

## Lezione 08

# Sorgenti di Interferenza Radiata

Stefano Selleri

Dipartimento di Elettronica e Telecomunicazioni  
Università di Firenze



## Sommario della Lezione

- ❖ Introduzione
- ❖ Disturbi Radiati
- ❖ Disturbi “naturali” Fulmine, NEMP, Scarica elettrostatica
- ❖ Cella TEM

## Introduzione

Abbiamo già diviso i disturbi in *condotti* e *radiati*. Le sorgenti di interferenza possono essere suddivise in modo analogo.

Il disturbo *condotto* è legato a delle correnti o tensioni di disturbo veicolate dai cavi di connessione dell'apparato. La classe principale di questi disturbi è quella legata ai cavi di alimentazione, per cui la fonte principale di disturbi condotti è la rete elettrica.

Il disturbo *radiato* è invece legato a campi elettromagnetici che inducono correnti e tensioni di disturbo sulle parti non appropriatamente schermate del dispositivo.

È intuitivo come gli spettri di queste due classi di disturbi siano diversi.

## Disturbi radiati

I disturbi radiati si dividono in

- ❖ **Intenzionali** – ovvero segnali generati intenzionalmente da sistemi di radiocomunicazione che però si comportano come interferenze nei confronti di apparati vittima. (Stazioni radio, TV, telefonia mobile etc.)
- ❖ **Non intenzionali** – disturbi che provengono da dispositivi ad alta frequenza che non prevedono trasmissione a distanza ma nei quali l'energia a radiofrequenza dovrebbe essere confinata all'interno. (forni a microonde, circuiti riceventi di TV etc.)
  - ❖ Come sottoclasse dei radiatori non intenzionali distinguiamo quelli a **radiazione incidentale**, in cui l'energia na RF è presente ma indesiderata (motori elettrici, motori a scoppio, lampade fluorescenti).
- ❖ **Naturali** – Fulmini, saette etc.

## Fulmini

Un fulmine è una scarica elettrica in atmosfera al seguito della differenza di potenziale accumulata fra le nuvole o fra le nuvole e il suolo.

Quando la differenza di potenziale, e di conseguenza il campo elettrico, superano una determinata soglia (livello di breakdown) gli atomi dell'atmosfera si ionizzano e formano un canale di ioni fra i due punti a potenziale diverso dell'ordine di  $10^8$  V.

Il canale ionico è conduttivo e attraverso esso si scarica il fulmine.

La formazione del canale avviene per passi discreti di durata circa  $1\mu\text{s}$  ad intervalli di  $50\mu\text{s}$  ed è visibile come una serie di flash luminosi (*stepped leader*).

Il canale nasce dalla nuvola e scende verso il suolo, contemporaneamente si apre un canale dal suolo verso l'alto. I canali si incontrano a circa 30 m dal suolo. Costruito il canale completo vi è un forte flusso di cariche (*return stroke*) con un picco di circa 30kA (si calcola che nel 10% dei casi si arrivi anche a 40kA e, nell'1% dei casi, addirittura a 100kA).

## Fulmini

Il modello del fulmine ai nostri fini è quello di un filo di corrente verticale di sezione trascurabile.

Nel caso di scarica fra nuvole il fulmine può essere invece meglio modellato come un filo orizzontale.

I due modelli differiscono essenzialmente solo per la polarizzazione del campo radiato.

Il modello semplificato dell'impulso di corrente del fulmine è quello dato da un sigolo impulso triangolare.

Tempo di salita:  $\tau_s = 500\text{ns}$

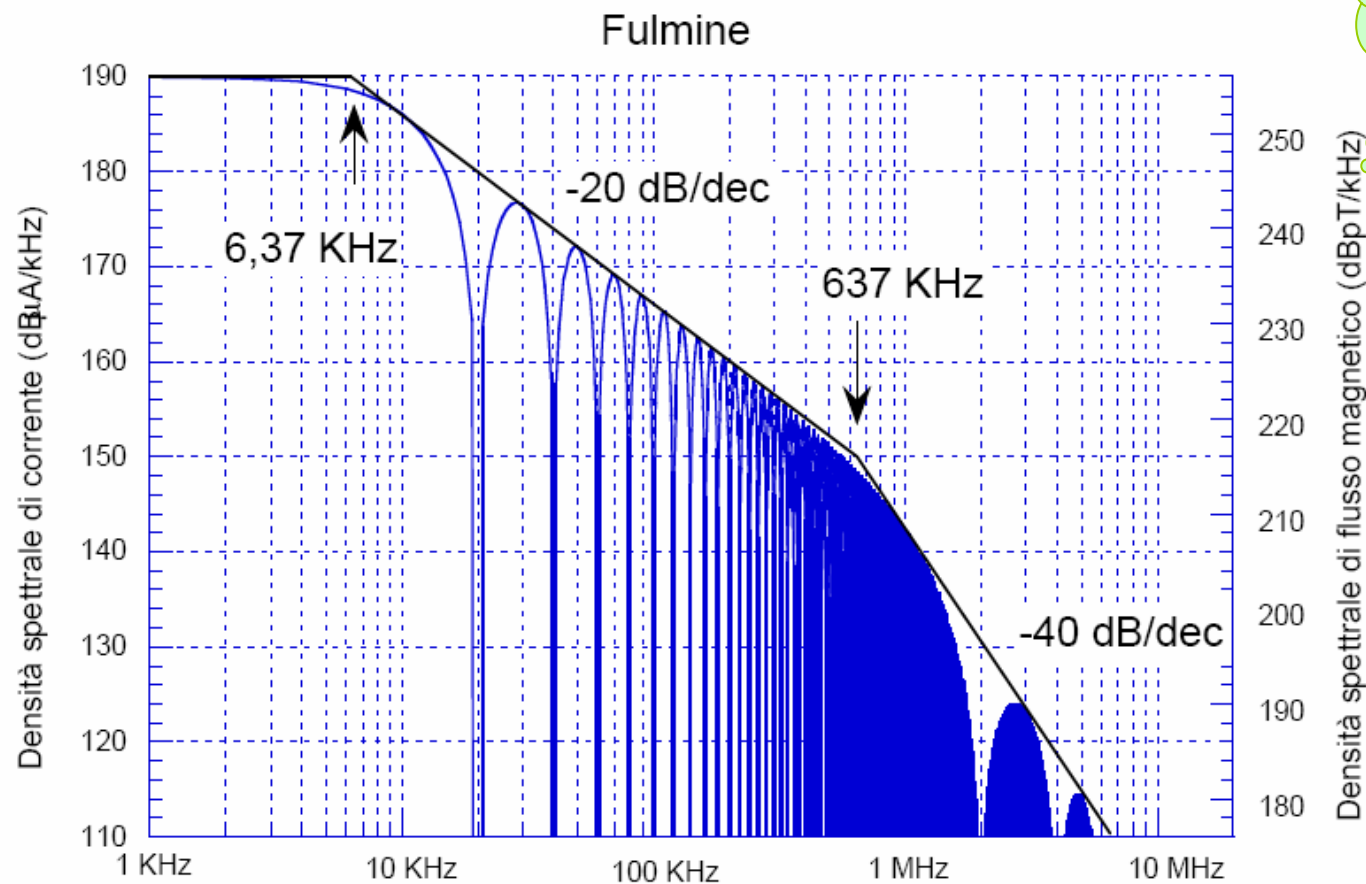
Durata:  $\tau = 50\mu\text{s}$

Picco: 30kA

## Fulmini

In questo modello prima del primo ginocchio la densità spettrale di potenza dell'involuppo è

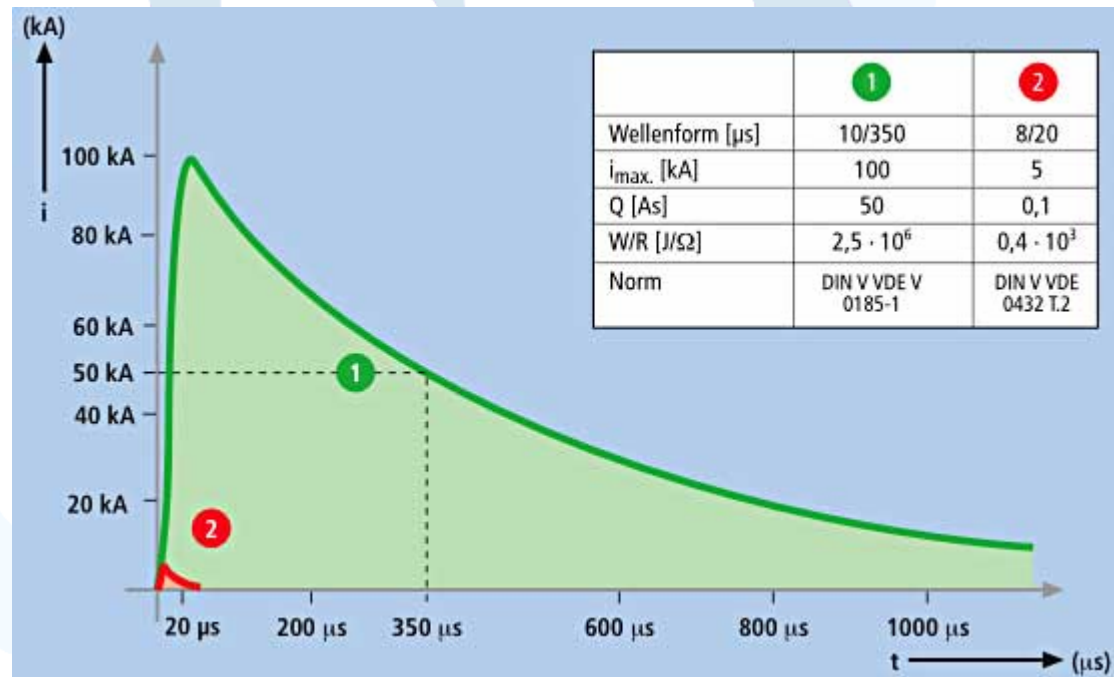
$$2\tau A \cong 3 \text{ A/Hz} = 3 \text{ kA/kHz} = 190 \text{ dBmA/kHz}$$



## Fulmini

Se quindi l'apparecchio *può* essere colpito *direttamente* dal fulmine deve sopportare una corrente di tipo "1"

Se invece il dispositivo *non è interessato direttamente* dal fulmine allora si testa per correnti indotte di tipo "2"

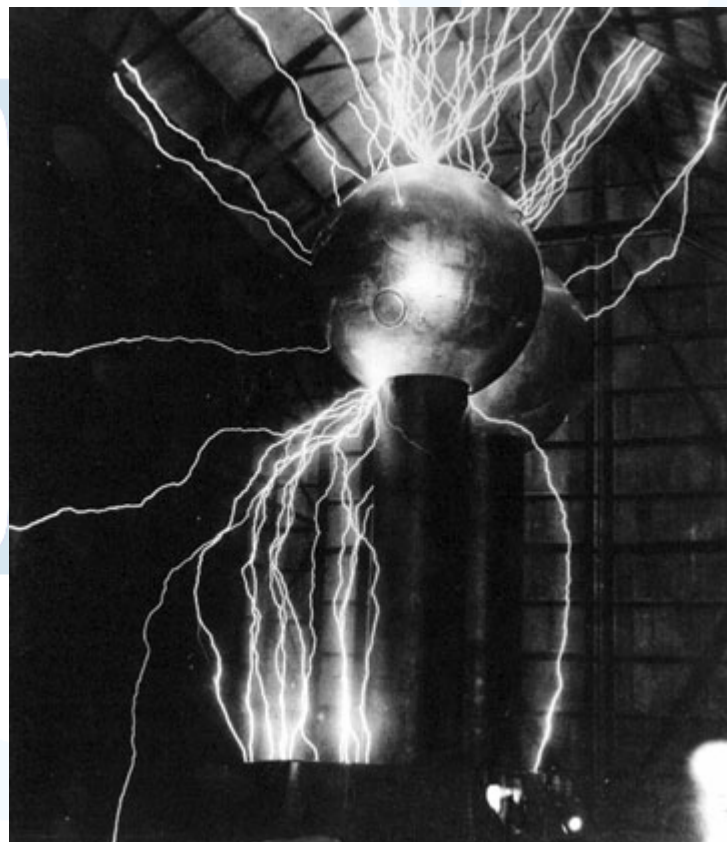




## Fulmini

Per generare artificialmente i fulmini si può fare qualcosa...

Un generatore di Van der Graaf è una macchina elettrostatica in grado di caricare una sfera fino a portarla a una tensione sufficiente da creare il canale ionico nell'aria



## Fulmini

Ricordiamo che la rigidità dielettrica dell'aria (secca) è  $3\text{kV/mm}$  e quindi  $3\text{MV/m}$ , anche se sperimentalmente può bastare anche solo  $0.5\text{MV/m}$  in condizioni "ottime". Il primo modello, da  $80\text{kV}$  creava scariche di qualche centimetro. Ben presto si arrivò a  $5\text{MV}$

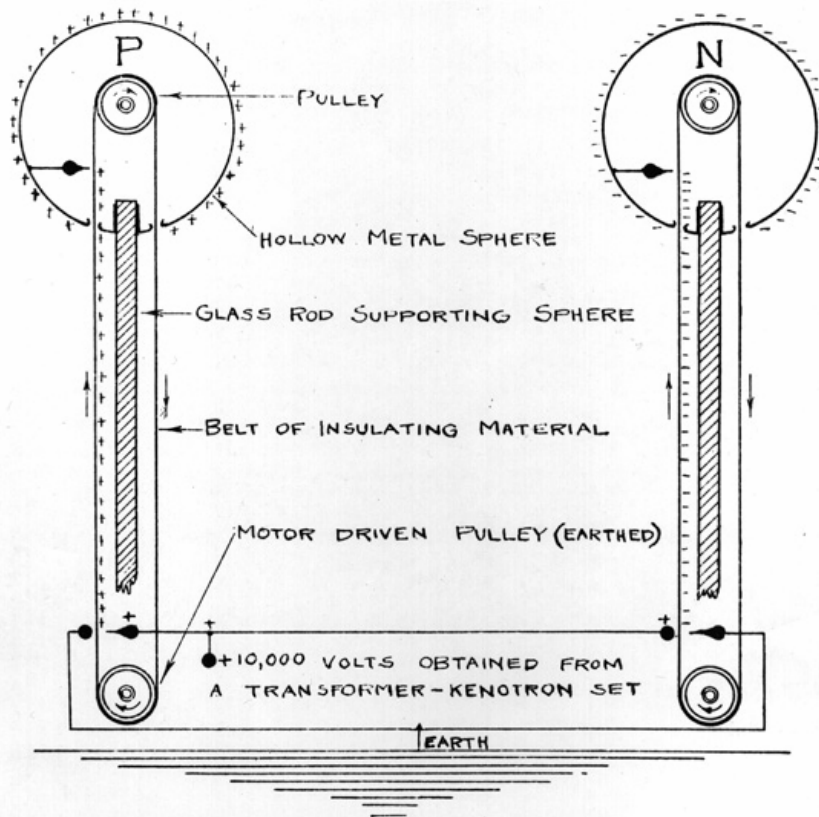
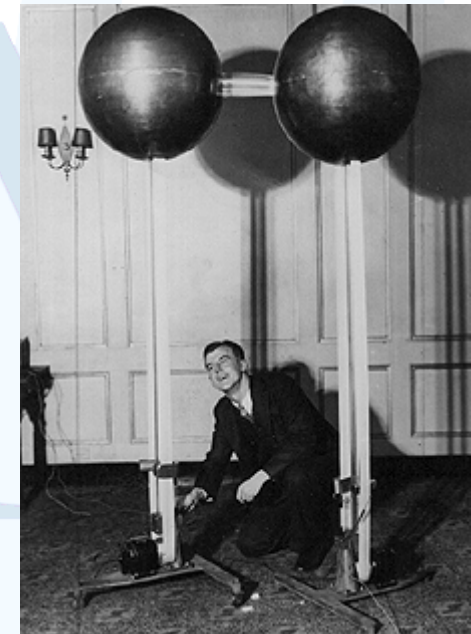


DIAGRAM OF FIRST GENERATOR

©MIT Museum All rights reserved



## Fulmini

Attualmente i generatori di Van der Graaf arrivano a 25-30MV, abbastanza per fulmini artificiali da più di 10m.

Disgraziatamente questi fulmini sono belli a vedersi ma hanno correnti di decine o centinaia di *micro* Ampere... quindi generano poca energia e relativamente poco rumore.

Un'altra tecnica è quella delle bobine di Tesla, in pratica un trasformatore con un secondario con tantissime spire, ma il risultato è sempre quello di una scarica di potenza ridotta.

Per generare un fulmine artificiale sarebbe necessario avere qualche MV e qualche kA, cosa non praticabile.

È però possibile “scalare” il tutto riducendo i V e gli A in proporzione (e quindi anche le lunghezze della scarica e la distanza fra scarica e dispositivo

## Fulmini

Il problema resta quello di generare la scarica in aria, ovvero rompere la rigidità dielettrica

Una possibilità è quella di tendere un filo sottile in aria. Una volta che si applica la tensione (comunque elevata) il filo si vaporizza e la scarica risulta breve e intensa

Altrimenti si può utilizzare un laser impulsato [Laser da 5TW su 100fs] per ionizzare un canale in aria e fare così scaricare lungo di esso una differenza di potenziale di anche soli 1 o 2 MV



**FILAMENT OF FIRE:** The Teramobile laser [left] shoots pulses from a shed to the space between an electrode charged by a generating tower and a grounded electrode [not shown]. The pulse ionizes the air, creating a conductive filament. Artificial lightning follows the filament's straight path [below].



## Fulmini

Il problema è che la durata (brevissima) dell'impulso laser non consente di ionizzare canali più lunghi di 10m.

In realtà lo scopo finale di questa ricerca è controllare i fulmini. Fare scaricare le nubi temporalesche, soprattutto in corrispondenza degli aeroporti, in modo controllato.



## Fulmini



## Fulmini



Per quanto riguarda Ritorno al Futuro pare ci vogliano 1.21GW per effettuare il viaggio nel tempo.

100MV e 30kA del fulmine classico sarebbero anche 2TW

Però dura *solo* 350 $\mu$ s

Sarebbe più corretto quindi parlare di energia e non di potenza, per il viaggio nel tempo

## NEMP

Tra i vari effetti devastanti di un'esplosione nucleare vi è il danno agli apparati elettronici legato non all'onda d'urto e neppure al calore, ma alla generazione di un impulso elettromagnetico detto *Nuclear Electromagnetic Pulse* (NEMP)

L'esplosione nucleare, a differenza di quelle convenzionali, produce fotoni nel campo dei raggi  $\gamma$ .

Questi interagiscono con le molecole dell'aria, liberando elettroni ad alta energia (effetto Compton)

Questi elettroni ad alta energia, e quindi molto veloci, sono sorgenti di un intenso campo elettromagnetico e generano, urtando le molecole, successive generazioni di elettroni liberi.

La generazione di questi elettroni liberi determina una conducibilità nell'aria e di conseguenza la corrente e la durata dell'impulso NEMP.



Si ritiene che una bomba atomica da 1Mton, che esplode a una quota inferiore a 2km generi a 1,6km dall'esplosione un picco di campo elettrico pari a 100kV/m e campi magnetici associati dell'ordine di 260A/m.

Per bombe atomiche appositamente costruite fatte esplodere in quota superiore ai 40km gli effetti sono analoghi ma si risentono anche fino a 5000 km dal punto di esplosione grazie alla presenza di cariche libere e all'effetto guidante delle linee di forza del campo magnetico terrestre nella ionosfera.

Le caratteristiche del NEMP portano a campi così elevati da poter causare il malfunzionamento permanente di dispositivi, per bruciatura di componenti, surriscaldamento con dissaldatura o cortocircuitazione di piste etc.

Questi problemi sono particolarmente sentiti a livello militare, dove le normative (MIL-STANDARD) definiscono appositi concetti di *hardening*.

Il modello semplificato dell'impulso di corrente del fulmine è quello dato da un sigolo impulso triangolare.

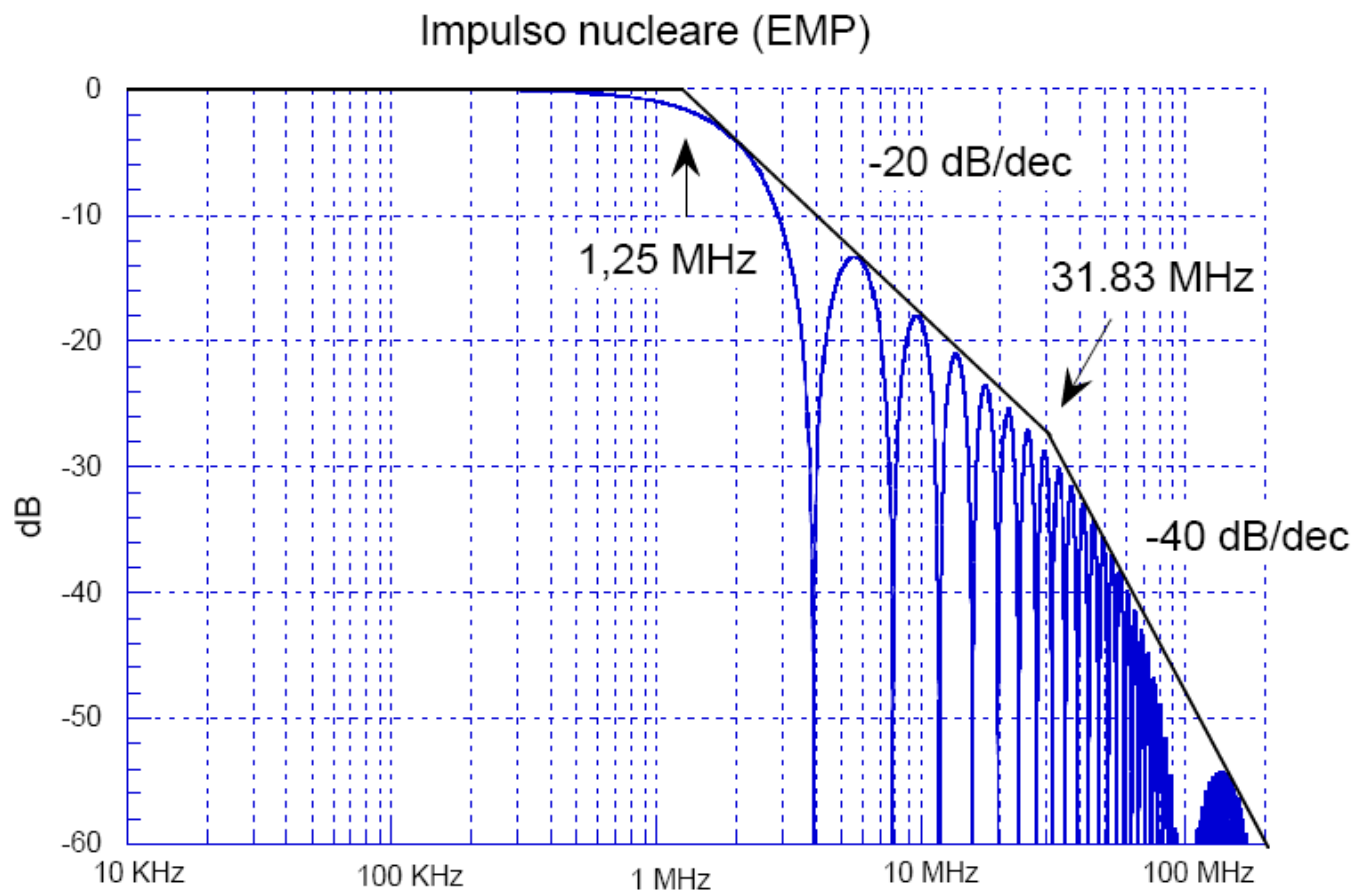
Tempo di salita:  $\tau_s = 10\text{ns}$

Tempo di discesa:  $\tau_f = 500\text{ns}$

Durata:  $\tau = 225\text{ns}$

## NEMP

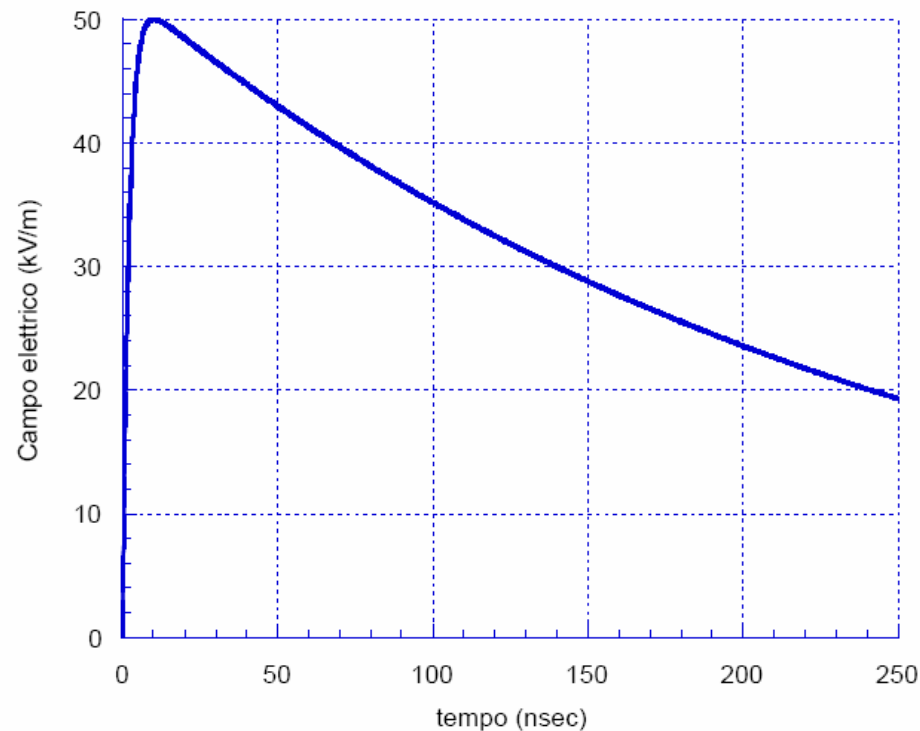
SI noti la maggiore estensione in frequenza rispetto al caso del fulmine.



## NEMP

Modelli più accurati trattano il NEMP come somma di due esponenziali:

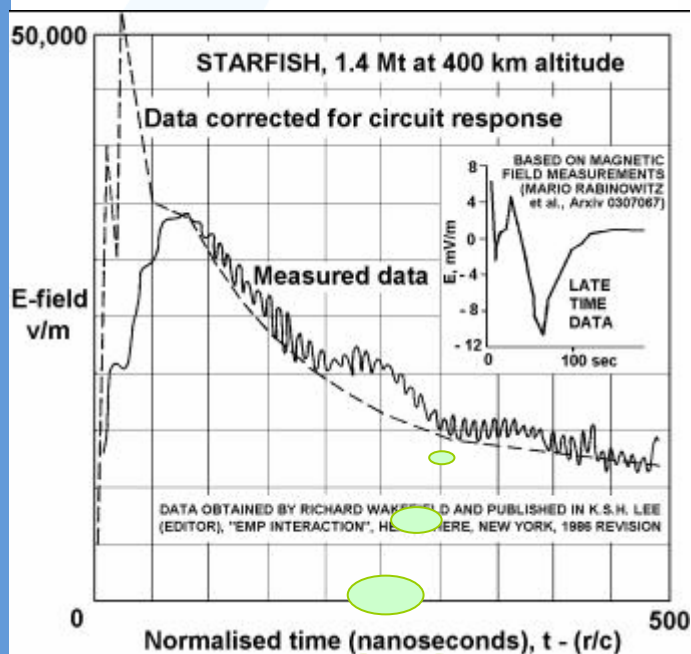
$$e(t) \cong 5.25 \times 10^4 \left[ e^{-4 \times 10^6 t} - e^{-4.76 \times 10^8 t} \right] \text{V/m}$$



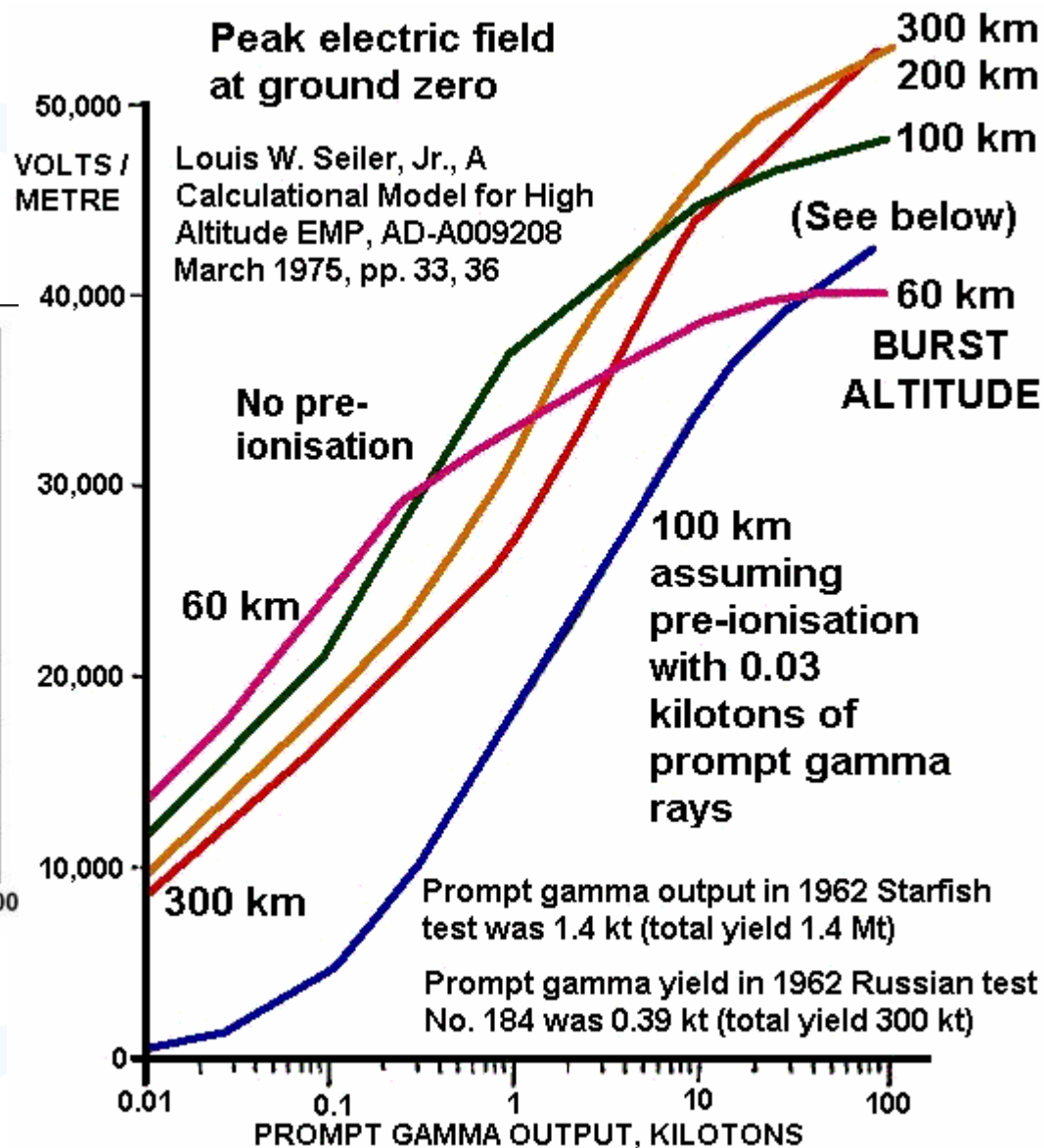
Lo spettro misurato del NEMP ha un massimo intorno ai 100kHz e si estende con effetti sensibili fino al GHz.

# NEMP

Dati dall'esperimento nucleare  
STARFISH, 1962



Il NEMP non ha queste oscillazioni, è una risonanza nello strumento di misura!

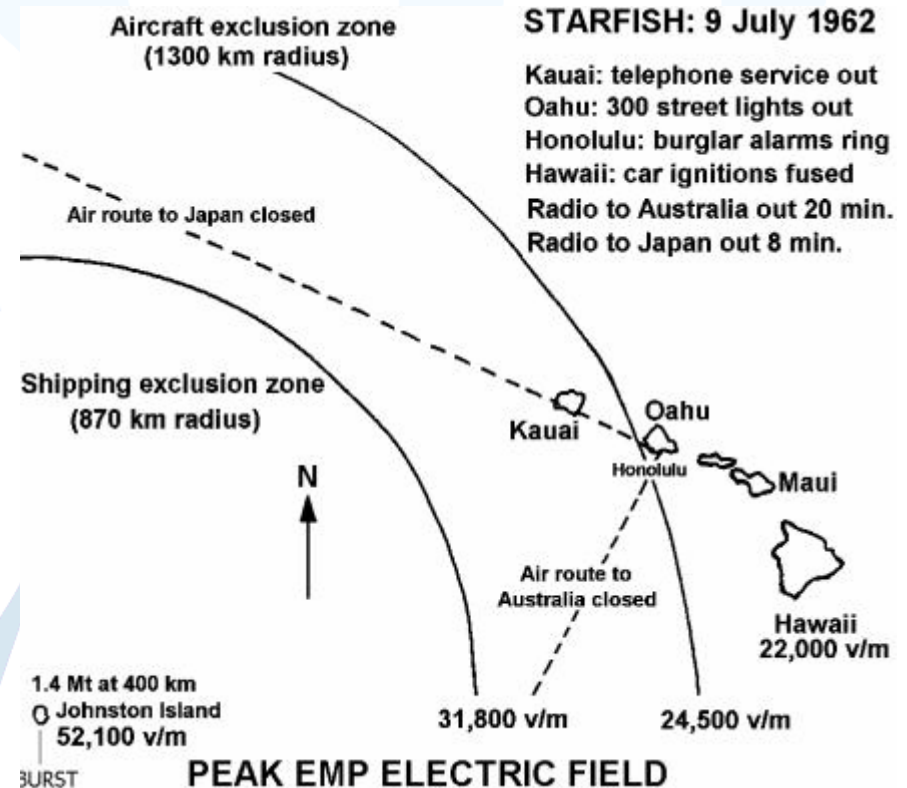


## NEMP

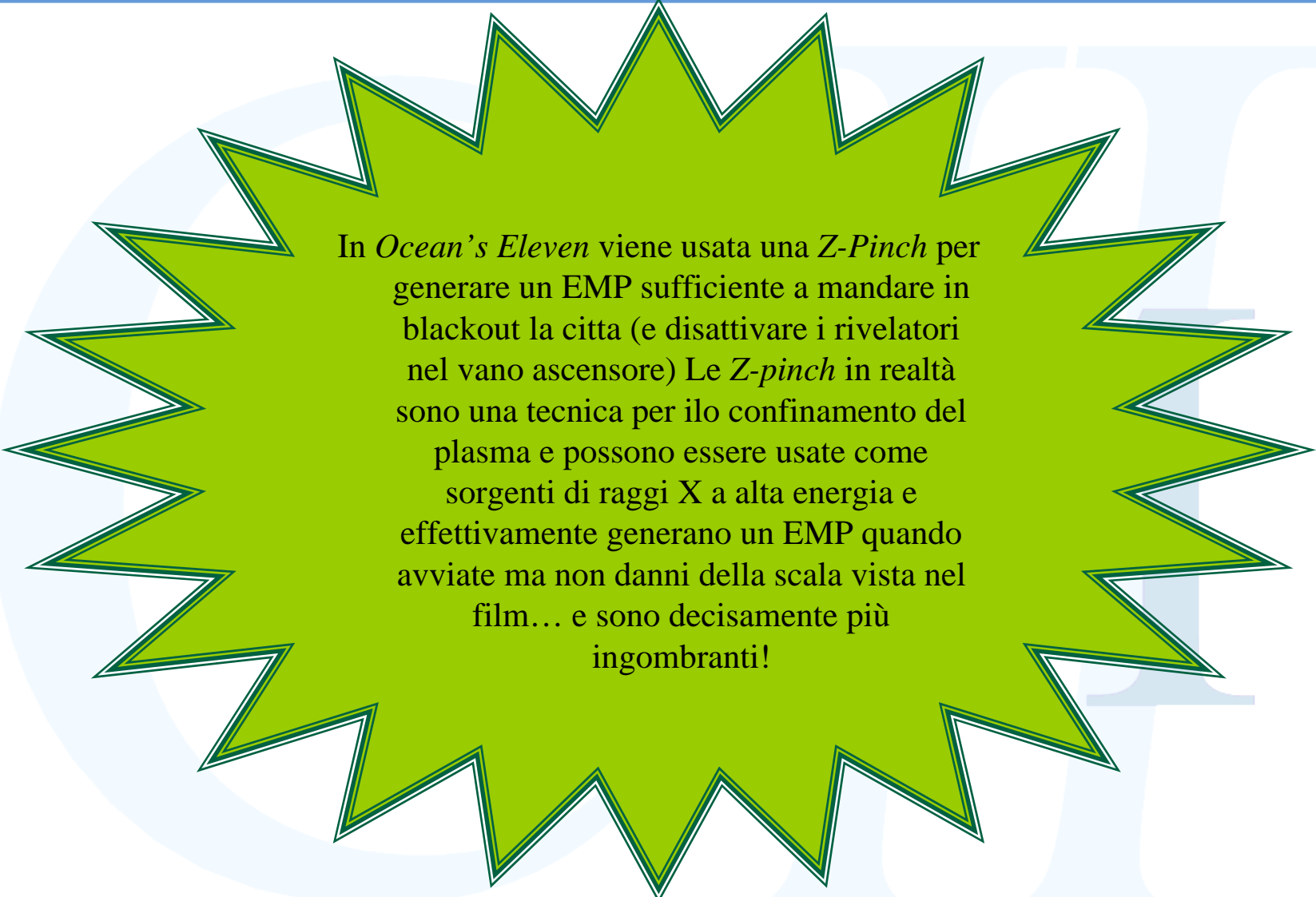
Le correnti indotte fecero saltare i fusibili di trecento lampade per illuminazione stradale a Ohau.

Fecero inoltre scattare centinaia di sistemi di allarme

Sull'isola di Kauai saltarono le linee telefoniche, nonostante le centraline elettromeccaniche degli anni 60 a causa di un componente a microonde.



## Un momento di Pausa



In *Ocean's Eleven* viene usata una *Z-Pinch* per generare un EMP sufficiente a mandare in blackout la città (e disattivare i rivelatori nel vano ascensore) Le *Z-pinch* in realtà sono una tecnica per il confinamento del plasma e possono essere usate come sorgenti di raggi X a alta energia e effettivamente generano un EMP quando avviate ma non danno danni della scala vista nel film... e sono decisamente più ingombranti!

## Scarica Elettrostatica

Una scarica elettrostatica è un fulmine a scala ridotta.

Avviene quando due corpi caricati elettricamente si avvicinano o entrano in contatto, ovvero quando due corpi diversi venuti a contatto si sono scambiati cariche elettriche che, al momento della separazione dei corpi, causano una differenza di potenziale e una scarica.

Se la differenza di potenziale è sufficientemente elevata si ha rottura del dielettrico e una scintilla fra i due corpi.

Se inoltre uno dei due corpi è un conduttore l'arco voltaico che si è creato si richiude attraverso di esso. Se si tratta di un dispositivo elettronico questa corrente può interferire col funzionamento del medesimo.

La scarica elettrostatica (*Electrostatic Discharge* – ESD) è particolarmente critica oggi per perché i dispositivi elettronici, soprattutto i clock, sono particolarmente sensibili ad essa.

I dispositivi a valvole di una volta erano invece particolarmente immuni a questo disturbo.



## Scarica Elettrostatica

Se due corpi neutri vengono in contatto e strofinati, c'è un trasferimento di carica da un corpo all'altro. Alla separazione i due corpi risultano elettricamente carichi di segno opposto.

La quantità di carica scambiata dipende dal materiale. Più due materiali sono distanti nella serie triboelettrica e più intenso è lo scambio di carica.

Altri fattori importanti sono la levigatezza delle superfici, la pulizia delle medesime, l'area di contatto, la pressione e lo sfregamento.

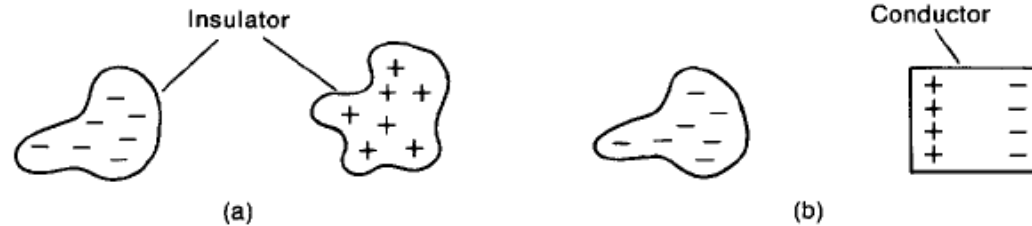
All'atto della separazione i due materiali, se isolanti, restano carichi ma con una modesta carica superficiale e la scarica non avviene

TABLE 11.2 The Triboelectric Series

| <i>Positive</i> |                          |
|-----------------|--------------------------|
| 1               | Air                      |
| 2               | Human skin               |
| 3               | Asbestos                 |
| 4               | Glass                    |
| 5               | Mica                     |
| 6               | Human hair               |
| 7               | Nylon                    |
| 8               | Wool                     |
| 9               | Fur                      |
| 10              | Lead                     |
| 11              | Silk                     |
| 12              | Aluminum                 |
| 13              | Paper                    |
| 14              | Cotton                   |
| 15              | Wood                     |
| 16              | Steel                    |
| 17              | Sealing wax              |
| 18              | Hard rubber              |
| 19              | Mylar                    |
| 20              | Epoxy-glass              |
| 21              | Nickel, copper           |
| 22              | Brass, silver            |
| 23              | Gold, platinum           |
| 24              | Polystyrene foam         |
| 25              | Acrylic                  |
| 26              | Polyester                |
| 27              | Celluloid                |
| 28              | Orlon                    |
| 29              | Polyurethane foam        |
| 30              | Polyethylene             |
| 31              | Polypropylene            |
| 32              | Polyvinyl chloride (PVC) |
| 33              | Silicon                  |
| 34              | Teflon                   |
| <i>Negative</i> |                          |



## Scarica Elettrostatica



Se però l'isolante carico si avvicina a un conduttore questo, che è elettricamente neutro, subisce per induzione una *separazione di cariche* per cui cariche di segno opposto a quelle dell'isolante si addensano nel punto del conduttore più vicino ad esso.

Se il conduttore è a massa o collegato a un altro conduttore le cariche opposte tendono a distribuirsi su quest'ultimo, ottenendo due oggetti conduttori carichi.

Se due oggetti conduttori carichi si avvicinano le cariche opposte tendono ad addensarsi nei punti più vicini dei due conduttori. Ne nasce un campo elettrico intenso e una differenza di potenziale che può portare alla scarica elettrostatica fra i due conduttori.

## Scarica Elettrostatica

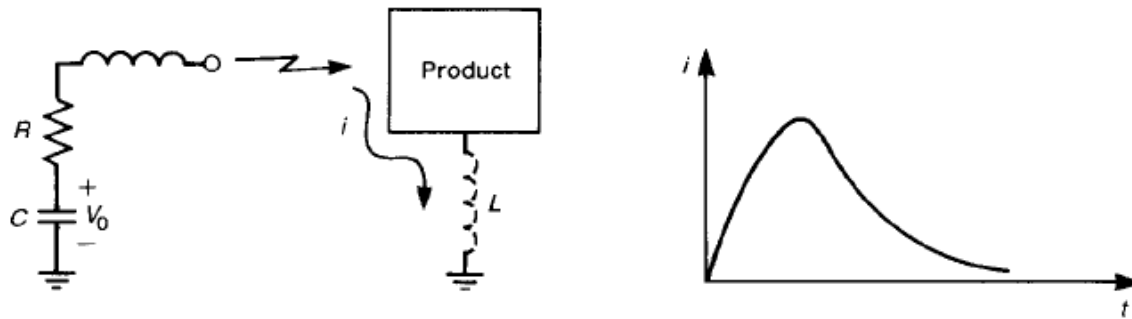
L'esempio classico si ha quando si guida in macchina. Lo sfregamento con il materiale sintetico dei sedili carica il corpo del guidatore (conduttore) di cariche. Se l'aria è secca e le cariche non si disperdono altrimenti scendendo dalla macchina e toccando la carrozzeria (altro oggetto conduttore) si ha una scintilla.

In realtà questo fenomeno avviene assai spesso, camminando su un tappeto o una moquette, mettendosi un maglione etc, solo che le scariche legate a differenze di potenziale inferiori a 3500V *non le sentiamo*

Ciò non toglie che una ESD da 3000V o meno possa essere potenzialmente molto dannosa per un apparato elettronico!

## Scarica Elettrostatica

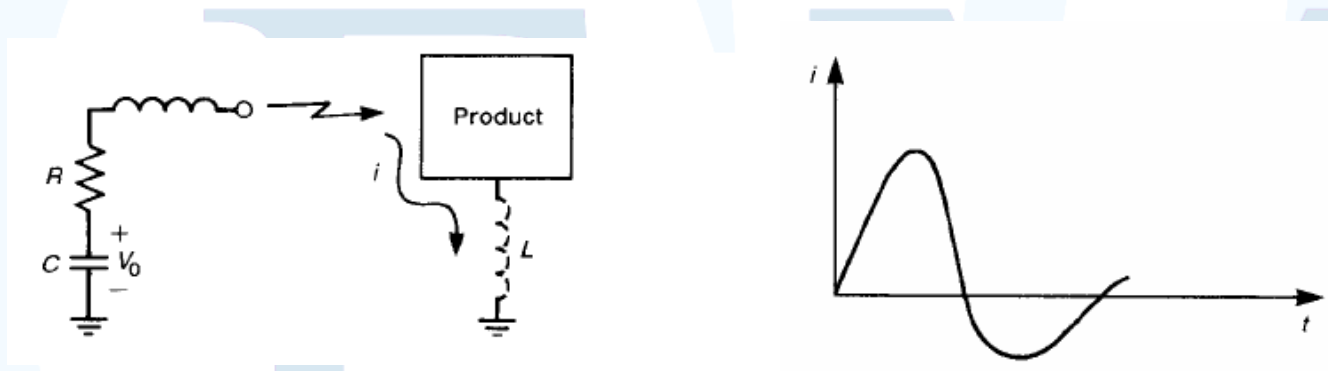
Il circuito equivalente per il fenomeno è costituito da un condensatore di capacità  $C$  carico a  $V_0$ . Questo si scarica attraverso una resistenza  $R$  ed un'induttanza  $L$  proprie del corpo carico e, tramite il case dell'apparato si scaricano a terra, passando eventualmente per l'induttanza  $L$  della messa a terra del dispositivo (se c'è)



Il modello per l'essere umano porta a impulsi triangolari con tempi di salita nell'ordine dei 200ps – 70ns e durate complessive dell'ordine di 100ns-2 $\mu$ s. Le correnti possono raggiungere i 10A e le tensioni i 10kV!

## Scarica Elettrostatica

Il modello per gli oggetti invece, a causa di un valore di  $R$  nettamente minore porta invece a delle oscillazioni smorzate del gruppo  $LC$ .



## Scarica Elettrostatica

La scarica del corpo umano può essere studiata più approfonditamente tramite misure a banda larga.

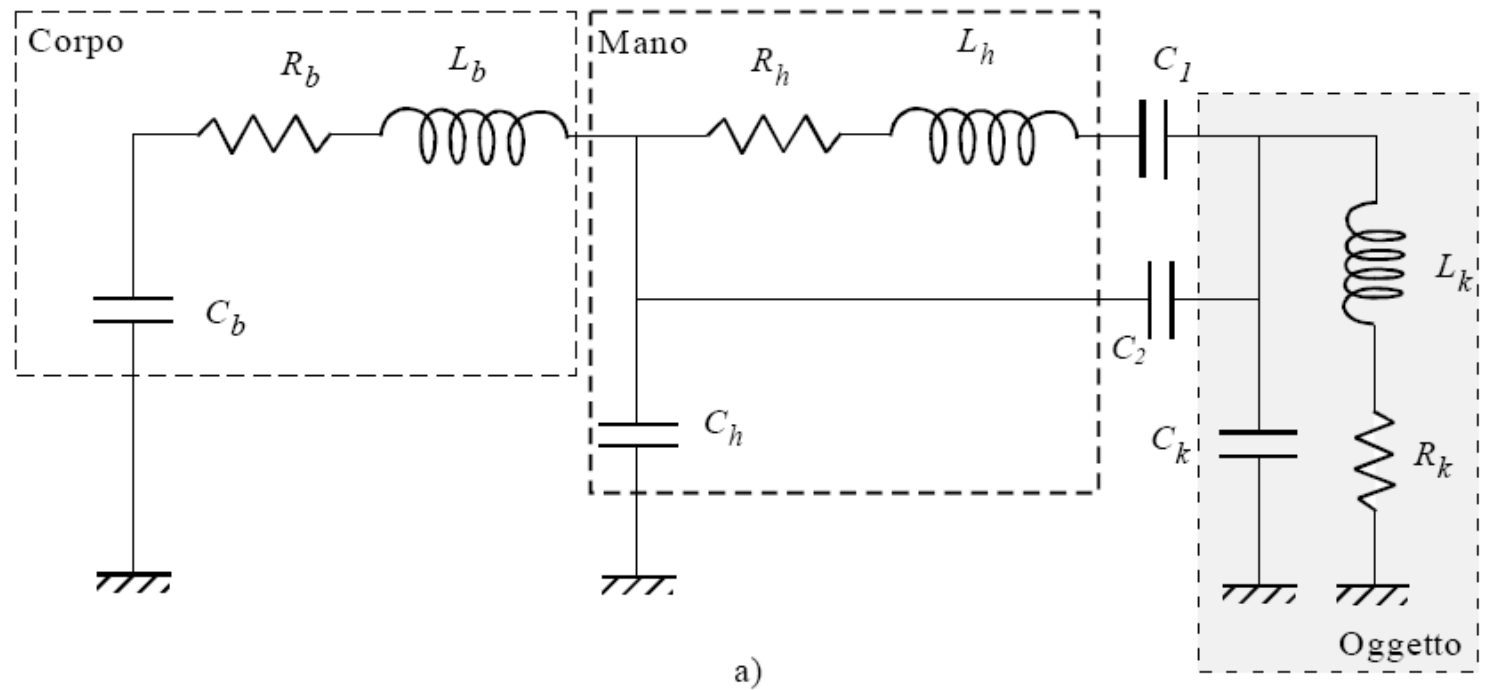
Queste misure hanno portato a riconoscere nell'ESD da corpo umano due fasi, una prima scarica che coinvolge praticamente la sola mano che è molto rapida (ns) e una scarica di tutto il corpo che avviene più lentamente.

Il modello circuitale completo è analizzabile in due fasi:

- ❖ Immediatamente prima del contatto:
  - ❖ Corpo umano e oggetto sono elettricamente isolati ma accoppiati da delle capacità
- ❖ Al contatto:
  - ❖ Corpo umano e apparato sono ora collegati elettricamente tramite una resistenza ed un'induttanza di contatto

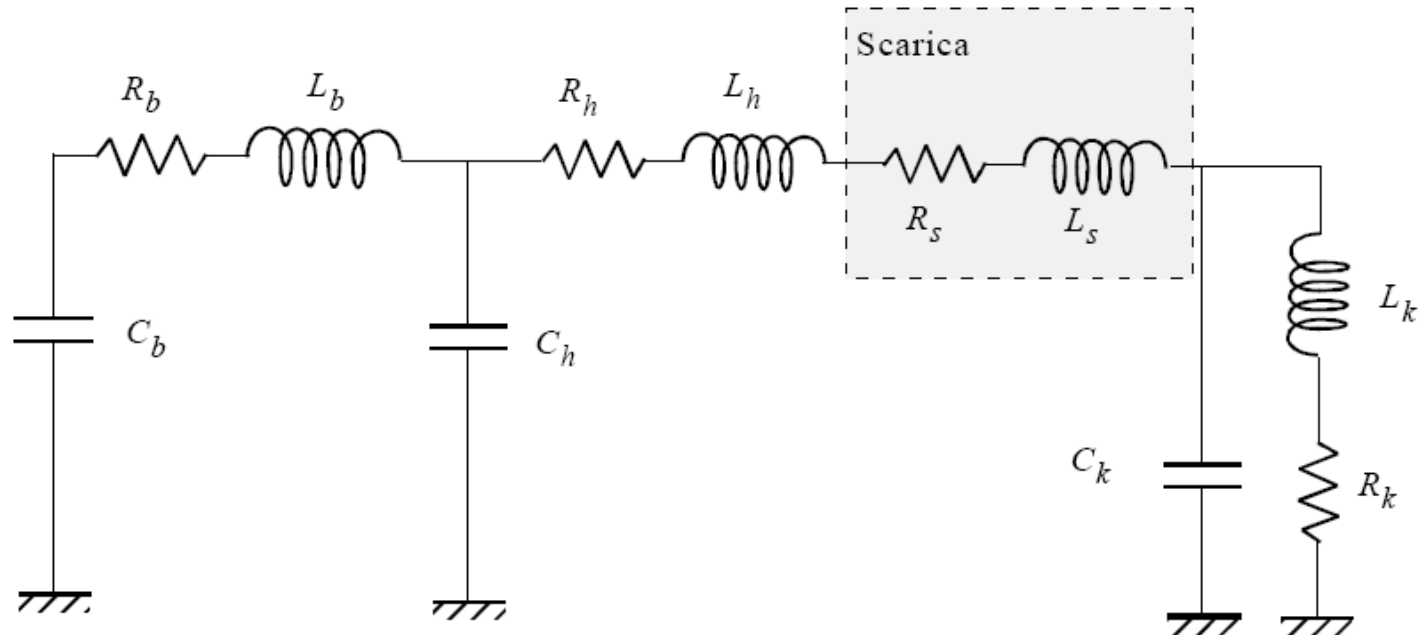
## Scarica Elettrostatica

*Immediatamente prima del contatto:*



## Scarica Elettrostatica

*Al contatto:*



$$L_b + L_h = 0.7 \text{ mH}$$

$$R_b + R_h = 1.5 \text{ k}\Omega \quad [\text{valore convenzionale, valori tipici } 1 \div 30 \text{ k}\Omega]$$

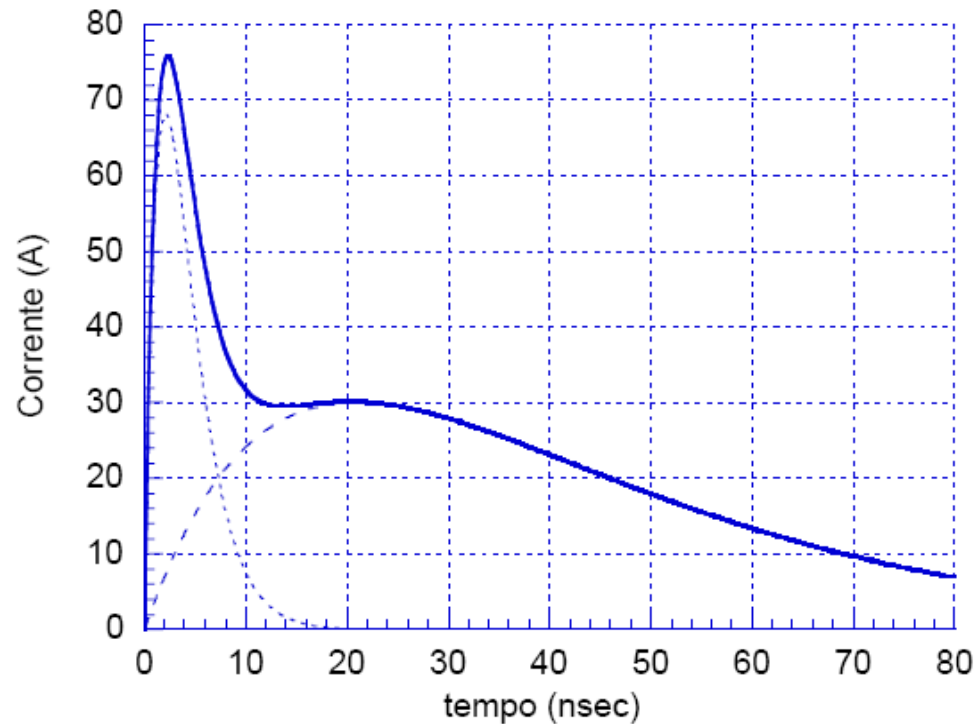
$$C_b + C_h = 150 \text{ pF} \quad [\text{valore convenzionale, valori tipici } 60 \div 300 \text{ pF}]$$

## Scarica Elettrostatica

La forma d'onda relativa è:

$$i(t) = 1943 \left[ e^{-\frac{t}{2.2}} - e^{-\frac{t}{2}} \right] + 857 \left[ e^{-\frac{t}{22}} - e^{-\frac{t}{20}} \right] A$$

Con  $t$  in ns.





## Scarica Elettrostatica

Data l'importanza dell'ESD esistono apparecchi appositamente costruiti per simulare la scarica da corpo umano::

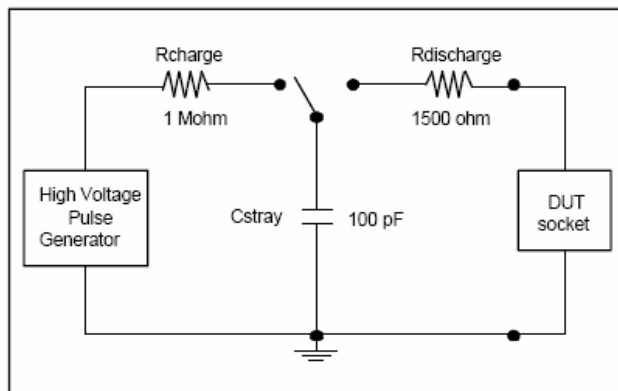


Figure 3: Typical HBM equivalent circuit

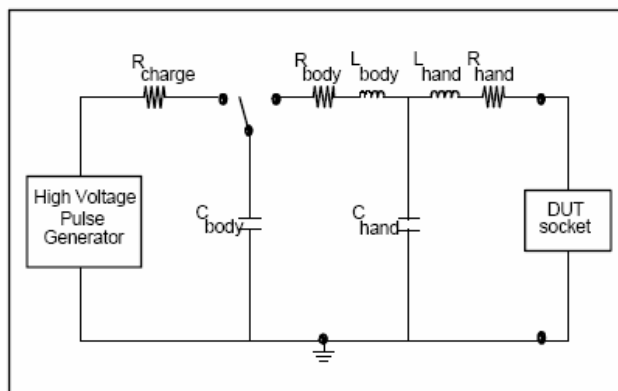


Figure 4: Worst case, actual HBM equivalent circuit

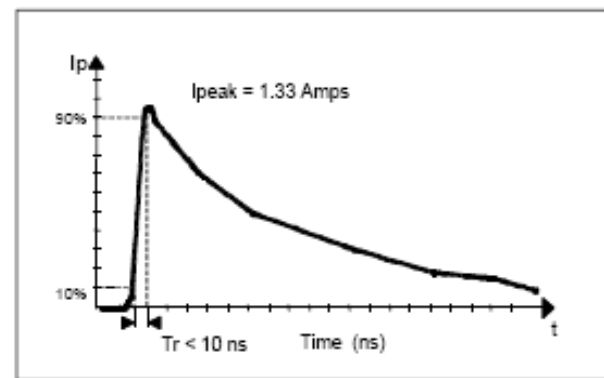


Figure 1: Mil-Std 883 Human Body Waveform (2kV)

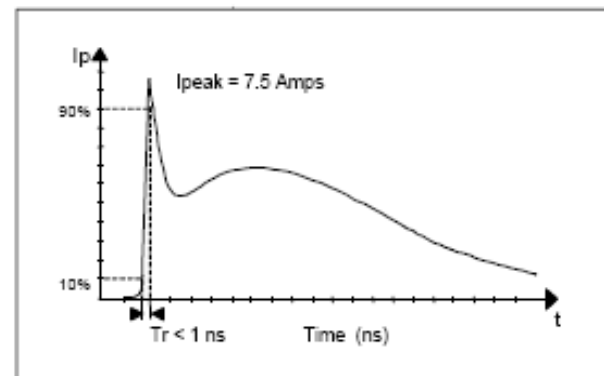


Figure 2: IEC 801-2 Human Body Waveform (2kV)

## Scarica Elettrostatica

Data l'importanza dell'ESD esistono apparecchi appositamente costruiti per simulare la scarica da corpo umano::

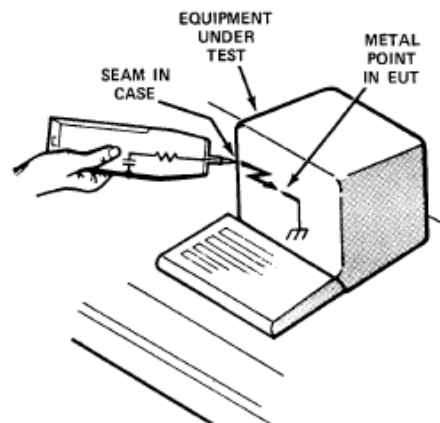


Figure 1

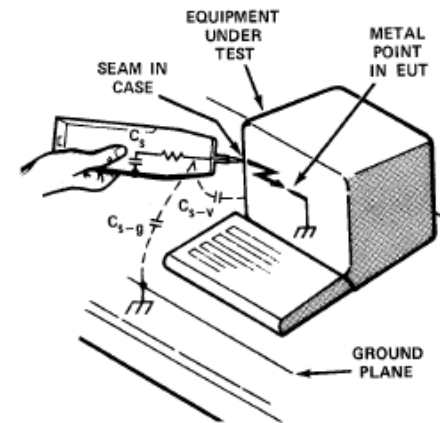


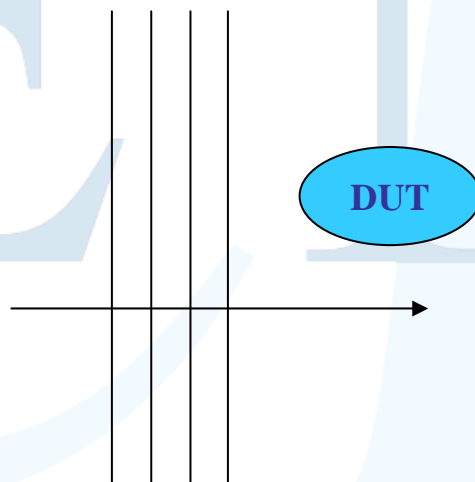
Figure 2

## Cella TEM

Per i disturbi radiati in generale, l'ideale sarebbe investire il dispositivo da certificare con un'onda piana di ampiezza opportuna.

L'onda piana è il caso ideale poiché trasporta una densità di potenza (e un'intensità di campo) uniforme su tutto lo spazio

Un'antenna reale e vicina è inevitabilmente direttiva (l'intensità dipende dalla direzione) e genera un'onda sferica (l'intensità dipende dalla distanza)

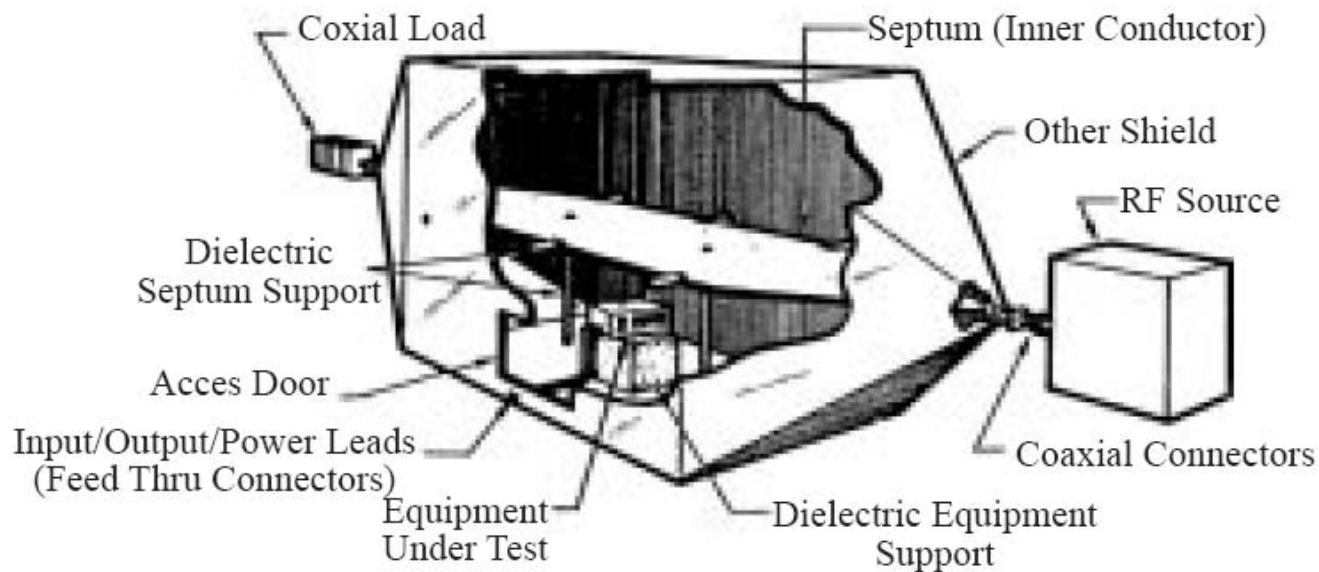


## Cella TEM

La generazione di un'onda piana è però complessa e costosa.

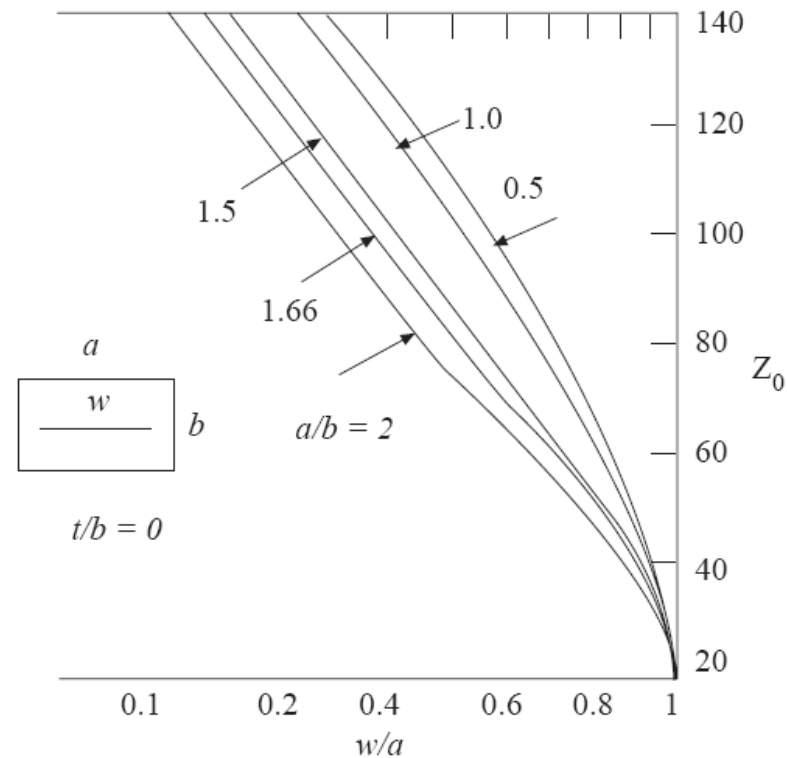
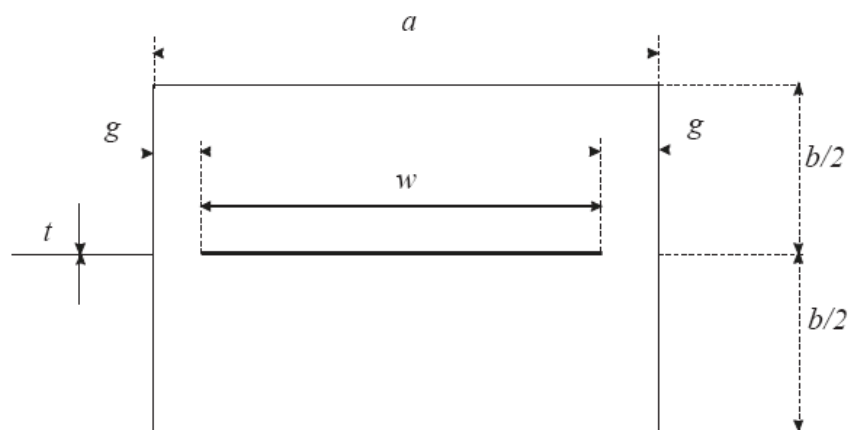
Si può ovviare costruendo una **CELLA TEM**

Questa è costituita da una sezione tipo cavo coassiale (dove quindi si propaga il TEM) costruita in modo che vi sia una zona più ampia possibile all'interno della quale l'anima e la calza sono piani e paralleli (e quindi dove il campo E ed H sono uniformi)



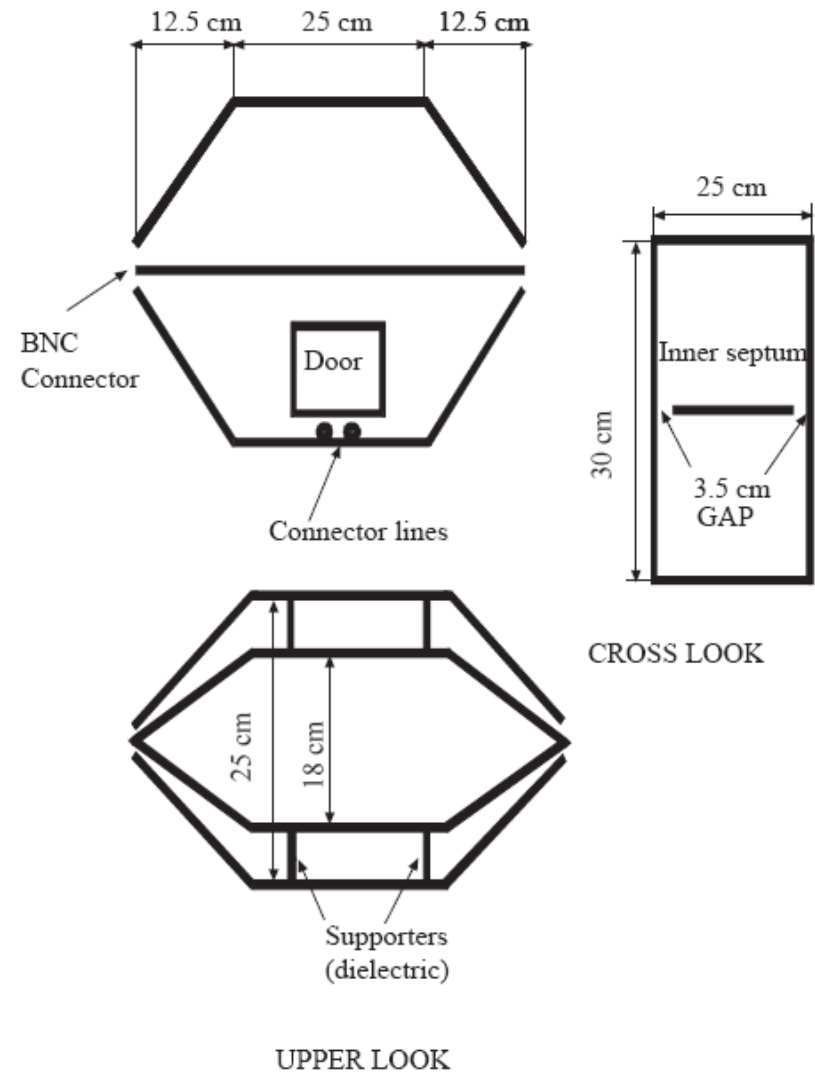
## Cella TEM

La cella, comportandosi da cavo coassiale, ha una propria impedenza caratteristica, da adattare a quella del cavo coassiale (vero!) ce l'alimenta tramite opportune rastremature



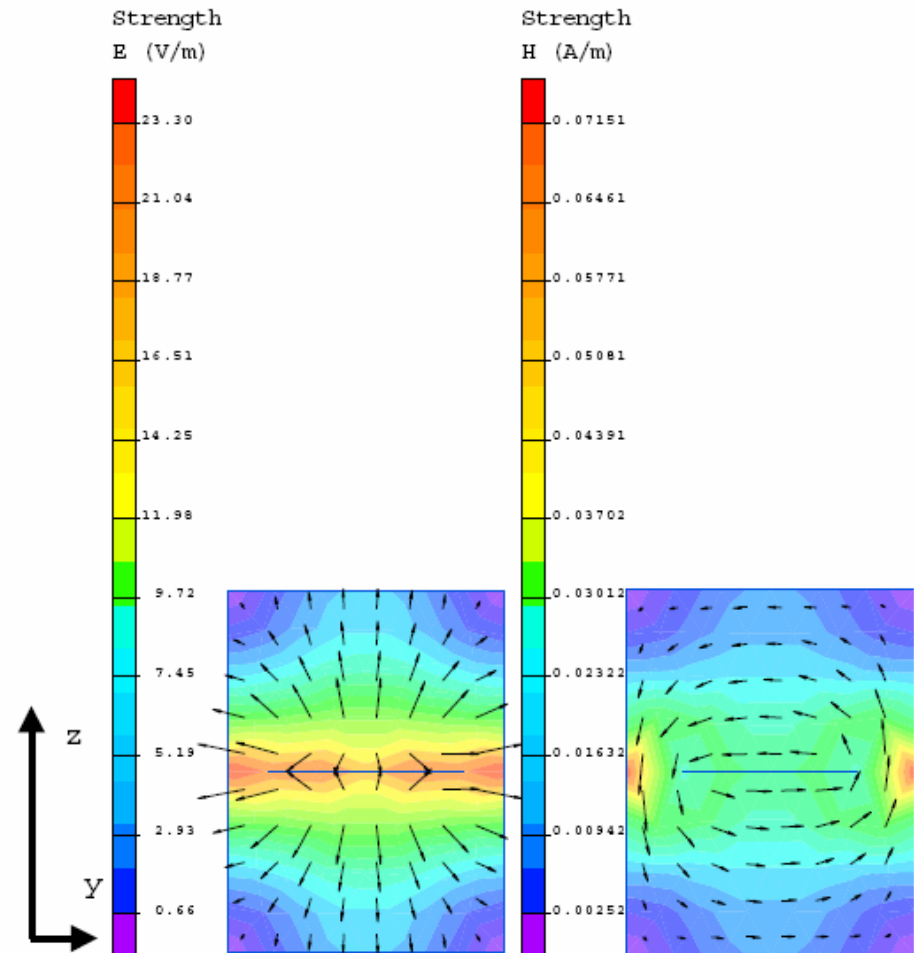
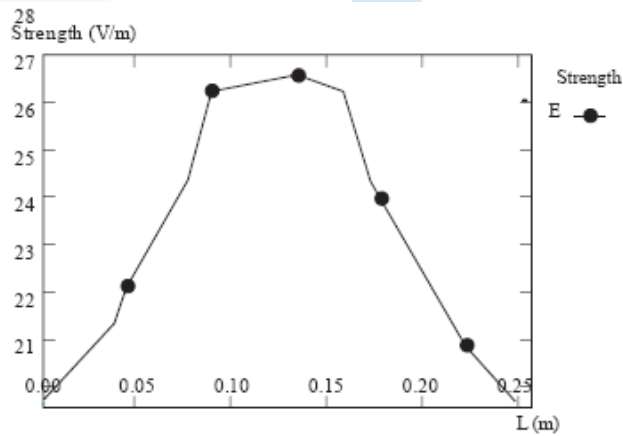
## Cella TEM

Dimensioni tipiche di una piccola cella  
a  $75\Omega$



# Cella TEM

E relativi campi elettrici e magneti  
metà cella (a destra) e su una linea  
metà altezza (sotto)



## Cella TEM

