

DETECTORES E INSTRUMENTACIÓN

SESIÓN II: TIPOS DE DETECTORES DE RAYOS GAMMA

José Serna

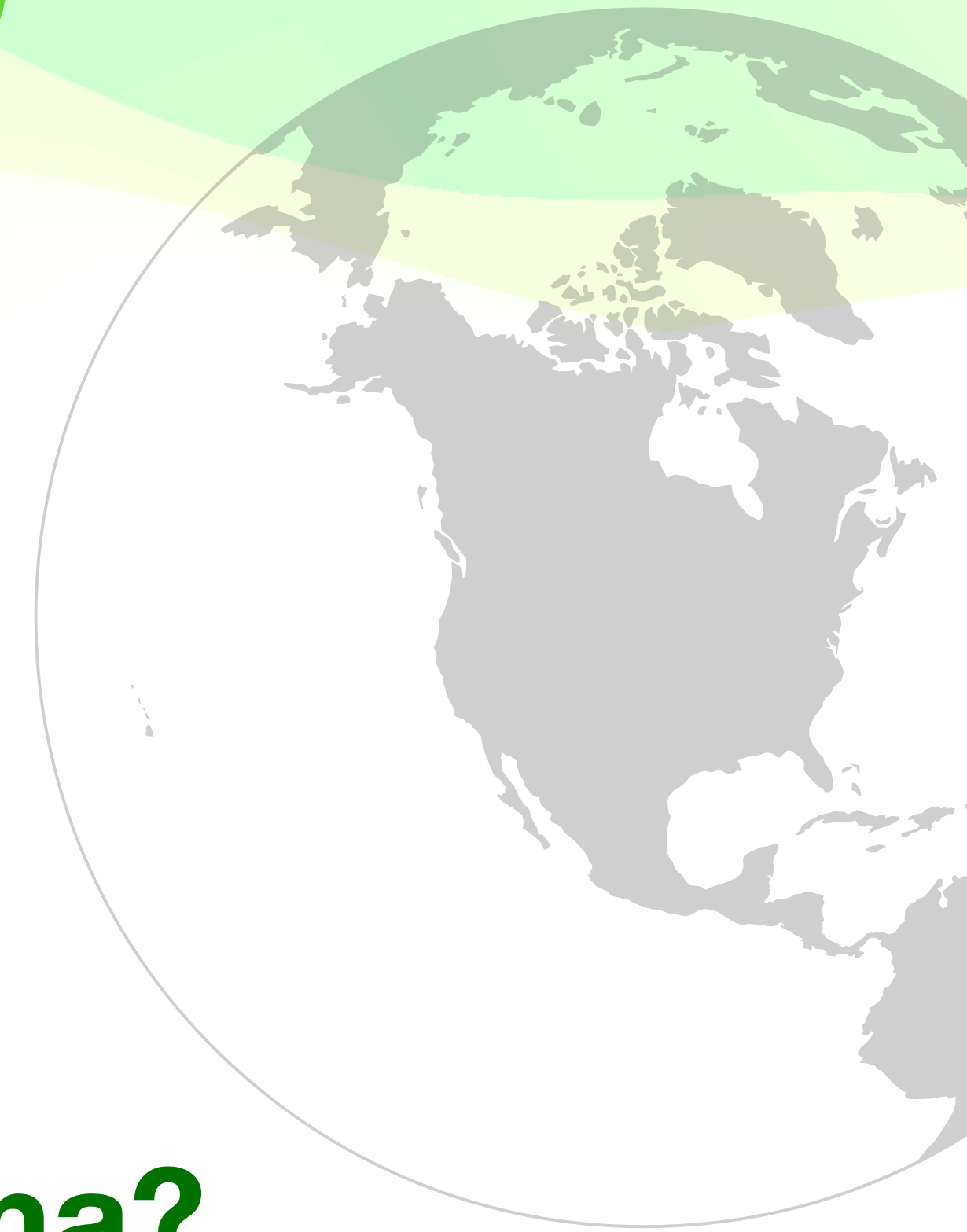
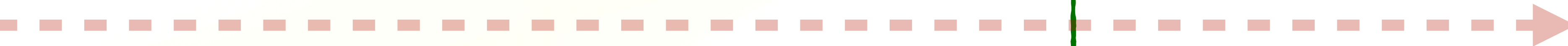
j_serna@ciencias.unam.mx

D&I - TAACO 2024 - Guatemala - Nov.2024

¿Qué características debemos de saber de los rayos gamma?

- ▶ Dirección de llegada del rayo gamma ✓
- ▶ Energía del rayo gamma ¿?

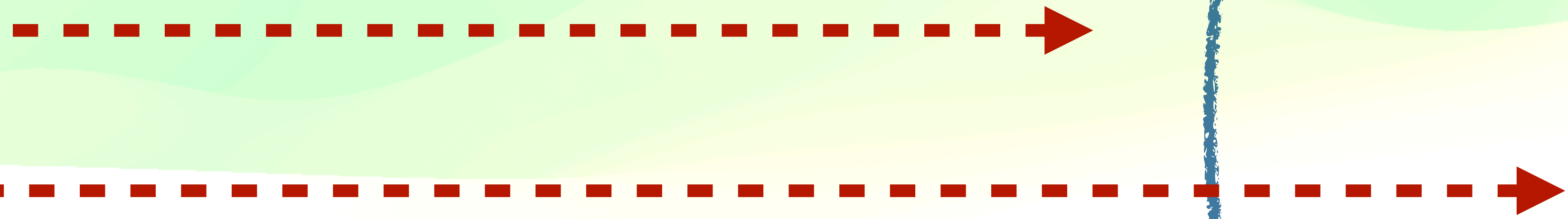
Rayos Gamma



¿Cómo detectamos los rayos gamma?

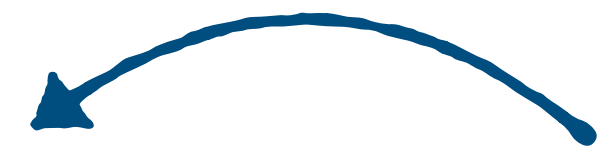
DETECCIÓN DIRECTA

Detectados FUERA de la atmósfera terrestre

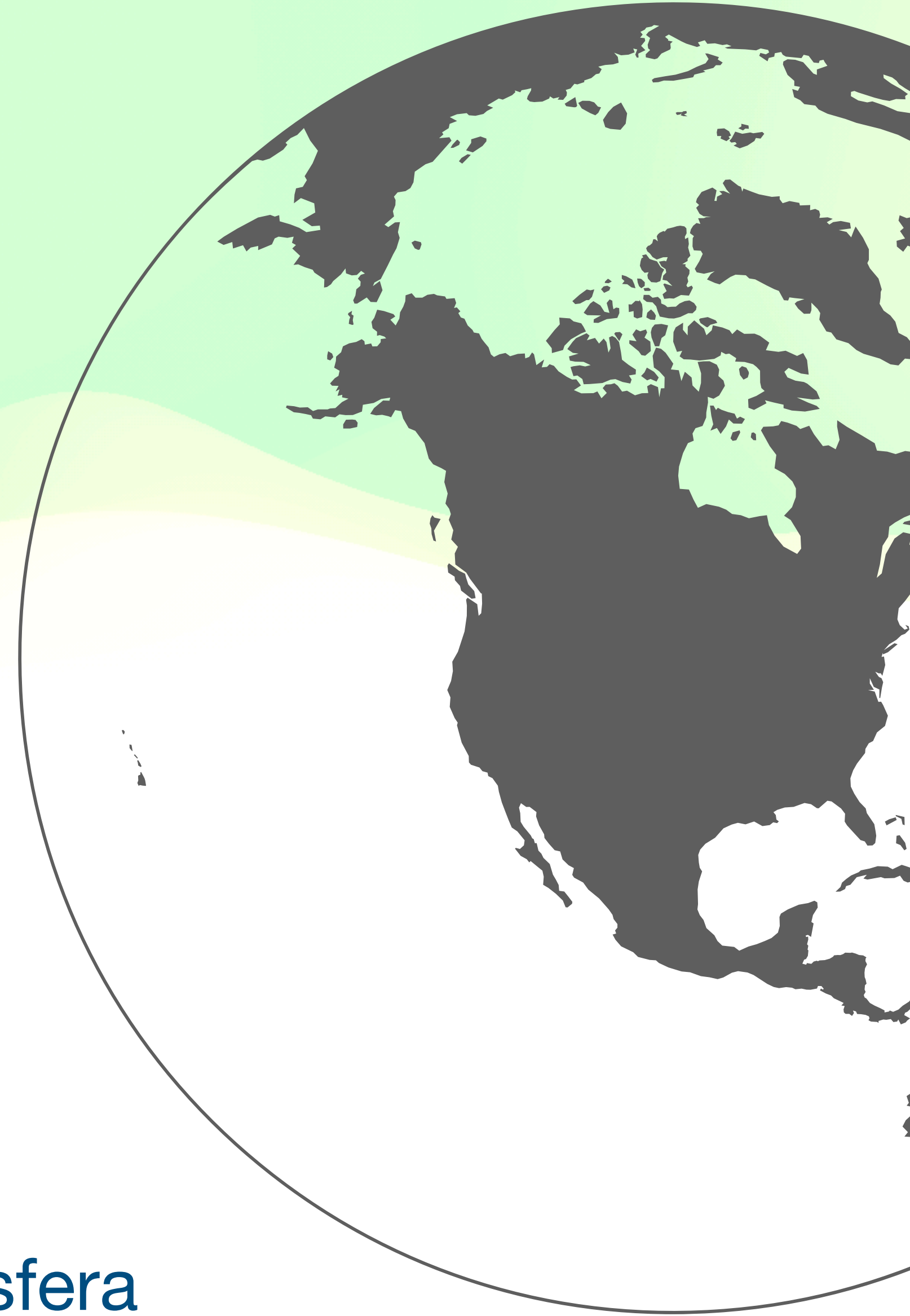


DETECCIÓN INDIRECTA

Detectados DENTRO de la atmósfera terrestre

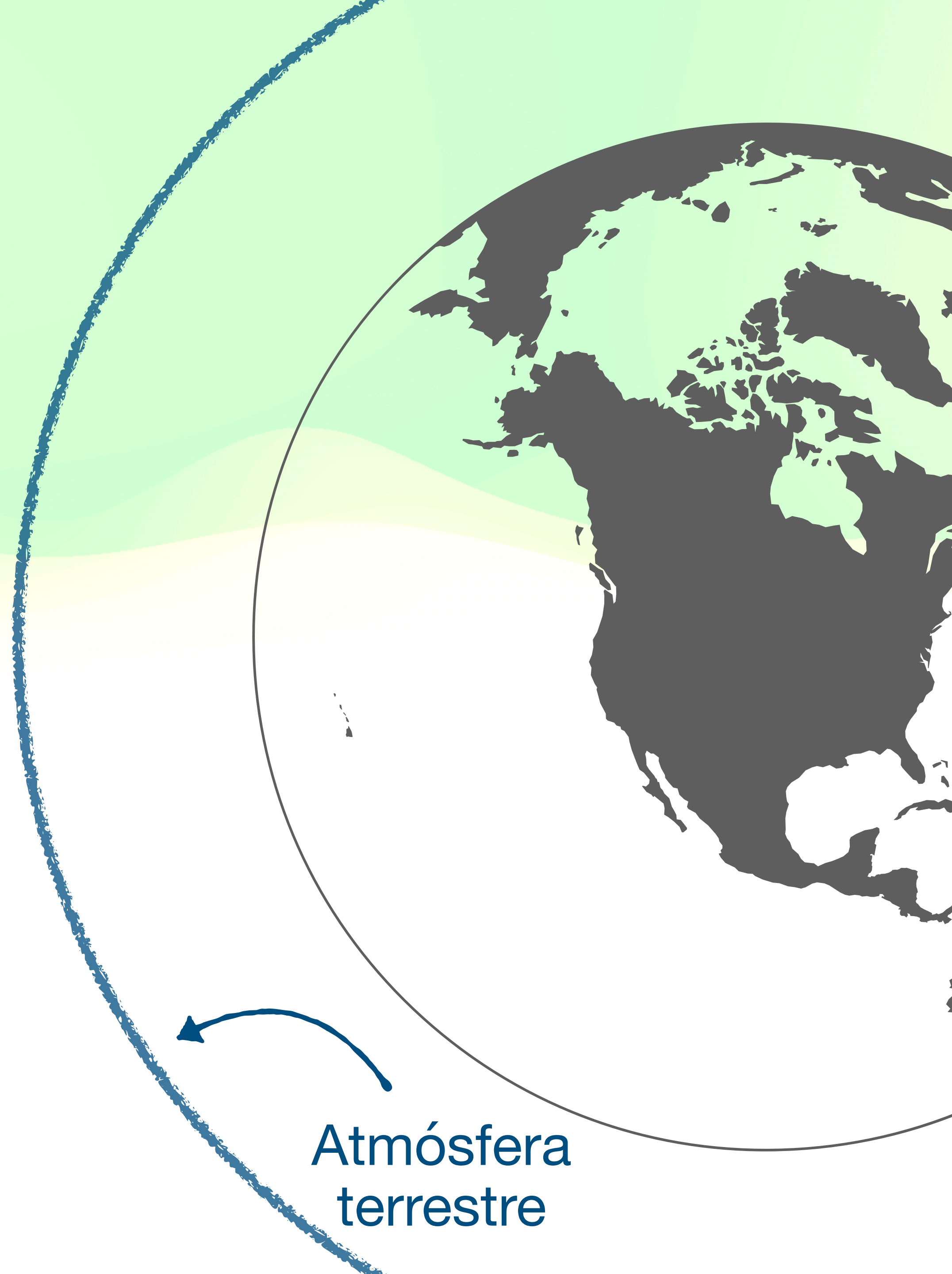
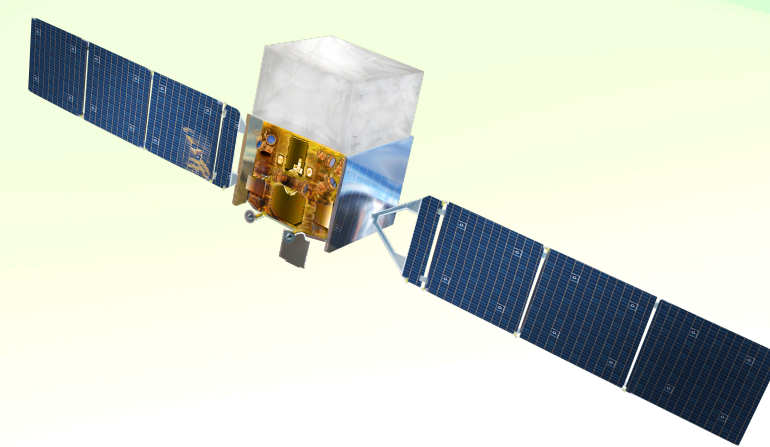


Atmósfera terrestre



DETECCIÓN DIRECTA

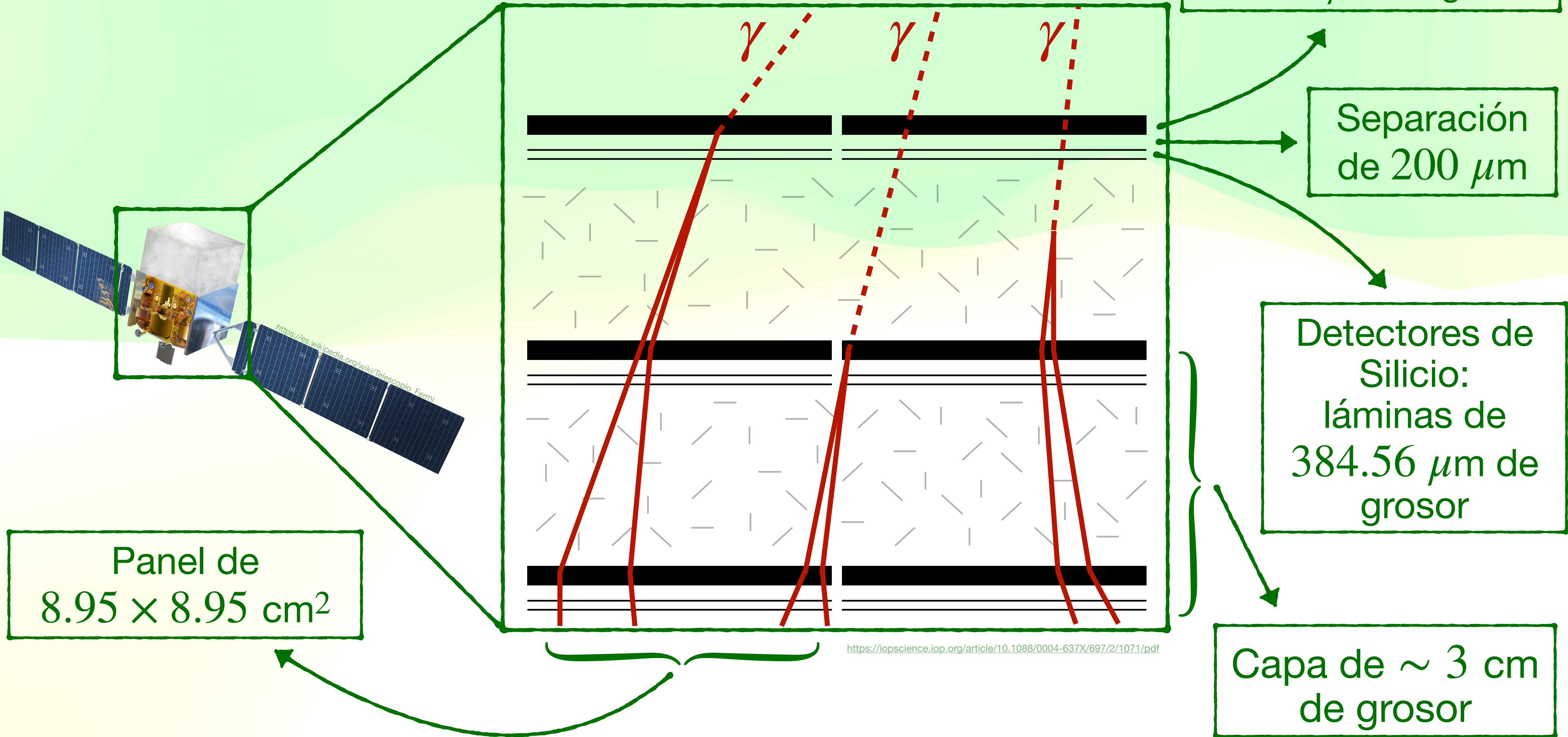
Detectados FUERA de la atmósfera terrestre



- ▶ Los instrumentos para la detección directa son los satélites

Atmósfera
terrestre

Detección Directa



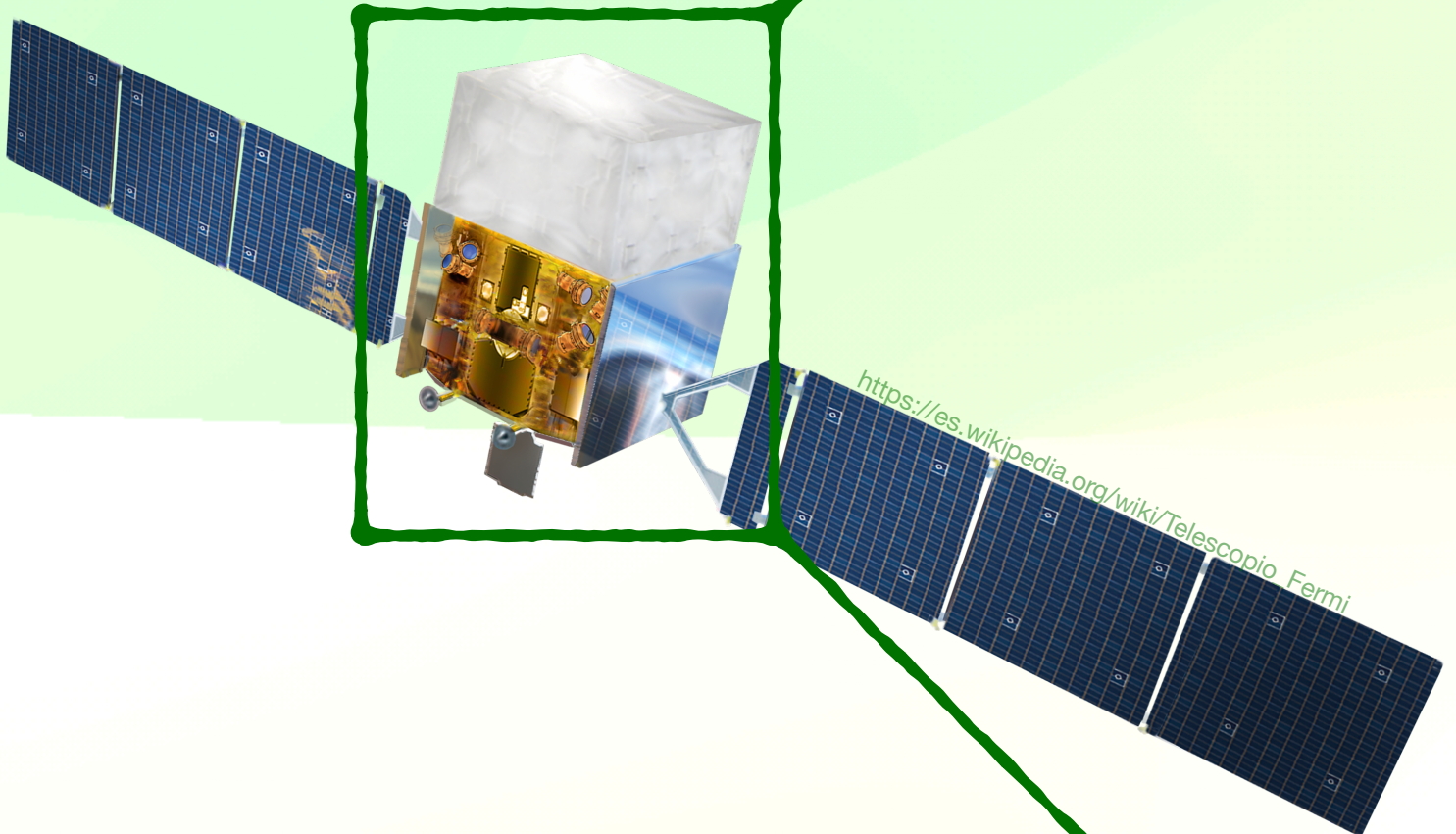
Tungsteno:
láminas de
 $\sim 100 \mu\text{m}$ de grosor

Separación
de $200 \mu\text{m}$

Detectores de
Silicio:
láminas de
 $384.56 \mu\text{m}$ de
grosor

Capa de $\sim 3 \text{ cm}$
de grosor

Panel de
 $8.95 \times 8.95 \text{ cm}^2$

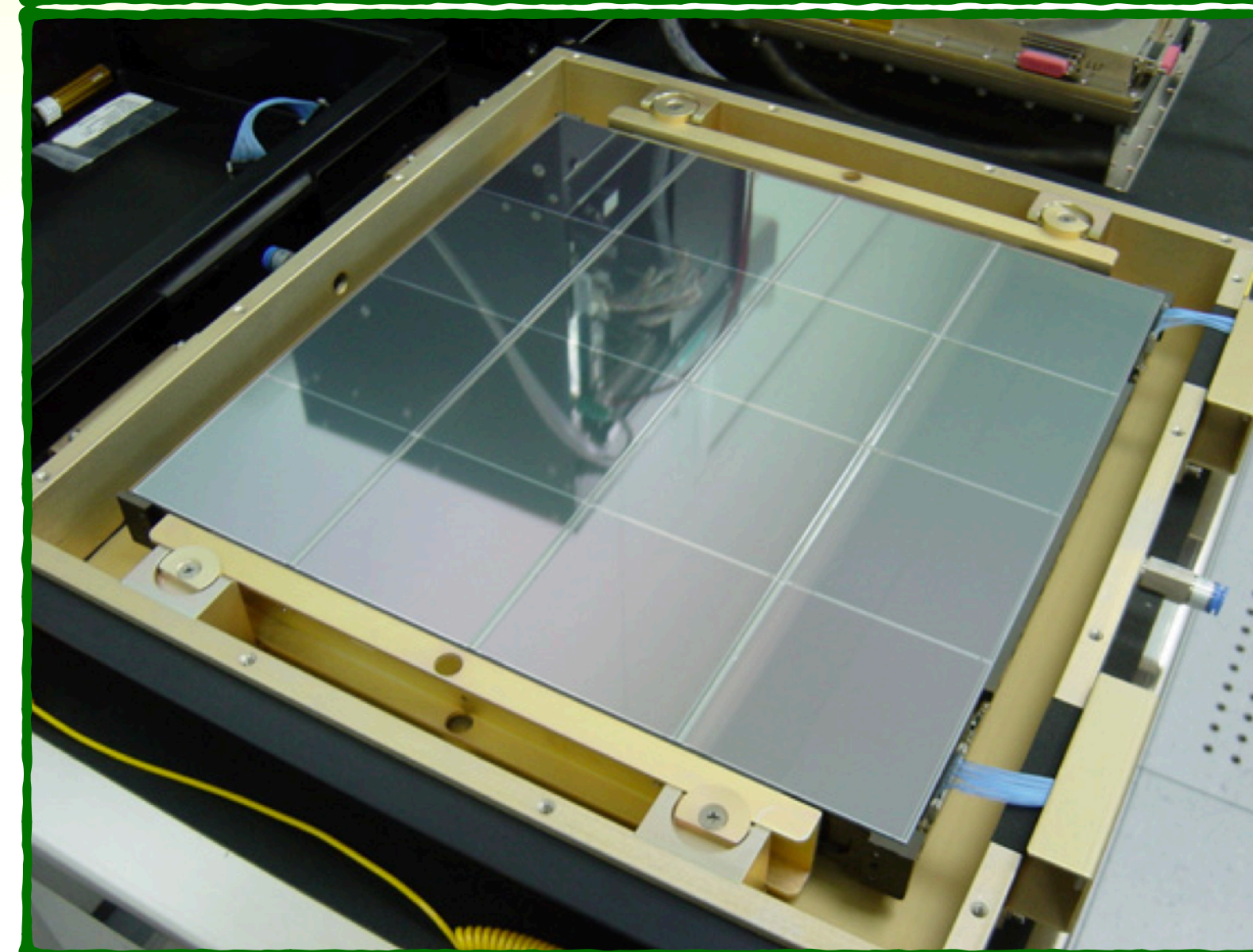
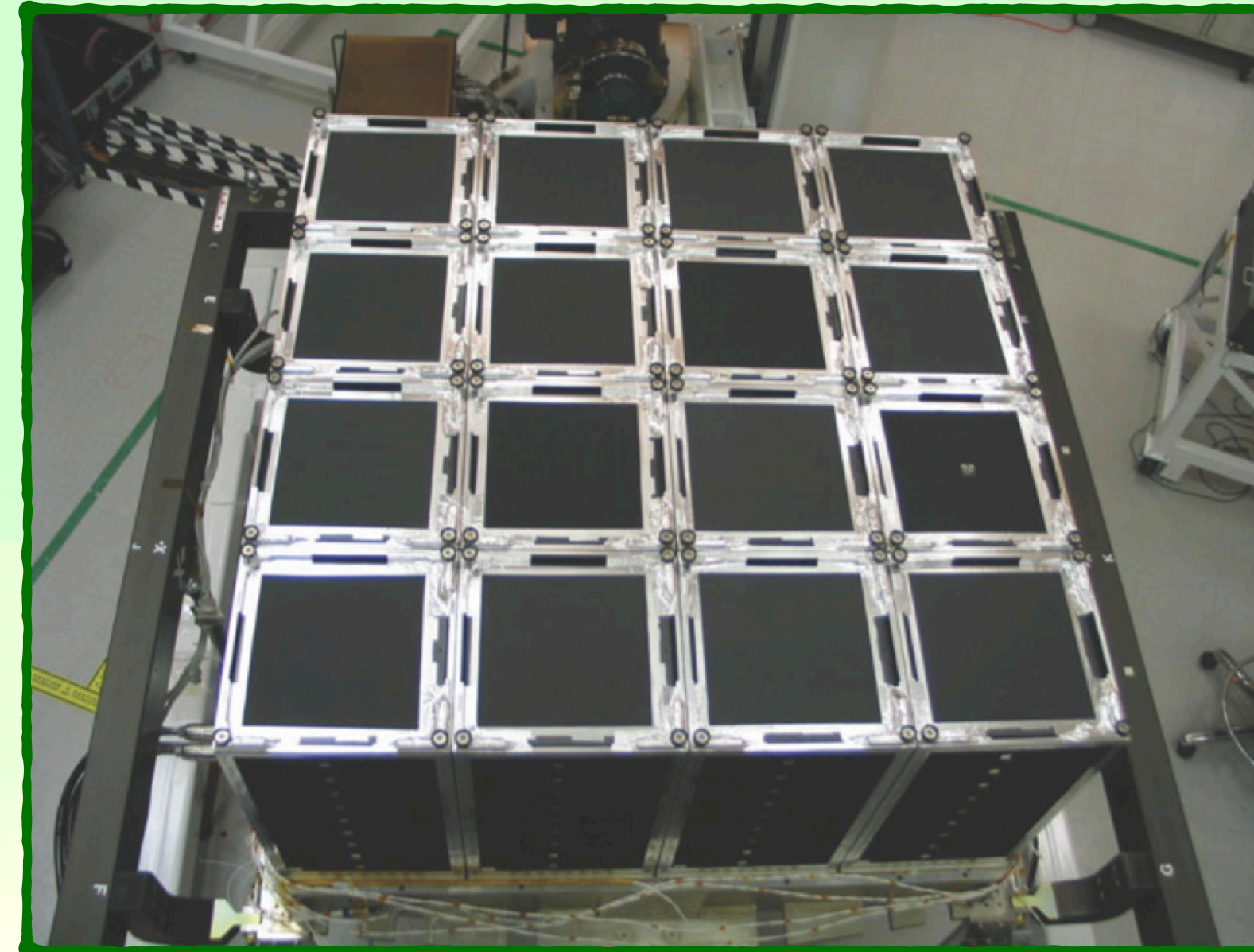


<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0004-637X/697/2/1071/pdf>

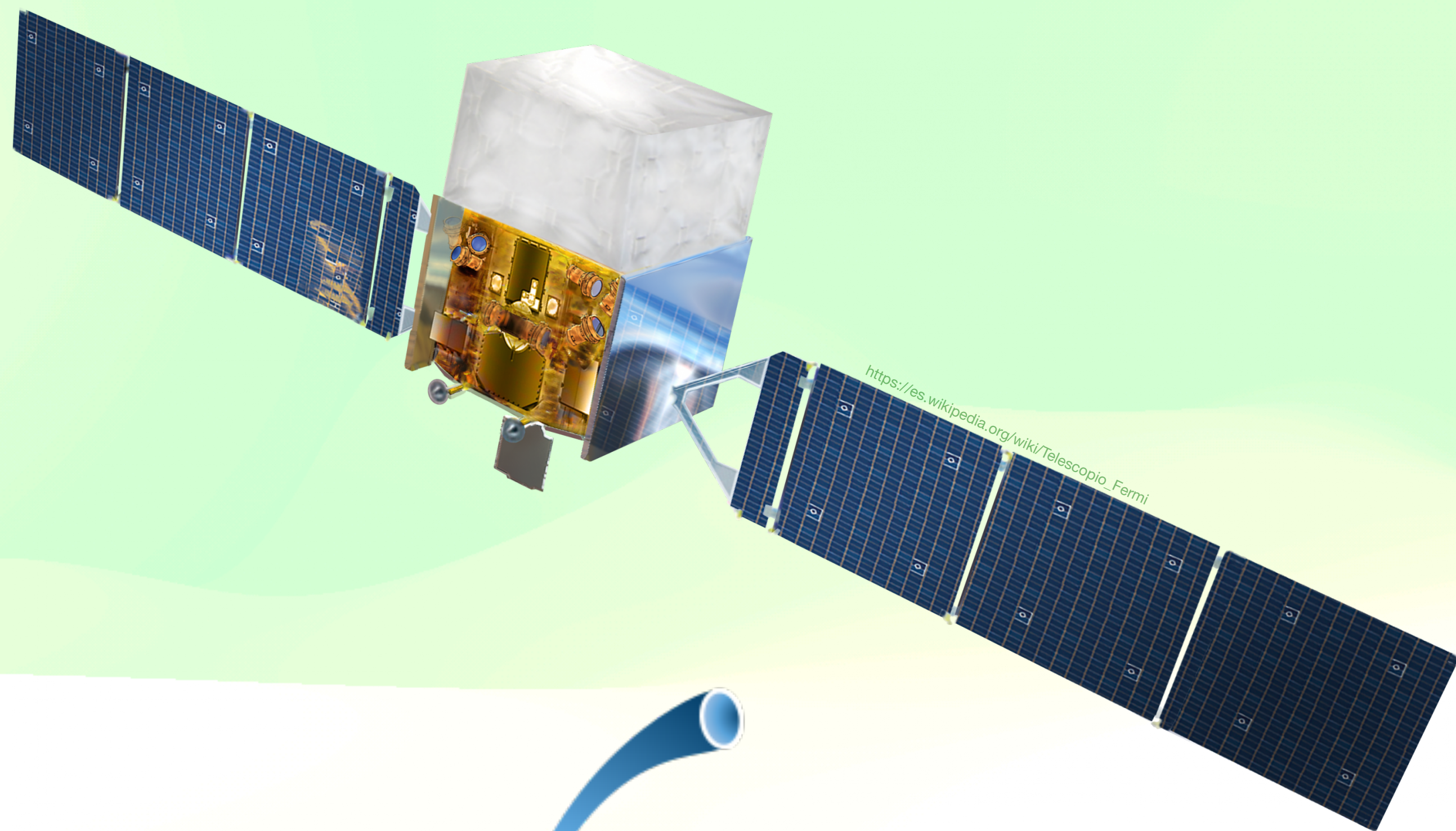
Detección Directa

<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0004-637X/697/2/1071/pdf>

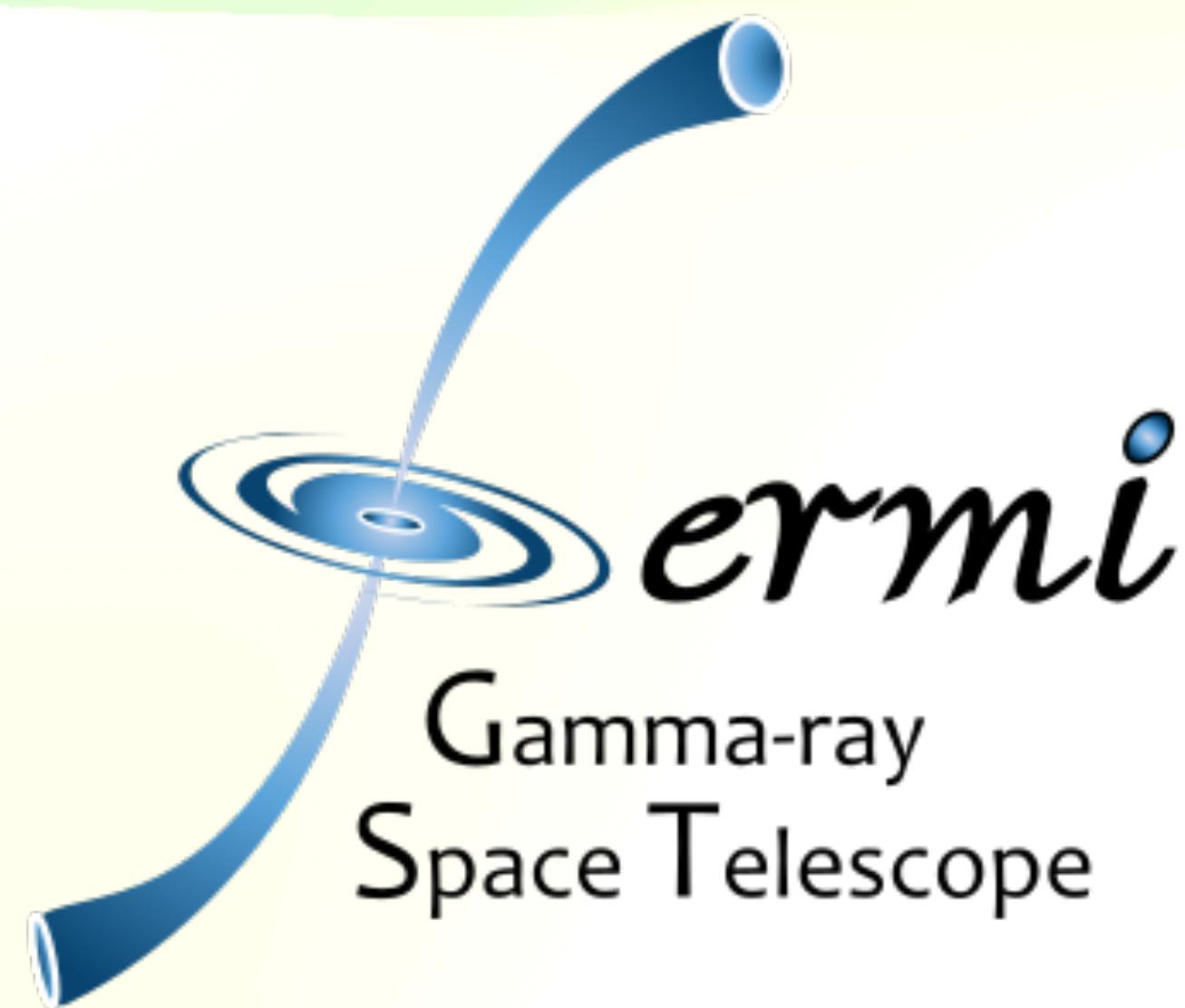
- ▶ 16 paneles
 - ▶ Arreglo de 4×4
- ▶ 19 capas de detectores
 - ▶ Capas de tungsteno + detectores de silicio



Detección Directa



- ▶ Detector de **rayos gamma**
- ▶ Satélite lanzado el 11.Jun.08
- ▶ En funcionamiento **>16 años**
- ▶ Tamaño: **2.8 × 2.8 m**
- ▶ Peso (en lanzamiento): **4.3 ton**
- ▶ Rango de energías que detecta: **20 MeV a 300 GeV**



[Página de divulgación
de Fermi-LAT](#)

DETECCIÓN DIRECTA

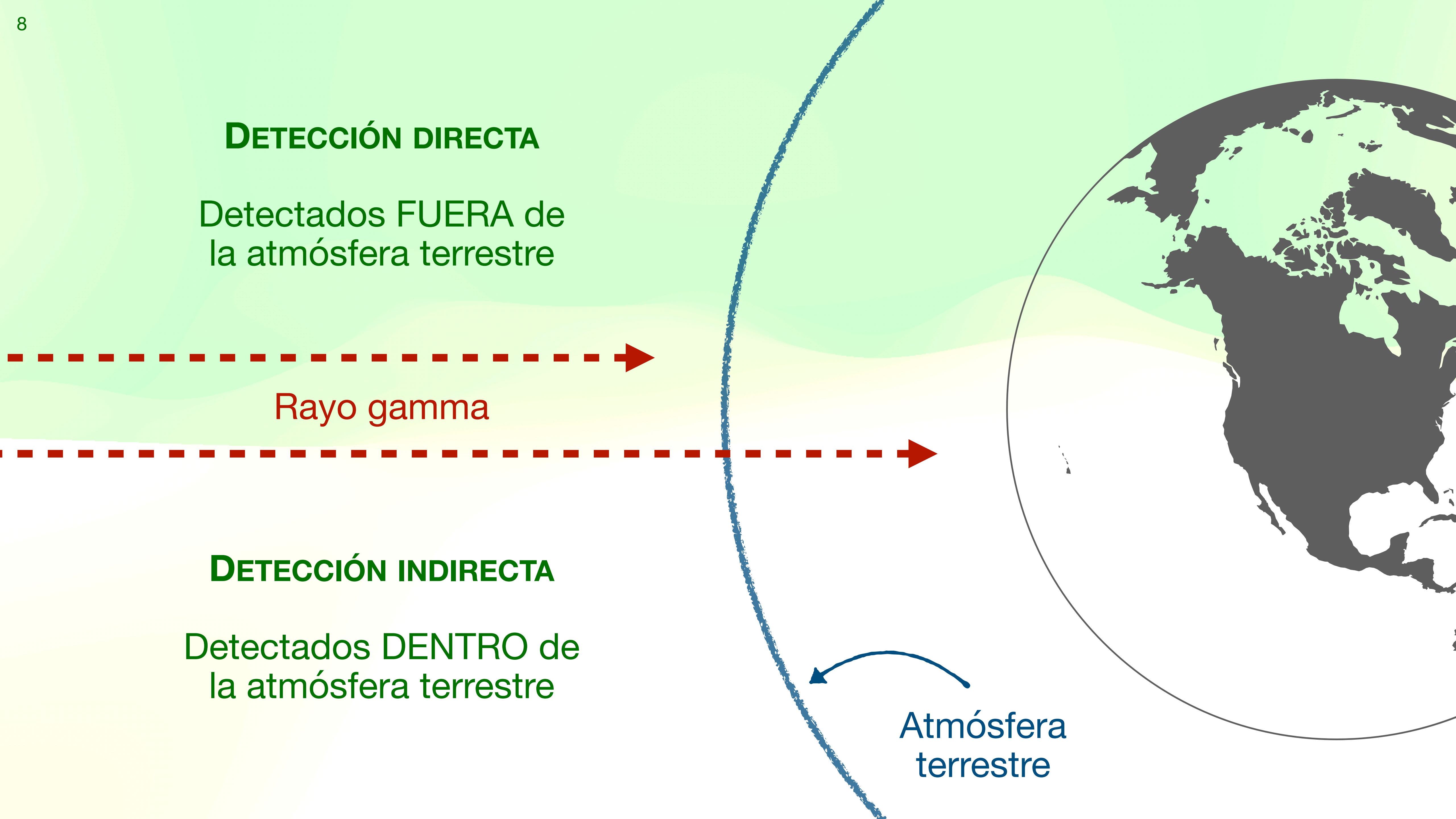
Detectados FUERA de la atmósfera terrestre

Rayo gamma

DETECCIÓN INDIRECTA

Detectados DENTRO de la atmósfera terrestre

Atmósfera terrestre

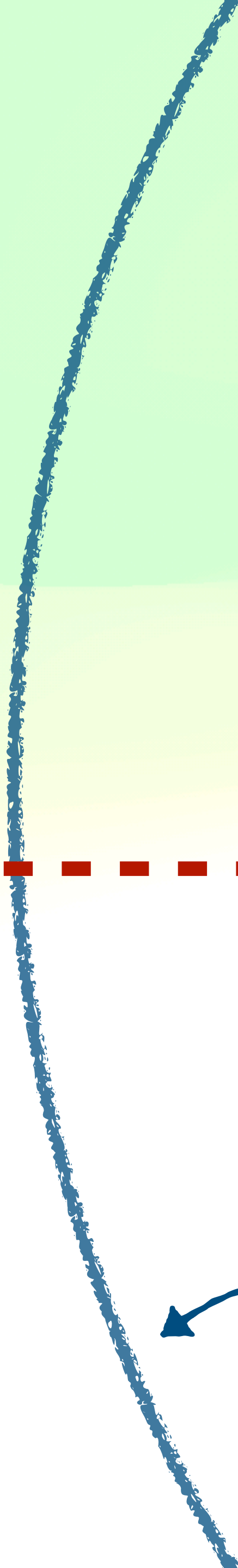


DETECCIÓN INDIRECTA

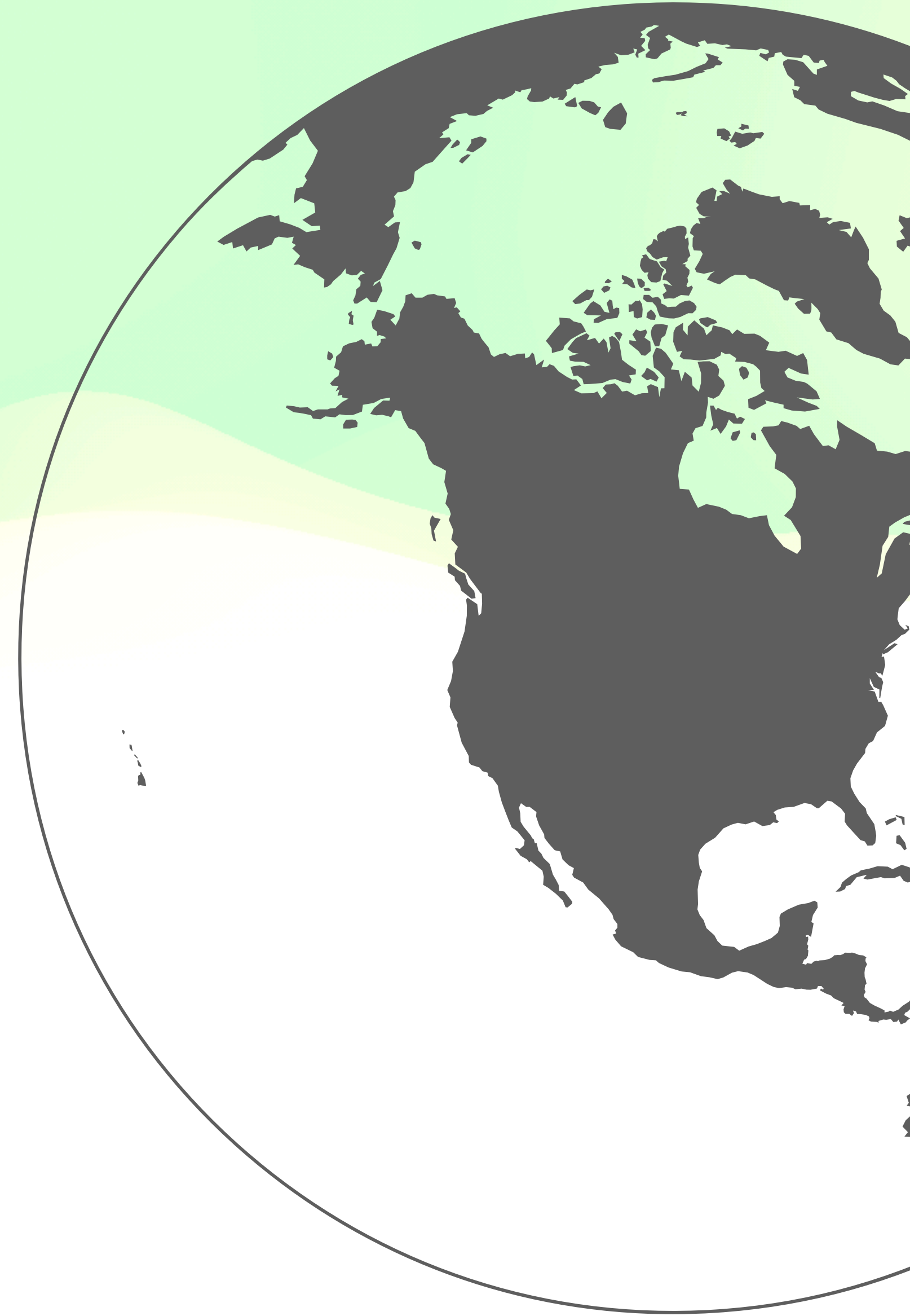
Detectados DENTRO de
la atmósfera terrestre



Rayo gamma
(partícula primaria)



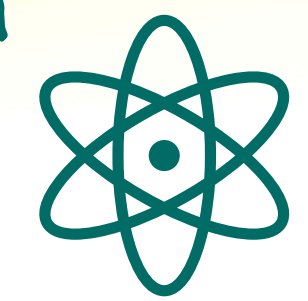
Atmósfera
terrestre



DETECCIÓN INDIRECTA

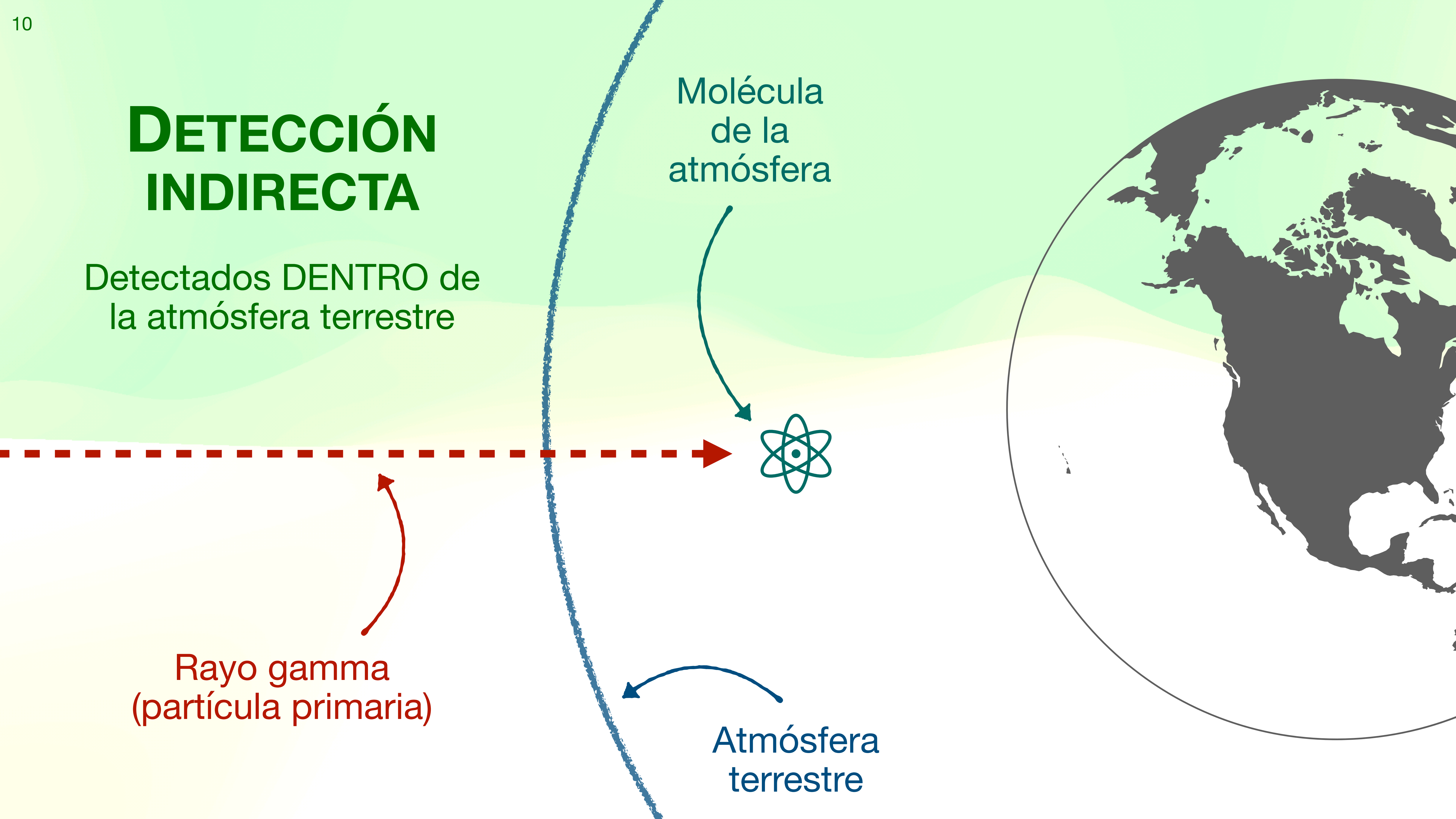
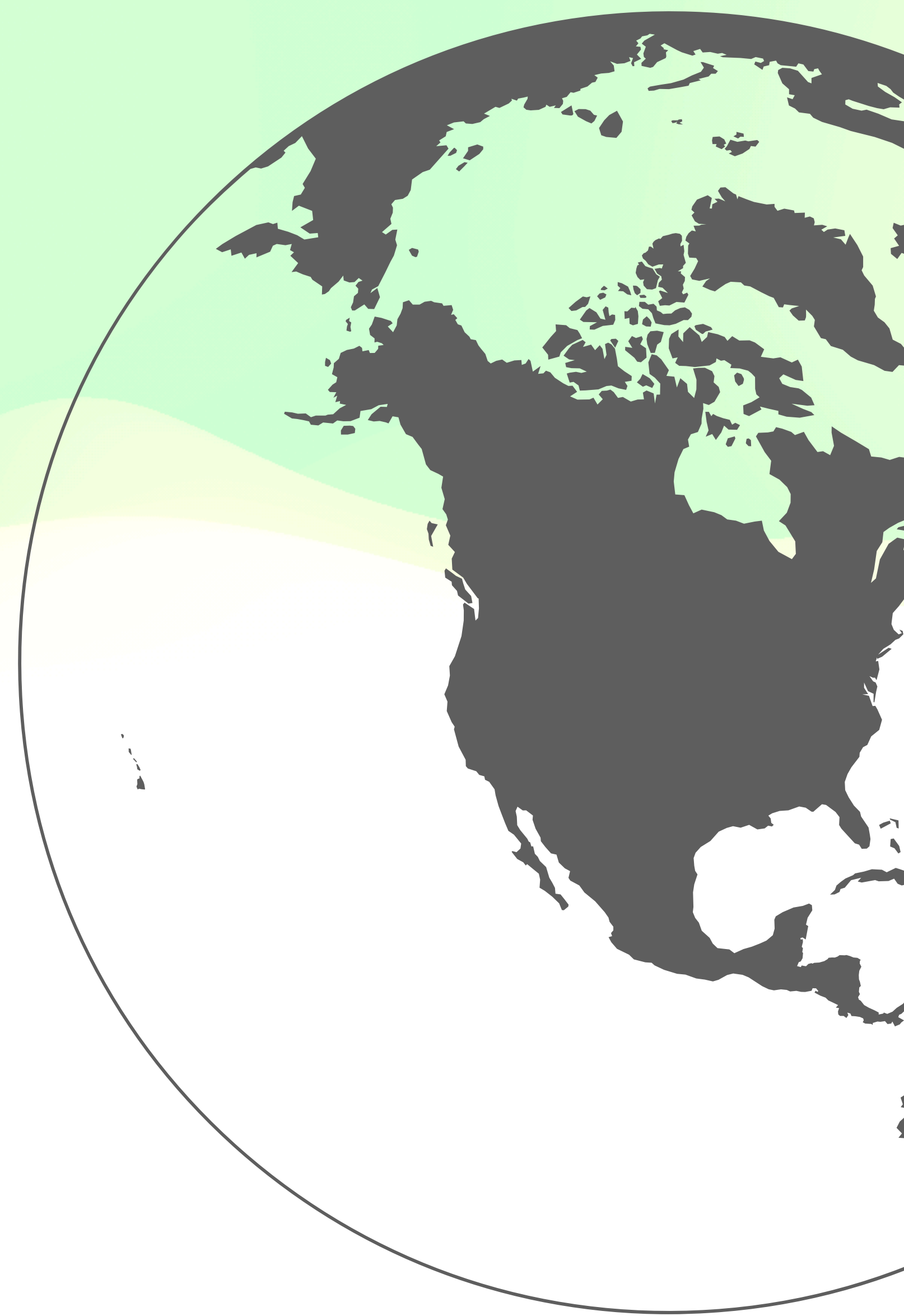
Detectados DENTRO de la atmósfera terrestre

Molécula de la atmósfera



Rayo gamma (partícula primaria)

Atmósfera terrestre



DETECCIÓN INDIRECTA

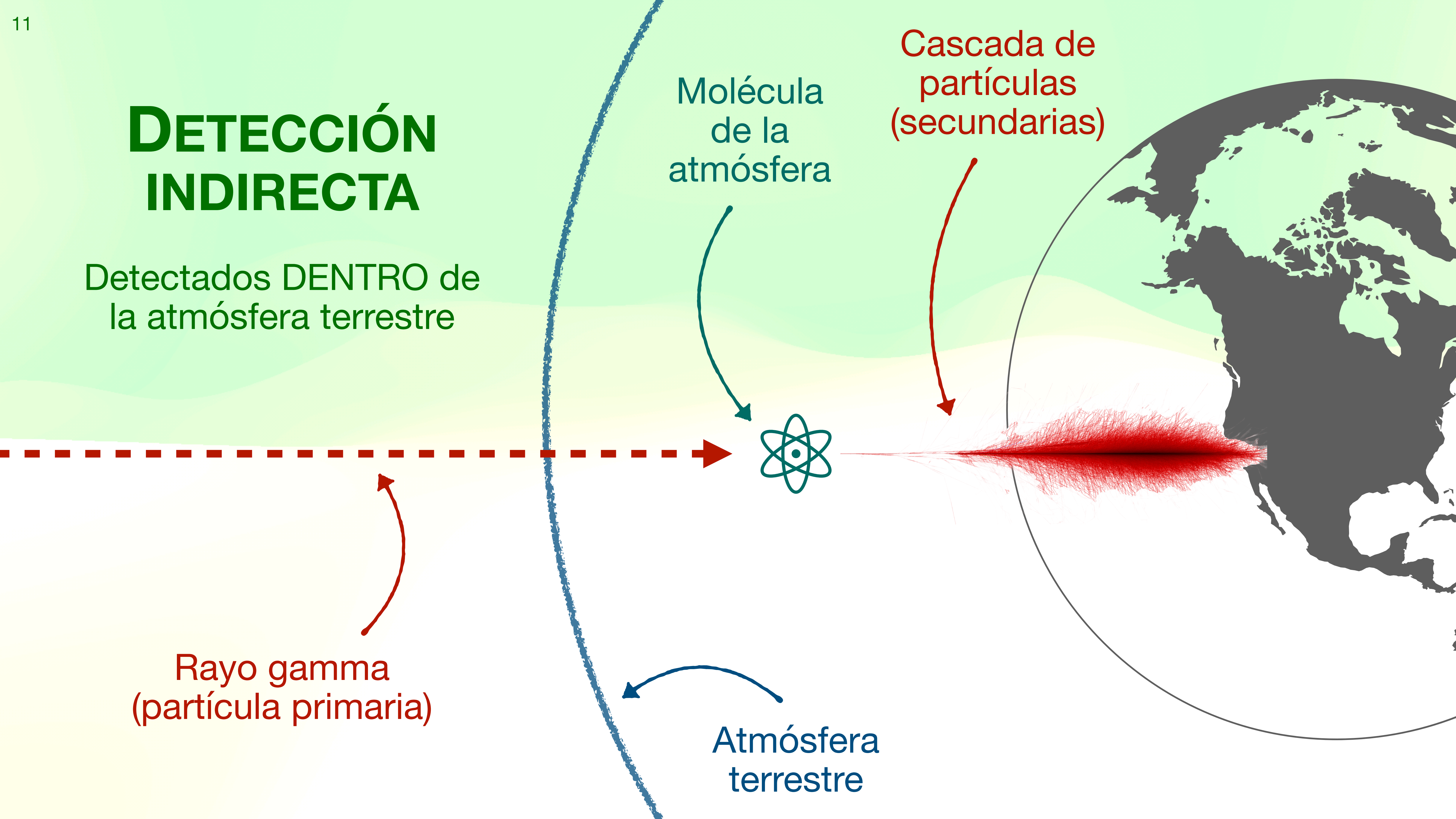
Detectados DENTRO de la atmósfera terrestre

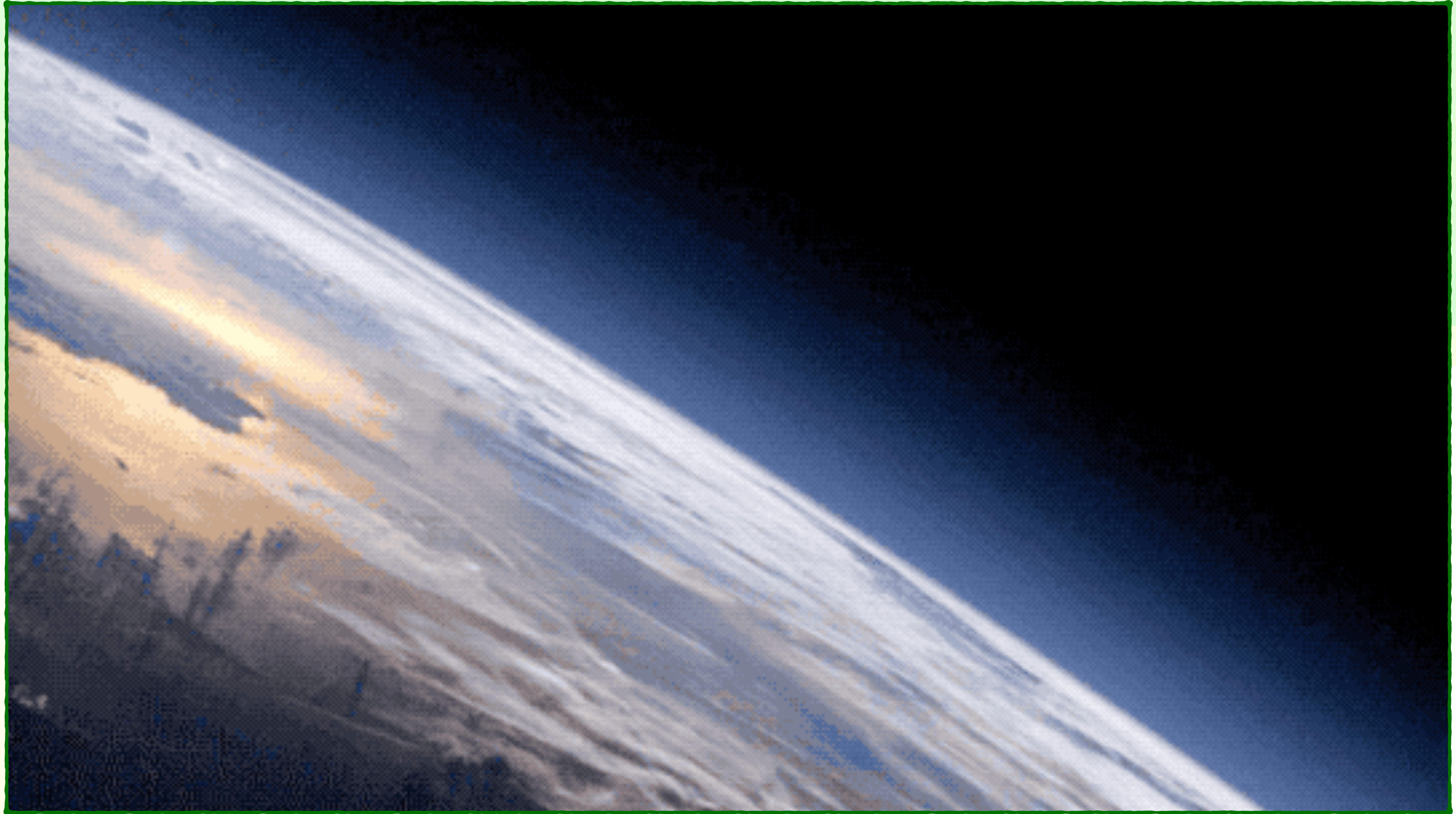
Cascada de partículas (secundarias)

Molécula de la atmósfera

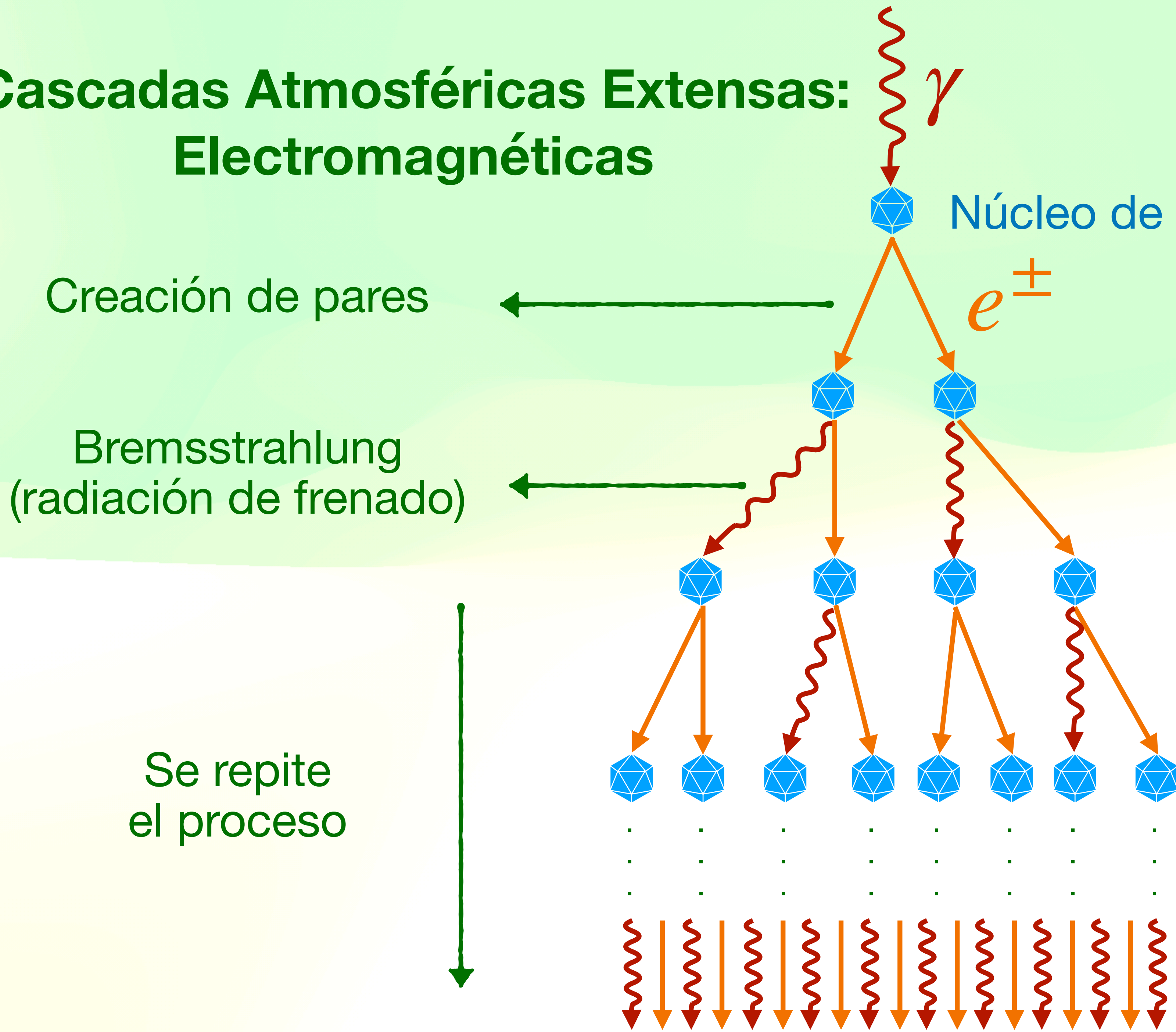
Rayo gamma (partícula primaria)

Atmósfera terrestre



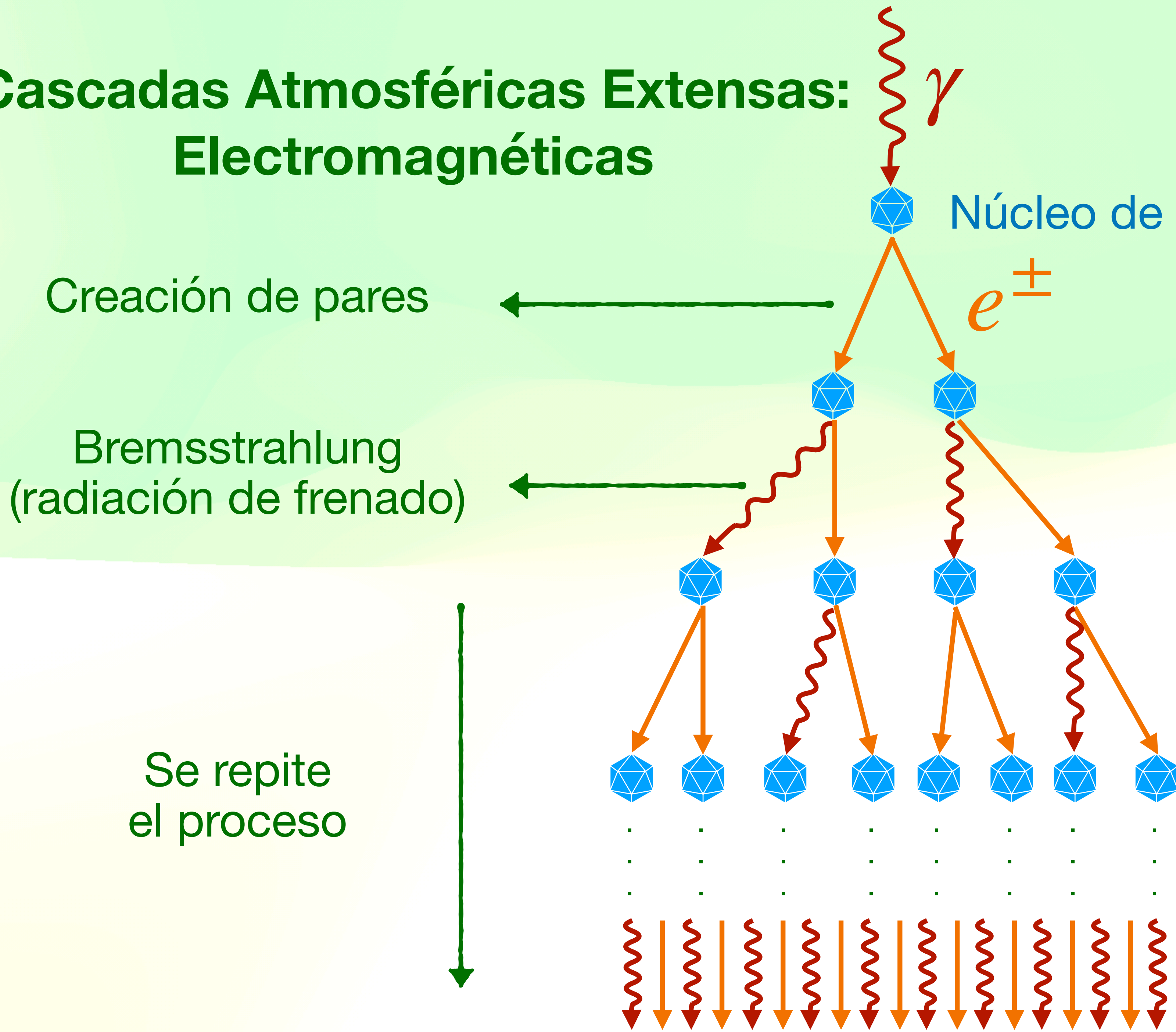


Cascadas Atmosféricas Extensas: Electromagnéticas



► Es una cascada de partículas secundarias, la cual está dominada por **rayos gamma de baja energía, electrones y positrones**

Cascadas Atmosféricas Extensas: Electromagnéticas



Creación de pares

Bremsstrahlung
(radiación de frenado)

Se repite
el proceso

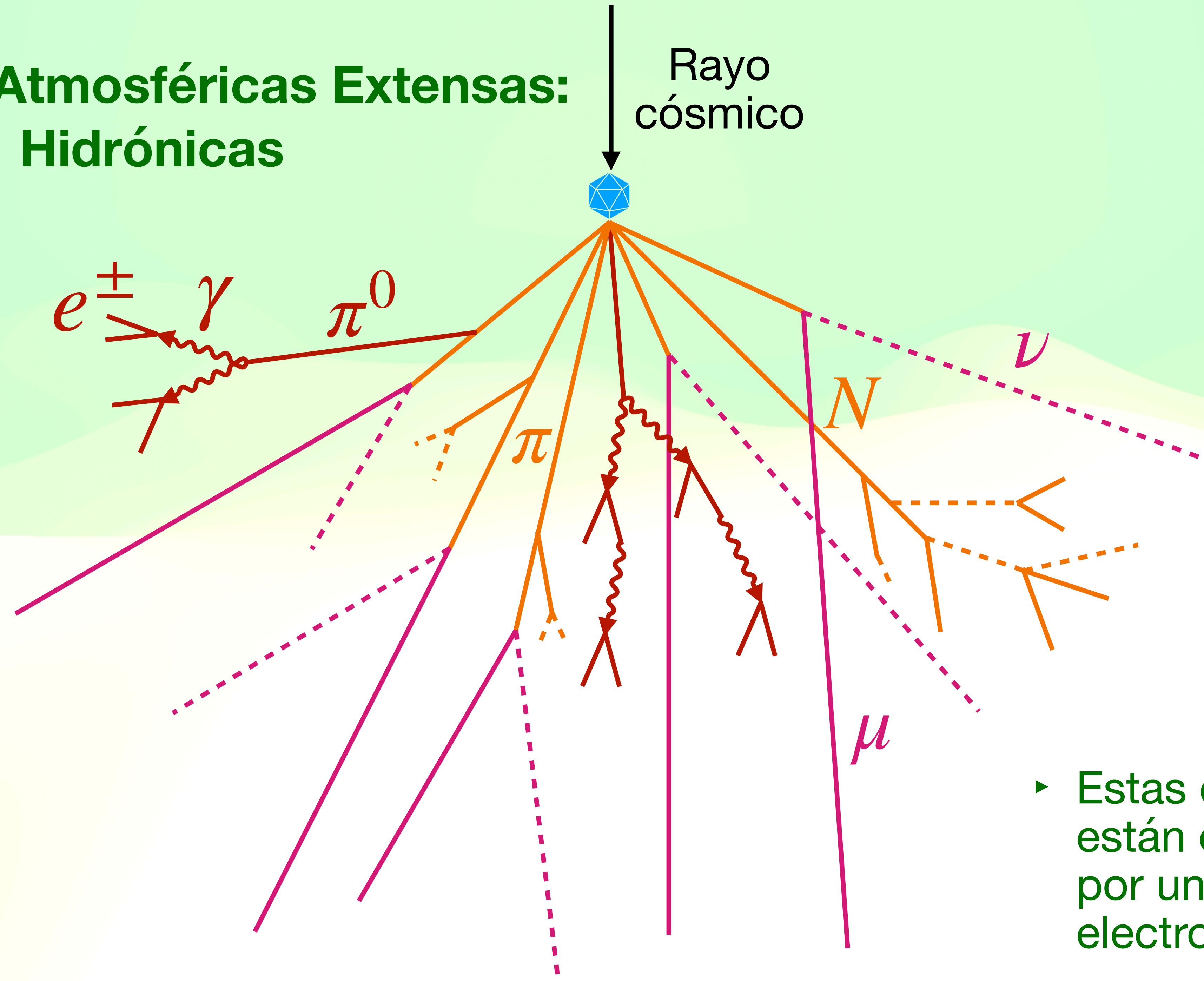
Núcleo de la atmósfera

e^\pm

- Es una cascada de partículas secundarias, la cual está dominada por **rayos gamma de baja energía, electrones y positrones**

Pero **NO** son las únicas partículas que producen cascadas atmosféricas extensas

Cascadas Atmosféricas Extensas: Hidrónicas

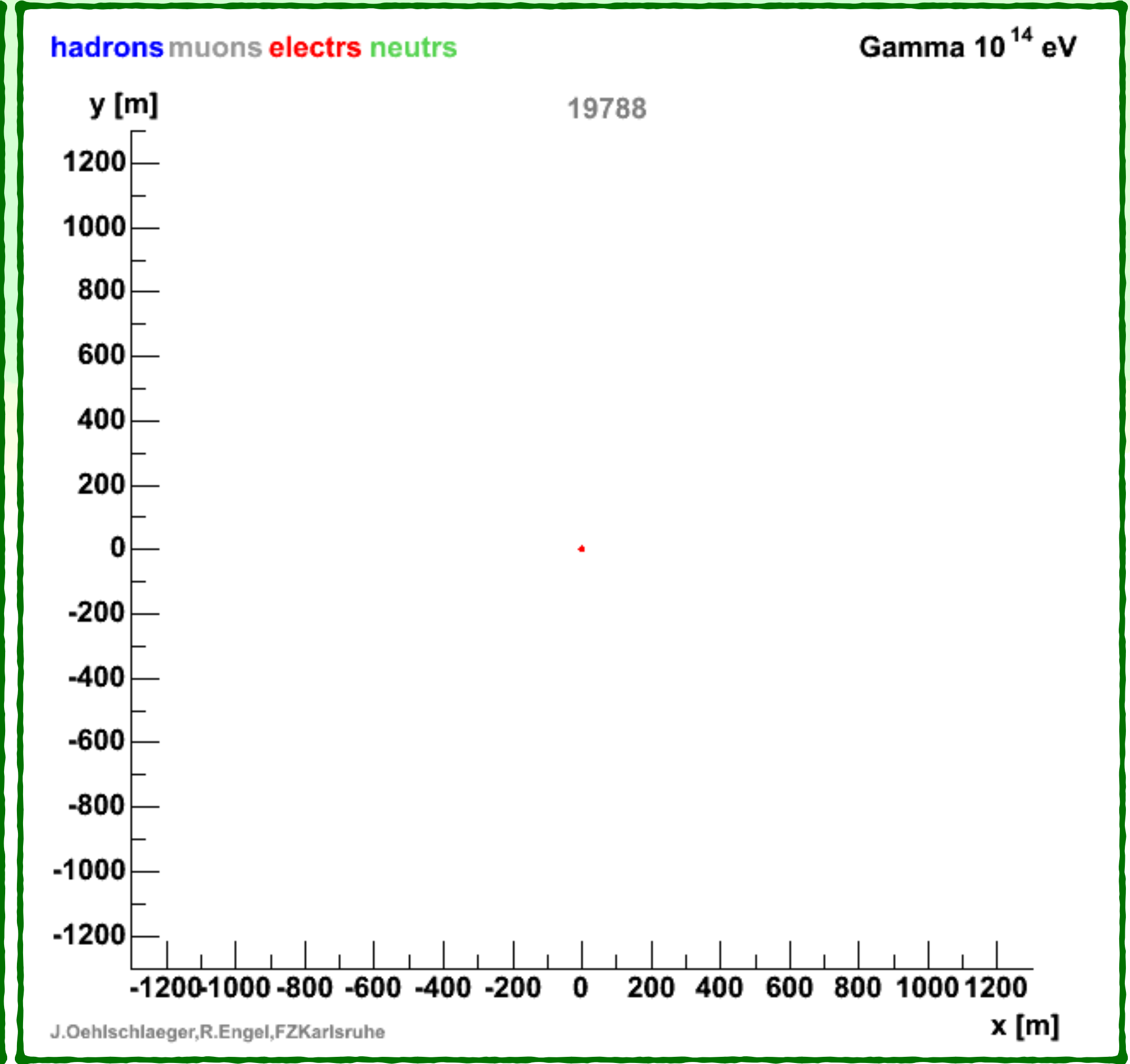
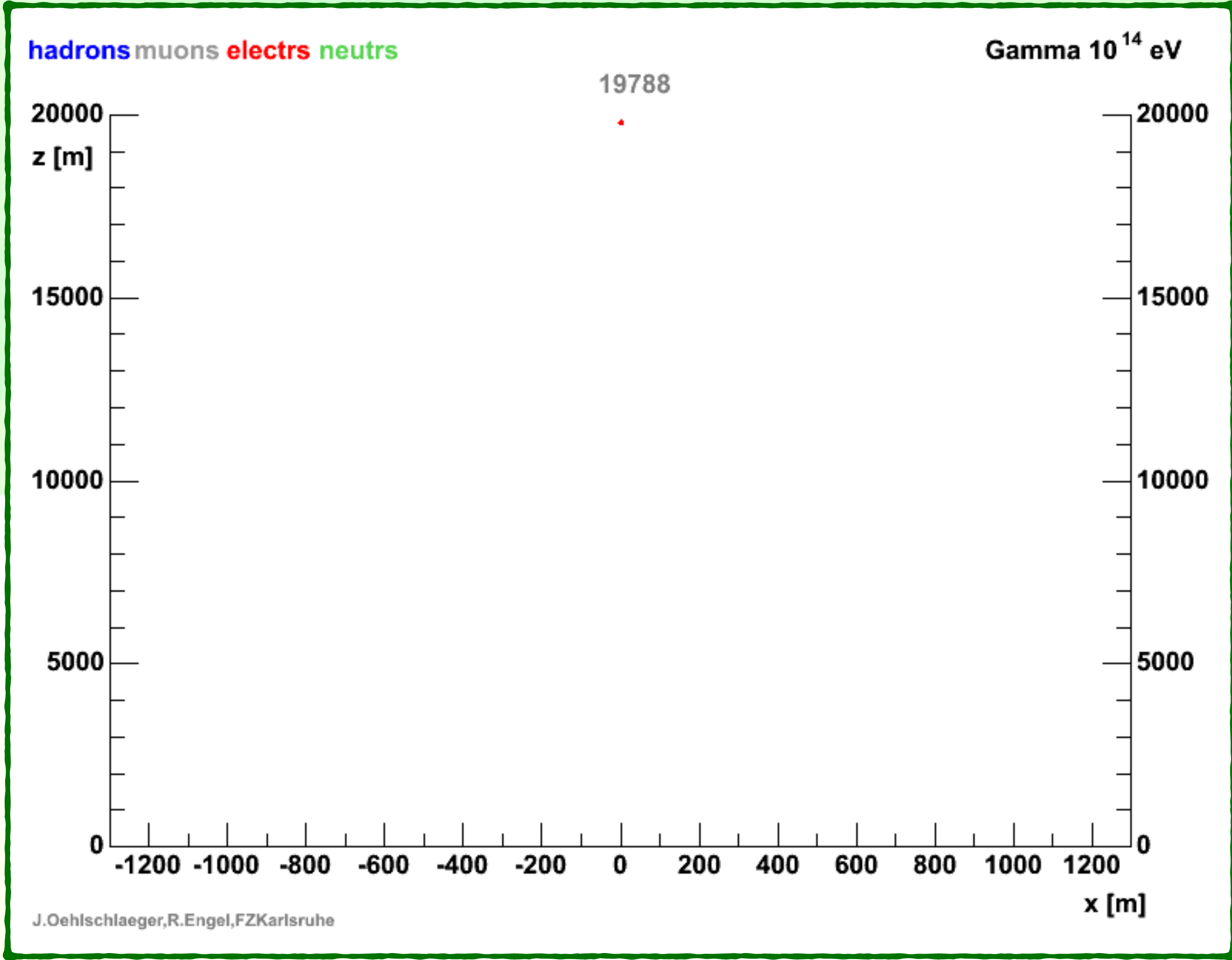


► Estas cascadas **NO** están dominadas por una parte electromagnética

Cascada Atmosférica Extensa: Electromagnética

Vista lateral

Vista inferior



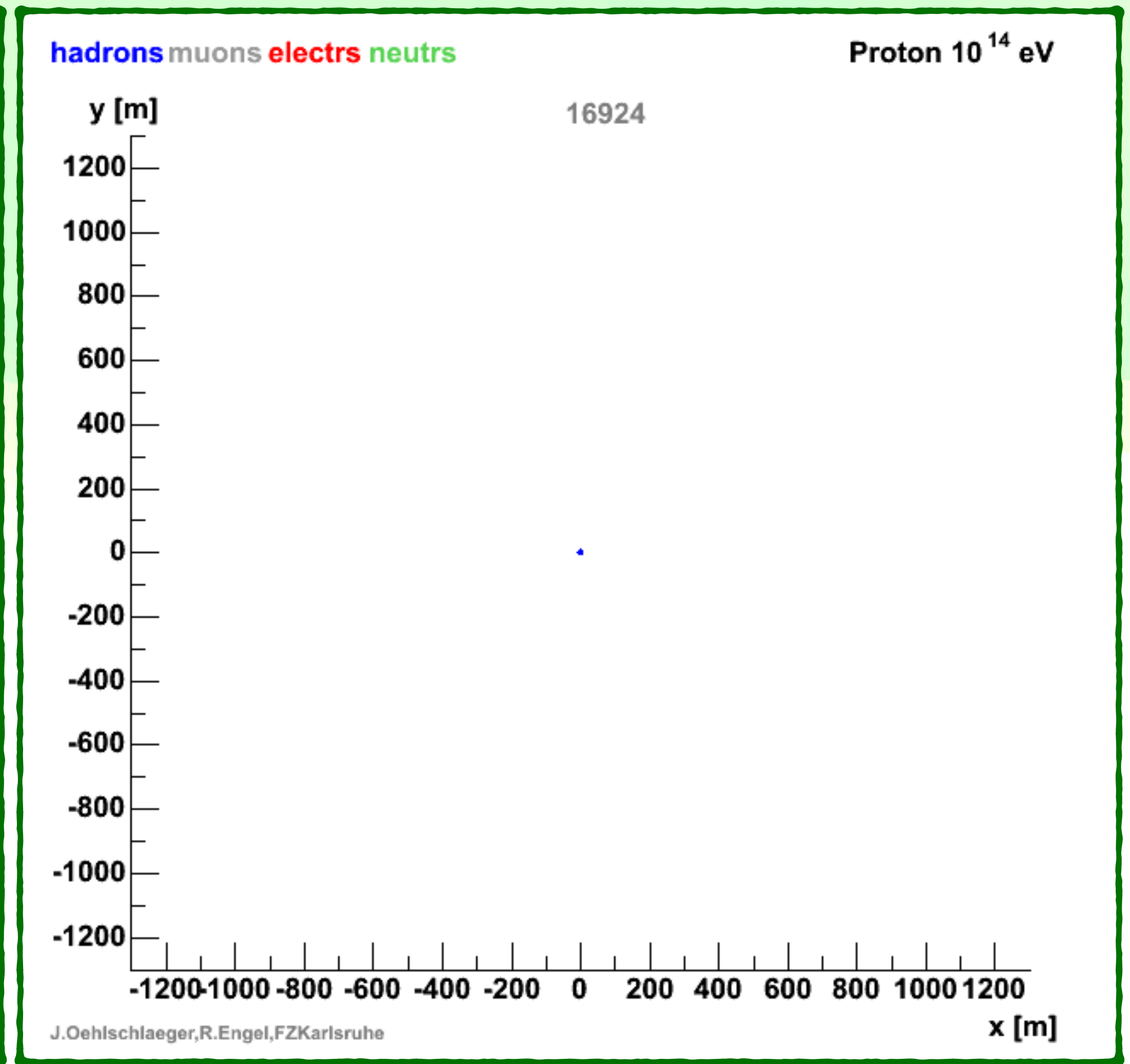
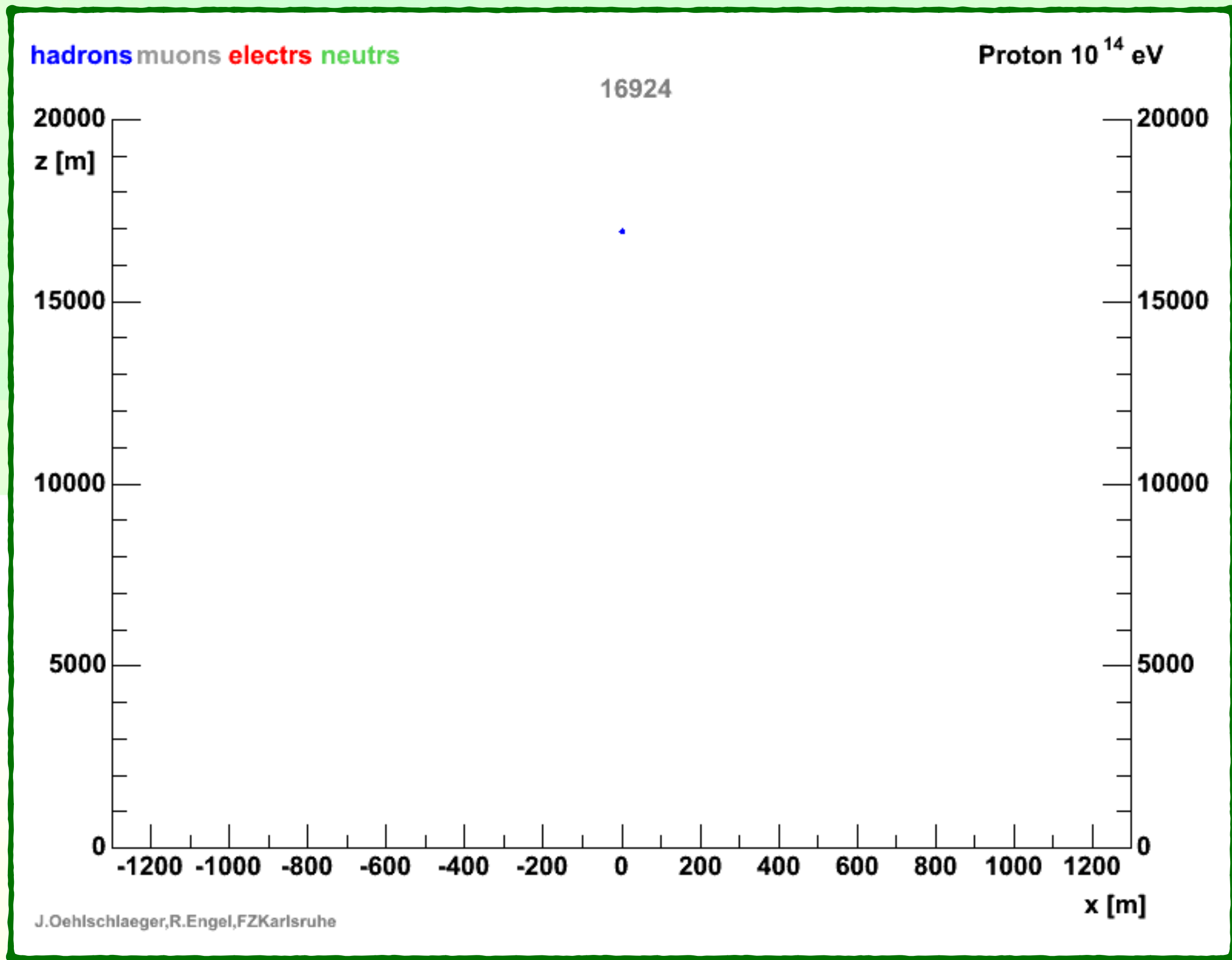
<https://www.iap.kit.edu/corsika/shower-movies.php>

Rayo gamma de 10^{14} eV = 100 TeV

Cascada Atmosférica Extensa: Hadrónica

Vista lateral

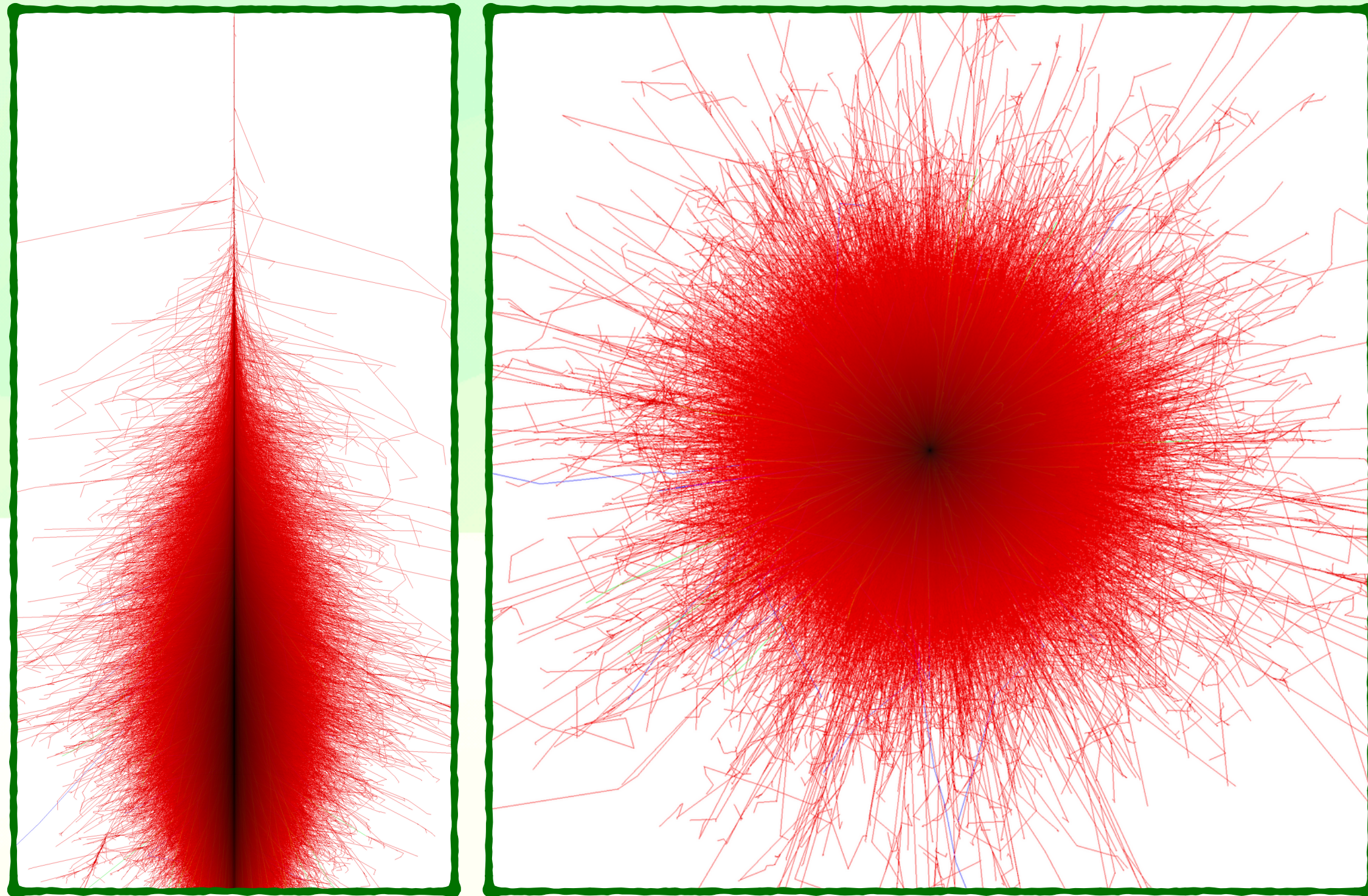
Vista inferior



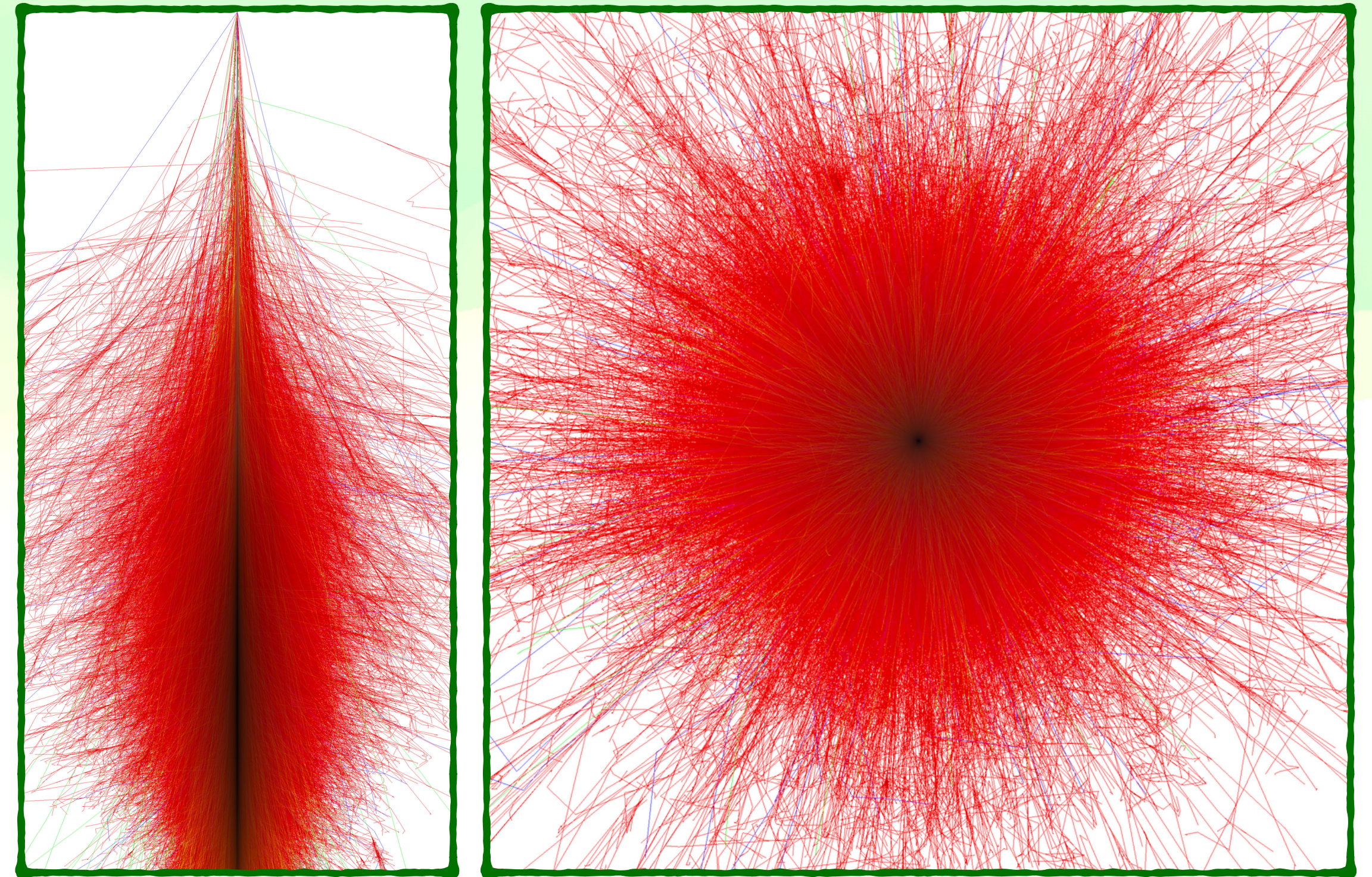
Protón de 10^{14} eV = 100 TeV

Cascadas Atmosféricas Extensas

Cascada electromagnética



Cascada hadrónica

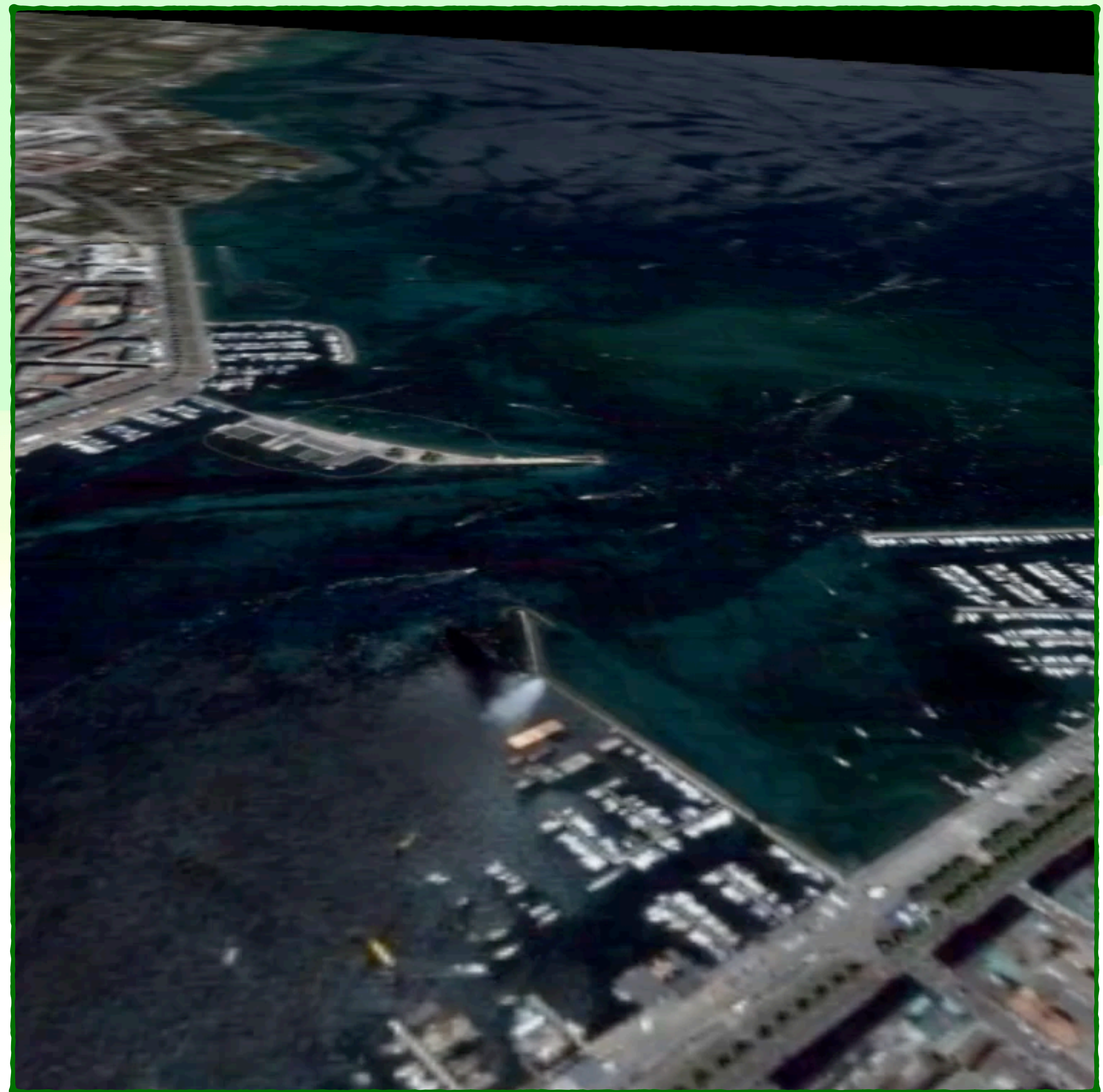


<https://www.iap.kit.edu/corsika/shower-movies.php>

- ▶ **Diferencias morfológicas** (topológicas) en la huella de la cascada
- ▶ **Diferente composición** de partículas
- ▶ Estas diferencias nos ayudan a **clasificarlas al ser detectadas**

Cascadas Atmosféricas Extensas

- ▶ Las partículas de la cascada atmosférica **viajan a lo largo de diferentes medios**
- ▶ La velocidad a la que se desplazan es cercana a la **velocidad de la luz en el vacío c**
- ▶ Dadas las condiciones anteriores, las partículas sufren un efecto llamado ***efecto Cherenkov***



Efecto Cherenkov

~~Efecto Cherenkov~~

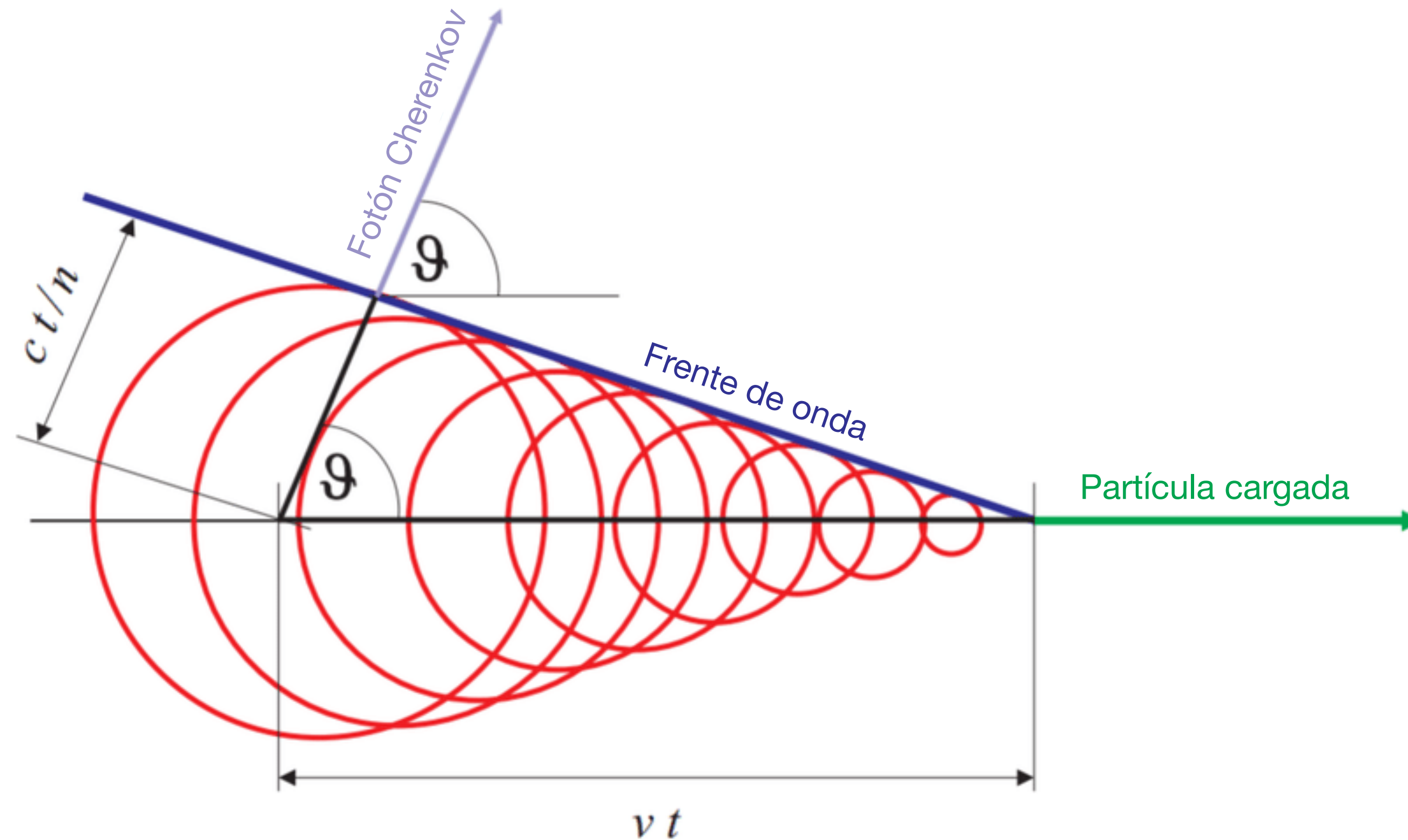
Explosión sónica



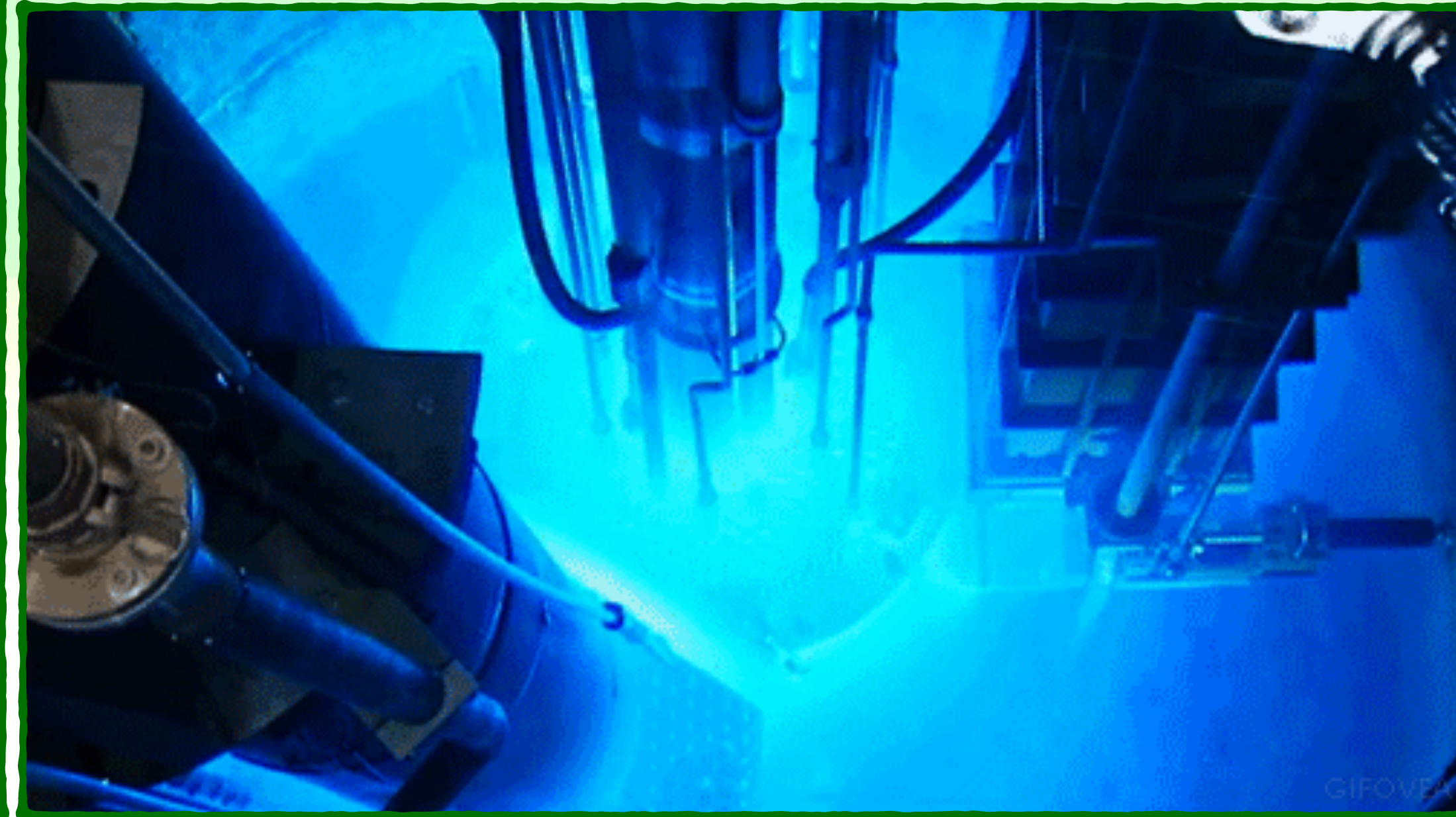
<https://radnews.in/all-you-wanted-to-know-about-sonic-booms/>

- ▶ La *explosión sónica* es un **efecto auditivo** generado por un objeto que **viaja a una velocidad mayor que la velocidad del sonido** en el medio en que se desplaza

Efecto Cherenkov



- ▶ La radiación generada (fotones Cherenkov) son de la longitud de onda azul



El efecto Cherenkov radiativo

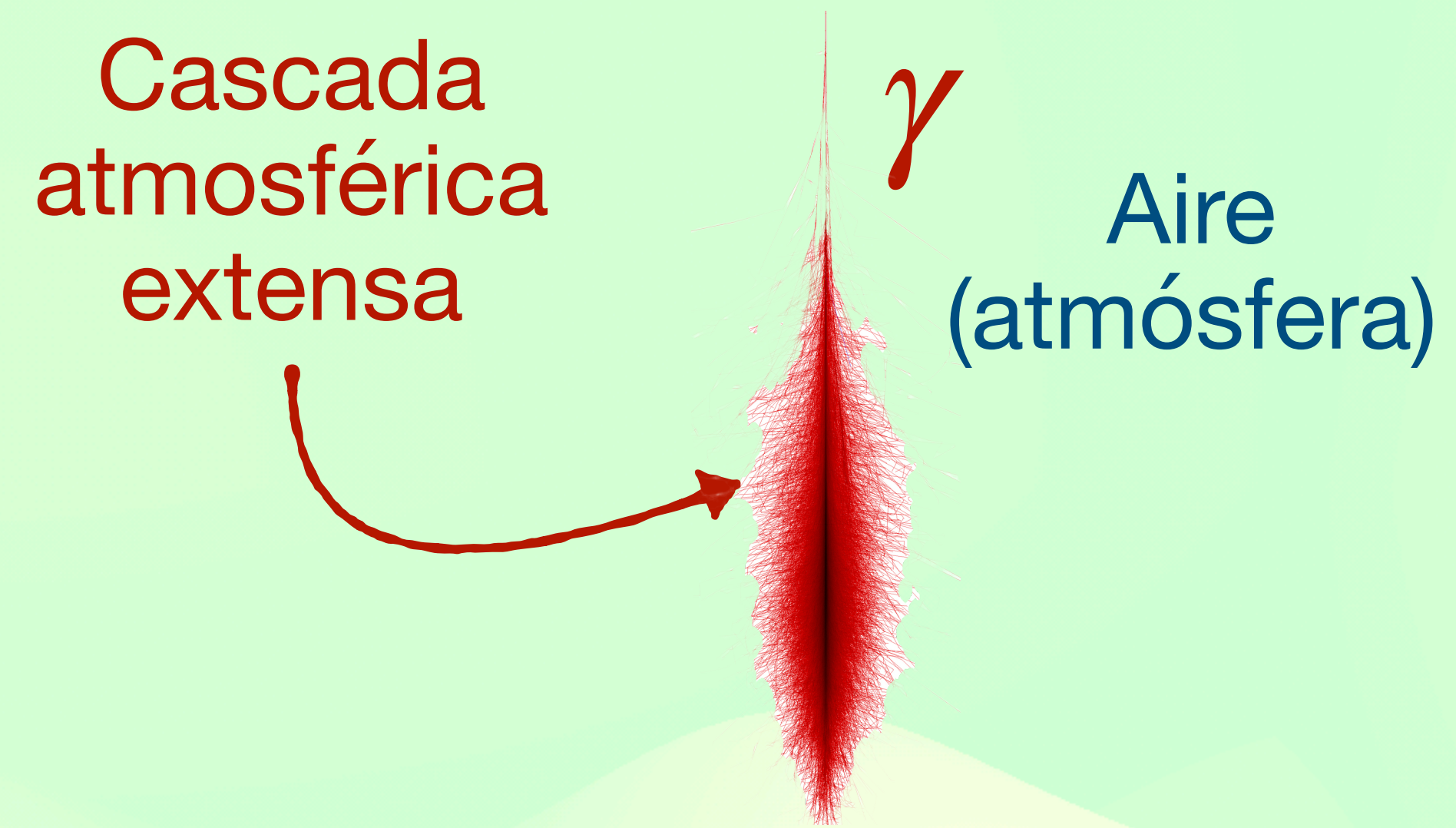
- ▶ ~~La explosión sónica~~ es un **efecto** ~~auditivo~~ generado por un objeto que **viaja a una velocidad mayor que la velocidad del sonido** en el medio en que se desplaza de la luz

Efecto Cherenkov



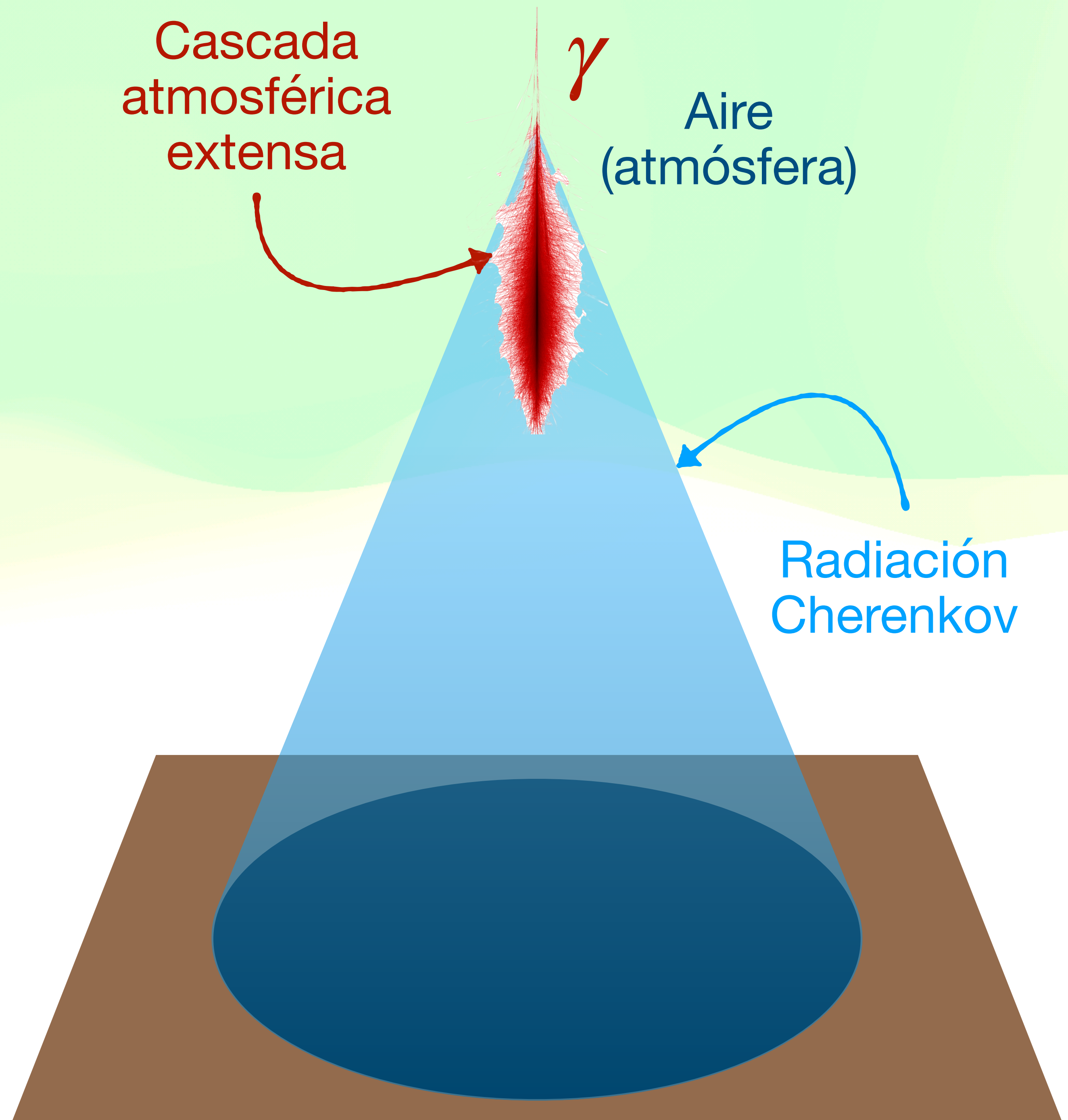
Efecto Cherenkov

- ▶ El efecto Cherenkov es un **efecto radiactivo** generado por un objeto que **viaja a una velocidad mayor que la velocidad de la luz** en el medio en que se desplaza



Efecto Cherenkov

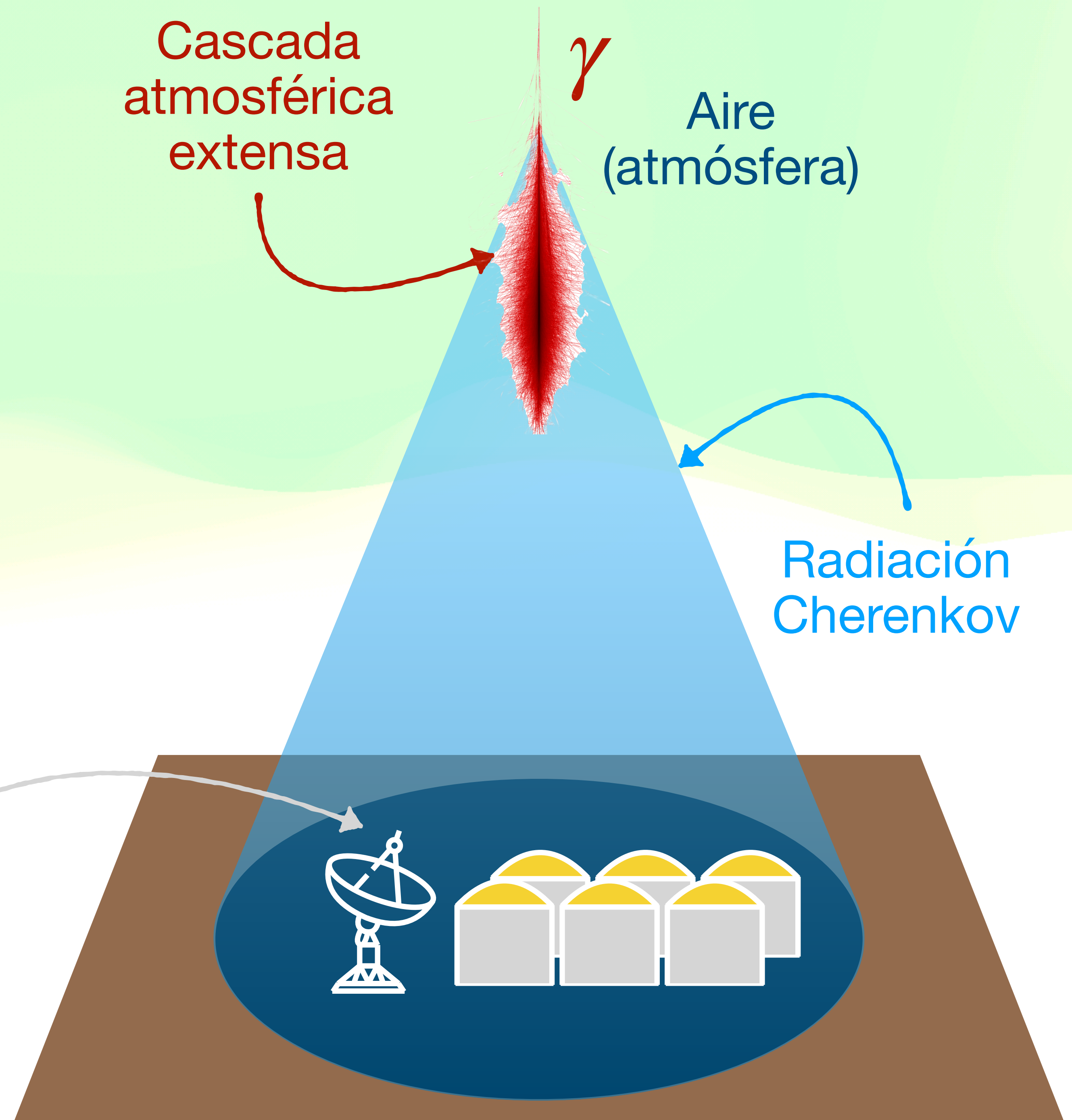
- ▶ El efecto Cherenkov es un **efecto radiactivo** generado por un objeto que **viaja a una velocidad mayor que la velocidad de la luz** en el medio en que se desplaza



Efecto Cherenkov

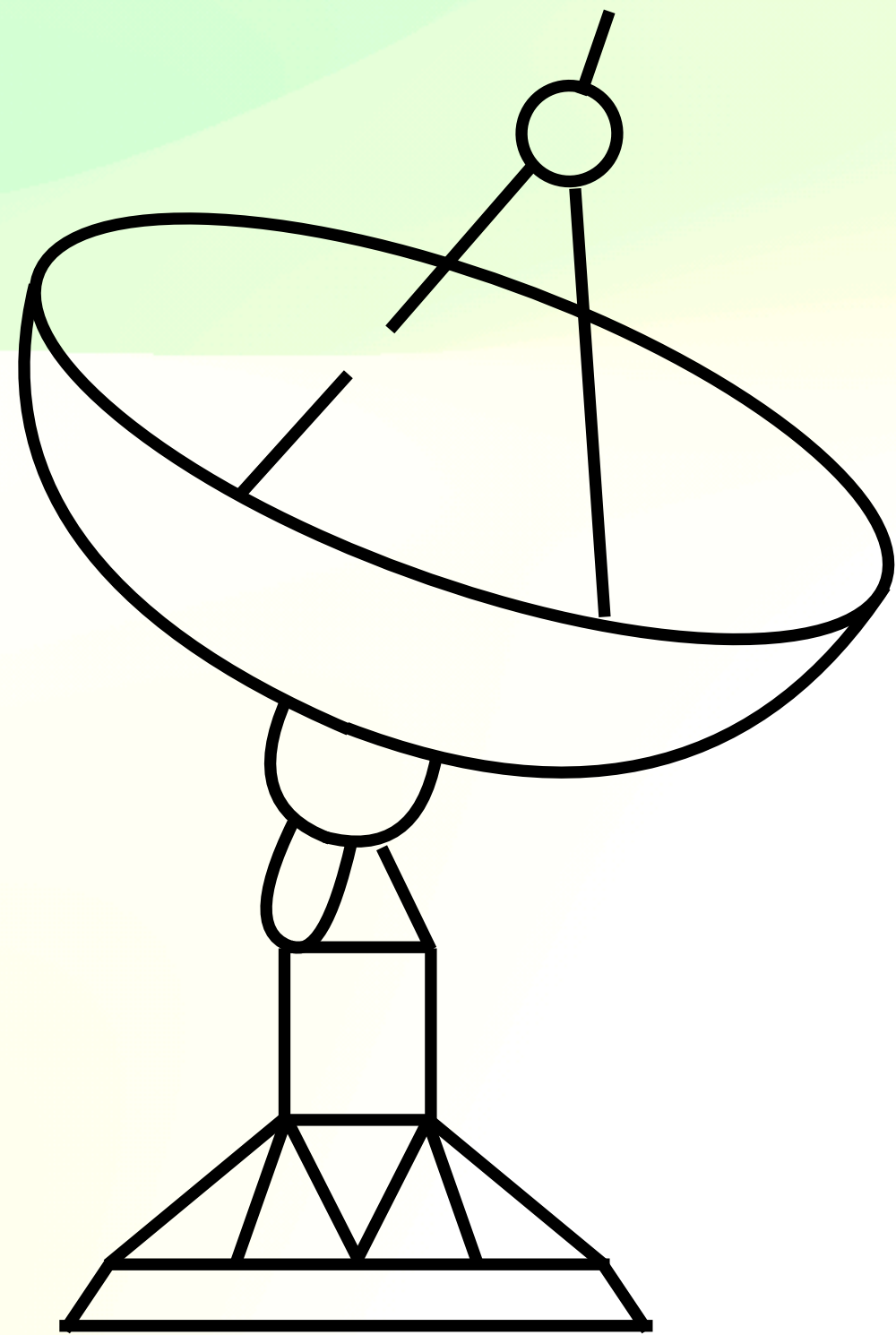
- ▶ El efecto Cherenkov es un **efecto radiactivo** generado por un objeto que **viaja a una velocidad mayor que la velocidad de la luz** en el medio en que se desplaza

Detectores de radiación Cherenkov

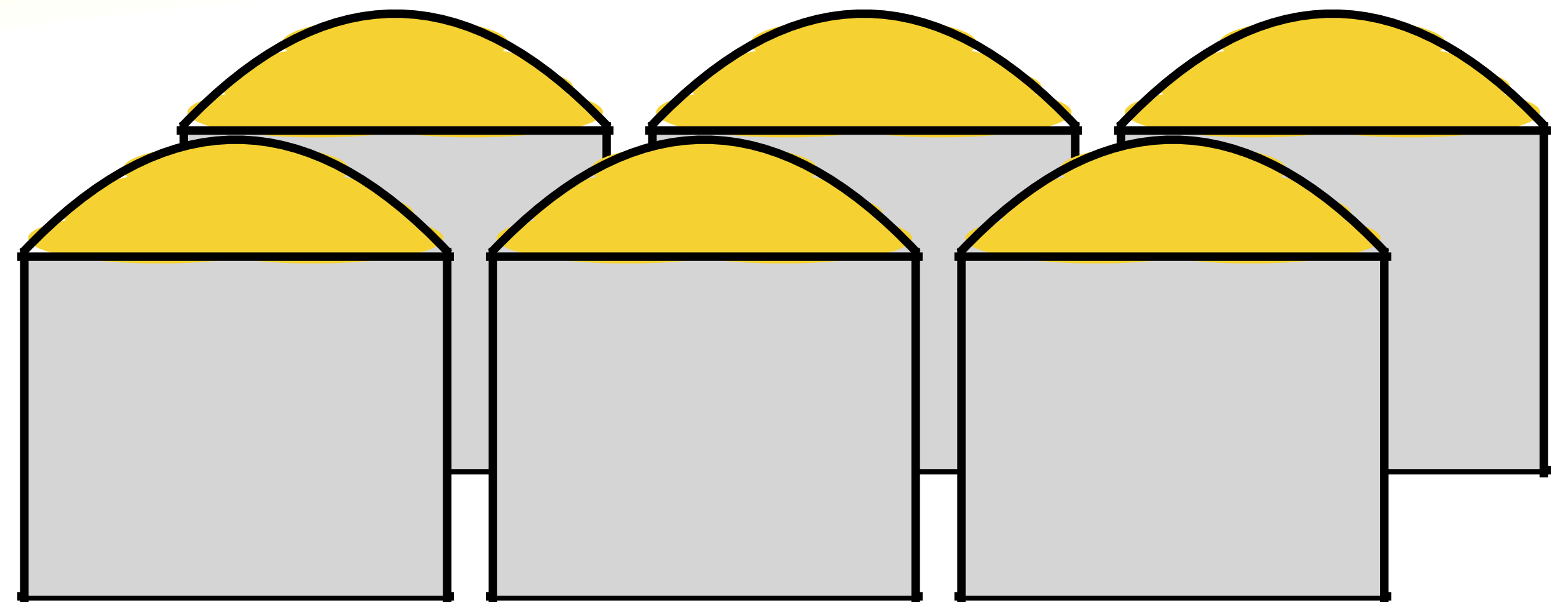


Detectores de radiación Cherenkov

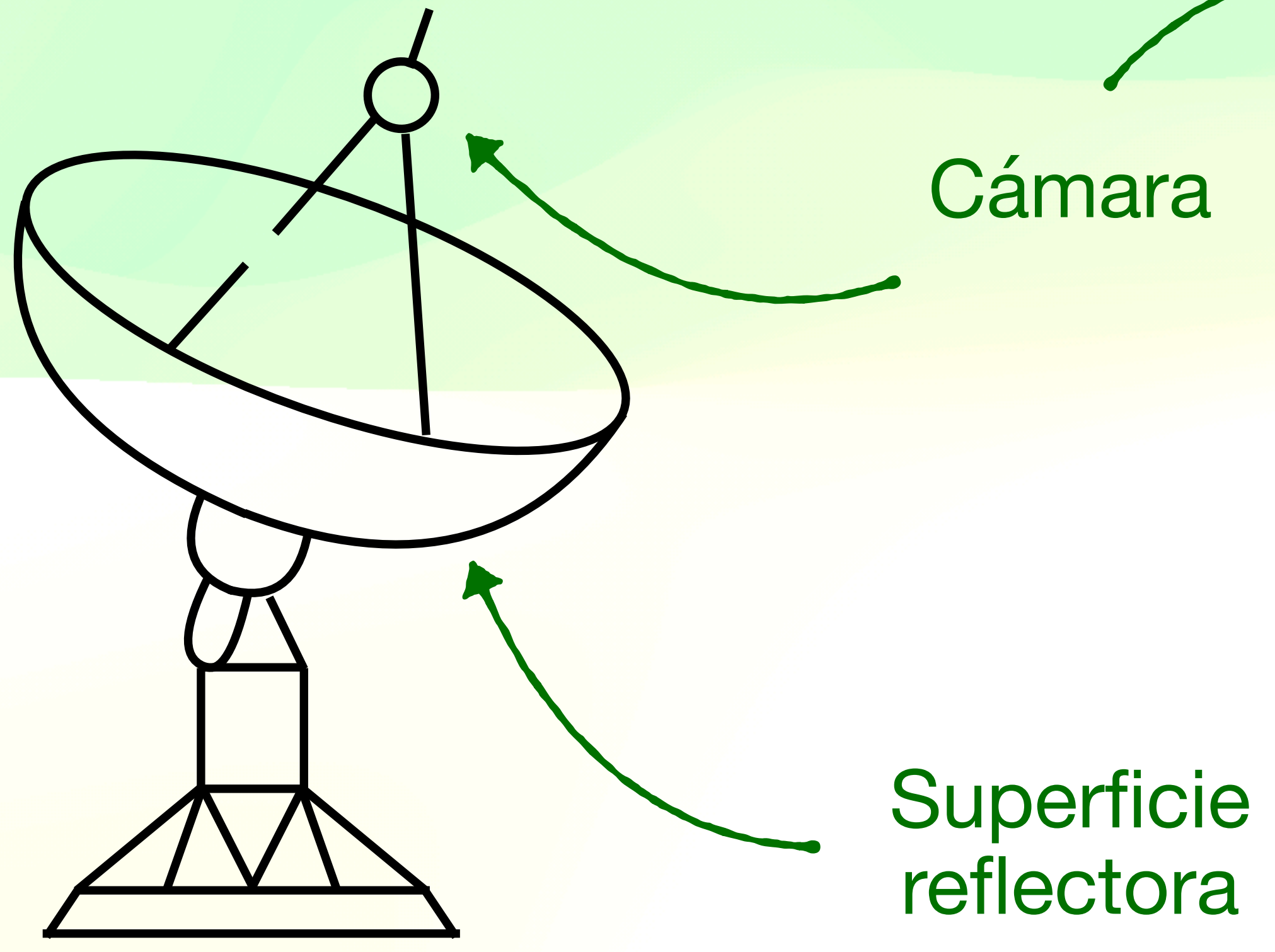
Telescopios de Imagen de Cherenkov Atmosférico
(Imaging Air Cherenkov Telescopes - IACTs)



Detectores de Amplio Campo de Visión
(Wide Field-of-view Detectors - WFDs)



Telescopios de Imagen de Cherenkov Atmosférico (Imaging Air Cherenkov Telescopes - IACTs)



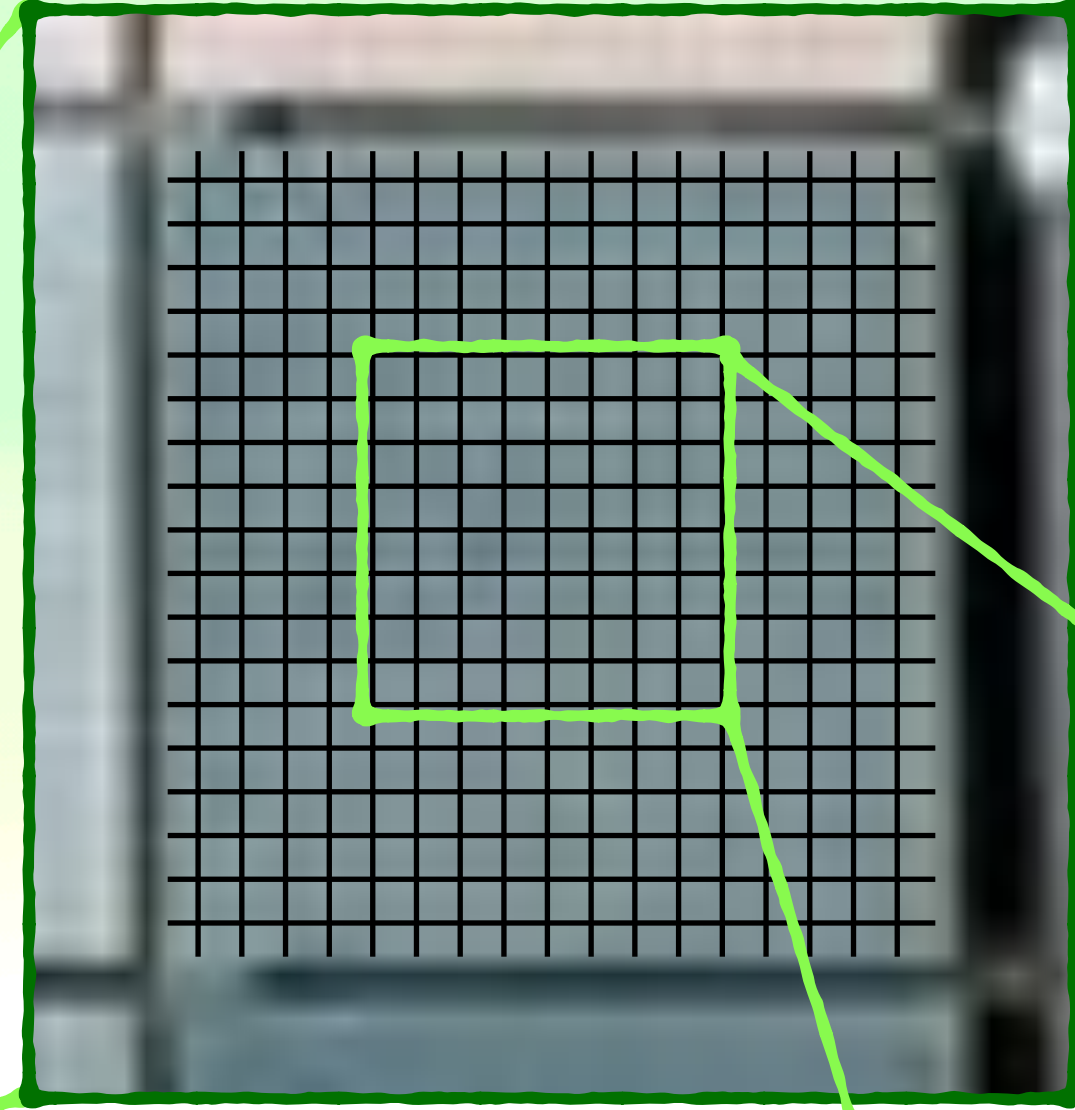
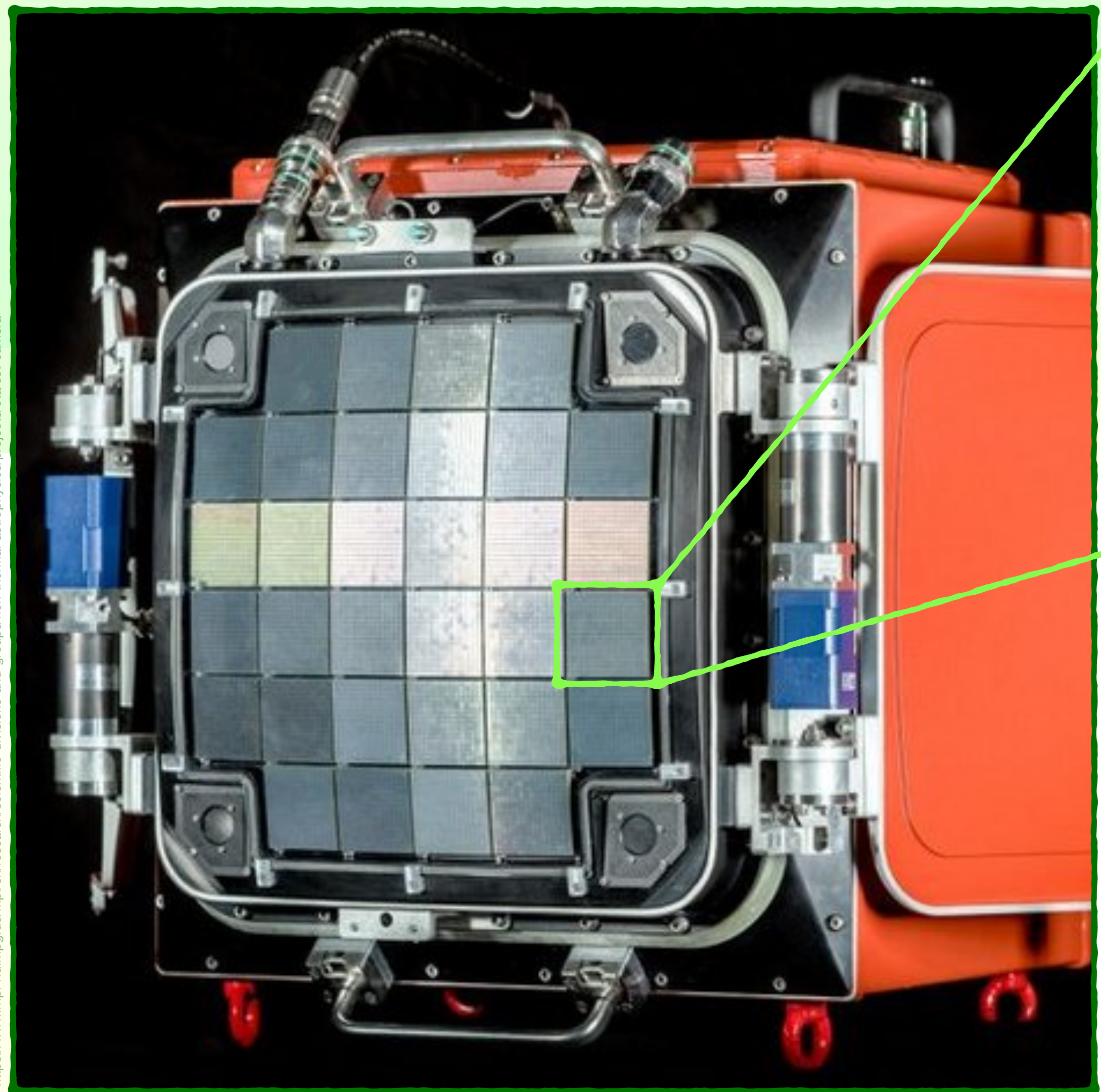
Telescopios de Imagen de Cherenkov Atmosférico (*Imaging Air Cherenkov Telescopes - IACTs*)

Cámara

- ▶ Localizado en el **foco de la parábola reflectora**
- ▶ Conjunto de **fotosensores** (sensores a la luz)
- ▶ Colecta la **radiación Cherenkov** producida por las partículas al atravesar la atmósfera



Telescopios de Imagen de Cherenkov Atmosférico (Imaging Air Cherenkov Telescopes - IACTs)

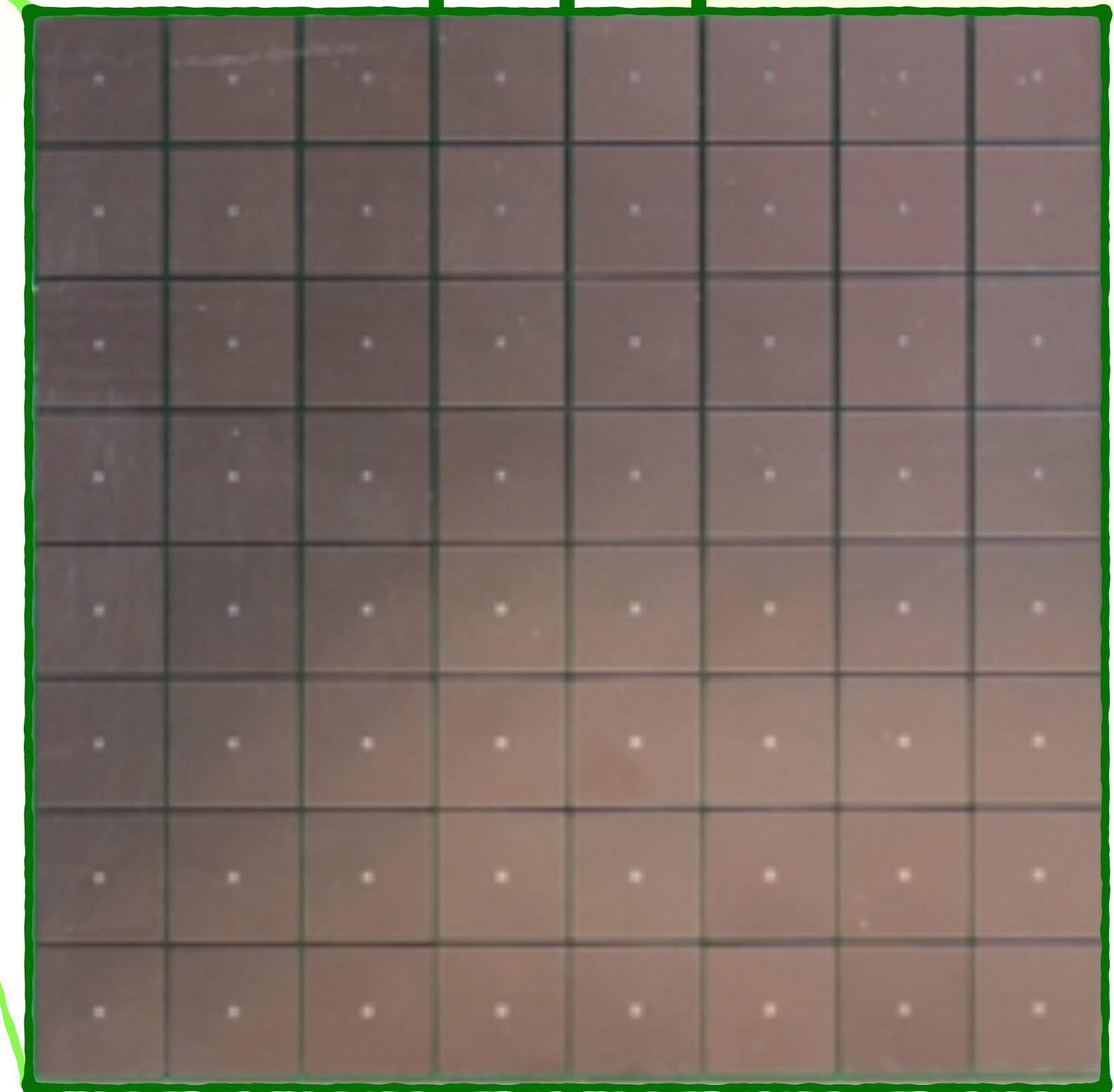


**Silicon Photomultiplier
(SiPM)**

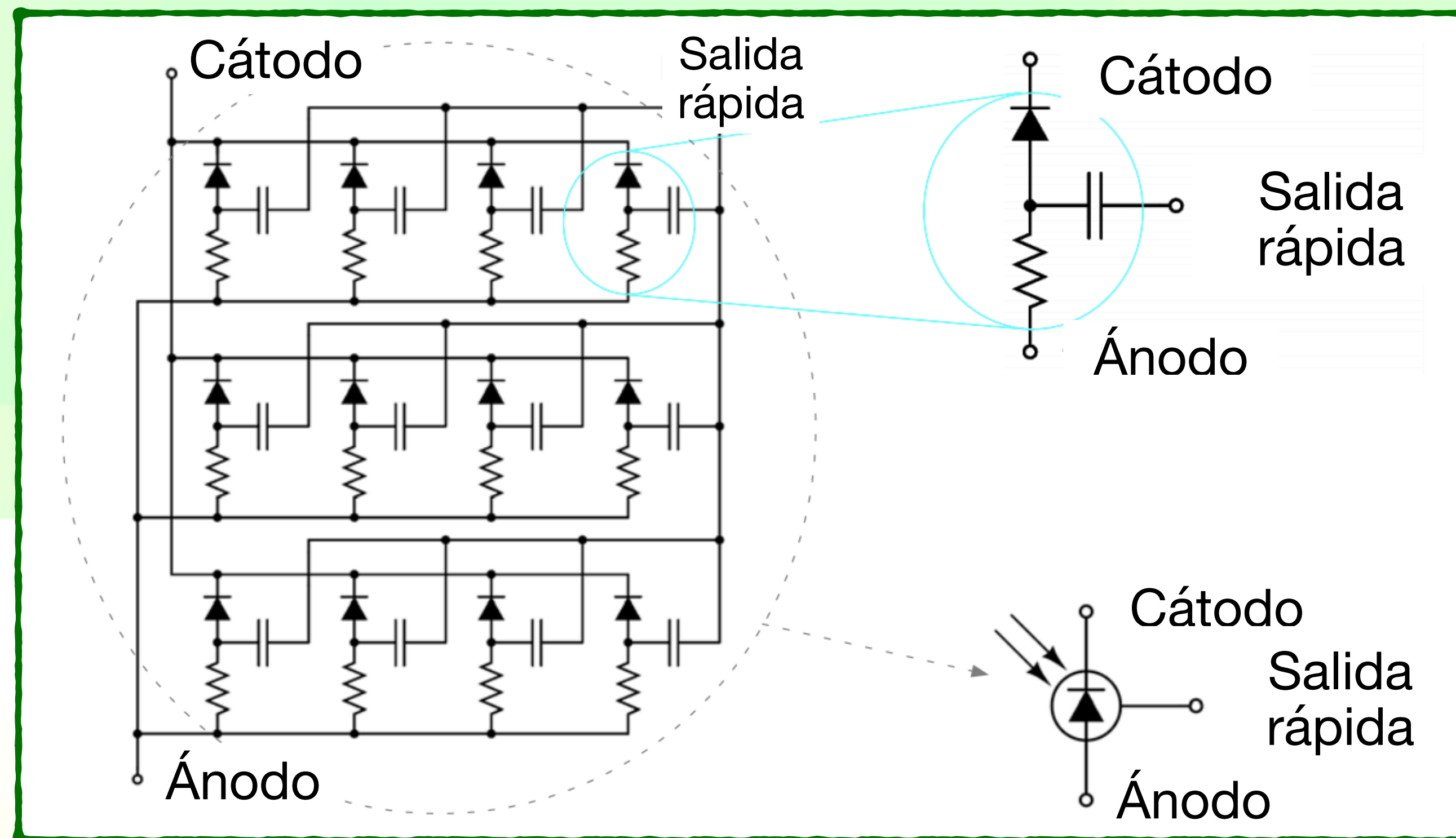
$3 \times 3 \text{ mm}^2$



- ▶ Esta cámara cuenta con **1440 SiPMs** de $3 \times 3 \text{ mm}^2$ cada uno



Telescopios de Imagen de Cherenkov Atmosférico (*Imaging Air Cherenkov Telescopes - IACTs*)



Silicon Photomultiplier (SiPM)

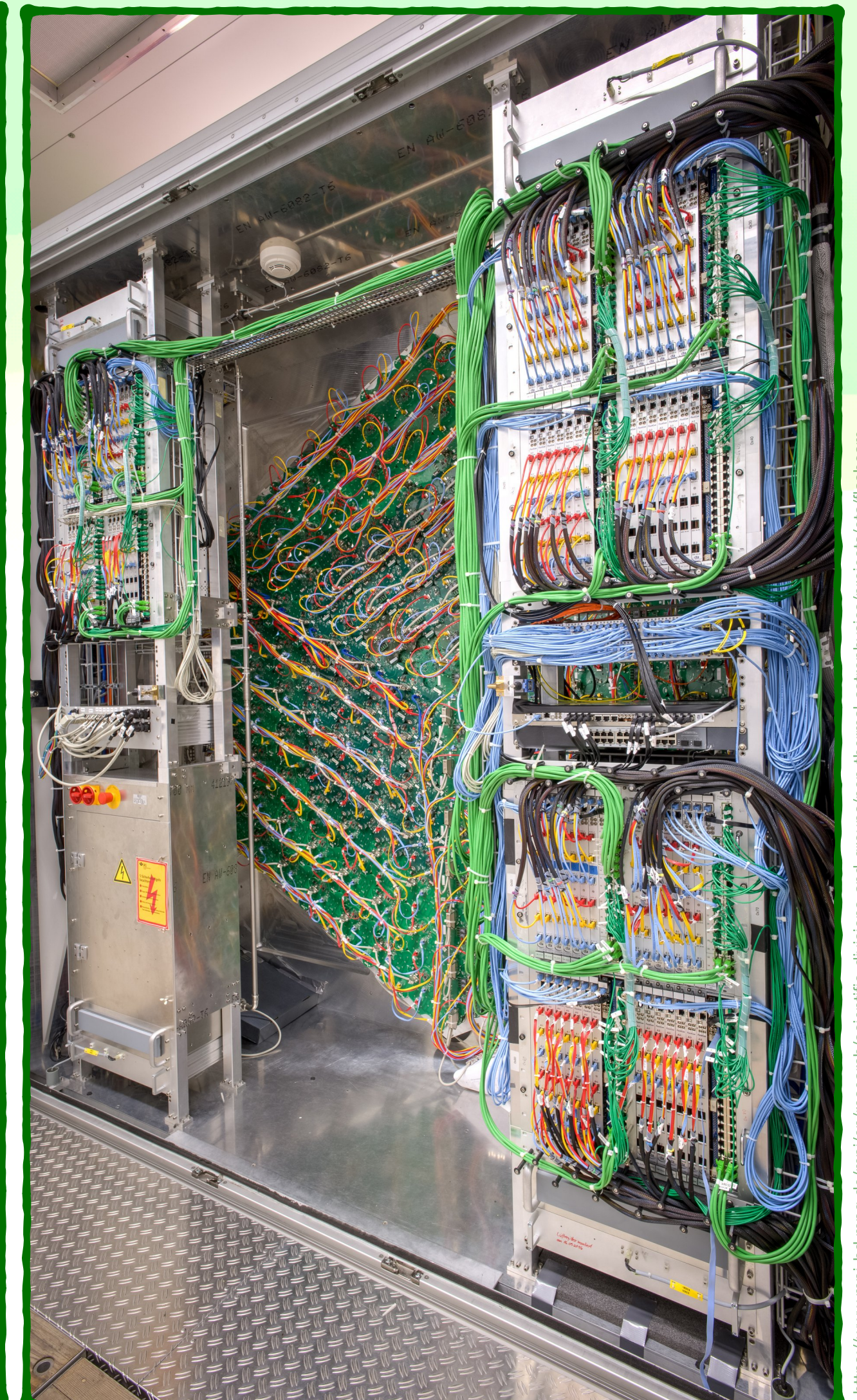
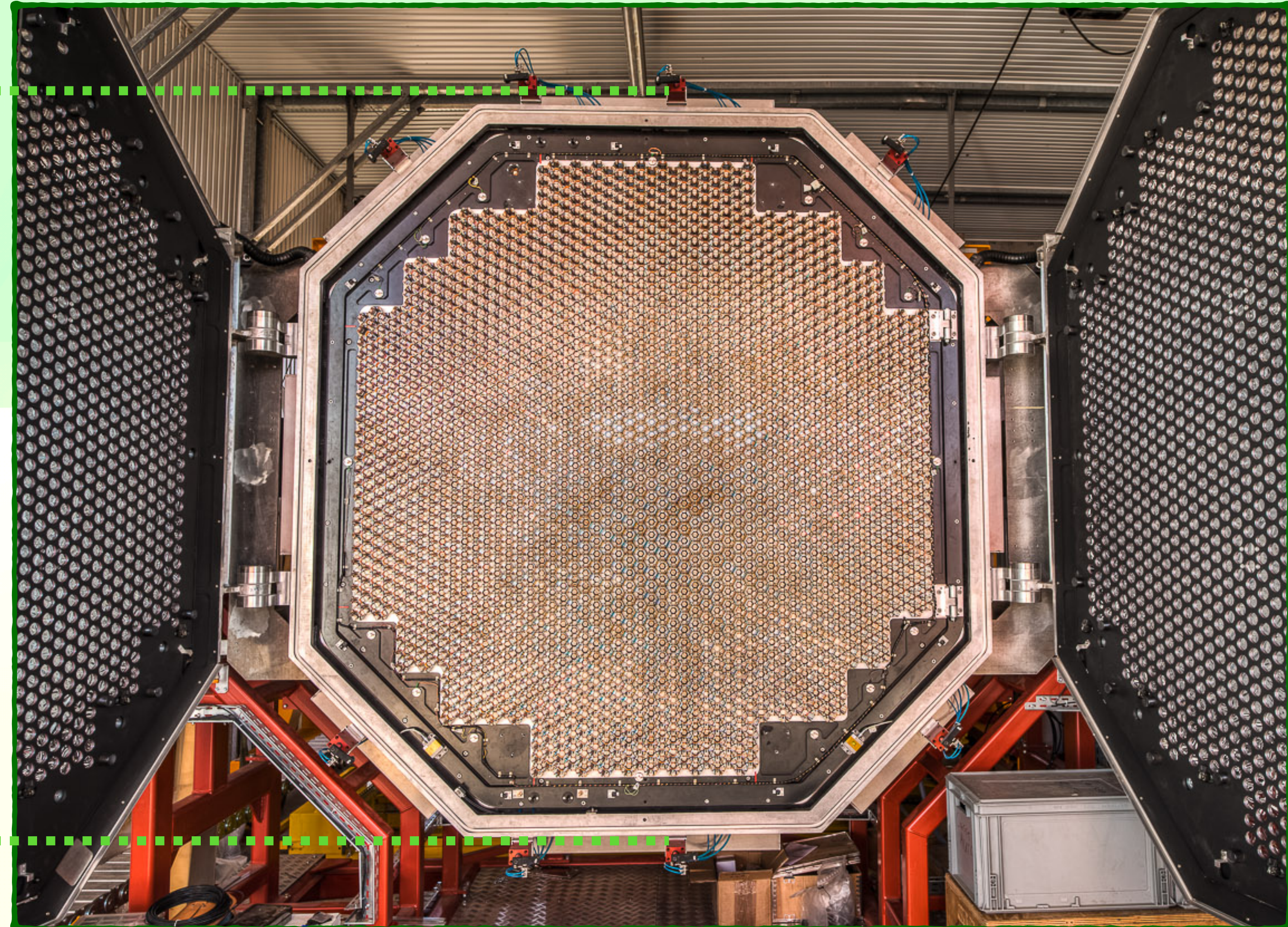
3 × 3 mm²



- ▶ FOTOSENSORES DE **ESTADO SÓLIDO**
- ▶ Funcionan a partir de **DIODOS DE SILICIO**
- ▶ **Muy alta eficiencia y robustos**
- ▶ **Tamaños muy pequeños**

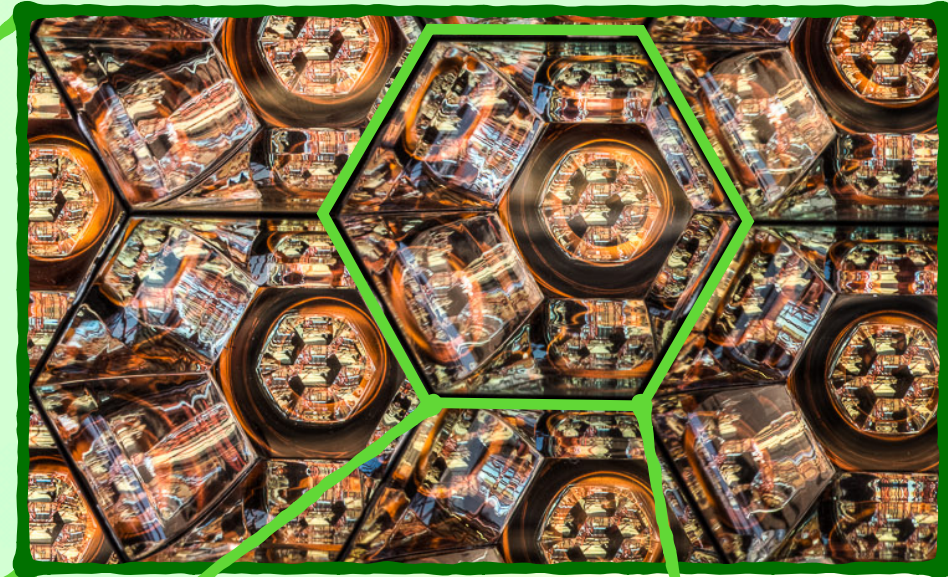
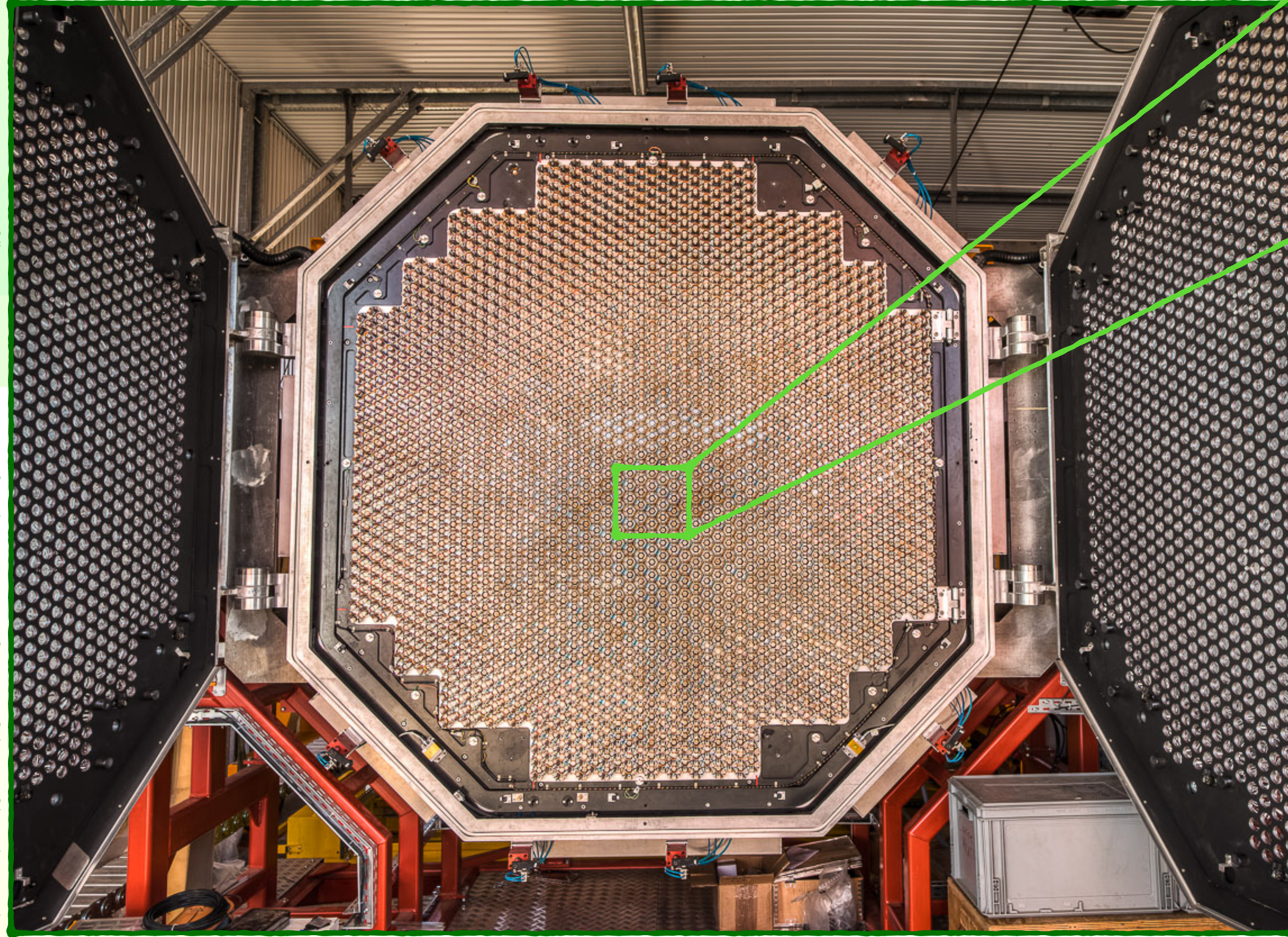
Telescopios de Imagen de Cherenkov Atmosférico (Imaging Air Cherenkov Telescopes - IACTs)

~ 4 m



Telescopios de Imagen de Cherenkov Atmosférico (*Imaging Air Cherenkov Telescopes - IACTs*)

<https://www.simtrum.com/WebShop/ProductList5.aspx?pid=1833>



► Esta cámara cuenta con **2048 PMTs de 1.25 in de diámetro** cada uno



Guía de luz tipo “**cono de Winston**”

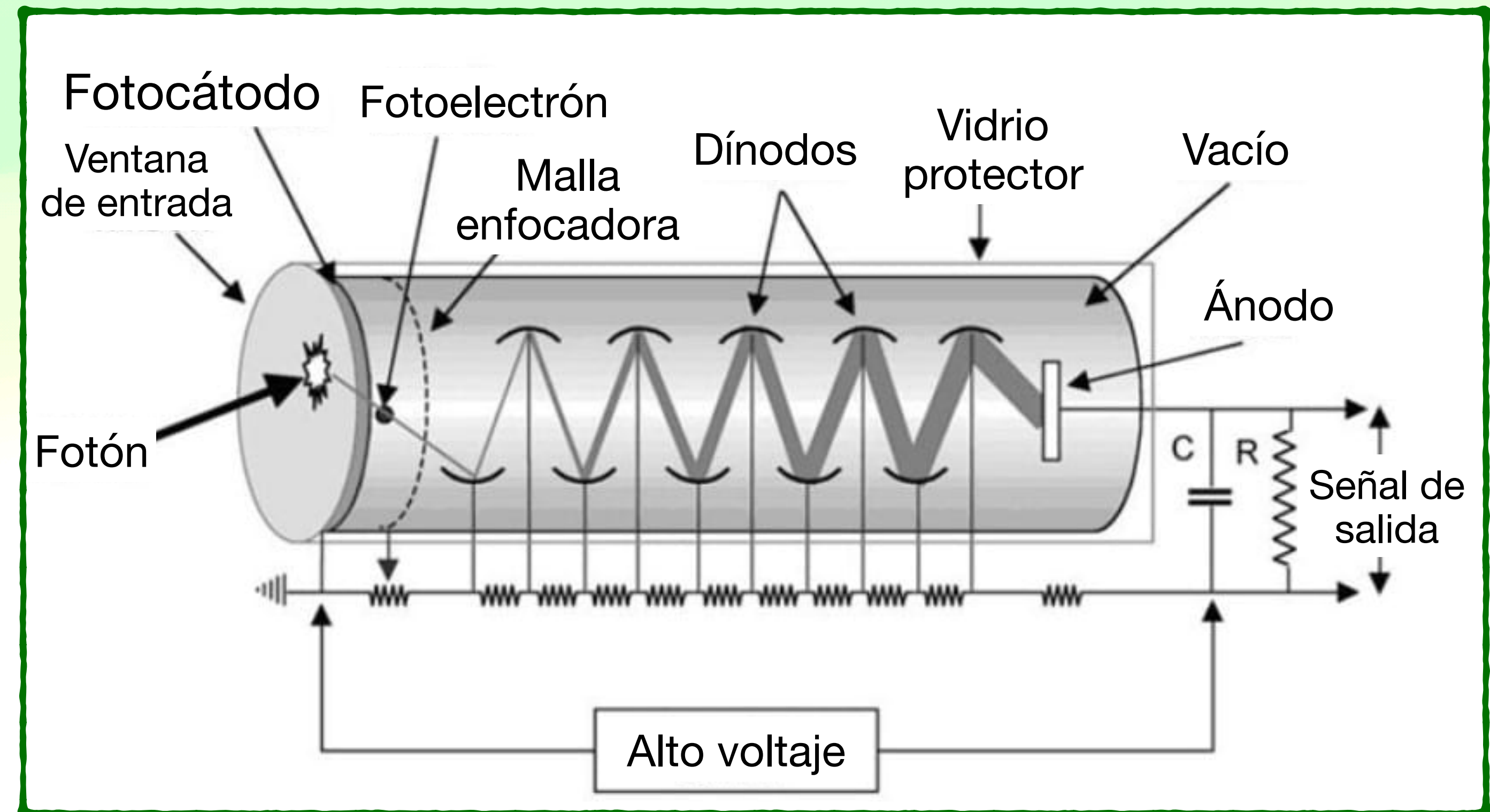
Photomultiplier Tube (PMT)

~ 2.5 cm

https://www.mpi-hd.mpg.de/HESS/pages/home/Webgalleries/HESS2_telescope/images/120925_Namibia_Foehr_0151_2_3_4_5.jpg

Telescopios de Imagen de Cherenkov Atmosférico (Imaging Air Cherenkov Telescopes - IACTs)

Photomultiplier Tube (PMT)



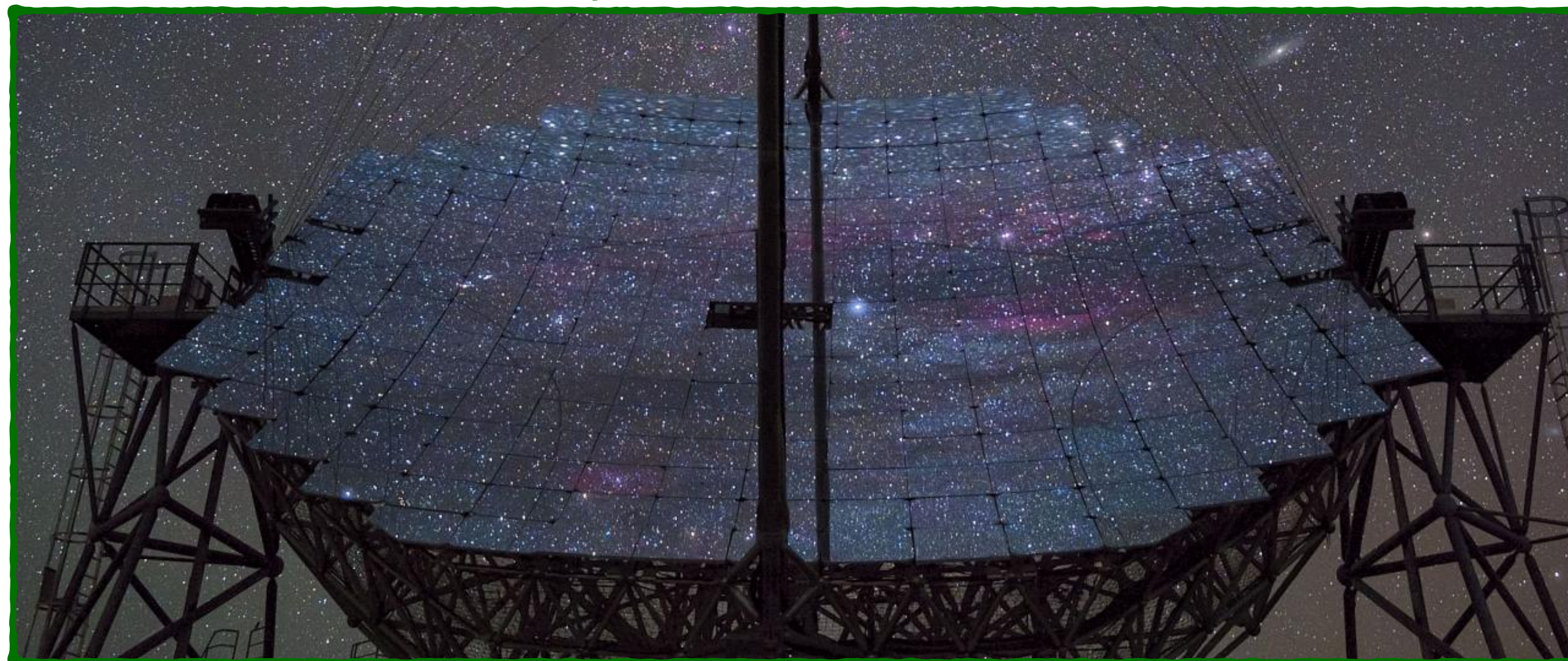
- ▶ Fodosensores a partir de **efecto fotoeléctrico**
- ▶ Funcionan a partir de **cadena de dínodos**
- ▶ **Menos eficientes y más delicados** de trabajar
- ▶ Cubren **mayor área** fácilmente

Telescopios de Imagen de Cherenkov Atmosférico (*Imaging Air Cherenkov Telescopes - IACTs*)

<http://www.astrin.inaf.it/en/project/technology/>

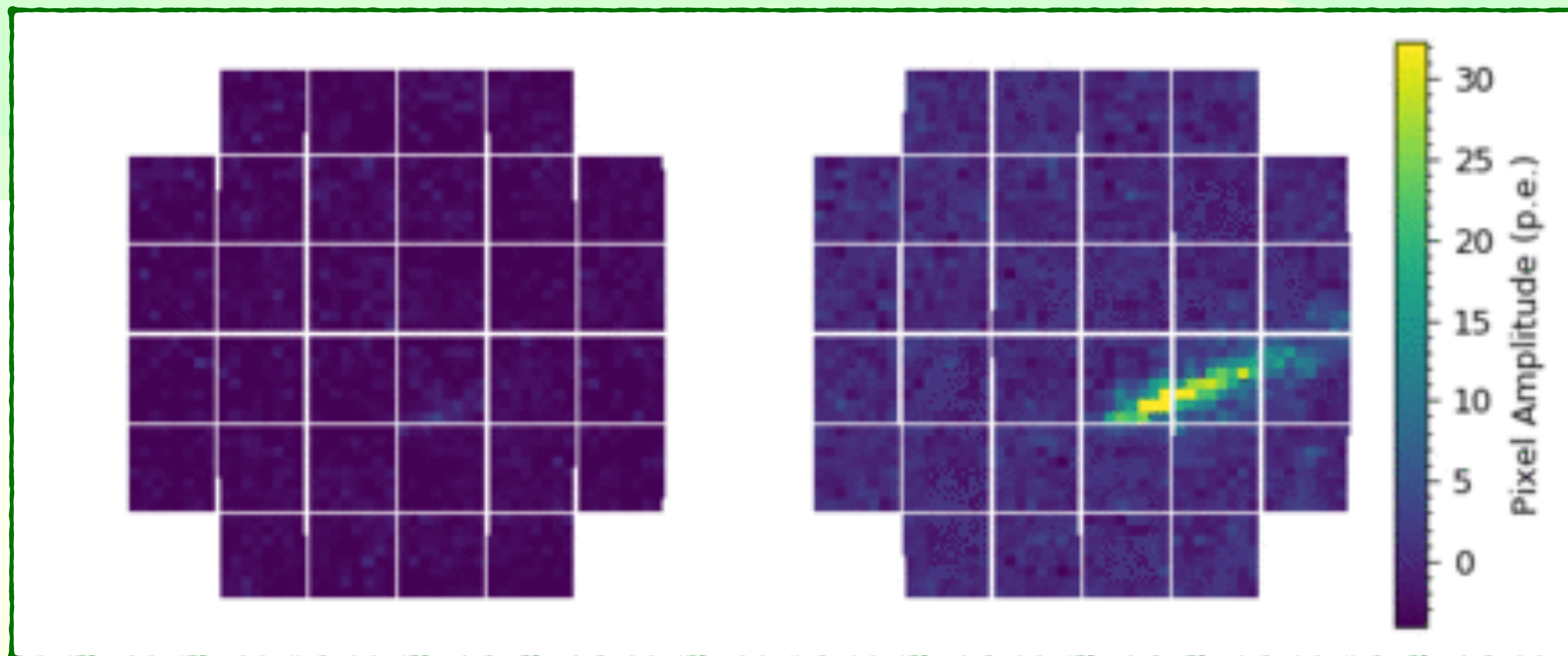
Superficie reflectora

- ▶ Conjunto de espejos en un área parabólica
- ▶ Reflejan y enfocan la radiación Cherenkov hacia la cámara localizada en el foco
- ▶ Alta reflectancia y baja dispersión de luz
- ▶ Alta eficiencia en el rango del UV y azul

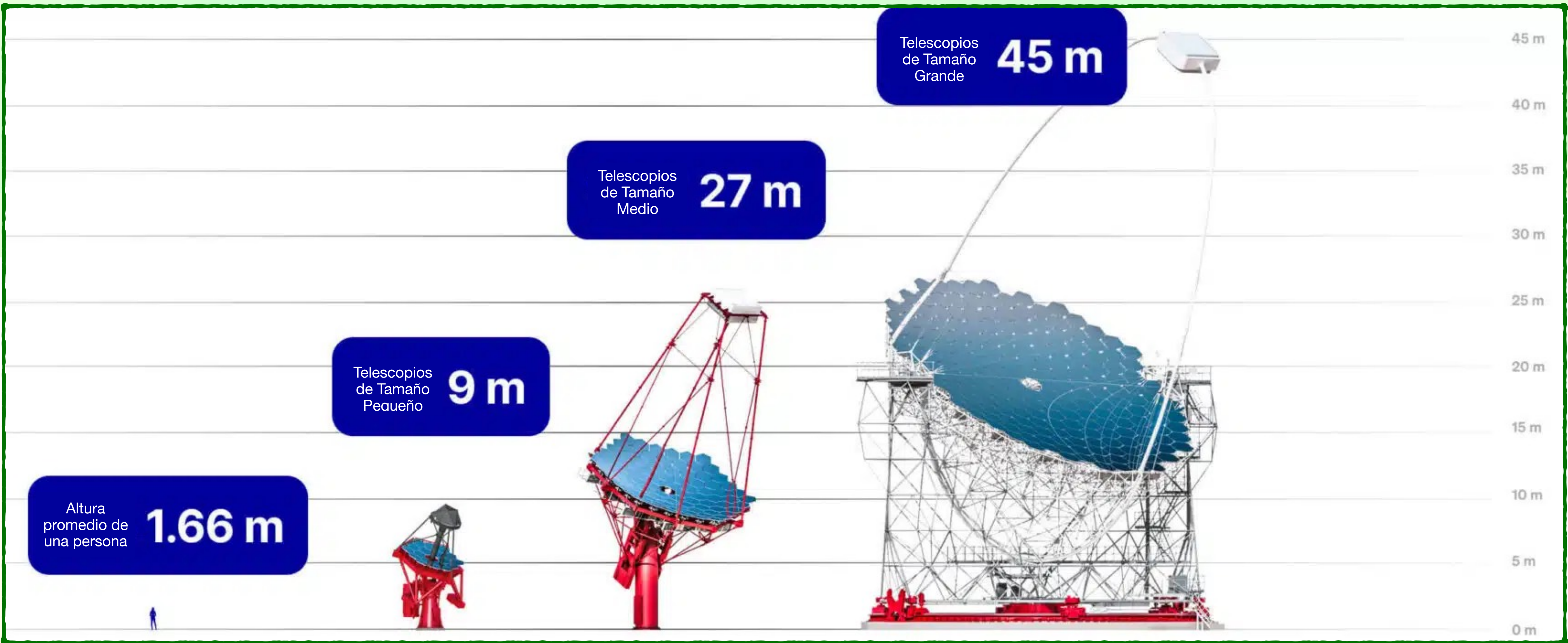


Telescopios de Imagen de Cherenkov Atmosférico (*Imaging Air Cherenkov Telescopes - IACTs*)

- ▶ Los tiempos de llegada de las señales se miden
- ▶ Entre más amarillo, mayor carga eléctrica asociada a la señal



Telescopios de Imagen de Cherenkov Atmosférico (*Imaging Air Cherenkov Telescopes - IACTs*)



Telescopios de Imagen de Cherenkov Atmosférico (Imaging Air Cherenkov Telescopes - IACTs)



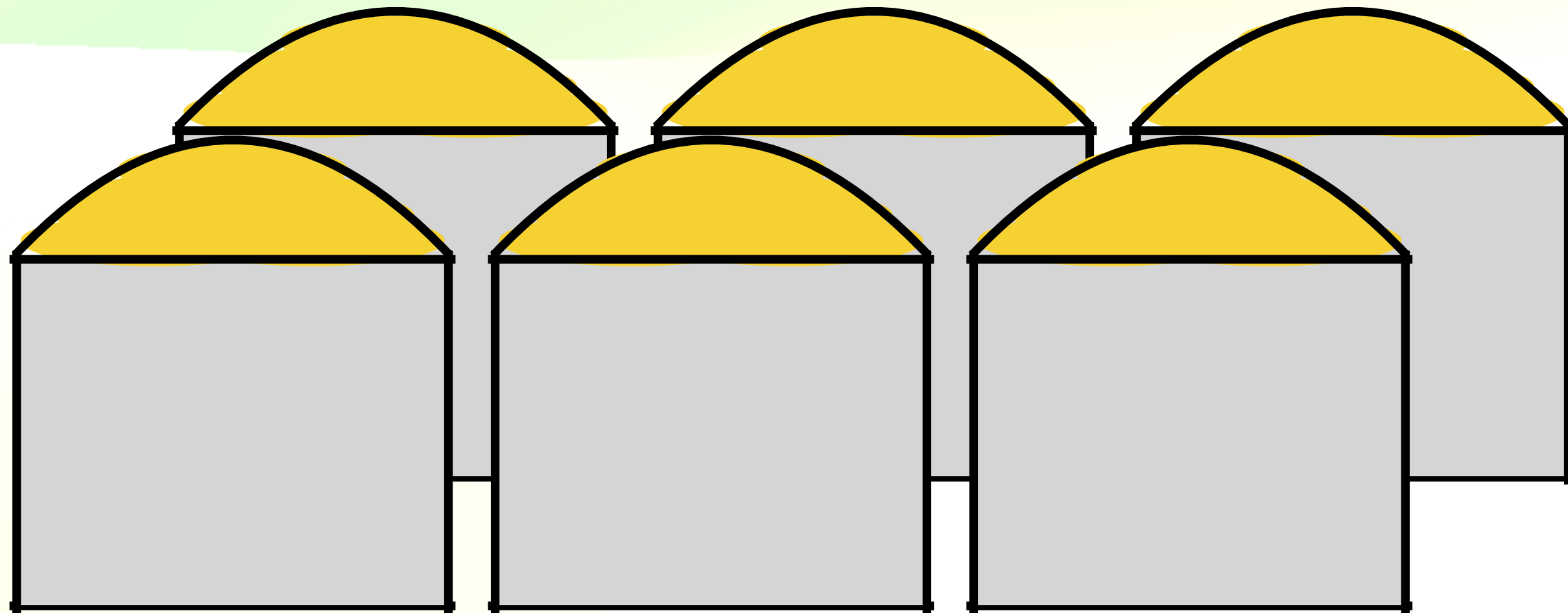
Major Atmospheric Gamma
Imaging Cherenkov

High Energy
Stereoscopic System



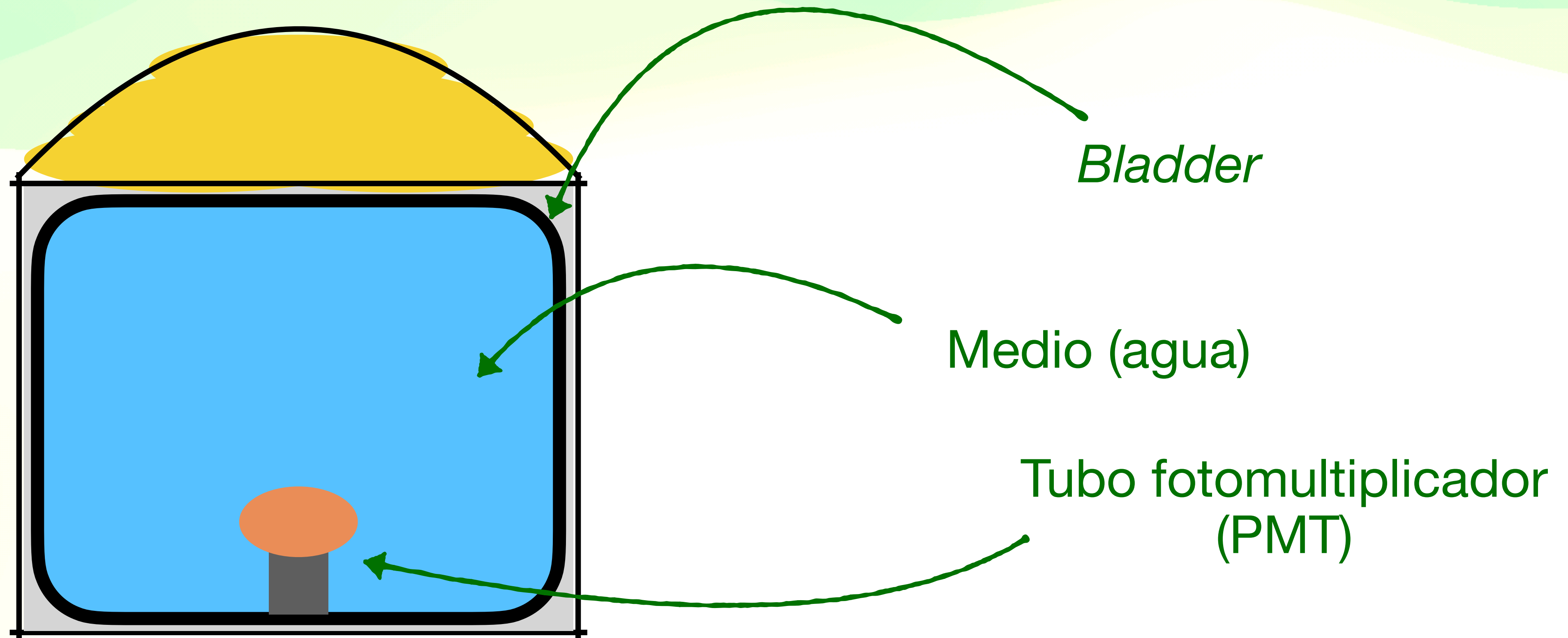
Detectores de Amplio Campo de Visión (*Wide Field-of-view Detectors - WFDs*)

- ▶ Contenedores de algún medio (generalmente agua)
- ▶ Completamente aislados de la luz externa



Detectores de Amplio Campo de Visión (*Wide Field-of-view Detectors - WFDs*)

- ▶ Contenedores de algún medio (generalmente agua)
- ▶ Completamente aislados de la luz externa



Detectores de Amplio Campo de Visión (*Wide Field-of-view Detectors - WFDs*)

Bladder

- ▶ Bolsa hermética aislante de la luz
- ▶ Hecha de **materiales especiales** para controlar el degradado del material
- ▶ **Contiene el medio** con el que se producirá la radiación Cherenkov



Detectores de Amplio Campo de Visión (*Wide Field-of-view Detectors - WFDs*)

Medio (agua)

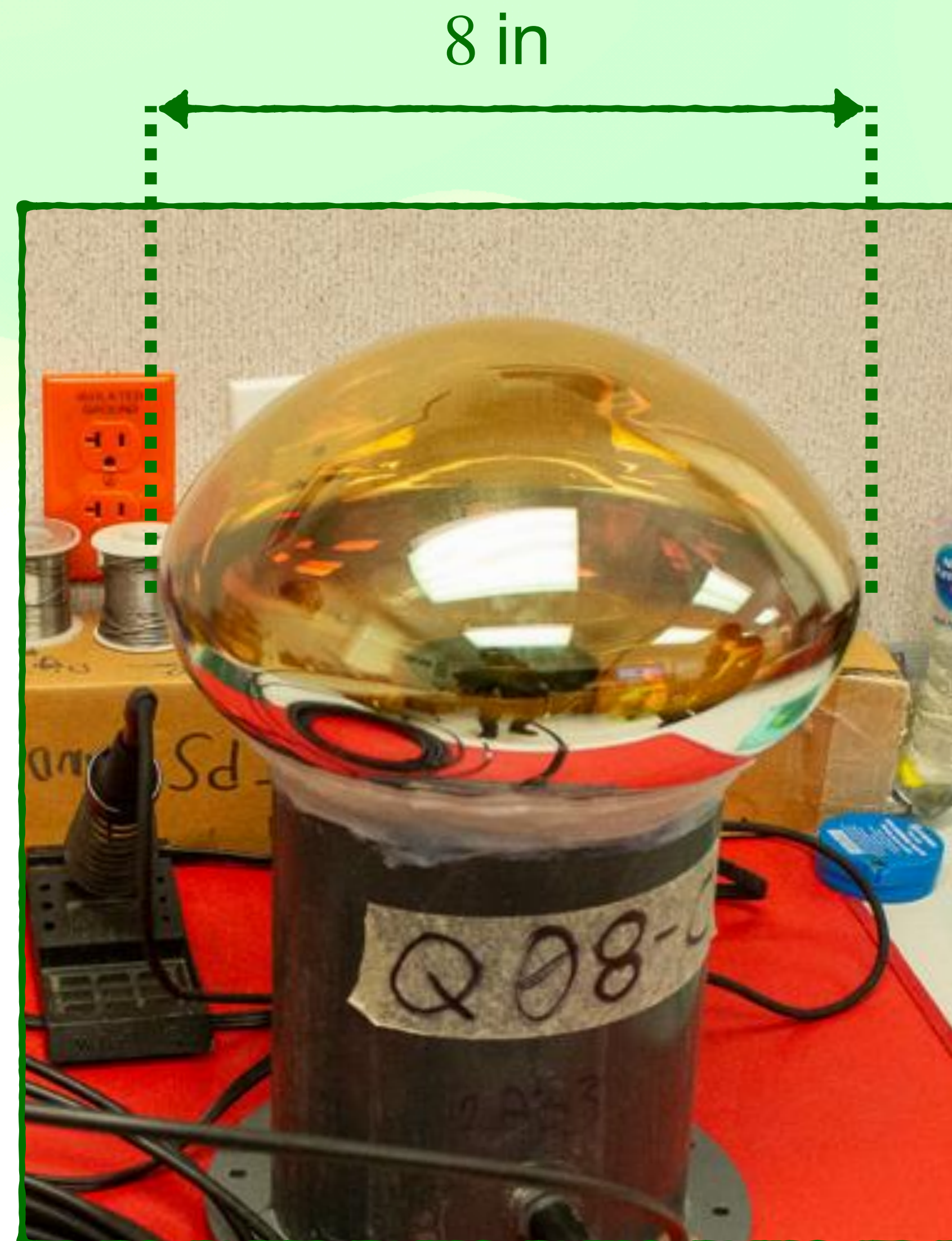
- ▶ El agua es filtrada pasando 60 galones por minuto
- ▶ Se filtran hasta partículas de 1 micrómetro de diámetro
- ▶ La distancia de atenuación es >15 m de largo



Detectores de Amplio Campo de Visión (*Wide Field-of-view Detectors - WFDs*)

Tubo fotomultiplicador (PMT)

- ▶ **Sensores análogos** a los PMTs utilizados en los IACTs
- ▶ **PMTs más grandes** que los utilizados en los IACTs
- ▶ Los componentes electrónicos deben de **aislarse del agua**

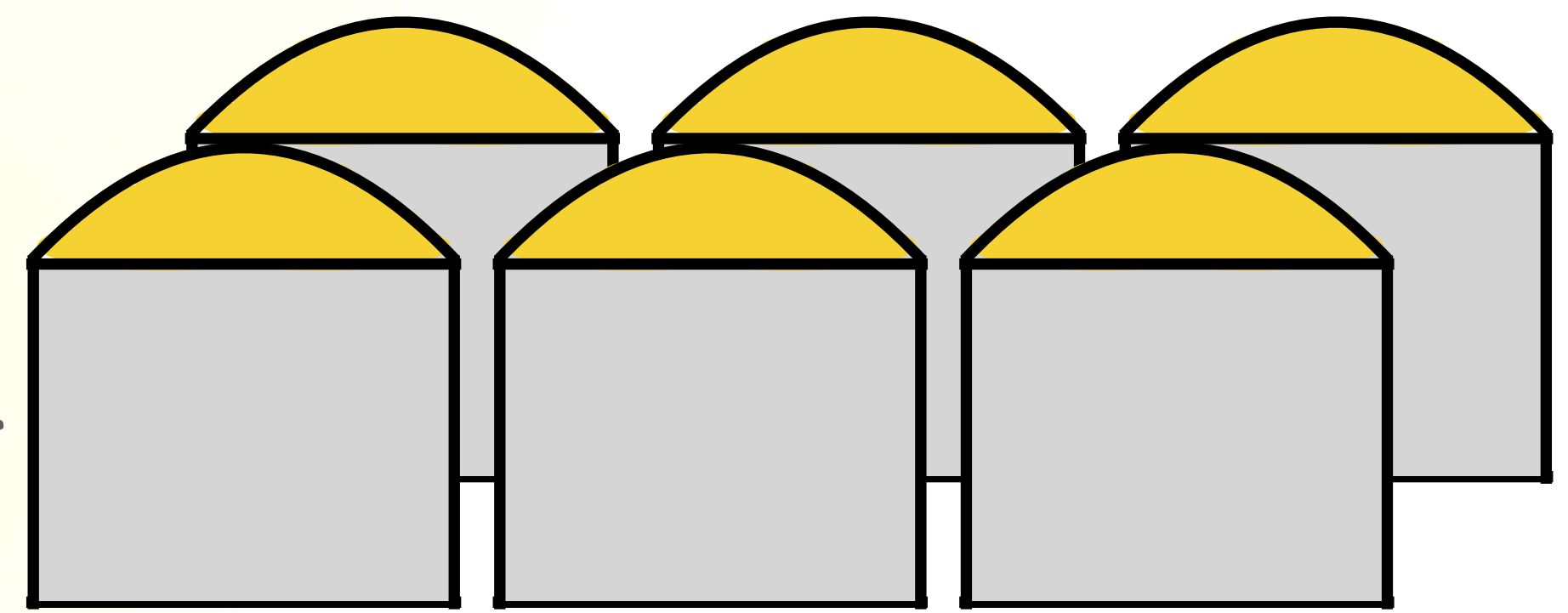


Detectores de Amplio Campo de Visión (*Wide Field-of-view Detectors - WFDs*)

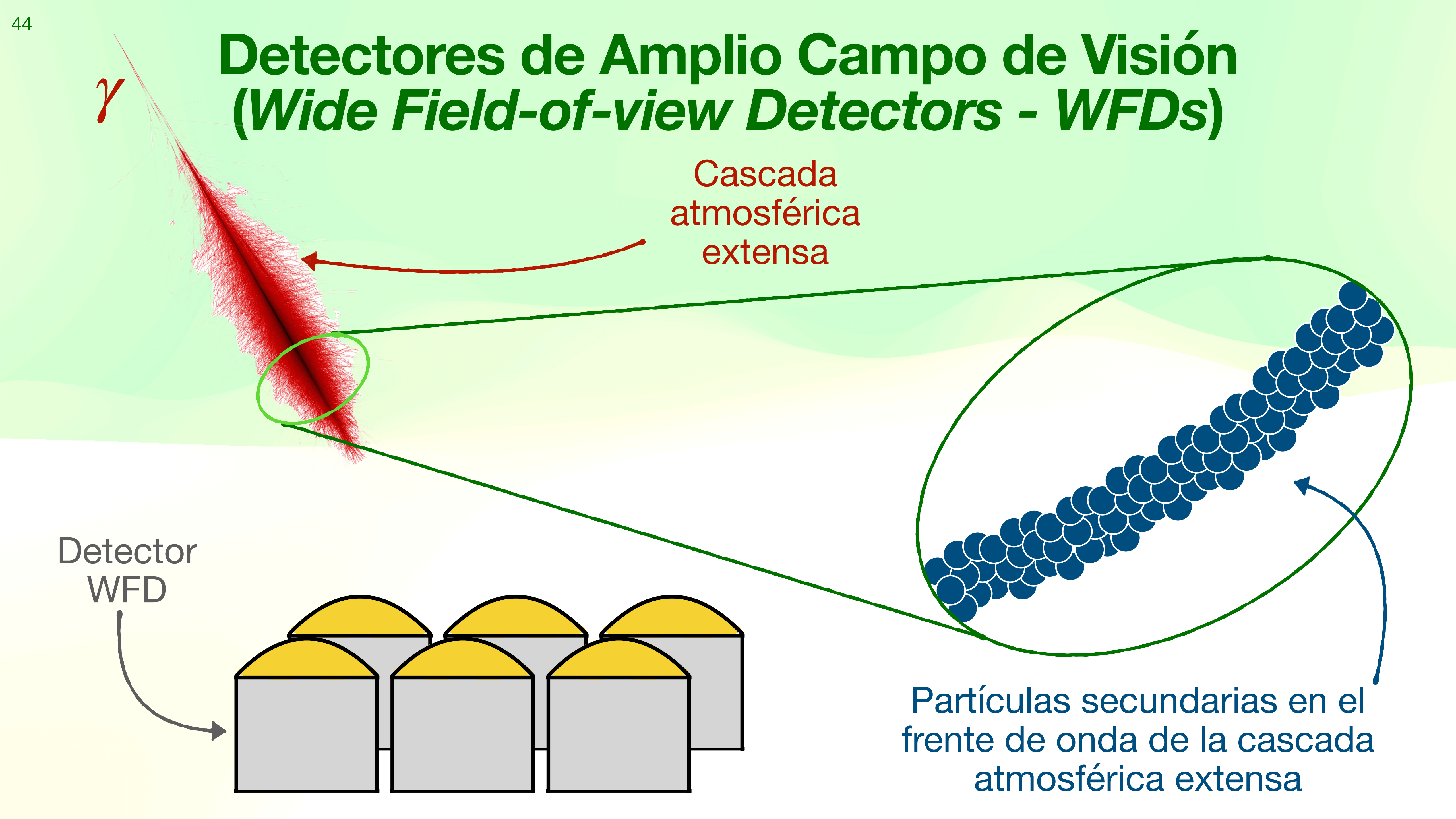
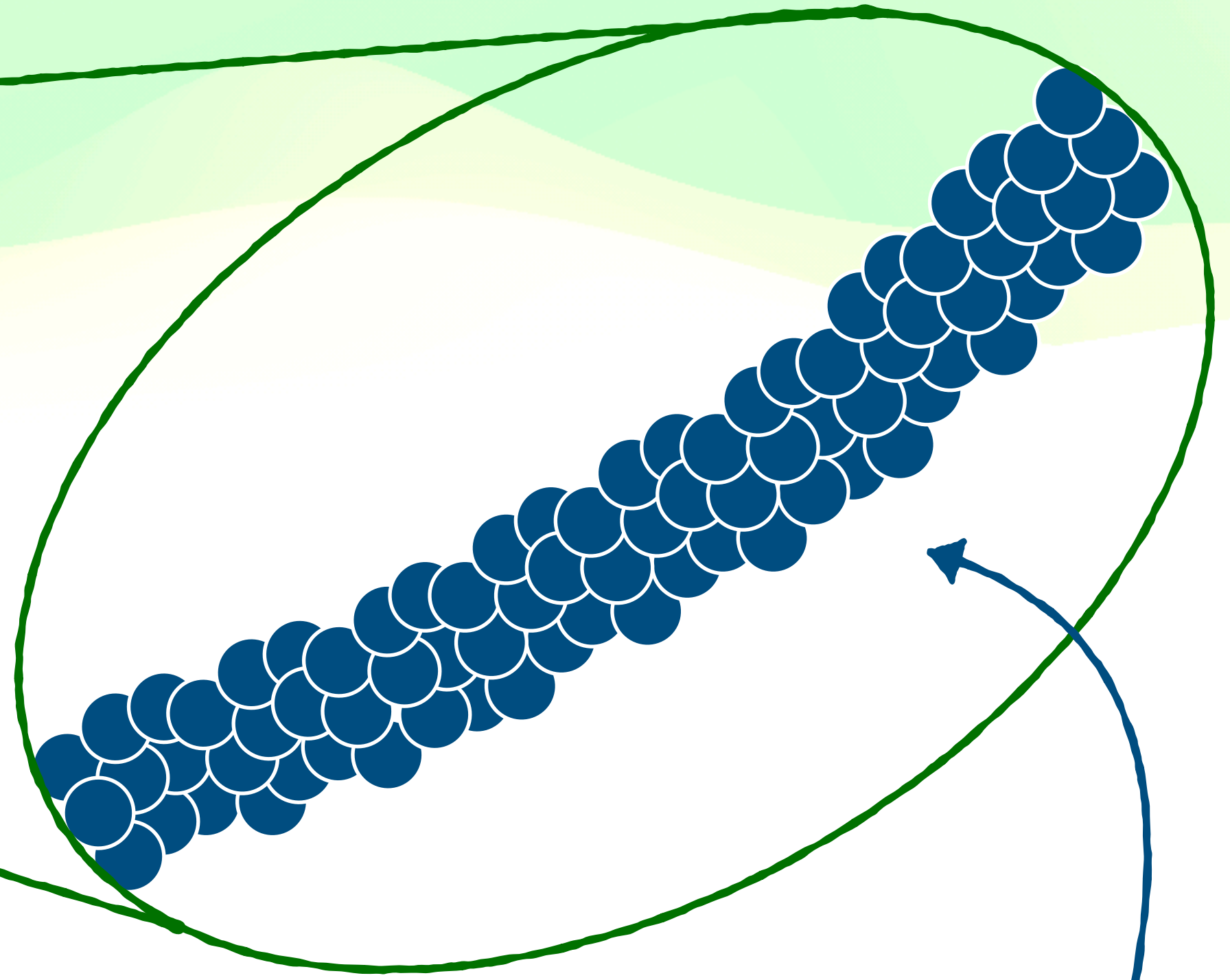
γ

Cascada
atmosférica
extensa

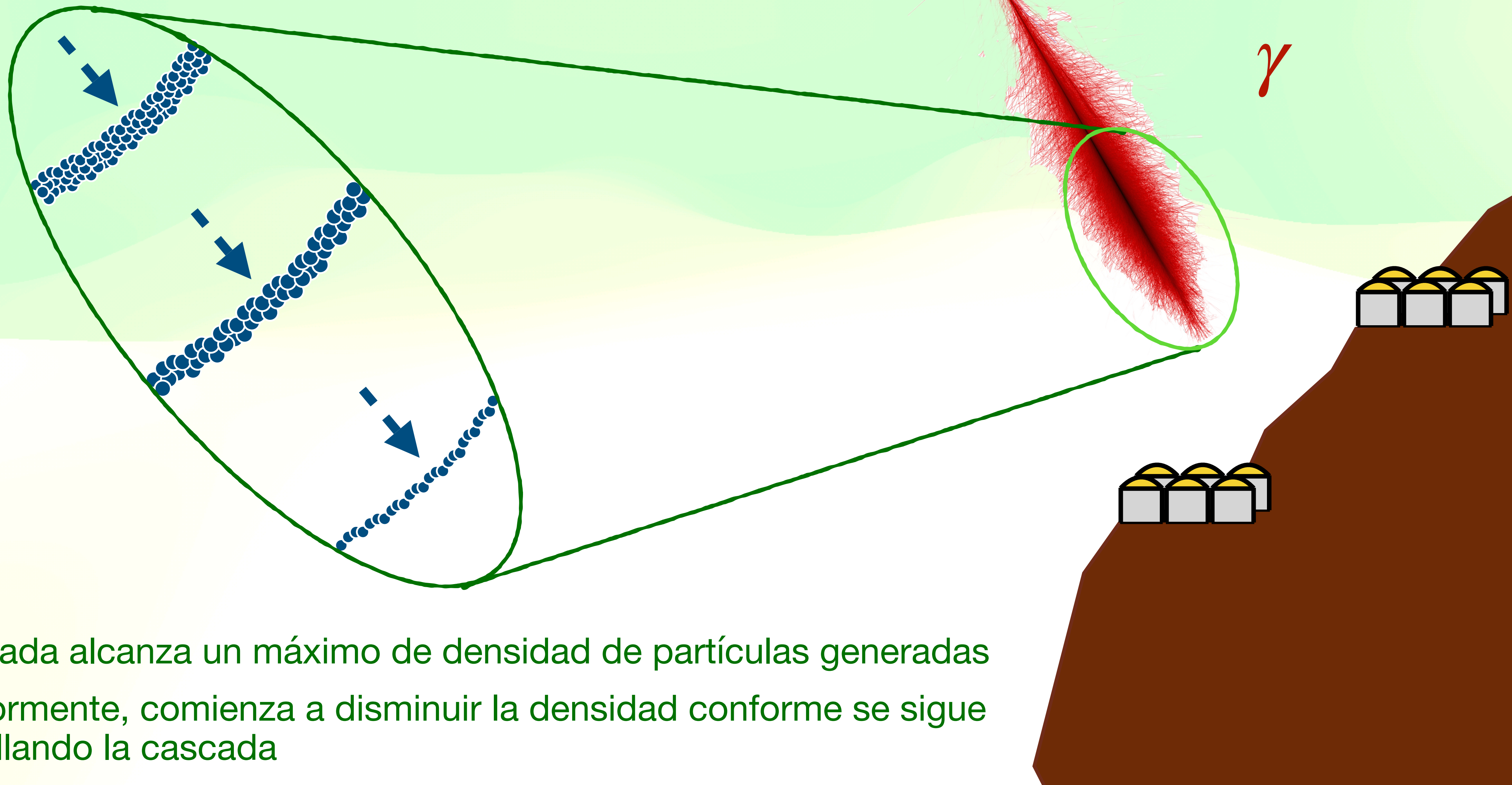
Detector
WFD



Partículas secundarias en el
frente de onda de la cascada
atmosférica extensa

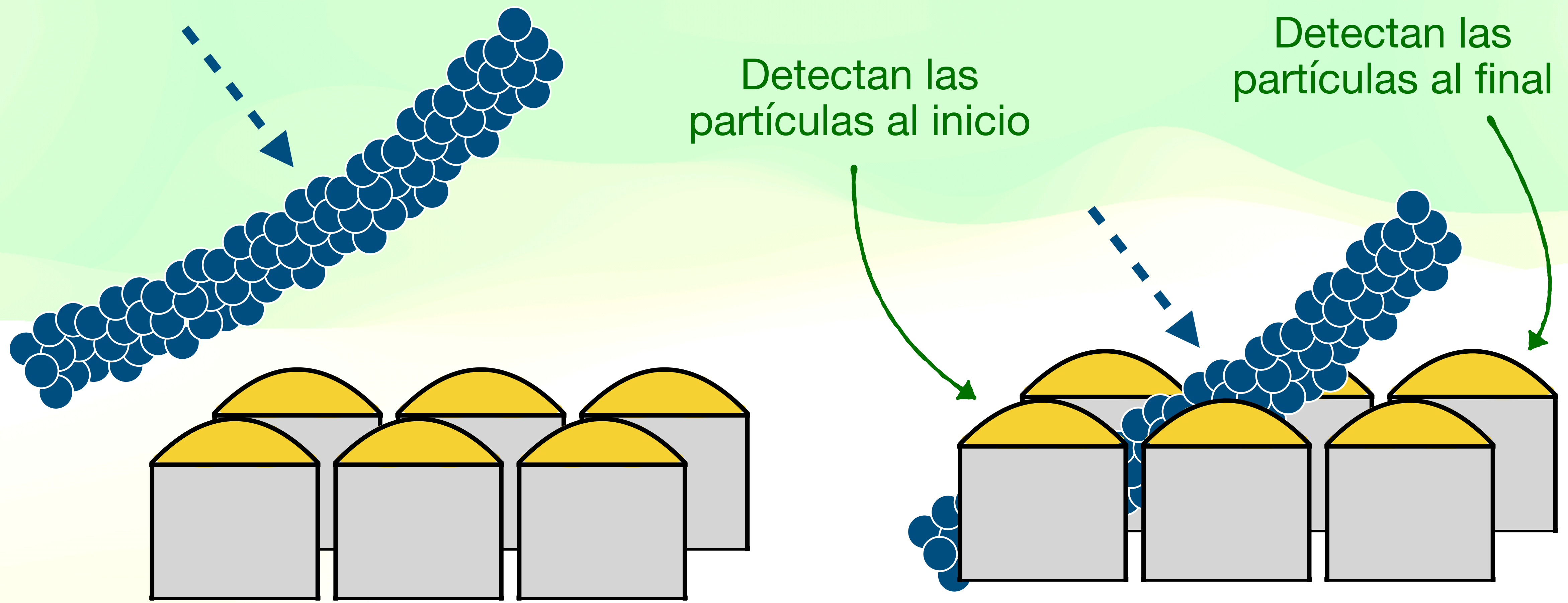


Detectores de Amplio Campo de Visión (*Wide Field-of-view Detectors - WFDs*)



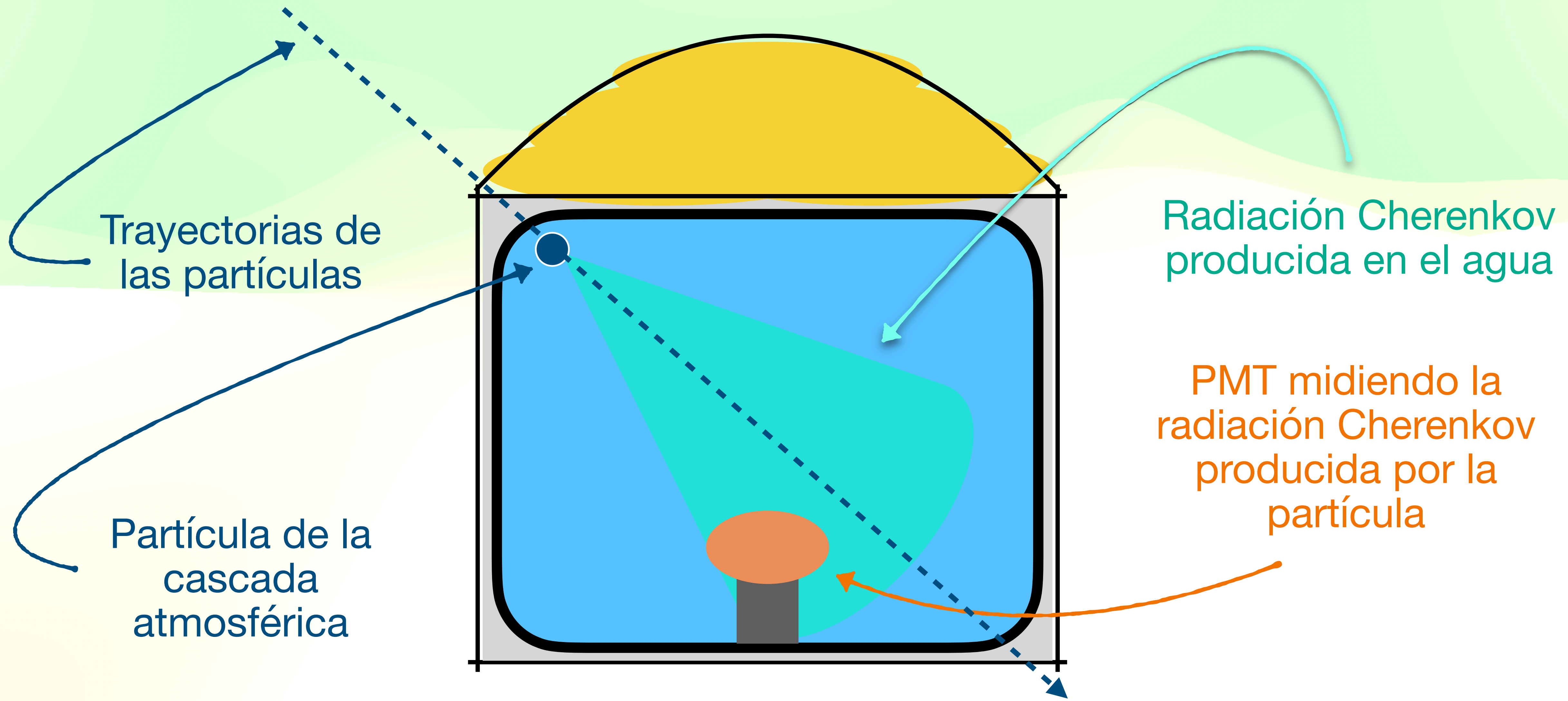
- ▶ La cascada alcanza un máximo de densidad de partículas generadas
- ▶ Posteriormente, comienza a disminuir la densidad conforme se sigue desarrollando la cascada

Detectores de Amplio Campo de Visión (*Wide Field-of-view Detectors - WFDs*)



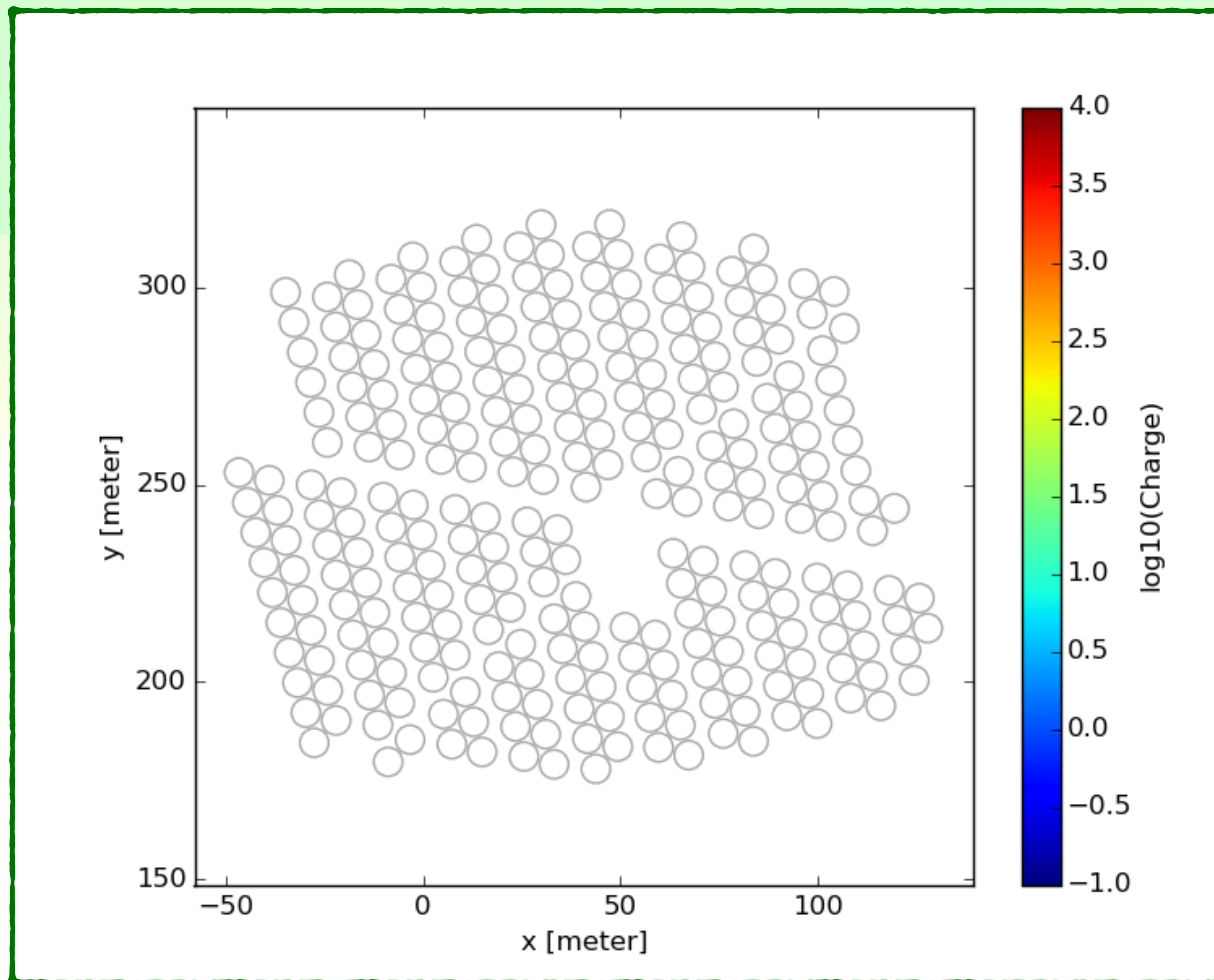
- ▶ Se miden los tiempos de llegada de las partículas conforme llegan al observatorio

Detectores de Amplio Campo de Visión (Wide Field-of-view Detectors - WFDs)



Detectores de Amplio Campo de Visión (*Wide Field-of-view Detectors - WFDs*)

- ▶ Los tiempos de llegada de las señales se miden
- ▶ Entre más rojo, mayor carga eléctrica asociada a la señal



Detectores de Amplio Campo de Visión (*Wide Field-of-view Detectors - WFDs*)

High-Altitude Water Cherenkov (HAWC) Observatory

- ▶ Localizado en **Puebla, México**
- ▶ Observatorio a **4,100 m s.n.m.**
- ▶ **300 detectores** de Cherenkov en agua
 - ▶ Contenedores de **7.3 m de diámetro y 4.5 m de alto**
 - ▶ **200,000 litros** de agua purificada en cada detector
 - ▶ **4 PMTs** dentro de cada detector (1,200 en total)
- ▶ Rango de energías: **300 GeV a 100 TeV**
- ▶ Ciclo de trabajo **>95%**



Colaboraciones Internacionales

Esfuerzo multinacional de pocas hasta cientos de personas entendiendo y analizando observaciones astronómicas

THE ASTROPHYSICAL JOURNAL, 936:126 (14pp), 2022 September 8 <https://doi.org/10.3847/1538-4357/ac880e>

© 2022. The Author(s). Published by the American Astronomical Society.

OPEN ACCESS

Constraints on the Very High Energy Gamma-Ray Emission from Short GRBs with HAWC

A. Albert¹, R. Alfaro², C. Alvarez³, J. C. Arteaga-Velázquez⁴, K. P. Arunbabu⁵, D. Avila Rojas², H. A. Ayala Solares⁶, R. Babu⁷, E. Belmont-Moreno², C. Brisbois⁷, K. S. Caballero-Mora³, T. Capistrán⁸, A. Carraminana⁹, S. Casanova¹⁰, O. Chaparro-Amaro¹¹, U. Cotti⁴, J. Cotzomi¹², S. Coutiño de León¹³, C. de León⁴, E. De la Fuente¹⁴, R. Diaz Hernandez⁹, S. Diciara¹⁵, B. L. Dingus¹, M. A. DuVernois¹³, M. Durocher¹, J. C. Díaz-Vélez¹⁴, K. Engel¹⁶, C. Espinoza², K. L. Fan¹⁶, N. Fraija⁸, A. Galván-Gómez⁸, J. A. García-González¹⁷, F. Garfias⁸, M. M. González⁸, J. A. Goodman¹⁶, J. P. Harding¹, S. Hernandez², B. Hona^{7,18}, D. Huang⁷, F. Hueyotl-Zahuantitla¹⁰, T. B. Humensky¹⁶, P. Hütemeyer⁷, A. Iriarte⁸, V. Joshi¹⁹, S. Kaufmann²⁰, A. Lara²¹, W. H. Lee⁸, H. León Vargas², J. T. Linnemann²², A. L. Longinotti⁸, G. Luis-Raya²⁰, K. Malone²³, S. S. Marinelli²², O. Martinez¹², J. Martínez-Castro¹¹, J. A. Matthews²⁴, P. Miranda-Romagnoli²⁵, J. A. Morales-Soto⁴, E. Moreno¹², M. Mostafá⁶, A. Nayerhoda¹⁰, L. Nellen²⁶, M. Newbold¹⁸, R. Noriega-Papaqui²⁵, A. Peisker²², Y. Pérez Araujo⁸, E. G. Pérez-Pérez²⁰, Z. Ren²⁴, C. D. Rho²⁷, D. Rosa-González⁹, M. Rosenberg⁶, J. R. Sacahui²⁸, H. Salazar¹², F. Salesa Greus^{10,29}, A. Sandoval², J. Serna-Franco², A. J. Smith¹⁶, R. W. Springer¹⁰, P. Surabali⁹, O. Tibolla²⁰, K. Tollefson²², I. Torres⁹, R. Torres-Escobedo¹⁴, R. Turner⁷, L. Villaseñor¹², X. Wang⁷, E. Willox¹⁶, A. Zepeda³⁰, and H. Zhou¹⁰

THE HAWC COLLABORATION

Received: 19 May 2023 | Accepted: 19 May 2023 | Published on: 6 June 2023

DOI: 10.1002/asna.20230084

Astronomische Nachrichten

REVIEW ARTICLE

A tool to understand emission mechanisms of blazars through their high-energy gamma-ray emission

Mabel Osorio¹ | Erick Rangel¹ | José Rodrigo Sacahui² | María Magdalena González¹

THE ASTROPHYSICAL JOURNAL LETTERS, 973:L34 (6pp), 2024 September 20 <https://doi.org/10.3847/2041-8213/ad772e>

© 2024. The Author(s). Published by the American Astronomical Society.

OPEN ACCESS

Observation of the Galactic Center PeVatron beyond 100 TeV with HAWC

A. Albert¹, R. Alfaro², C. Alvarez³, A. Andrés⁴, J. C. Arteaga-Velázquez⁵, D. Avila Rojas², H. A. Ayala Solares⁶, R. Babu⁷, E. Belmont-Moreno², A. Bernal⁴, K. S. Caballero-Mora³, T. Capistrán⁸, A. Carraminana⁹, S. Casanova⁹, U. Cotti⁵, J. Cotzomi¹⁰, S. Coutiño de León¹¹, E. De la Fuente¹², C. de León⁵, D. Depaoli¹³, N. Di Lalla¹⁴, R. Diaz Hernandez⁸, B. L. Dingus¹, M. A. DuVernois¹¹, J. C. Díaz-Vélez¹¹, K. Engel¹⁵, T. Erwin⁷, C. Espinoza², K. L. Fan¹⁵, K. Fang¹¹, N. Fraija⁴, S. Fraija⁴, J. A. García-González¹⁶, F. Garfias⁴, H. Goksu¹³, M. M. González⁴, J. A. Goodman¹⁵, S. Groetsch¹⁷, J. P. Harding¹, S. Hernández-Cadena¹⁸, I. Herzog⁷, J. Hinton¹³, D. Huang¹⁵, F. Hueyotl-Zahuantitla³, T. B. Humensky¹⁹, P. Hütemeyer¹⁷, A. Iriarte⁴, S. Kaufmann²⁰, D. Kieda²¹, A. Lara²², W. H. Lee⁴, J. Lee²³, H. León Vargas², J. T. Linnemann⁷, A. L. Longinotti⁴, G. Luis-Raya²⁰, K. Malone¹, O. Martinez¹⁰, J. Martínez-Castro²⁴, J. A. Matthews²⁵, P. Miranda-Romagnoli²⁶, J. A. Montes⁴, J. A. Morales-Soto⁵, E. Moreno¹⁰, M. Mostafá²⁷, M. Najafi¹⁷, L. Nellen²⁸, M. Newbold²¹, M. U. Nisa⁷, R. Noriega-Papaqui²⁶, L. Olivera-Nieto¹³, N. Omodei¹⁴, M. Osorio-Archila², Y. Pérez Araujo², E. G. Pérez-Pérez²⁰, C. D. Rho²⁹, D. Rosa-González⁸, E. Ruiz-Velasco¹³, H. Salazar¹⁰, D. Salazar-Gallegos⁷, A. Sandoval², M. Schneider¹⁵, G. Schwefer¹³, J. Serna-Franco², A. J. Smith¹⁵, Y. Son²³, R. W. Springer²¹, O. Tibolla²⁰, K. Tollefson⁷, I. Torres⁸, R. Torres-Escobedo¹⁰, R. Turner¹⁷, F. Ureña-Mena⁸, E. Varela¹⁰, X. Wang¹⁷, Z. Wang¹⁵, I. J. Watson²³, E. Willox¹⁵, H. Wu¹¹, S. Yu⁶, S. Yun-Cárcamo¹⁵, and H. Zhou¹⁸

THE ASTROPHYSICAL JOURNAL, 944:178 (11pp), 2023 February 20 <https://doi.org/10.3847/1538-4357/acb700>

© 2023. The Author(s). Published by the American Astronomical Society.

OPEN ACCESS

GRB 221009A: A Light Dark Matter Burst or an Extremely Bright Inverse Compton Component?

M. M. González¹, D. Avila Rojas², A. Pratts², S. Hernández-Cadena², N. Fraija¹, R. Alfaro², Y. Pérez Araujo¹, and J. A. Montes¹

Colaboraciones Internacionales

THE ASTROPHYSICAL JOURNAL, 936:126 (14pp), 2022 September 8

© 2022. The Author(s). Published by the American Astronomical Society.

OPEN ACCESS

<https://doi.org/10.3847/1538-4357/ac880e>



CrossMark

Constraints on the Very High Energy Gamma-Ray Emission from Short GRBs with HAWC

A. Albert¹, R. Alfaro², C. Alvarez³, J. C. Arteaga-Velázquez⁴, K. P. Arunbabu⁵, D. Avila Rojas², H. A. Ayala Solares⁶, R. Babu⁷, E. Belmont-Moreno², C. Brisbois⁷, K. S. Caballero-Mora³, T. Capistrán⁸, A. Carraminana⁹, S. Casanova¹⁰, O. Chaparro-Amaro¹¹, U. Cotti⁴, J. Cotzomi¹², S. Coutiño de León¹³, C. de León⁴, E. De la Fuente¹⁴, R. Diaz Hernandez⁹, S. Diciara¹⁵, B. L. Dingus¹, M. A. DuVernois¹³, M. Durocher¹, J. C. Díaz-Vélez¹⁴, K. Engel¹⁶, C. Espinoza², K. L. Fan¹⁶, N. Fraija⁸, A. Galván-Gómez⁸, J. A. García-González¹⁷, F. Garfias⁸, M. M. González⁸, J. A. Goodman¹⁶, J. P. Harding¹, S. Hernandez², B. Hona^{7,18}, D. Huang⁷, F. Hueyotl-Zahuantitla¹⁰, T. B. Humensky¹⁶, P. Hütemeyer⁷, A. Iriarte⁸, V. Joshi¹⁹, S. Kaufmann²⁰, A. Lara¹⁰, W. H. Lee⁸, H. León Vargas², J. T. Linnemann²², A. L. Longinotti¹⁰, G. Luis-Raya²⁰, K. Malone²³, S. S. Marinelli²², O. Martinez¹², J. Martínez-Castro¹¹, J. A. Matthews²⁴, P. Miranda-Romagnoli²⁵, J. A. Morales-Soto⁴, E. Moreno¹², M. Mostafá⁶, A. Nayerhoda¹⁰, L. Nellen²⁶, M. Newbold¹⁸, R. Noriega-Papaqui²⁵, A. Peisker²², Y. Pérez Araujo⁸, E. G. Pérez-Pérez²⁰, Z. Ren²⁴, C. D. Rho²⁷, D. Rosa-González⁹, M. Rosenberg⁶, J. R. Sacahui²⁸, H. Salazar¹², F. Salesa Greus^{10,29}, A. Sandoval², J. Serna-Franco², A. J. Smith¹⁶, R. W. Springer¹⁰, P. Surabali⁹, O. Tibolla²⁰, K. Tollefson²², I. Torres⁹, R. Torres-Escobedo¹⁴, R. Turner⁷, L. Villaseñor¹², X. Wang⁷, E. Wilcox¹⁶, A. Zepeda³⁰, and H. Zhou¹⁰

THE HAWC COLLABORATION

Esfuerzo multinacional de pocas hasta cientos de personas entendiendo y analizando observaciones astronómicas

► Observatorio HAWC

- 14 institutos de México
- 14 institutos de E.U.A.
- 1 instituto de Alemania
- 1 instituto de Polonia



THE ASTROPHYSICAL JOURNAL LETTERS, 973:L34 (6pp), 2024 September 20

© 2024. The Author(s). Published by the American Astronomical Society.

OPEN ACCESS

<https://doi.org/10.3847/2041-8213/ad772e>



CrossMark

Observation of the Galactic Center PeVatron beyond 100 TeV with HAWC

A. Albert¹, R. Alfaro², C. Alvarez³, A. Andrés⁴, J. C. Arteaga-Velázquez⁵, D. Avila Rojas², H. A. Ayala Solares⁶, R. Babu⁷, E. Belmont-Moreno², A. Bernal⁴, K. S. Caballero-Mora³, T. Capistrán⁸, A. Carraminana⁹, S. Casanova¹⁰, U. Cotti⁵, J. Cotzomi¹⁰, S. Coutiño de León¹¹, E. De la Fuente¹², C. de León⁴, D. Depaoli¹³, N. Di Lalla¹⁴, R. Diaz Hernandez⁸, B. L. Dingus¹, M. A. DuVernois¹¹, J. C. Díaz-Vélez¹¹, K. Engel¹⁵, T. Erein⁷, C. Espinoza², K. L. Fan¹⁵, K. Fang¹¹, N. Fraija⁴, S. Fraija⁴, J. A. García-González¹⁶, F. Garfias⁴, H. Goksu¹³, M. M. González⁴, J. A. Goodman¹⁵, S. Groetsch¹⁷, J. P. Harding¹, S. Hernández-Cadena¹⁸, I. Herzog⁷, J. Hinton¹³, D. Huang¹⁵, F. Hueyotl-Zahuantitla³, T. B. Humensky¹⁹, P. Hütemeyer¹⁷, A. Iriarte⁴, S. Kaufmann²⁰, D. Kieda²¹, A. Lara²², W. H. Lee⁴, J. Lee²³, H. León Vargas², J. T. Linnemann⁷, A. L. Longinotti⁴, G. Luis-Raya²⁰, K. Malone¹, O. Martinez¹⁰, J. Martínez-Castro²⁴, J. A. Matthews²⁵, P. Miranda-Romagnoli²⁶, J. A. Montes⁴, J. A. Morales-Soto⁵, E. Moreno¹⁰, M. Mostafá²⁷, M. Najafi¹⁷, L. Nellen²⁸, M. Newbold²¹, M. U. Nisa⁷, R. Noriega-Papaqui²⁶, L. Olivera-Nieto¹³, N. Omodei¹⁴, M. Osorio-Archila², Y. Pérez Araujo², E. G. Pérez-Pérez²⁰, C. D. Rho²⁹, D. Rosa-González⁸, E. Ruiz-Velasco¹³, H. Salazar¹⁰, D. Salazar-Gallegos⁷, A. Sandoval², M. Schneider¹⁵, G. Schwefer¹³, J. Serna-Franco², A. J. Smith¹⁵, Y. Son²³, R. W. Springer²¹, O. Tibolla²⁰, K. Tollefson⁷, I. Torres⁸, R. Torres-Escobedo¹⁰, R. Turner¹⁴, F. Ureña-Mena⁸, E. Varela¹⁰, X. Wang¹⁷, Z. Wang¹⁵, I. J. Watson²³, E. Wilcox¹⁵, H. Wu¹¹, S. Yu⁶, S. Yun-Cárcamo¹⁵, and H. Zhou¹⁸