

RIVELATORI DI RADIAZIONE

(CENNI)

STRUMENTI SENSIBILI ALL'INTERAZIONE DI PARTICELLE, CARICHE E NEUTRE.

DAREMO 3 CLASSIFICAZIONI:

① TIPO DI GRANDEZZA FISICA DA MISURARE

- FLUSSO DI PARTICELLE
- CONTEGGIO DI PARTICELLE SINGOLE
- • RIVELATORI PIÙ SEMPLICI

- ENERGIA DEPOSTA → SPETTRI DI ENERGIA
- POSIZIONE DI DEPOSIZIONE DELL'ENERGIA
↳ PUNTI, AREE, TRACCE
- TEMPI DI ARRIVO DI PARTICELLE
- VELOCITÀ DI PARTICELLE
- MOMENTO DI PARTICELLE

IN ALCUNI CASI, ALCUNE DI QUESTE GRANDEZZE POSSONO ESSERE MISURATE SIMULTANEAMENTE

②

TIPO DI RADIAZIONE

- SPETTROSCOPIA α
- SPETTROSCOPIA β
- SPETTROSCOPIA γ
- NEUTRONI
- NEUTRINI
- γ ED ELETTRONI DI ALTA ENERGIA
- ADRONI DI ALTA ENERGIA



QUESTE PERÒ SONO "SPECIALIZZAZIONI", E NON
COPRONO TUTTO LO SPETTRO DEI RIVELATORI
ESISTENTI

③

PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO

- IONIZZAZIONE
- a) • RIVELATORI A GAS
 - PRODUZIONE DI N COPPIE ELETTRONE - IONE ("CARICA LIBERATA")
 - MISURA DELLA CARICA LIBERATA
 - b) • RIVELATORI A STATO SOLIDO (GIUNZIONE A POLARIZZAZIONE INVERSA)
 - PRODUZIONE DI N COPPIE ELETTRONE - LACUNA ("CARICA LIBERATA")
 - MISURA DELLA CARICA LIBERATA
- ECCITAZIONE ATOMICA
- c) • SCINTILLATORI
 - ECCITAZIONE ATOMICA
 - MISURA DEI FOTONI DI DESECCITAZIONE

d)

POLARIZZAZIONE • ČERENKOV E RADIAZIONE DI TRANSIZIONE

- FENOMENI DI POLARIZZAZIONE

- MISURA DI β E γ

• PROPRIETÀ DI
PARTICELLE
RELATIVISTICHE:

$$\beta = v/c \quad \gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}$$

e)

CALORE • RIVELATORI TERMICI

- MISURA DELL'INNALZAMENTO DI
TEMPERATURA DETERMINATO DA
UNA PARTICELLA SINGOLA

MISURE DI AMPIEZZA DI IMPULSI SINGOLI

PER I RIVELATORI DI TIPO a), b) e c) DELLA CLASSIFICAZIONE PRECEDENTE, POSSIAMO, DAL PUNTO DI VISTA DELLA MISURA DELL'ENERGIA, ELABORARE UN MODELLO SEMPLIFICATO PER IL RIVELATORE.

CON QUALCHE "DISTINGUO"



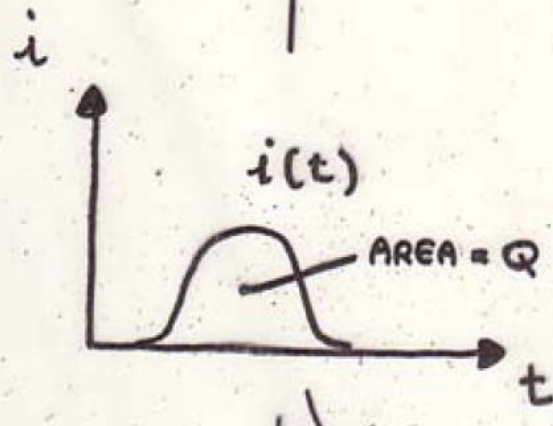
• PARTICELLA SINGOLA DEPOSITA ENERGIA E

• L'ENERGIA E LIBERA UNA CARICA Q , CHE SI MUOVE (CAMPO ELETTRICO) DANDO LUOGO AD UN IMPULSO DI CORRENTE $i(t)$

• $Q = \int_0^{\infty} i(t) dt$

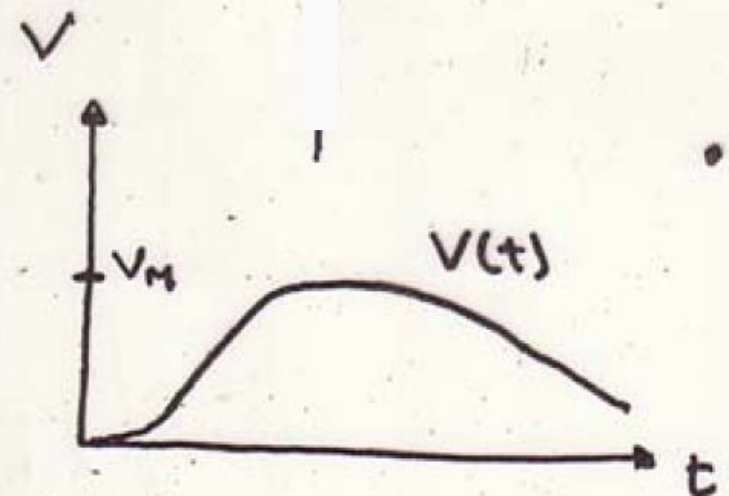
• RIVELATORE IN REGIME IMPULSIVO

A QUESTO LIVELLO, SI HANNO INFORMAZIONI TEMPORALI E SUL MECCANISMO DI FORMAZIONE DELL'IMPULSO



CARICANDO UNA CAPACITÀ C CON LA CORRENTE $i(t)$, SI OTTIENE UN IMPULSO DI TENSIONE $V(t)$, CHE RAGGIUNGE IL MASSIMO:

$$V_M = \frac{Q}{C}$$



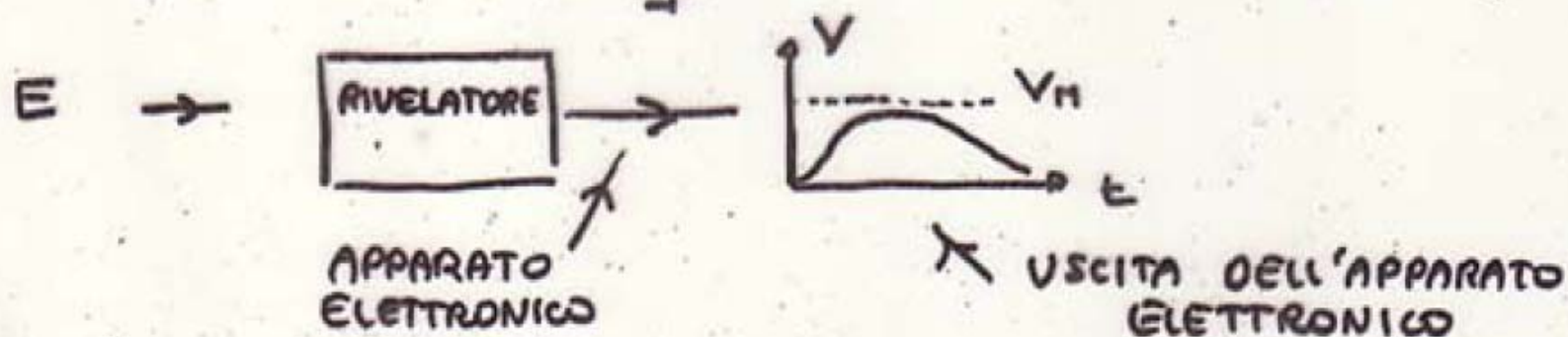
- VALE LA SEGUENTE CATENA DI PROPORZIONALITÀ :

$$E \propto Q \propto V_m \Rightarrow E = k \cdot V_m$$

↳ IL MASSIMO DELL'IMPULSO DI TENSIONE (AMPIEZZA) È UNA MISURA DELL'ENERGIA DEPOSTA.

↳ PER DETERMINARE k , SI FA UNA CALIBRAZIONE.

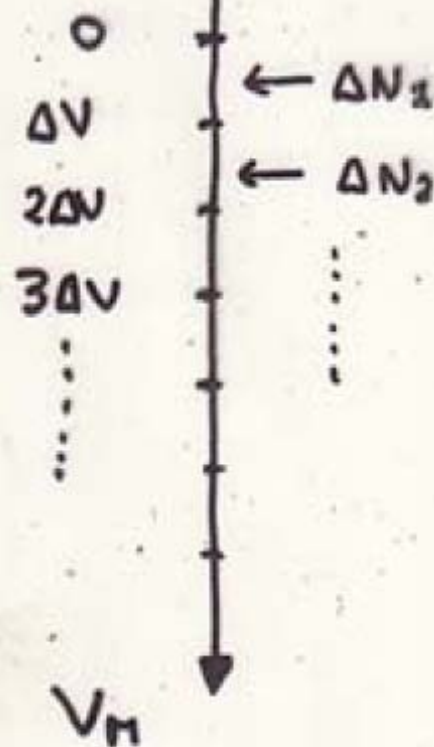
QUINDI, IN MODO SEMPLIFICATO, IL RIVELATORE È UN SISTEMA [RIVELATORE PROPRIAMENTE DETTO] + [APPARATO ELETTRONICO] COSÌ SCHEMATIZZABILE



- QUANDO ESEGUO MISURE DI ENERGIA, MI INTERESSA SAPERE COME SI DISTRIBUISCONO LE ENERGIE DEPOSTE, OSSIA QUANTO FREQUENTI SONO CERTI ENERGIE RISPETTO AD ALTRE.

→ SPETTROSCOPIA.

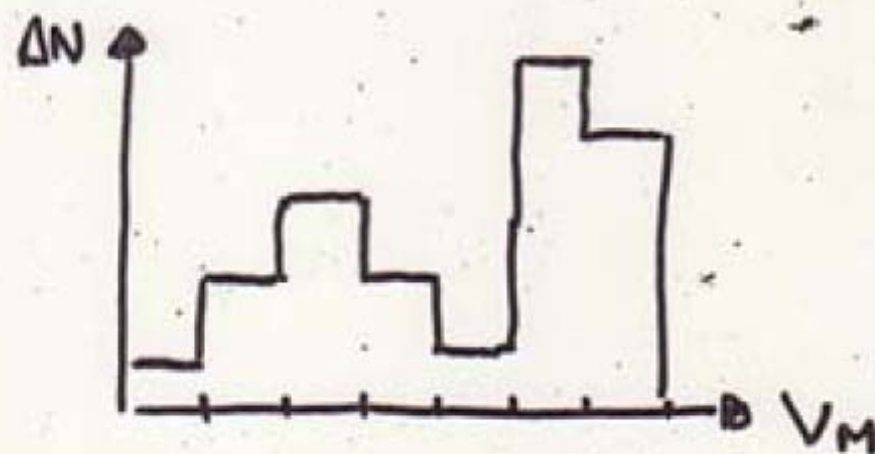
SCALA DELLE AMPIEZZE V_M
(SCALA DELLE ENERGIE)



DIVIDO LA SCALA DELLE AMPIEZZE IN TANTI INTERVALLI.

CONTO QUANTI IMPULSI ΔN CAPITANO IN CIASCUN INTERVALLO.

→ SPETTRO:



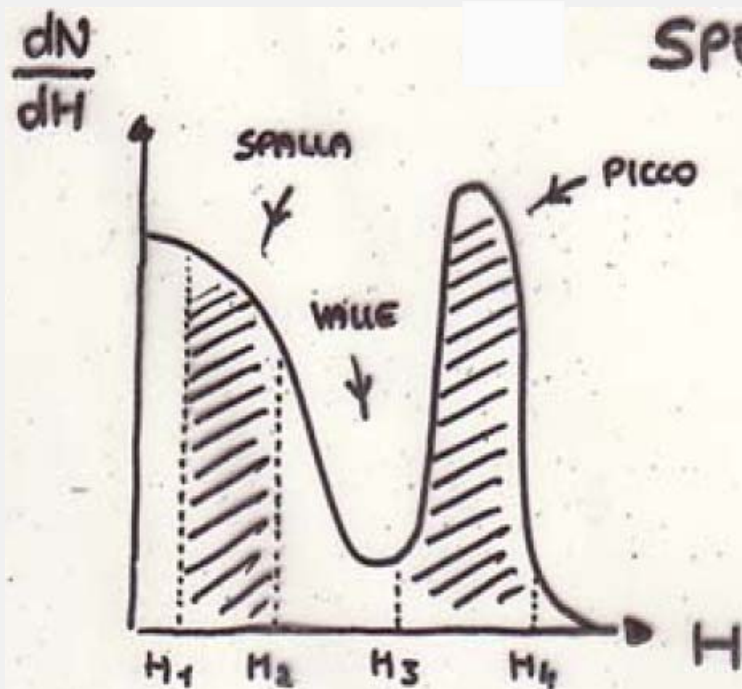
POSSO ASSUMERE CHE GLI INTERVALLI SIANO INFINITESIMI
(NON VERO PER GLI STRUMENTI CHE DIGITALIZZANO:
ADC \rightarrow "ANALOG TO DIGITAL CONVERTER") E LO SPETTRO
DIVENTA UNA CURVA CONTINUA:
(PER COMODITÀ, DESIGNO V_M CON H)

$dN(H)$ NUMERO DI IMPULSI CHE HANNO AMPIEZZA
COMPRESA TRA H E $H + dH$

$\frac{dN}{dH}(H) \rightarrow$ "DENSITÀ" DI AMPIEZZE TRA H E $H + dH$

\rightarrow È QUESTA FUNZIONE CHE PRENDE IL NOME
DI : DISTRIBUZIONE DELLE AMPIEZZE O
SPETTRO DIFFERENZIALE O SEMPLICEMENTE
SPETTRO

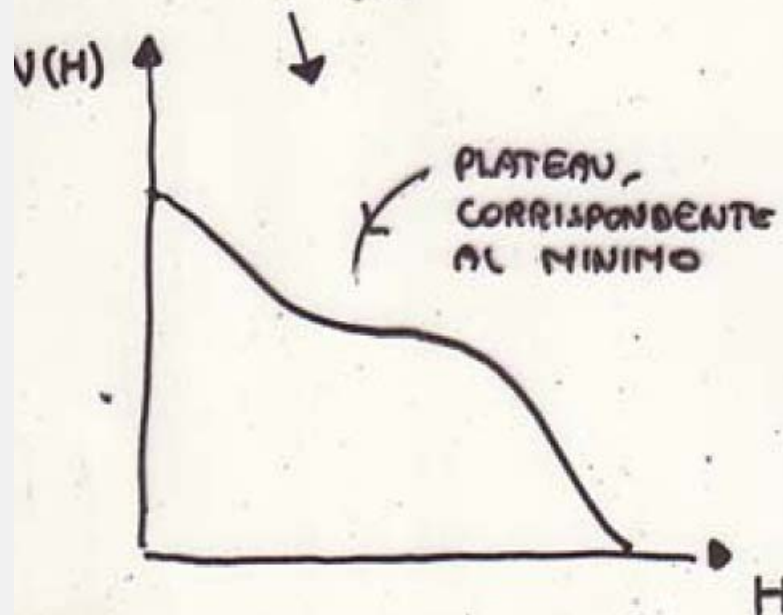
SPETTRO



SE SONO INTERESSATO AL
NUMERO DI CONTEGGI IN
UNA CERTA ZONA, ESEGUO
UN INTEGRALE:

$$\Delta N_{\text{picco}} = \int_{H_3}^{H_4} \frac{dN}{dH}(H) dH$$

A VOLTE (PIÙ RARAMENTE) SI RACCOLGONO SPETTRI
INTEGRALI.



$$N(H) = \int_H^{\infty} \frac{dN}{dH'} dH'$$

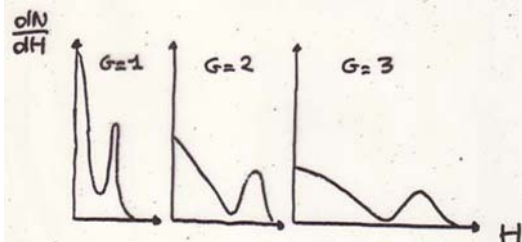
NUMERO DI IMPULSI
CON AMPIEZZA $> H$

LA CATENA DI STRUMENTI CHE PRODUCE UNO SPETTRO DIFFERENZIALE È COSÌ SCHEMATIZZABILE:



PRODUCE UN IMPULSO $V(t)$ CON MASSIMO H

H PUÒ ESSERE PIÙ O MENO "DILATATO" A SECONDA DEL GUADAGNO G DEL SISTEMA ELETTRONICO



"DIGITALIZZA" L'IMPULSO, OSSIA TRASFORMA L'AMPIEZZA H IN UN NUMERO COMPRESO TRA 1 E 2^n

PRECISIONE \rightarrow N° DI BIT DELLA ADC

(SECONDO UN "FONDOSCALA" IN VOLT DA IMPOSTARE)

DISTRIBUISCE I NUMERI FORNITI DALLA ADC IN 2^n "CANALI". OGNI CANALE RAPPRESENTA L'INTERVALLO MINIMO ΔH IN CUI SI CONTANO GLI IMPULSI. GENERA LO SPETTRO DIFFERENZIALE

PROPRIETÀ DEI RIVELATORI

- EFFICIENZA
 - RISOLUZIONE ENERGETICA
 - SPAZIALE
 - TEMPORALE
- } MINIMO INTERVALLO TRA DUE EVENTI
CHE UN RIVELATORE È IN GRADO DI
RISOLVERE

EFFICIENZA ASSOLUTA

$$\epsilon_{abs} = \frac{\# \text{ DI IMPULSI REGISTRATI}}{\# \text{ DI QUANTI DI RAD. ENESSI}}$$

FATTORI CHE INFLUENZANO L'EFFICIENZA

- 1 FATTORE DI ATTENUAZIONE GEOMETRICA G
- 2 FATTORE DI ATTENUAZIONE DEL MATERIALE M
- 3 EFFICIENZA D'INTERAZIONE I
- 4 EFFICIENZA DI REGISTRAZIONE R

$$E = E(G, M, I, R)$$

① SE LA SORGENTE EMETTE IN MODO ISOTROPO

$$G = \frac{\Omega}{4\pi}$$

- DIPENDE DALLA GEOMETRIA DEL SISTEMA
- DIMINUISCE SE ALLONTANO LA SORGENTE
- PER UNA GEOMETRIA A 4π $G \leq 1$
- PER UNA GEOMETRIA A 2π $G \leq 0.5$



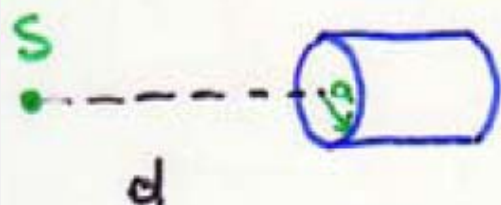
Si ha

$$\Omega = \int_A \frac{\cos \alpha}{r^2} dA$$

α angolo tra la normale all'elem. di sup. dA e la diret. della S ,
 r distanza della S dal rivelatore

CASO SEMPLICE

Sorgente puntiforme distante d COASSIALE
 con un rivelatore CILINDRICO di raggio a



$$\Omega = 2\pi \left(1 - \frac{d}{\sqrt{d^2 + a^2}} \right) \xrightarrow{d \gg a} \frac{A}{d^2} = \frac{\pi a^2}{d^2}$$

② Tiene conto di:

- AUTO ASSORBIMENTO DELLA SORGENTE
- MATERIALE INTERPOSTO FRA SORGENTE E RIVELATORE
- VOLUME MORTO

③

$$I = \frac{\text{\# IMPULSI REGISTRATI}}{\text{\# DI QUANTI DI RAD. INCIDENTI NEL VOLUME VIVO}}$$

CASO X e γ

poiché $n = n_0 (1 - e^{-\mu x})$ SONO I FOTONI CHE INTERAG.

$$I = 1 - e^{-\mu x}$$

- DIPENDE DAL MATERIALE (μ)
- DIPENDE DALLO SPESSORE (x)

CASO DI PARTICELLE CARICHE

$$I \sim 1$$

BASTA LA FORMAZIONE DI UNA SOLA COPPIA PER CONSIDERARE IL QUANTO COME "RIVELATO"

IN MODO PIÙ ALGORITMO:

siano dati E_0 e W , Allora $n_0 = \frac{E_0}{W}$ SOGGETTO ALLA STATISTICA DI P,

$$I = 1 - P(0) = 1 - e^{-n_0}$$

- In Ar, per PARTICELLE AL MINIMO DI IONIZZAZIONE

$$n_0 = 3,4 \text{ ioni/mm}$$

Allora

$$I(1\text{cm}) = 1 - e^{-34} \approx 1$$

$$I(1\text{mm}) = 1 - e^{-3,4} = 1 - 0.033 \sim 97\% \neq 100\%$$

STATISTICAMENTE POSSO NON RIVELARE ALCUNI QUANTI DI RADIAZIONE

④

Sia m il tasso di registrazione = $\frac{\# \text{ DI EVENTI UTILI REGISTR.}}{\text{TEMPO DI MISURA}}$

n il tasso d'interazione = $\frac{\# \text{ INTERAZIONI}}{\text{TEMPO DI MISURA}}$

Allora

$R = \frac{m}{n}$ DIPENDE DAL TEMPO MORTO DEL
MIO SISTEMA (vedi dopo...)

ALTRE DEFINIZIONI UTILI

EFFICIENZA INTRINSECA

$$E_{int} = E_{abs} \cdot \frac{4\pi}{\Omega}$$

SVINCOLA L'EFFICIENZA DA PROBLEMI
GEOMETRICI. VALE NELL'IP. DI
SORGENTE PUNTI FORME
MAT. INTERPOSTO TRASCURABILE

CONTIENE LA DIPENDENZA DAL VOLUME
MORTO E DALLE CARATT. DEL RIVELATORE

DIPENDE DA:

- MATERIALE RIVELATORE
- SPESSORE LUNGO \hat{r}
- ENERGIA DEL QUANTO INCIDENTE

EFFICIENZA AL PICCO

$$E_{ip} = \frac{\# \text{ CONTAGGI AD ENERGIA PIENA (N)}}{\# \text{ DI QUANTI DI RAD. CHE INCIDONO SUL RIV.}}$$

Allo ra

$$S = N \frac{1}{E_{ip}} \frac{4\pi}{\Omega} \quad \text{e} \quad A = S \cdot (\text{Br. Ratio})$$

↑
attività della
sorgente

↑ di quel particolare
modo di decaim.
con E pari al picco

E NON SI CALCOLA: SI MISURA

Possibile alternativa: USO DI MONTECARLO testati

LA RISOLUZIONE ENERGETICA

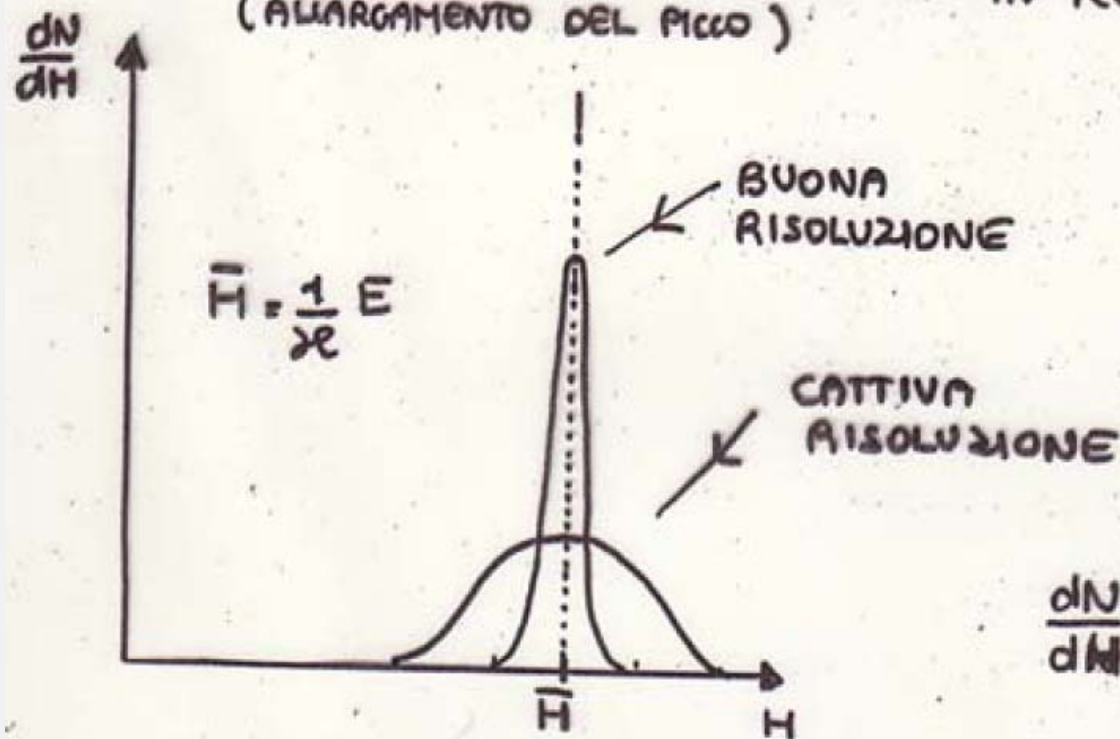
SU UN RIVELATORE INCIDANO PARTICELLE DELLA MEDESIMA ENERGIA, CHE SI ARRESTINO NEL RIVELATORE STESSO.

→ AD OGNI EVENTO, CORRISPONDE ESATTAMENTE UNA DEPOSIZIONE DI ENERGIA E .

→ NELLO SPETTRO DIFFERENZIALE, MI ASPETTO UN PICCO MOLTO STRETTO - SE USO UN MCA, MI ASPETTO CHE LE AMPIERZE VENGANO TUTTE COLLOCATE NELLO STESSO CANALE.

MA: IL RIVELATORE NON MISURA CON INFINITA PRECISIONE.

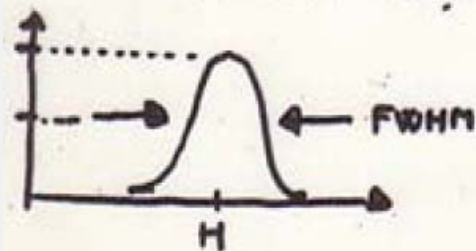
LO SPETTRO DIFFERENZIALE AVRÀ IN REALTÀ LA FORMA:
(ALLARGAMENTO DEL PICCO)



AL LIMITE DI
RISOLUZIONE
INFINITAMENTE
BUONA, CI SI
ASPETTA:

$$\frac{dN}{dH} = N_0 \delta(H - \bar{H})$$

IN PRATICA, LA RISOLUZIONE SI MISURA DANDO LA
LARGHEZZA A MEZZA ALTEZZA DEL PICCO (FWHM =
"FULL WIDTH AT HALF MAXIMUM")



LA POSSO DARE IN TERMINI ASSOLUTI:

• FWHM [V] ; • OPPURE CONVERTIRLA IN
ENERGIA: $(2 \cdot FWHM) [eV]$

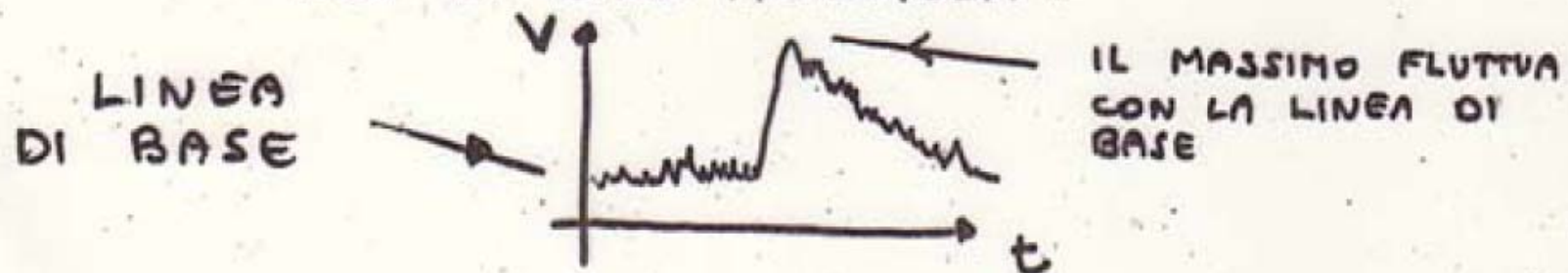
• OPPURE IN %: $\frac{FWHM [V]}{H [V]} \times 100$

LE CAUSE DI DETERIORAMENTO DELLA RISOLUZIONE SONO MOLTEPLICI :

- DI CARATTERE STATISTICO:

- es. RUMORE ELETTRONICO.

L'IMPULSO $V(t)$ CRESCE SEMPRE SU UNA LINEA DI BASE RUMOROSA :



- DI CARATTERE SISTEMATICO:

- es. DIPENDENZA DELLA RISPOSTA DEL RIVELATORE DALLA POSIZIONE;
- es. DERIVA TEMPORALE DI χ .

MA PER RIVELATORI BASATI SULLA GENERAZIONE DI CARICA LIBERA, C'È UNA CAUSA IRRIDUCIBILE DI DETERIORAMENTO DELLA RISOLUZIONE.

- LIBERO UNA CARICA Q -
- LA CARICA PERÒ È DISCRETA.
IN REALTÀ, LIBERO n PORTATORI DI CARICA,
OGNUNO CARATTERIZZATO DA UNA CARICA ELEMENTARE q

$$Q = n \cdot q$$

$$E = \mathcal{R} \cdot H = \mathcal{R} \cdot \frac{Q}{C} = \mathcal{R} \frac{q}{C} n \Rightarrow E \propto n$$

↳ MA: LA LIBERAZIONE DI CARICA È UN PROCESSO STATISTICO - n FLUTTUA EVENTO PER EVENTO, ATTORNO AD UN VALOR MEDIO N

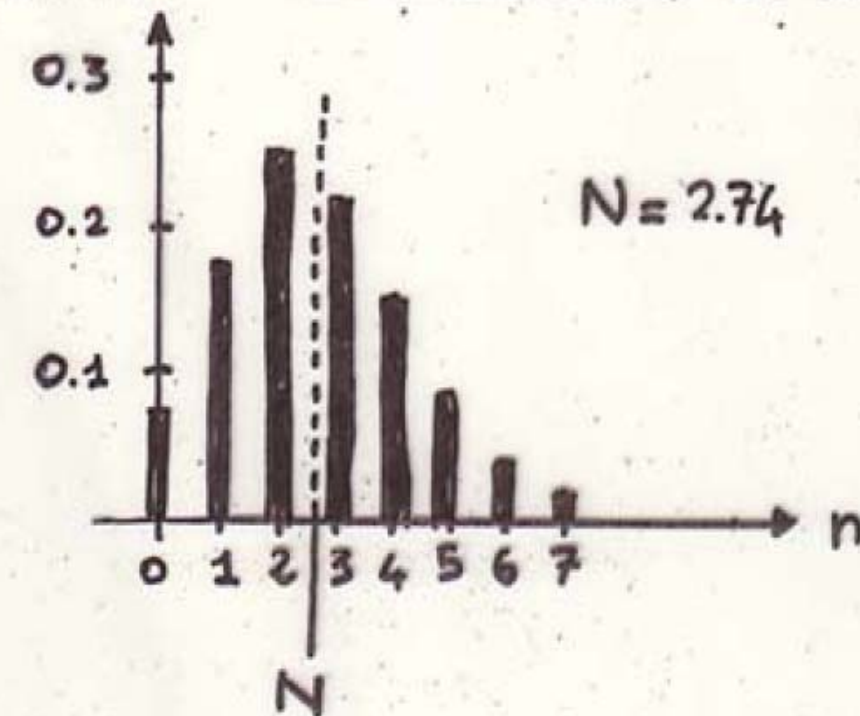
↳ Q FLUTTUA, H FLUTTUA -

• VALUTIAMO LA FLUTTUAZIONE.

SE I PROCESSI SINGOLI CHE LIBERANO I PORTATORI DI CARICA q SONO L'UNO INDIPENDENTE DALL'ALTRO, n SI DISTRIBUISCE ATTORNO AD N SECONDO LA STATISTICA DI POISSON:

$$P(n) = \frac{(N)^n e^{-N}}{n!} \quad \leftarrow \text{NORMALIZZATA A 1}$$

\uparrow PROBABILITÀ DI AVERE n PORTATORI LIBERI



⇐ ESEMPIO

LA DISTRIBUZIONE È
ASIMMETRICA (CODA)

VARIANZA DELLA DISTRIBUZIONE :

$$\sigma^2 = \sum_{n=0}^{\infty} P(n) (n-N)^2 = N$$

↑ PROPRIETÀ TIPICA DELLA
DISTRIBUZIONE DI POISSON

$$\sigma = \sqrt{N} \leftarrow \text{DEVIATION STANDARD.}$$

SE N È MOLTO GRANDE ($N > 20$), LA
DISTRIBUZIONE DI POISSON PUÒ ESSERE APPROSSIMATA
CON UNA GAUSSIANA (CHE È SIMMETRICA)

$$P(n) = \frac{1}{\sqrt{2\pi N}} \exp \left[-\frac{(n-N)^2}{2N} \right]$$

SE, COME È VERO, IN GENERALE :

$$H = \frac{q}{c} n \quad ; \quad \bar{H} = \frac{q}{c} N$$

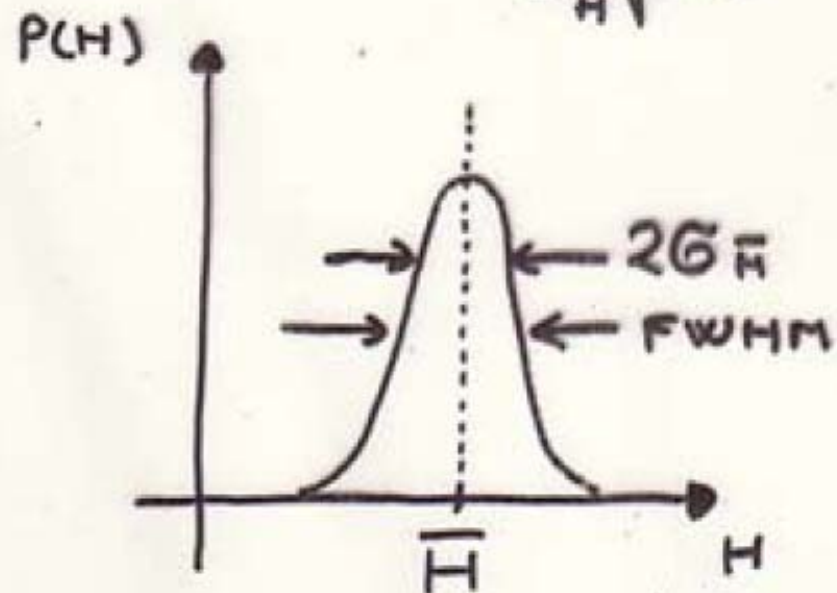
ANCHE H SARÀ DISTRIBUITO COME UNA GAUSSIANA :

$$\bar{H} = \frac{q}{C} \cdot N$$

$$\sigma_{\bar{H}} = \frac{q}{C} \cdot \sigma_N = \frac{q}{C} \sqrt{N}$$

$$P(H) = \frac{A}{\sigma_{\bar{H}} \sqrt{2\pi}} \exp \left(-\frac{(H - \bar{H})^2}{2\sigma_{\bar{H}}^2} \right)$$

FATTORE DI NORMALIZZAZIONE
(AREA)



$$\bullet \int_{\bar{H}-\sigma}^{\bar{H}+\sigma} P(H) dH = 0.68 \cdot A$$

$$\bullet FWHM = 2.35 \cdot \sigma_{\bar{H}}$$

↑ RELAZIONE VALIDA
PER LE GAUSSIANE

QUINDI :

$$\left[\frac{\text{FWHM}}{\bar{H}} = \frac{2.35 \sigma_H}{\bar{H}} = 2.35 \frac{\sigma_N}{N} = 2.35 \frac{1}{\sqrt{N}} \right] (\times 100)$$

→ RISOLUZIONE PERCENTUALE (LIMITE STATISTICO)

ES. PARTICELLA DI $E = 1 \text{ MeV}$ IN UN GAS.
VEDREMO CHE IN UN GAS OCCORRONO $\sim 30 \text{ eV}$
PER LIBERARE UNA COPPIA IONE-ELETTRONE.

ALLORA: $N = 10^6 / 30 \approx 3 \times 10^4 \Rightarrow \sqrt{N} \approx 1.8 \times 10^2$

$$\left[\frac{\text{FWHM}}{\bar{H}} = \frac{2.35}{1.3} \% \right] (\text{LIMITE STATISTICO})$$

→ LA RISOLUZIONE MIGLIORA COME $1/\sqrt{N}$
AL CRESCERE DI N .

IN REALTÀ, IL PROCESSO NON È POISSONIANO (EVENTI
NON INDIPENDENTI)

$$F \equiv \frac{\sigma_N^2 \text{ OSSERVATA}}{N} \quad \text{CON} \quad F < 1$$

↑
FATTORE DI FANO

MISURA DELLA POSIZIONE

- RIVELATORI TRACCIANTI
- SEGMENTAZIONE DEGLI ELETTRODI
- MATRICI DI RIVELATORI IDENTICI

Definiamo

PRECISIONE SPAZIALE

- PRECISIONE CON CUI È RICOSTRUITA LA POSIZIONE DI UN ELEMENTO DELLA TRACCIA
- DISPERSIONE DEI PUNTI RISPETTO ALL'INTERPOLAZIONE LINEARE DELLA TRACCIA

$$\sigma^2 = \frac{\sum (s_k - s)^2}{N-2}$$

s_k COORD. MISURATA

s COORD. FITTATA

↑ HO USATO 2 D.O.F. PER IL FIT LINEARE

RISOLUZIONE SPAZIALE

- MINIMA SEPARAZIONE DI 2 TRACCE RISOLTE INDIVIDUALI.

RISOLUZIONE TEMPORALE

MINIMO INTERVALLO TEMPORALE TRA 2 EVENTI CHE UN RIVELATORE
E' IN GRADO DI RISOLVERE

≡ TEMPO MORTO

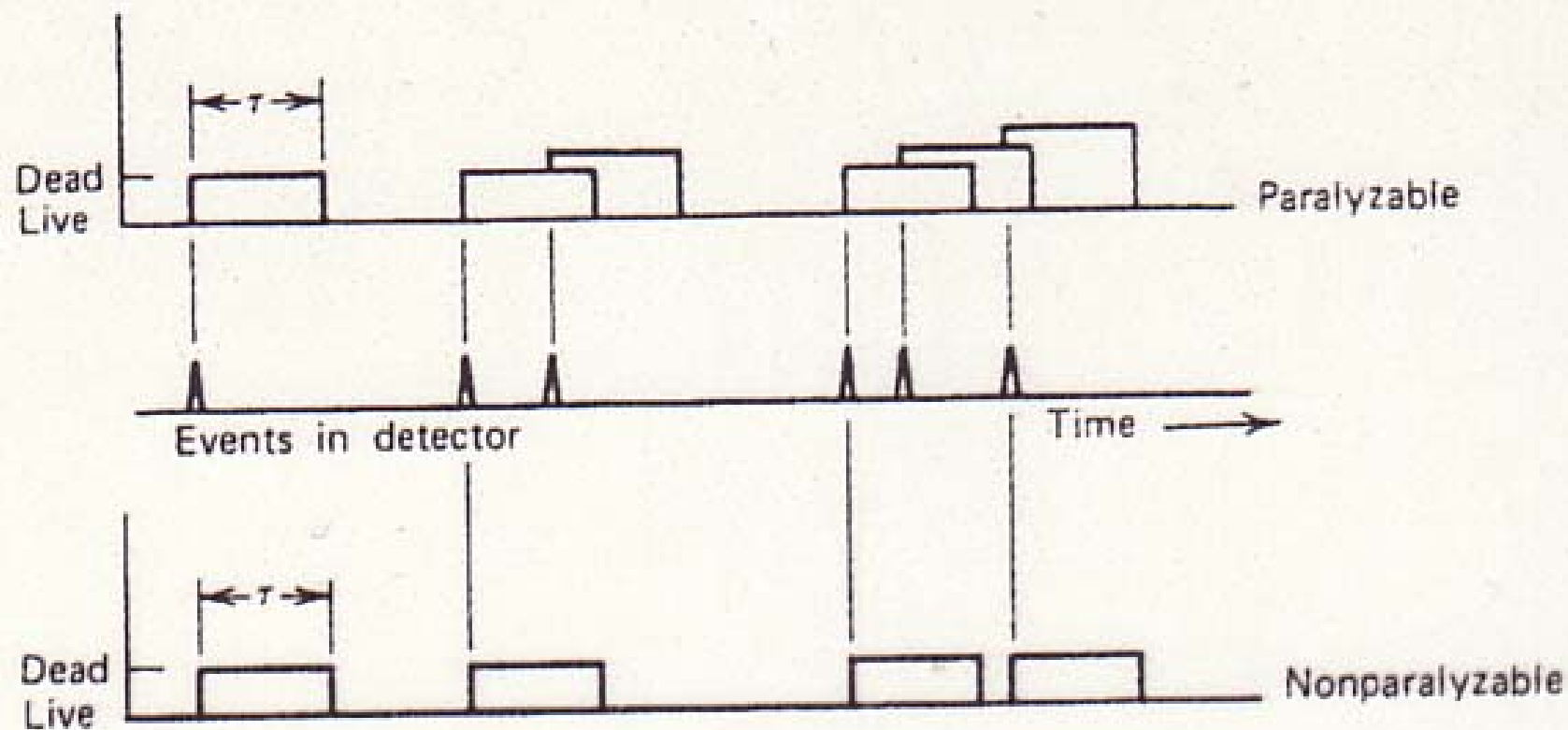
DIPENDE DA

CARATTERISTICHE INTRINSECHE DEL RIVELATORE
MECCANISMI DI RACCOLTA DEI QUANTI PRODOTTI
STRUMENTAZIONE ELETTRONICA DI LETTURA

SE 2 EVENTI NON SONO RISOLTI TEMPORALMENTE SI HA :

PILE-UP → ERRATA VALUTAZIONE DEL TASSO DI CONTEGGI
→ ERRATA VALUTAZIONE DELL'ENERGIA ($E \approx E_1 + E_2$)

OCCORRE SAFER APPORTARE UNA CORREZIONE PER
IL TEMPO MORTO DEL RIVELATORE



Se n il tasso d'interazione VERO

m

APPARENTE

τ il tempo morto caratteristico del rivelatore

MODELLO DI RIVELATORE NON PARALIZZABILE

Tempo morto totale $(m\tau) \cdot t_{ms}$

$$\Rightarrow n = \frac{m}{1 - m\tau}$$

Tasso di perdita di eventi $n \cdot m\tau = n - m$

$$(n \rightarrow \infty \quad m \rightarrow \frac{1}{\tau})$$

MODELLO DI RIVELATORE PARALIZZABILE

distrib. degli intervalli temporali $P(t)dt = n e^{-nt} dt$

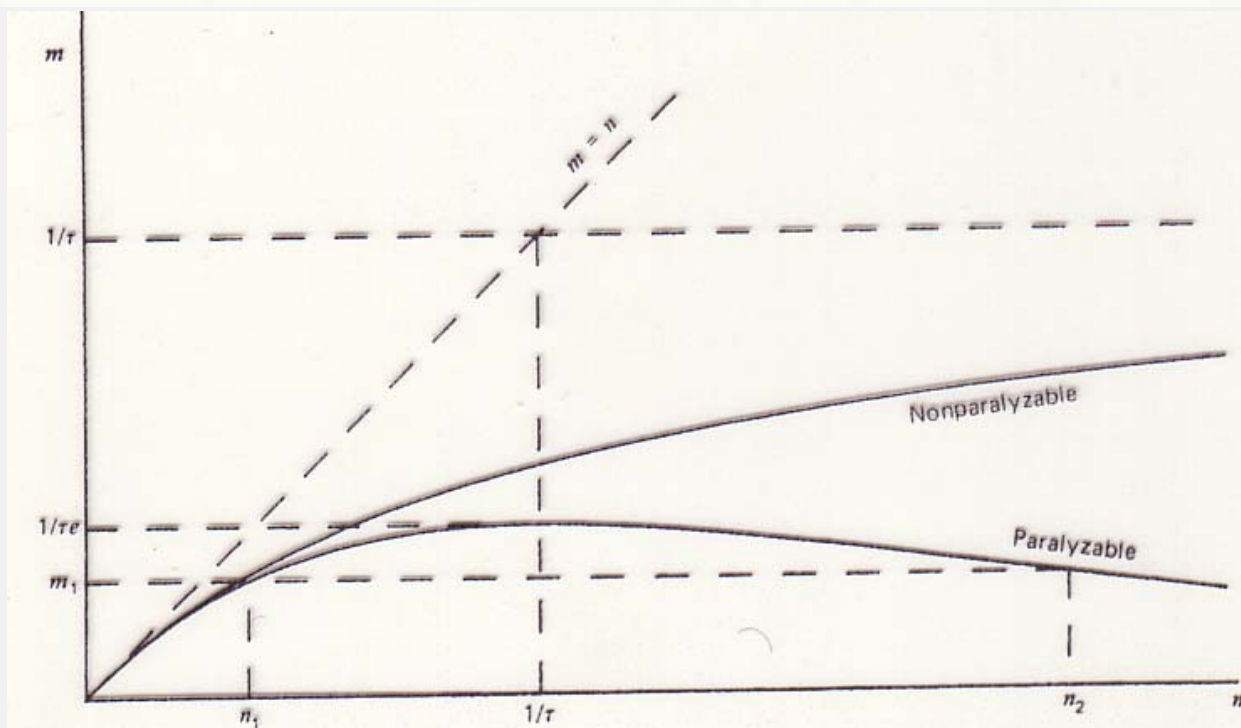
Probab. di avere un intervallo $> \tau$ $P(\tau) = \int_{\tau}^{\infty} P(t)dt = e^{-n\tau}$

Allora $m = n e^{-n\tau}$ ($n \rightarrow \infty \quad m \rightarrow 0$)

PER BASSI RATE

$n \ll \frac{1}{\tau} \rightarrow m \approx n(1 - n\tau)$ IN ENTRAMBI I CASI

ATTENZIONE PER ALTI RATE (ALTO TEMPO MORTE) LA STATISTICA DI CONTEGGIO NON È PIÙ VERAMENTE POISSONIANA (C'È BIAS)



MISURA DEL TEMPO MORTO

METODO CON 2 SORGENTI

SI BASA SU n_1 TASSO DI CONTeggi CON SORGENTE 1
 n_2 2
 n_{12} 1 e 2 assieme
 n_b TASSO DI CONTeggi DI FONDO

È SU m_1, m_2, m_{12}, m_b , TASSI OSSERVATI

allora

$$n_{12} - n_b = (n_1 - n_b) + (n_2 - n_b)$$

$$n_{12} + n_b = n_1 + n_2$$

Posso **SOSTITUIRE** I TASSI VERI CON I TASSI OSSERVATI COME DATI DAI 2 MODELLI DI TEMPO MORTO E RISOLVERE, OTTENENDO

$$\tau = \tau(m_1, m_2, m_{12}, m_b)$$

- CASO SEMPLICE: MODELLO NON PARALIZZABILE CON $m_b = 0$

$$\tau = \frac{m_1 m_2 - [m_1 m_2 (m_{12} - m_1) (m_{12} - m_2)]^{1/2}}{m_1 m_2 m_{12}}$$

METODO CON SORGENTE A VITA MEDIA BASSA

$$n = n_0 e^{-\lambda t} + n_b$$

Se $n_b \neq 0$, allora $n \sim n_0 e^{-\lambda t}$

MOD. DI RIV.
NON PARALIZZABILE

$$m e^{\lambda t} = -n_0 \tau m + n_0$$

$$(x = m \quad y = m e^{\lambda t})$$

MODELLO DI RIV.
PARALIZZABILE

$$\lambda t + \ln m = -n_0 \tau e^{-\lambda t} + \ln n_0$$

$$(x = e^{-\lambda t} \quad y = \lambda t + \ln m)$$

INB

- PENDENZA DELLA RETTA NEL GRAFICO (x, y)
 $= -n_0 \tau$ SEMPRE
- NOTA n_0 , TROVO τ
- SERVE ANCHE PER IDENTIFICARE IL MODELLO ADATTO