

Grandezze fondamentali e unita' di misura per le radiazioni ionizzanti

Adolfo Esposito
Radiation Protection Expert
adolfo.esposito@Inf.infn.it

Fisica delle radiazioni
Sorgenti e campi di radiazioni
Interazione con la materia
Dosimetria



Esposizione umana alle radiazioni e/o sostanze radioattive



Radiobiologia
Relazione fra dose e effetto
Efficacia biologica relativa
Dosimetria

Radioterapia
Radiologia
Medicina Nucleare
Efficacia del trattamento
Qualità dell'immagine
Dosimetria

Radioprotezione
Limitazione della dose
Valutazione della dose
Dosimetria

Concetti – Grandezze – Unità

Grandezze radiometriche – ICRU

**International Commission on
Radiation Units and measurements**

Grandezze dosimetriche – ICRU & ICRP

**International Commission
on Radiological Protection**

Grandezze radioprotezionistiche – ICRP

**grandezze dosimetriche di base
grandezze per la limitazione delle dosi**

Sistema internazionale per le grandezze e le unità di misura – SI

Quantities in Radiological Protection

Calculation for simple phantom (spheres or slab) validation by measurement

Primary Physical Quantities

fluence, Φ
energy fluence, Ψ
air kerma, K_a
exposure, X

Calculation using w_R, w_t and anthropomorphic phantom interaction coefficients for energy absorption

Operational Quantities

ambient dose equivalent, $H^*(d)$
directional dose equivalent, $H'(d, \Omega)$
personal dose equivalent, $H_p(d)$

Related by calibration and calculation



Monitored quantities

Instruments response

ICRP Protection quantities

absorbed dose, D
equivalent dose, H_T
effective dose, E

Estimation by measurements and calculation using w_R and anthropomorphic phantom



I processi di ionizzazione ed eccitazione degli atomi e delle molecole attraversate dalle radiazioni ionizzanti sono all'origine degli effetti indotti osservati nella materia attraversata.

Il problema fondamentale e' associare gli effetti osservati alle caratteristiche fisiche del campo di radiazione ionizzanti.

La dosimetria delle radiazioni ha avuto origine subito dopo la scoperta dei raggi X.

La necessità di protezione contro l'effetto delle radiazioni che le applicazioni di medicina hanno richiesto metodi quantitativi per la misura della "dose di radiazione"

Lo scopo principale del concetto quantitativo della dose di radiazione è ovviamente di predire gli effetti associati e di riprodurre i risultati clinici

Dal termine dose di radiazioni quasi usato in senso «farmacologico» si è passati a metodi fisici per la descrizione e la misura della dose trasformando la dosimetria delle radiazioni in una scienza fisica

Obiettivo centrale della dosimetria sono i metodi per la determinazione quantitativa dell'energia depositata in un dato mezzo dalle radiazioni direttamente o indirettamente ionizzanti

Non ionizzanti

Radiazioni

Direttamente ionizzanti

**Particelle cariche
Elettroni, Protoni, Alfa etc.**

Indirettamente ionizzanti

**Particelle non cariche
Fotoni, Raggi X, Neutroni etc.**

Prima di entrare nel merito delle grandezze dosimetriche e' necessario avere familiarita' con tutte quelle grandezze che definiscono il campo di radiazioni nonche' con tutti i coefficienti che regolano il trasporto dell'energia delle radiazioni ionizzanti.

I concetti, le definizioni e le grandezze che verranno illustrate sono quelle riportate in maniera complete e dettagliata nelle pubblicazioni ICRU (International Commission on Radiation Units and measurements)

L'ICRU ha avuto dalla sua nascita nel 1925 ad oggi come principale obiettivo quello di sviluppare un corpus di raccomandazioni accettabili a livello internazionale in riferimento a

- **Grandezze ed unita' di misura delle radiazioni e della radioattivitа'**
- **Metodologie e procedure relative alla misura e all'applicazione di queste alle grandezze in radiologia clinica e in radiobiologia**
- **Dati fisici necessari all'applicazione delle metodologie stesse**

A questi compiti si sono aggiunti nel corso degli anni guide e raccomandazioni nel campo della radioterapia e nella radioprotezione, con la compilazione di tutti i dati importanti per questi usi specifici così come per l'uso nella ricerca scientifica e per le applicazioni industriali.

Ultimo ma non meno importante è la protezione del paziente.

Stopping Powers for Electrons and Positrons

Report no. 37, 1984

Microdosimetry

Report no. 36, 1983

Radiation Dosimetry: Electron Beams with Energies Between 1 and 50 MeV

Report no. 35, 1984

The Dosimetry of Pulsed Radiation

Report no. 34, 1982

Radiation Quantities and Units

Report no. 33, 1980

Quantification and Reporting of Low-Dose and other Heterogeneous Exposures

Report 86:, 2011

Fundamental Quantities and Units for Ionizing Radiation

Report no. 85, 2010

Reference Data for the Validation of Doses from Cosmic-Radiation Exposure of Aircraft Crew

Report no. 84, 2010

Prescribing, Recording, and Reporting Photon-Beam Intensity-Modulated Radiation Therapy (IMRT)

Report no. 83, 2010

Mammography - Assessment of Image Quality

Report no. 82, 2009

La Commissione svolge un compito di analisi continua della scienza delle radiazioni con l'obiettivo di identificare tutte quelle aree di interesse per le quale ritiene necessario e utile lo sviluppo di guide e raccomandazioni

L'ICRU raccoglie e valuta i dati più recenti riguardanti i problemi di misura e di dosimetria delle radiazioni e raccomanda le modalità di misura più' accettabili per l'uso pratico.

L'ICRU fornisce un sistema di grandezze ed unita' di misura aventi un campo di applicabilita' il piu' vasto possibile.

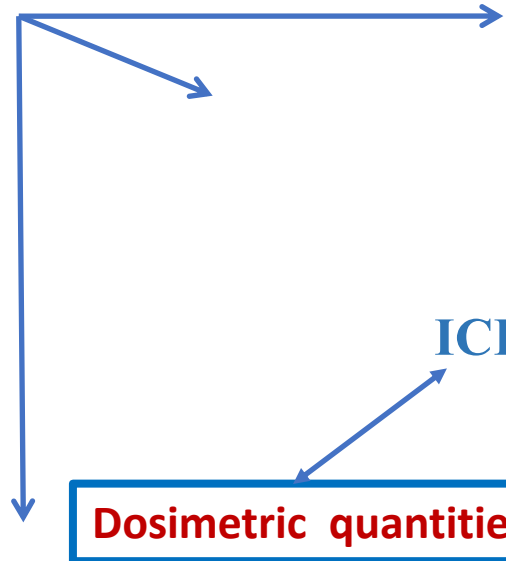
L'ICRU ha scambi continui di informazioni e documenti con tutte le agenize e internazionali coinvolte nella materia specifica

L'ICRU e' parte integrante delle Advisory Agencies che altro non sono che quelle agenzie internazionali che danno linee guida e raccomandazioni che le Regolotary Agencies fanno proprie nelle leggi dei singoli stati

Advisory Agency

IAEA

The IAEA is the world's center for cooperation in the nuclear field.



Radiometric quantities

Dosimetric quantities

The ICRU, has as its principal objective to develop and promulgate internationally accepted recommendations on radiation related quantities and units, terminology, measurement procedures, and reference data for the safe and efficient application of ionizing radiation to medical diagnosis and therapy, radiation science and technology, and radiation protection of individuals and populations.

Radiation protection quantities

The ICRP is an advisory body providing recommendations and guidance on all aspects of protection against ionizing radiation.
-basic dosimetric quantities
-dose limitation quantities

◆ In the European Union the regulations laying down basic safety standard for protection against the danger arising from exposure to ionizing radiation to the Council Directive 2013/59/Euratom of 5 December 2013 1996.

◆ Such Directive, taking into account the recommendations of International Advisory Bodies, lays down basic safety standards for the protection of the health of workers and general public against the danger arising from ionizing radiation.

◆ Each State of the European Union may adopt more restrictive policies.

NB Solo i regolamenti hanno recepimento immediato

Siamo ancora in attesa del recepimento

DISPOSIZIONI FINALI

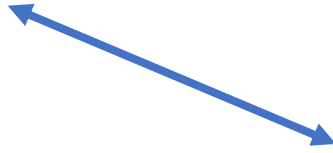
Articolo 106

Recepimento

1. Gli Stati membri mettono in vigore le disposizioni legislative, regolamentari e amministrative necessarie per conformarsi alla presente direttiva entro il 6 febbraio 2018.



ICRP



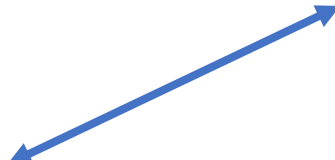
ISO



ICRU



UNSCEAR (the United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation)



NRPB (the National Council on Radiation Protection and Measurements)



- Bureau International de Métrologie Légale
- Bureau International des Poids et Mesures
- European Commission
- Council for International Organizations of Medical Sciences
- Food and Agriculture Organization of the United Nations
- International Council for Science
- International Electrotechnical Commission
- International Labour Office
- International Organization for Medical Physics
- International Radiation Protection Association
- International Union of Pure and Applied Physics

L'ICRU nel corso degli anni ha pubblicato 7 report sulle grandezze fondamentali e sulle unita' di misura per le radiazioni ionizzanti

ICRU Report 11	1968
ICRU Report 19	1971
ICRU Report 33	1980
ICRU Report 51	1993
ICRU Report 60	1998
ICRU Report 65	2001
ICRU Report 85	2011
ICRU Report ??	??

Il termine grandezza usato per la descrizione di un fenomeno fisico è altrimenti chiamato grandezza fisica.

Per confrontare diverse quantità della stessa grandezza fisica è necessario introdurre un campione di riferimento cioè una "unità di riferimento".

La quantità è quindi espressa come il prodotto dell'unità per un valore numerico.

L'ICRU raccomanda sempre l'uso del Sistema Internazionale delle Unità e delle unità da esso derivate anche se ammette unità non prettamente SI quali l'eV o l'unità di massa atomica.

E' ammesso, a causa della sua grande diffusione, l'uso del minuto, dell'ora e del giorno.

La misura delle radiazioni ionizzanti e lo studio degli effetti delle radiazioni richiedono la conoscenza dettagliata del campo di radiazioni nel punto di interesse.

Il campo di radiazioni generato dai vari tipi di particelle quali ad esempio fotoni, neutroni e via dicendo e' caratterizzato dalle grandezze radiometriche in aria e nella materia.

Le grandezze utilizzate per la caratterizzazione del campo di radiazione sono riferibili al numero di particelle o all'energia da esse trasportate e definite in genere in associazione

stocastiche

- *valore casuale non predittibile*
- *prevedibile sulla base di una distribuzione di probabilità.*
- *definita solo su domini finiti, e non infinitesimi (varia nello spazio e nel tempo)*
- *valore atteso o valor medio di una quantità stocastica è il valore medio delle sue misure quando il numero delle osservazioni tende all'infinito*

Le grandezze sono a loro volta grandezze

non stocastiche

- *valore predittibile*
- *funzione continua e differenziabile nello spazio e nel tempo*
- *definita anche per volumi infinitesimali*

L'analisi delle grandezze radiometriche parte dalla definizione piu' generale possibile

- del numero N di particelle e
- dell'energia radiante R ad essa associata

La descrizione completa del campo di radiazioni richiede informazioni sul tipo di particelle considerate, sulla loro energia, la loro distribuzione nel tempo e nello spazio nonché la loro direzione e il punto di interesse.

Nella teoria del trasporto della radiazione il campo dovrebbe essere descritto da grandezze vettoriali

Le specifiche di un campo di radiazioni si raggiungono anche attraverso una successiva differenziazione di N e di R rispetto al tempo, all'area, al volume, alla direzione e all'energia ottenendo quelle grandezze radiometriche scalari.

Di queste mi occuperò in dettaglio

In generale non vi è corrispondenza fra il valore della grandezza scalare e quella vettoriale salvo in alcune condizioni come nel caso di campo unidirezionale

GRANDEZZE RADIOMETRICHE SCALARI

Particle Number

N

Radiant Energy

R

Flux

\dot{N}

Energy Flux

\dot{R}

Fluence

Φ

Energy Fluence

Ψ

Particle Radiance

$\dot{\Phi}$

Energy Radiance

$\dot{\Psi}$

Particle Number, Radiant Energy

The particle number, N , is the number of particles that are emitted, transferred, or received.

Unit: 1

The radiant energy, R , is the energy (excluding rest energy) of the particles that are emitted, transferred or received.

Unit: J

$1\text{J} = 1\text{ N} \cdot m =$ lavoro compiuto dalla forza di 1 N quando il suo punto di applicazione si sposta di 1 metro nella direzione e nel verso della forza stessa

Per particelle di energia E esclusa l'energia di riposo l'energia radiante e'

$$R=NE$$

Le distribuzioni di particelle N_E e di energia radiante R_E rispetto l'energia

$$N_E=dN/dE$$

$$R_E=dR/dE$$

Dove dN e' il numero di particelle fra E ed $E+dE$ e dR e' la loro di energia radiante

$$R_E=N_E E$$

e laddove si parli di volume il numero di particelle n e di energia radiante u per unita' di volume sono

$$n=dN/dV$$

$$n_E=dn/dE$$

$$u_E=n_E E$$

$$u=dR/dV$$

$$u_E=du/dE$$

Flux, Energy Flux

The flux, is the quotient of dN by dt , where dN is the increment of the particle number in the time interval dt , thus

$$\dot{N} = \frac{dN}{dt}$$

Unit: s^{-1}

The energy flux, R , is the quotient of dR by dt , where dR is the increment of radiant energy in time interval dt , thus

$$\dot{R} = \frac{dR}{dt}$$

Unit: W

$1W = 1Js^{-1}$ Potenza di un sistema che produce il lavoro di un J in 1 s

Entrambe le grandezze sono riferibili a una determinata regione dello spazio

Fluence, Energy Fluence

The fluence, Φ , is the quotient of dN by da , where dN is the number of particles incident on a sphere of cross-sectional area da , thus

$$\Phi = \frac{dN}{da}$$

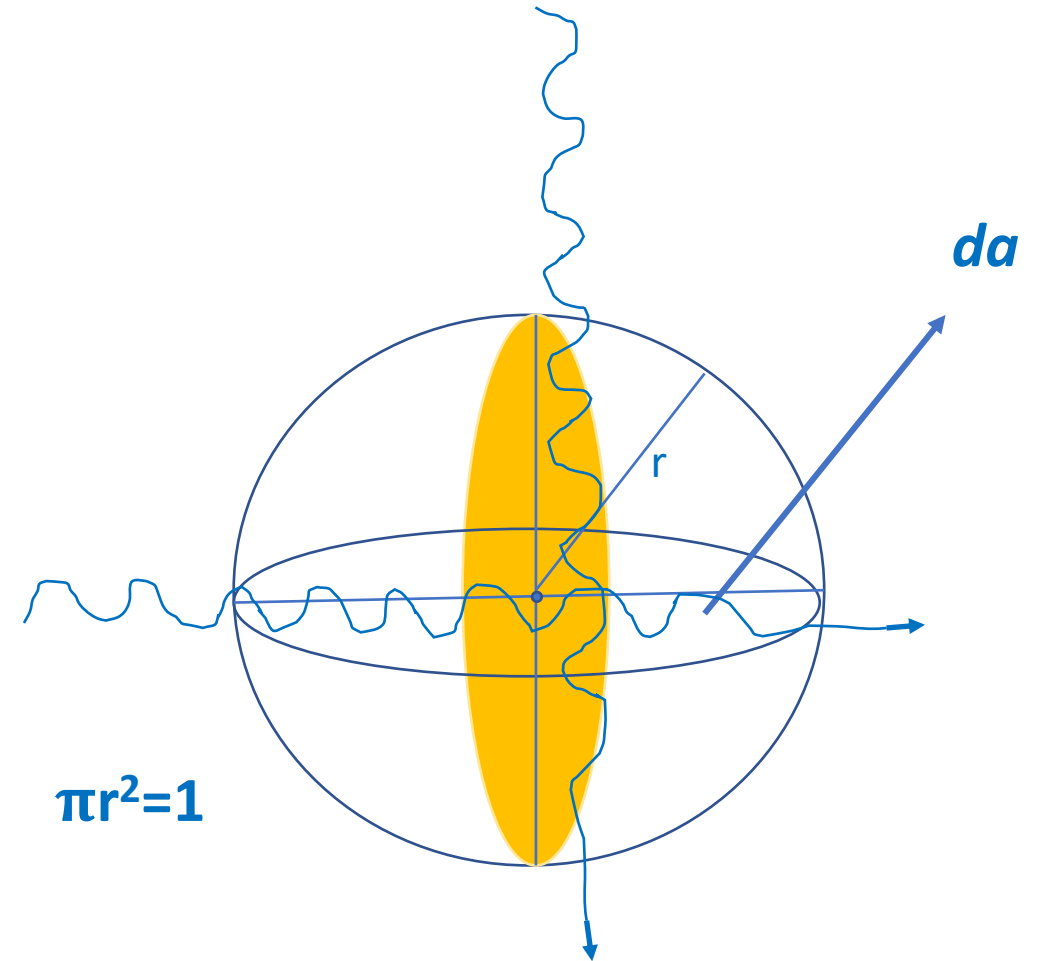
Unit: m^{-2}

The energy fluence, Ψ , is the quotient of dR by da , where dR is the radiant energy incident on a sphere of cross-sectional area da , thus

$$\Psi = \frac{dR}{da}$$

Unit: J m^{-2}

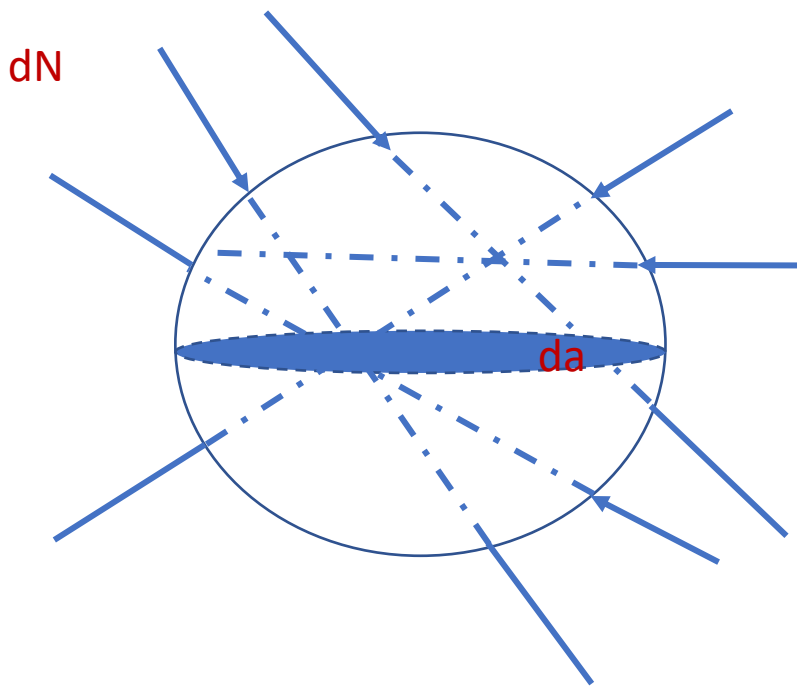
Si fa riferimento a una sfera perche' in questo modo viene soddisfatta sempre la condizione che la sezione da e' sempre perpendicolare alla direzione di incidenza della radiazione qualunque essa sia



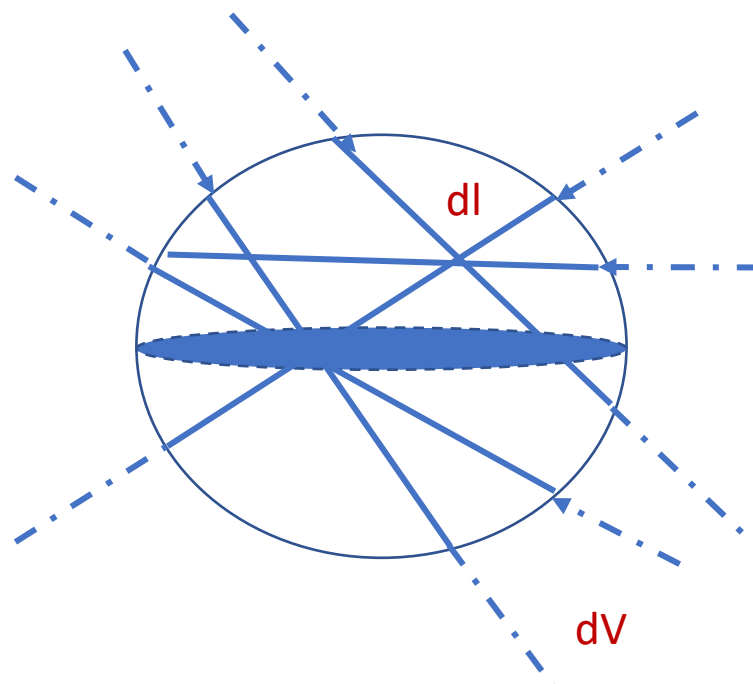
Queste grandezze sono applicabili a tutte quelle situazioni reali in cui le interazioni sono indipendenti dalla direzione delle particelle in arrivo

Definizione alternativa utilizzata molto nei calcoli con codici Montecarlo

La fluenza in un punto P è numericamente uguale al valore atteso della somma delle lunghezze di traccia (assunte rettilinee) che si verificano in un volume infinitesimo dV intorno a P diviso per il volume stesso dV .



$$\Phi = \frac{dN}{da}$$



$$\Phi = \frac{dI}{dV}$$

Definizione valida anche per campi non isotropi e per una qualsiasi forma del volume considerato

Per campi di radiazione che non variano nel tempo vale $\Phi = nvt$ dove n è il numero di particelle per unità di volume e v la loro velocità

Distribuzioni di fluenza di particelle e di fluenza d'energia

$$\Phi_E = \frac{d\Phi}{dE}$$

$$\Psi_E = \frac{d\Psi}{dE}$$

Dove $d\Phi$ e' la fluenza di di particelle fra E ed $E+dE$ e $d\Psi$ e' la loro di energia radiante

$$\Psi_E = E\Phi_E$$

$$\Phi = \int_0^E \Phi_E dE$$

$$\Psi = \int_0^E \Psi_E dE = \int_0^E E\Phi_E dE$$

Talvolta e' utile calcolare il valor medio dell'energia \bar{E} pesando la media sia sulla fluenza di particelle che sulla fluenza di energia. Va sempre specificando sempre su cosa si e' pesato.

$$\bar{E}_\Phi = \frac{\int_0^{E_{max}} E\Phi_E dE}{\int_0^{E_{max}} \Phi_E dE}$$

$$\bar{E}_\Psi = \frac{\int_0^{E_{max}} E\Psi_E dE}{\int_0^{E_{max}} \Psi_E dE}$$

Fluence Rate, Energy Fluence Rate

The fluence rate, $\dot{\Phi}$, is the quotient of $d\Phi$ by dt , where $d\Phi$ is the increment of the fluence in the time interval dt , thus

Unit: $\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$

$$\dot{\Phi} = \frac{d\Phi}{dt}$$

The energy fluence rate, $\dot{\Psi}$, is the quotient of $d\Psi$ by dt , where $d\Psi$ is the increment of the energy fluence in the time interval dt , thus

Unit: W m^{-2}

$$\dot{\Psi} = \frac{d\Psi}{dt}$$

Per campi di radiazione composti da particelle di velocità v
 $\dot{\Phi} = nv$ dove n è il numero di particelle per unità di volume.

Particle Radiance, Energy Radiance

The particle radiance, $\dot{\Phi}_{\Omega}$, is the quotient of $d\dot{\Phi}$ by $d\Omega$, where $d\dot{\Phi}$ is the fluence rate of particles propagating within a solid angle $d\Omega$ around a specified direction, thus

$$\dot{\Phi}_{\Omega} = \frac{d\dot{\Phi}}{d\Omega}$$

Unit: $\text{m}^{-2} \text{s}^{-1} \text{sr}^{-1}$

The energy radiance, $\dot{\Psi}_{\Omega}$, is the quotient of $d\dot{\Psi}$ by $d\Omega$, where $d\dot{\Psi}$ is the energy fluence rate of particles propagating within a solid angle $d\Omega$ around a specified direction, thus

$$\dot{\Psi}_{\Omega} = \frac{d\dot{\Psi}}{d\Omega}$$

Unit: $\text{W m}^{-2} \text{sr}^{-1}$

Lo steradiante e' l'angolo solido con il vertice nel centro di una sfera che sottende una calotta sferica di area pari al quadrato del raggio della sfera stessa.

Distribuzioni della radianza di particelle e della radianza d'energia

$$\dot{\Phi}_{\Omega E} = \frac{d\dot{\Phi}_{\Omega}}{dE}$$

$$\dot{\Psi}_{\Omega E} = E \dot{\Phi}_{\Omega E}$$

$$\dot{\Psi}_{\Omega E} = \frac{d\dot{\Psi}_{\Omega}}{dE}$$

Le grandezze radiometriche finora definite vengono abitualmente usate nelle diverse branche della fisica radiologica e in particolare in dosimetria e in radioprotezione.

Nella teoria del trasporto, i campi di radiazioni, vengono descritti sia con grandezze scalari che con grandezze vettoriali.

Le grandezze vettoriali non servono laddove sono appropriate le grandezze scalari per esempio utilizzando grandezze dosimetriche indipendenti dalla direzione della particella.

In genere non c'è una corrispondenza esatta fra le due grandezze (salvo nel caso unidirezionale) dove il modulo dell'uno coincide con il valore dell'altro

Vengono riportate le grandezze vettoriali in **grassetto** per distinguerle dalle equivalenti grandezze scalari

GRANDEZZE RADIOMETRICHE VETTORIALI

Vector Particle Radiance $\dot{\Phi}_{\Omega}$

Vector Energy Radiance $\dot{\Psi}_{\Omega}$

Vector Fluence Rate $\dot{\Phi}$

Vector Energy Fluence Rate $\dot{\Psi}$

Vector Fluence Φ

Vector Energy Fluence Ψ

Vector Particle Radiance, Vector Energy Radiance

The vector particle radiance, $\dot{\Phi}_{\Omega}$, is the product of Ω by $\dot{\Phi}_{\Omega}$, where Ω is the unit vector in the direction specified for the particle radiance $\Phi\Omega$, thus

$$\dot{\Phi}_{\Omega} = \Omega \dot{\Phi}_{\Omega}$$

$$\dot{\Phi}_{\Omega} = |\dot{\Phi}_{\Omega}|$$

Unit: $\text{m}^{-2} \text{s}^{-1} \text{sr}^{-1}$

The vector energy radiance, $\dot{\Psi}_{\Omega}$, is the product of Ω by $\dot{\Psi}_{\Omega}$, where Ω is the unit vector in the direction specified for the energy radiance $\Psi\Omega$, thus

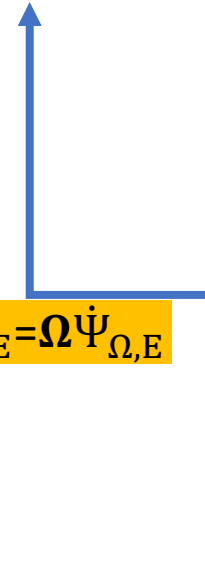
$$\dot{\Psi}_{\Omega} = \Omega \dot{\Psi}_{\Omega}$$

$$\dot{\Psi}_{\Omega} = |\dot{\Psi}_{\Omega}|$$

Unit: $\text{W m}^{-2} \text{sr}^{-1}$

$$\dot{\Phi}_{\Omega,E} = \Omega \dot{\Phi}_{\Omega,E}$$

$$\dot{\Psi}_{\Omega,E} = \Omega \dot{\Psi}_{\Omega,E}$$



La grandezza nella teoria del trasporto e' chiamata densita' di corrente angolare o flusso direzionale

Vector Fluence Rate, Vector Energy Fluence Rate

The vector fluence rate, $\dot{\Phi}$, is the integral of $\dot{\Phi}_\Omega$ with respect to solid angle, where $\dot{\Phi}_\Omega$ is the vector particle radiance in the direction specified by the unit vector Ω , thus

$$\dot{\Phi} = \int \dot{\Phi}_\Omega d\Omega$$

Unit: $\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$

The vector energy fluence rate, $\dot{\Psi}$, is the integral of $\dot{\Psi}_\Omega$, with respect to solid angle, where $\dot{\Psi}_\Omega$ is the vector energy radiance in the direction specified by the unit vector Ω , thus

$$\dot{\Psi} = \int \dot{\Psi}_\Omega d\Omega$$

Unit: W m^{-2}

$$\dot{\Phi} = \int \dot{\Phi}_\Omega d\Omega$$

Le grandezze scalari sono ottenute analogamente. Va messo in evidenza che il valore assoluto di entrambe le grandezze vettoriali variano da un valore 0 in un campo isotropico a $\dot{\Phi}$ e $\dot{\Psi}$ in un campo unidirezionale

$$\dot{\Psi} = \int \dot{\Psi}_\Omega d\Omega$$

Vector Fluence, Vector Energy Fluence

The vector fluence, Φ , is the integral of $\dot{\Phi}$ with respect to time, t , where $\dot{\Phi}$ is the vectorial fluence rate, thus

$$\Phi = \int \dot{\Phi} dt$$

Unit: m^{-2}

The vector energy fluence, Ψ , is the integral of $\dot{\Psi}$ with respect to time, t , where $\dot{\Psi}$ is the vectorial energy fluence rate, thus

$$\Psi = \int \dot{\Psi} dt$$

Unit: J m^{-2}

$$\Phi_E = \frac{d\Phi}{dE} = \int \dot{\Phi}_E dt$$

$$\Psi_E = \frac{d\Psi}{dE} = \int \dot{\Psi}_E dt$$

