

Universidad Nacional de Río Negro

Int. Partículas, Astrofísica & Cosmología - 2019

- **Unidad** 01 – Relatividad
- **Clase** U01 C01
- **Fecha** 07 Ago 2018
- **Cont** Presentación, introducción, relatividad
- **Cátedra** Asorey
- **Web** <https://gitlab.com/asoreyh/unrn-ipac/>



Presentación



Colegas contando algunas experiencias

- Hernán Asorey

<hasorey@unrn.edu.ar> <asoreyh@gmail.com>

- Centro Atómico Bariloche e Instituto Balseiro:
líneas: Aplicaciones de Detectores de Partículas: Meteorología Espacial, Muongafía de Volcanes, Física Médica
- UNRN
Profesor Asociado, Física IIIB; **Física IVB (a.k.a. Introducción a la Física de Partículas, Astrofísica y Cosmología a.k.a. IPAC)**

A horizontal banner image depicting the evolution of the universe from the Big Bang to the present. It starts with a bright yellow-orange sphere on the left, representing the initial state, and transitions through various stages of cosmic development, including the formation of the first atoms, the emergence of the first stars and galaxies, and the expansion of the universe. The background is a deep blue space filled with distant galaxies and stars. The text 'Charla abierta' is overlaid in white on the right side of the banner.

Charla abierta



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
- Prácticas en clase y en casa

Puntos de contacto

- **Las clases:**
 - **Miércoles 19 a 23**
 - **Una semana por mes se agrega:
Lunes 19 a 23**
- **La Bibliografía: ver ----->**
 - **Depende de la unidad**
 - **Apuntes de clase**
 - **Wikipedia**



<https://gitlab.com/asoreyh/unrn-ipac>



IPAC2019



Astrofísica y Cosmología (B5300) y Física IVB (B5330) - Segundo semestre de 2019

Asignatura del cuarto año de la carrera de Profesorado en Física [Universidad Nacional de Río Negro](#)

Dr. Hernán Asorey *Departamento Física Médica, Centro Atómico Bariloche, Av. E. Bustillo 9500, (8400) San Carlos de Bariloche, Argentina*

Programa de la materia

Clases

Guías de ejercicios

Materiales

Fundamentación

Representa un intento por exponer aspectos de la física que normalmente no se presentan en cursos de cuarto año de profesorado 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 (Plan vigente).



Formas de Aprobación...

- **Evaluación continua (60%)**
 - Participación en clases y laboratorios
 - Entrega de prácticos
 - Charla presentando un tema a elección
- **Final integrador (40%)**
- **Promoción, cumpliendo todas estas condiciones:**
 - Entrega del 100% de los prácticos en tiempo y forma, cumpliendo con las fechas pactadas
 - Entrega del 100% de los informes en tiempo y forma, cumpliendo con las fechas pactadas
 - Nota Evaluación Continua > 7.9
 - Dispone de un (y sólo un) “comodín” para las fechas de entregas



- **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.



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

- **Propuesta metodológica**

Las clases serán interactivas, con amplio espacio para la discusión de los conceptos claves de la materia. Se realizarán demostraciones y prácticas de laboratorio con los equipos disponibles y con elementos de bajo costo. En todos los casos se abordará la problemática planteada desde un modelo constructivista. Las clases incluirán instancias de trabajo virtual para prácticas de incorporación de herramientas de tecnologías de información y comunicación (TIC) en la enseñanza de las ciencias.

Contenidos: un viaje en el tiempo

HOW DID OUR UNIVERSE BEGIN?

Some 13.8 billion years ago our entire visible universe was contained in an unimaginably hot, dense point, a billionth the size of a nuclear particle. Since then it has expanded—a lot—fighting gravity all the way.

Inflation
In far less than a nanosecond, a repulsive energy field inflates space to visible size and fills it with a soup of subatomic particles called quarks.
Age: 10^{-32} milliseconds
Size: Infinitesimal to golf ball

Early building blocks
The universe expands, cools. Quarks clump into protons and neutrons, the building blocks of atomic nuclei. Perhaps dark matter forms.
Age: 0.1 milliseconds
Size: 0.1-trillionth present size

First nuclei
As the universe continues to cool, the lightest nuclei, of hydrogen and helium, arise. A thick fog of particles blocks all light.
Age: 0.01 to 200 seconds
Size: 1-billionth present size

First atoms, first light
As electrons begin orbiting nuclei, creating atoms, the glow from our infant universe is unveiled. 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 cosmic background radiation is the only light. Clumps of matter that will become galaxies glow brightly.
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 that of dark matter—to eventually form 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 by gravity, cosmic expansion accelerates again. The output: 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.



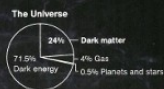
Galaxies ripped apart by rapid expansion

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 counteracts gravity, providing an explanation for observations that the expansion of space is accelerating.



WHAT IS THE SHAPE OF OUR UNIVERSE?

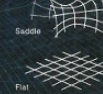
Einstein discovered that a star's gravity curves space around it. But is the whole universe curved? Might space close up on itself like a sphere or curve the other way, opening out like a saddle? By studying cosmic background radiation, scientists have found that the universe is poised between the two, 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.

Observable Universe

The universe began 13.8 billion years ago. Because it has been expanding ever since, the farthest observable edge is now 47 billion light-years away.

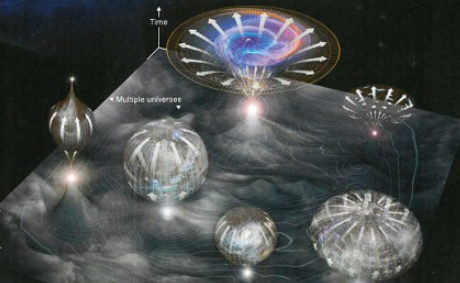
The Unknown Beyond

What we can't see. The possible shapes are:



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 quantum energy 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.



Fly through the universe on our digital edition.
LAWSON PARKER, HOW STAFF, KIMBA GIBBERN, AND MICHAEL M. BROWN. SOURCES: CHARLES BRANETT, JAMES HODGSON, UNIVERSITY OF CHICAGO; UNIVERSITY OF CHICAGO; UNIVERSITY OF CHICAGO; UNIVERSITY OF CHICAGO.

HOW DID OUR UNIVERSE BEGIN?

In the 13.8 billion years ago, the entire visible universe was contained in an unimaginably dense point, a billionth the size of a nuclear particle, or even it has expanded—a fighting gravity all the way.

Inflation
In far less than a nanosecond a repulsive energy field inflated space to inflate stars and fill it with a soup of subatomic particles called quarks.
Age: 10^{-32} milliseconds
Size: Infinitesimal to golf ball

Early building blocks
The universe expands, cools. Quarks clump into protons and neutrons, the building blocks of atomic nuclei. Perhaps dark matter forms.
0.1 milliseconds
0.1-trillionth present size

First matter
As the universe cools, the first molecules arise. A trillionth the size of a nucleus.
0.1 to 200 trillionths

Unidad 4 El Big Bang Allá lejos y hace tiempo

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 piled 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 fit 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 that counteracts gravity, providing an explanation for observations that the expansion of space is accelerating.

The Universe

Component	Percentage
Dark energy	71.5%
Dark matter	24%
Gas	4%
Planets and stars	0.5%

Atoms
Hydrogen

Atoms

First atoms, first light
As electrons begin orbiting nuclei, creating atoms, the glow from our infant universe is unveiled. This light is as far back as our measurements can see.
3,800,000 years
.0009 present size

The "dark ages"
For 300 million years this cosmic background radiation is the only light. Clumps of matter that will become galaxies glow brighter.
380,000 to 300 million years
.0009 to 0.1 present size

Gravity wins: first stars
Dense gas clouds collapse under their own gravity—of dark matter—to create form galaxies and stars.
300 million years
0.1 present size

Stars

Unidad 3

Cosmología

No es lo que se ve Sino lo que se palpa

Observable Universe
The universe began 13.8 billion years ago. Because it has been expanding ever since, the farthest observable edge is now 47 billion light-years away.

47 billion light-years

The Unknown
What we can't see, possible shapes

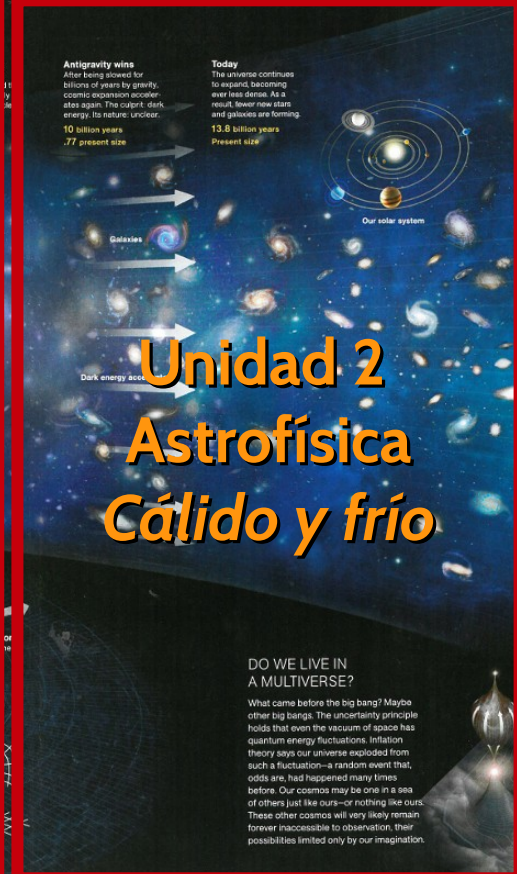
Sphere

Saddle

Flat

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.



Antigravity wins
After being slowed for billions of years by gravity, cosmic expansion picks it up again. The culprit: dark energy. Its nature: unclear. 10 billion years. .77 present size

Today
The universe continues to expand, becoming ever less dense. As a result, fewer new stars and galaxies are forming. 13.8 billion years. Present size

Galaxies

Our solar system

Dark energy accelerates expansion

Unidad 2 Astrofísica Cálido y frío

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 quantum energy 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.

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.

Big crunch Big rip Infinite expansion

Galaxies ripped apart
by rapid expansion

Unidad 1

Partículas 1

todo es relativo

Time

Multiple universes

Fly through the universe on our digital edition.

LUISITON RAMIREZ, NGUYEN THANH PHUONG, GUILLERMO E. ALI, and NORMAN MARCOLOTT
 EDITOR: CHARLES E. JOHNSON
 UNIVERSITY OF CALIFORNIA, LOS ANGELES
 UNIVERSITY OF CALIFORNIA, LOS ANGELES
 UNIVERSITY OF CALIFORNIA, LOS ANGELES
 UNIVERSITY OF CALIFORNIA, LOS ANGELES

U1: Todo es relativo

4 encuentros: del 07/Ago al 28/Ago

$E_k = \frac{1}{2} m v^2$ $\tan \vartheta_B = \frac{v_2}{v_1} = \frac{v_{21}}{v_1}$ $\rho V = n R T$ $\vec{\psi} = \iint \vec{D} d\vec{S} = A D$ $H_\lambda = \frac{\Delta M_e}{\Delta \lambda}$

• **Relatividad Especial**

• **Introducción**

• **Cinemática y Dinámica Relativista**

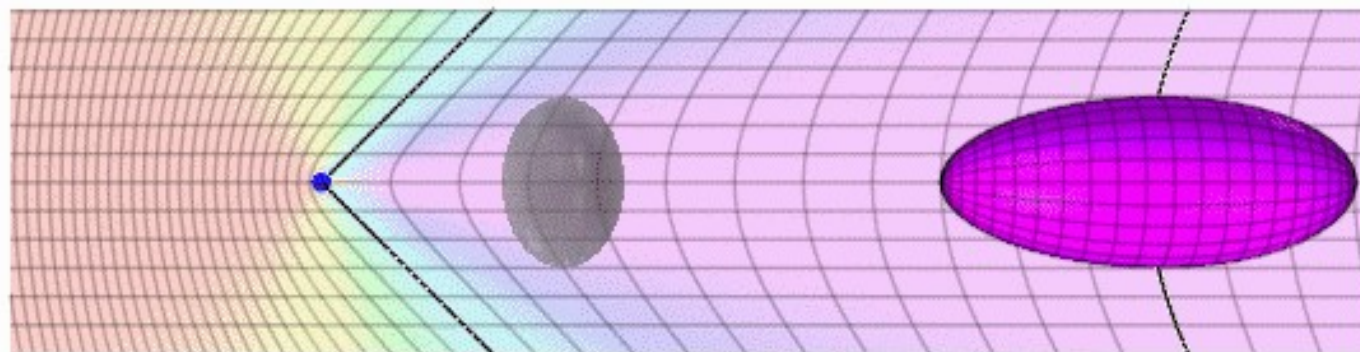
• **Física de Partículas, 1ª parte**

• **Planck, Bosones y Fermiones**

• **Interacciones fundamentales**

• **Radiactividad**

$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2 \psi}{dx^2} + V \psi = E \psi$ $\psi_e = \frac{L}{4\pi r^2}$ $\Delta t = \frac{\Delta t'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$ $X_L = \frac{U_m}{I_m} = \omega L = 2\pi f L$ $F_g = \frac{m_1 m_2}{r^2}$ $R_m = \frac{C}{T}$ $k = \pm \sqrt{\frac{2m}{\hbar^2} (E - V_0)}$ $\omega = 2\pi f$ $\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{v_2}{v_1}$ $V = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r \mu_r}}$ $\frac{\Delta I_C}{\Delta t} \phi_e = \frac{\Delta E}{\Delta t} \frac{m_1}{x} + \frac{m_2}{x'} = \frac{m_2 - m_1}{v}$ $\iint \vec{D} d\vec{S} = Q^*$ $E = \hbar k^2$ $1 \text{ pc} = \frac{1 \text{ AU}}{r}$ $S R = \frac{U}{T} E$ $\left(\frac{E_t}{E_0} \right)_{\parallel} = \frac{2 \cos \vartheta_1 \cos \vartheta_2}{\cos(\vartheta_1 - \vartheta_2) \sin(\vartheta_1 + \vartheta_2)}$ $E_y = E_0 \sin(k_x - \omega t)$ $R = R_0 \sqrt[3]{A}$ $S = \frac{1}{A} \frac{d\omega}{d\lambda}$



U2: Cálido y Frío

5 encuentros: del 04/Sep al 02/Oct

- Estrellas

- Astronomía Observacional: sistemas de coordenadas y mapas estelares
- Radiación de Cuerpo Negro
- Ley de Eddington, Clasificación estelar, Diagrama H-R
- Objetos Compactos y evolución estelar

- Planetas

- Planetas y Exoplanetas
- Vida en el Universo: Astrobiología

- Galaxias


- Modelos y formación
- Ejemplos: La Vía Láctea, Otras Galaxias, GalaxyZoo(*)



U3: no es lo que se ve, sino lo que se palpa

3 encuentros: del 09/Oct al 23/Oct

- **Relatividad General**
 - Introducción y conceptos básicos,
 - Modelo de Friedman-Lemaître-Robertson-Walker
 - El error de Einstein
- **Modelos del Universo**
 - Formación de estructuras
 - Midiendo distancias
 - Corrimiento al rojo
 - El universo en expansión

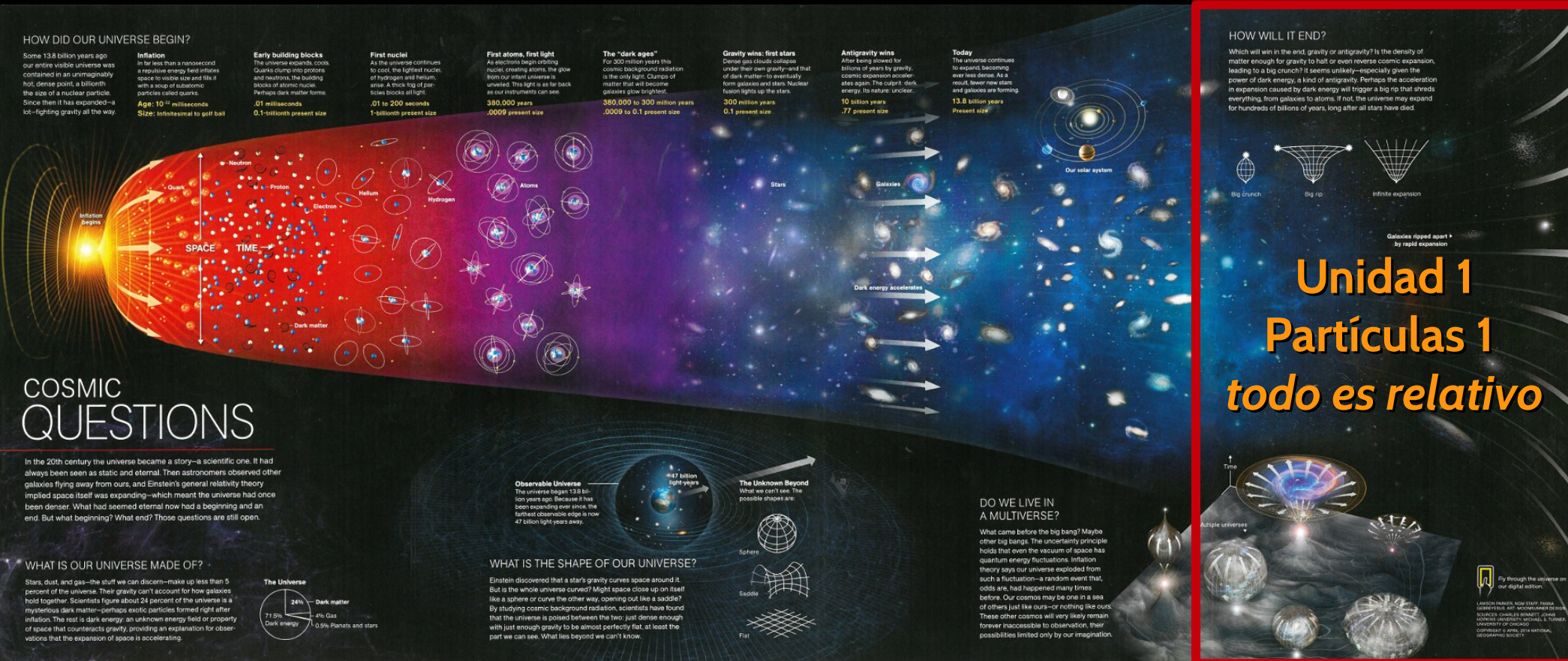



U4: Allá lejos y hace tiempo

4 encuentros: del 30/Oct al 20/Nov

- El modelo cosmológico estándar
 - Modelo de Alpher, Bethe & Gamow
 - El fondo de microondas
 - Modelo Λ CDM
- Historia térmica del universo
 - El Big Bang
 - Primeros segundos del universo
 - Épocas térmicas de tiempo, inflación, recombinación
 - Evolución futura del universo
 - ¿El fin?

Contenidos: un viaje en el tiempo





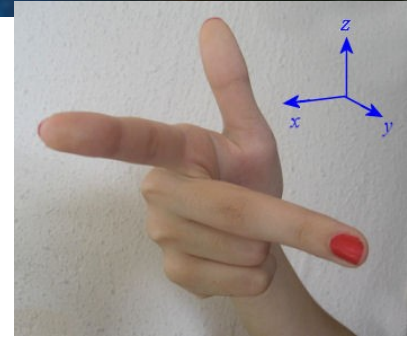
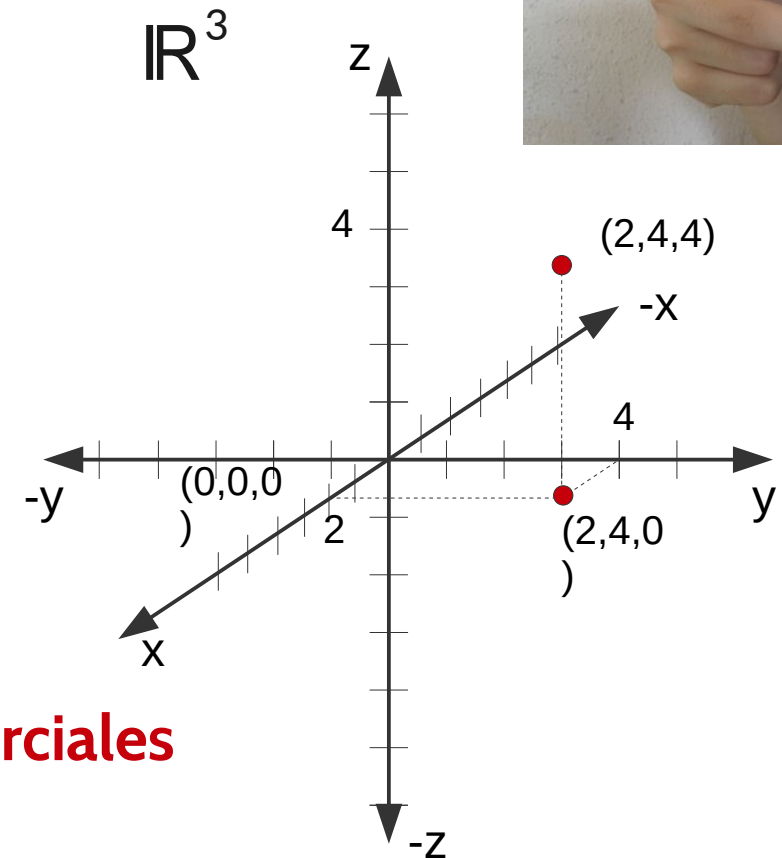
U1: Todo es relativo (07/Ago - 28/Ago)

- ¿Marco de referencia?
-
-
- ¿Marco de referencia inercial?
-
-
-

Marco de referencia

- **Marco de referencia**

- Sistema de coordenadas que fija la posición de objetos físicos de manera unívoca (localización y orientación)
- Existe un conjunto de medidas estandarizadas (una regla)
- Distintos tipos:
 - Fijos al cuerpo, fijos al espacio, **inerciales** y no inerciales

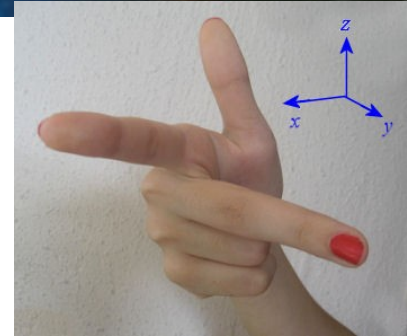
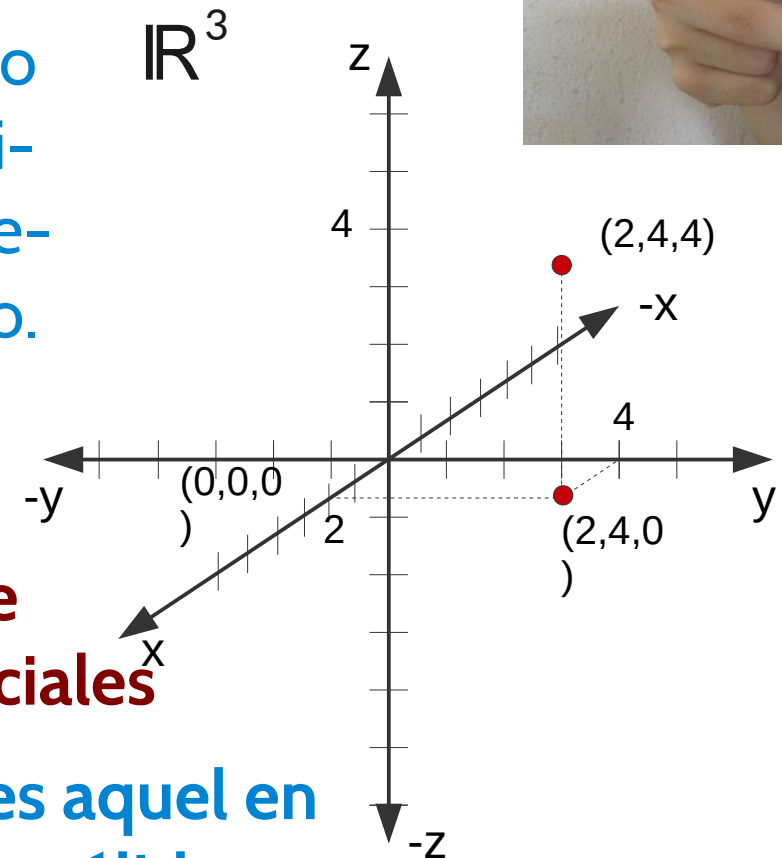


3-tupla: (x,y,z)

Marco de referencia **inercial**

- **Marco de referencia inercial**

- Describe el espacio homogéneo (no hay lugares privilegiados) e isotrópicamente (no hay direcciones privilegiadas) e independiente del tiempo.
- Las leyes físicas tienen la “misma forma” en todo sistema inercial. Decimos que la física es **covariante frente a cambios de sistemas inerciales**
- Un sistema de referencia inercial es aquel en el que la primera ley de Newton es válida.



3-tupla: (x,y,z)



U1: Todo es relativo

- ¿Qué es la relatividad?

-

-

- ¿Quién la descubrió?

-

-

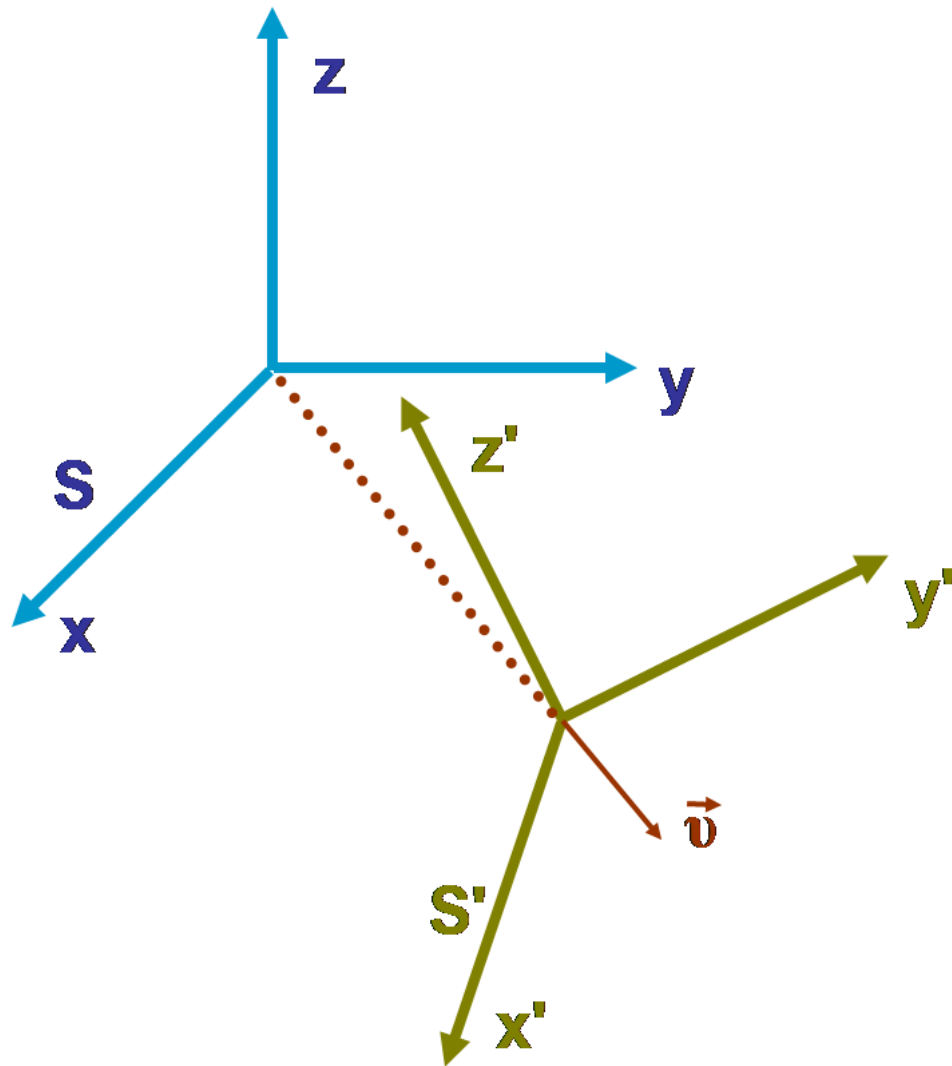
-



Relatividad de Galileo

- Si la ley de la inercia es válida, las aceleraciones son provocadas sólo por fuerzas internas, no externas (p. ej. un sistema rotante)
- No hay forma de “saber” si estamos en movimiento
 - Propongan un ejemplo ahora
- **El tiempo y el espacio están claramente desacoplados** (¡vida diaria!)
- **Las leyes de la mecánica son invariantes en el tiempo**
 - → **El espacio es absoluto**
 - → **Todos los sistemas inerciales comparten el mismo tiempo**

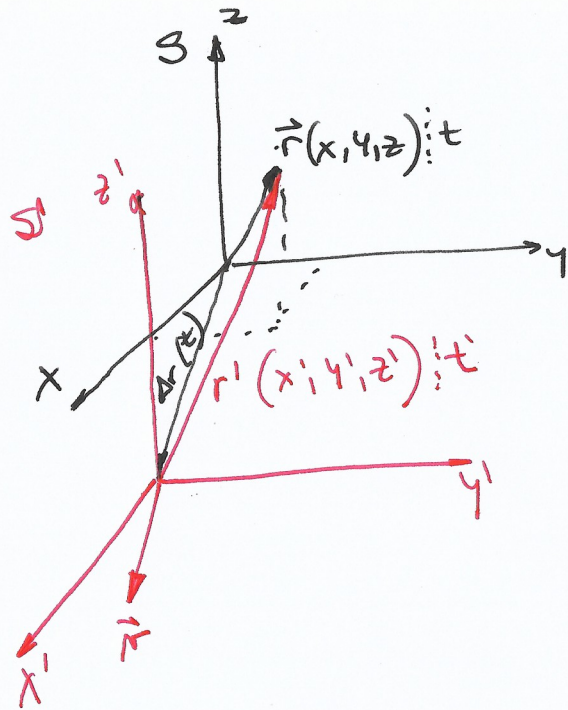
Relatividad de Galileo



- Sea un sistema S' que se mueve con velocidad constante v respecto a otro sistema S .
- Luego, un objeto en r , a tiempo t en S , tendrá posición $r'(t)$ dada por:

$$\vec{r}'(t) = \vec{r}(t) - \vec{v}t$$

Derivación



Ahora bien, por (2^a) postulado

$$t = t'$$

y por (1) en algún momento t_0

$$\vec{O}(t_0) = \vec{O}'(t_0) \Rightarrow \vec{r}(t_0) = \vec{r}'(t_0)$$

Eso ocurrió hace un tiempo $(t - t_0)$

\Rightarrow En ese tiempo, S' se desplazó $\Delta \vec{r} = \vec{v} \cdot (t - t_0)$

luego a tiempo t , y visto desde S

$$\vec{r}(t) - \vec{r}'(t) = \Delta \vec{r}(t)$$


$$\Rightarrow \vec{r}'(t) = \vec{r}(t) - \Delta \vec{r}(t)$$

$$\Rightarrow \vec{r}'(t) = \vec{r}(t) - \vec{v}(t - t_0)$$

Haciendo $t_0 = 0 \Rightarrow$

$$\vec{r}'(t) = \vec{r}(t) - \vec{v}t$$

$$\boxed{\vec{r}'(t) = \vec{r}(t) - \vec{v}t}$$



Y luego

Entonces.

Si el objeto en $r(t)$ se está moviendo, en S' será:

$$\vec{u}'(t) = \frac{d}{dt} r'(t) = \frac{d}{dt} (\vec{r}(t) - \vec{v}t) = \frac{d\vec{r}(t)}{dt} - \vec{v}$$

Recordar
 $\vec{v} = \text{cte}$

$$\Rightarrow u'(t) = \vec{u}(t) - \vec{v} \Rightarrow \boxed{u'(t) = \vec{u}(t) - \vec{v}}$$

Regla de
velocidades

$$\vec{u}'(t) = \vec{u}(t) - \vec{v}$$

Si el objeto se acelera \Rightarrow Su aceleración $\vec{a}(t)$ vista desde S' será:
 $= \vec{a}(t)$

$$\vec{a}'(t) = \frac{d}{dt} \vec{u}'(t) = \frac{d}{dt} (\vec{u}(t) - \vec{v}) = \frac{d\vec{u}(t)}{dt} - \frac{d\vec{v}}{dt} \rightarrow 0$$

$$\vec{a}'(t) = \vec{a}(t) \Rightarrow \boxed{\vec{a}'(t) = \vec{a}(t)}$$

Aceleración iguales !!

Pero entonces... Invariancia de Galileo

- Este último resultado es crucial, ya que si

$$\vec{a}'(t) = \vec{a}(t)$$

- Y suponemos que la masa m es un invariante, $m=m'$

$$m \vec{a}'(t) = m \vec{a}(t) \Rightarrow \vec{F}'(t) = \vec{F}(t)$$

- ¡La segunda ley de Newton no cambia frente a cambios entre sistemas de referencias inerciales! (la primera ya valía)
- **Si las leyes de la mecánica valen en un marco inercial, valen en todos**

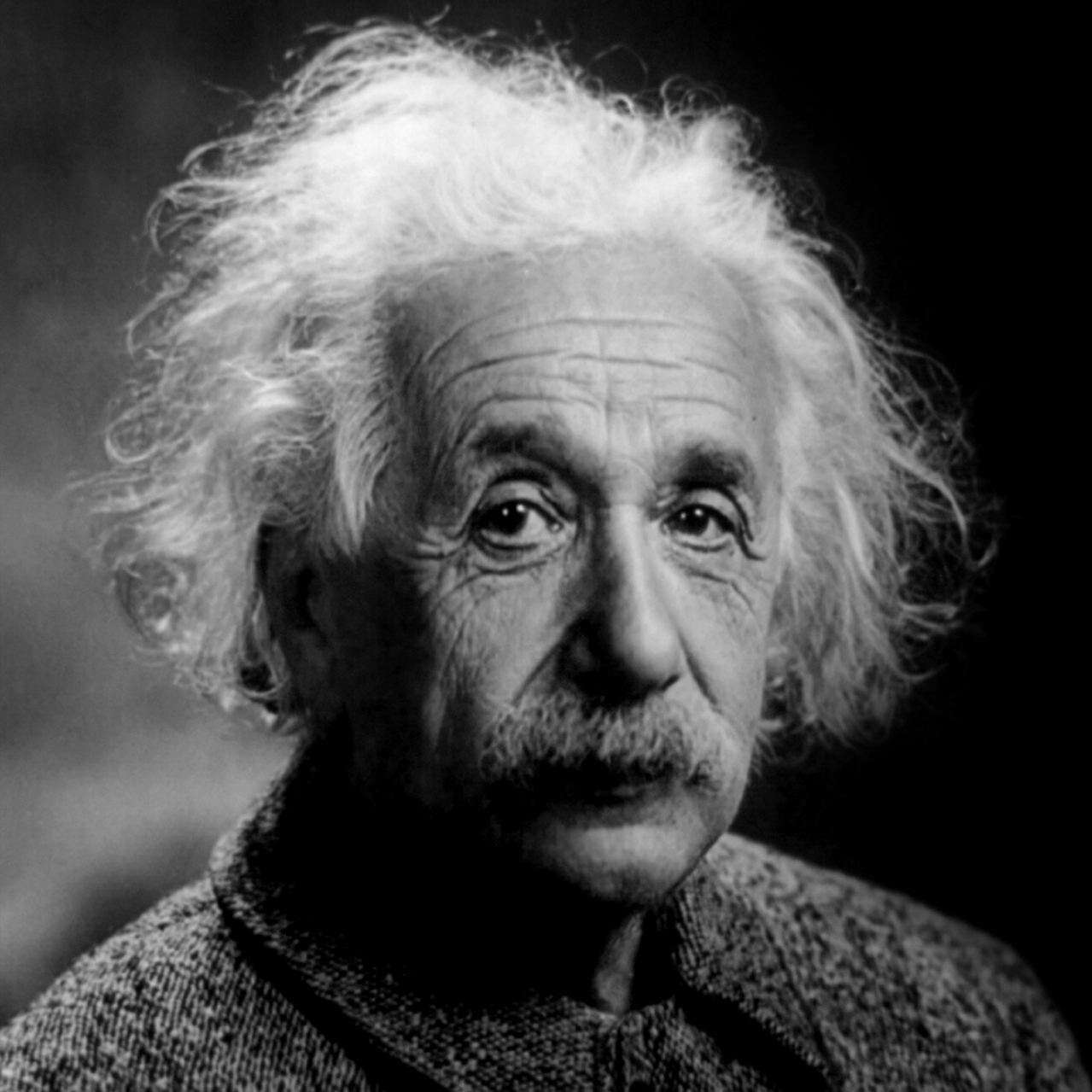
- Para llegar a este importante resultado, dimos por sentado algo que no es trivial:

**En todos los casos, derivamos respecto a t ,
ya que en Galileo,
 $t=t' \rightarrow dt = dt'$**

- Esto parece obvio, pero ¡no lo es!
- Y además, sólo vale para las leyes de Newton, en el electromagnetismo, esto no vale ($\rightarrow F-4B$)
 \rightarrow Transformaciones de Lorentz (ya vienen)



El genial Albert Einstein



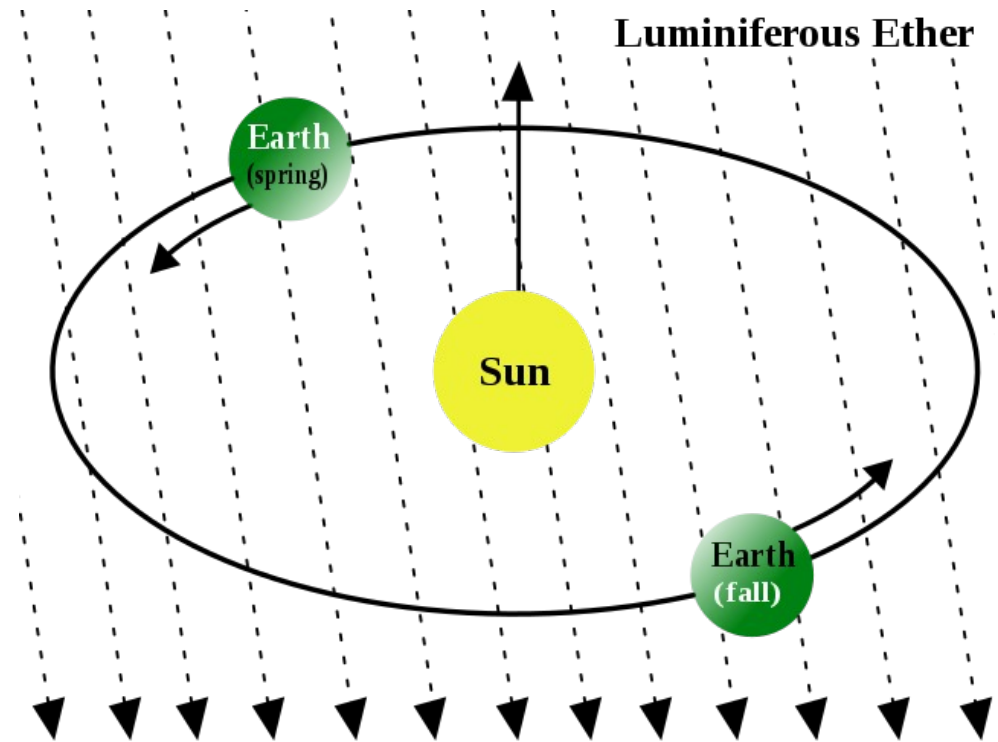
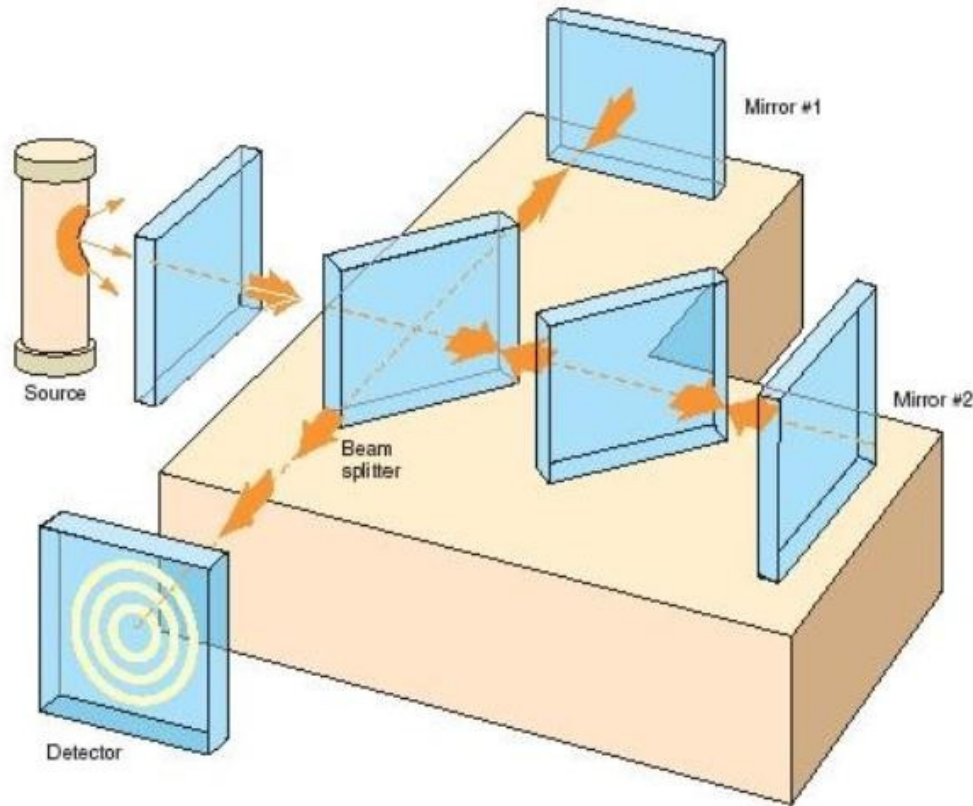
Albert Einstein



¿Qué pasa si....

- Ondas mecánicas necesitan un medio
→ Ondas electromagnéticas también → Éter
- Hay una fuerte inconsistencia entre las leyes de Newton y las leyes de Maxwell
- Michelson & Morley (1887) querían medir la velocidad del “viento del éter” (la Tierra se mueve a una velocidad de $30\text{km/s} \sim 0.0001 c$)...

El experimento de Michelson & Morley



En diferentes momentos del año, la velocidad de la luz medida en los brazos del interferómetro sería diferente, teniendo en cuenta la velocidad de propagación de la Tierra respecto al eter (viento del eter), que era donde se suponía se desplazaba la luz.



¿Qué pasa si....

- Ondas mecánicas necesitan un medio
→ Ondas electromagnéticas también → Éter
- Hay una fuerte inconsistencia entre las leyes de Newton y las leyes de Maxwell
- Michelson & Morley (1887) querían medir la velocidad del “viento del éter” (la Tierra se mueve a una velocidad de $30\text{km/s} \sim 0.0001 c$) → **fallan estrepitosamente...**
- ... y esto es un **éxito rotundo**: demuestran que no hay necesidad de plantear la existencia del éter
- **Pero además, vieron que la velocidad de la luz era la misma en cualquier dirección!!!**



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

... y paso a la historia