



**GRUPO ASTRONÓMICO DEL ZULIA (GAZ)
MARACAIBO, EDO ZULIA VENEZUELA**



Los rayos cósmicos en la Astronomía.

Presentado por:

Lic. Irvin Reinel

XXV ENCUENTRO NACIONAL DE ASTRONOMÍA

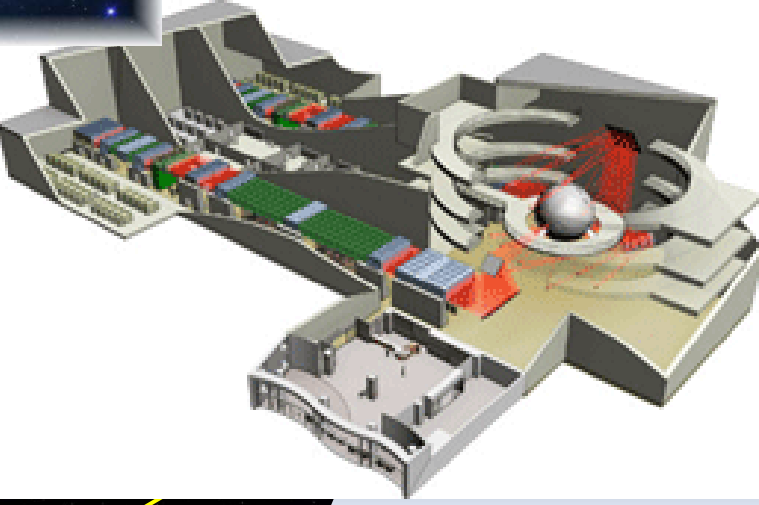
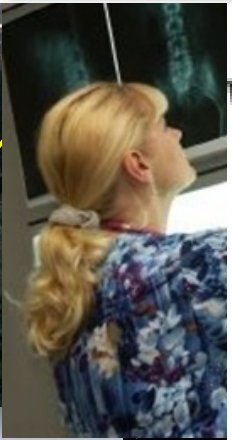
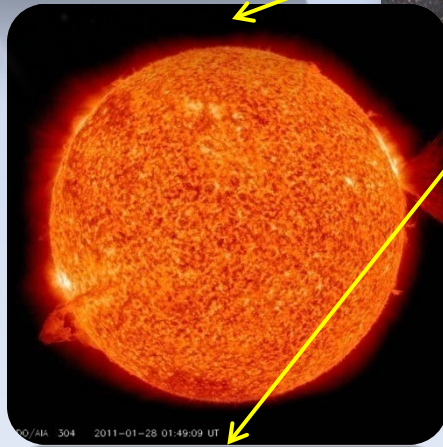
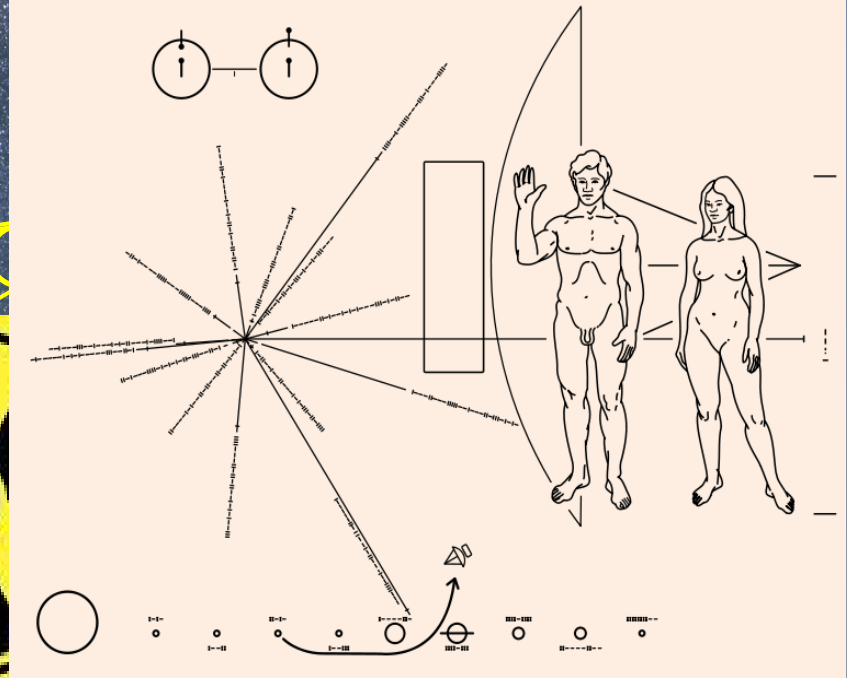
Marzo del 2015

ENA - 2015

ASTRONOMÍA



[HTTP://CHANDRA.HARVARD.EDU](http://chandra.harvard.edu)



INTRODUCCIÓN

En 1912 el científico Austriaco, Víctor Hess realizó el descubrimiento de unas partículas energéticas, que llevan por nombre: Rayos Cósmicos (RC).

Robert Milikan
Dio el nombre de Rayos Cósmicos
Premio Nobel 1936



Carl Störmer
(1874-1957)



Carl D Anderson
Positrón 1932
Premio Nobel



Premio nobel 1936



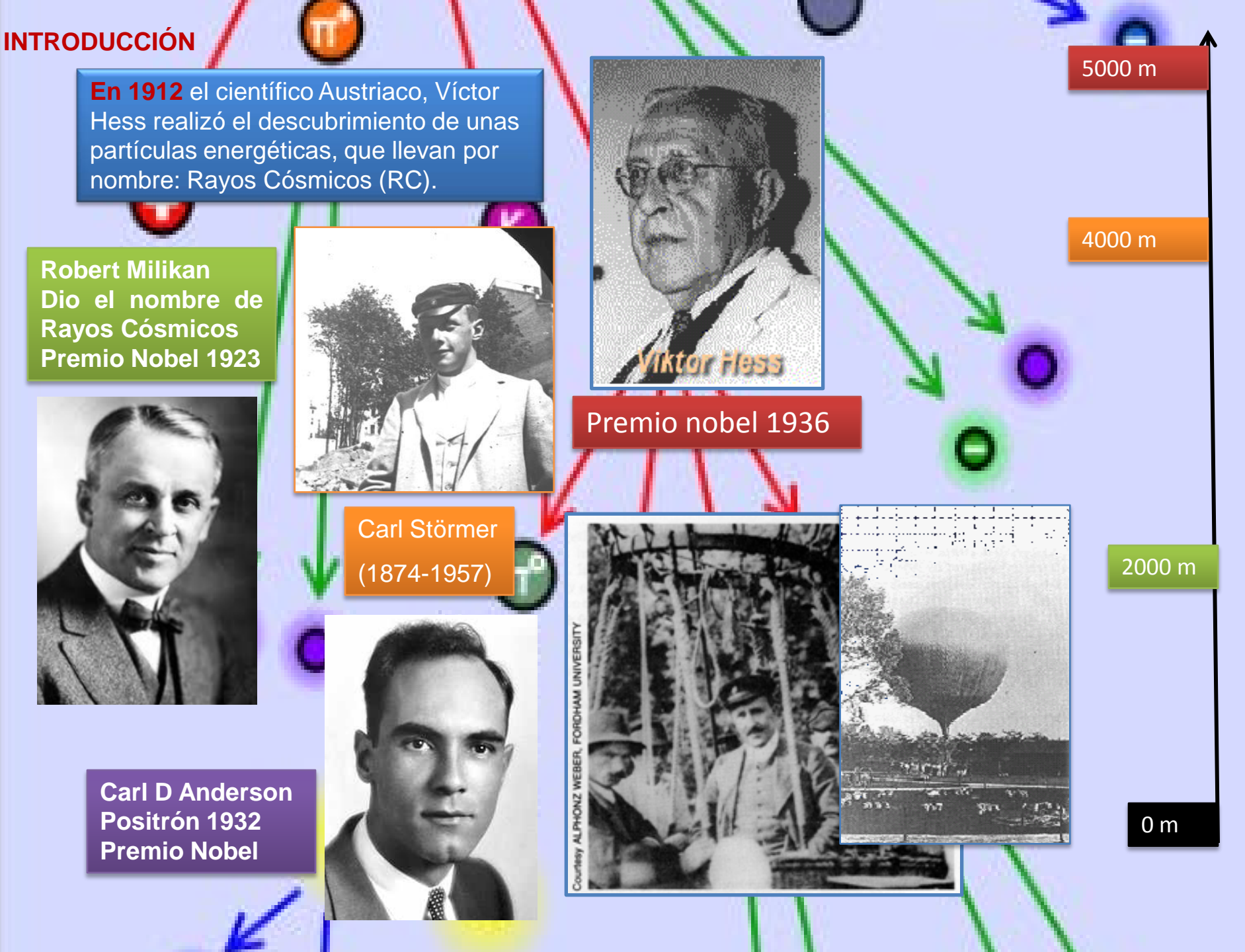
Courtesy ALPHONZ WEBER, FORDHAM UNIVERSITY

5000 m

4000 m

2000 m

0 m



¿Qué son los Rayos Cósmicos?

- **Son partículas** de gran velocidad que provienen del espacio exterior.
- Son principalmente protones **(89%) – núcleos hidrógeno**, también **(10%) núcleos de helio** y **(1%) elementos mas pesados**, y solitarios electrones.
- Viajan a velocidades cercanas a la de la luz y arriban a la Tierra en una **variedad de energías**, por tanto tienen **muy alta energía**.

Radiación
Primaria

Radiación
Secundaria

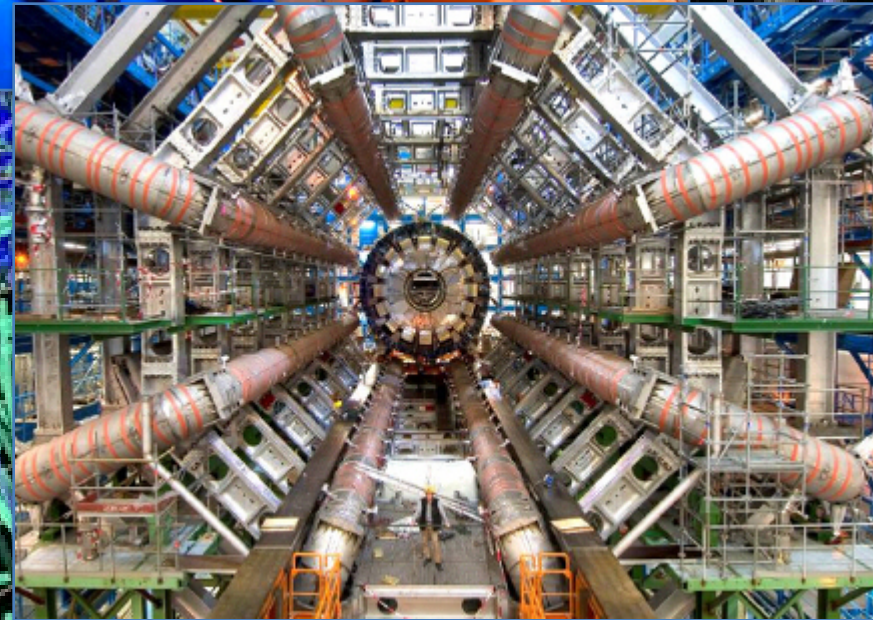
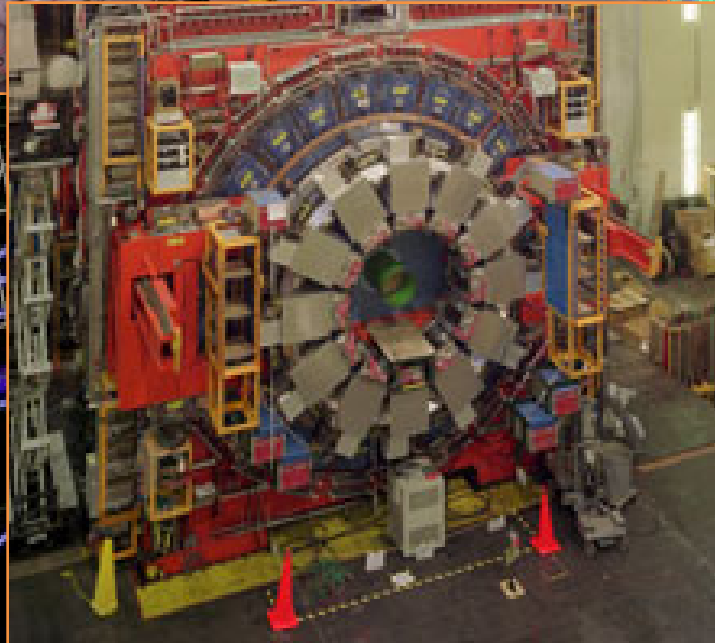




TEVATRON



LHC



Costo \$265 millones.

Longitud: 6.3 Km.

Alcance \approx **1 Tev.**

Los **RC** más energéticos

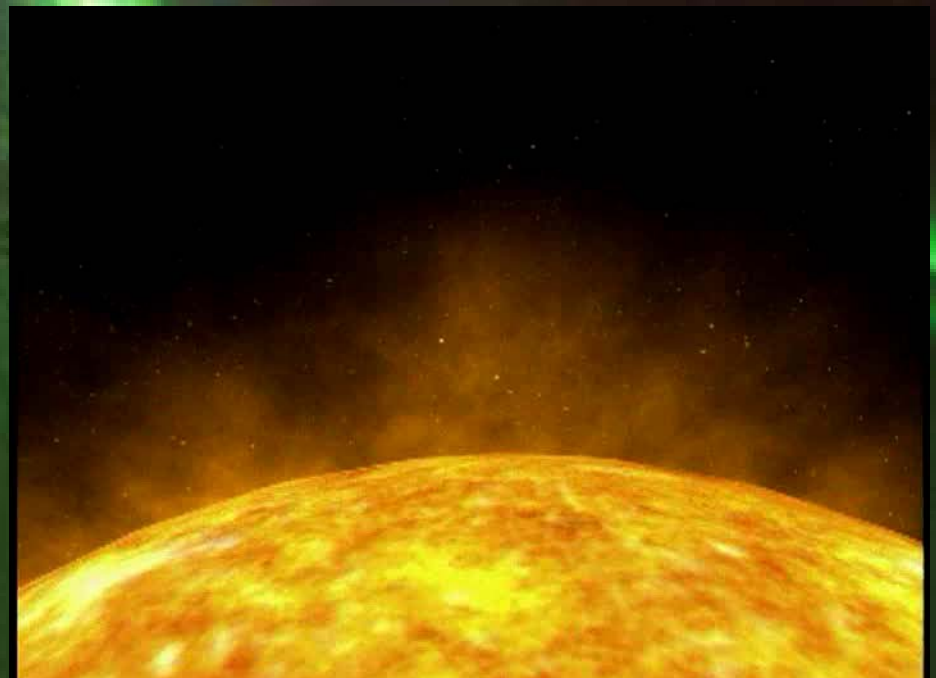
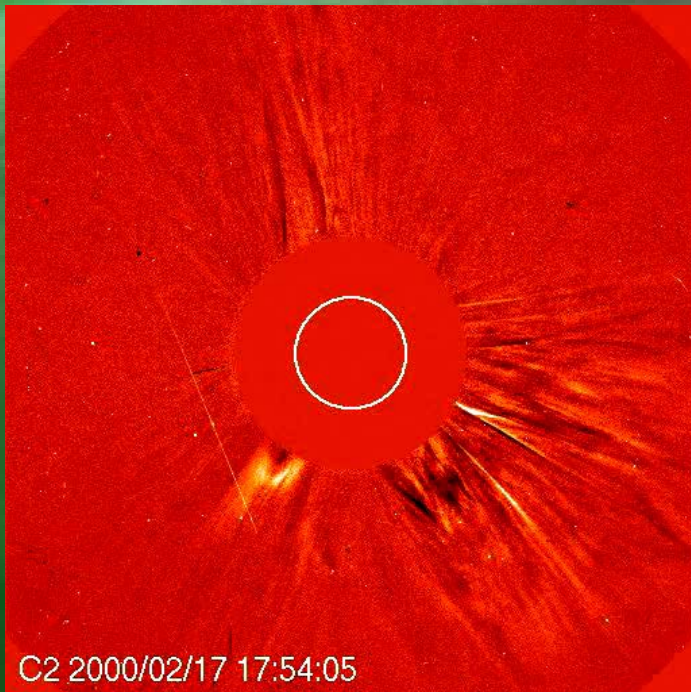
detectados: **10^7 TeV.**

Costo: 300 millones de €

Longitud: 27 Km

Alcance \approx **14 Tev**

¿De donde proviene los RC?



Los RC de Ultra Alta Energía o UHE



Enrico Fermi
Premio Nobel 1938,
Aceleración de
ondas magnéticas



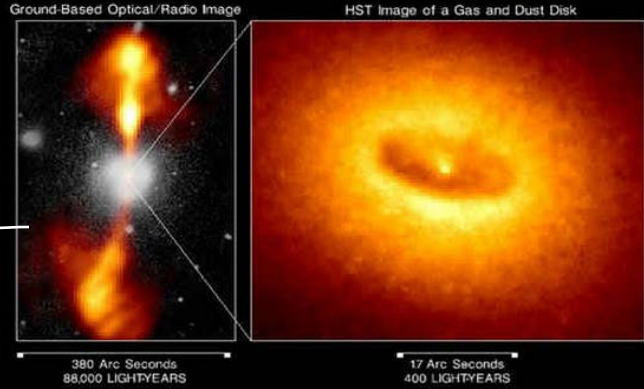
Agujero Negro

Nebulosas remanentes.

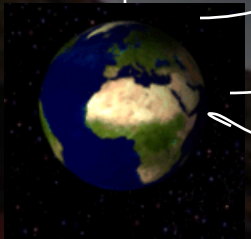


Core of Galaxy NGC 4261
Hubble Space Telescope
Wide Field / Planetary Camera

Núcleos de galaxias activas.



Colisión de Galaxias.



El origen de los UHE es uno de los misterios más grande de la astrofísica.

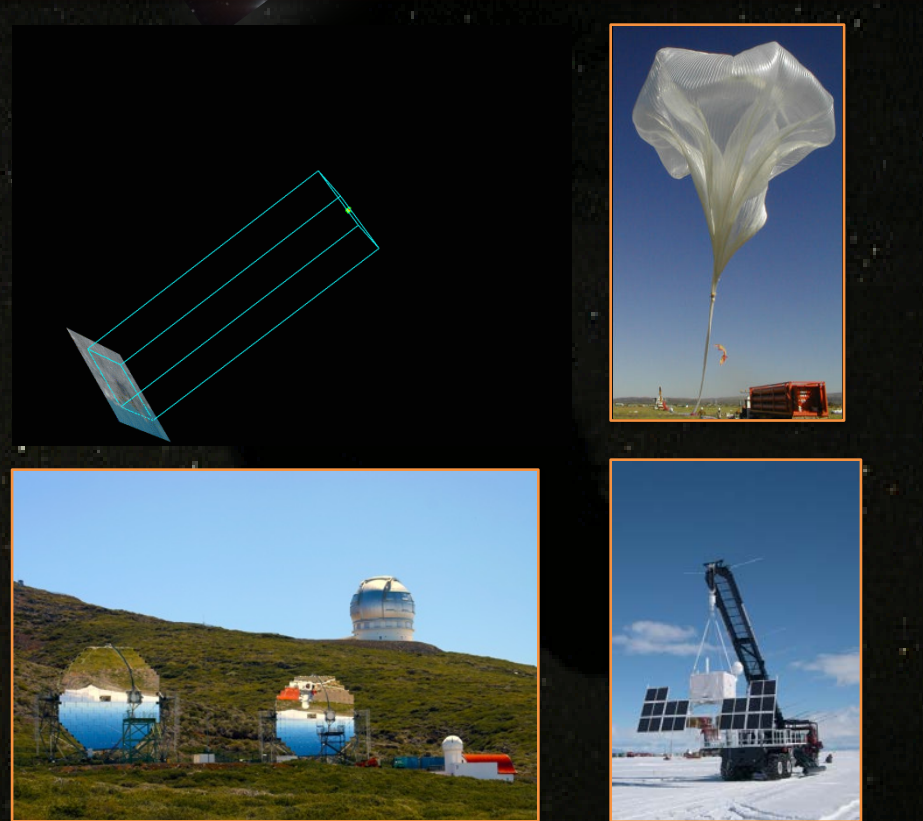
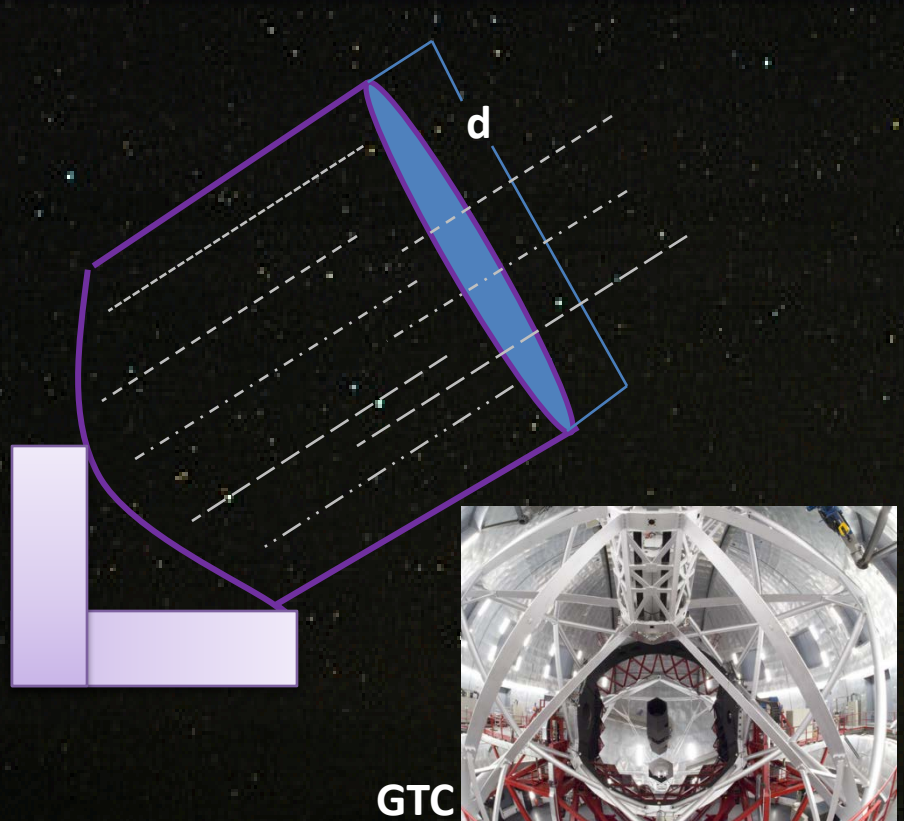


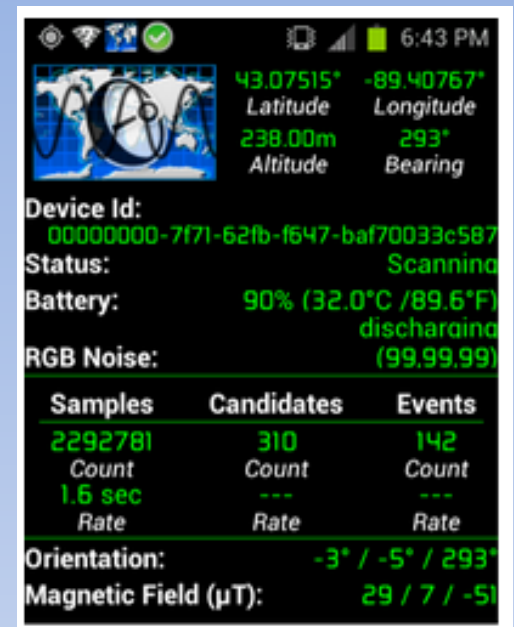
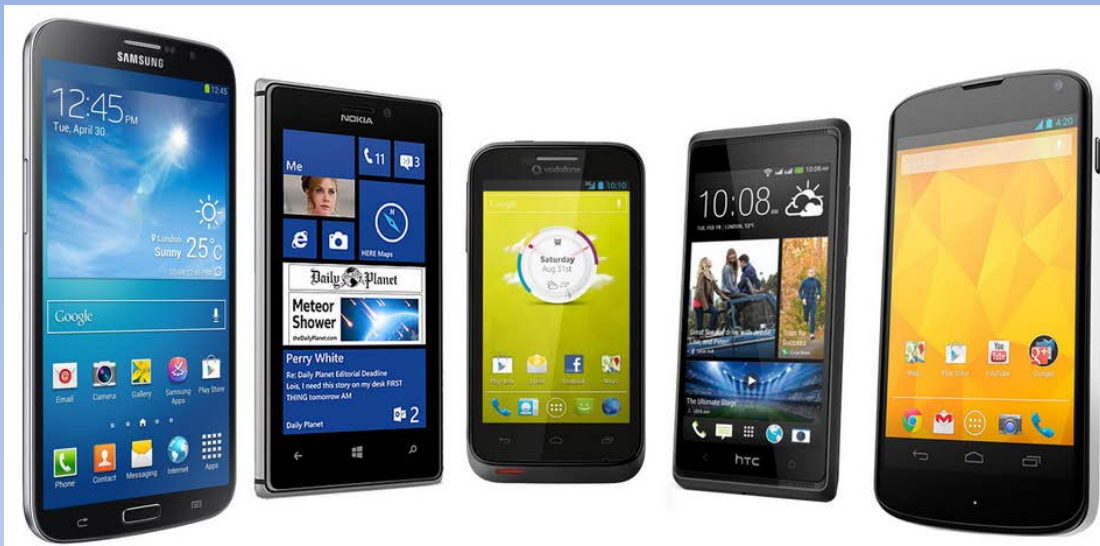
¿Como se detectan los RC?



Para captar luz necesitamos ...

Para captar rayos cósmicos necesitamos





Formas en la fotografía:



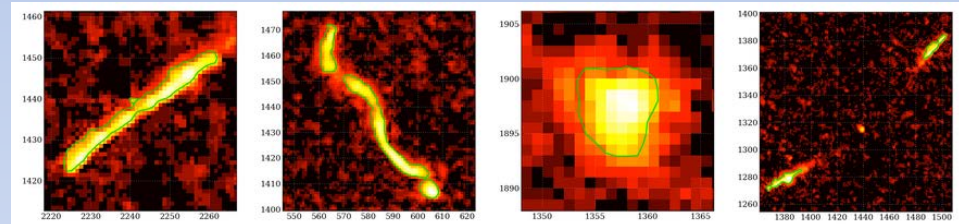
DECO

Distributed Electronic Cosmic-ray Observatory

Android - Octubre, 2014

iOS - 2015

To learn more and download the app, visit <http://wipac.wisc.edu/learn>.

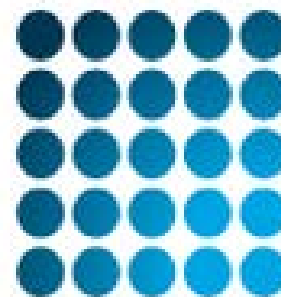


Muón

Electrón

Rayos Gamma

Múltiple: Intriga



WIPAC

WISCONSIN ICECUBE
 PARTICLE ASTROPHYSICS CENTER

¿Porque estudiarlos?

•Gran parte de los RC detectados con más facilidad proviene del sol.

•Podrían afectar nuestra salud en la tierra o la de los astronautas.

•Pueden ser un ingrediente sustancial en el cambio climático.

•Podrían afectar los satélites de comunicaciones y posicionamiento global, así como las computadoras.

•Darán respuestas a los problemas cosmológico de la comprensión del cosmos.

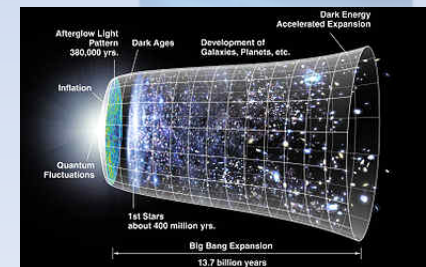
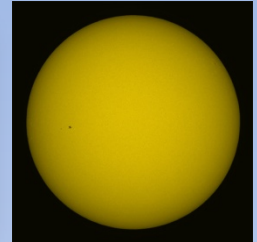
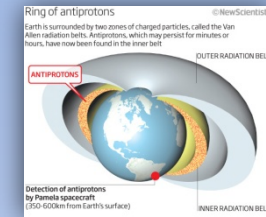
La variedad de energía que podríamos estudiar y obtener.

La salud humana.

El efecto en el cambio climático mundial.

El efecto en computadoras cuánticas y la lógica electrónica.

Al estudiar la estructura y dinámica del universo para entender UHE





**MUCHAS GRACIAS.
¿preguntas?**

Bibliografía

- [1] T.K. Gaisser; T. Stanev; P.V. Sokolsky; R.E. Streitmatter; The primary spectra tne cosmic radiation incident, Bartol Research Inst.; Univ. of Delaware; Univ. of Utah, NASA (2006).
- [2] PG T Zatsepin, T M Roganova, Cosmic ray investigations, Phys.-Usp. 52 1139 **(2009)**.
- [3] Lev Dorman, Cosmic Ray in Magnetospheres of the Earth and Other planets , ASSL Springer, cap 2.1(2009).
- [4] C. Störmer, The Polar Aurora, Oxford Press (1955).
- [5] Ziegler, J. F.; Terrestrial Cosmic Ray intensities, IBM Research Division, Thomas J. Watson Research Center, P.O. Box 218, Yorktown Heights, New York 10598, USA, 06 abril **2010**.
- [6] M. Ram, M.R. Stolz, and B.A Tinsley, The Terrestrial Cosmic Ray Flux: Its Importance for Climate, American Geophysical Union Volume 90, number 44, 3 november **(2009)**.
- [7] Jasper Kirkby, Cosmic Ray and Climate, EUROPEAN ORGANIZATION FOR NUCLEAR RESEARCH (CERN-PH-EP), (05-2008).
- [8] Federico, C.A et al, Estimates of cosmic radiation dose received by aircrew of DCTA's flight test special group, Institute for Avanced Studies **(2010)**.
- [9] Lyndon B. Johnson Space Center, NASA Facts, October 2002.
- [10] Cengel KA, Diffenderfer ES, Avery S, Kennedy AR, McDonough J, Using electron beam radiation to simulate the dose distribution for whole body solar particle event proton exposure, Department of Radiation Oncology, University of Pennsylvania School of Medicine, Philadelphia, PA 19104, USA. keith.cengel@uphs.upenn.edu and NSBRI (National Space Biomedical Research Institute), Radiat Environ Biophys. 2010 Nov;49(4):715-21. Aug 20, Epub **2010**.
- [11] 14] L.A Núñez et al, LAGOVirtual A Collaborative Environment for the Large Aperture GRB Observatory Proceedings of the Second EELA-2 Conference ,Centro Nacional de Cálculo Científico Universidad de Los Andes Corporación Parque Tecnológico de Mérida, Mérida 5101, **(2009)**.
- [12] M. Alonso, E. Finn, FÍSICA, Addison Wesly Iberoamericana, cap 4, (1995).
- [13] Jackson J.D. - Classical electrodynamics (3ed., Wiley) cap 5, 1999.

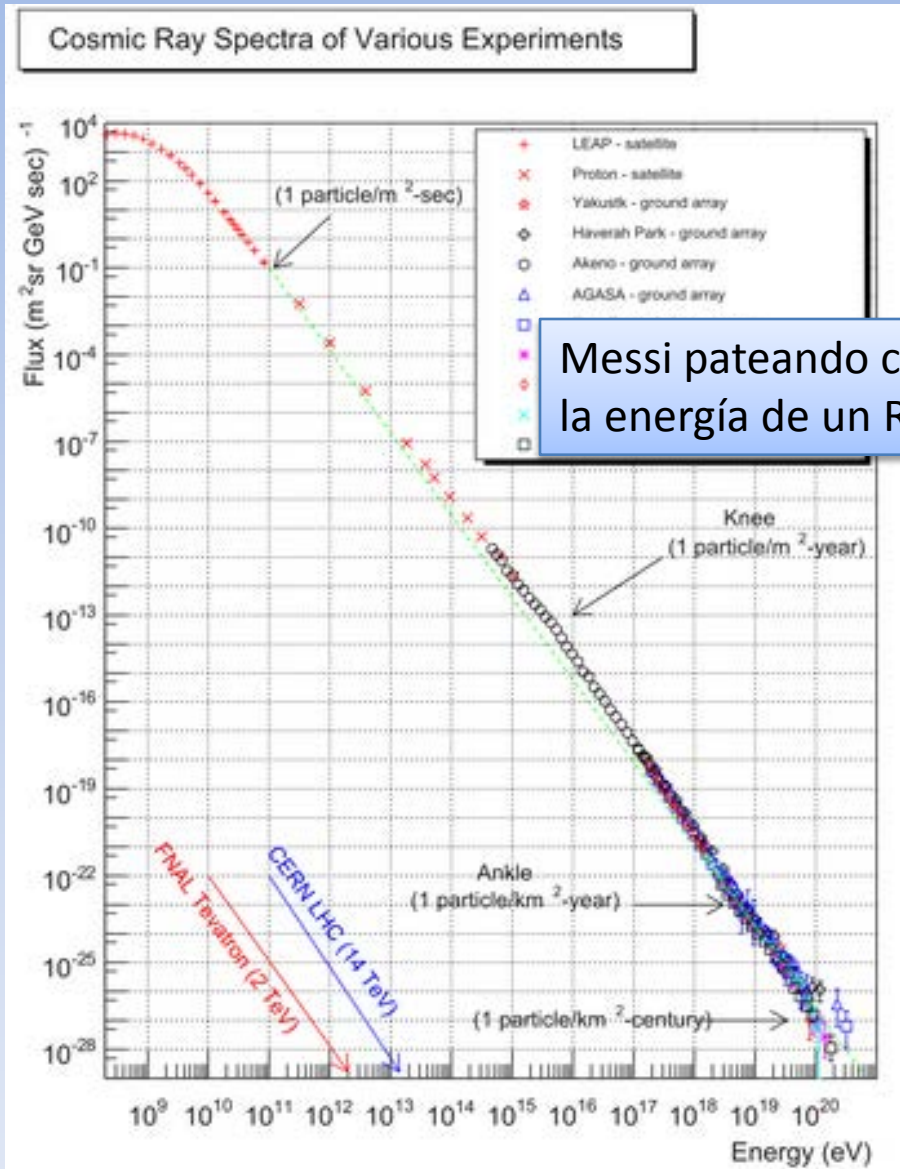
ANEXOS

ANEXOS



VUELO DE LA ISS POR EL POLO NORTE ¿PREGUNTAS?

¿Cuánta es la mayor energía?



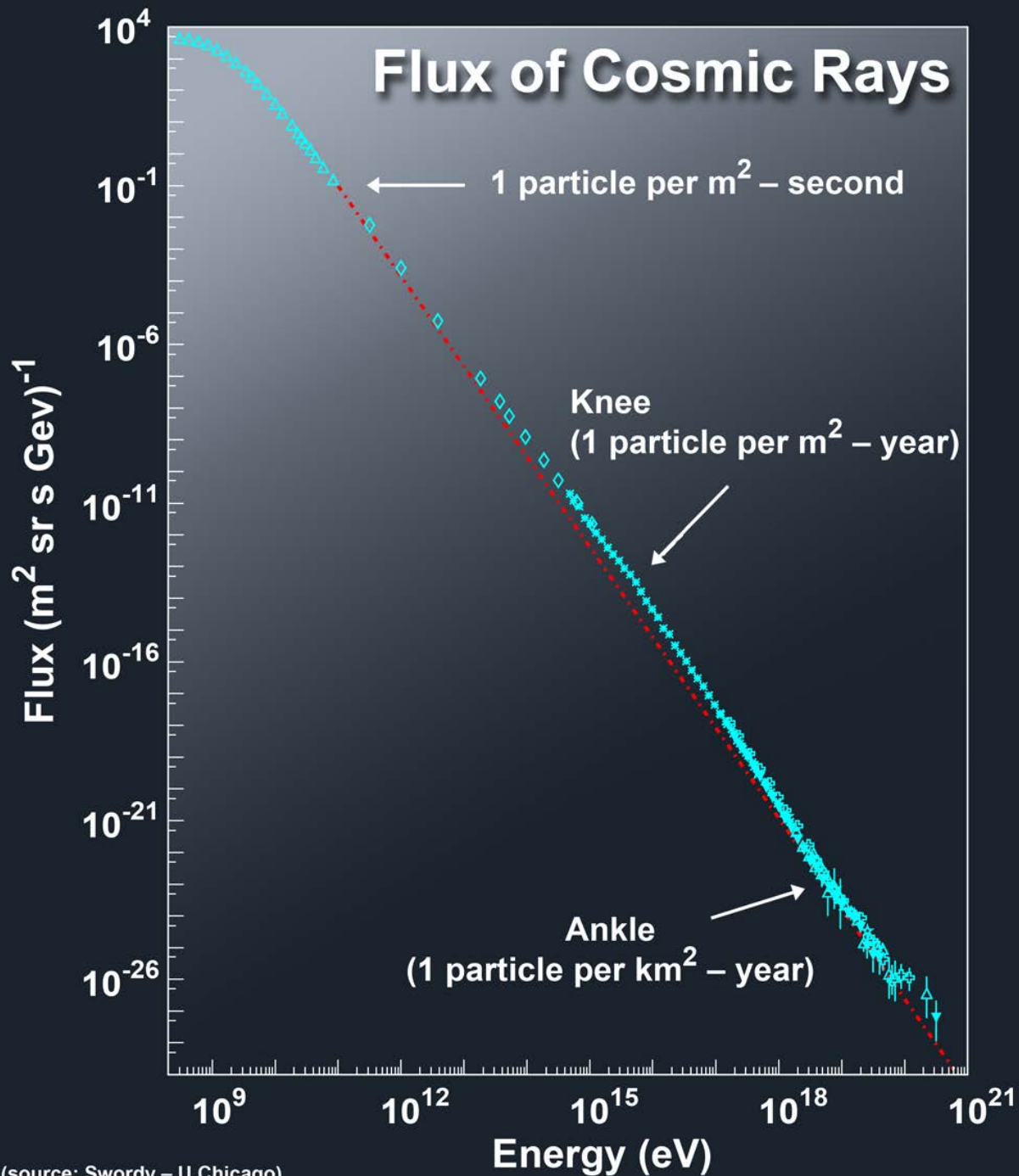
Messi pateando con la energía de un RC.



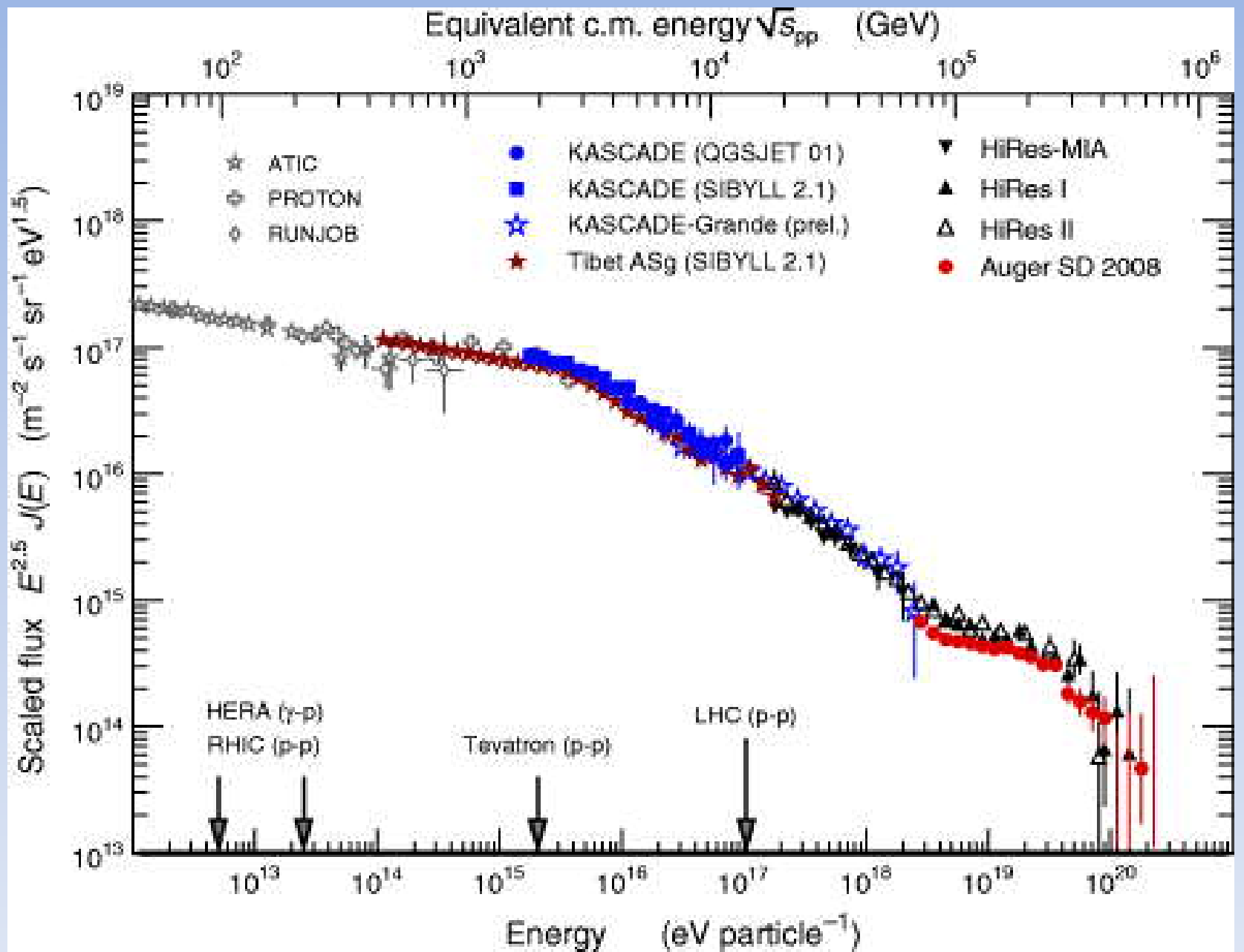
Protón

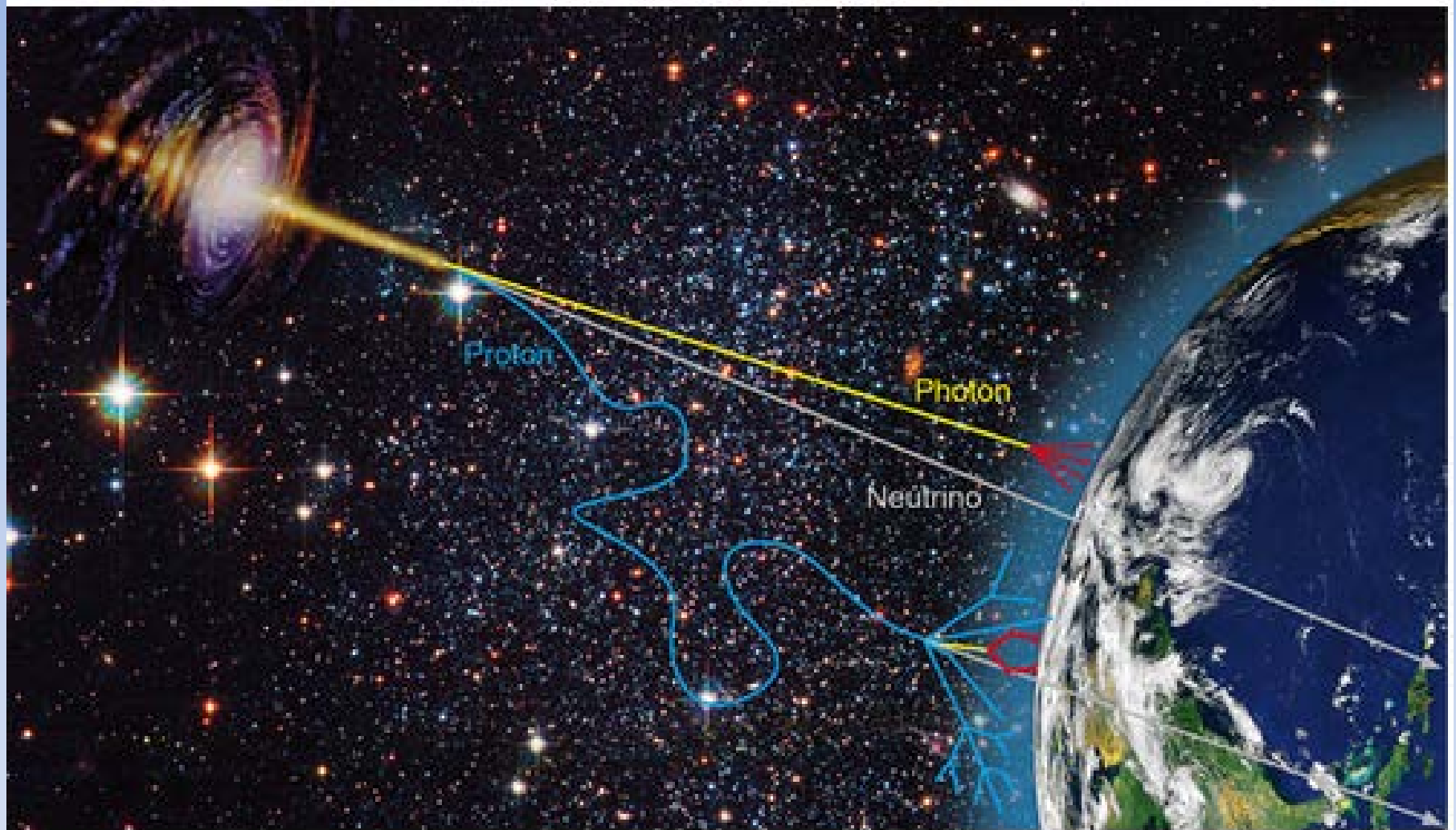
1 eV, la energía que gana o pierde 1 electrón al atravesar una diferencia de potencial eléctrico de 1 V.

Flux of Cosmic Rays



(source: Swordy - U.Chicago)





*Astroparticle physics research explores the universe
with high energy neutrinos and gamma rays
(credit: DESY)*

Cluster de computadoras



Codificamos todo en el lenguaje de programación FORTRAN 90

```
! Componentes del CAMPO MAGNETICO
B(1,i)=fac*Q*pos(1,i)*pos(3,i)

B(2,i)=fac*Q*pos(2,i)*pos(3,i)

B(3,i)=(1./3.)*fac*Q*(3.*pos(3,i)*pos(3,i)-p)
```

Fuerza de Lorentz

2da Ley de Newton

Velocidad resultante del algoritmo de velocidades de Verlet

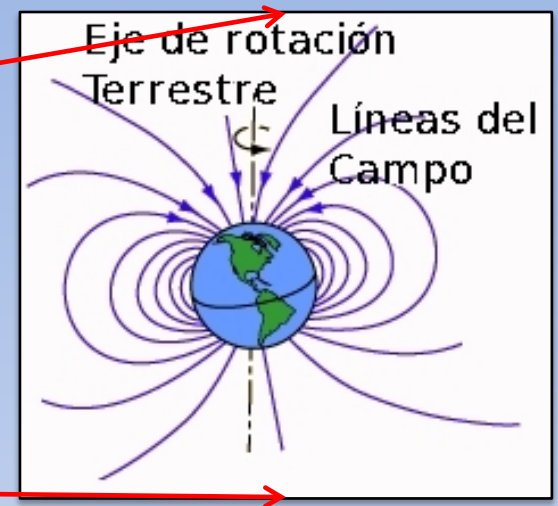
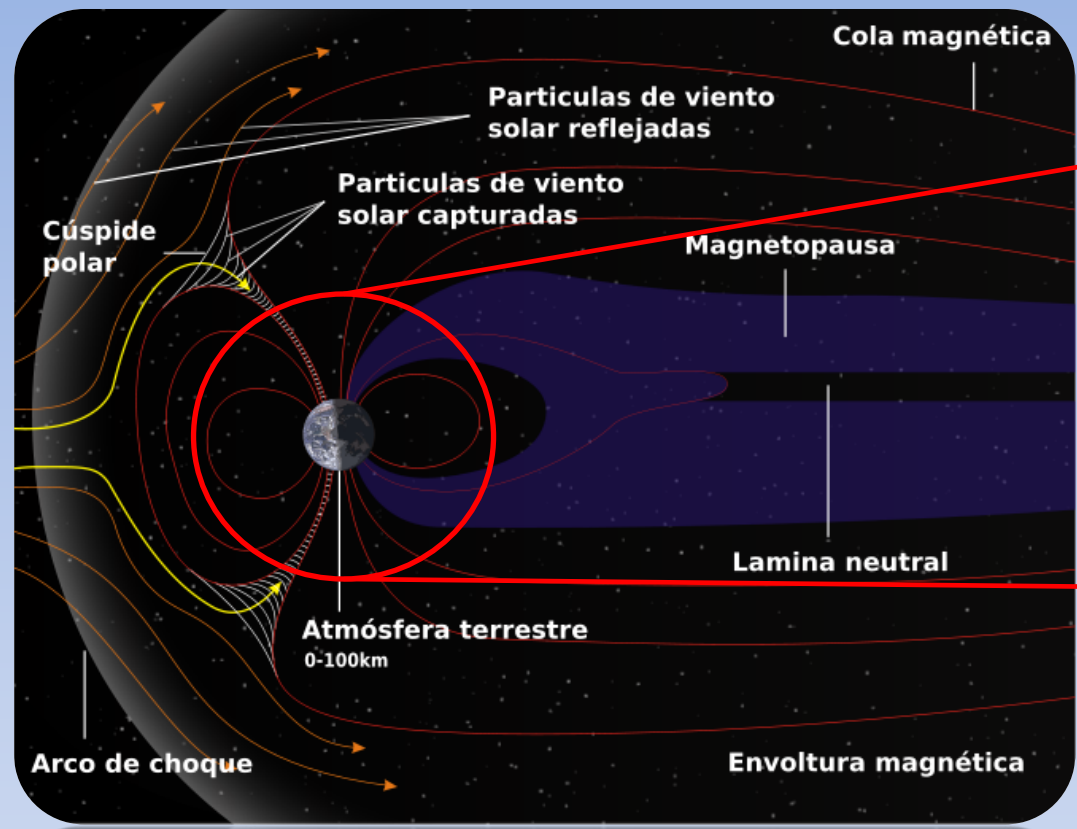


CENTRO DE MODELADO CIENTIFICO

LA

Laboratorio de Astronomía
y Física Teórica

FT



Asumimos el Campo Magnético terrestre en su aproximación dipolar.

Campo Geomagnético de la Tierra

✓ CARÁCTERÍSTICAS:

Ecuaciones de la Física Clásica

Velocidades del 1% C.

Sistema simétrico

Componentes de inducción magnética que **no** se resuelven en la literatura

$$B_x = \frac{\mu_0 M_0 a^3}{r^5} X.Z$$

$$B_y = \frac{\mu_0 M_0 a^3}{r^5} Y.Z$$

$$B_z = \frac{1}{3} \frac{\mu_0 M_0 a^3}{r^5} [3Z^2 - r^2]$$

Protón	pos (0°)	pos (20°)	pos (30°)	pos (45°)	pos (70°)	pos (75°)	pos (80°)	pos (90°)
Vel 1	✓	✗	✗	✓	✓	✓	✗	✗
Vel 2	✗	✗	✗	✓	✓	✓	✗	✗
Vel 3	✗	✗	✓	✗	✓	✓	✗	✗
Vel 4	✗	✗	✗	✗	✓	✓	✗	✗
Vel 5	✗	✗	✗	✗	✓	✓	✗	✗

Tabla 1: Tilde (La astropartícula **llegó a la Tierra**), (x) la astropartícula **no llegó a la Tierra**.

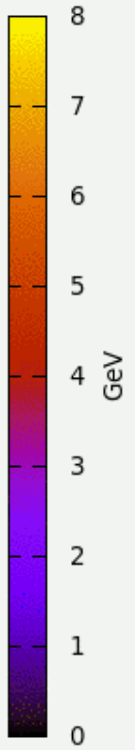
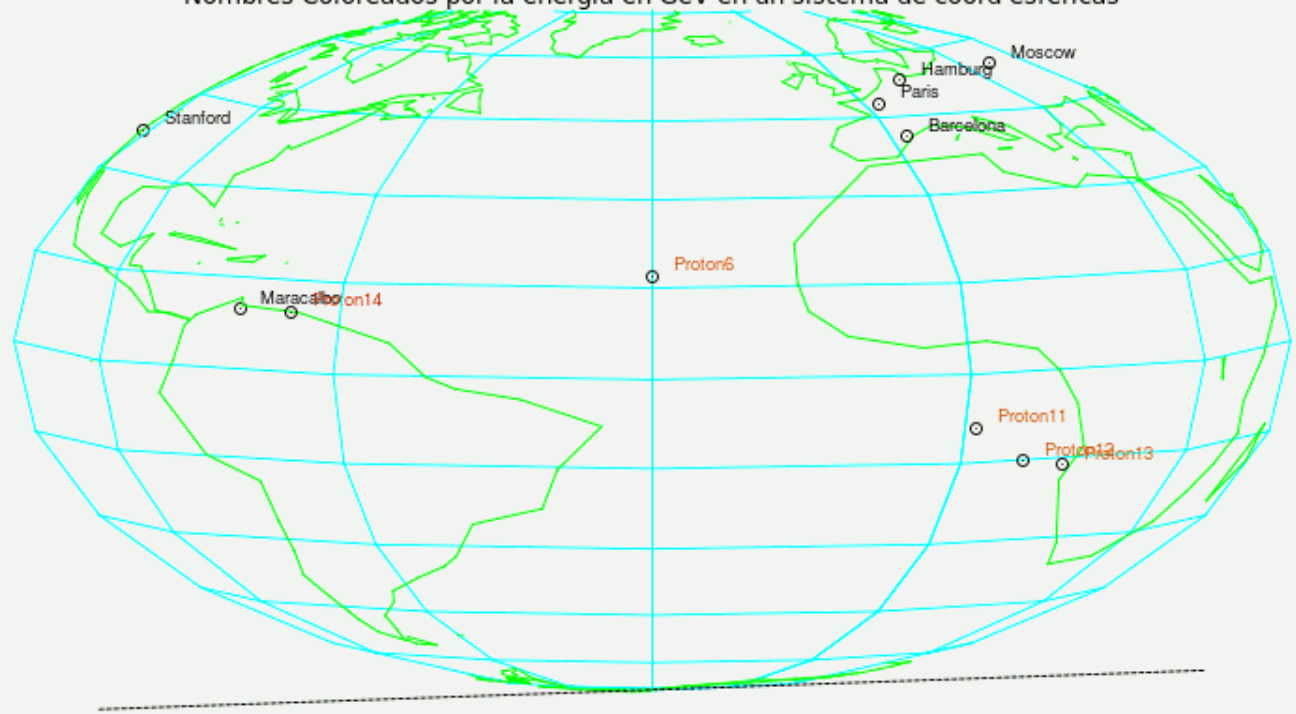
Nombre:	Latitud(θ)	$\Delta\theta$	Longitud(ϕ)	$\Delta\phi$
Maracaibo	10°46'N	#	-71°39'W	#
Protón 6	17°24'N	3.01×10^{-6}	-30°55'W	1.69×10^{-6}
Protón 11	-9°71'S	3.43×10^{-6}	1°36'E	4.23×10^{-9}
Protón 12	-15°82'S	3.17×10^{-6}	7°14'E	9.48×10^{-8}
Protón 13	-16°55'S	3.52×10^{-6}	12°57'E	1.42×10^{-7}
Protón 14	10°84'N	4.72×10^{-7}	-65°78'W	1.20×10^{-6}

Tabla 2: Coord de Latitud y longitud.

Tabla 3: Energías inicial E_0 y final E_f en GeV.

Nombre:	E_0 (GeV)	ΔE_0	E_f (GeV)	ΔE_f
Protón 6	4.69×10^{-5}	2.07×10^{-12}	5.17×10^{-5}	2.28×10^{-7}
Protón 11	4.69×10^{-5}	2.07×10^{-12}	5.35×10^{-5}	2.37×10^{-7}
Protón 12	4.69×10^{-5}	2.07×10^{-12}	5.42×10^{-5}	2.40×10^{-7}
Protón 13	4.69×10^{-5}	2.07×10^{-12}	5.51×10^{-5}	2.44×10^{-7}
Protón 14	4.69×10^{-5}	2.07×10^{-12}	4.45×10^{-5}	1.97×10^{-7}

Nombres Coloreados por la energía en GeV en un sistema de coord esféricas



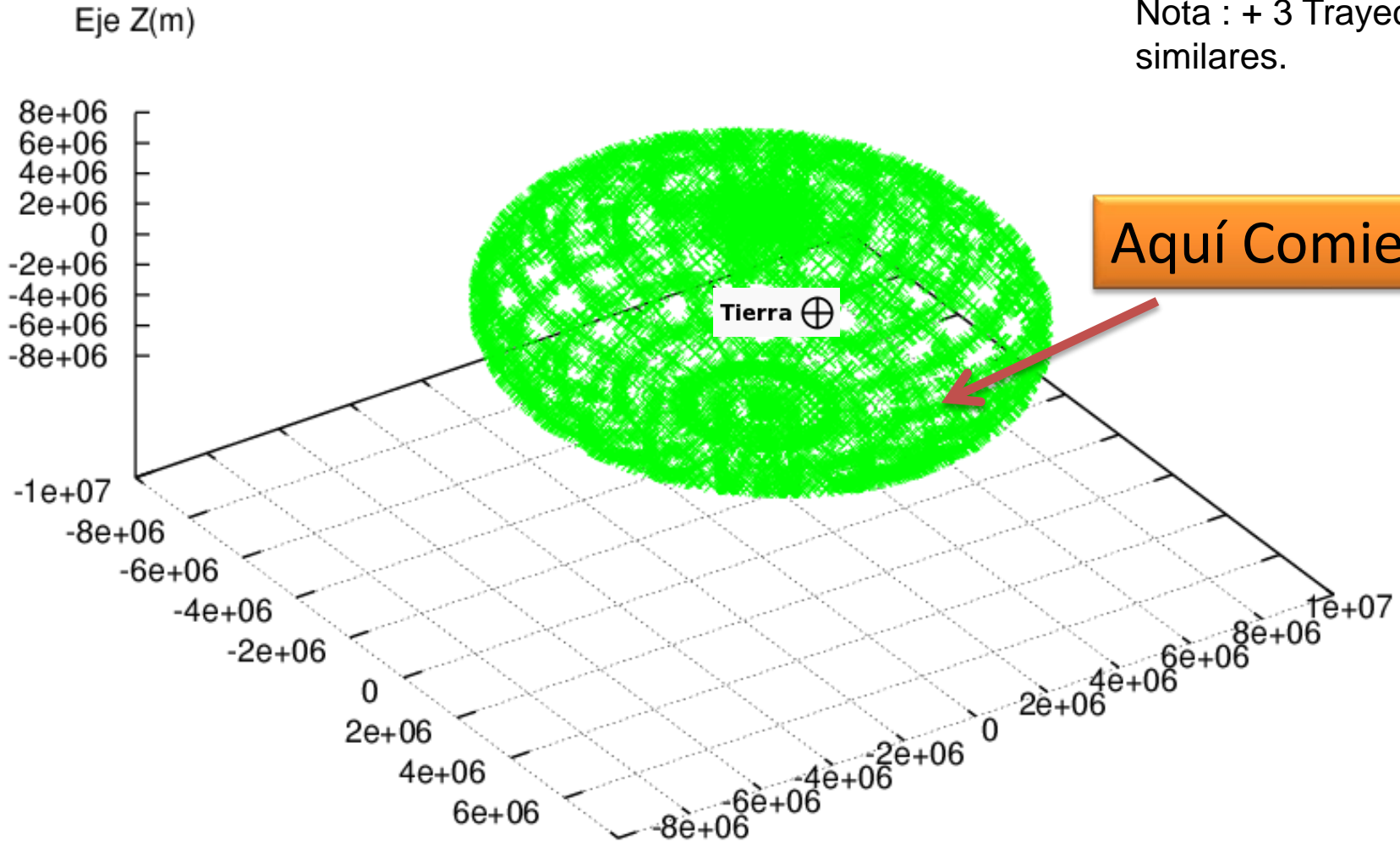
view: 82.0000, 60.0000 scale: 1.22000, 1.26000

Figura 1: Protón con velocidad 5 y posición 75°.

Figura 2: Protón con velocidad 5 y posición 75°.

"pmTierra.txt" ×
"astrotrayec.dat"

Nota : + 3 Trayectorias similares.



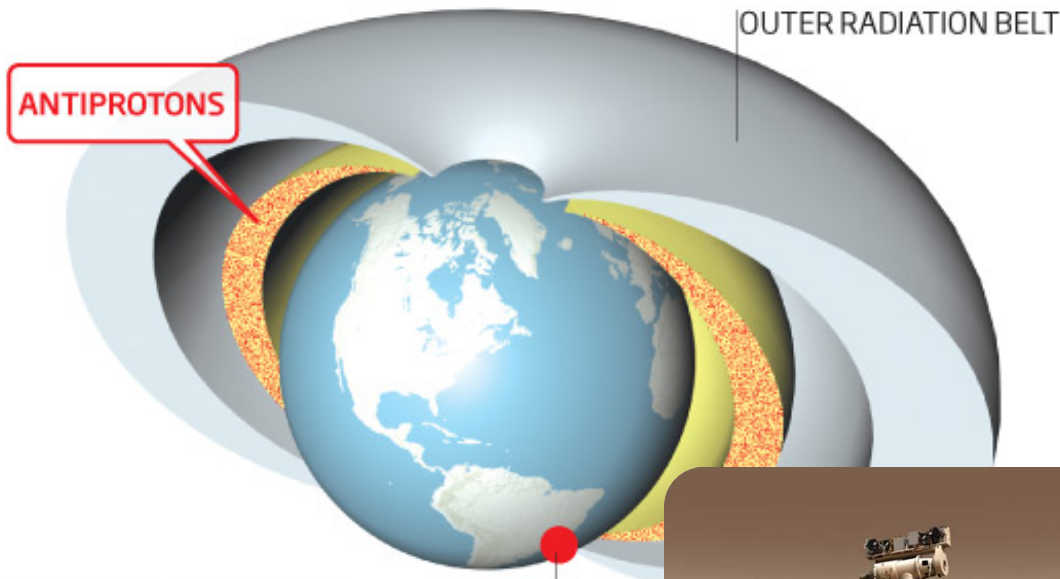
Confirmación Experimental

Ahora en referencia al reciente descubrimiento del **27-07-2011** en The Astrophysical Journal Letters.

Ring of antiprotons

©NewScientist

Earth is surrounded by two zones of charged particles, called the Van Allen radiation belts. Antiprotons, which may persist for minutes or hours, have now been found in the inner belt



Detection of antiprotons
by Pamela spacecraft
(350-600km from Earth's surface)

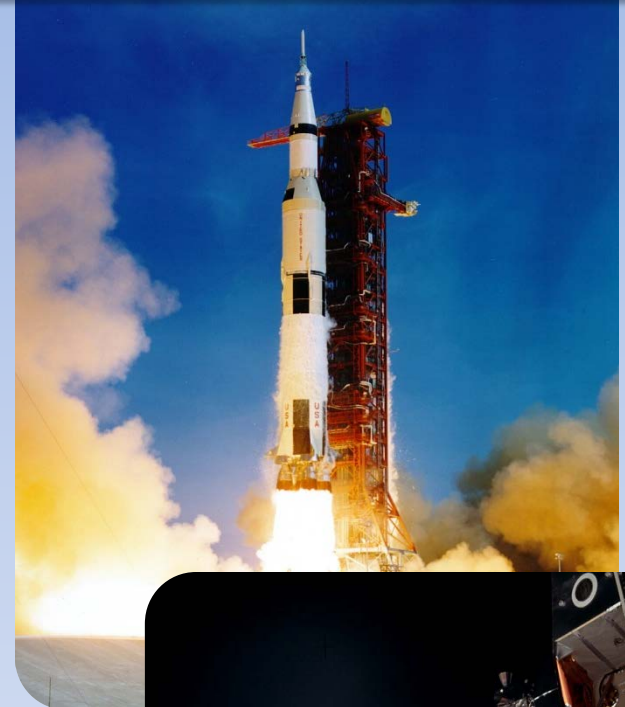


Figura 3: Antiprotón con velocidad 2 y posición 70 con 20M pasos

"pmTierra.txt" ×
"astrotrayec.dat" .

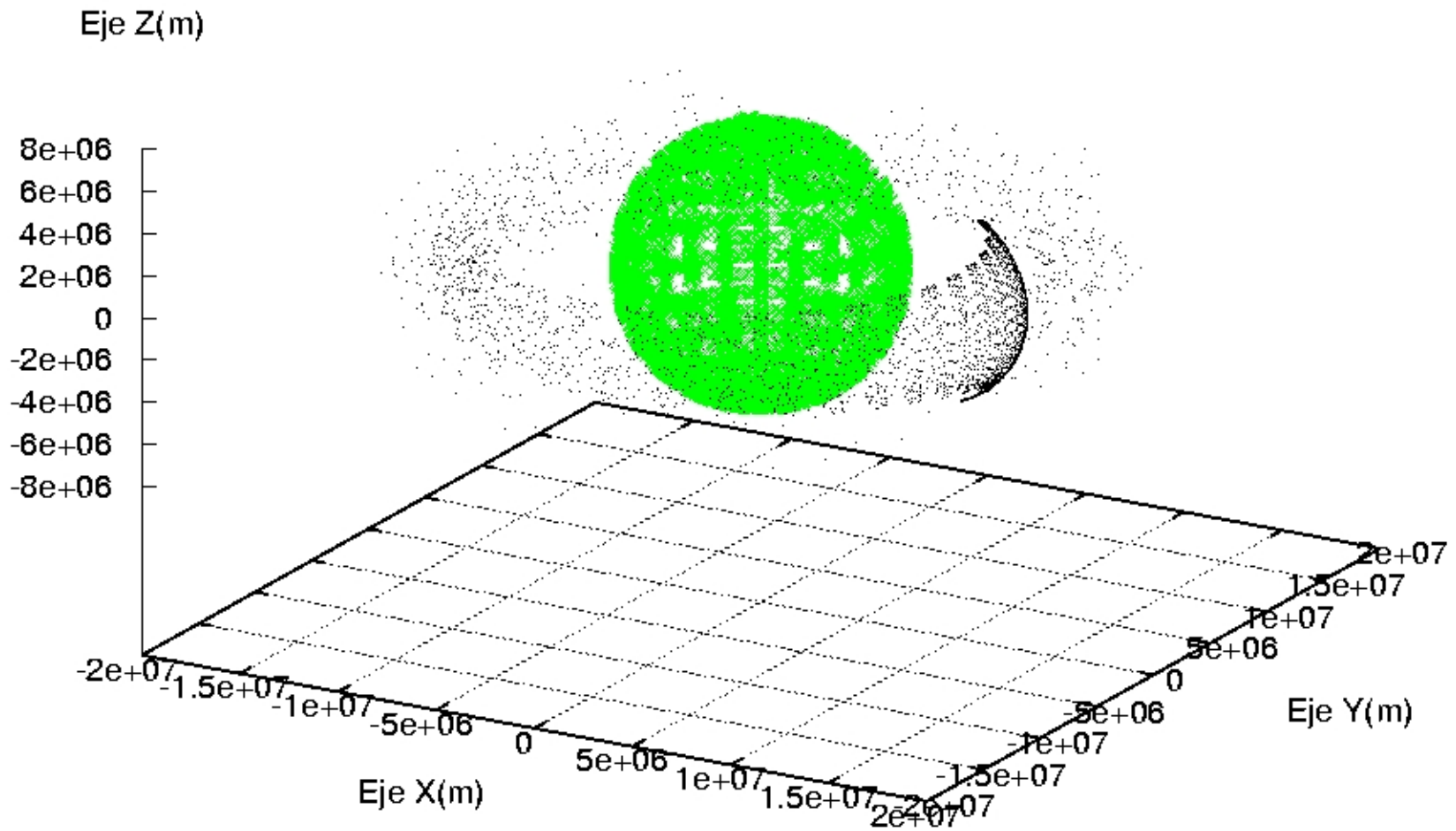
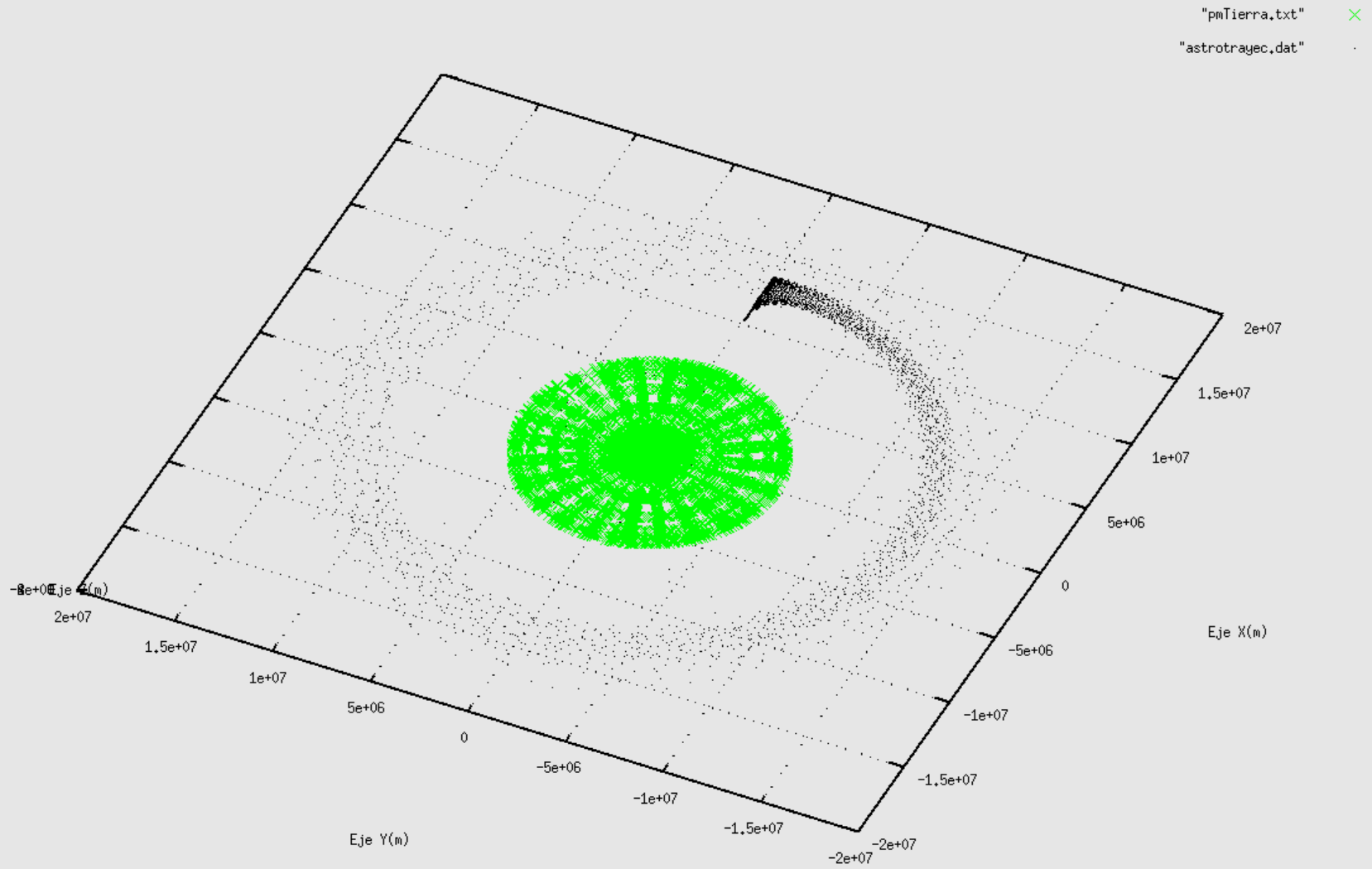


Figura 3: Antiprotón con velocidad 2 y posición 70 con 20M pasos

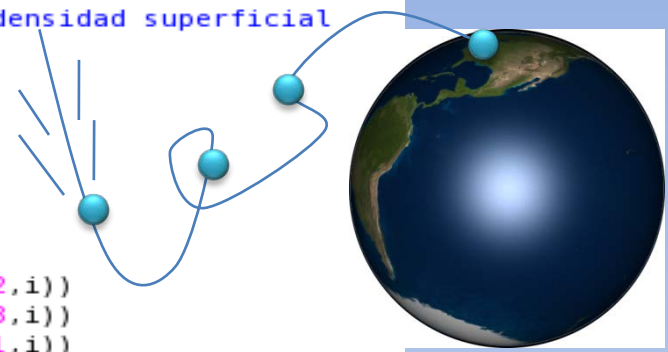


fac=M0*J/(4*3.1415)!*a*a la a aparece por ser la densidad superficial

```

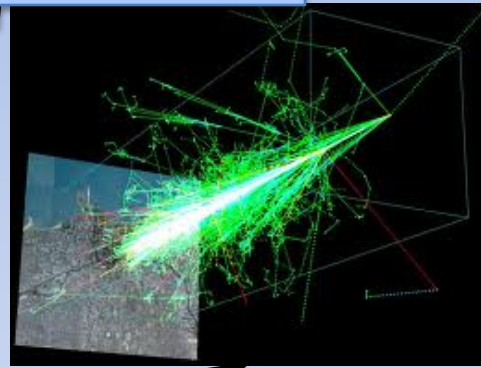
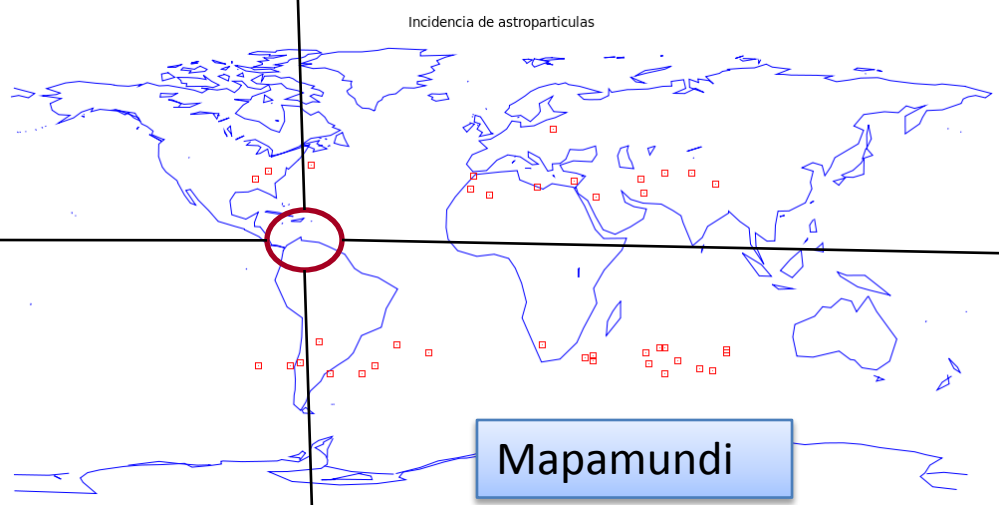
Componentes del CAMPO MAGNETICO
B(1,i)=fac*Q*pos(1,i)*pos(3,i)
B(2,i)=fac*Q*pos(2,i)*pos(3,i)
B(3,i)=(1./3.)*fac*Q*(3.*pos(3,i)*pos(3,i)-p)
Componente del CAMPO ELECTRICO
(np,nd)=0.d0
Componente de la FUERZA DE LORENTZ
f(1,i)=car*(E(1,i)+vel(2,i)*B(3,i)-vel(3,i)*B(2,i))
f(2,i)=car*(E(2,i)+vel(3,i)*B(1,i)-vel(1,i)*B(3,i))
f(3,i)=car*(E(3,i)+vel(1,i)*B(2,i)-vel(2,i)*B(1,i))

```



Computar todo en FORTRAN 90 y generar Trayectorias.

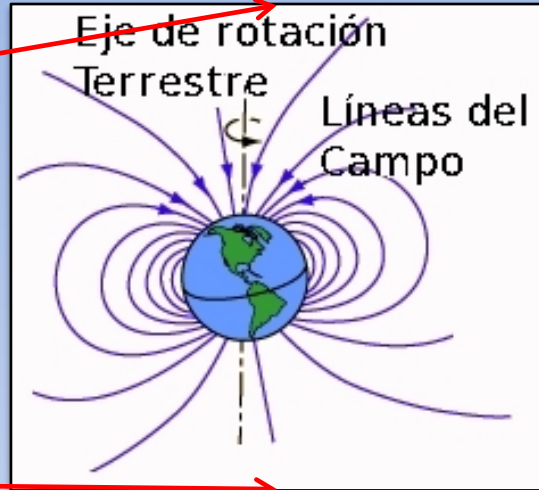
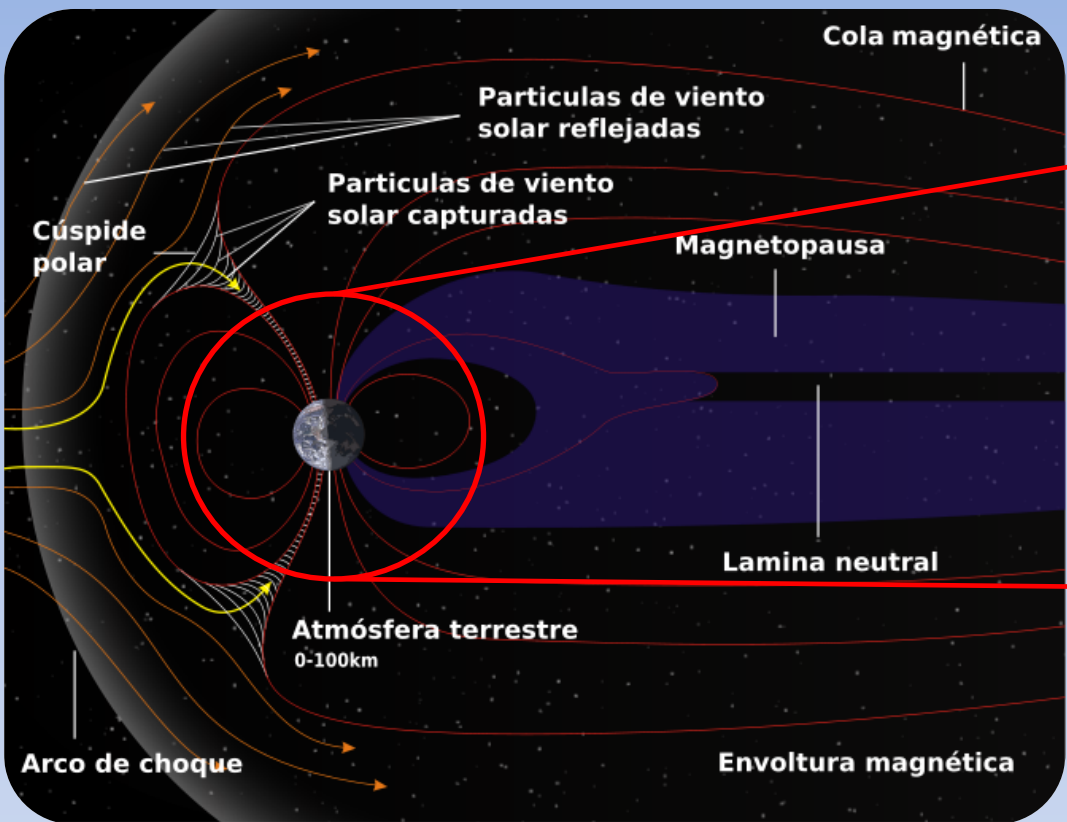
Generar una herramienta computacional de utilidad para el estudio de los RC



AIRES Cosmic Ray Project.

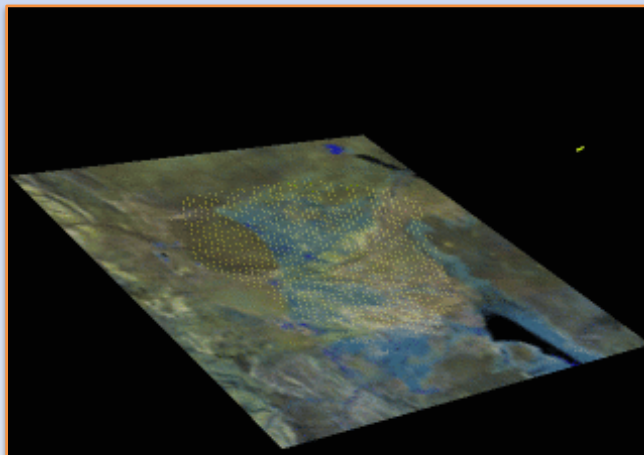


Ciudad de Maracaibo



Asumimos el Campo Magnético terrestre en su aproximación dipolar.

Campo Geomagnético de la Tierra



Aquí en Venezuela:

Actualmente Venezuela cuenta con muy pocos investigadores en el área, sin embargo participa desde el 2008 en el proyecto **Large Aperture GRB Observatory** (LAGO, siglas en inglés, Observatorio de Gran Apertura de Brotes de Rayos Gamma), el cual consiste primeramente en la articulación de instrumentos de detección de los RC en los países de México, Venezuela, Colombia, Bolivia, Perú y Argentina para configurar el **proyecto LAGOVirtual** que genere una Grid Computacional para América Latina y Europa[11].



Alejandra Melfo: este proyecto permitirá incorporarnos a la Física Experimental de Altas Energías



fundación
EMPRESAS POLAR
2007

La participación Venezolana viene por las universidades:



INTRODUCCIÓN

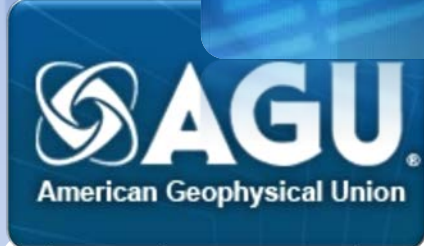
LA TECNOLOGÍA [5].



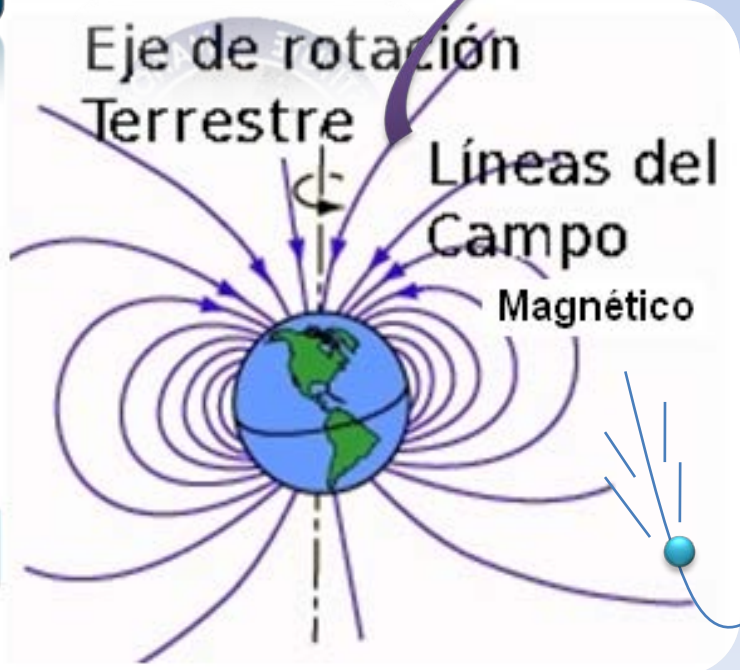
EL CLIMA GLOBAL [6,7].



LA SALUD HUMANA [8,9,10].



$$B_x = \frac{\mu_0 M_0 a^3}{r^5} X.Z$$
$$B_y = \frac{\mu_0 M_0 a^3}{r^5} Y.Z$$
$$B_z = \frac{1}{3} \frac{\mu_0 M_0 a^3}{r^5} [3Z^2 - r^2]$$



Fuerza de Lorentz



2da Ley de Newton

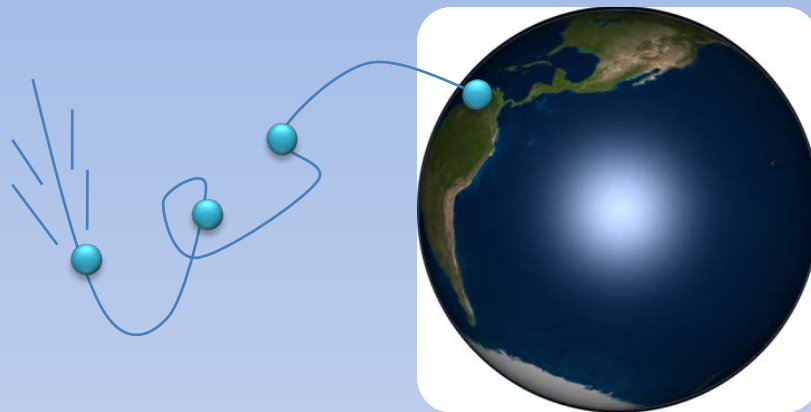
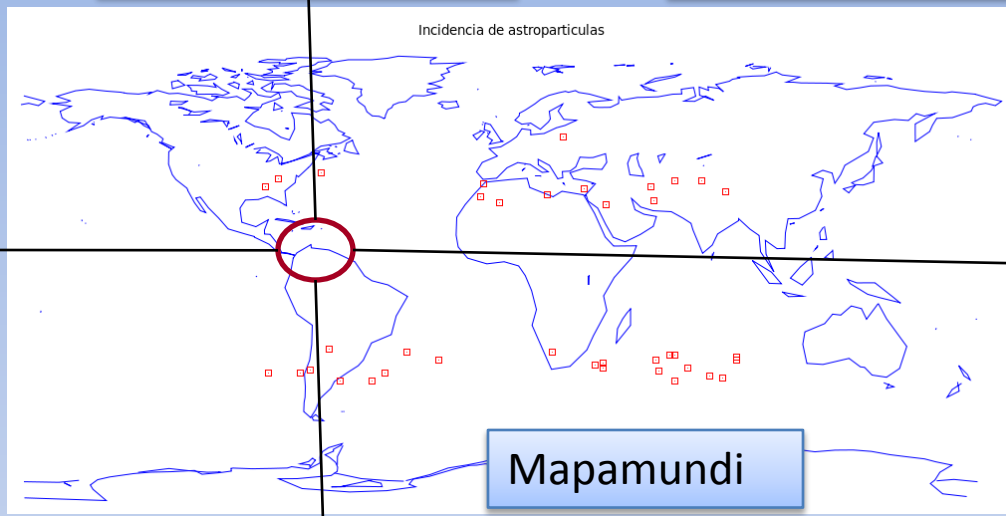


Algoritmo de Verlet para la velocidad



OBJETIVOS

Generar una herramienta computacional de utilidad para el estudio de los RC



En MARACAIBO
¿Sólo nos cae
Agua?



Ciudad de Maracaibo

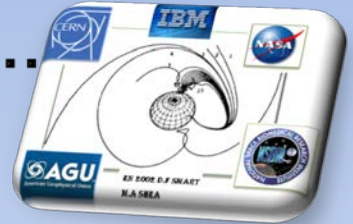


Índice General

1. Introducción.....



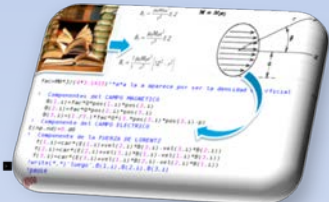
2. Antecedentes de la Investigación.....



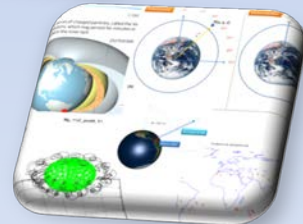
3. Objetivos.....



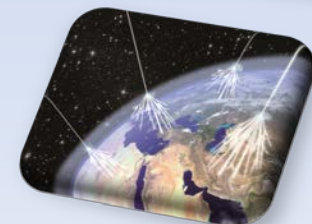
4. Marco Metodológico de la Investigación.....



5. Discusión y Análisis de los Resultados.....



6. Conclusiones y Recomendaciones...



Los Rayos Cósmicos en la Tecnología Actual

IEEE Xplore®
DIGITAL LIBRARY

(2010)

Terrestrial cosmic ray intensities



Download
Citation



Email



Print



Instructions
for Authors

Ziegler, J. F.;
IBM Research Division, Thomas J. Watson Research
Center, P.O. Box 218, Yorktown Heights, New York
10598, USA

This paper appears in: [IBM Journal of Research and Development](#)

ResearchGate

Los rayos cósmicos pueden causar fallos en la lógica electrónica y memorias, para ello el artículo resalta que **“Es necesario conocer el flujo local de los RC para poder predecir los daños promedios en la electrónica debidos a los RC”**[5].

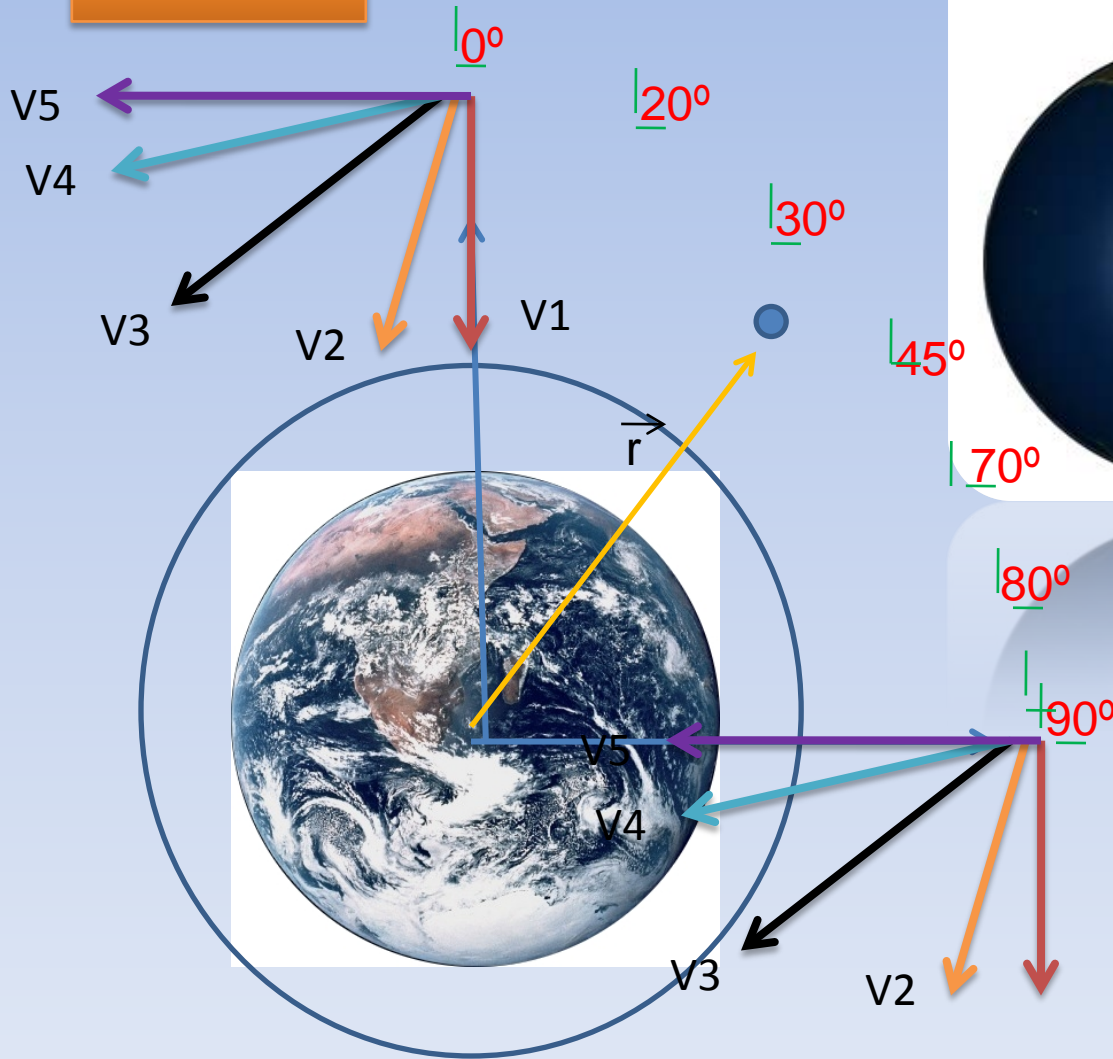


RESULTADOS

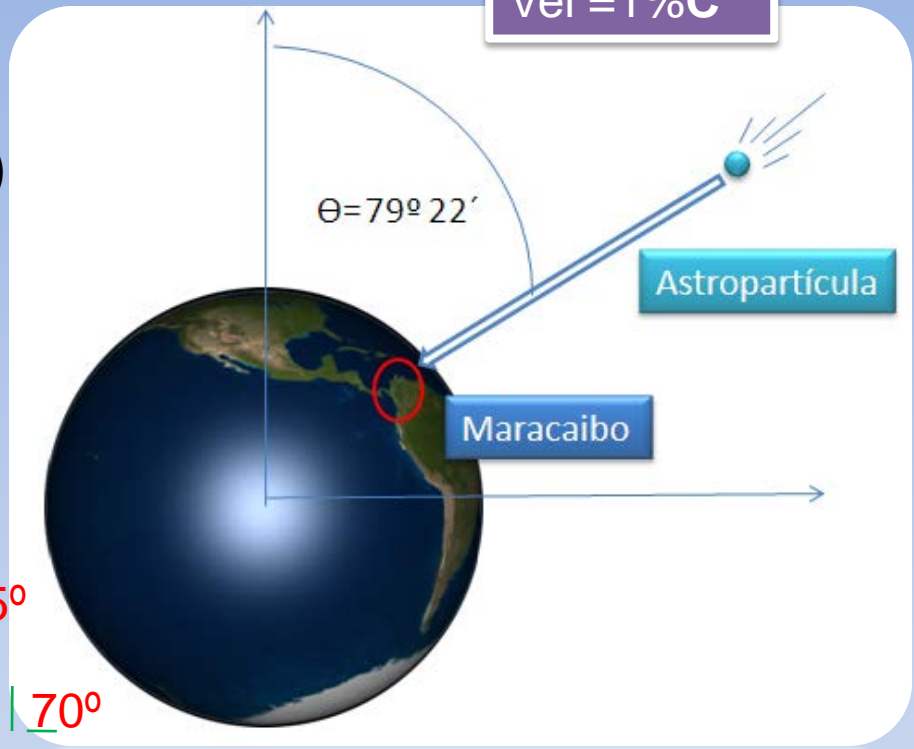
Velocidades

$$\vec{V}(V_x, V_y, V_z)$$

Posiciones



Vel = 1% C



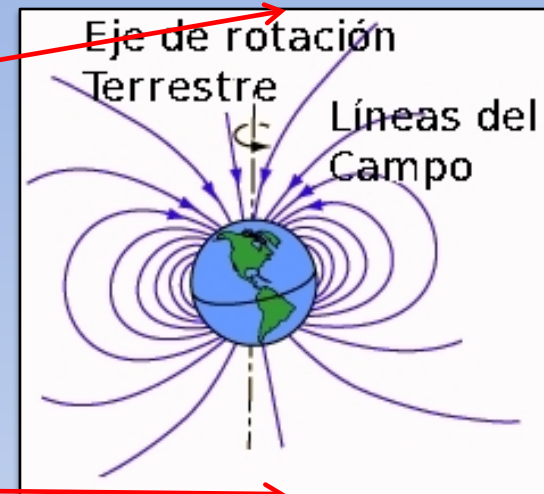
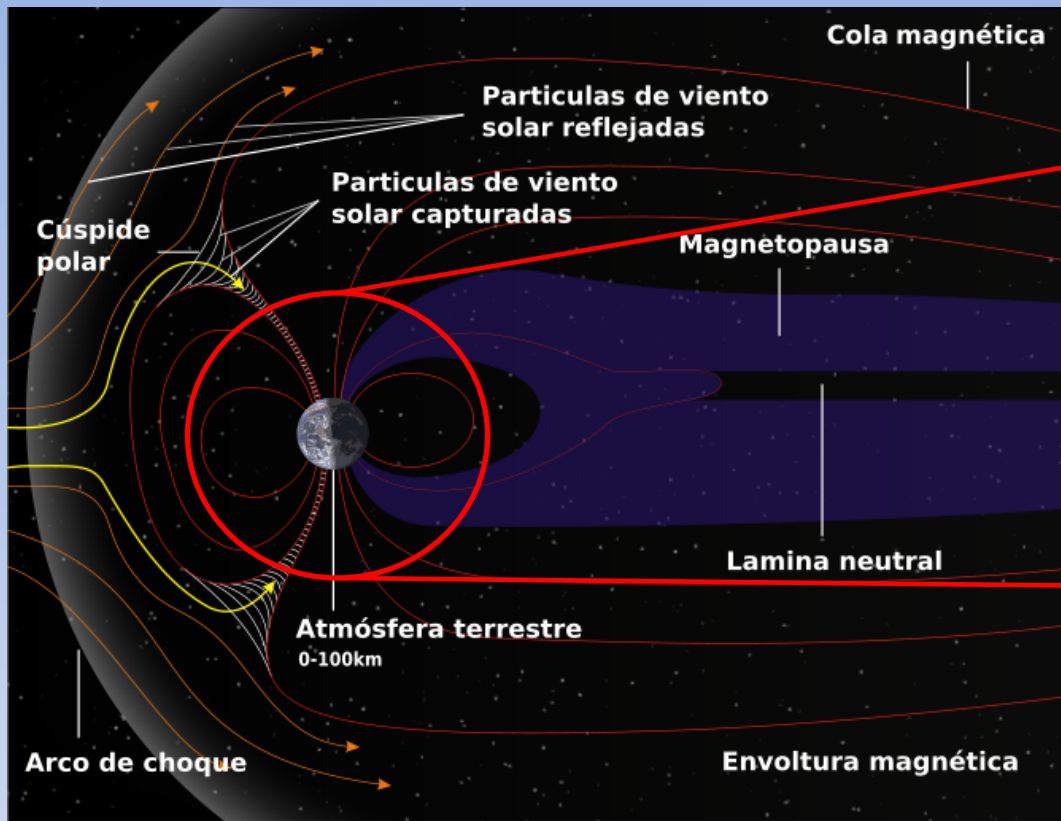


CONCLUSIONES

Como conclusiones de la presente investigación luego de realizar un **total de 1396 corridas**

computacionales y procesar más de **228 Gb de datos**, podemos destacar los siguientes aspectos:

1. Si fue posible simular las trayectorias de los Rayos Cósmicos.
2. El algoritmo de Verlet de la velocidad si funciona como herramienta para la determinación de la posición de las astropartículas.
3. Si es posible obtener la posición sobre la superficie terrestre de los lugares de incidencia para los RC.
5. Si es posible implementar este modelo computacional, para estudiar cuales astropartículas pueden incidir sobre la Ciudad de Maracaibo Venezuela.



Asumimos el Campo Magnético terrestre en su aproximación dipolar.

Campo Geomagnético de la Tierra

$$B_x = \frac{\mu_0 M_0 a^3}{r^5} X.Z$$

$$B_y = \frac{\mu_0 M_0 a^3}{r^5} Y.Z$$

$$B_z = \frac{1}{3} \frac{\mu_0 M_0 a^3}{r^5} [3Z^2 - r^2]$$

$$B_r = \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} (\sin \theta A_\phi)$$

$$B_\theta = -\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r A_\phi)$$

$$B_\phi = 0$$

$$A_\phi(x) = \frac{\mu_0}{3} M_0 a^2 \left(\frac{r_{<}}{r_{>}^2} \right) \sin \theta$$

$$(4.1) \quad B_x = \frac{\mu_0 M_0 a^3}{r^5} X.Z$$

$$(4.2) \quad B_y = \frac{\mu_0 M_0 a^3}{r^5} Y.Z$$

$$(4.3) \quad B_z = \frac{1}{3} \frac{\mu_0 M_0 a^3}{r^5} [3Z^2 - r^2]$$

Componentes del CAMPO MAGNETICO

B(1,i)=fac*Q*pos(1,i)*pos(3,i)

B(2,i)=fac*Q*pos(2,i)*pos(3,i)

B(3,i)=(1./3.)*fac*Q*(3.*pos(3,i)*pos(3,i)-p)

Obtenemos las componentes de inducción magnética en coordenadas cartesianas, las cuales **no** se encuentran resueltas de esta manera y reescritas para codificar fácilmente en FORTRAN 90.

Fuerza de Lorentz

$$\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$$

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m}$$

2da Ley de Newton

Velocidad resultante del algoritmo de velocidades de Verlet:

$$v(t) = v_t - v_{t-\Delta t} + \frac{1}{2} \Delta t a$$

$$r = r_0 + v_0 dt + \frac{1}{2} dt^2 a$$

Clásica ecuación de la posición en el Mov Curvilíneo[12]

El Flujo de Rayos Cósmicos: Su importancia para el Clima

EOS, TRANSACTIONS AMERICAN GEOPHYSICAL UNION, VOL. 90, NO. 44, P. 397, 2009
doi:10.1029/2009EO440001

The Terrestrial Cosmic Ray Flux: Its Importance for Climate

Michael Ram

Department of Physics, State University of New York at Buffalo, USA



EUROPEAN ORGANIZATION FOR NUCLEAR RESEARCH

CERN-PH-EP/2008-005

26 March 2008

COSMIC RAYS AND CLIMATE

Jasper Kirkby

CERN, Geneva, Switzerland



Afirmaban igualmente que por medio de numerosas observaciones “paleoclimáticas” sugieren que los rayos cósmicos desempeñan un papel muy importante en el proceso de cambio climático, tanto como lo hace la irradiancia solar o su componente electromagnética UV [6,7].

La salud Humana bajo la incidencia de los Rayos Cósmicos

National Aeronautics and
Space Administration
Lyndon B. Johnson Space Center

Understanding Space Radiation



Display Settings: Abstract



Radiat Environ Biophys. 2010 Nov;49(4):715-21. Epub 2010 Aug 20.

Using electron beam radiation to simulate the dose distribution for whole body solar particle event proton exposure.

Cengel KA, Diffenderfer ES, Avery S, Kennedy AR, McDonough J.

Department of Radiation Oncology, University of Pennsylvania School of Medicine, Philadelphia, PA 19104, USA.
keith.cengel@uphs.upenn.edu



En su trabajo explican que debido a que los astronautas **reciben una significativa radiación** durante los eventos espaciales, que **denominan “ eventos de partículas solares”** o solarparticle event (SPE), el Centro de Investigaciones para la Radiación Acumulada (CARR) afirma que los astronautas pueden recibir en sus periodos de exposición a la radiación **principalmente protones energéticos del orden de 50MeV**, y para un análisis de la problemática planteada usan simulaciones realizadas con Monte Carlo para determinar la porción de radiación absorbida primeramente en animales de laboratorio[9,10].

Introducción



La Tecnología: desde celulares, GPS, satélites y computadores de todo tipo[5].



El Clima Global: Cambio Climático [6,7].

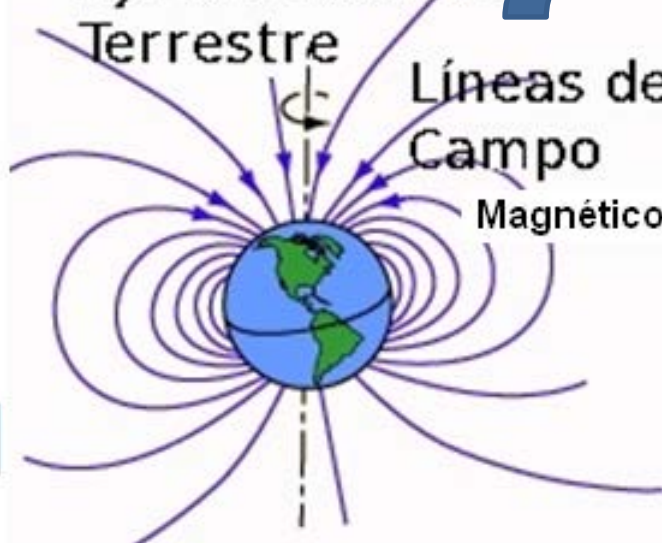


La Salud Humana: Vuelos Trasatlánticos y Astronautas [8,9,10].



Eje de rotación
Terrestre

Líneas del
Campo
Magnético



$$B_x = \frac{\mu_0 M_0 a^3}{r^5} X.Z$$

$$B_y = \frac{\mu_0 M_0 a^3}{r^5} Y.Z$$

$$B_z = \frac{1}{3} \frac{\mu_0 M_0 a^3}{r^5} [3Z^2 - r^2]$$

2da ley de newton

Fuerza de Lorentz

$$v(t) = v_t - v_{t-\Delta t} + \frac{1}{2} \Delta t a$$

Algoritmo de Verlet
para la Velocidad

$$r = r_0 + v_0 dt + \frac{1}{2} dt^2 a$$

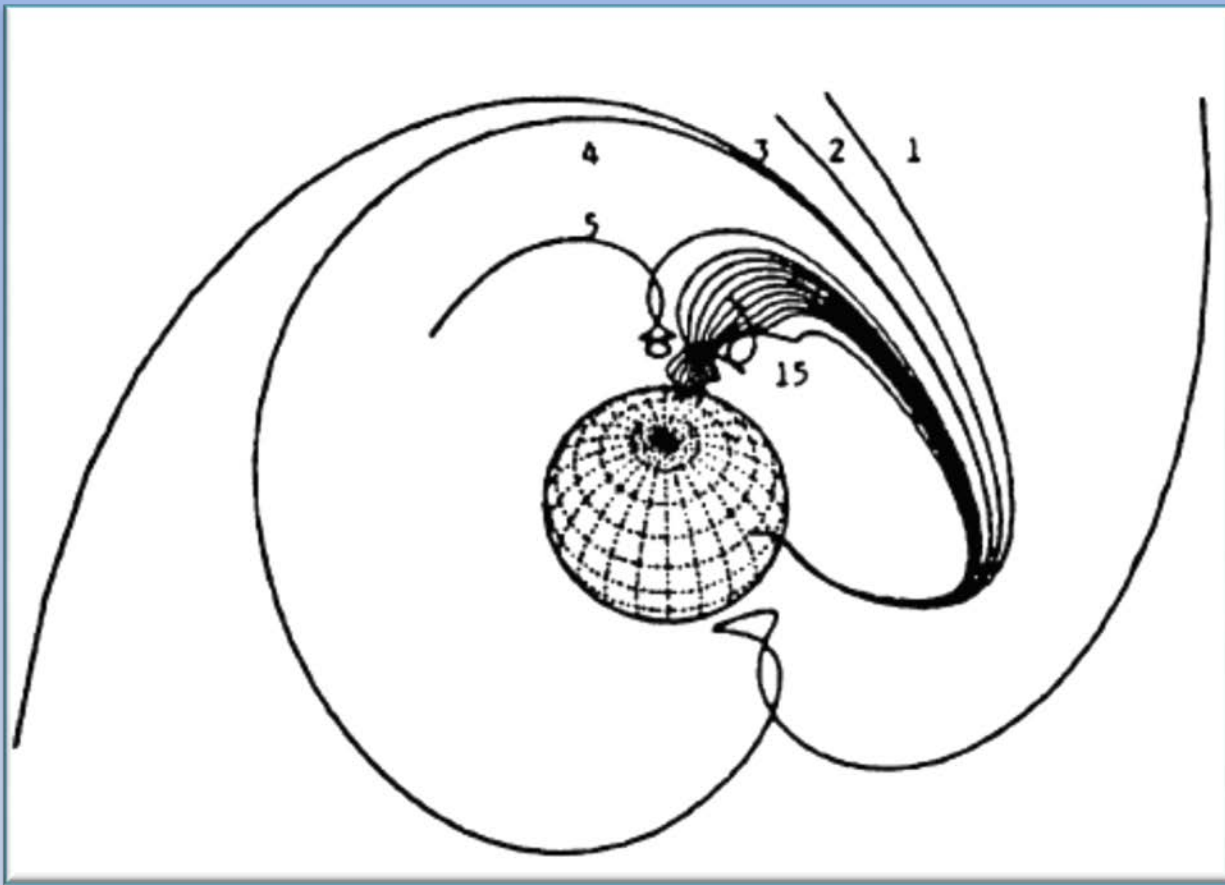


Figura 1: Ilustración del proceso de trazado de trayectorias de los rayos cósmicos. La de rigidez mas alta (mas resistente a la curvatura geomagnética) marcada como 1 y la de mas baja rigidez marcado como 15 [12].

En 2002 **D.F Smart y M.A Shea** hacen una publicación, en la cual realizan una medida proporcionada por el campo magnético de la Tierra; en donde por medio del corte geomagnético se puede predecir la energía de trasmisión de las partículas cargadas de la magnetosfera a un lugar específico como función de la dirección.

Propuesta Física-Computacional

En nuestro proyecto definimos el campo magnético terrestre en su forma dipolar y en él aplicamos las ecuaciones para una esfera uniformemente magnetizada; estas son bien conocidas en la literatura[13] (Figura 2):

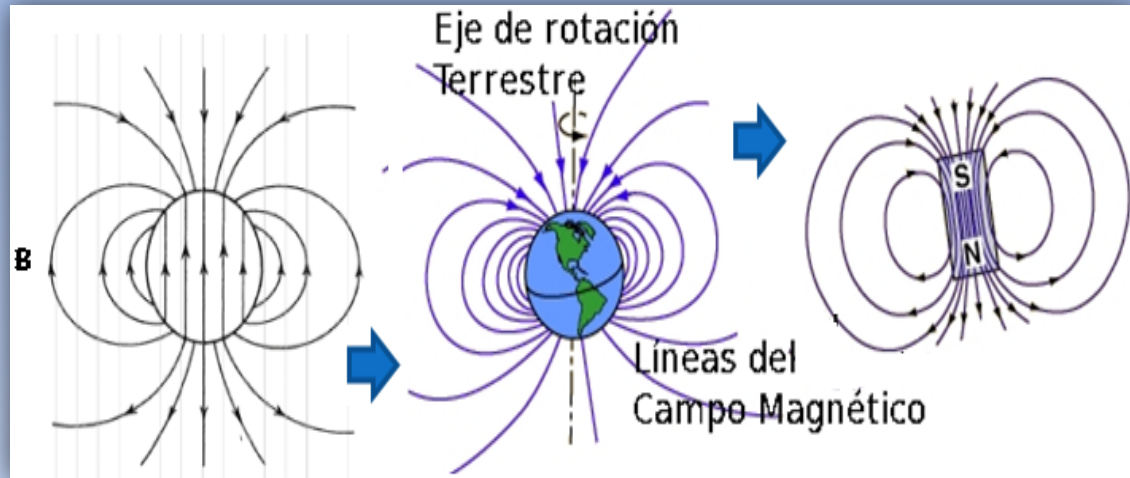


Figura 2: Esfera uniformemente magnetizada con fuente esférica a semejanza del campo magnético terrestre y su aproximación dipolar[14].

Tabla 1

A partir del potencial magnético vectorial $A_{\phi}(x)$:

$$A_{\phi}(x) = \frac{\mu_0}{3} M_0 a^2 \left(\frac{r_{<}}{r_{>}^2} \right) \text{sen} \theta \quad (6.1)$$

Parámetros	Magnitudes
(Permeabilidad del espacio libre) μ_0	$4\pi 10^{-7} \text{ N/A}^2$
(magnetización o momento dipolar) M_0	$8,1 \times 10^{22} \text{ Am}^2$
a (Radio terrestre)	$6,3 \times 10^7 \text{ m}$
r (Módulo del vector posición)	En metros
(Potencial magnético vectorial) $A_{\phi}(x)$	Wb/m

Junto a las componentes de inducción magnética ($B_r ; B_\theta ; B_\phi$) con fuente tipo dipolar:

A partir del potencial magnético vectorial $A_\phi(x)$:

$$B_r = \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} (\sin \theta A_\phi) \quad (2.2)$$

$$A_\phi(x) = \frac{\mu_0}{3} M_0 a^2 \left(\frac{r_{<}}{r_{>}^2} \right) \sin \theta \quad (2.1)$$

$$B_\theta = -\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r A_\phi) \quad (2.3)$$

Estas ecuaciones son bien conocidas en la literatura[28] y por medio de ellas logramos obtener las componentes ($B_x ; B_y ; B_z$) en coordenadas cartesianas para la incorporación final en el algoritmo computacional,

$$B_\phi = 0 \quad \text{Debido a la simetría} \quad (2.4)$$

$$B_r = \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin \theta \frac{\mu_0}{3} M_0 a^2 \left(\frac{r_{<}}{r_{>}^2} \right) \sin \theta \right)$$

$$B_\theta = -\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\mu_0}{3} M_0 a^2 \left(\frac{r_{<}}{r_{>}^2} \right) \sin \theta \right)$$

Aplicando las siguientes transformaciones de coordenadas

$$B_r = \frac{2}{3} \frac{M_0 \mu_0 a^3}{r^3} \cos \theta$$

$$B_\theta = \frac{M_0 \mu_0 a^3}{3r^3} \sin \theta$$

$$B_\phi = 0$$

$$B_x = B_r \hat{r}_x + B_\theta \hat{\theta}_x + B_\phi \hat{\phi}_x$$

$$B_y = B_r \hat{r}_y + B_\theta \hat{\theta}_y + B_\phi \hat{\phi}_y$$

$$B_z = B_r \hat{r}_z + B_\theta \hat{\theta}_z + B_\phi \hat{\phi}_z$$

$$\frac{x}{r} = \sin \theta \cos \phi$$

$$\frac{y}{r} = \sin \theta \sin \phi$$

$$\frac{z}{r} = \cos \theta$$

(6.5)

$$B_x = \frac{\mu_0 M_0 a^3}{r^5} X.Z$$

(6.6)

$$B_y = \frac{\mu_0 M_0 a^3}{r^5} Y.Z$$

(6.7)

$$B_z = \frac{1}{3} \frac{\mu_0 M_0 a^3}{r^5} [3Z^2 - r^2]$$

Codificación en FORTRAN 90

! Componentes del CAMPO MAGNETICO

B(1,i)=fac*Q*pos(1,i)*pos(3,i)

B(2,i)=fac*Q*pos(2,i)*pos(3,i)

B(3,i)=(1./3.)*fac*Q*(3.*pos(3,i)*pos(3,i)-p)

Obtenemos las componentes de inducción magnética en coordenadas cartesianas, las cuales **no** se encuentran resueltas de esta manera y reescritas para codificar fácilmente en FORTRAN 90.

$$\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$$

Fuerza de Lorentz

$$\vec{F} = m\vec{a} \Rightarrow \vec{a} = \frac{1}{m} \vec{F}$$

2da Ley de Newton

$$F_x = q(E_x + v_y B_z - v_z B_y)$$

```
f(1, i) = car * (E(1, i) + vel(2, i) * B(3, i) - vel(3, i) * B(2, i))
```

El **algoritmo de Verlet** en su forma clásica usa las posiciones y aceleraciones al tiempo t , y las posiciones del paso previo, $r(t - \Delta t)$ para calcular las nuevas posiciones en $t + \Delta t$, $r(t + \Delta t)$: Por medio la expansión en serie de Taylor:

Para la posición $r(t + \Delta t)$ tenemos

$$\mathbf{r}(t + \Delta t) = \mathbf{r}(t) + \mathbf{r}'(t)\Delta t + \mathbf{r}''(\mathbf{r}, t) \frac{\Delta t^2}{2} + \dots \quad (6.9)$$

Para la posición $r(t - \Delta t)$ tenemos

$$\mathbf{r}(t - \Delta t) = \mathbf{r}(t) - \mathbf{r}'(t)\Delta t + \mathbf{r}''(\mathbf{r}, t) \frac{\Delta t^2}{2} + \dots \quad (6.10)$$

Por lo tanto si, sumamos estas dos relaciones (6.9 y 6.10) obtendremos:

$$\mathbf{r}(t + \Delta t) = 2\mathbf{r}(t) - \mathbf{r}(t - \Delta t) + \Delta t^2 \mathbf{r}''(r, t)$$

La cual necesitamos para sustituir en la siguiente ecuación la cual es el resultado de la resta de las expresiones (6.9 y 6.11):

$$\mathbf{v}(t) = \frac{[\mathbf{r}(t + \Delta t) - \mathbf{r}(t - \Delta t)]}{2\Delta t} \quad (6.12)$$

Esta ecuación se llama algoritmo de Verlet para la velocidad y hay muchas otras formas de escribirla[15].

$$\mathbf{v}(t) = \mathbf{v}_t - \mathbf{v}_{t-\Delta t} + \frac{1}{2} \Delta t \mathbf{a}$$

Velocidad que incorporamos en la ecuación clásica de la posición en el Movimiento Curvilíneo conocida de la literatura[16], por medio del cual determinamos la posición de la astropartícula a lo largo del número total de pasos temporales.

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}_0 + \mathbf{v}_0 dt + \frac{1}{2} dt^2 \mathbf{a}$$

Clusters:	Capacidad de Disco Duro	Memoria RAM	Nº Procesadores	Sistema operativo
Belphegor	1 Tb	8 Gb	16 AMD	Rocks Cluster 5.4
Weinberg	0.7 Tb	32 Gb	8 Intel Xeon	Rocks Cluster 5.1



CENTRO DE MODELADO CIENTIFICO

