai fili.

Abbiamo detto che solo la prima può produrre corrente nei fili e questi riemettono radiazione elettromagnetica polarizzata ad un angolo di  $45^\circ$  rispetto all'asse di polarizzazione del ricevitore. Scomponendo ancora una volta la radiazione in una componente parallela ed una perpendicolare ad esso avremo che la prima arriva al ricevitore registrando una lettura diversa da zero.

L'esperimento precedente è illustrato in un'esperienza di laboratorio del MIT, eseguita con il supporto di un oscilloscopio che mostra con precisione la variazione del segnale sul ricevitore nelle diverse configurazioni dell'apparato (figura 19).

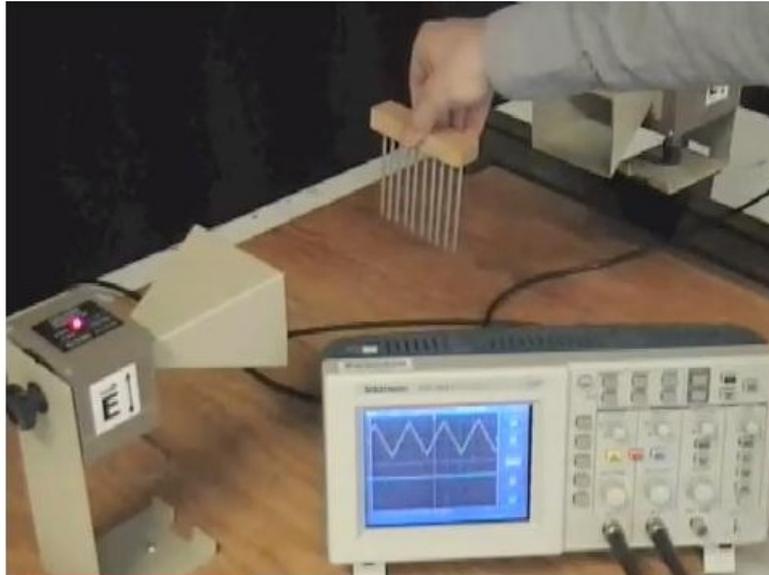


Figura 19: Esperienza di polarizzazione con griglia metallica

Sul web è disponibile il video di questa esperienza <http://www.youtube.com/watch?v=nCAKQJf0vk> e di altre realizzate al MIT.

Oltre alla diffusione di video che mostrano esperienze laboratoriali è possibile reperire anche simulazioni semplici e animazioni che descrivono i fenomeni permettendo di cambiare tutti i parametri a piacimento adattandosi ad esempio alle condizioni di un apparato che si sta utilizzando.

Un oggetto virtuale ha il grande vantaggio della visualizzazione del fenomeno da un punto di vista intuitivo e schematico. Nel nostro caso è stata utilizzata un'applet virtuale per prevedere le caratteristiche di un'onda riflessa e rifratta al variare di alcuni parametri dell'onda incidente e del materiale (ampiezza, angolo con la normale, polarizzazione, indice di rifrazione...). Cambiando i parametri (indice di rifrazione, angolo di incidenza, ampiezza dell'onda) è possibile osservare la polarizzazione per riflessione all'angolo di Brewster (figura 20) , la riflessione totale e molti altri fenomeni elettromagnetici in modo intuitivo e comprensibile.

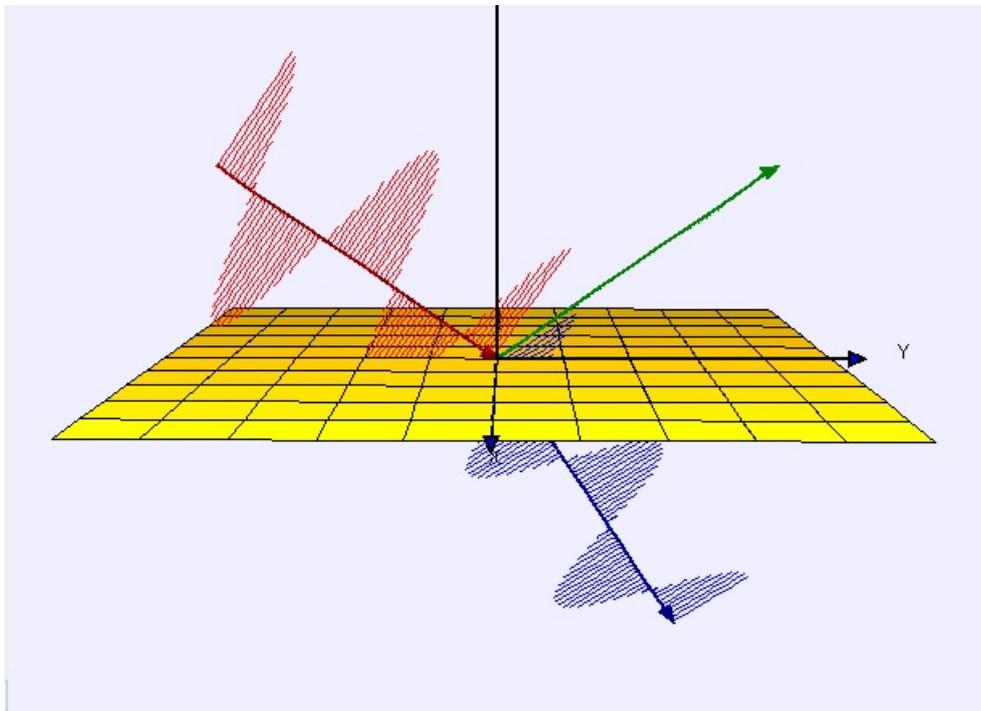


Figura 20: Applet angolo Brewster

#### 4.4 Determinazione dell'angolo di Brewster con luce e microonde

Le riflessioni fatte nell'esperienza di polarizzazione ci hanno messo davanti al fatto che cambiare tipo di apparato e lunghezza d'onda e quindi ordine di grandezza delle misure in gioco, può rendere i fenomeni molto più comprensibili e gestibili dal punto di vista fisico.

E' stato chiaro il comportamento delle microonde al variare dell'angolo del polarizzatore con l'asse di polarizzazione e sono state identificate le caratteristiche fisiche per cui è possibile ottenere un polarizzatore.

Un'esperienza in laboratorio di ottica, ad esempio la verifica della legge di Malus, rende chiaro il concetto che i polarizzatori selezionino una precisa componente della radiazione e che sia possibile quindi orientarli in modo da ottenere un minimo di o un massimo di intensità in uscita cambiando le loro configurazioni, ma non ci fornisce lo stesso livello di comprensione su come tale selezione sia effettivamente possibile.

La maggiore precisione dello strumento e delle misure non corrisponde in questo caso ad un maggiore valore didattico dell'esperienza e anzi, provando che lo stesso fenomeno si possa generalizzare per lunghezze d'onda profondamente diverse, si fornisce una visione generale delle onde elettromagnetiche e delle leggi che le governano, non limitata al solo caso dell'ottica.

Abbiamo provato ad applicare questa visione anche nell'ambito dell'interazione tra onde elettromagnetiche e materiali, cercando di riprodurre l'esperienza dell'angolo di Brewster in entrambi i casi, ottica e microonde.

In questo modo anche le relazioni di Fresnel e la legge di Snell, che di solito riferiamo solo al visibile, acquistano nella pratica un carattere più generale e sono quindi comprese come leggi dei campi elettromagnetici e non esclusivamente della luce.

Tali relazioni descrivono le situazioni che si vengono a creare per i campi elettrici e magnetici nella riflessione e nella rifrazione sulla superficie di separazione tra due mezzi con indici di rifrazione  $n_1$  ed  $n_2$ .

Distinguiamo i casi di onde polarizzate linearmente con vettore elettrico perpendicolare (onda polarizzata tipo s figura 21)

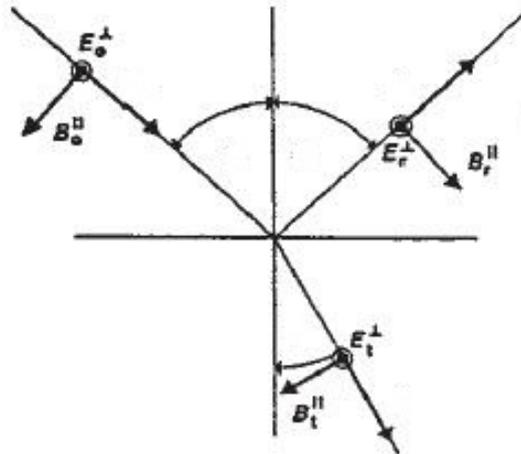


Figura 21: Polarizzazione tipo s

o parallelo (onda polarizzata tipo p figura 22)

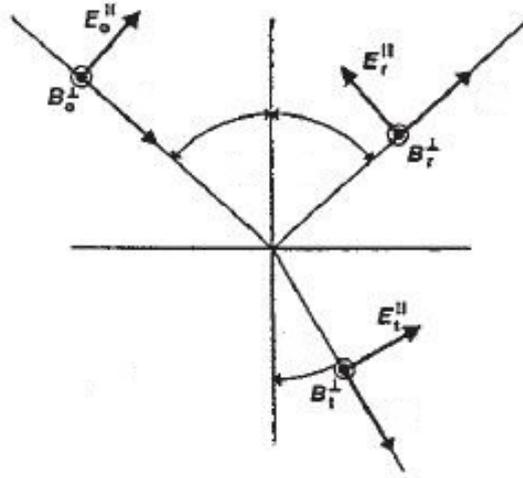


Figura 22: Polarizzazione tipo p

al *piano di incidenza* ovvero il piano contenente le direzioni di propagazione dell'onda incidente, riflessa e rifratta.

La scomposizione in queste due componenti è sempre possibile qualunque sia il tipo di onda piana.

Partendo dalle equazioni di Maxwell, imponiamo la continuità delle componenti tangenziali del campo elettrico e magnetico sulla superficie di interfaccia tra i due mezzi, assumendo poi che essi siano dielettrici (correnti di superficie e cariche superficiali nulle) e che la permeabilità magnetiche del primo e del secondo siano uguali e assimilabili a 1:

$$\begin{cases} E_{1t} = E_{2t} & D_{1n} = D_{2n} \\ B_{1n} = B_{2n} & \frac{B_{1t}}{\mu_1} = \frac{B_{2t}}{\mu_2} \end{cases}$$

$$\mu_1 \simeq \mu_2 \simeq 1$$

Consideriamo il caso in cui il campo elettrico stia oscillando parallelamente al piano di incidenza (fig 22). Le relazioni per E e B rispettivamente diventano:

$$E_{i\parallel} \cos \theta_i = E_{r\parallel} \cos \theta_r + E_{t\parallel} \cos \theta_t$$

$$B_{i\perp} + B_{r\perp} = B_{t\perp}$$

dove  $\theta_i, \theta_r$  e  $\theta_t$  sono gli angoli incidente, riflesso e rifratto. Per la legge di riflessione  $\theta_i = \theta_r$ .

Tenendo conto delle relazioni tra i campi

$$|B| = n |E|$$

e delle equazioni precedenti, si ottengono dunque i coefficienti di riflessione e trasmissione per le ampiezze nel caso di polarizzazione parallela al piano di incidenza:

$$r_{\parallel} = \frac{E_{r\parallel}}{E_{i\parallel}} = \frac{n_2 \cos \theta_i - n_1 \cos \theta_t}{n_2 \cos \theta_i + n_1 \cos \theta_t}$$

$$t_{\parallel} = \frac{E_{t\parallel}}{E_{i\parallel}} = \frac{2n_1 \cos \theta_i}{n_2 \cos \theta_i + n_1 \cos \theta_t}$$

Nel caso in cui il campo elettrico sia perpendicolare al piano di incidenza, ricaviamo allo stesso modo i coefficienti:

$$r_{\perp} = \frac{n_1 \cos \theta_i - n_2 \cos \theta_t}{n_1 \cos \theta_i + n_2 \cos \theta_t}$$

$$t_{\perp} = \frac{2n_1 \cos \theta_i}{n_1 \cos \theta_i - n_2 \cos \theta_t}$$

Combinando queste relazioni con la legge di Snell e passando dalle ampiezze alle intensità, otteniamo la *riflettanza* (coefficiente di intensità di riflessione) come quadrato del coefficiente di riflessione per le ampiezze:

$$R_{\perp} = \frac{\sin^2(\theta_i - \theta_t)}{\sin^2(\theta_i + \theta_t)}$$

$$R_{\parallel} = \frac{\tan^2(\theta_i - \theta_t)}{\tan^2(\theta_i + \theta_t)}$$

Si vede quindi che, nel caso di un'onda polarizzata parallelamente al piano di incidenza, il secondo termine dell'equazione precedente svanisce quando  $\theta_i + \theta_t = \pi/2$  poichè il denominatore diventa infinito.

L'angolo per il quale questo accade è detto angolo di Brewster  $\theta_B$ .

Esso può essere calcolato servendosi della legge di Snell come  $\theta_B = \arctan n_2/n_1$ .

A tale angolo la componente della radiazione parallela al piano di incidenza, se esiste, viene dunque "ammazzata" nell'interazione con l'interfaccia, mostrando un minimo nell'intensità dell'onda riflessa che sarà totalmente polarizzata perpendicolarmente al piano di incidenza (polarizzata tipo s).

Questo implica che nel caso in cui la radiazione sia completamente polarizzata su tale piano, in corrispondenza dell'angolo riflesso  $\theta_B$  non ci sarà onda riflessa e si parlerà anche di *rifrazione totale*.

Per la conservazione dell'energia si avrà infatti un massimo di intensità nella radiazione rifratta.

Questi due fenomeni suggeriscono dunque due possibili strade per la determinazione dell'angolo di Brewster, una volta nota la polarizzazione della radiazione incidente.

Data la differenza profonda tra le strutture di un apparato a microonde ed uno ottico e le diverse caratteristiche di propagazione, abbiamo cercato di arrivare alla misura dell'angolo di Brewster utilizzando entrambi i metodi osservando poi quale procedimento fosse più adatto e perché.

La prima misurazione è stata eseguita nel visibile a  $\lambda = 670$  nm utilizzando il fascio di un laser a diodo di 0,8 mW parzialmente polarizzato e un polarizzatore a calcite con asse di polarizzazione indicato e regolabile.

Abbiamo fatto incidere il fascio su una piccola lastra di vetro di circa un millimetro di spessore posta su un goniometro con mezzo grado a divisione in modo tale che i due potessero ruotare solidalmente. Il motivo per cui si è scelta una tale geometria è per realizzare alla scala del visibile un sistema analogo a quello che si descriverà nel caso delle microonde.

Successivamente si è usato anche un prisma di vetro per eliminare l'effetto di doppia riflessione che si ha usando una lastra a facce parallele.

Il fascio laser e il polarizzatore sono stati allineati con la normale alla lastra nel punto dell'asse di rotazione e per intercettare i raggi riflesso e rifratto misurare la loro intensità è stato utilizzato un fotorivelatore a diodo connesso ad un amperometro digitale.

Per conoscere l'asse di polarizzazione della sorgente laser ci siamo serviti del riferimento del polarizzatore cercando il punto di estinzione del segnale corrispondente all'incrocio degli assi.

Ruotando il polarizzatore e cambiando meccanicamente la posizione del diodo, sono state eseguite misure di intensità in riflessione al variare dell'angolo di incidenza prima con luce polarizzata tipo p e poi tipo s.

Nel primo caso lo scopo è stato di osservare una scomparsa del segnale in prossimità dell'angolo di Brewster e nel secondo verificare se ci fosse un adattamento delle misure con l'andamento previsto dalle equazioni di Fresnel (figur 26 [7]).

Graficando le misure effettuate nel caso del prisma abbiamo ottenuto una buona verifica di queste relazioni e anche il valore atteso per l'angolo di Brewster, che per il vetro è circa  $56^\circ$  ( $n \simeq 1,5$ ) è risultato proprio vicino al minimo trovato per l'onda incidente polarizzata tipo p (figura 24).

Analogamente si è verificato un buon accordo con l'andamento atteso per la riflettanza nel caso di polarizzazione tipo s dell'onda incidente (figura 23).

Riflettanza vs angolo di incidenza per polarizzazione tipo s

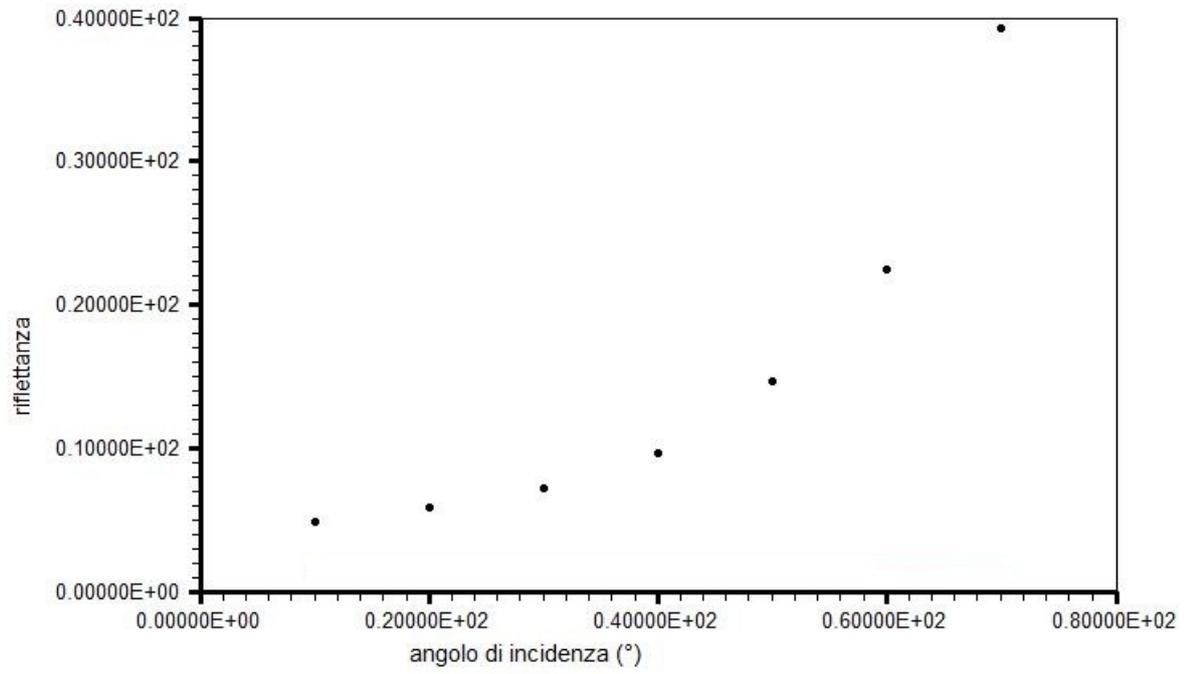


Figura 23:

riflettanza vs. angolo di incidenza

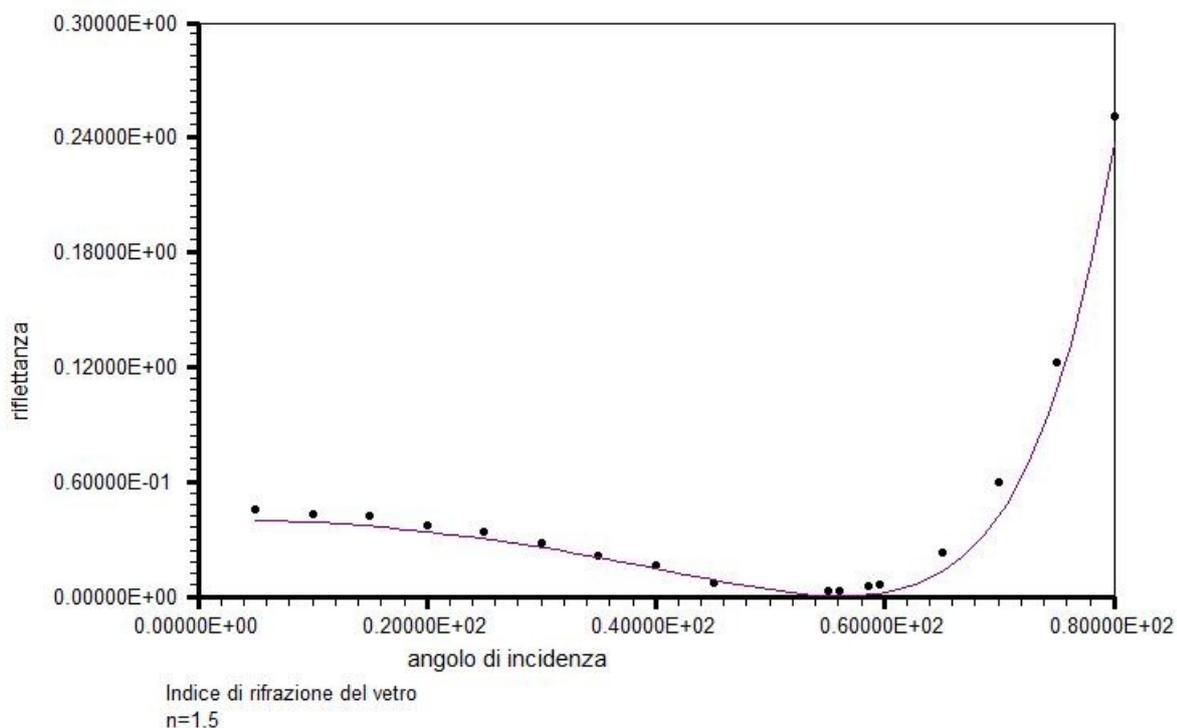


Figura 24:

Per il caso della polarizzazione tipo p i dati risultano adattarsi alla relazione di Fresnel per la riflettanza con coefficiente di correlazione  $R^2 = 0,995$ .

L'indice di rifrazione, inserito come parametro della curva, è risultato pari a  $1,50 \pm 0,03$ . Il valore è quello che ci aspettiamo per il vetro.

Il minimo della curva è infatti intorno ad un angolo di  $56,3^\circ \simeq \theta_B$ .

E' interessante però notare che in questo caso la sola sensibilità dell'occhio è bastata per identificare  $\theta_B$  quando ci si metta in condizioni di sufficiente buio.

Abbiamo provato quindi ad usare una sorgente estesa di luce non polarizzata per provare ad indentificare senza rivelatore un minimo di intensità in riflessione in corrispondenza dell'angolo di Brewster, intercettando il raggio su un pannello di materiale dispersivo.

Il minimo è effettivamente percepibile ad occhio e la prova che ci si trovasse proprio a  $\theta_B$  è stata intercettare il raggio riflesso con un polarizzatore.

Ruotando l'asse di polarizzazione è risultato infatti che tale fascio si fosse polarizzato in riflessione.

Come previsto dalle relazioni di Fresnel, ci siamo proposti di misurare anche le intensità in rifrazione per verificare se le osservazioni fossero altrettanto efficaci.

Tuttavia la traslazione del fascio dovuta all'attraversamento della lastra di vetro non ci ha permesso di avere un buon allineamento degli oggetti utilizzati fornendo una misura meno efficace sia dal punto di vista numerico sia didattico e intuitivo.

Nel caso del prisma tale misura non è stata nemmeno valutata per i fenomeni di riflessioni e rifrazioni multiple al suo interno.

Siamo dunque passati a svolgere l'esperienza con l'apparato a microonde.

Ci si potrebbe aspettare che il metodo migliore per identificare l'angolo di Brewster sia anche in questo caso effettuare misure in riflessione.

In questo caso la misura è stata effettuata scegliendo come superfici oggetti di diverso materiale e dimensioni: inizialmente si è utilizzato un blocco di polietilene ( $n = 1,5$  per 10 GHz) di superficie di  $18 \times 15,5$  cm e spessore 2,5 cm fornito dalla PASCO; successivamente abbiamo scelto una lastra trasparente di acrilico di superficie maggiore (50 cm di lato circa) e spessore di 0,5 cm. Gli oggetti sono stati montati sul goniometro e, per intercettare il fascio riflesso (quindi un picco del segnale) al variare dell'angolo di incidenza, il ricevitore è stato mosso rigidamente intorno alla regione in cui ci si aspetta la riflessione.

Come si è detto, la propagazione in microonde non avviene però in un fascio collimato tale da poterne identificare un'unica direzione, bensì secondo una distribuzione nello spazio descritta dal cosiddetto diagramma di radiazione, che presenta un massimo in direzione del lobo principale.

Durante le rotazioni rigide del ricevitore si è identificato di volta in volta tale massimo, intorno al quale si sono osservati vari picchi minori.

Grazie alla possibilità di ruotare facilmente le antenne e quindi l'asse di polarizzazione, abbiamo poi eseguito per ogni angolo la misura in entrambe le polarizzazioni, tipo p e tipo s.

Per il blocco di polietilene ci saremmo aspettati, nel caso di polarizzazione s, di identificare un determinato angolo per cui il segnale si annullasse e che questo fosse simile a quello misurato per il vetro nel caso della luce, essendo simili gli indici di rifrazione.

Tuttavia la grande dispersione del fascio e la piccola superficie del blocco non hanno consentito di leggere il segnale riflesso per angoli di incidenza maggiori di  $55^\circ$ , oltre il quale la lettura raggiunge molto rapidamente il fondoscala (figura 25).

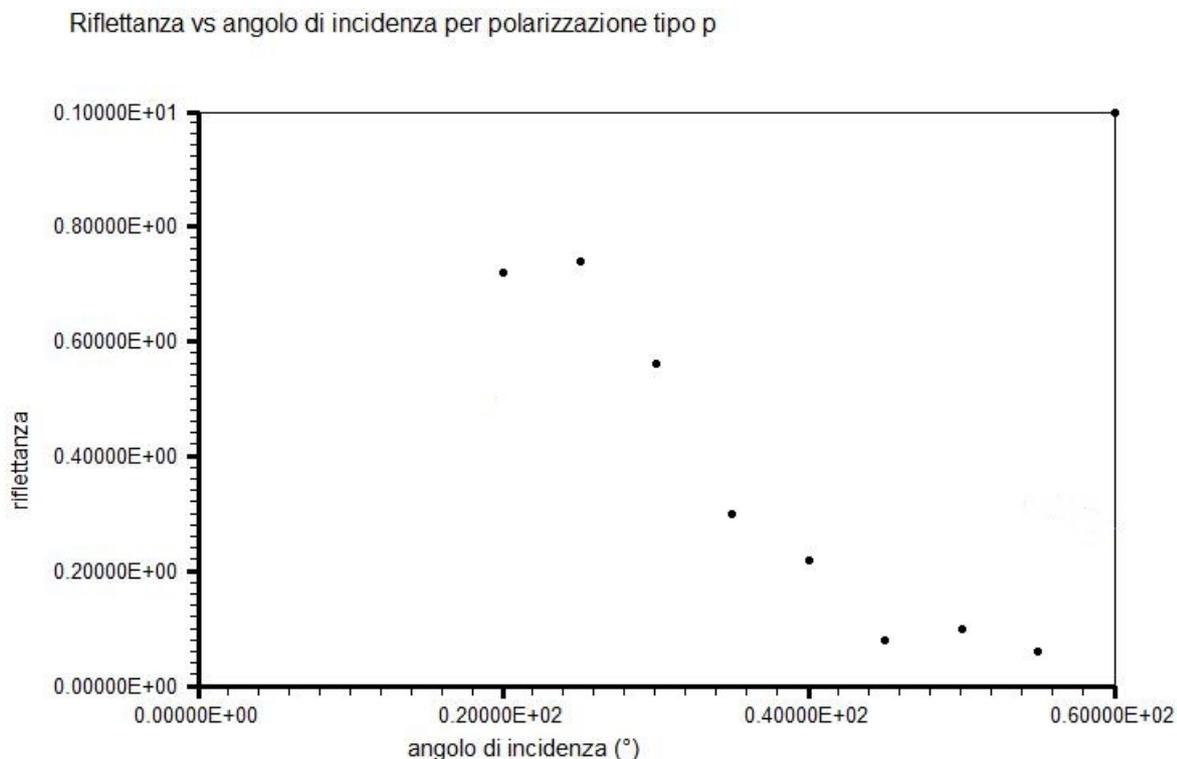


Figura 25: Riflettanza vs angolo di incidenza di microonde su blocco di polietilene per un'onda polarizzata tipo p

La situazione è molto migliorata utilizzando la lastra dove ci siamo potuti fermare ad angoli di circa  $70^\circ$ , oltre il quale il ricevitore inizia a intercettare il fascio proveniente direttamente dal trasmettitore e non solo riflesso dalla superficie.

In questo caso però l'indice di rifrazione della lastra, maggiore rispetto a quello del polietilene, ci fornisce un valore dell'angolo di Brewster vicino ai  $65^\circ$ .

Siamo stati quindi in grado di identificare un minimo del segnale ma è stato possibile registrare solo poche misure intorno ad esso.

E' chiaro che le caratteristiche dell'apparato a microonde non consentono di utilizzare una procedura analoga a quella utilizzata nel caso della luce.

Eseguendo la misura in rifrazione invece, ponendo cioè trasmettitore e ricevitore l'uno di fronte all'altro e ruotando gli oggetti sul goniometro per cambiare l'angolo di incidenza, abbiamo osservato chiaramente un massimo del segnale in prossimità dell'angolo atteso sia nel caso del polietilene sia della lastra.

Riportiamo solo i valori di tale massimo, confrontati con le due posizioni estreme, in cui le superfici sono normali o parallele alla direzione del fascio.

Blocco Polietilene ( $n = 1,5$ )		Lastra di Acrilico ( $n \simeq 2,3$ )	
$\theta(\pm 1^\circ)$	L( $\pm 0,02$ )	$\theta(\pm 1^\circ)$	L( $\pm 0,02$ )
0 (normale al fascio)	0,20	0 (normale)	0,68
53	0,51	67	0,92
90 (parallelo al fascio)	0,22		

Dunque nel caso dell'ottica abbiamo un fascio ben collimato per eseguire misure angolari molto precise ma la risposta dell'apparato risulta molto influenzata dal rumore di fondo, da piccole vibrazioni o movimenti esterni; nel caso delle microonde la figura di radiazione non può certo essere approssimata ad un raggio monodirezionale e le onde stazionarie che si creano fra trasmettitore e ricevitore rendono la misura fortemente dipendente dalla distanza tra i due.

Tuttavia la minore influenza dell'ambiente esterno sulla misura ci permette di essere meno precisi nelle variazioni che operiamo sul sistema e di avere maggior controllo qualitativo su ciò che stiamo misurando e sulle caratteristiche del sistema stesso.

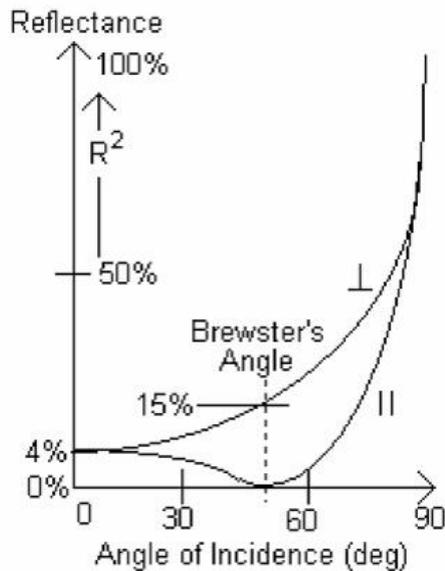


Figura 26: Riflettanza in funzione dell'angolo di incidenza

## CONCLUSIONI

Il lavoro svolto in laboratorio, così come le riflessioni sui metodi didattici, sulle soluzioni ai problemi concettuali comuni riscontrati nello studio delle onde elettromagnetiche, sono prevalentemente indirizzate ad un pubblico di insegnanti più che di studenti, in primo luogo di scuole ma riteniamo sia utile fare delle riflessioni sul modo in cui l'insegnamento di alcune materie di base venga concepito anche in ambito universitario.

Alla luce del nostro lavoro, la divisione netta tra teoria e lavoro di laboratorio sembra a volte priva di senso: l'esperienza e l'osservazione delle caratteristiche e delle risposte dello strumento, dei suoi limiti e delle sue possibilità e della sua interazione con i materiali, ci hanno portato a un continuo "dialogo" fra modello teorico e sua applicazione nella realtà fisica, tra aspetto formale e osservazione qualitativa di un fenomeno.

Questo continuo passare da previsione a osservazione a nuove previsioni ha permesso un' "autoanalisi" sull'apprendimento e sul modo comune di assimilare alcuni concetti.

Basandoci su studi presenti in letteratura si può concludere che il problema di investigare alcuni tratti comuni nella comprensione di alcuni argomenti di fisica è stato spesso affrontato e si sono cercate delle strade per cercare di risolvere i problemi alla base di queste lacune.

I metodi tuttavia non ci sono sembrati sempre condivisibili poiché spesso risolvere il problema della comprensione è confuso con il risolvere il problema del rendimento degli studenti e non riteniamo che le cose debbano necessariamente coincidere.

Imparare a risolvere gli esercizi che vengono proposti in ambito didattico non significa sempre padroneggiare i concetti che sono alla base dei fenomeni coinvolti.

Riteniamo sia un "falso successo" che un lavoro si limiti a far superare dei test alla maggior parte degli studenti con risultati positivi.

E le stesse attività di laboratorio, indispensabili per acquisire competenze sperimentali, andrebbero a nostro avviso integrate con esplorazioni attive della fenomenologia, necessariamente anche qualitative ma potenziate con l'uso di risorse di calcolo e di simulazioni interattive al fine di favorire la comprensione di concetti e lo sviluppo di competenze nella padronanza dei modelli interpretativi. Nel tentativo di capire come coniugare, nell'interpretazione dei fenomeni legati alla radiazione elettromagnetica, la coerenza dei modelli proposti dalla teoria con descrizioni fenomenologiche a livello microscopico (si pensi agli stimoli esemplari offerti da Feynman) abbiamo interagito con alcuni docenti e ricercatori del Dipartimento che ci hanno offerto chiavi di lettura e visioni a volte diverse, a volte complementari. In ogni caso molto stimolanti e non presenti nei libri di fisica di base. Pensiamo che questo lavoro-confronto potrebbe essere di grande stimolo per la rivisitazione del modo di insegnare la fisica.

## Riferimenti bibliografici

- [1] C. Mencuccini e V. Silvestrini, *FISICA II Elettromagnetismo Ottica*, Liguori Editore, Napoli (1999);
- [2] R. Feynman, R. Leighton, M. Sands, *The Feynman Lecturers on Physics Volume I - Part 2*, Addison-Wesley Publishing Company (1963);
- [2] F.S. Crawford, *La Fisica di Berkley Onde e Oscillazioni*, Zanichelli, Bologna (1972);
- [3] B. S. Ambrose, P. R. L. Heron, S. Vokos, and L. C. McDermott, *Student understanding of light as an electromagnetic wave: Relating the formalism to physical phenomena*, Am. J. Phys. 67, 891 (1999);
- [4] *Instruction Manual and Experiment Guide for the PASCO scientific Model WA-9314B, MICROWAVE OPTICS*, PASCO Roseville, CA 95747 USA;
- [5] S. Bobbio e E. Gatti, *Elettromagnetismo. Ottica*. Bollati Boringhieri, Torino (1991);
- [6] K. Chandrasekhara Reddy and D Sailaja, *Experimental verification of Fresnel's equations for reflections of electromagnetic waves*. Department of Physics, S.S.B.N.Degree & P.G. College (Autonomous), Anantapur-515001.A.P. INDIA;
- [7] PHYWE series of publications • Laboratory Experiments • Physics • © PHYWE SYSTEME GMBH , *Fresnel's equations - theory of reflection* <http://www.phywe.com/461/pid/26333>;