



Universidad Nacional de Río Negro

Int Partículas, Astrofísica & Cosmología - 2020

- **Unidad** 01 – El modelo estándar
- **Clase** U01 C01 - 1/16
- **Fecha** 05 Ago 2020
- **Cont** Dinámica relativista
- **Cátedra** Asorey
- **Web** <https://gitlab.com/asoreyh/unrn-ipac/>



Presentación





Colegas contando algunas experiencias

- Hernán Asorey, <hasorey@unrn.edu.ar>, Físico
 - Centro Atómico Bariloche e Instituto Balseiro:
Jefe del Departamento Física Médica - CAB
líneas: Aplicaciones de Detectores de Partículas: Meteorología Espacial, Muongafía de Volcanes, Física Médica
 - UNRN
 - Docente del Profesorado Superior en Física desde 2009.
 - Profesor Asociado:
 - Física IIIB (Termodinámica)
 - Física IVB (Astrofísica, Cosmología y Partículas)
 - Antes: Física 1A, Física 1B, Física 2B, Física Moderna A
 - UBA, Instituto Balseiro, UIS (Colombia), UNSAM



Objetivos y metodología

- **Objetivos**

- Adquirir una perspectiva del estado actual de la Física de Partículas, la Astrofísica y la Cosmología, a un nivel introductorio y que produzca las herramientas para su implementación en el aula de escuelas medias.

- **Metodología (orientada al trabajo grupal)**

- Clases interactivas, virtuales (y presenciales)
- Trabajos en clase y en casa
- Son fundamentales y valorados:
 - sus aportes en clase; y
 - la profundización curricular individual o grupal fuera del horario de clase



Fundamentación y Propósito

- **Fundamentación**

Representa un intento por exponer aspectos de la física que normalmente no se presentan en cursos de cuarto año de profesorados en física, con el objeto de brindar a los futuros docentes conocimientos y herramientas que les permitan abordar en la escuela media, temas actuales. La física de este curso incluye tópicos de la física contemporánea con contenidos que desde que se tiene conocimiento fascinan e interesan al hombre como el del origen del universo, el funcionamiento y el destino del Universo. Se introducen contenidos de física moderna como el modelo estándar de las partículas fundamentales, la radiactividad, la relatividad especial y general y el modelo estándar cosmológico

- **Propósitos de la asignatura**

Construir juntos con los estudiantes los modelos que rigen al universo, y su importancia, y los efectos indirectos que pueden observarse en el mundo cotidiano. Que los estudiantes comprendan como la física abarca desde los sucesos que rigen las interacciones fundamentales hasta la estructura del Universo a las escalas más grandes, produciendo herramientas para facilitar la implementación en el aula de escuelas medias.



Puntos de contacto

- **16 encuentros semanales, desde el 03/Ago hasta el 18/Nov**
 - **Google Meet:** Miércoles 19 a 23, disponibles en YouTube
 - **Trabajo en casa:** 3 horas semanales
 - **Google Classroom**
 - **Campus Bimodal UNRN**
- **Bibliografía**
 - **Depende de la unidad, ver en classroom y aula bimodal**
 - **Apuntes de clase**
 - **Wikipedia**



Formas de Aprobación...

- **Evaluación continua (70%)**

- Participación activa en los encuentros semanales (P)
- Auto-evaluación conceptual al finalizar cada semana en classroom (P)
- Entregas de trabajos mensuales en fechas predeterminadas (P)
- Charla presentando un tema a elección (P)

- **Final integrador (30%)**

- **Promoción (P), cumpliendo todas estas condiciones:**

- Cumplir con el 100% de las entregas solicitadas en tiempo y forma
- Completar y entregar todas las auto-evaluaciones
- Nota Evaluación Continua >7.9
- Dispone de un (y sólo un) “comodín” para las entregas



Autoevaluación en línea

- Al final de cada semana subiré un cuestionario en línea para ser completado en forma individual
- **Revisión de los conceptos claves de cada clase**
- Es un formulario de **autoevaluación para que cada uno analice su comprensión de temas claves**
- Plazo para completarlo: una semana
- No tienen nota pero es importante que sean completados, forman parte de la evaluación continua
- Habrá 15 autoevaluaciones a lo largo del curso



Contenidos mínimos

- **Los contenidos mínimos según su plan:**

Partículas fundamentales y sus interacciones: leptones, hadrones y partículas mensajeras.
Antipartículas. El modelo estándar. Aceleradores de partículas. Estrellas y galaxias. Evolución de las estrellas en nacimiento y muerte de las estrellas.
Relatividad general: gravedad y la curvatura del espacio. El universo en expansión. El Big-Bang y el fondo cósmico de microondas. El modelo estándar cosmológico. Los primeros tiempos del Universo

Contenidos: un viaje en el tiempo y el espacio

HOW DID OUR UNIVERSE BEGIN?

Inflation
In less than a nanosecond, a massive energy field inflates space by a factor of 10²⁹, filling it with a soup of subatomic particles called quarks.

Age: 10⁻³⁴ seconds
Size: Infinitesimal to golf ball

Early building blocks
The universe expands, cools. Quarks clump into protons and neutrons; then, surrounding blocks of atomic nuclei. Perhaps dark matter forms.

Age: .01 milliseconds
Size: 1-billionth present size

First nuclei
As the universe continues to cool, the lightest nuclei of hydrogen will form. A thick fog of particles blocks all light.

Age: .01 to 200 seconds
Size: 1-billionth present size

First atoms, first light
As electrons begin orbiting nuclei, creating atoms, the glow from their inflection points arise. This light is as far back as our instruments can see.

Age: 380,000 years
Size: .0009 present size

The "dark ages"
For 300 million years this continues. Light is the only light. Clumps of matter that will become galaxies glow brightest.

Age: 380,000 to 300 million years
Size: .0009 to 0.1 present size

Gravity wins: first stars
Dense gas clouds collapse under their own gravity and heat of dark matter, eventually forming galaxies and stars. Nuclear fusion lights up the stars.

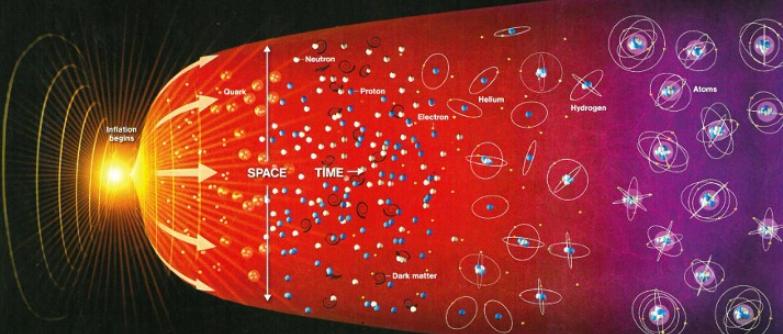
Age: 300 million years
Size: 0.1 present size

Antigravity wins
After being slowed for billions of years, gravity finally, cosmic expansion accelerates again. The culprit: dark energy. Its nature: unclear.

Age: 10 billion years
Size: .77 present size

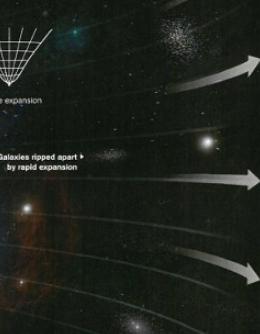
Today
The universe continues to expand, becoming ever less dense. As a result, fewer new stars and galaxies are forming.

Age: 13.8 billion years
Size: Present size



HOW WILL IT END?

Which will win in the end, gravity or antigravity? Is the density of matter enough for gravity to halt or even reverse cosmic expansion, leading to a big crunch? It seems unlikely—especially given the power of dark energy, a kind of antigravity. Perhaps the acceleration in expansion caused by dark energy will trigger a big rip that shreds everything, from galaxies to atoms. If not, the universe may expand for hundreds of billions of years, long after all stars have died.

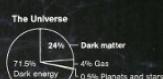


COSMIC QUESTIONS

In the 20th century the universe became a story—a scientific one. It had always been seen as static and eternal. Then astronomers observed other galaxies flying away from ours, and Einstein's general relativity theory implied space itself was expanding—which meant the universe had once been denser. What had seemed eternal now had a beginning and an end. But what beginning? What end? Those questions are still open.

WHAT IS OUR UNIVERSE MADE OF?

Stars, dust, and gas—the stuff we can discern—make up less than 5 percent of the universe. Their gravity can't account for how galaxies hold together. Scientists figure about 24 percent of the universe is a mysterious dark matter—perhaps exotic particles formed right after inflation. The rest is dark energy, an unknown energy field or property of space that counters gravity, providing an explanation for observations that the expansion of space is accelerating.



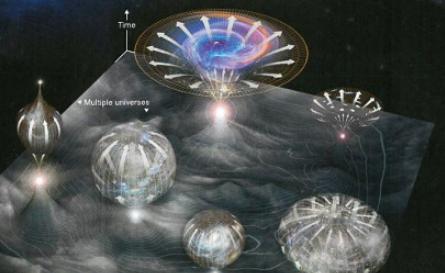
WHAT IS THE SHAPE OF OUR UNIVERSE?

Einstein discovered that a star's gravity curves space around it. But is the whole universe curved? Might space close up on itself like a sphere or curve the other way, opening out like a saddle? By studying cosmic background radiation, scientists have found that the universe is poised between the two: just dense enough with just enough gravity to be almost perfectly flat, at least the part we can see. What lies beyond we can't know.



DO WE LIVE IN A MULTIVERSE?

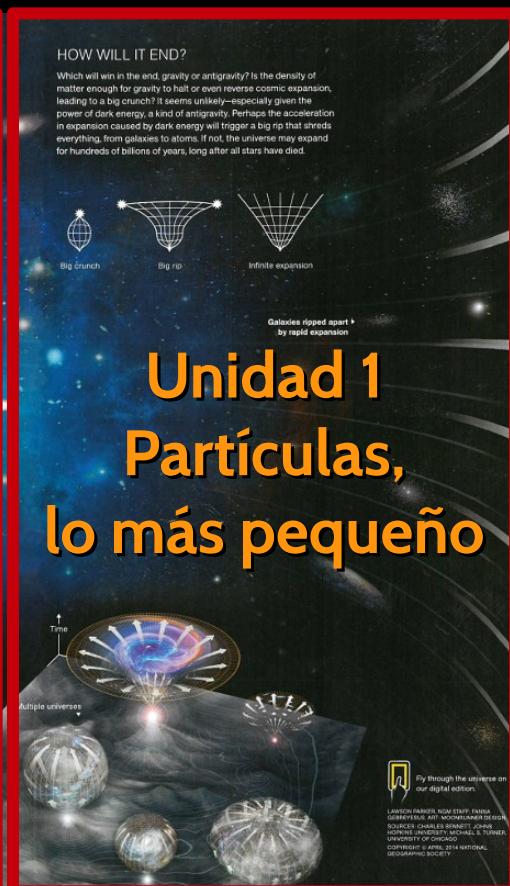
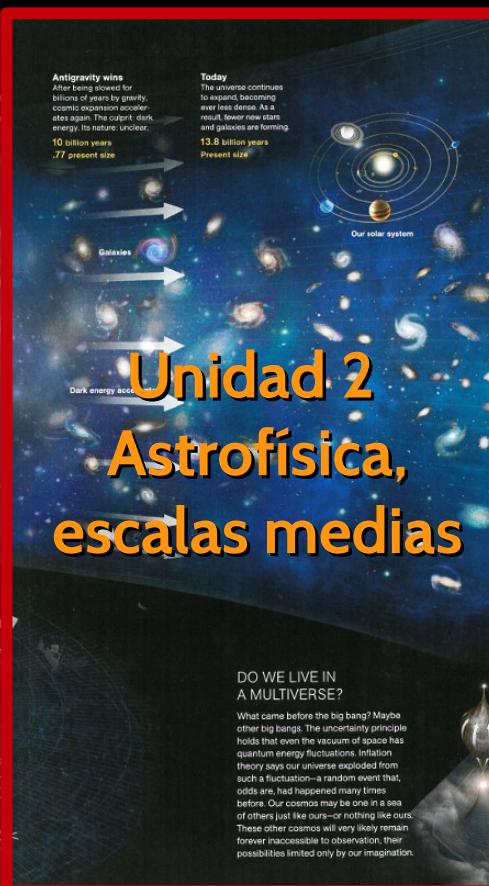
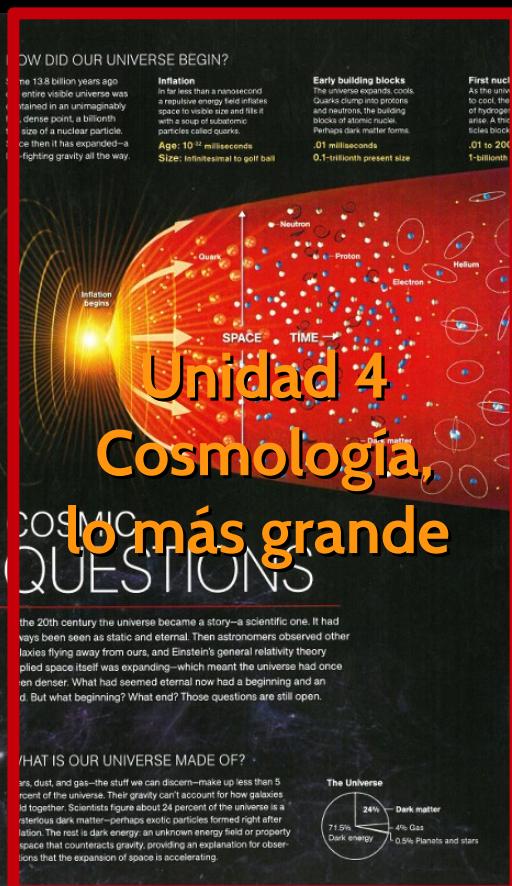
What came before the big bang? Maybe other big bangs. The uncertainty principle holds that even the vacuum of space has density fluctuations. Inflation theory says our universe exploded from such a fluctuation—a random event that, odds are, had happened many times before. Our cosmos may be one in a sea of others just like ours—or nothing like ours. These other cosmos will very likely remain forever inaccessible to observation, their possibilities limited only by our imagination.



By **through the universe** on
our digital edition

LAWRENCE FRAZER, NICK STAFF, FABRIZIO GEMMELLARO, ART MONTAGNA DESIGN:
CHARLES BENNETT, JOHN HARRIS, ANDREW HARRIS, JEFFREY TANNER,
UNIVERSITY OF CHICAGO
CONCEPT: 2014 NATIONAL GEOGRAPHIC SOCIETY

Contenidos: un viaje en el tiempo y el espacio



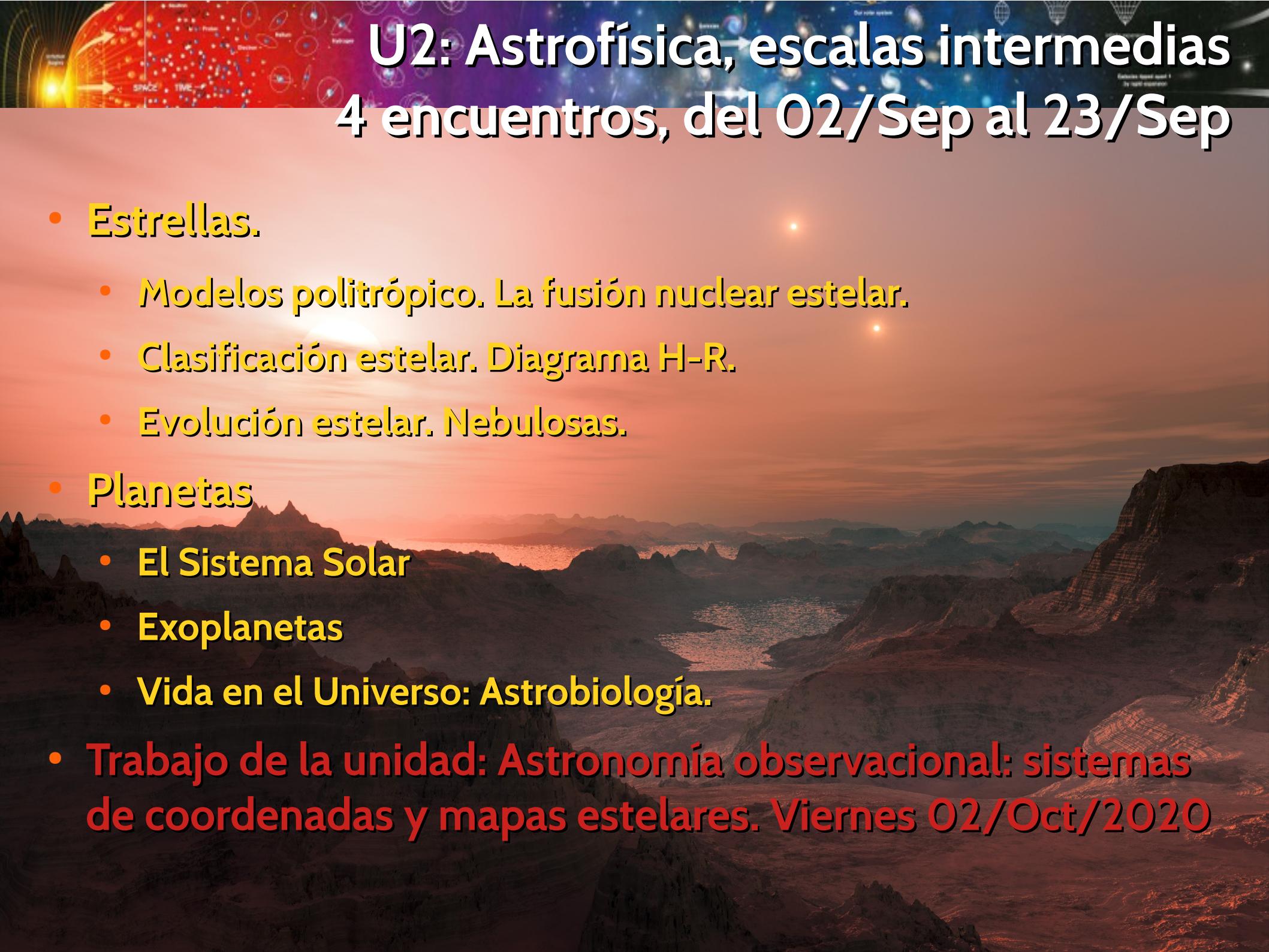
U1:Partículas, lo más pequeño

4 encuentros, del 05/Ago al 26/Ago

- Dinámica Relativista.
- Física de partículas
 - Ley de Planck.
 - Partículas fundamentales: leptones, hadrones, bosones mensajeros
- El modelo estándar
 - Interacciones fundamentales
 - Simetrías y leyes de conservación
- Trabajo de la unidad: tópicos de física de partículas.

Entrega Viernes 04/Sep/2020





U2: Astrofísica, escalas intermedias

4 encuentros, del 02/Sep al 23/Sep

- **Estrellas.**
 - **Modelos politrópico. La fusión nuclear estelar.**
 - **Clasificación estelar. Diagrama H-R.**
 - **Evolución estelar. Nebulosas.**
- **Planetas**
 - **El Sistema Solar**
 - **Exoplanetas**
 - **Vida en el Universo: Astrobiología.**
- **Trabajo de la unidad: Astronomía observacional: sistemas de coordenadas y mapas estelares. Viernes 02/Oct/2020**



U3: Astrofísica, escalas grandes

4 encuentros, del 30/Sep al 21/Oct

- Relatividad General.
 - Introducción y conceptos básicos.
 - Solución de Schwarzschild.
 - Objetos compactos: enanas blancas, estrellas de neutrones y agujeros negros.
- Formación de estructuras
 - Galaxias: Modelos y formación. GalaxyZoo.
 - Galaxias de Núcleos activos. Clasificación.
 - Formación de estructuras. Corrimiento al rojo y el universo en expansión.
- Trabajo de la unidad: Midiendo distancias en el Universo.
Entrega Viernes 30/Oct/2020



U4: Cosmología, las escalas más grandes

4 encuentros, del 28/Oct al 18/Nov

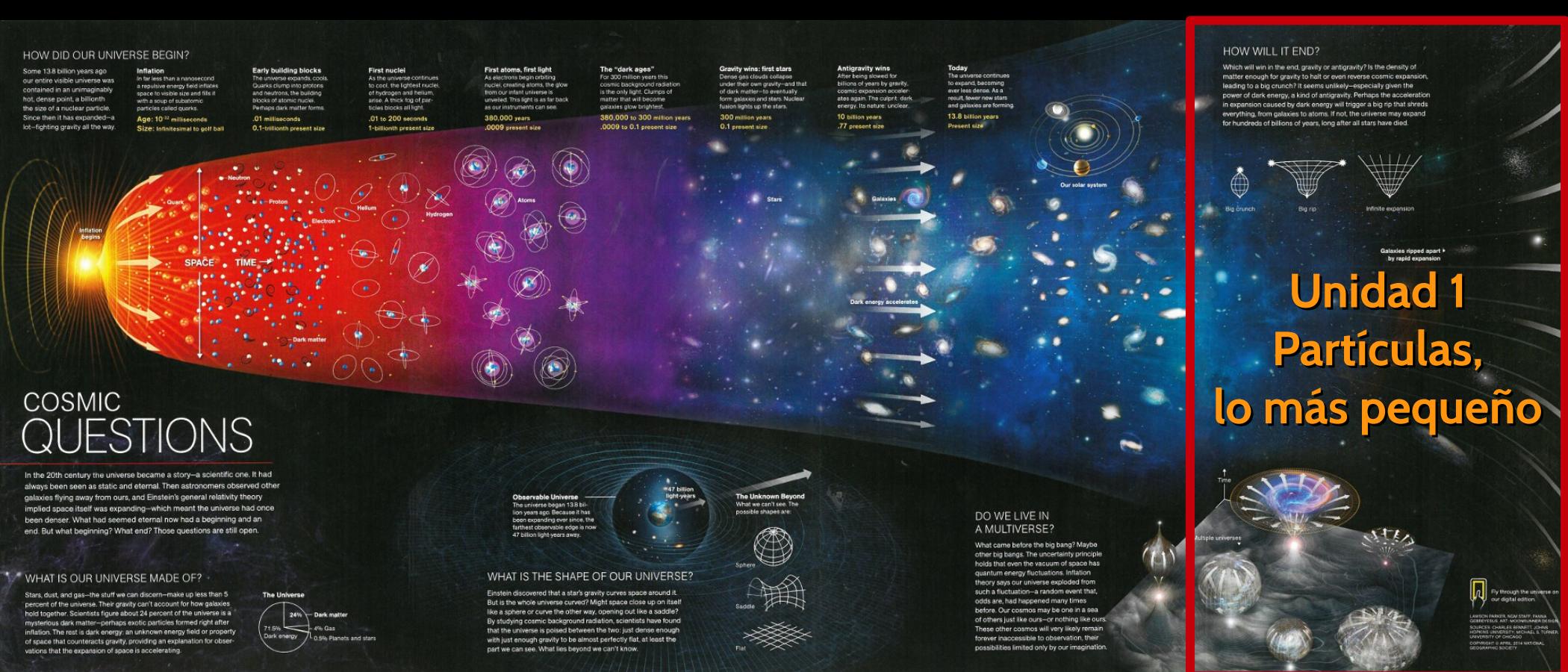
- Modelo cosmológico estándar
 - El fondo de microondas.
 - Modelo de Friedman-Lemaître-Robertson-Walker.
 - El Big Bang. Modelo de Alpher, Bethe & Gamow.
 - Modelo LCDM.
- Historia térmica del universo.
 - Épocas térmicas
 - Primeros segundos del universo
 - Evolución futura del universo.
 - ¿El fin...?
- Trabajo de la unidad: Tema a elección. Charla 18/Nov/2020



¿Qué esperan de este curso en relación a...

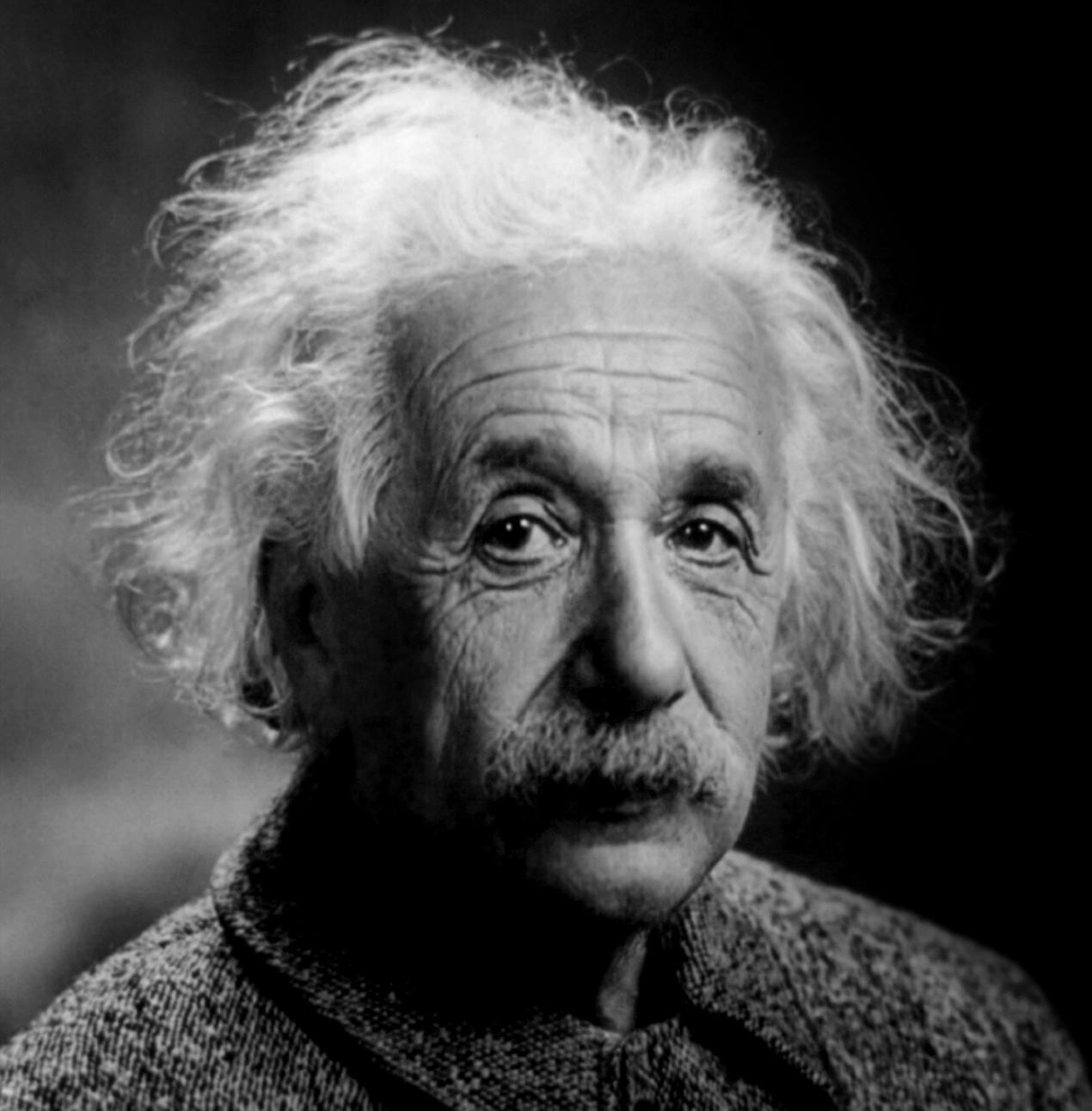
- ... sus intereses particulares?
- ... los conceptos físicos y temas a tratar?
- ... su rol como docentes?
- ¿Hay algún tema o temas que les interesaría ver o profundizar?

Contenidos: un viaje en el tiempo y el espacio





El genial Albert Einstein



Albert Einstein



Einstein postula

- **El principio de la relatividad:**

Las leyes que gobiernan los cambios en los estados de los sistemas físicos son iguales para todos los observadores inerciales

- **El principio de la invarianza de la velocidad de la luz**

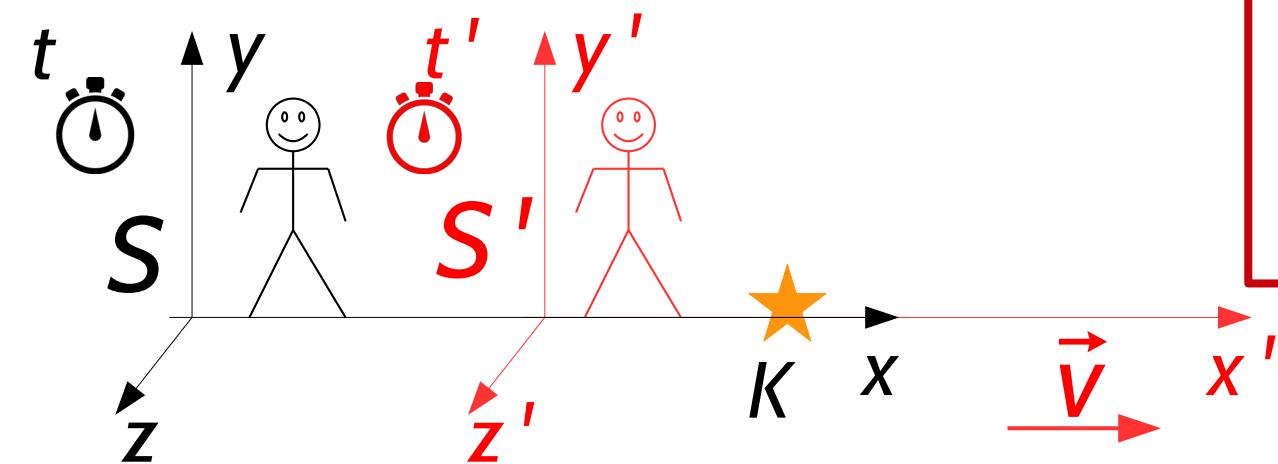
La luz se propaga en el vacío siempre con la misma velocidad, sin importar la velocidad de la fuente emisora de luz

La medición del tiempo y del espacio dependen del observador

Transformaciones de Lorentz

- Las ecuaciones que transforman dos marcos de referencia, y que verifican ambos postulados, son

Recordar que estas transformaciones son válidas para un sistema S' que se mueve con velocidad v en la dirección x , entonces $K=(t,x,y,z)$ y $K'=(t',x',y,z)$, ya que $z'=z$ e $y'=y$

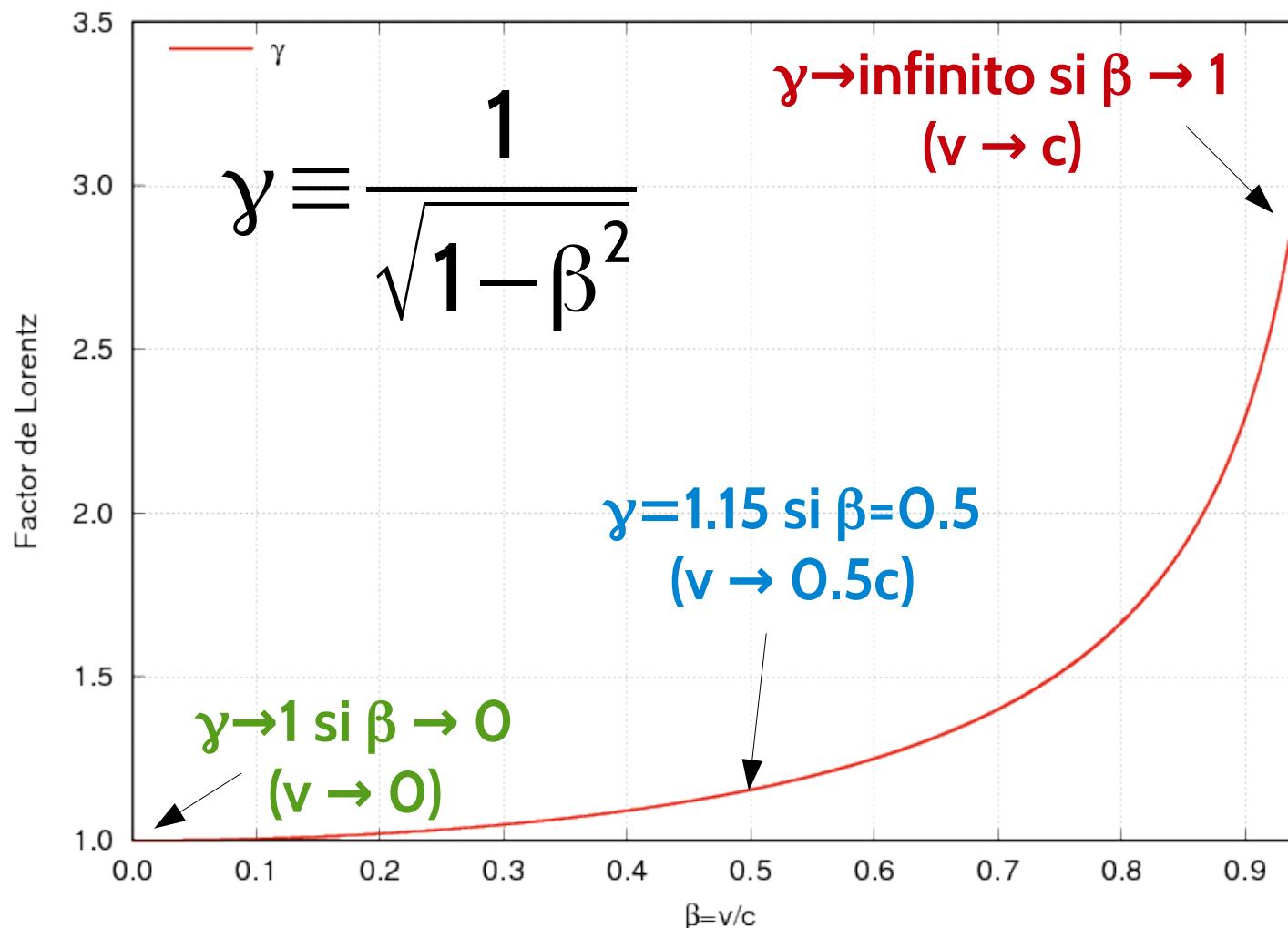


$$t' = \gamma \left(t - \frac{v}{c^2} x \right)$$
$$x' = \gamma \left(x - vt \right)$$
$$y' = y$$
$$z' = z$$

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

Factor de Lorentz

- Estudiemos la función gamma, ecuación (10)





Dilatación temporal y Contracción espacial

- El **lapso de tiempo entre dos eventos no es invariante de un observador a otro en distintos marcos de referencia**

$$\Delta t' = \gamma \Delta t \text{ para eventos } \Delta x = 0$$

- La **distancia espacial entre dos eventos no es invariante de un observador a otro en distintos marcos de referencia**

$$\Delta x' = \frac{\Delta x}{\gamma} \text{ para eventos } \Delta t' = 0$$



Tiempo propio

- Dado que cada marco de referencia tiene su propio tiempo, **podemos definir un marco de referencia adherido a un objeto en movimiento.**
- **El tiempo de ese marco es el tiempo que “percibe” un observador que se mueve junto con el objeto.**
Llamaremos a este marco **“comóvil”**.
- El tiempo del marco comóvil es el tiempo propio: es independiente de las coordenadas.

$$ds^2 = c^2 dt^2 - dr^2 = ds'^2 = c d\tau^2 \quad \text{Tiempo propio}$$

$$\Rightarrow c^2 dt^2 - dr^2 = c^2 d\tau^2 \quad dt = \gamma d\tau$$



Hasta aquí...

- Los postulados de Einstein implican cambios profundos en la concepción de la Naturaleza.
 - Estos afectan nuestra percepción de distancia y lapso temporal, de espacio y tiempo.
- Las transformaciones de Lorentz indican como transforman las leyes de la física entre dos marcos de referencia inerciales.
 - Son las transformaciones válidas entre marcos de referencia.
- La mecánica Newtoniana es una aproximación válida para velocidades bajas respecto a la velocidad de la luz.
 - ¿Cómo puede ser generalizada?



Richard Feynman dijo:

- “*For those who want to learn just enough about it so they can solve problems, that is all there is to the [special] theory of relativity – it just changes Newton’s laws by introducing a correction factor to the mass*”
- Luego:
- donde

$$\vec{F} = \frac{d(m\vec{v})}{dt}$$

$$m \rightarrow m\gamma = \frac{m}{\sqrt{1-\beta^2}}$$



La relatividad es fácil

Find & Replace X

Find: ▼

Match case Whole words only

Replace: ▼

Find Previous **Find Next** **Replace** **Replace All** ▼

Other options

Current selection only Replace backwards

Similarity search Similarities...

Diacritic-sensitive

Help **Close**

La conservación de p es un principio básico

- Alberto lo dijo: al derivar, el tiempo depende del marco de referencia:

Clásico: $\vec{p} = \frac{d}{dt}(m\vec{r})$ y $\vec{p}' = \frac{d}{dt}(m\vec{r}')$

Correcto: $\vec{p} = \frac{d}{dt}(m\vec{r})$ y $\vec{p}' = \frac{d}{dt'}(m\vec{r}')$

- Y como todos los marcos son equivalentes, ¡podemos usar el marco comovil!

dado que: $\Delta\tau = \gamma \Delta t$

$$\frac{dr}{d\tau} = \gamma \frac{d\vec{r}}{dt}$$

Recordar a Feynmann:

$$\vec{p} = m\gamma \frac{d\vec{r}}{dt} = m(\gamma\vec{v})$$

Cant. de movimiento
relativista

$$\vec{p} = \frac{d}{d\tau} m(\tau) \vec{r}(\tau)$$



Una nueva magnitud conservada

- Una nueva magnitud conservada surge naturalmente:

$$E = \gamma m c^2$$

Energía total

- A bajas energías, si $v \ll c$, obtenemos la visión clásica:

$$E = \gamma m c^2 \approx mc^2 + \frac{1}{2}mv^2$$

Energía cinética clásica

Equiv. masa energía

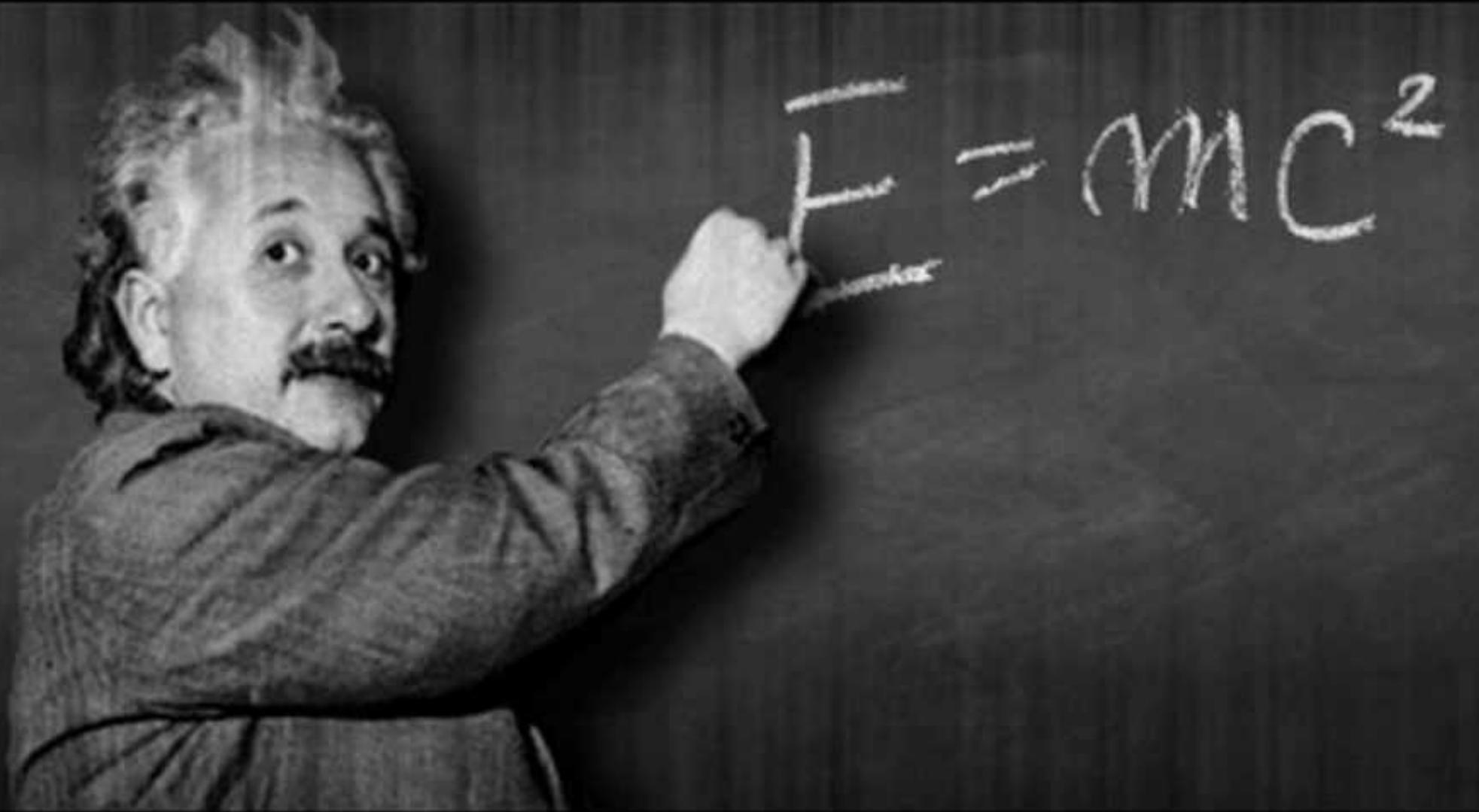
- En general, y en ausencia de otras interacciones:

$$E_K \equiv E - mc^2 = (\gamma - 1)mc^2$$

Energía cinética
(en ausencia de otras
interacciones)



Gracias Isaac, seguí participando...



Un nuevo invariante

Cant de mominto relativista: $\hat{p} = \gamma m \vec{v}$

Energia total relativista: $E = \gamma m c^2$

Elevaron al cuadrado: $E^2 = \gamma^2 m^2 c^4 \quad (1)$

$$p^2 = \gamma^2 m^2 v^2 \Rightarrow p^2 c^2 = \gamma^2 m^2 v^2 c^2 \quad (2)$$

Restando (1) - (2):

$$E^2 - p^2 c^2 = \gamma^2 m^2 c^4 - \gamma^2 m^2 c^2 v^2$$

Sacando factor común: $E^2 - p^2 c^2 = \gamma^2 m^2 c^4 \left(1 - v^2/c^2\right) = \gamma^2 m^2 c^4 \underbrace{\left(1 - \beta^2\right)}_{1/\gamma^2}$

$$\Rightarrow E^2 - p^2 c^2 = \gamma^2 m^2 c^4 \cdot \frac{1}{\gamma^2}$$

$$\Rightarrow \boxed{E^2 - p^2 c^2 = m^2 c^4}$$

invariante relativista.
(no depende del Sist. Ref.).



Resumen hasta aquí

- Cantidad de movimiento relativista (correcto siempre):

$$\vec{p} = \gamma m \vec{v}$$

- Energía relativista (correcta siempre):

$$E = \gamma m c^2$$

- Un nuevo invariante relativista:

$$E^2 - (pc)^2 = (mc^2)^2$$

Invariante
relativista



¿y si no la partícula no tiene masa?

- ¡No importa, tiene energía y tiene cantidad de movimiento!

$$m=0 \rightarrow E^2 - (pc)^2 = (mc^2)^2 \Rightarrow E^2 - (pc)^2 = 0$$

**Cantidad de
movimiento de
partículas sin masa**

$$E = pc$$

- Por ejemplo, un fotón violeta:

$$\lambda = 420 \text{ nm} \rightarrow E = hc/\lambda = 0.473 \text{ aJ} \text{ (attojoules, atto}=10^{-18})$$

$$\rightarrow p = 1.58 \times 10^{-27} \text{ kg m/s}$$



Comentario sobre unidades

- Es conveniente trabajar en otro sistema de unidades
- 1 eV es la energía ganada por un electrón en una diferencia de potencial de 1 V

$$E = qV \rightarrow E = (1.602 \times 10^{-19} \text{ C})(1 \text{ V}) \rightarrow E = 1.602 \times 10^{-19} \text{ J}$$

electronvolt

$$\Rightarrow 1 \text{ eV} = 1.602 \times 10^{-19} \text{ J}$$

meV eV keV MeV GeV TeV PeV EeV

Microndas RX Partículas R.C. Gal
Visible Gamma C. Galáctico R.C.E.G.



Nuevas unidades

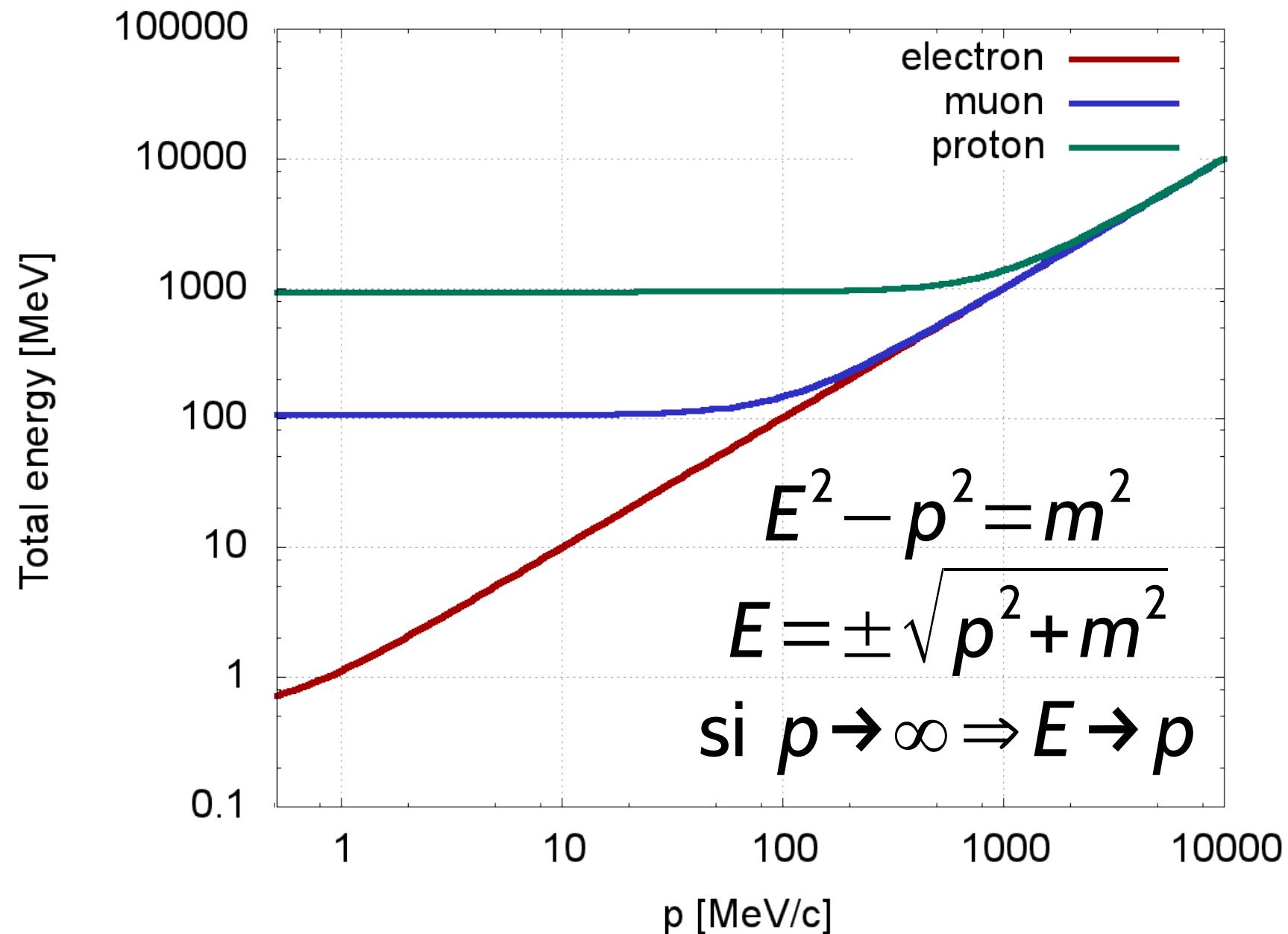
Magnitud	Ecuación	Unidad
Energía	E	eV
Cant. de movimiento	$p = E/c$	eV/c
Masa	$m = E / c^2$	eV/c ²

- A veces, se usan las unidades naturales:

$$h=c=1$$

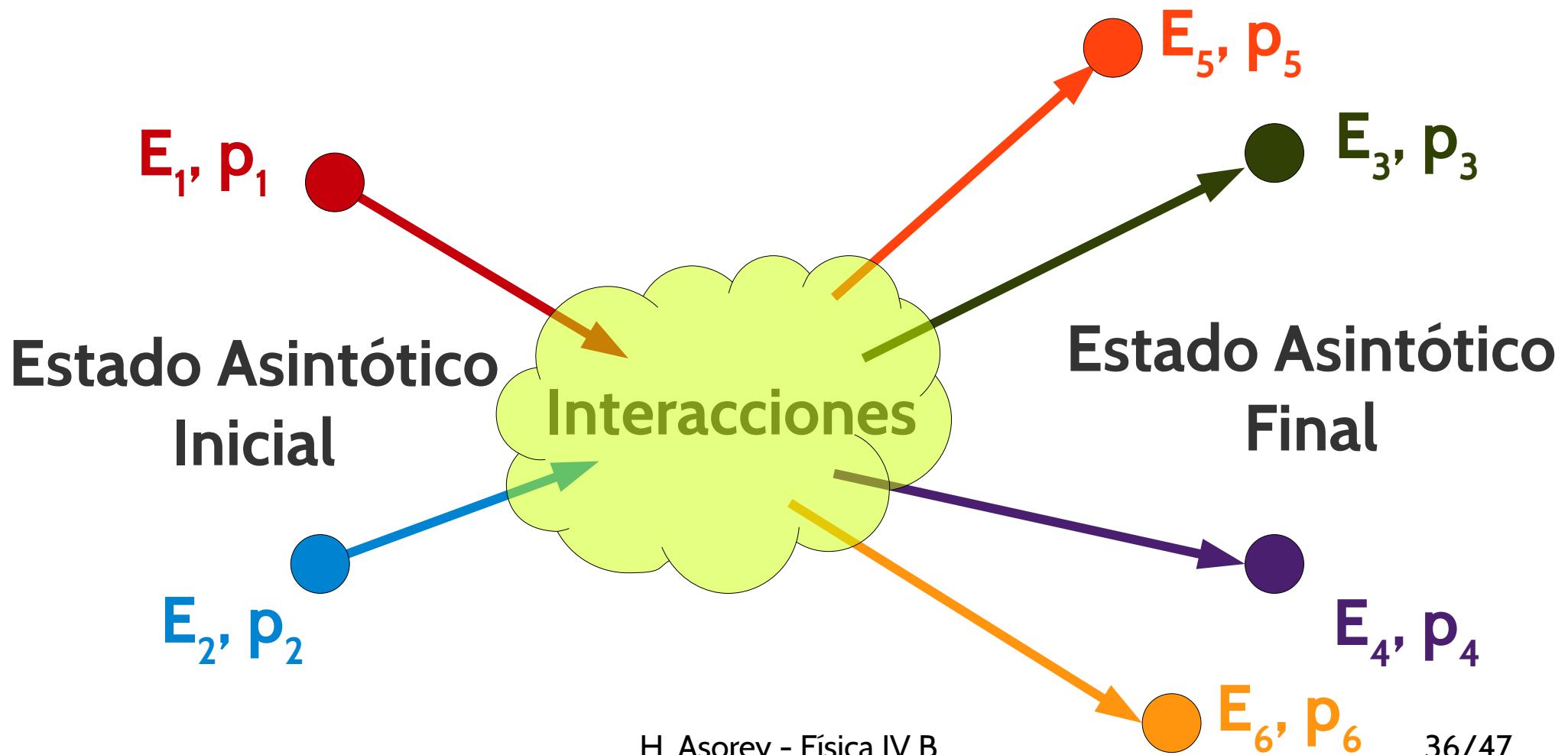
- Entonces, todo se mide en eV y →
$$E^2 - p^2 = m^2$$

Mil palabras



¿Cómo funciona la conservación?

- Y todo por pedir que c tiene que tener el mismo valor para todos los observadores inerciales.





Así funciona la Naturaleza

- La Energía total se conserva

$$\left. \begin{aligned} E^{\text{inicial}} &= \sum_j^{n^{\text{inicial}}} E_j^{\text{inicial}} = \sum_j m_j \gamma_j c^2 \\ E^{\text{final}} &= \sum_k^{n^{\text{final}}} E_k^{\text{final}} = \sum_k m_k \gamma_k c^2 \end{aligned} \right\} E^{\text{inicial}} = E^{\text{final}}$$

- La cantidad de movimiento total se conserva

$$\left. \begin{aligned} \vec{p}^{\text{inicial}} &= \sum_j^{n^{\text{inicial}}} \vec{p}_j^{\text{inicial}} = \sum_j m_j \gamma_j \vec{v}_j \\ \vec{p}^{\text{final}} &= \sum_k^{n^{\text{final}}} \vec{p}_k^{\text{final}} = \sum_k m_k \gamma_k \vec{v}_k \end{aligned} \right\} \vec{p}^{\text{inicial}} = \vec{p}^{\text{final}}$$



Apéndice: Transformación de Lorentz

Apéndice

Transformaciones de Lorentz



Apéndice: Transformaciones de Lorentz

Derivación “a la Einstein”

- Supongamos que el evento fue encender una linterna en $(0,0,0,0)$ apuntando en la dirección $+x$. Luego de un tiempo t , la luz se habrá desplazado una distancia:

$$x = ct \Rightarrow x - ct = 0$$

- En el sistema S' , tendremos (recordar, $c'=c$)

$$x' - ct' = 0$$

- Dado que están igualados a cero, los eventos ocurren en el mismo punto del espaciotiempo (no importa quien los vea), entonces:

$$x' - ct' = \lambda(x - ct)$$

Derivación “a la Einstein”, 2

- Para un fotón viajando hacia +x:

$$x' - ct' = \lambda(x - ct)$$

- Para un fotón viajando hacia -x:

$$x' + ct' = \mu(x + ct)$$

Dencción

$$\left\{ \begin{array}{l} x' - ct' = \lambda(x - ct) \\ x' + ct' = \mu(x + ct) \end{array} \right. \quad (1) \quad (2)$$

Suando (1)+(2):

$$\begin{aligned} 2x' &= \lambda x - \lambda ct + \mu x + \mu ct \\ x' &= \left(\frac{\lambda + \mu}{2} \right) x - \left(\frac{\lambda - \mu}{2} \right) ct \end{aligned}$$

$x' = ax - bx ct$

(3)

Restando (1)-(2):

$$\begin{aligned} -2ct' &= \lambda x - \lambda ct - \mu x - \mu ct \\ ct' &= -\left(\frac{\lambda - \mu}{2} \right) x + \left(\frac{\lambda + \mu}{2} \right) ct \end{aligned}$$

$ct' = act - bx$

(4)

Derivación “a la Einstein”, 3

- Visto desde S' , el origen está en $x'=0 \Rightarrow$

$$0 = ax - bct$$

$$\Rightarrow x = \frac{bc}{a} t$$

- y por lo tanto, la velocidad relativa entre S y S' es:

$$v = ct \Rightarrow \boxed{v = \frac{bc}{a}} \quad (5)$$

y a tiempo $t=0 \Rightarrow$

$$\boxed{x' = ax} \quad (6)$$



Derivación “*a la Einstein*”, 4, Importante

- Definimos el intervalo de distancia como

$$\Delta x' \equiv x'_2 - x'_1$$

$$\Delta x \equiv x_2 - x_1$$

Ahora, por el postulado 1, la longitud de una regla en reposo en S' medida por O , debe ser igual a la longitud observada por O' de una regla que está en reposo en S .

$$\Rightarrow \Delta x' = \Delta x$$

- Entonces, si dos puntos en x' están separados por $\Delta x' = 1$, vistos desde S' a $t=0$, será

$$x' = ax \Rightarrow \Delta x' = a \Delta x \Rightarrow$$

$$\Delta x = \frac{1}{a} \quad (7)$$

• Consideremos ahora $t'=0$ (tiempo en s'),

despejamos t desde la ecuación (4):

$$0 = act - bx \Rightarrow tac = bx$$

$$\Rightarrow t = \frac{b}{ac} x$$

• Reemplazando en (3)

$$x' = ax - b \left(\frac{b}{ac} \right) x$$

$$\Rightarrow x' = ax - \frac{b^2}{a} x$$

$$\Rightarrow x' = \frac{a^2 x - b^2 x}{a}$$

$$\Rightarrow x' = \frac{a^2 - b^2}{a} x \quad \text{Multiplico } a/a$$

$$\Rightarrow x' = a \left(\frac{a^2 - b^2}{a^2} \right) x$$

$$\Rightarrow x' = a \left(1 - \frac{b^2}{a^2} \right) x \quad y \text{ por (5)}$$

$$\Rightarrow x' = a \left(1 - \frac{v^2}{c^2} \right) x \quad \boxed{x' = a(1-\beta^2)x} \quad (8)$$



$$\beta \equiv \frac{v}{c}$$

$$x' = a(1-\beta^2)x \quad (8)$$



Derivación “a la Einstein”, 6

- Luego, la relación de distancias será

$$\Delta x' = x'_2 - x'_1 = a(1 - \beta^2)(x_2 - x_1)$$

$$\Rightarrow \Delta x' = a(1 - \beta^2) \Delta x, \text{ y si } \Delta x = 1$$

$$\rightarrow \Delta x' = a(1 - \beta^2) \quad (9)$$

- Pero recordando $\Delta x' = \Delta x$, entonces (7)=(9):

$$\Delta x = \Delta x' \Rightarrow \frac{1}{a} = a(1 - \beta^2) \Rightarrow a^2 = \frac{1}{1 - \beta^2}$$

Derivación “a la Einstein”, 7, Importante

- Y entonces

$$a = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

- Definiendo:

$$\gamma \equiv \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}} \quad (10)$$

- Resulta (recordando además (5) y la def de beta:

$$a = \gamma, \quad y \quad b = \beta \gamma \quad (11)$$

- Entonces, reemplazando en (1) en (3) y (4) :

$$x' = \alpha x - b c t \rightarrow x' = \gamma x - \gamma \beta c t$$

$$\Rightarrow x' = \gamma (x - \nu t)$$

$$\text{y } ct' = \gamma a c t - b x \rightarrow ct' = \gamma c t - \beta \gamma x$$

$$\Rightarrow t' = \frac{\gamma c t}{\gamma} - \frac{\beta \gamma}{c} x$$

$$\Rightarrow t' = \gamma \left(t - \frac{\beta}{c} x \right)$$

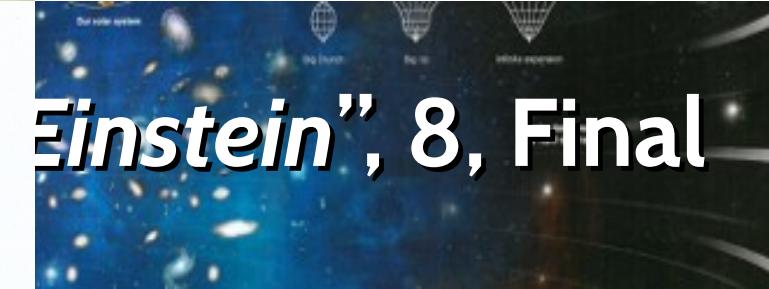
$$\Rightarrow t' = \gamma \left(t - \frac{\beta c}{c^2} x \right)$$

$$\Rightarrow t' = \gamma \left(t - \frac{\nu}{c^2} x \right)$$

y finalmente:

$$\boxed{\begin{aligned} t' &= \gamma \left(t - \frac{1}{c^2} \nu x \right) \\ x' &= \gamma \left(x - \nu t \right) \\ y' &= y \\ z' &= z \end{aligned}}$$

Transformación
de
Lorentz



Transformaciones de Lorentz

$$t' = \gamma \left(t - \frac{1}{c^2} v x \right)$$

$$x' = \gamma \left(x - v t \right)$$

$$y' = y$$

$$z' = z$$

Transformación de Lorentz. Otra forma.



- A los sistemas con co-locales
- A lo que se enciende un foco partiendo del origen $S_0 = S'_0$.
- Como $c=c'$ \Rightarrow En ambos sistemas se debe cumplir la postulación de la lumen
- El fronte de lumen según en S : $x^2 + y^2 + z^2 = c^2 t^2$
- Y en S' : $x'^2 + y'^2 + z'^2 = c^2 t'^2$

• Como S' se mueve en la dirección $+x \Rightarrow y=y'$, $z=z'$ y solo aparecen cambios en x y x' : $\Rightarrow x' = \gamma(x - vt)$; $x = \gamma'(x' + vt')$

• Y es algún factor de cambio \Rightarrow Por el 1º postulado $\gamma = \gamma'$

• Por el segundo postulado, $c=c' \Rightarrow$ en la dirección $+x$: $ct = x \quad \text{y} \quad ct' = x'$

$$\Rightarrow ct' = \gamma(x - vt) \quad \text{y} \quad ct = \gamma(x' + vt')$$

$$\Rightarrow ct' = \gamma(ct - vt) \quad \text{y} \quad ct = \gamma(ct' + vt')$$

$$\Rightarrow t' = \frac{\gamma}{c}(c - v)t \Rightarrow t' = \gamma\left(1 - \frac{v}{c}\right)t \Rightarrow t' = \gamma t(1 - \beta)$$

$$\text{y} \quad t = \frac{1}{\gamma} + \left(1 - \frac{v}{c}\right)t' \Rightarrow t = \gamma(1 + \beta)t'$$

$$\Rightarrow t = \gamma(1 + \beta)\gamma(1 - \beta)t' \Rightarrow 1 = \gamma^2(1 + \beta)(1 - \beta) \Rightarrow \gamma^2 = \frac{1}{1 - \beta^2}$$

$$\Rightarrow \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}} \quad \text{y luego obtener los T.L.}$$

Otra forma para TL



Notar que así también se pueden construir los intervalos invariantes