ALCUNI COMMENTI PRELIMINARI

Energia delle particelle – unità di misura: eV **(energia acquisita da un elettrone su 1 Volt)**

KeV = 10^3 eV ; MeV = 10^6 eV ; GeV = 10^9 eV ….

Impulso p : si misura in eV/c (e suoi multipli)
massa a riposo m_o: si misura in eV/c^2

MA SPESSO : $\hbar = c = 1$

Unita' di massa (m) e di impulso (p)= eV

$$E^2 - p^2 = m^2$$

massa a riposo protone ~ 1 GeV , massa elettrone = 511 KeV

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

Raggi Cosmici

I raggi cosmici (CR) sono particelle elementari e nuclei in movimento nel cosmo. In particolare sono presenti in prossimità della Terra.

- **I raggi cosmici interagiscono con gli apparati spaziali rilasciando energia al loro interno**
- **I raggi cosmici sono un laboratorio naturale dove studiare astrofisica e fisica delle particelle.**

Cosa sono i RC?

particelle stabili

Radiazione elettromagnetica:

- Radio
- IR
- Visibile
- UV
- X
- γ

Astronomia Astrofisica (Pace)

Particelle cariche:

- p
- e^-
- e^+
- $\bar{p}$
- Nuclei
- Antinuclei?
- ???

Particelle neutre:

- ν
- ???

RC

Onde gravitazionali

1900-1950 RAGGI COSMICI E FISICA DELLE PARTICELLE

Table 1. Discovery of elementary particles

Particle	Year	Discoverer (Nobel Prize)	Method
e^-	1897	Thomson (1906)	Discharges in gases
p	1919	Rutherford	Natural radioactivity
n	1932	Chadwik (1935)	Natural radioactivity
e^+	1933	Anderson (1936)	Cosmic Rays
$\mu^\pm$	1937	Neddermeyer, Anderson	Cosmic Rays
$\pi^\pm$	1947	Powell (1950) , Occhialini	Cosmic Rays
$K^\pm$	1949	Powell (1950)	Cosmic Rays
π^0	1949	Bjorklund	Accelerator
K^0	1951	Armenteros	Cosmic Rays
Λ^0	1951	Armenteros	Cosmic Rays
Δ	1932	Anderson	Cosmic Rays
Ξ^-	1932	Armenteros	Cosmic Rays
$\Sigma^\pm$	1953	Bonetti	Cosmic Rays
p^-	1955	Chamberlain, Segre' (1959)	Accelerators
anything else	1955 $\Longrightarrow$ today	various groups	Accelerators
$m_\nu \neq 0$	2000	KAMIOKANDE	Cosmic rays

Anni 90: ritorno ai RC

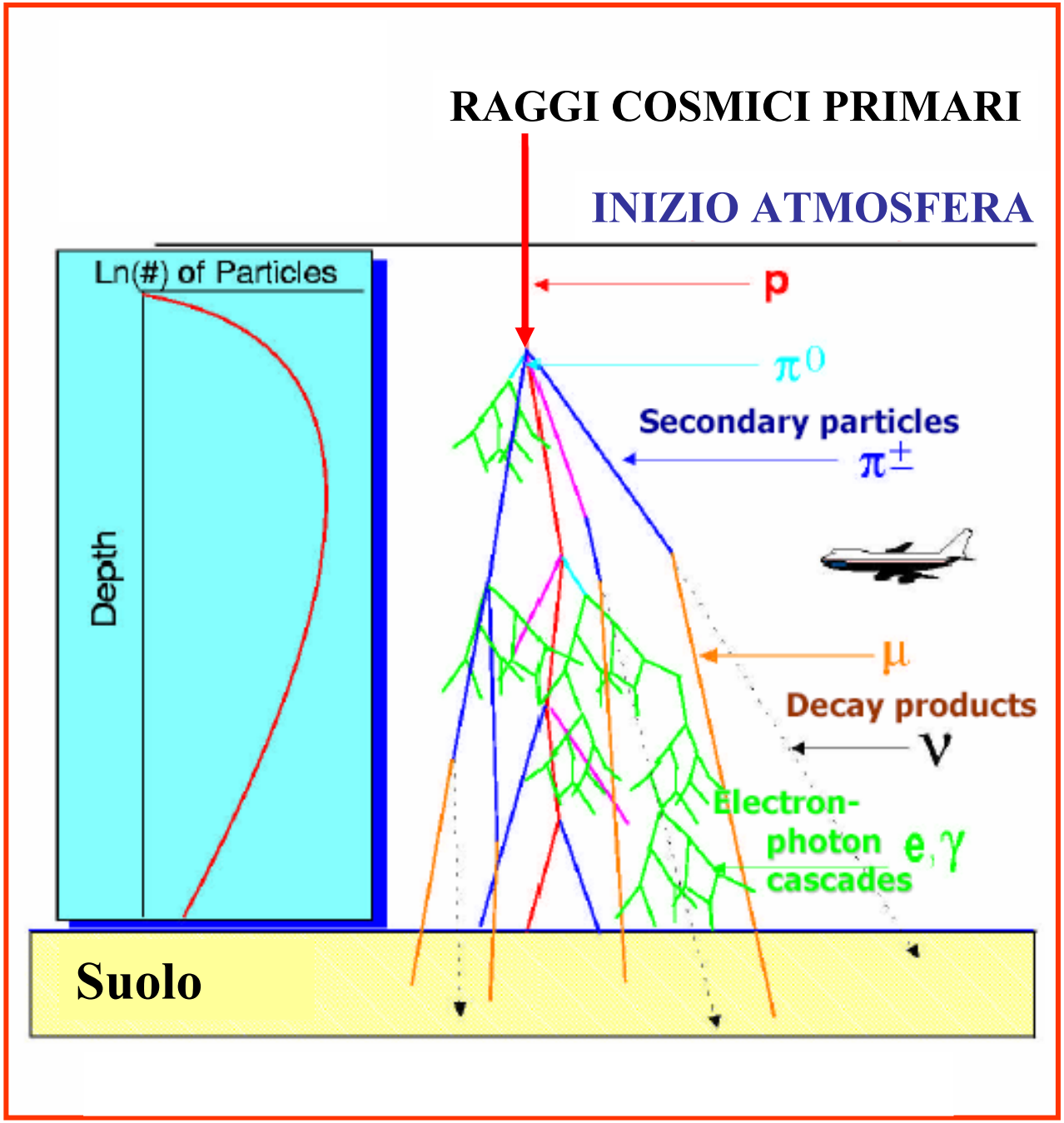
1. Energie in gioco maggiori che in acceleratori

2. Collegamenti interdiscplinari
   - Fisica Nucleare
   - Fisica delle particelle
   - Astrofisica

3. Nuovi mezzi tecnici
   - Grandi rivelatori
   - **Palloni stratosferici**
   - **Satelliti**

Tecnologie spaziali!!!!

La fisica dei RC è uno dei campi di esplorazione scientifica che più si è giovato della possibilità di andare nello spazio!!!!


RAGGI COSMICI PRIMARI
INIZIO ATMOSFERA
Ln(#) of Particles
Depth
p
π^0
Secondary particles
$\pi^{\pm}$
μ
Decay products
ν
Electron-
photon
cascades
e, γ
Suolo

Particelle ed Interazioni

La fisica subnucleare studia i costituenti della materia (partoni e leptoni) e cerca di capire le interazioni cui sono soggetti →

- Interazioni forti (forza relativa a ~10^{-18} cm ~1)
- Interazioni e.m. (" " ~10^{-2})
- Interazioni deboli (" " ~10^{-5})
- Interazioni gravitazionali (" " ~10^{-39})

- La forza gravitazionale è irrilevante in quanto m_p = 938 MeV = 1.67×10^{-27} kg. È comunque a lungo raggio.
- La forza debole (responsabile dei decadimenti radioattivi e delle interazioni di neutrini è poco utile per i rivelatori. È a corto raggio.
- La forza forte è quella che tiene assieme i protoni (e neutroni) nel nucleo. È utilizzata solo nei Calorimetri Adronici. Anche questa forza è a corto raggio.
- La forza e.m., non è altro che la forza coulombiana. È a lungo raggio e quindi, nel caso di particelle cariche domina a grandi distanze fino a ~ 1 f (a piccole distanze domina la forza forte).

Quest' ultima è fondamentale per i rivelatori→ Interazione Radiazione Materia dominata da processi e.m.

4 tipi fondamentali di particelle i cui processi d'interazione con la materia sono classificabili in base alle loro proprietà elettromagnetiche (e la loro massa)

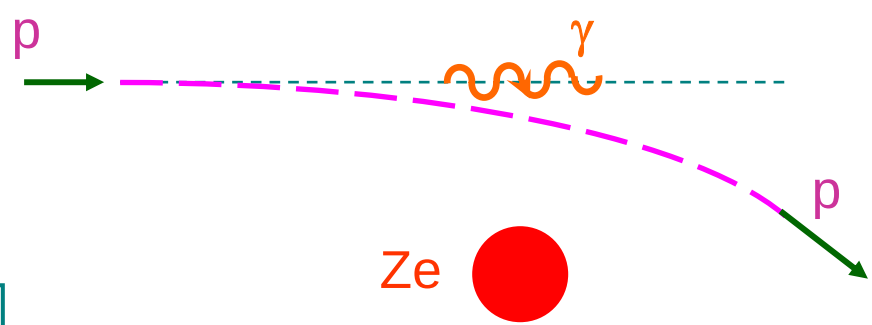
Cariche		Neutre
particelle pesanti	$\Leftrightarrow$	**neutroni (n)**
protoni (p), muoni (μ), pioni (π), …		
elettroni	$\Leftrightarrow$	**fotoni**
		raggi X, raggi γ

Particelle Cariche

PERDITA DI ENERGIA NELLA MATERIA

1. **IONIZZAZIONE (interazione con e^- atomici)**

2. **IRRAGGIAMENTO DI FOTONI** (Bremmstrahlung nel campo coulombiano del nucleo)



$$\sigma_B \propto \frac{m_e^2}{M^2}$$

→ Bremmstrahlung e' trascurabile per protoni

Perdita di energia per ionizzazione

Osserviamo che ***dE/dx (FORMULA DI BETHE BLOCH):***

$$-\frac{dE}{dx} = \rho 4\pi N_0 r_e^2 mc^2 \frac{Z}{A} z^2 \frac{1}{\beta^2}\left[\frac{1}{2}\ln\frac{2mc^2\beta^2\gamma^2 T_{\max}}{I^2} - \beta^2\right]$$

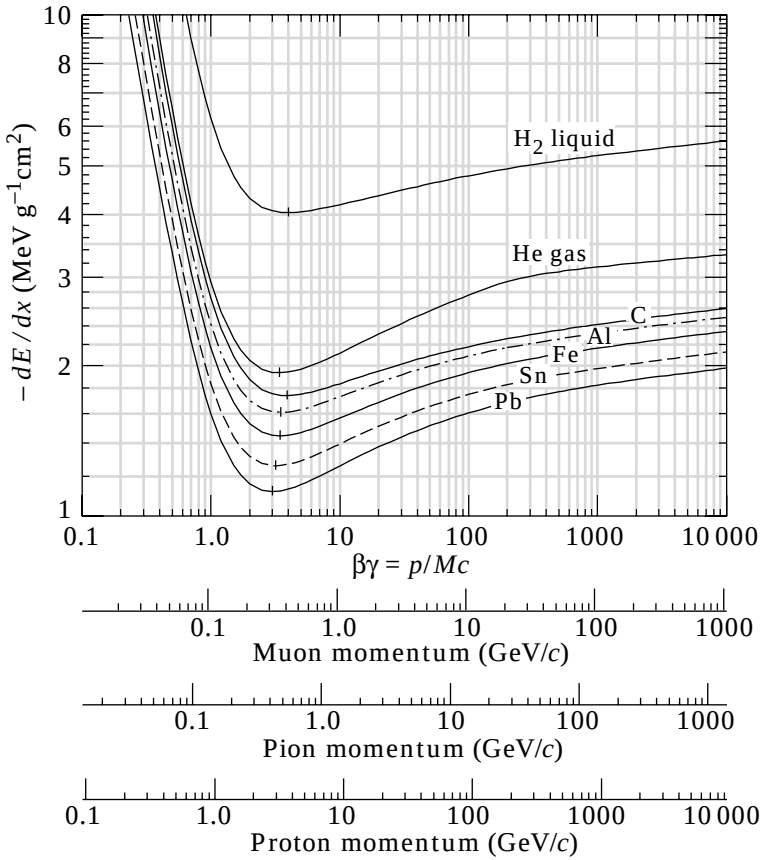
i. Dipende dalla carica della particella incidente (z^2). (interazione Coulombiana).

ii. Per β crescente decresce come $1/\beta^2$ raggiungendo un minimo per $\beta\gamma \sim 3 \div 4$ e poi risale in quanto $\log(\beta^2\gamma^2)$ domina. (risalita relativistica).

iii. Dipende dal potenziale di ionizzazione medio del materiale.

Perdita di energia per ionizzazione

Per Z/A = 0.5
Al minimo di ionizzazione :
~2MeV (g/cm^2)$^{-1}$
(da moltiplicare
per la densita')



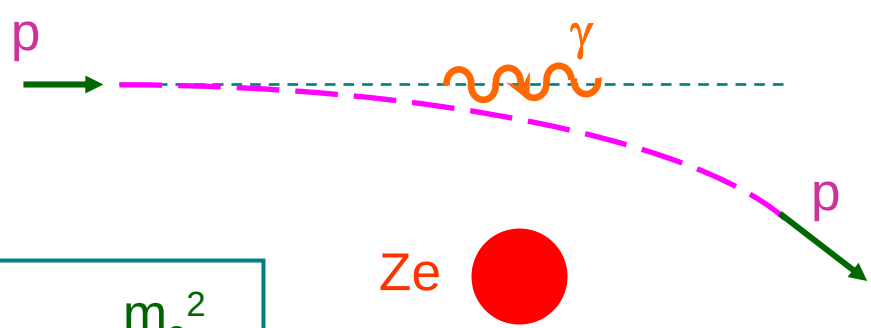
Protoni Emin ~2GeV
Elettroni Emin ~1 MeV

$$-\frac{dE}{dx} = \rho 4\pi N_0 r_e^2 mc^2 \frac{Z}{A} z^2 \frac{1}{\beta^2}\left[\frac{1}{2}\ln\frac{2mc^2\beta^2\gamma^2 T_{\max}}{I^2} - \beta^2\right]$$

Elettroni & Positroni

2. Bremmstrahlung nel campo coulombiano del nucleo

accelerazione nel campo del nucleo atomico $\rightarrow$ deflessione della traiettoria $\oplus$ emissione di radiazione e.m. (fotoni)



$E\gamma = h\nu$

$$\sigma_B \propto q^4 Z^2 \frac{m_e^2}{M^2}$$

Elettroni & Positroni

2 parametri importanti :

1. Energia critica E_c

energia particella incidente per la quale risulta

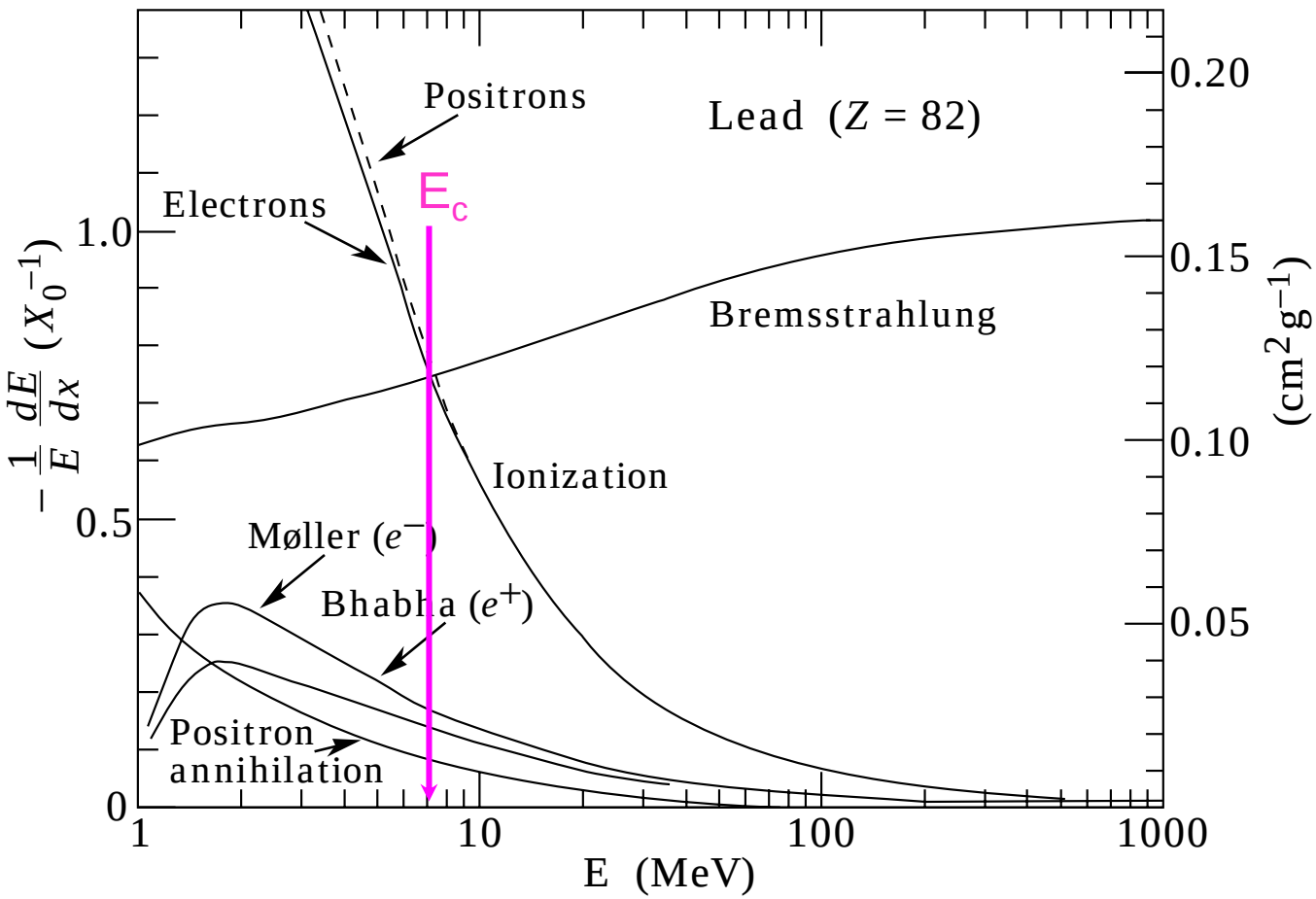
$$-\left.\frac{dE}{dx}\right|_{Coll.} = -\left.\frac{dE}{dx}\right|_{B}$$

$E > E_c \rightarrow$ domina Bremmstrahlung

$e^{\pm}$

$$E_c \sim \frac{800}{Z} \quad \text{MeV}$$

Elettroni & Positroni



DOSE DI RADIAZIONE

UNITA' DI MISURA

DOSE ASSORBITA :

RAD = 100 erg/g = 6,25 10^7 MeV/g=6,25 10^{10} MeV/kg

S.I. Gy(GRAY) = 100 RAD

QUANTO FA MALE ?

DOSE EQUIVALENTE= DOSE X (FATTORE DI QUALITA')

S.I. Sv(Sievert) = 1 Gy X (F.Q.=1)

REM = 1 RAD X (F.Q.=1)

1 Sv = 100 REM

F.Q.=5 (protoni) F.Q.=1 (elettroni)

Sulla terra 300 millirem/year

29.1. Definitions

The International Commission on Radiation Units and Measurements (ICRU) recommends the use of SI units. Therefore we list SI units first, followed by cgs (or other common) units in parentheses, where they differ.

- **Unit of activity** = becquerel (curie):

  1 Bq = 1 disintegration s^{-1} [$= 1/(3.7 \times 10^{10})$ Ci]

- **Unit of absorbed dose** = gray (rad):

  1 Gy = 1 joule kg^{-1} ($= 10^4$ erg g^{-1} = 100 rad)

  $= 6.24 \times 10^{12}$ MeV kg^{-1} deposited energy

- **Unit of exposure**, the quantity of x- or γ- radiation at a point in space integrated over time, in terms of charge of either sign produced by showering electrons in a small volume of air about the point:

  = 1 coul kg^{-1} of air (roentgen; 1 $R = 2.58 \times 10^{-4}$ coul kg^{-1})

  = 1 esu cm^{-3}(= 87.8 erg released energy per g of air)

Implicit in the definition is the assumption that the small test volume is embedded in a sufficiently large uniformly irradiated volume that the number of secondary electrons entering the volume equals the number leaving. This unit is somewhat historical, but appears on many measuring instruments.

- **Unit of equivalent dose** (for biological damage) = sievert [= 100 rem (**r**oentgen **e**quivalent for **m**an)]: Equivalent dose in Sv = absorbed dose in grays $\times$ w_R, where w_R (radiation weighting factor, formerly the quality factor Q) expresses long-term risk (primarily cancer and leukemia) from low-level chronic exposure. It depends upon the type of radiation and other factors, as follows [2]:

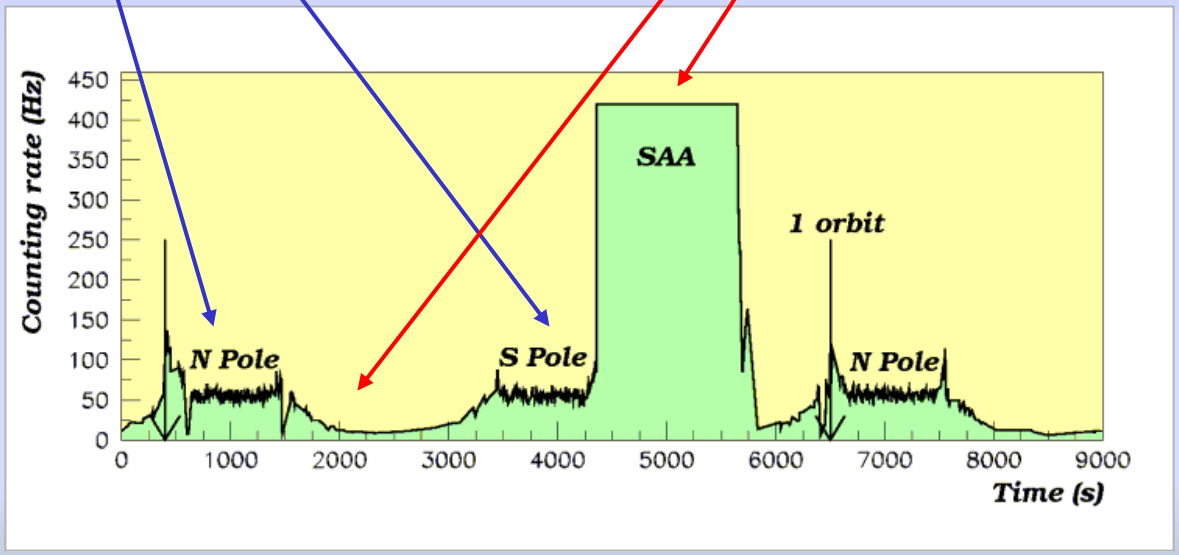
Table 29.1: Radiation weighting factors.

Radiation	w_R
X- and γ-rays, all energies	1
Electrons and muons, all energies	1
Neutrons < 10 keV	5
10–100 keV	10
> 100 keV to 2 MeV	20
2–20 MeV	10
> 20 MeV	5
Protons (other than recoils) > 2 MeV	5
Alphas, fission fragments, & heavy nuclei	20

Orbit analysis

Polar regions:

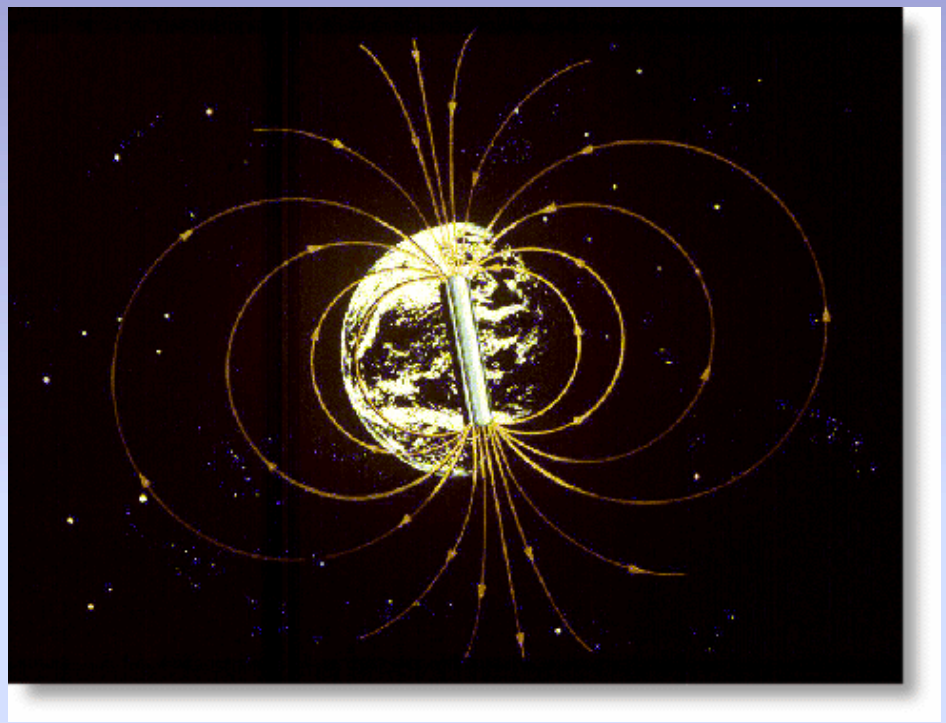
Mid-latitudes:



Il campo magnetico terrestre

Correnti che circolano nel *core* della terra

- 11º tilt from rotation axis
- Inverted dipole
- **Offset** from centre of Earth
- **Multipole** terms
- **Time dependent** terms
- Interaction with solar wind



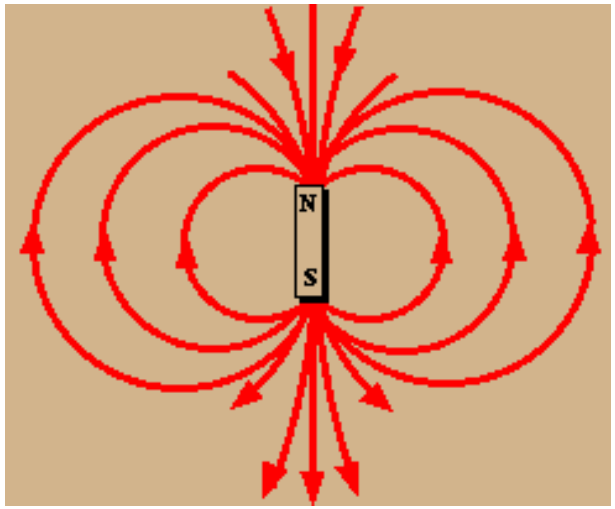
$$B(R,\lambda)=(1+\sin^2\lambda)^{1/2}\, B_0/R^3$$

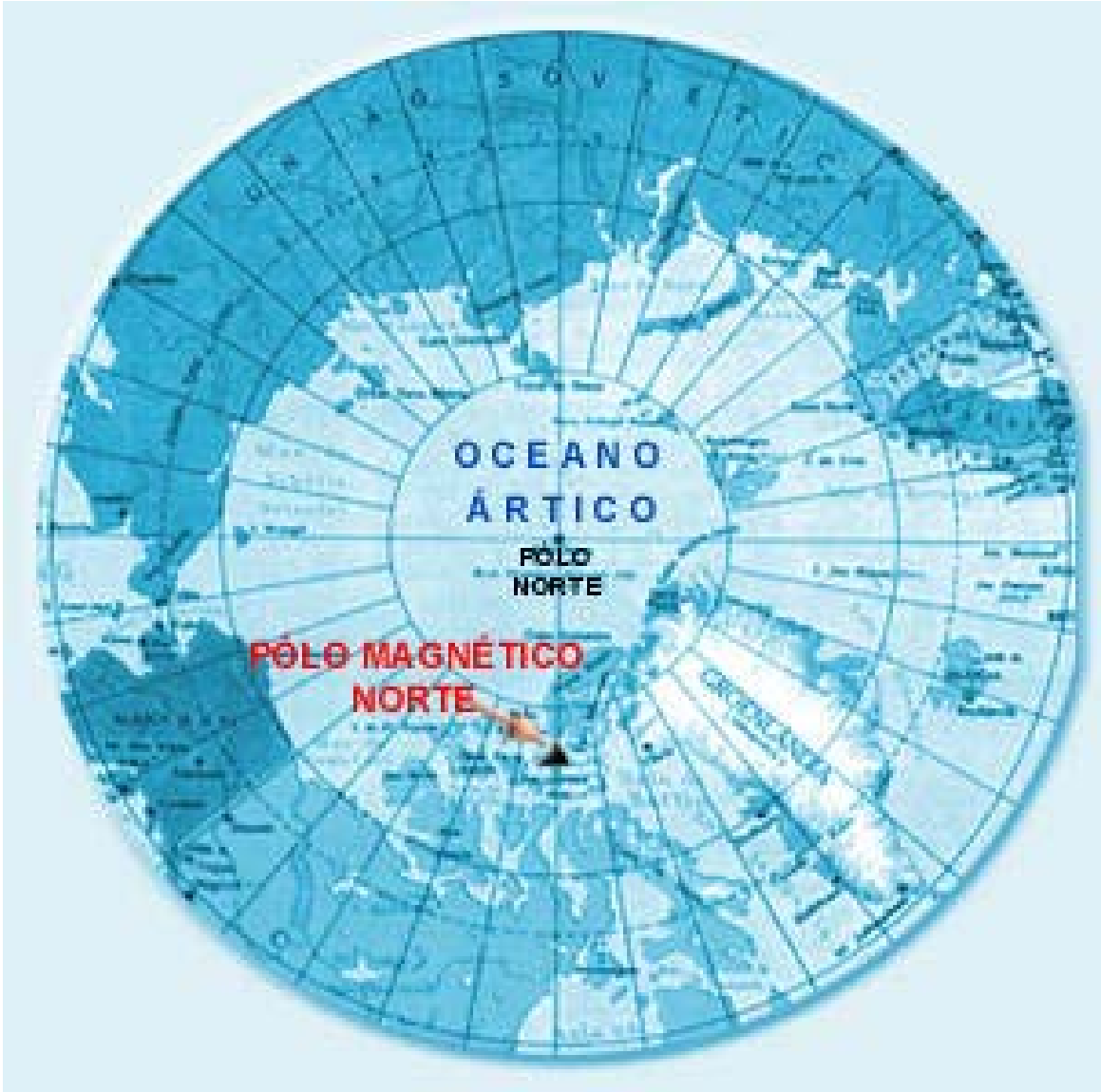
B_0=0.3 gauss

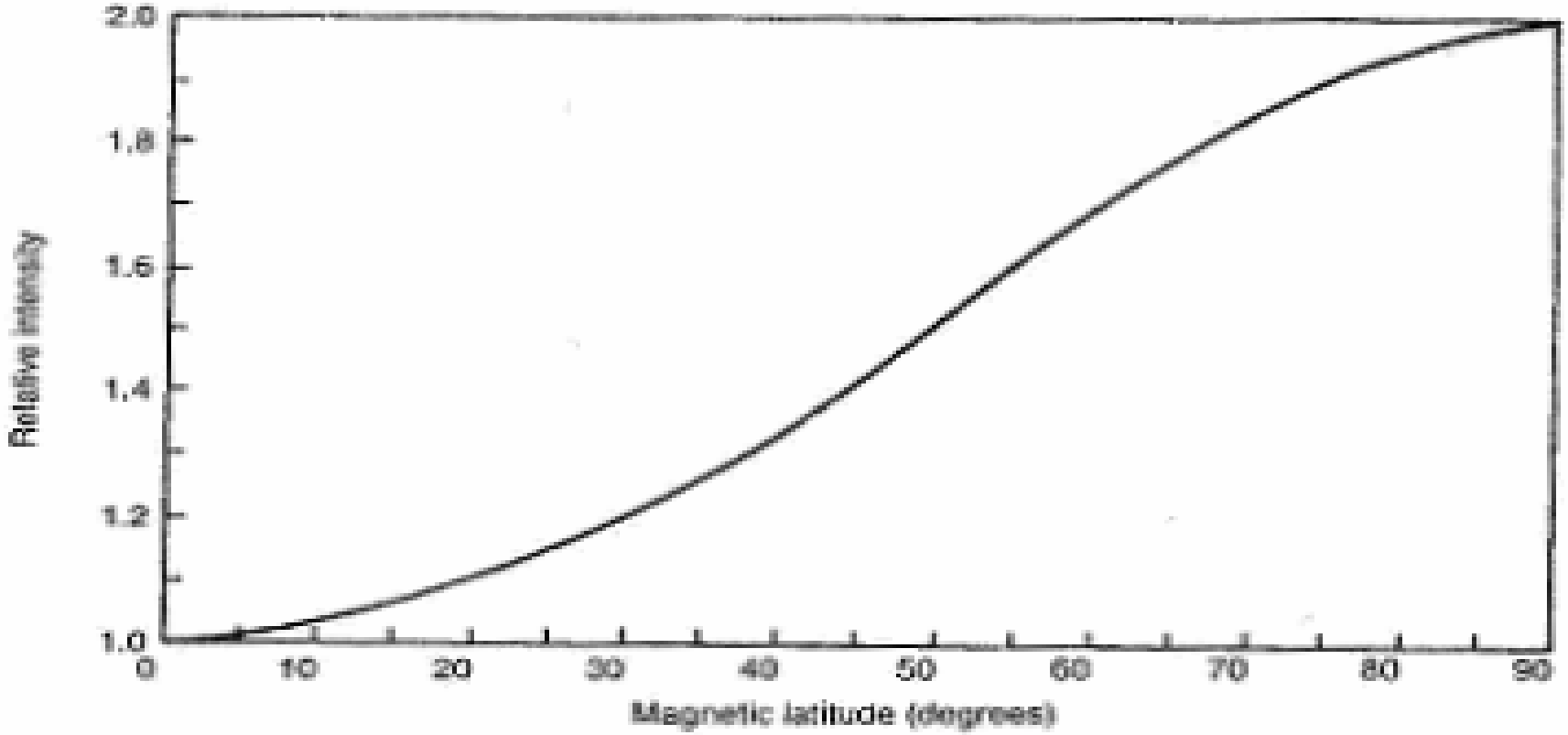
λ=latitudine magnetica

R in unità di raggi terrestri

(1 Tesla = 10^4 gauss)


N
S


OCEANO
ÁRTICO
PÓLO
NORTE
PÓLO MAGNÉTICO
NORTE



(b)

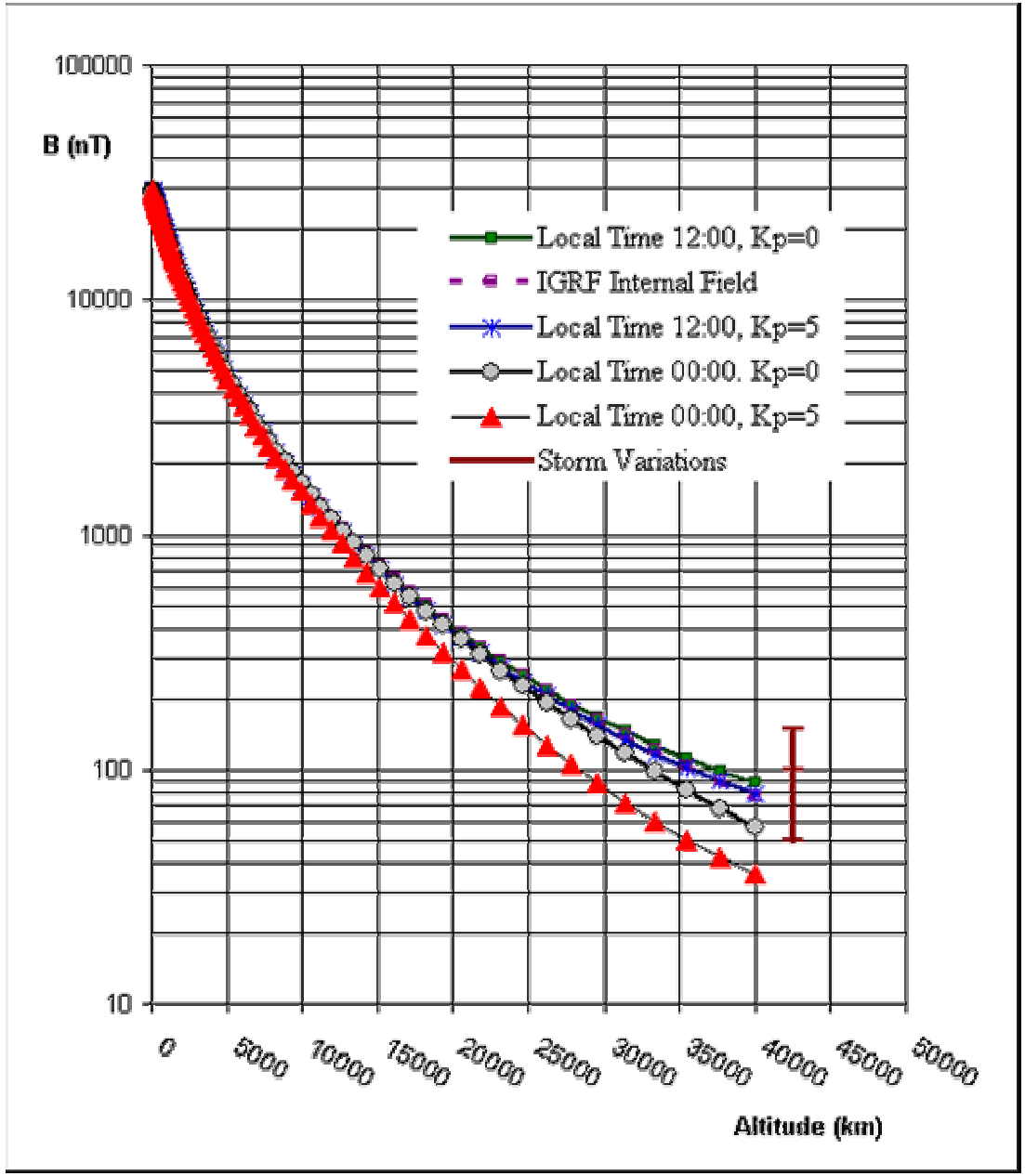
Figure 2.13 (a) Earth's magnetic field intensity at the magnetic equator as a function of altitude (Adapted from Reference [12]) and (b) relative intensity of the Earth's magnetic field as a function of magnetic latitude (Reproduced by permission of Kluwer Academic Publishers)

$$B(R,\lambda)=(1+\sin^2\lambda)^{1/2}\, B_0/R^3$$

B_0=0.3 gauss

λ=latitudine magnetica

R in unità di raggi terrestri



$$B(R,\lambda)=(1+\sin^2\lambda)^{1/2}\, B_0/R^3$$

RAGGI COSMICI (CR) E AMBIENTE SPAZIALE

PRINCIPALI CONTRIBUTI

- **CR solari - ‘Vento solare’ ; ‘Solar Flares’ (brillamenti)**

- **CR galattici**

- **CR intrappolati nel campo magnetico terrestre (fasce di Van Allen)**

RAGGI COSMICI SOLARI

FLUSSO CONTINUO

Vento solare (pressione di radiazione!!!!)

v=450 km/sec ; E ~ KeV

ρ = 9 p/cm3 ; B ~ 10^{-5} Gauss

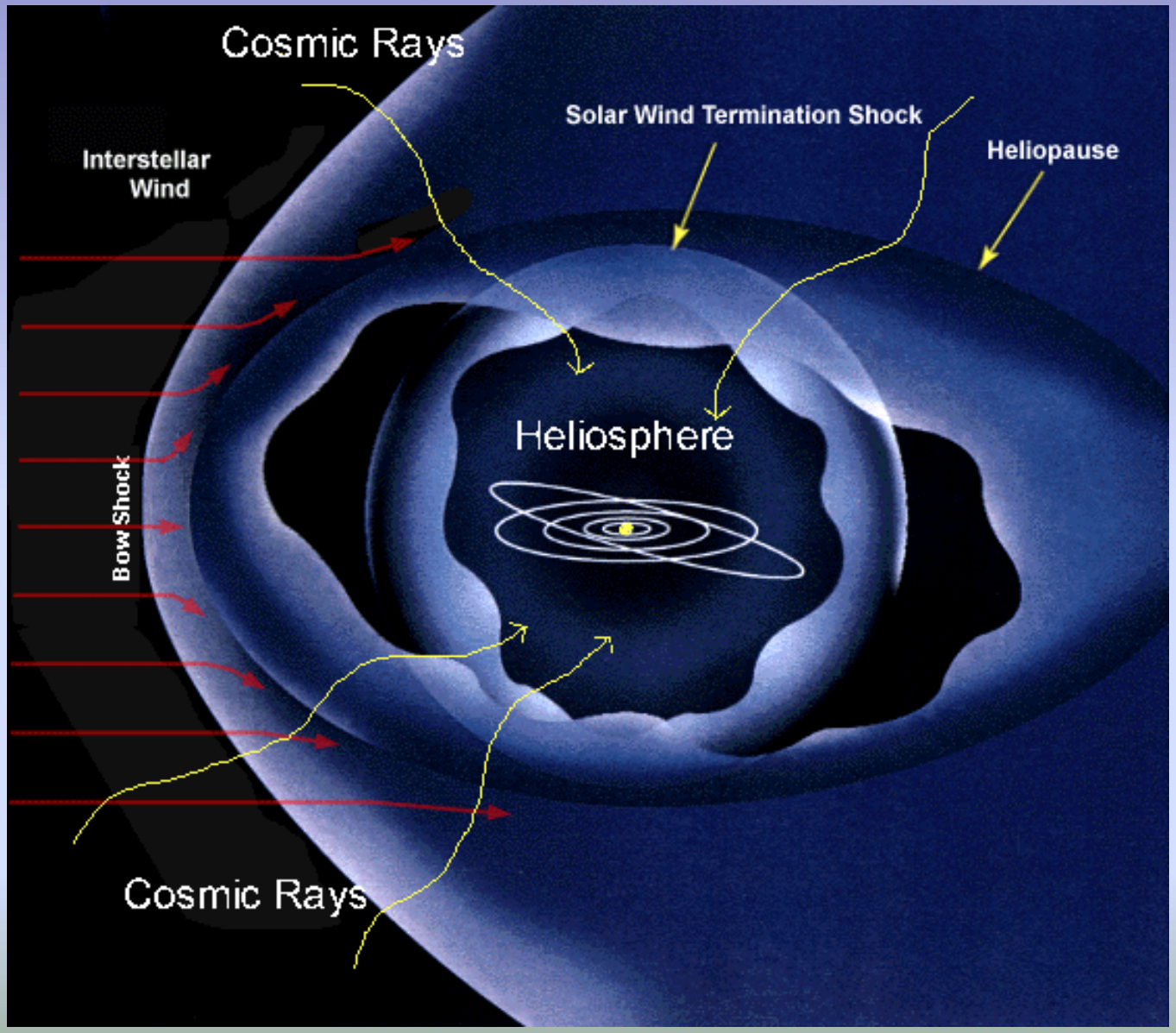
Grossa variabilità con il tempo (macchie, flares etc.)

Solar Flares (brillamenti)

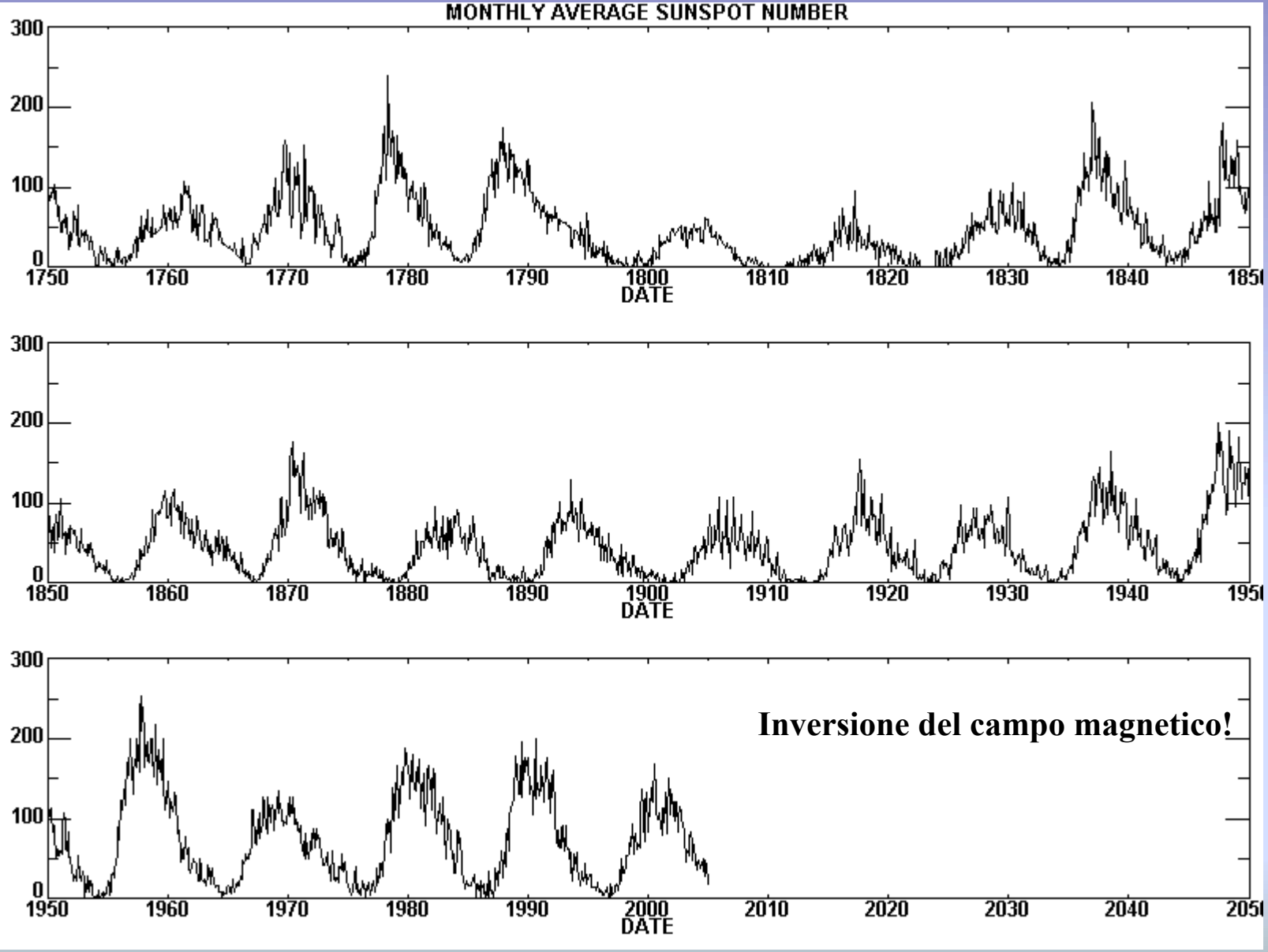
MeV - 10 MeV

10^{11} / cm^{-2}

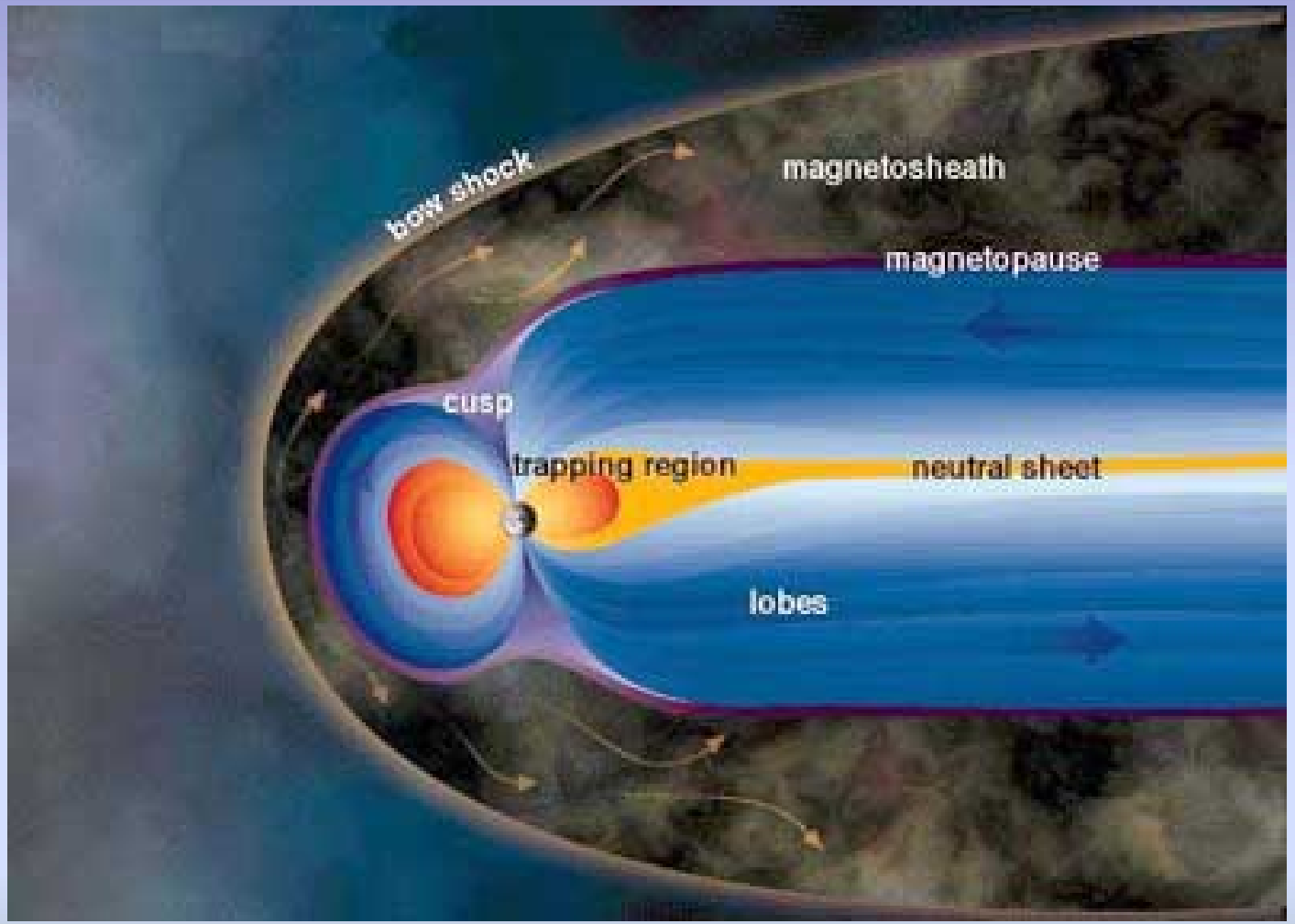
VENTO SOLARE – FINO A 100 U.A.



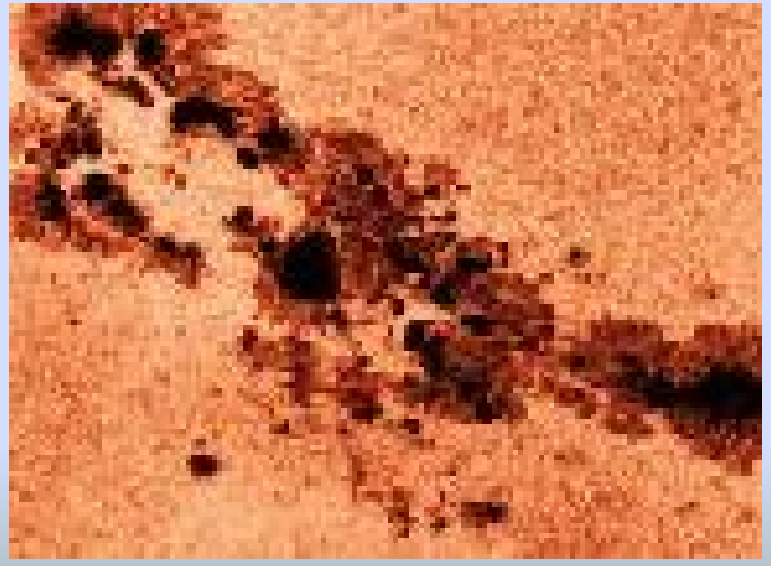
VARIAZIONE ATTIVITA' SOLARE - 11-22 anni

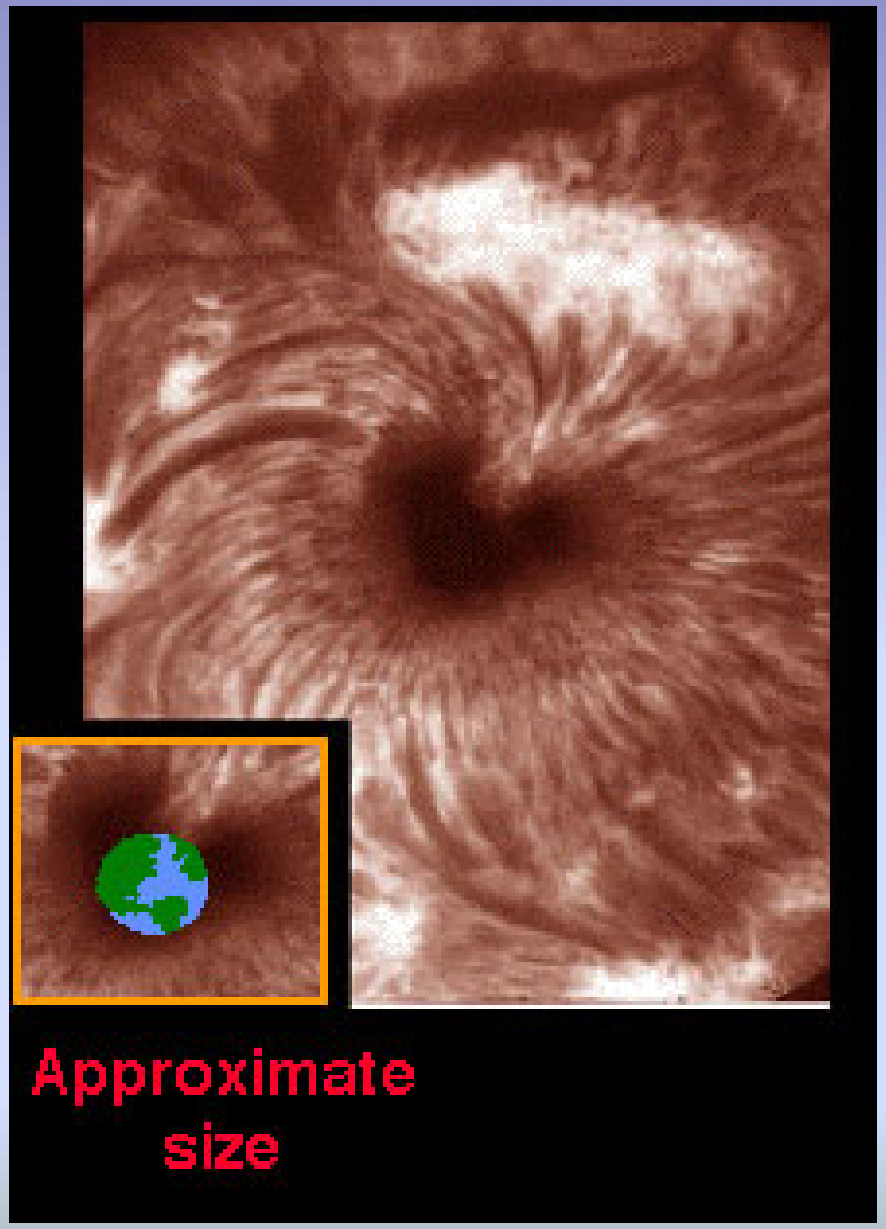


MODIFICA DELLA MAGNETOSFERA DOVUTA AL VENTO SOLARE



Fino a 1000 Re




Approximate
size

Solar Flare
1971 October 10
Big Bear Solar Observatory
E BBSO

BRILLAMENTI E RAGGI COSMICI

La frequenza dei brillamenti e' collegata al ciclo solare.

L'intensita' dei brillamenti varia su vari ordini di grandezza

La frequenza varia da 1/mese ad 1/anno

Energia dei protoni anche fino al GeV

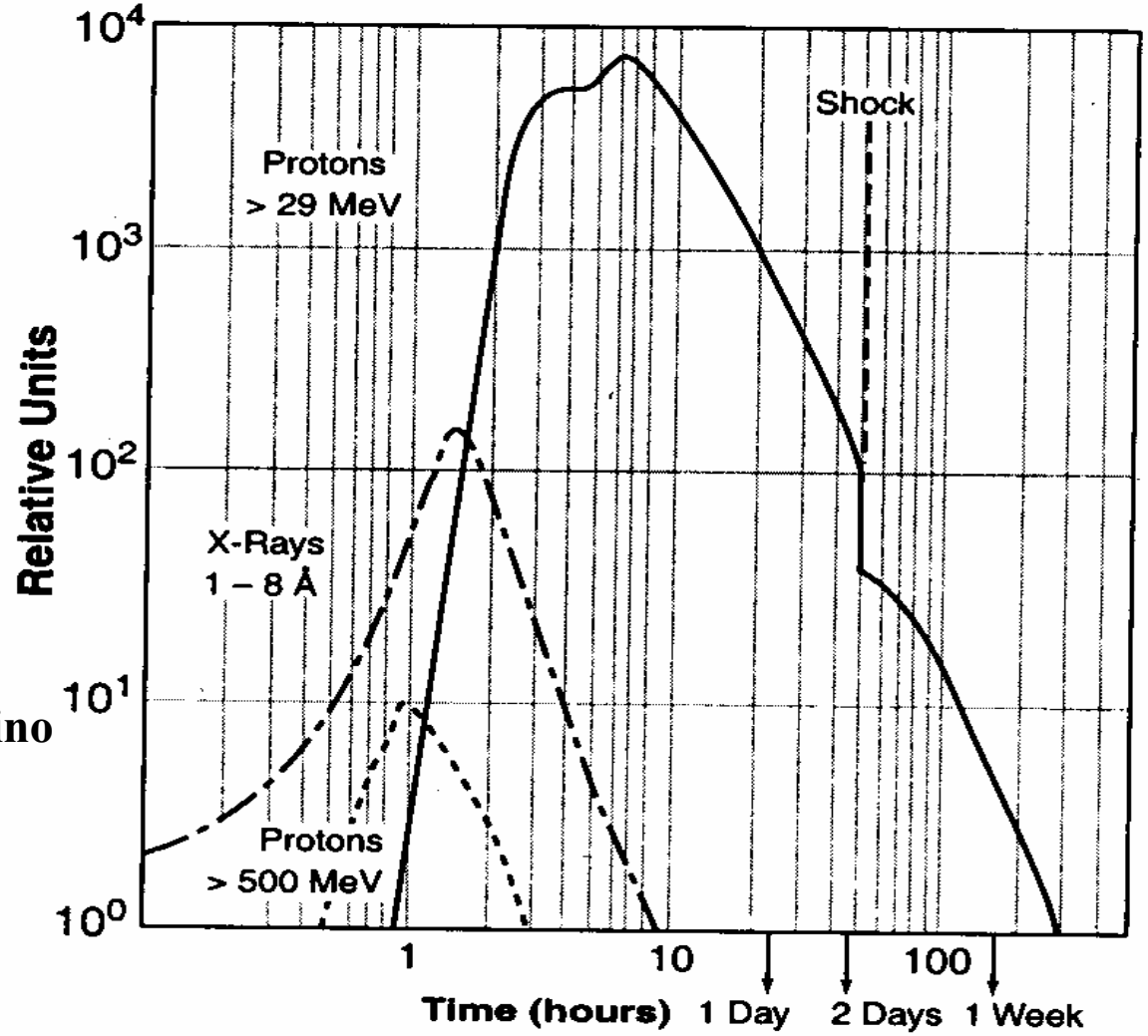


Fig. 8-11. Typical Time Evolution of a Solar Particle Event Observed on Ea

Solar wind (KeV)

Solar Flare (MeV-GeV)

Galactic CR (E>GeV)

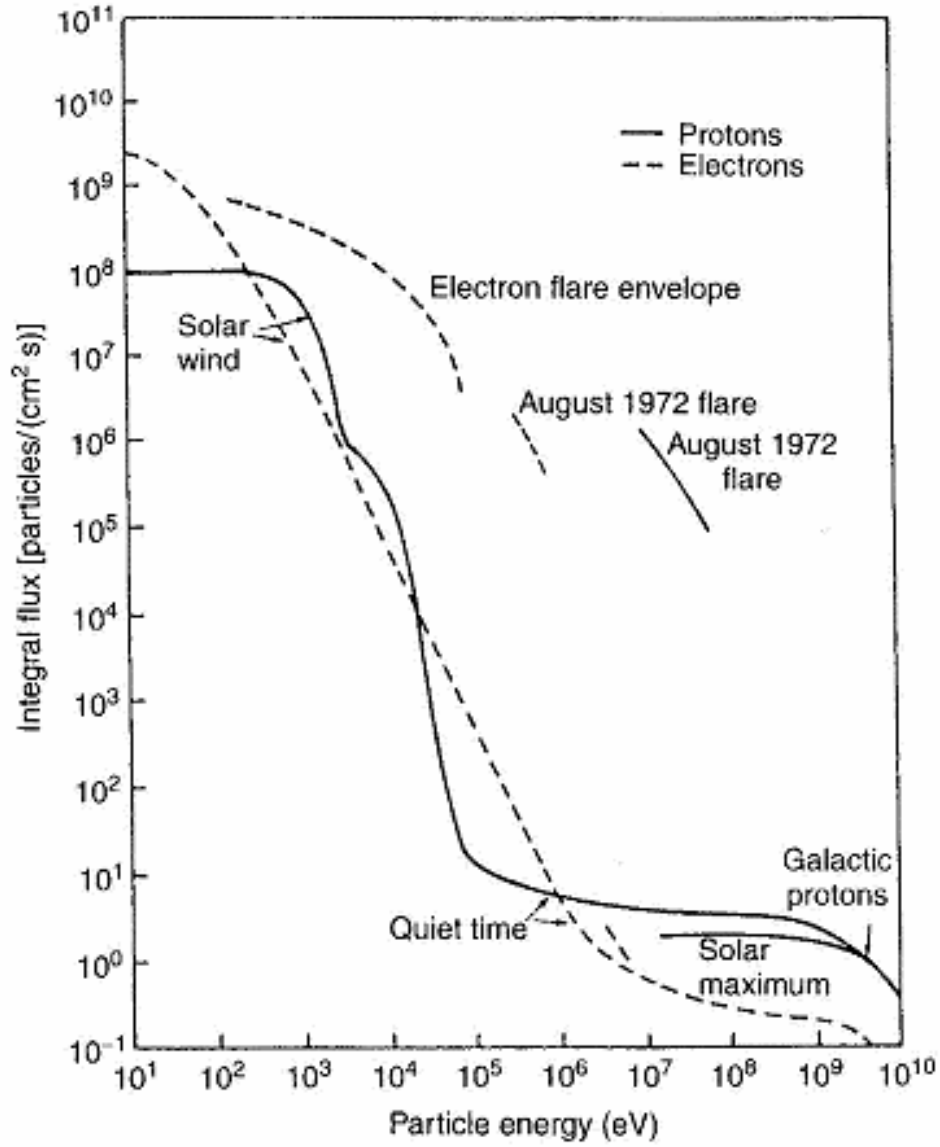
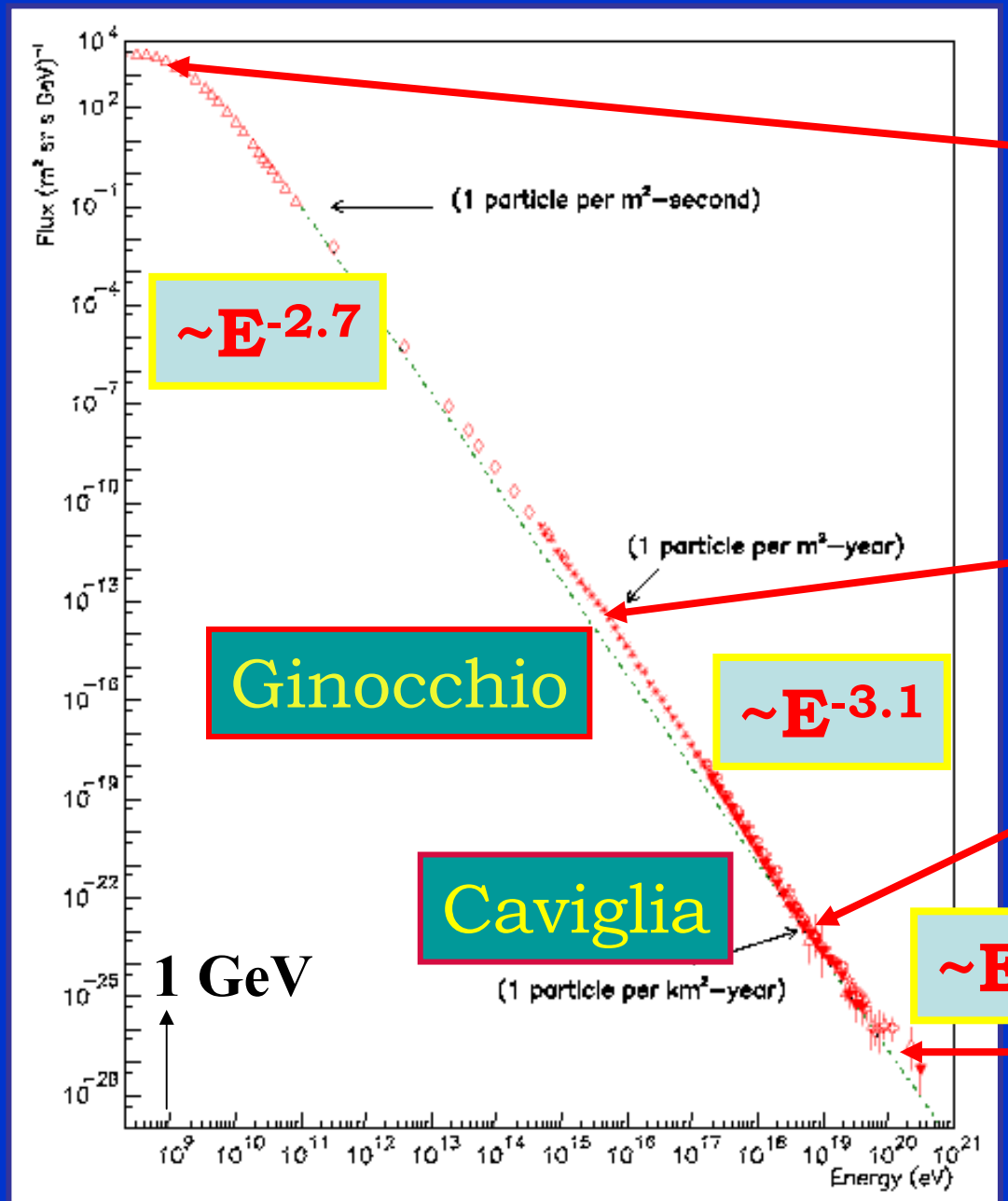


Figure 2.9 Electron and proton spectra (From *Solar Cell Array Design Handbook* by H. S. Rauschenback, Copyright © 1980 by Van Nostrand Reinhold. All rights reserved)

RAGGI COSMICI GALATTICI

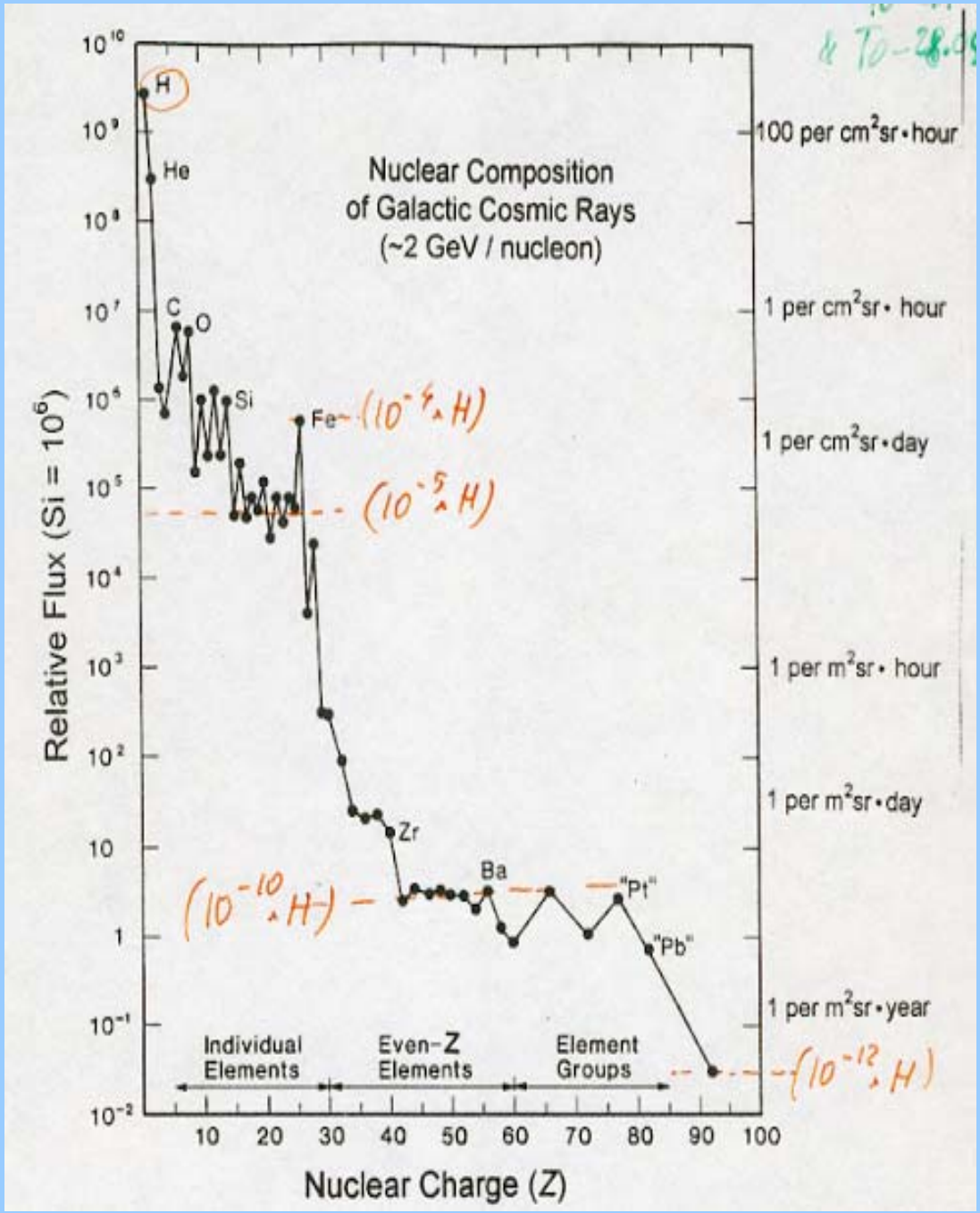


~10^2/m^2/secondo

~1/m^2/anno

~1/km^2/anno

~1/km^2/secolo


Nuclear Composition
of Galactic Cosmic Rays
(~2 GeV / nucleon)
Relative Flux (Si = 10^6)
Nuclear Charge (Z)
100 per cm²sr • hour
1 per cm²sr • hour
1 per cm²sr • day
1 per m²sr • hour
1 per m²sr • day
1 per m²sr • year
H
He
C
O
Si
Fe
Zr
Ba
"Pt"
"Pb"
Individual Elements
Even-Z Elements
Element Groups
(10^-4 × H)
(10^-5 × H)
(10^-10 × H)
(10^-12 × H)

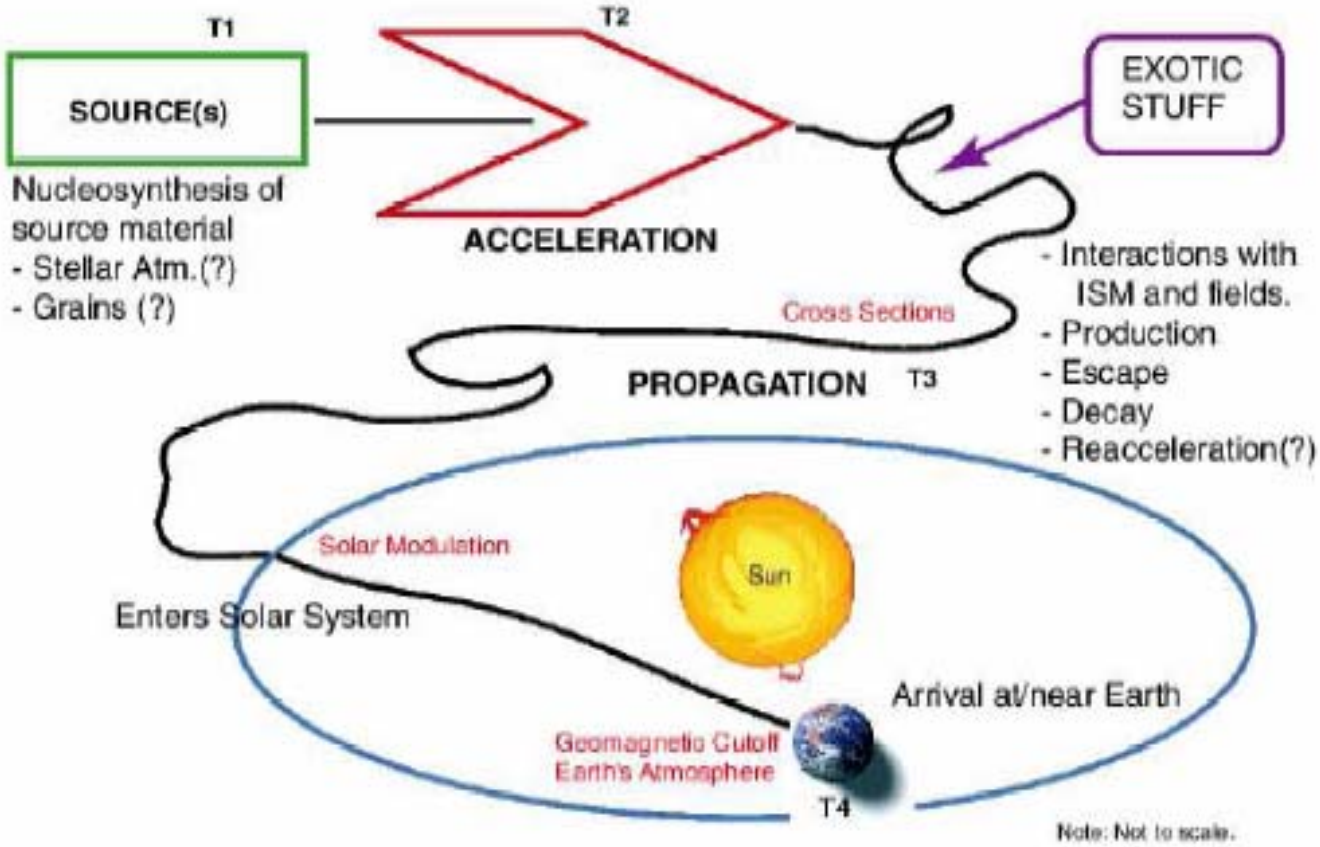
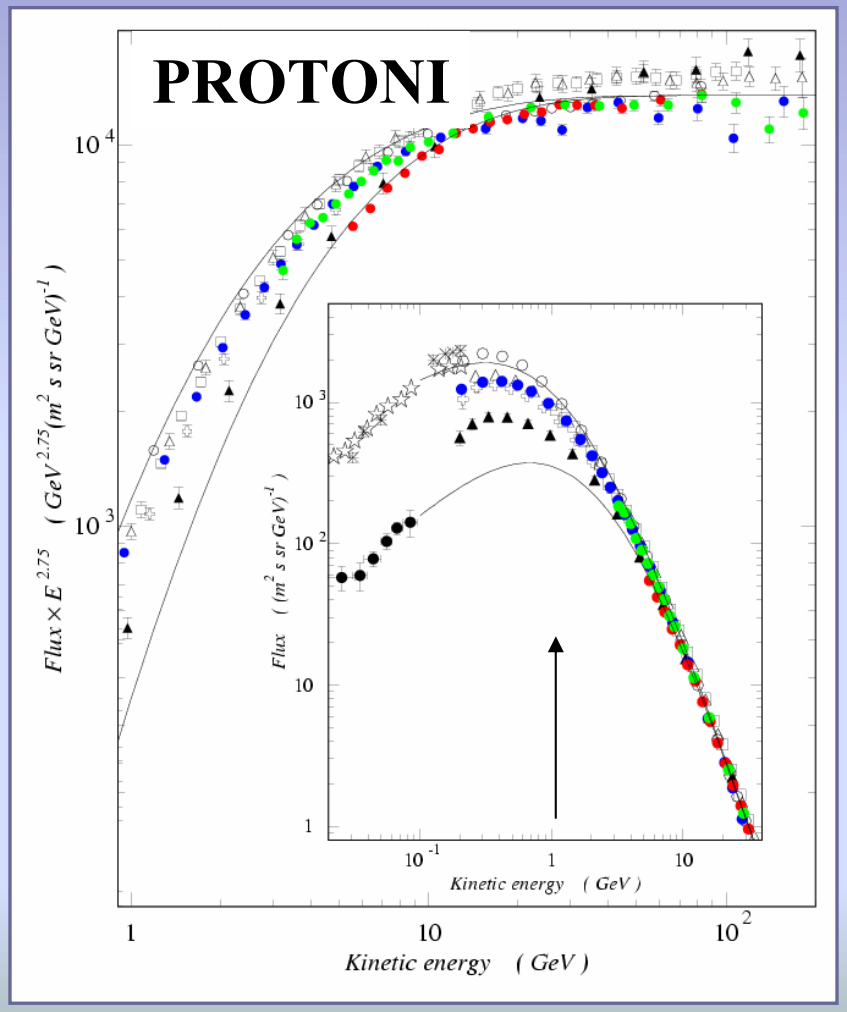
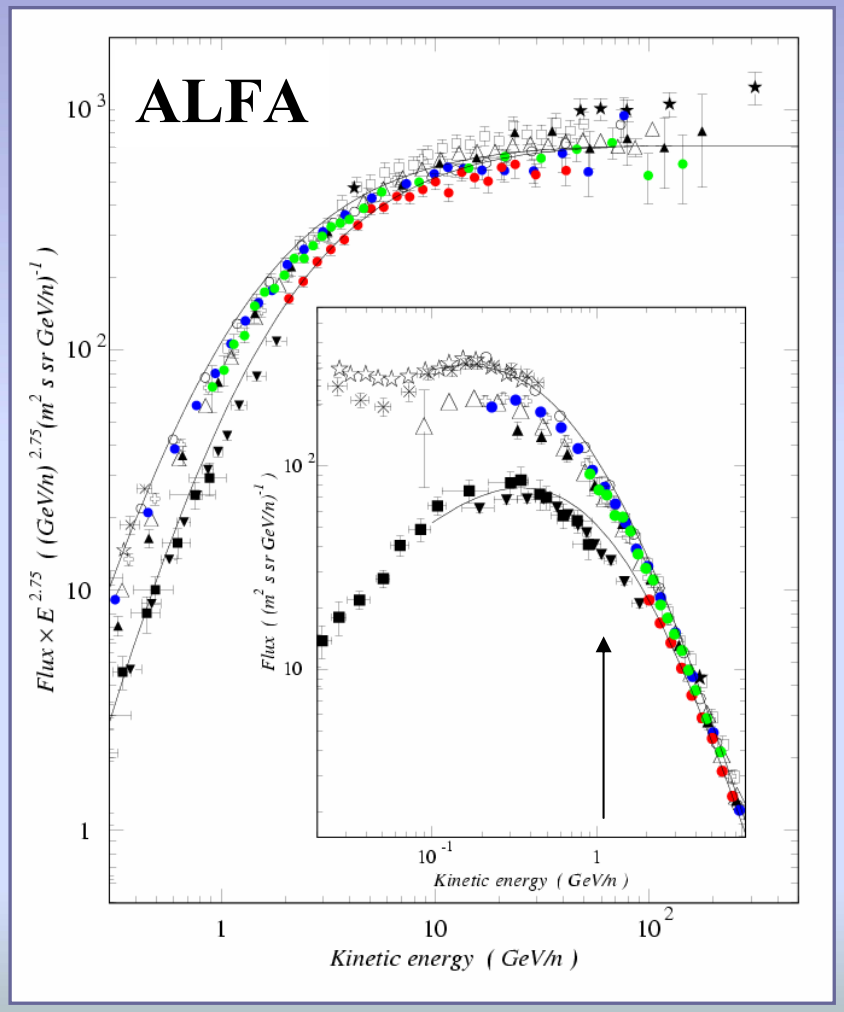


Figura 1.1: Viaggio dei raggi cosmici dalle sorgenti fino alla Terra [2].

Misure all'interno dell'eliosfera

→ Flussi modulati in funzione dell'attività solare





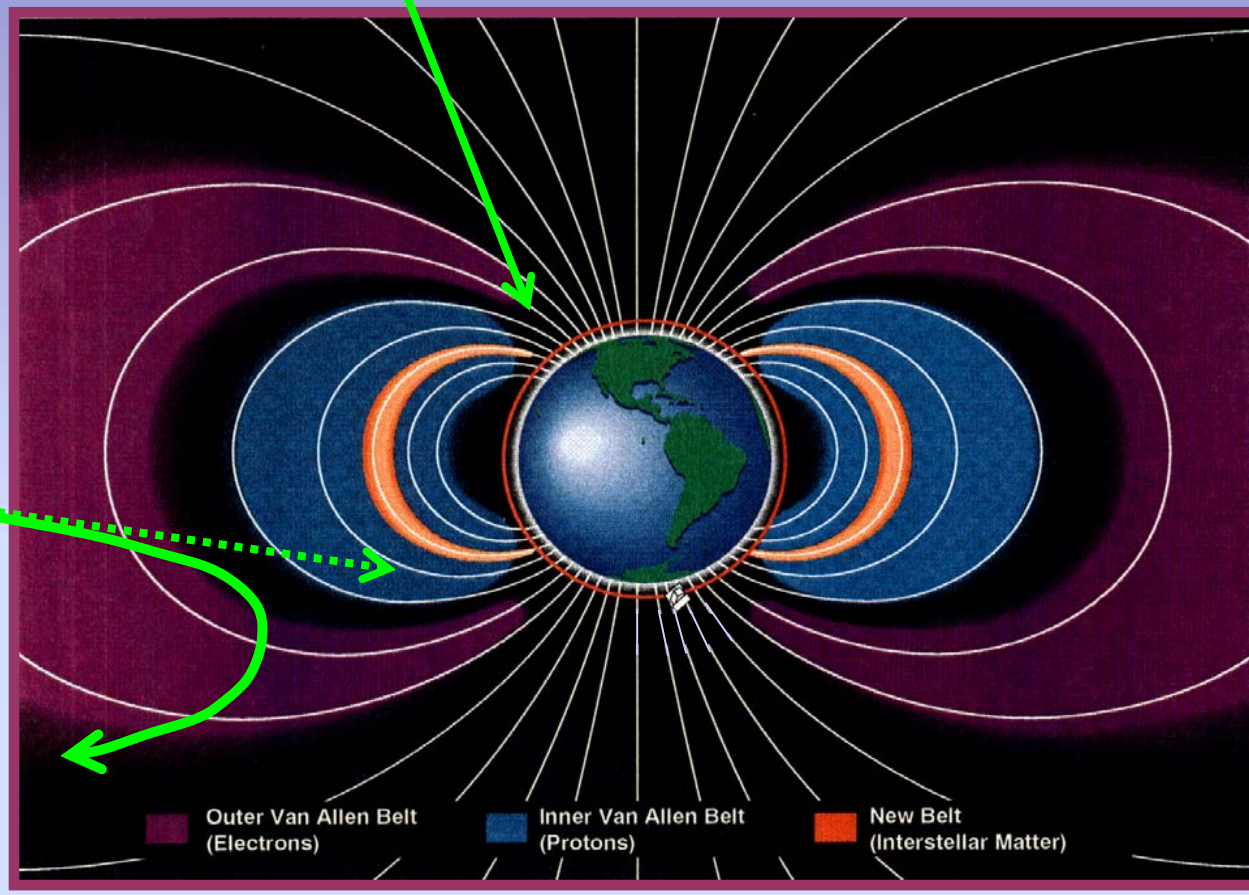
EFFETTO 'RIMBALZO' (CUTOFF GEOMAGNETICO)

Per poter entrare nella magnetosfera :

Per protoni

All'equatore : E>15GeV

A 60º di latitudine : E>0.5 GeV



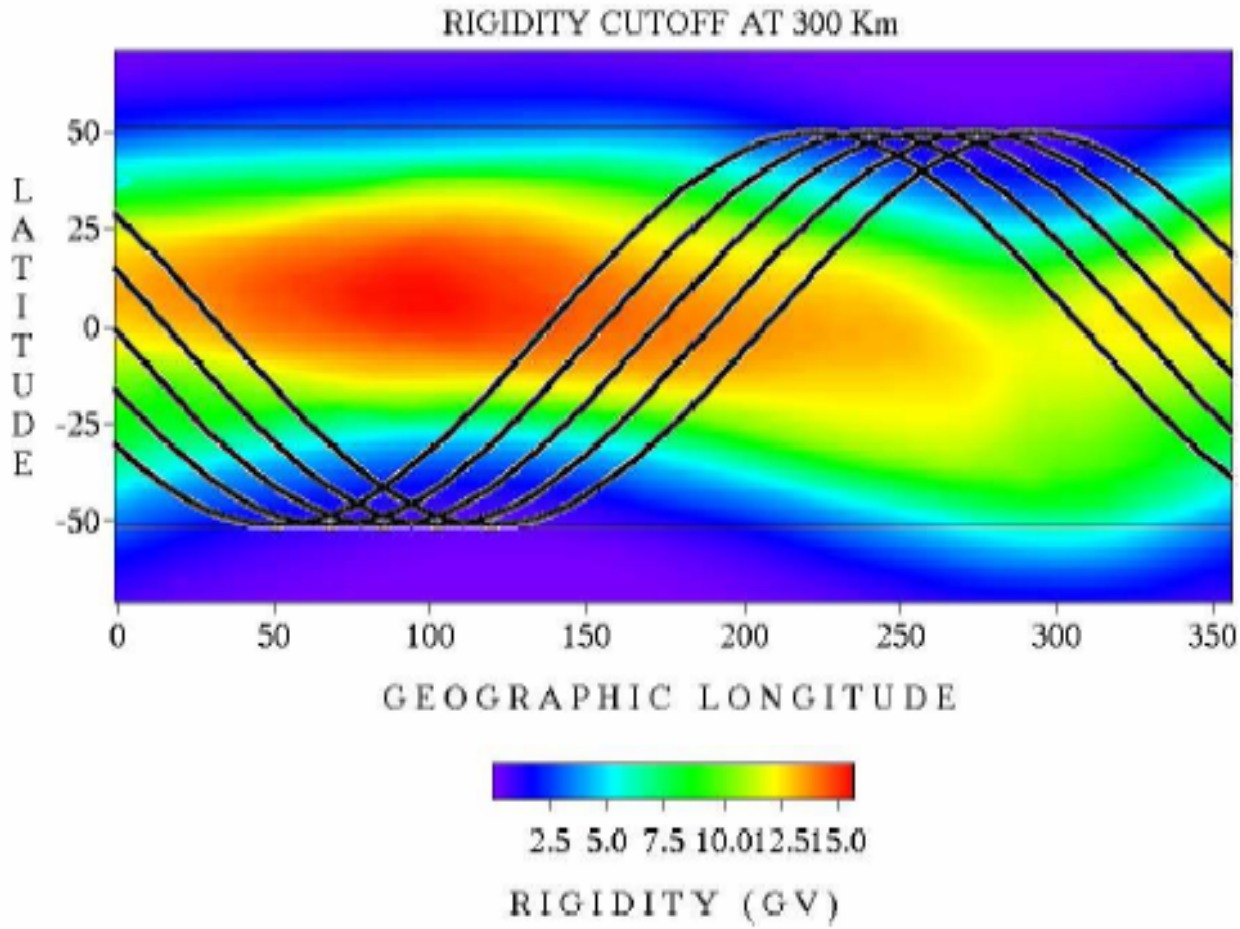


Figura 1.5: Rigidità di cutoff attesa all'altitudine del volo dello shuttle (∼300 km) per particelle provenienti dalla direzione dello zenith, in funzione della latitudine in coordinate geografiche. Le linee rappresentano le latitudini geografiche raggiungibile da AMS [22].

Particelle intrappolate : le fasce di Van Allen

Se le particelle con energia sotto il cutoff si trovano fuori della magnetosfera non penetrano all'interno

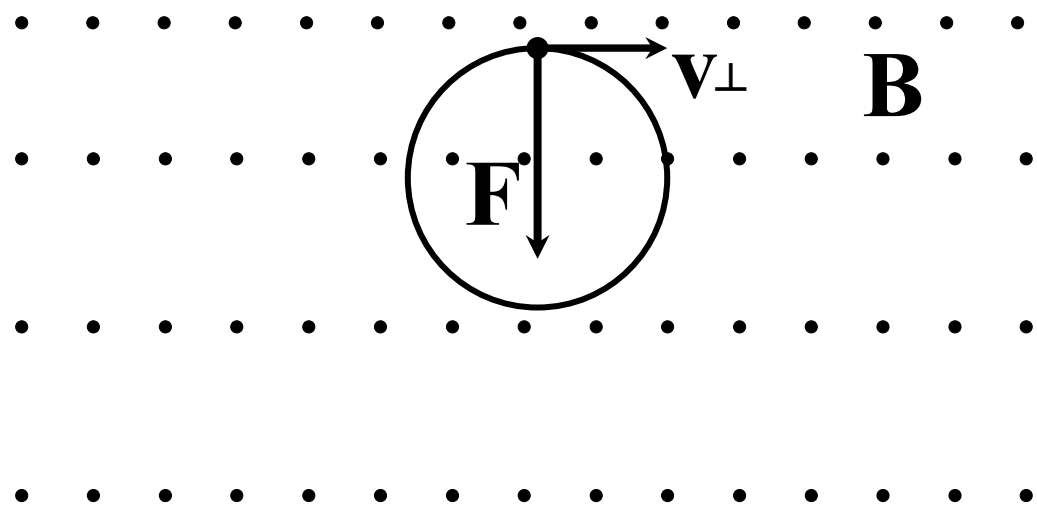
Se le particelle si trovano all'interno possono venir intrappolate : FASCE DI RADIAZIONE (VAN ALLEN)

MOTO DI UNA CARICA IN CAMPO MAGNETICO COSTANTE

$$\overline{\mathbf{F}} = \mathbf{q}\,\overline{\mathbf{v}} \wedge \overline{\mathbf{B}}$$

$$\overline{\mathbf{v}} = \overline{\mathbf{v}}_{\perp} + \overline{\mathbf{v}}_{//}$$

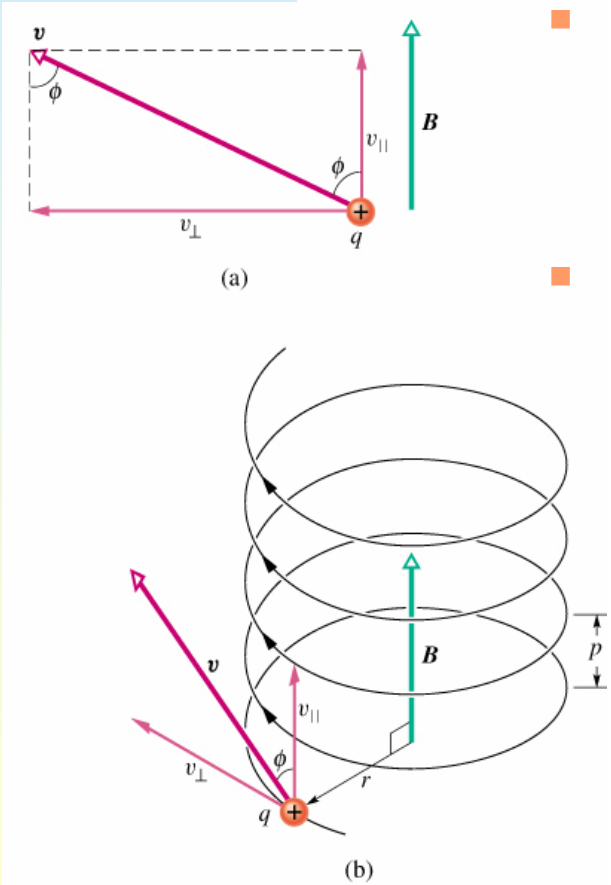
$$\overline{\mathbf{F}} = \mathbf{q}\,\overline{\mathbf{v}}_{\perp} \wedge \overline{\mathbf{B}}$$



$$|\mathbf{F}| = \mathbf{m}\frac{\mathbf{v}^2}{\mathbf{R}} = \mathbf{qvB} \qquad \Rightarrow \mathbf{R} = \mathbf{m}\frac{\mathbf{v}}{\mathbf{qB}}$$

Effetti della forza di Lorentz: campo magnetico uniforme, *non* ortogonale al moto

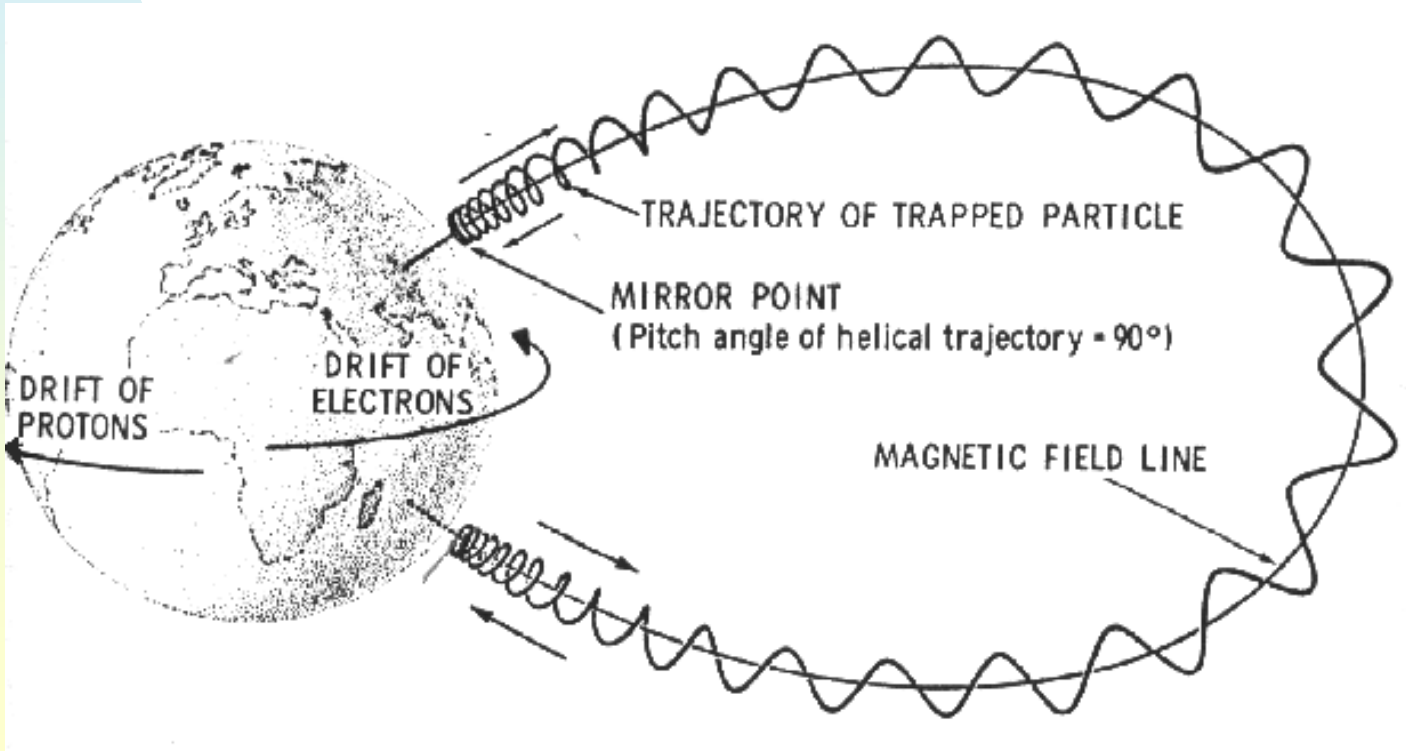
Se la velocità ha componente non nulla nella direzione di B, percorso elicoidale



- La componente della velocità parallela all'induzione da il passo dell'elica, quella ortogonale raggio e periodo.
- Raggio e periodo si calcolano considerando solo la componente ortogonale

MOTO DI UNA CARICA IN UN CAMPO MAGNETICO DEBOLMENTE VARIABILE

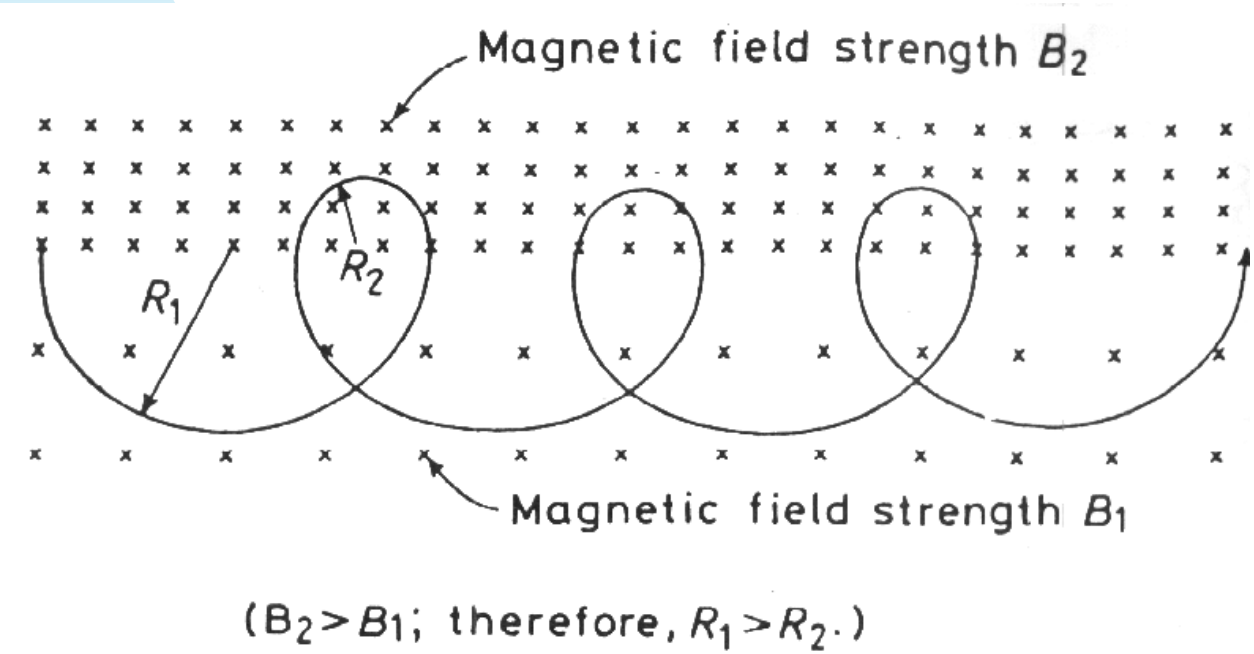
- **Se B=costante su R : Moto elicoidale. Il centro di ogni spira (CENTRO GUIDA) segue le linee di campo anche se curve su grande scala. Le ulteriori piccole variazioni di B influenzano il moto del centro di guida**



MOTO DI UNA CARICA IN UN CAMPO MAGNETICO DEBOLMENTE VARIABILE

- **Se B non e' costante su R ma ΔB<<B :**

" DRIFT DI GRADIENTE"



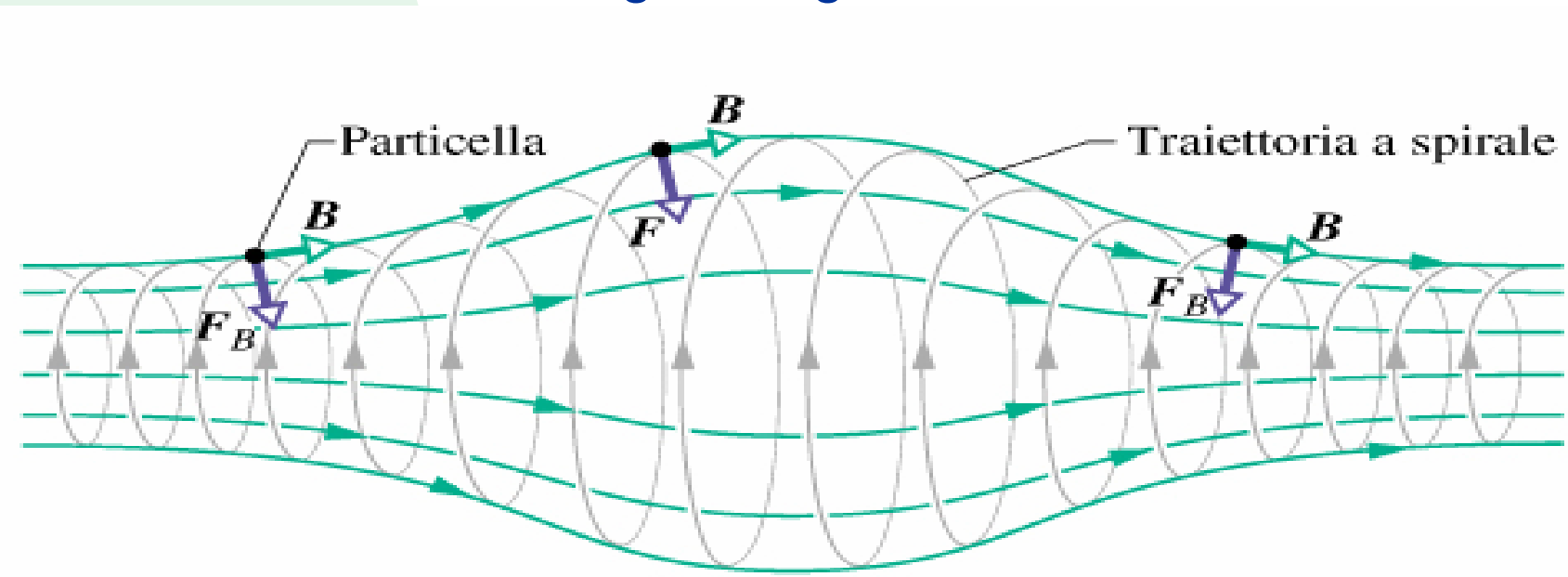
B(R,l)=(1+sin2l)1/2 B0/R3

DRIFT EST – OVEST DEL CENTRO DI GUIDA

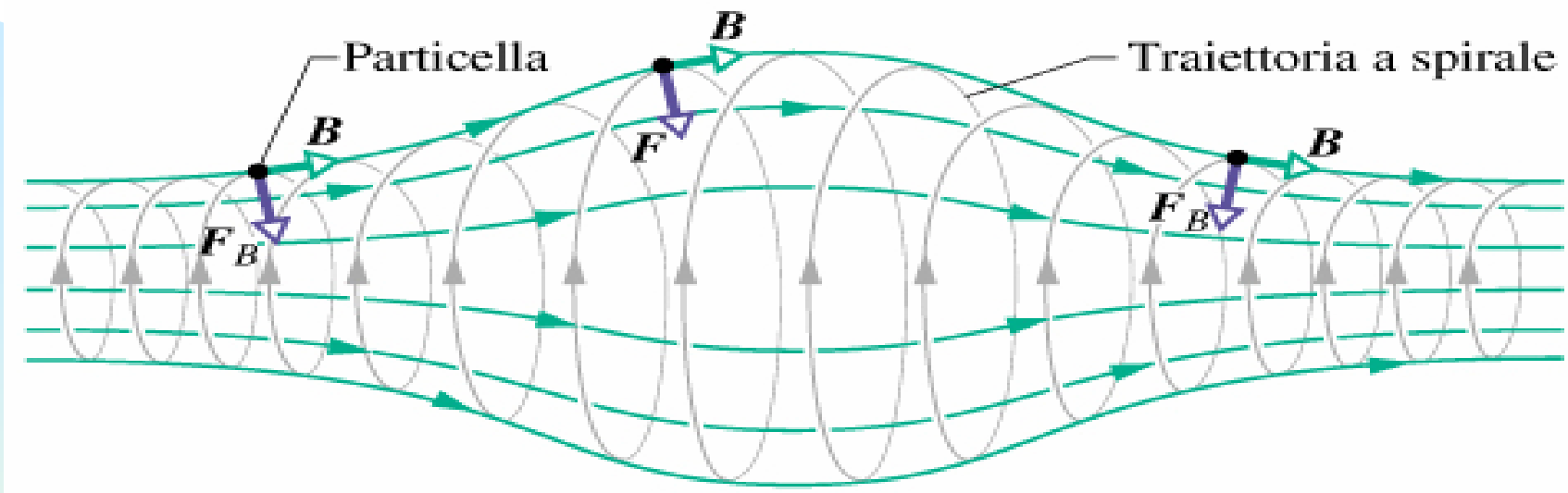
campo magnetico *non* uniforme, intensità variabile nella direzione del moto del centro di guida

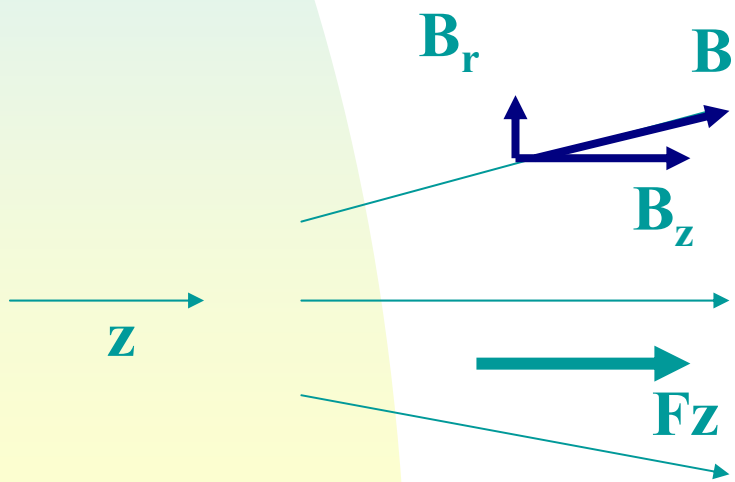
Se il campo magnetico **B** non è omogeneo, la particella sarà soggetta ad un moto a spirale con raggio (e velocità di rotazione) variabile

- Se alle estremità B è molto intenso e ha una componente radiale, può riflettere la particella; se questo avviene alle due estremità si ha la “bottiglia magnetica”



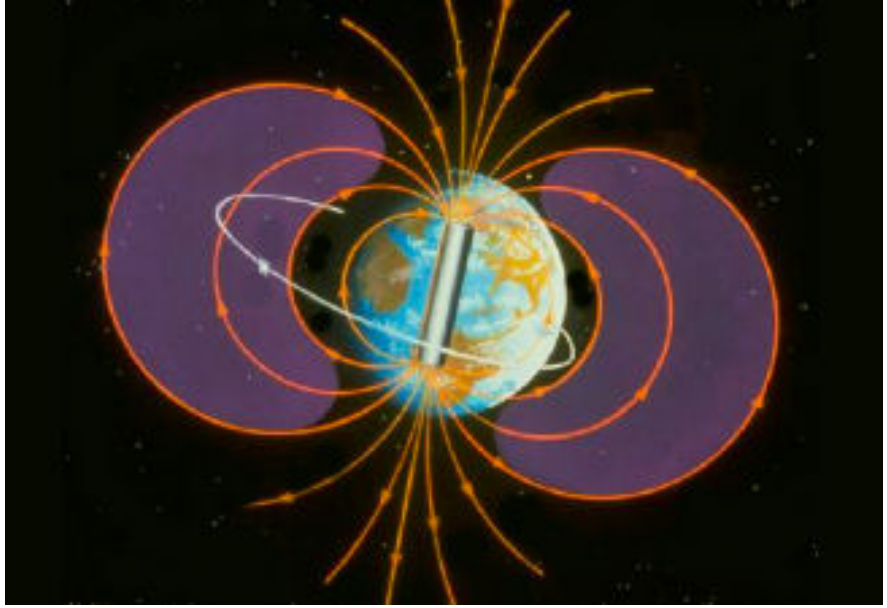
BOTTIGLIA MAGNETICA

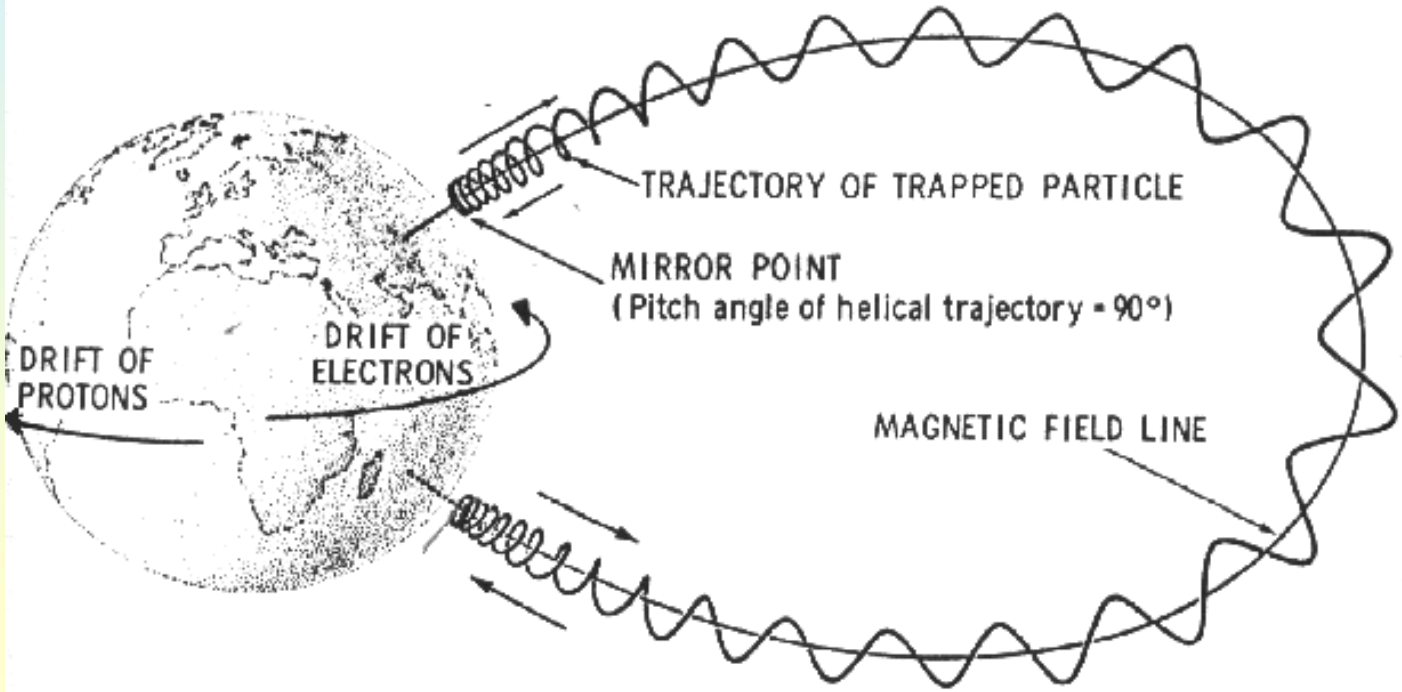




$|F_z|=|q\, v_\perp B_r|$

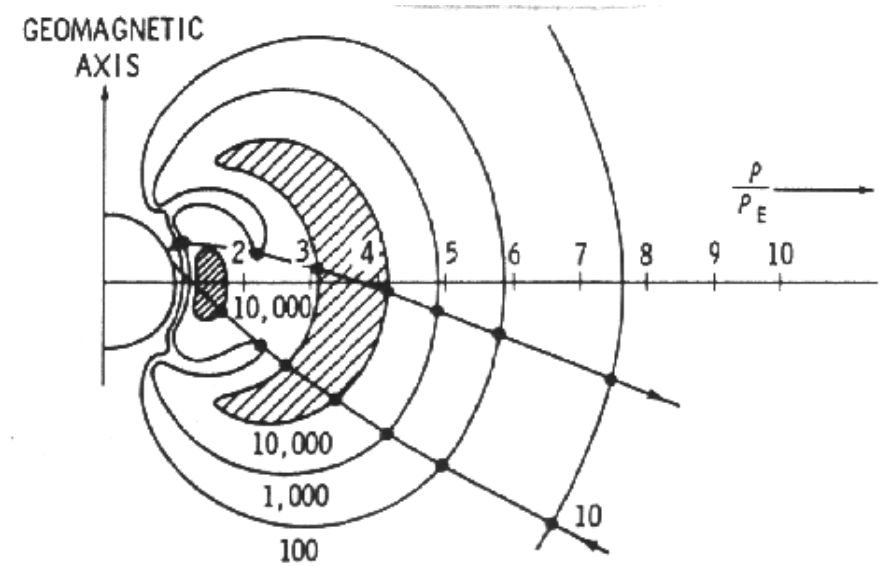
La componente Fz della forza è diretta dalla zona di campo piu' intenso a quella di campo meno intenso. Il centro di guida 'rimbalza' da un collo all'altro della bottiglia




TRAJECTORY OF TRAPPED PARTICLE
MIRROR POINT
(Pitch angle of helical trajectory = 90°)
DRIFT OF PROTONS
DRIFT OF ELECTRONS
MAGNETIC FIELD LINE

Le fasce di radiazione (o di Van Allen)

- Si tratta di zone in cui le particelle sono intrappolate dal campo magnetico terrestre.
- Il flusso di particelle è di ordini di grandezza superiore rispetto all'esterno
- Furono scoperte con un Geiger a bordo del satellite Explorer 1 dal gruppo di Van Allen nel 1958
- Elettroni e protoni sono costretti a spiraleggiare lungo le linee di forza del campo geomagnetico Possono costiuire un pericolo per i satelliti che vi si trovano all'interno



Primo schema fatto da Van Allen sulla struttura delle fasce di radiazione terrestri: quella più interna è relativa a protoni; mentre quella esterna è costituita principalmente da elettroni.

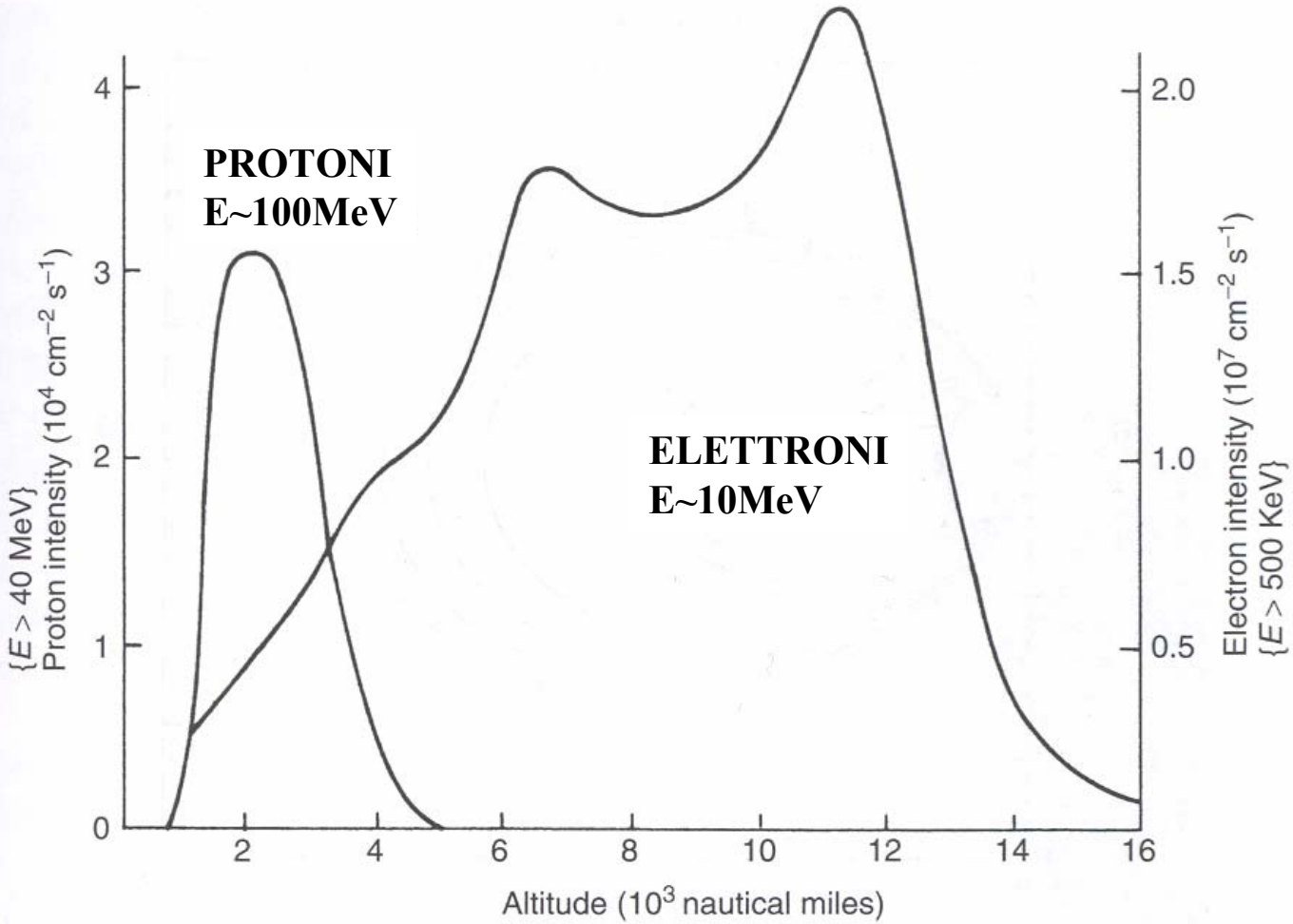
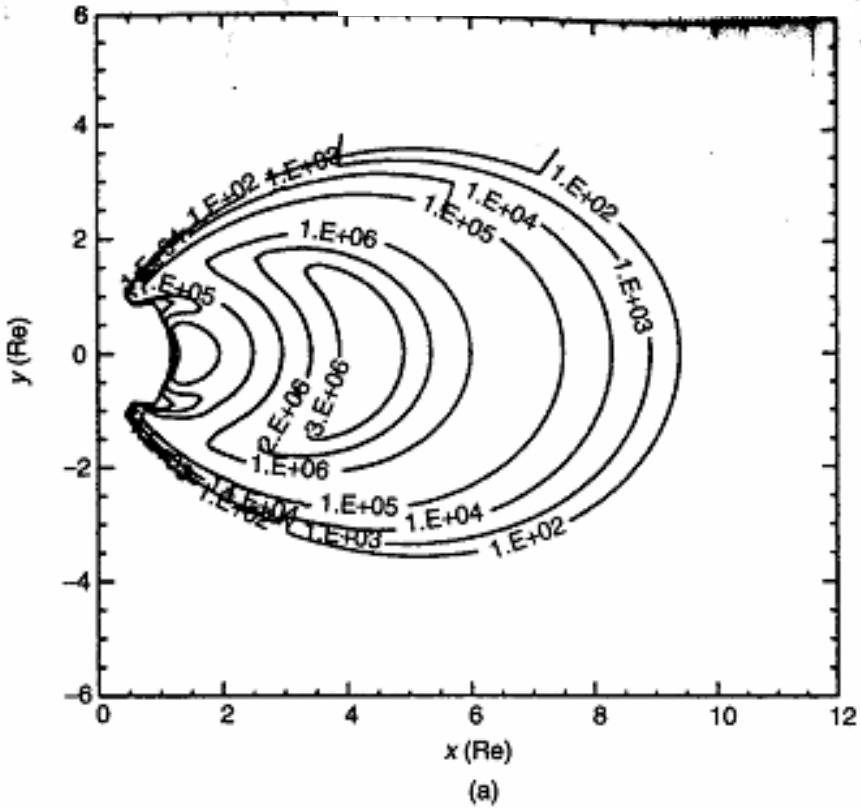


Figure 2.14 Van Allen radiation belts (idealized)

ELETTRONI

PROTONI



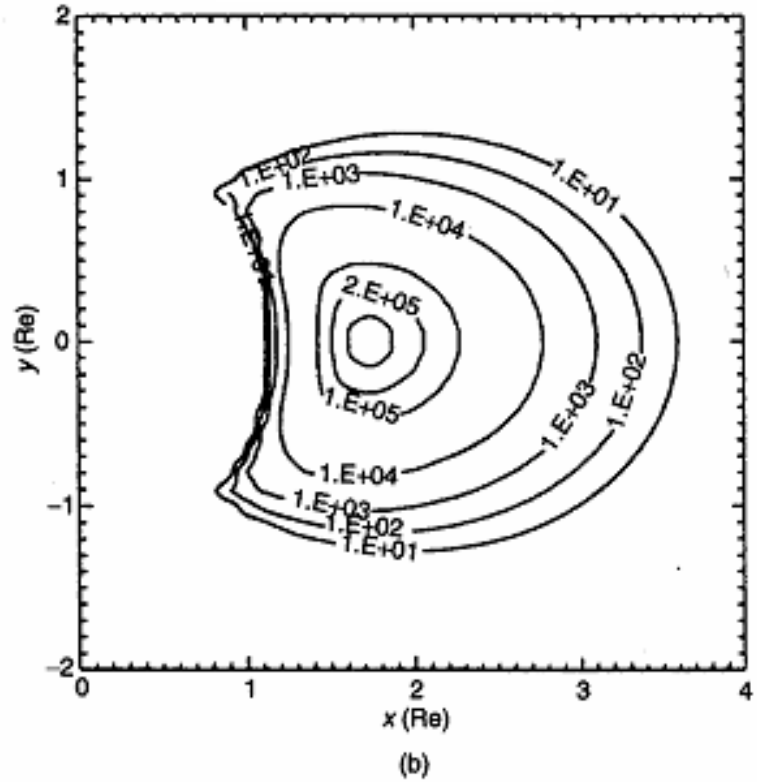
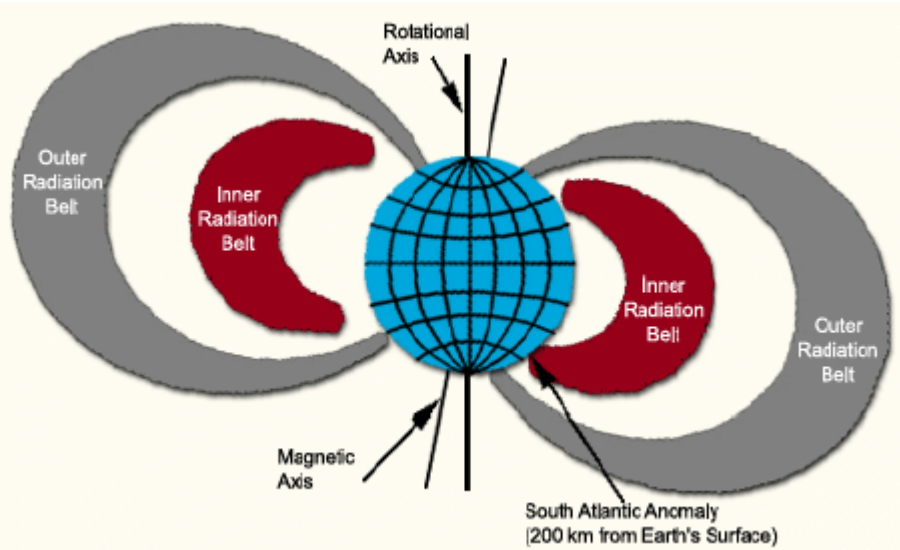
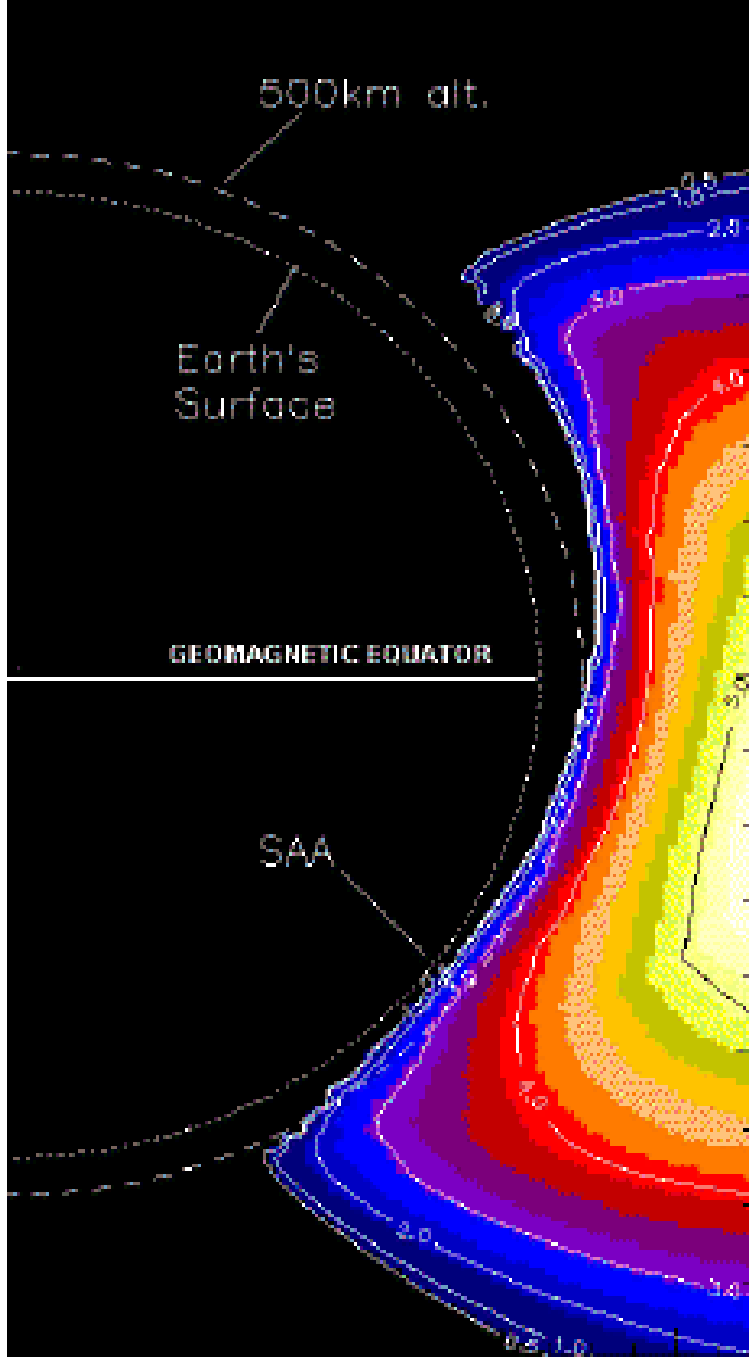
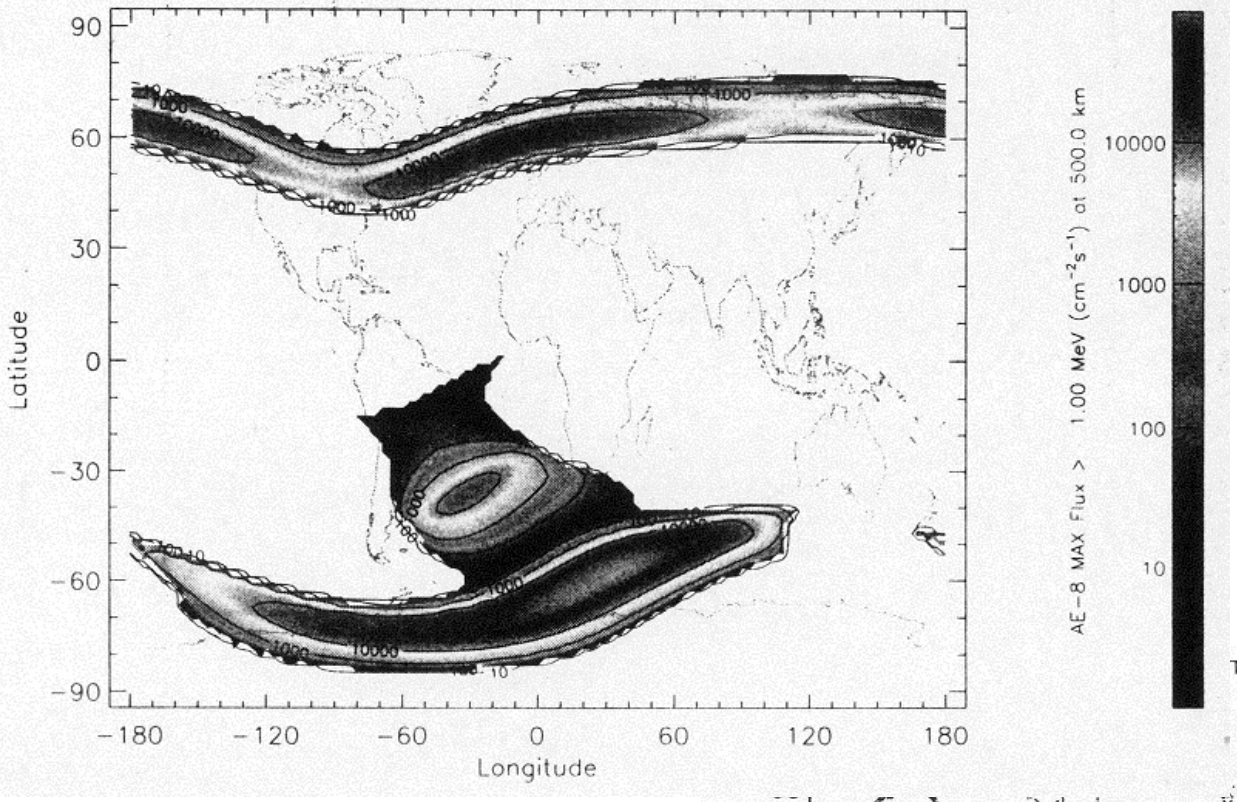


Figure 2.15 Radiation belt model particle fluxes. Contour plots in 'dipole space' in a plane containing the geo-dipole axis (y): (a) electron fluxes at greater than 1 MeV and (b) proton fluxes at greater than 10 MeV. (Axes are calibrated in Earth radii, Re) [13]. (Reproduced by permission of the International Astronautical Federation)

ANOMALIA SUD ATLANTICA

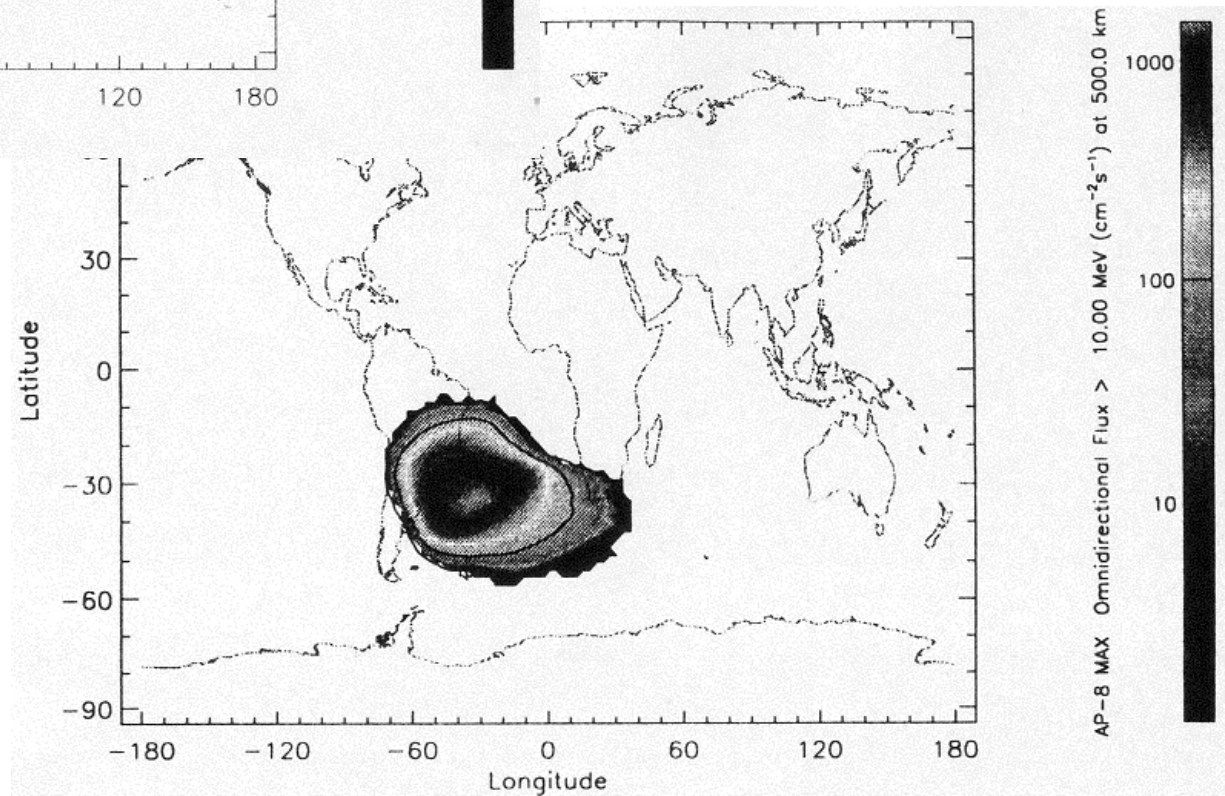






elettroni, E>1MeV
a 500 km di altezza

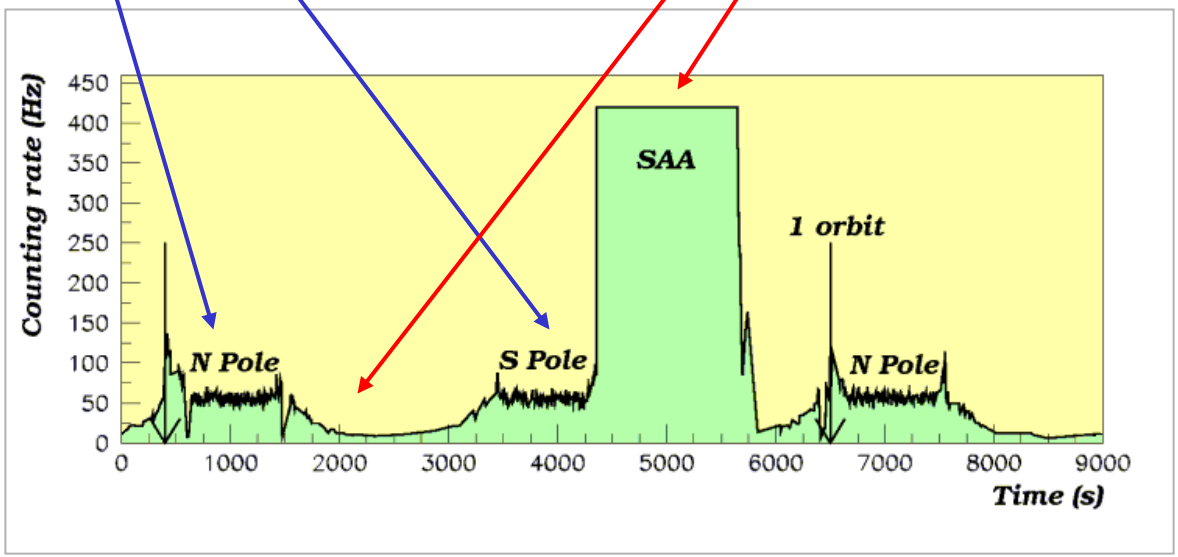
Protoni, E>10MeV
a 500 km di altezza



Orbit analysis

Polar regions:

Mid-latitudes:



QUINDI ATTENZIONE A :

LEO (200-700 km) **CR Galattici (E>100 MeV-10 GeV)**
- ANOMALIA SUD ATLANTICA-

MEO (700 -35000 km) **CR Galattici, fasce Van Allen**

GEO (35800 km) **CR Galattici, Brillamenti solari**
(se ci sono)

Table 2.9 Radiation dose in space-laboratory-type orbit (free space)

Source	Dose rate
Galactic radiation	0.01–0.05 rad/day =.0001-0.005 Gy/h
	(~0.3 rem/day)=.003 Sv/day
Radiation belts	protons: 1–10 rad/h =.01-0.1 Gy/h
	[behind 1 cm Al]
	electrons: 10^2–10^3 rad/h =1-10 Gy/h
	[at surface of S/C]
	(~1–30 rem/h) =.01-.3 Sv/day
Solar flares	12–350 rad/event = 0.12-3.5 Gy/event
	(~10 500 rem) =100 Sv/event = 0.1-5 Sv/day

Note: Mean dose on earth 250–300 millirem/year =2.5-3 mSv/yr

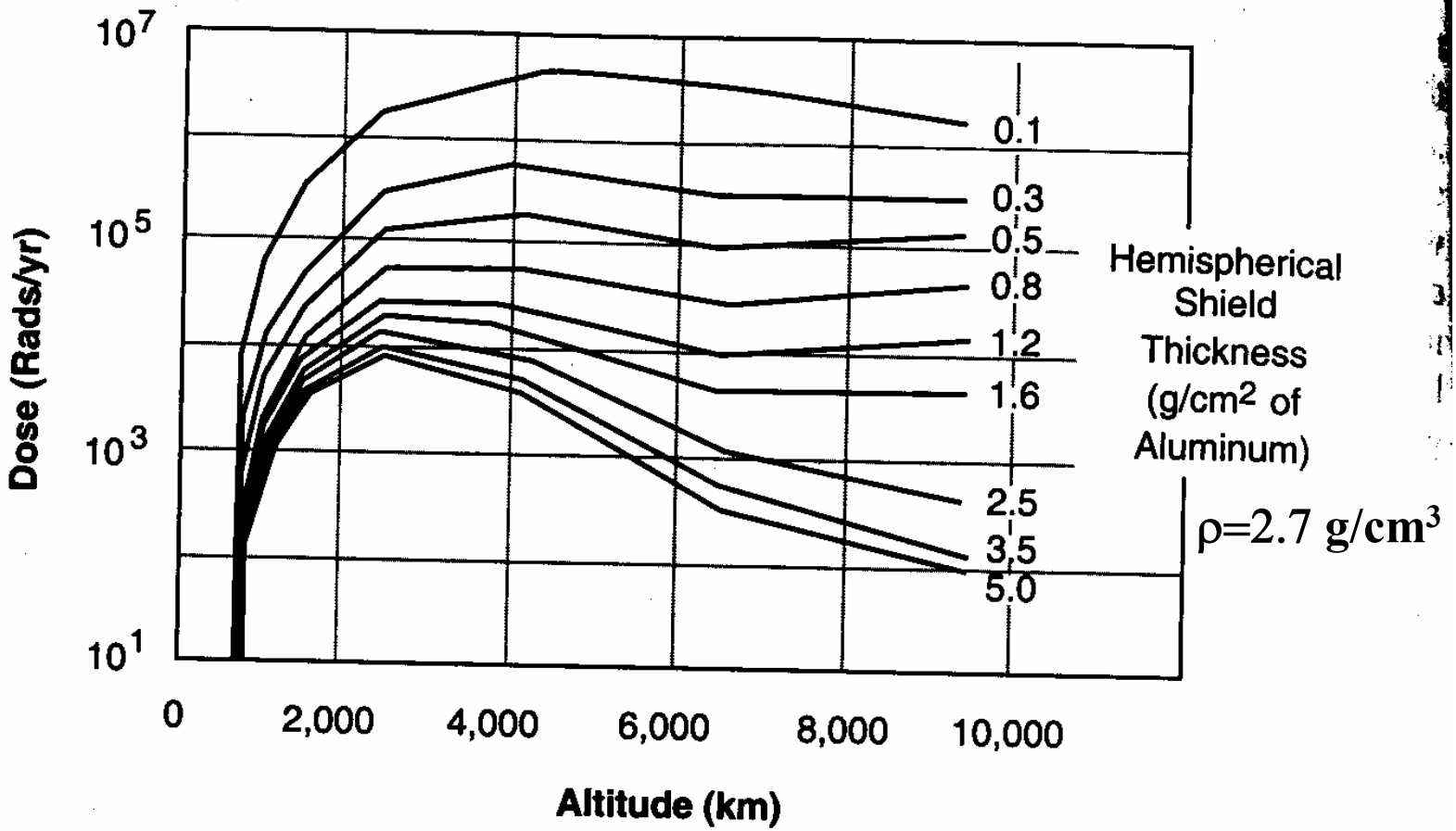


Fig. 8-9. Radiation Dose Rates as a Function of Altitude for Low-Altitude Polar Orbits. Dose rates are shown for several shielding depths.

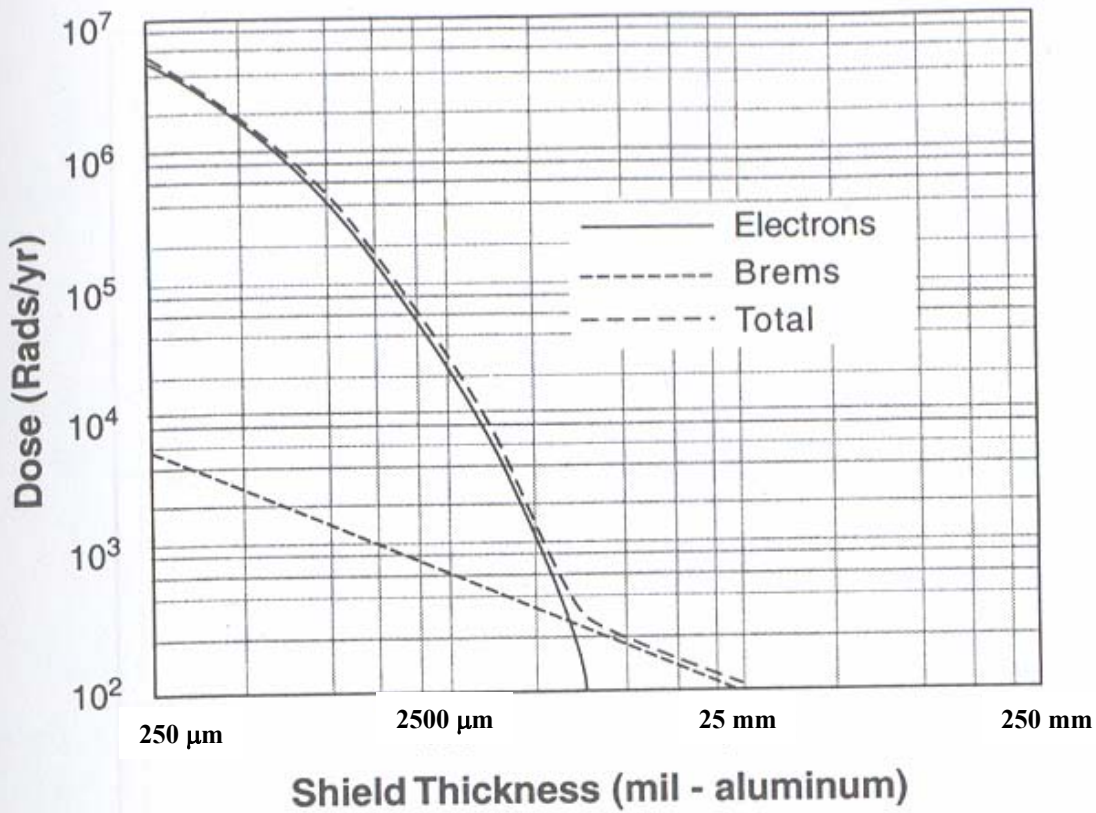


Fig. 8-10. Radiation Dose Rate in Geosynchronous Equatorial Orbit for Various Shield Thicknesses.

BIBLIOGRAFIA

- P.Fortescue,John Stark, G. Swinerd SPACECRAFT SYSTEMS ENGINEERING, WILEY
- S: Longair , High Energy Astrophysics , Cambridge University Press
- W.R.Leo, Tecniques for Nuclear and Paricle Physics Experiments, Springer Verlang, 1994

Effetti della forza di Lorentz: campo magnetico *non* uniforme, *non* ortogonale al moto; Bottiglia magnetica

- infatti $\vec{\mathbf{v}} = v_r \vec{\mathbf{u}}_r + v_\phi \vec{\mathbf{u}}_\phi + v_z \vec{\mathbf{u}}_z$

$$\vec{\mathbf{B}} = B_r \vec{\mathbf{u}}_r + B_z \vec{\mathbf{u}}_z$$

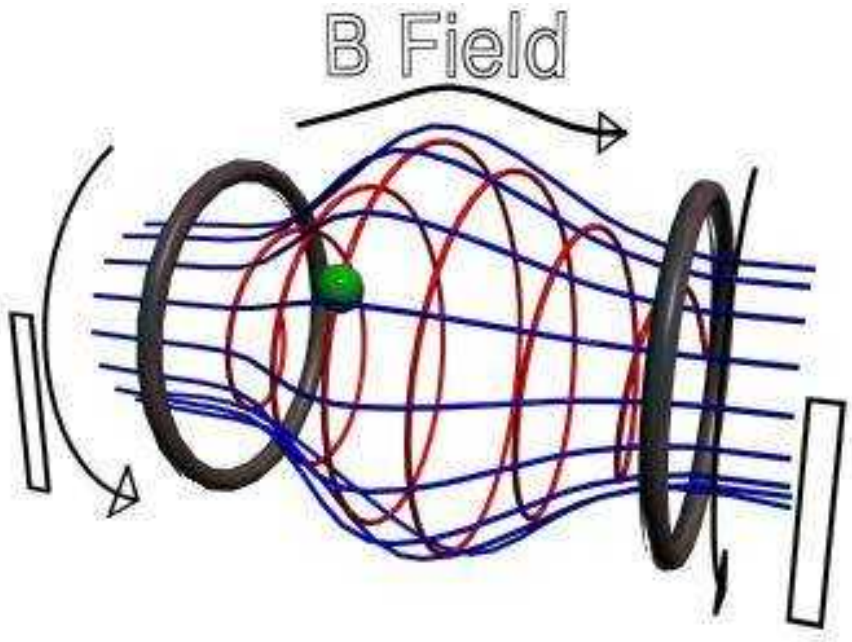
$$\vec{\mathbf{v}} \times \vec{\mathbf{B}} = (v_r \vec{\mathbf{u}}_r + v_\phi \vec{\mathbf{u}}_\phi + v_z \vec{\mathbf{u}}_z) \times (-B_r \vec{\mathbf{u}}_r + B_z \vec{\mathbf{u}}_z) =$$

$$= v_\phi B_z \mathbf{u}_r - v_\phi B_r \mathbf{u}_z - v_r B_z \mathbf{u}_\phi + v_z B_r \mathbf{u}_\phi$$

- cioè $\boldsymbol{F_r = q v_\phi B_z}$

$$\boldsymbol{F_\phi = -q v_r B_z + q v_z B_r}$$

$$\boldsymbol{F_z = -q v_\phi B_r}$$



- Dopo una riflessione, invertendosi il senso del moto, si inverte la direzione di rotazione, e quindi la direzione

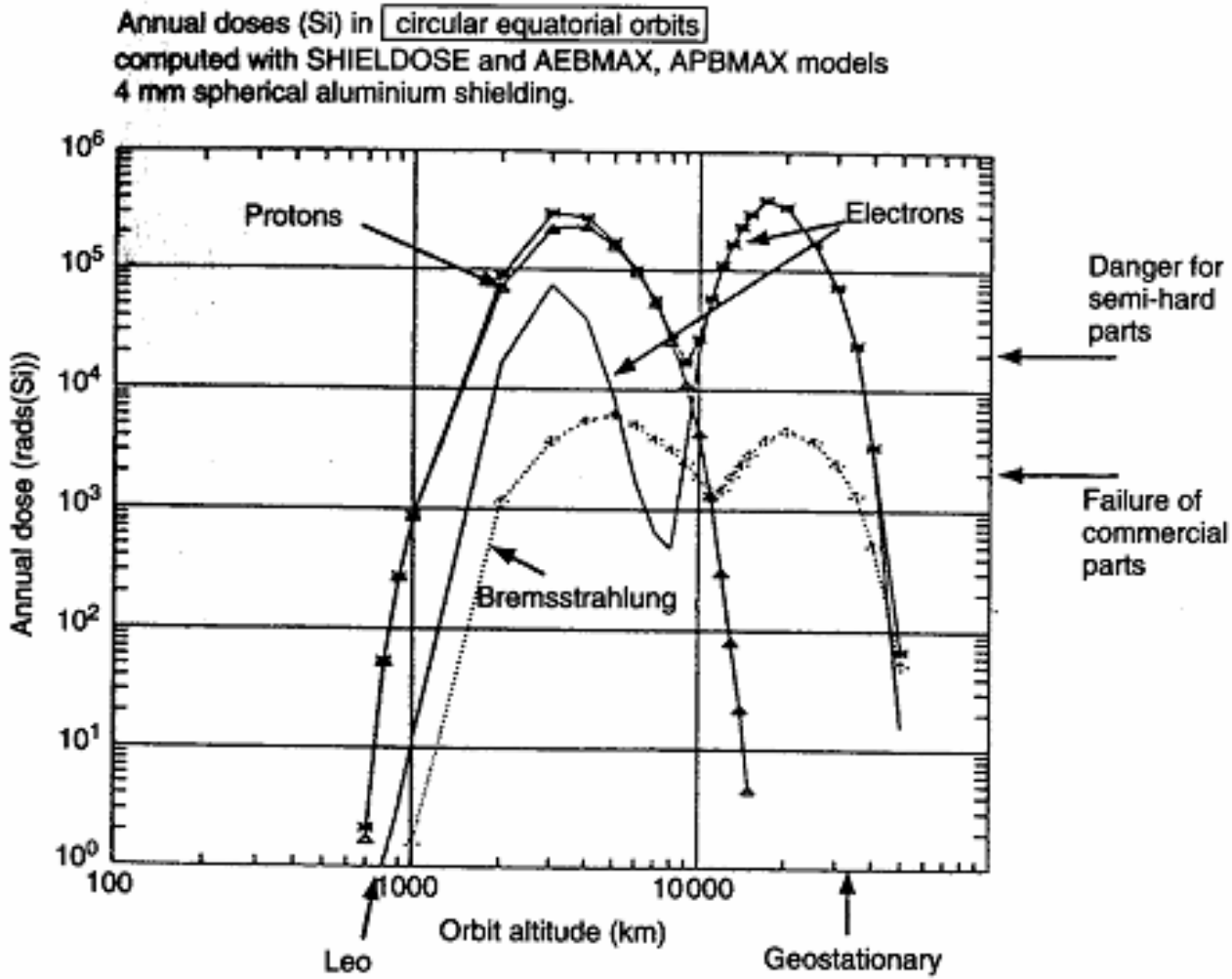


Figure 2.17 Variation of computed annual dose on circular orbits as a function of altitude. Computed with AE8 and AP8 models and SHIELDOSE [13]. (Reproduced by permission of the International Astronautical Federation)

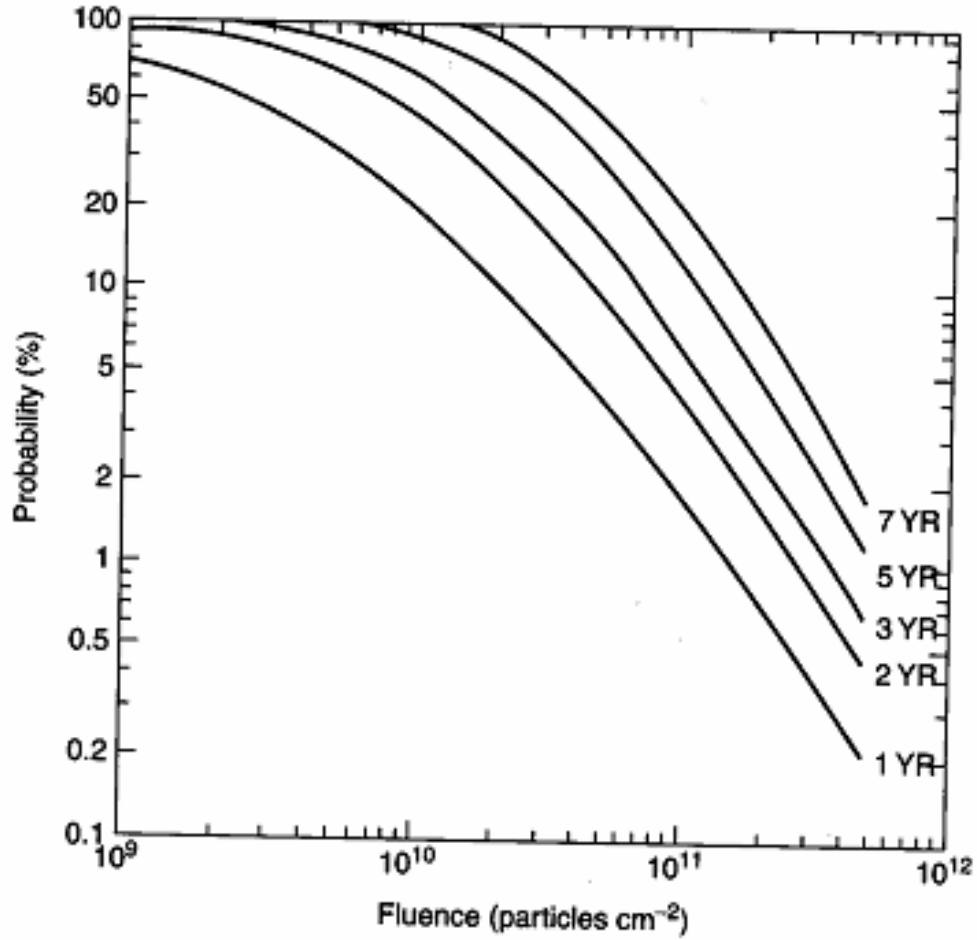


Figure 2.19 Probability of exceeding given levels of fluence energy >10 MeV *versus* active years of solar cycle. (Reproduced by permission of the Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, Pasadena, California)