

The background of the slide is a deep space image featuring a vibrant, multi-colored nebula in shades of blue, purple, red, and yellow, set against a black field densely populated with bright yellow and white stars.

SpazioTempo

un piccolo viaggio attraverso

Relatività

Ristretta

e

Generale

Antonio Dainelli

Istituto Nazionale di Fisica Nucleare

Laboratori Nazionali di Legnaro



Sapete che ... ?

- Il Tempo scorre diversamente quando vi muovete a velocità diverse ...
- Quando siete in **montagna** oppure al **livello del mare** ...
- Quando vi avvicinate a **GRANDI MASSE ?!**

Questi sono tutti effetti **REALI** della Relatività di Einstein

Sapete che ?

- Il tempo scorre in modo diverso anche nella vostra testa rispetto a come scorre nei vostri piedi ?!

- **Gli orologi in alto scorrono più velocemente:**

Un orologio a 2 metri di altezza guadagna **~ 7 nanoseconds/anno** su un orologio ai vostri piedi.

- **Implicazioni Tecnologiche:**

Questo effetto è contemplato e gestito nei satelliti GPS, dove gli orologi a 20200 km di distanza dalla Terra guadagnano **~ 45 microsecondi/giorno** a causa della Relatività Generale (e perdono **~ 7 μ s/giorno** per la Relatività Ristretta).

- **Fatto divertente** : Se vivete al secondo piano guadagnate **~ 0.00002 secondi in 80 anni** rispetto a chi vive al piano terra.

Questi sono tutti effetti REALI della Relatività di Einstein

Galileo&Newton vs Einstein

- Relatività di Galileo: **Il Tempo è ASSOLUTO**, lo stesso per tutti gli osservatori.
- Relatività di Einstein: **Il Tempo e Lo Spazio sono RELATIVI** al moto dell'osservatore (ovvero al Sistema Inerziale associato con l'osservatore).

Come abbiamo raggiunto questo Risultato ?

- Lo sviluppo della **Relatività Ristretta** (o **Speciale - 1905**) emerge da una serie di incongruenze fisiche che combinano problem fisici non risolti, brillanti intuizioni e radicali cambi di prospettive. Questi i passaggi fondamentali :
Incongruenze tra la Meccanica di Newton e l' Elettromagnetismo
- **Fisica Classica (Galileo/Newton):**
 - Le leggi della meccanica sono le stesse in tutti i **Sistemi di Riferimento Inerziali** (Relatività Galileiana).
 - **Le velocità si sommano:** se corri su un treno la tua velocità totale è:
 $V_{\text{treno}} + V_{\text{tua sul treno}}$
- **Equazioni di Maxwell (1865):**
 - Descrivono la LUCE come una onda **electromagnetica** con velocità costante **$c \approx 300,000 \text{ km/s}$** (come una onda in un lago calmo)
 - **Problema:** velocità della Luce costante rispetto a quale sistema di riferimento
 - ed in quale Mezzo di Propagazione ? Ipotesi storica **"ETERE luminifero"**

Come abbiamo raggiunto questo Risultato ?

- **Esperimento di Michelson-Morley (1887)**
- **Obbiettivo:** Misurare la Velocità della Luce con il moto della Terra nell' "Etere".
- **Resultato:** Nessuna rilevabile variazione della Velocità della Luce, indipendentemente dal moto della Terra nell' "Etere".
- **Conseguenza : L' "ETERE" NON ESISTE e la Velocità della Luce è una costante in tutti i Sistemi di Riferimento Inerziali !**
- **MA ... Einstein non cita l'esperimento di Michelson-Morley nel suo articolo del 1905 per Einstein la Relatività Ristretta/Speciale era una conseguenza logica di alcuni principi della fisica e non un tentativo di spiegare alcuni esperimenti.**
- Vediamolo in dettaglio ...

Come abbiamo raggiunto questo Risultato ?

Einstein e Esperimento di Michelson-Morley

- Einstein non cita mai l'esperimento Michelson-Morley nel suo articolo del 1905 — anche se oggi l'esperimento viene spesso citato come l'esperimento che ha “ispirato” la Teoria della Relatività Ristretta/Speciale.
- Einstein era sicuramente a conoscenza dei risultati dell'esperimento. Ma in una intervista del 1950 egli dice che quell risultato non è stato mai centrale nelle sue riflessioni.
- “The theory of relativity was not founded to explain the Michelson-Morley experiment... **What impressed me was that the Maxwell equations, properly interpreted, led to a principle of relativity.**”

Come abbiamo raggiunto questo Risultato ?

Einstein e Esperimento di Michelson-Morley

- Einstein era soprattutto focalizzato sulla consistenza teorica, specialmente sul disaccordo tra la meccanica di Newton e **le Leggi sull'Elettromagnetismo di Maxwell.**
- Il Principale obiettivo di Einstein era rimuovere la necessità di un mezzo di propagazione come l' "ETERE" e costruire una teoria basata esclusivamente su quello che un osservatore può misurare.,
- Einstein costruisce la teoria della Relatività Ristretta/Speciale solo su principi logici e simmetrie della leggi fisiche.

The Beauty of Maxwell equations !

Permettività del vuoto / Costante dielettrica

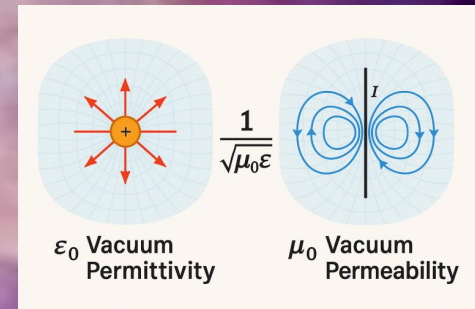
Ci dice con quale facilità si possono formare campi elettrici nello spazio vuoto.

È come la "flessibilità elettrica" dello spazio.

Influisce sulla forza con cui le **cariche** interagiscono a distanza.

Immaginate lo spazio come una sorta di "tessuto invisibile".

Se vi inserite una carica, si crea un campo elettrico, come se il tessuto si tendesse. La **permettività** ci dice quanto è rigido o flessibile quel tessuto per le forze elettriche.



Permeabilità del vuoto / Costante magnetica

Ci dice con quanta facilità si formano campi magnetici nello spazio vuoto.

È la "flessibilità magnetica" dello spazio.

Influisce sull'intensità del campo magnetico prodotto dalle **correnti elettriche**.

La **permeabilità** ci dice quanto è facile per quei campi magnetici attraversare lo spazio.

The Beauty of Maxwell equations !

$$\nabla^2 \mathbf{E} - \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} = 0$$

$$\nabla^2 \mathbf{B} - \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial^2 \mathbf{B}}{\partial t^2} = 0$$

Queste sono tipiche **equazioni d'onda** della forma :

$$\nabla^2 \psi - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} = 0$$

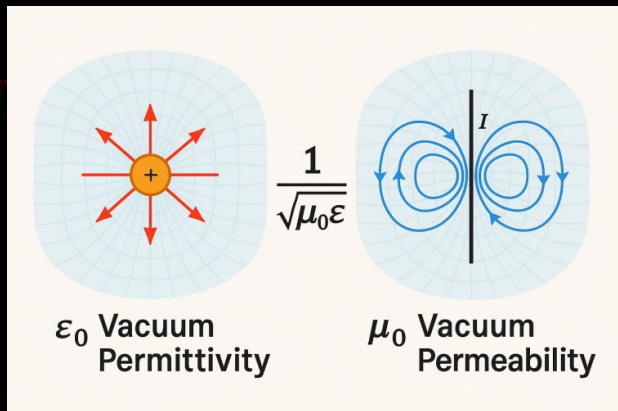
Nelle quali v è la velocità dell'onda.

Dal confronto si deduce che la velocità delle onde elettromagnetiche nel vuoto è :

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}}$$

Dal valore misurato delle due costanti si ottiene la Velocità della Luce nel vuoto :

$$c \approx 3 \times 10^8 \text{ m/s}$$

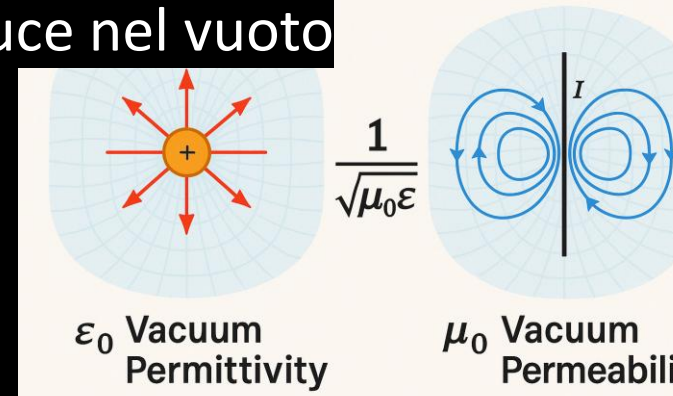


The Beauty of Maxwell equations !

o FORSE della natura del VUOTO ?!

ϵ_0 e μ_0 Non sono solo delle costanti astratte – Insieme determinano quanto velocemente viaggia la luce nel vuoto

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}}$$



La VELOCITA' della LUCE sembra determinata da come il Campo Elettrico ed il Campo Magnetico interagiscono con lo spazio vuoto

Siamo sicuri che questa sia una corretta descrizione della Natura ?

Nell'elettrodinamica quantistica (QED), il vuoto non è veramente vuoto: è un mare di particelle virtuali. Queste possono polarizzarsi leggermente in risposta ai campi. Quindi, nella fisica moderna, **permittività** e **permeabilità** possono essere viste come proprietà emergenti del comportamento del vuoto quantistico.

Vuoto Classico (Maxwell's)

ϵ_0 e μ_0 sono costanti misurate negli esperimenti

Vuoto = “Mezzo” passivo in cui i campi si manifestano

Nessuna Struttura sottostante - solo uno Spazio Vuoto

“i Campi esistono indipendentemente da ogni mezzo.”

Vuoto Quantistico (Prospettiva QED)

il «Vuoto» non è davvero vuoto.

Particelle Virtuali appaiono e scompaiono costantemente

ϵ_0 e μ_0 emergono da effetti quantistici

il Vuoto può essere **polarizzato** come un **dielettrico**

Tentativi di Soluzioni ...

Ipotesi di Lorentz and FitzGerald :

- Per salvare l'Etere L&F propongono che gli oggetti in movimento si contraggano nella direzione del moto (**Contrazione delle Lunghezze**).
- Lorentz deriva le Trasformazioni tra due Sistemi Inerziali (**Trasformazioni di Lorentz -1892**), che lasciano inalterate le Equazioni di Maxwell, ma **vede queste trasformazioni come un trucco matematico, non una realtà !!**

Tentativi di Soluzioni ...

Ci sono ormai tutti gli ingredient per un **nuovo approccio**

Intuizioni di Einstein (1905)

- Einstein propone **Due Postulati Rivoluzionari** :

1. Principio di Relatività :

1. Le Leggi della Fisica sono le stesse in tutti i Sistemi di Riferimento Inerziali (non esistono Sistemi di Riferimento “privilegiati”).

2. La Velocità della Luce è una costante ed è la stessa in tutti i Sistemi di Riferimento : La Velocità della Luce è la stessa per tutti gli osservatori indipendentemente dal loro moto relativo.

- Rottura con il passato: **il Tempo NON è più ASSOLUTO !!**
- **Abbandono del tempo e dello spazio assoluti di Newton.**

Conseguenze Immediate :

- **Dilatazione del Tempo:**
Un orologio in movimento va più piano
- **Contrazione delle Lunghezze:**
Un oggetto in movimento appare più corto
- **Relatività della Simultaneità:**
Due eventi simultanei per un osservatore possono non esserlo per un altro.

Trasformazioni di Lorentz

Obbiettivo :

Trovare come le coordinate spaziotemporali (t, x) in un Sistema di Riferimento Inerziale **S** sono correlate alle coordinate spaziotemporali (t', x') in un altro SRI **S'** che si muove con velocità v lungo l'asse x di **S**

Le origini dei due Sistemi di Riferimento Inerziali coincidono al tempo $t=t'=0$

Vogliamo quindi trovare trasformazioni lineari del tipo

$$x' = \alpha x + \beta t \quad t' = \gamma x + \delta t \quad y' = y \quad z' = z$$

Ci aspettiamo **simmetria** e **linearità** perché moti uniformi devono trasformarsi in moti uniformi in uno spazio **Isotropo** ed **Omogeneo**.

Trasformazioni di Lorentz

Supponiamo che nell'istante in cui le origini dei due SRI **S** ed **S'** coincidono, nell'origine si accenda una lampadina ...

In entrambi i SRI la luce si espanderà su una **superficie sferica** di raggio **$r=ct$** (**Invarianza della Velocità della Luce nei due SRI**)

$$x^2 + y^2 + z^2 = c^2 t^2 \qquad x'^2 + y'^2 + z'^2 = c^2 t'^2$$

$$x^2 + y^2 + z^2 - c^2 t^2 = 0 \qquad x'^2 + y'^2 + z'^2 - c^2 t'^2 = 0$$

$$x^2 + y^2 + z^2 - c^2 t^2 = x'^2 + y'^2 + z'^2 - c^2 t'^2$$

L'intervallo spazio-temporale (i quadrati delle coordinate spaziali **meno** il quadrato del prodotto **ct**) **nei due SRI è lo stesso** ...

Trasformazioni di Lorentz

Limitiamoci alla sola coordinata x ... (y e z non sono coinvolte dal moto di **S'** lungo l'asse x di **S**)

Step 1: Light pulse in both frames

Imagine a flash of light is emitted at the origin at $t = 0$.

- In frame S:

$$x = ct$$

→ light spreads at speed c

- In frame S', we must also have:

$$x' = ct'$$

So in both frames:

$$x^2 - c^2t^2 = x'^2 - c^2t'^2 = 0$$

This suggests:

$$x'^2 - c^2t'^2 = x^2 - c^2t^2$$

This condition **preserves the spacetime interval** — the key idea!

Plug into the interval:

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

Compute it:

$$= \gamma^2 \left[(x - vt)^2 - c^2 \left(t - \frac{v}{c^2}x \right)^2 \right]$$

After some algebra, this reduces to:

$$= \gamma^2 \left(1 - \frac{v^2}{c^2} \right) (x^2 - c^2t^2)$$

To preserve the interval, we must have:

$$\gamma^2 \left(1 - \frac{v^2}{c^2} \right) = 1 \quad \Rightarrow \quad \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Trasformazioni di Lorentz

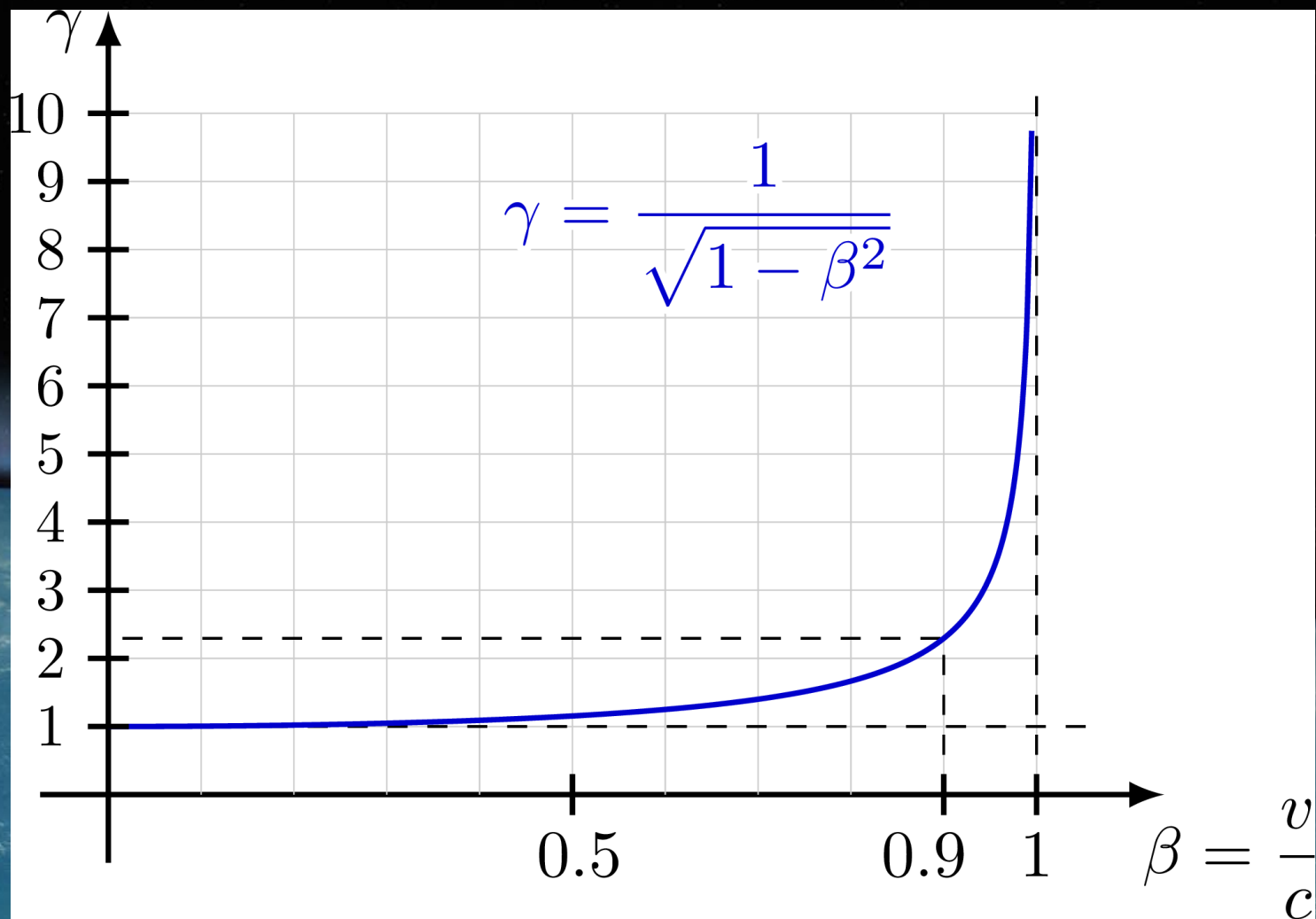
$$x' = \gamma(x - vt), \quad t' = \gamma\left(t - \frac{v}{c^2}x\right)$$

Se $x=0$ (nel sistema di riferimento della particella in moto)
abbiamo la **dilatazione del tempo** !!

con

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Fattore Relativistico
Fattore di Lorentz



Invarianti per Trasformazioni di Lorentz

1. Principio di Relatività:

1. Le Leggi della Fisica sono le stesse in tutti i Sistemi di Riferimento Inerziali (non esiste un Sistema di Riferimento privilegiato)

Quindi, dobbiamo scrivere le leggi della Fisica in modo tale che **siano le stesse in tutti i Sistemi di Riferimento Inerziali**

Un INVARIANTE è una quantità fisica che tutti gli osservatori in Sistemi Inerziali differenti possono misurare e trovare lo stesso valore.

Nello spazio ordinario il **prodotto scalare** di un vettore 3D rappresenta il suo **modulo** ed il modulo è lo stesso per ogni Sistema di Coordinate, anche dopo rotazioni e traslazioni !

Invarianti per Trasformazioni di Lorentz

Proviamo a individuare quantità fisiche INVARIANTI introducendo degli elementi che ci permettano di descrivere **EVENTI** ed il moto di oggetti in questo nuovo “spazio” in cui Spazio e Tempo sono parte di una stessa realtà, lo SPAZIOTEMPO e **non possiamo più trattarli come variabili separate.** Introduciamo quindi il quadri-vettore

$$X^\mu = (ct, x, y, z)$$

che rappresenta le coordinate di una **particella** nello SpazioTempo ... **X^μ** individua dove è ed in quale istante (EVENTO) sono misurate tutte le sue coordinate **spaziali e temporali.**

Quadri-Vettori nello SpazioTempo

La più semplice grandezza fisica **invariante** può essere il **modulo** del quadri-vettore «coordinate» nello SpazioTempo

$$X^\mu = (ct, x, y, z)$$

$$X^\mu X_\mu = s^2 = - (ct)^2 + x^2 + y^2 + z^2$$

$$X^\mu X_\mu \text{ sta per } \sum \eta_{\mu\nu} X^\mu X^\nu$$

con $\eta_{\mu\nu}$ La **metrica di Minkovsky**
-1, +1, +1, +1

L'Intervallo SpazioTemporale tra due **eventi** è un **invariante**

$$s^2 = - (ct)^2 + x^2 + y^2 + z^2$$

(per Trasformazioni di Lorentz)

È il **Modulo** del Quadri-Vettore Coordinate nello SpazioTempo !

Metrica di Minkovsky

Perché nella metrica di Minkowski viene inserito il segno negativo ?

Nel formalismo della Relatività Ristretta, l'intervallo spazio-temporale (distanza tra due eventi) Δs^2 deve essere un INVARIANTE

Il segno negativo serve a mantenere invariato l'intervallo Δs^2 sotto le trasformazioni di Lorentz.

Questo assicura che la **struttura causale** dello spazio-tempo rimanga la stessa per tutti gli osservatori inerziali.

Il tempo non è una dimensione come quelle spaziali:
scorre in una sola direzione e separa passato e futuro.

Il segno “-” nella metrica indica che la dimensione temporale ha una natura diversa dalle tre spaziali.

Serve per distinguere intervalli temporali, spaziali e luminosi, e **per far sì che la velocità della luce rappresenti un limite universale.**

Infatti, abbiamo cercato e trovato le **Trasformazioni di Lorentz imponendo che la velocità della Luce sia la stessa in tutti i Sistemi di Riferimento Inerziali.**

Quadri-Vettori nello SpazioTempo

3. Il quadrivettore velocità

Per descrivere il moto di una particella, usiamo il **tempo proprio** τ , cioè il tempo misurato da un orologio che viaggia insieme alla particella.

Definiamo allora il **quadrivettore velocità**:

$$U^\mu = \frac{dX^\mu}{d\tau} = \gamma(c, v_x, v_y, v_z)$$

dove $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-v^2/c^2}}$ è il fattore di Lorentz.

Quadri-Vettori nello SpazioTempo

4. Il quadrivettore impulso

Moltiplicando per la massa m otteniamo il **quadrivettore impulso (energia-impulso)**:

$$P^\mu = mU^\mu = (\gamma mc, \gamma m\vec{v})$$

Quindi:

- la **componente temporale** $P^0 = \gamma mc$ rappresenta l'**energia** (divisa per c),
- le **componenti spaziali** formano il **vettore impulso** $\vec{p} = \gamma m\vec{v}$.

Quadri-Vettori nello SpazioTempo

$$p^\mu p_\mu \text{ sta per } \sum \eta_{\mu\nu} p^\mu p^\nu$$

con $\eta_{\mu\nu}$ la metrica di Minkovsky

-1, +1, +1, +1

Se $E \gg mc^2$

Come per particelle negli acceleratori

$$E = pc$$

Come anche per **fotoni** che hanno massa nulla

5. L'invariante del quadrivettore impulso

Il "modulo" del quadrivettore impulso è lo stesso per tutti gli osservatori:

$$P^\mu P_\mu = -(mc)^2$$

Esplicitando le componenti:

$$\left(\frac{E}{c}\right)^2 + p^2 = -(mc)^2$$

Moltiplichiamo per c^2 :

$$E^2 = p^2 c^2 + m^2 c^4$$

Questa è la **relazione fondamentale dell'energia relativistica**.

Equivalenza Massa-Energia


$$E = mc^2$$

6. Il caso particolare della particella a riposo

Se la particella è **ferma** ($p = 0$), resta:

$$E = mc^2$$

Questo significa che **anche una particella a riposo possiede energia**, semplicemente per il fatto di avere massa.

7. Significato fisico

La relazione $E = mc^2$ ci dice che **massa ed energia sono due forme diverse della stessa cosa**.

Ogni corpo possiede un'enorme quantità di energia "immagazzinata" nella sua massa — e in certe condizioni (come nelle reazioni nucleari) può essere convertita da una forma all'altra.

Riassumendo ...

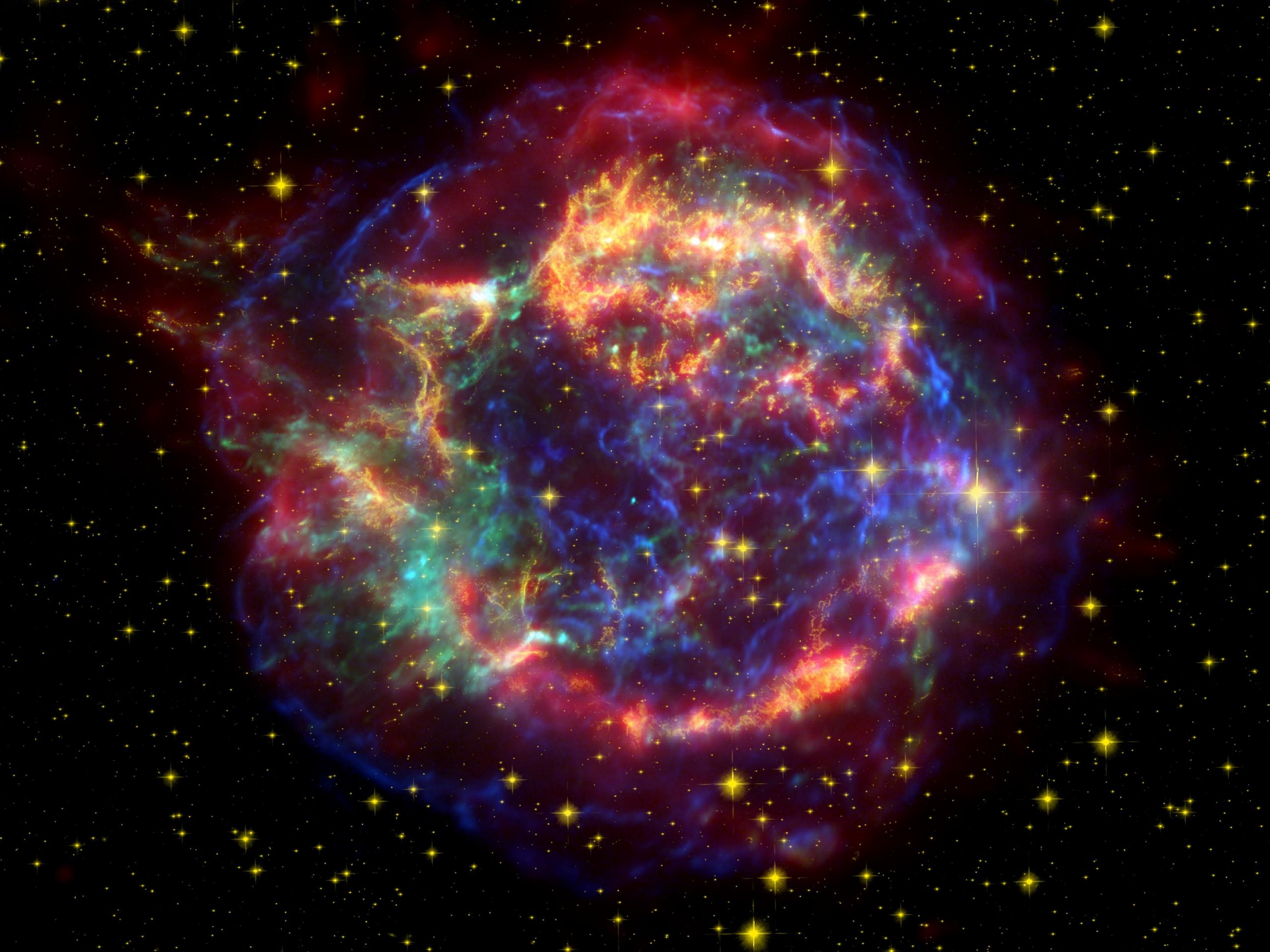
I Quadri-Vettori **unificano**
Spazio e Tempo
Energia (E) ed Impulso (mv)

$E = mc^2$ emerge naturalmente
dalla geometria dello SpazioTempo

La **MASSA** non è più solo una misura dell'Inerzia a
cambiare lo stato di moto,
MA rappresenta anche
ENERGIA di una particella a riposo.

Che cosa abbiamo imparato dalla Relatività Ristretta/Speciale ?

1. La Velocità della Luce è una Costante Fondamentale **FORSE** determinata dalla **Natura del Vuoto** (ϵ_0 and μ_0)
2. La Velocità della Luce è la stessa per tutti gli osservatori, indipendentemente dal loro moto
3. Le Leggi della Fisica sono le stesse in tutti i Sistemi di Riferimento Inerziali (non ci sono Sistemi “privilegiati”).
4. Le Leggi della Fisica devono essere scritte in forma INVARIANTE per Trasformazioni di Lorentz $ds^2 = \eta_{ik} dx^i dx^k$
5. Le “Informazioni” possono essere trasmesse solo a velocità che non superano quella della Luce – **NON sono possibili Informazioni Istantanee !!**



Relatività Generale - Che cosa è la GRAVITA' ?

Come può la Terra, girando intorno al Sole, “percepire” la MASSA e la POSIZIONE del Sole se informazioni “istantanee” a distanze finite non sono permesse dalla Relatività Ristretta ?

Dobbiamo cambiare ancora la nostra visione dello SpazioTempo ?

- Newton: La Gravità è una forza che agisce a distanza. **COME ?!**
- Einstein: Gravità è la *curvatura dello SpazioTempo* causata da massa/energia.

Principio di Equivalenza (1907)

Affermazione Centrale:

Gli effetti della gravità sono localmente indistinguibili dalla accelerazione di un Sistema di Riferimento.

Esempio concreto:

- **Scenario A:** Siamo sulla Terra (gravità: $\text{acc} = 9.8 \text{ m/s}^2$ verso il basso).
- **Scenario B:** siamo su un razzo che accelera con 9.8 m/s^2 .
- *Nessun esperimento può distinguere tra A e B se la regione è abbastanza piccola.*

Implicazione fondamentale:

La Gravità non è una forza reale – è una **forza fittizia** che emerge scegliendo un sistema di riferimento accelerato.

Dall'Accelerazione alla Curvatura

In uno SpazioTempo PIATTO (Minkowski), osservatori inerziali si muovono a velocità costanti

Ma gravità/accelerazione cambiano le traiettorie - *questo non può accadere* in uno SpazioTempo PIATTO !

Intuizione di Einstein :

se la gravità si comporta come l'accelerazione, e l'accelerazione *deforma le traiettorie*, allora la **gravità deve deformare lo SpazioTempo stesso.**

Dall'Accelerazione alla Curvatura

Eperimento Immaginario:

- **Raggio LASER su un razzo in accelerazione:**
 - spariamo un raggio LASER orizzontalmente in un razzo in accelerazione verticale. Per un osservatore esterno, **la luce curva in basso** (perché il razzo sta accelerando in direzione verticale).

Per il Principio di Equivalenza,
la stessa cosa deve accadere in un Campo Gravitazionale !

Conclusione: La Luce viene deviata in un Campo Gravitazionale → **Lo SpazioTempo non può essere PIATTO.**

Che cosa è INVARIANTE ?

- **Nella Relatività Speciale:** $ds^2 = -c^2 dt^2 + dx^2 + dy^2 + dz^2$ $ds^2 = \eta_{ik} dx^i dx^k$

- 1 +1 +1 +1

η_{ik} **Minkowski** - metrica PIATTA

- **Nella Relatività Generale:** $ds^2 = g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu$ $g_{\mu\nu}$ Cambia con la curvatura

$g_{\mu\nu}$ **Schwarzschild** - metrica CURVA

Punto Fondamentale:

- Gli osservatori possono non concordare su Tempo e Spazio,
MA concordano su **Intervalli SpazioTemporali**.

Intervalli SpazioTemporali SONO INVARIANTI ! (per Trasformazioni di Lorentz)

Equazione di Campo di Einstein

- L'Equazione Fondamentale:

$$G_{\mu\nu} = (8\pi G/c^4) T_{\mu\nu}$$

- Lato sinistro ($G_{\mu\nu}$): Curvatura dello SpazioTempo (Geometria).
- Lato Destro ($T_{\mu\nu}$): Distribuzione Massa-Energia (Fisica).
- Significato semplificato :
La Massa (del Sole) curva lo SpazioTempo
Lo SpazioTempo curvato determina il moto dei pianeti.

Predizioni e Conferme

- 1. Orbita di Mercurio:** Precessione descritta da RG ($43''/\text{secolo}$).
- 2. Deviazione della Luce:** Confermata nell'Eclissi solare del 1919 ... + Einstein RINGS
- 3. Rallentamento Gravitazionale del Tempo:** il Tempo avanza più lentamente vicino alla Terra (GPS deve correggere per questo effetto !).
- 4. Onde Gravitazionali:** Rilevate da LIGO nel 2015 ed effettivamente, come previsto nel 1916, ... **si muovono alla Velocità della Luce !!**

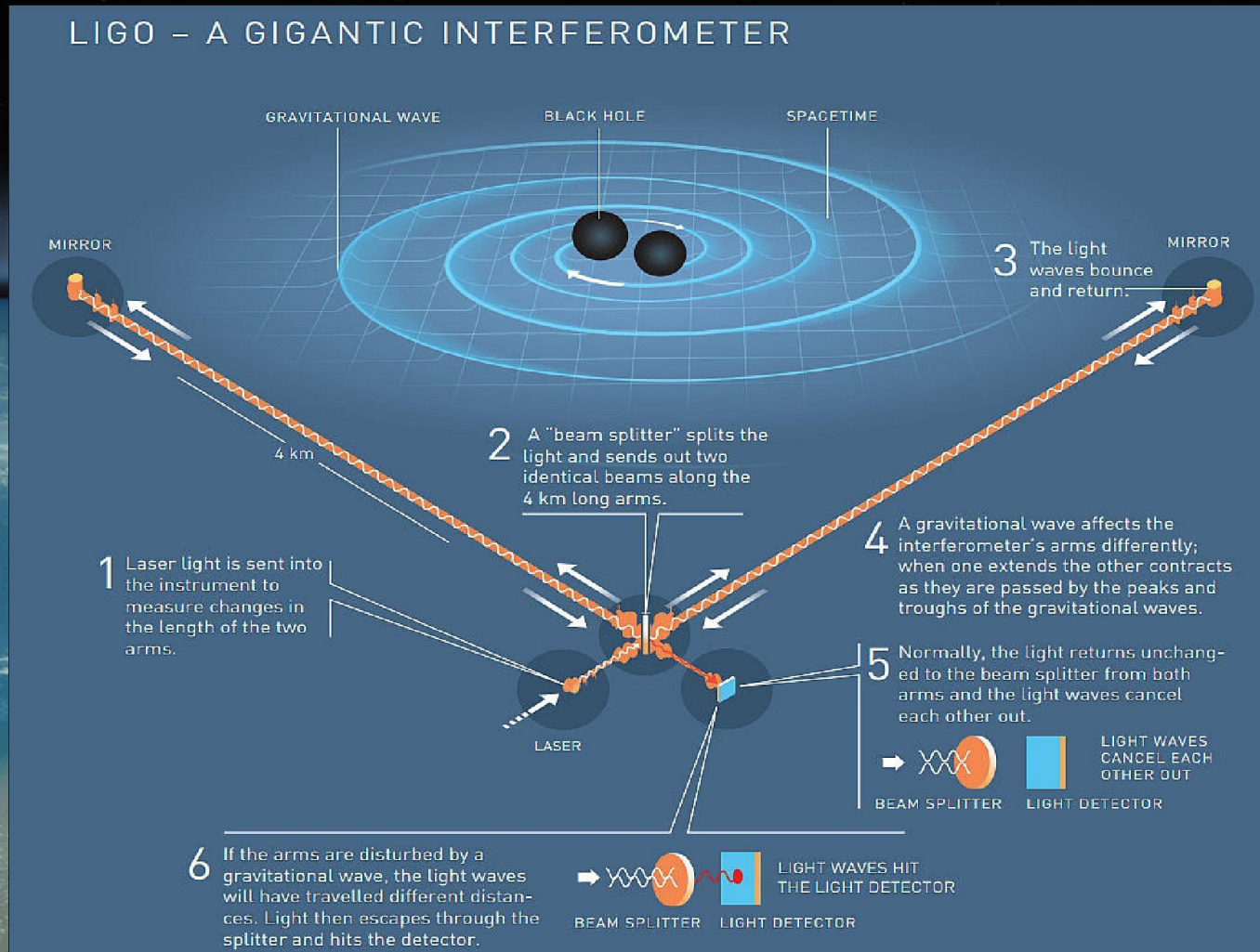
Perché la RG è Fondamentale oggi ?

- **Cosmologia:** Buchi Neri, Big Bang, Espansione dell'Universo, Energia Oscura.
- **Technologie:** GPS, Astronomia con le Onde Gravitazionali e Multi Messaggeri (OG, Neutrini, Raggi Gamma ...)
- **Misteri Non Risolti :** **Gravità Quantistica**, black hole information paradox.

*"The universe is not only stranger than we imagine, **it's stranger than we can imagine.**" — J.B.S. Haldane*

Interferometri per Onde Gravitazionali

<https://www.eoportal.org/other-space-activities/ligo#precision-characterization>



Gravitational Waves Interferometers

- https://www.einstein-online.info/en/spotlight/gw_detectors/



Interferometri per Onde Gravitazionali

- The state of the art in search of gravitational waves are the interferometric detectors which have been under development since the 1980s and whose technology continues to be improved and refined. There are currently the following projects:
- **GEO600** has an arm-length of **600m** and is located in Ruthe, **Germany** (near Hanover). It is operated by the Max Planck Institute for Gravitational Physics in Hanover. The GEO collaboration consists of 250 members and is part of the LIGO scientific collaboration.
- **LIGO** is an abbreviation for “Laser Interferometer Gravitational Wave Observatory”. The LIGO project has two interferometric detectors in the United States, “Advanced LIGO”, each with arm lengths of **4 kilometres**. They are located in **Hanford**, Washington State, and **Livingston**, Louisiana State. A third detector of the LIGO network has been under construction in India in 2020.
- **VIRGO** is an European detector with an arm-length of **3 kilometres** near **Pisa** in Italy. The initial detector, Virgo, was upgraded to achieve 10 times higher sensitivity and started operation as Advanced Virgo in 2017.
- **KAGRA** (Kamioka Gravitational Wave Detector) is an underground gravitational wave detector in the Kamioka mine in **Japan**. It uses cryogenic technology, which means that the mirrors are cooled down to **20 Kelvin** in order to reduce thermal noise. The detector has been in operation since 2020.

Antenne Risonanti per Onde Gravitazionali

- The first type of gravitational wave detectors were resonant mass antennas. The center piece of such a detector is a **solid metal object**. Passing gravitational waves make that central test-mass oscillate, and these oscillations can be measured and amplified to detect the gravitational waves.
- Such antennas were set up in Rome (NAUTILUS) and **Legnaro** (**AURIGA**), Italy, in Geneva (EXPLORER) , Switzerland, in the US (ALLEGRO), and in Perth (NIOBE), Australia, forming the International Gravitational Event Collaboration.
- the sensitivity of these early instruments did not seem to allow efficient detection of gravitational waves. However, third generation resonant mass antennas, which use spherical test masses, are still in operation at Leiden (MiniGRAIL), The Netherlands, and Sao Paulo, Brazil (Mario Schenberg).

- Infine ... un **DUBBIO** Notevole !

- Abbiamo visto che la Velocità della Luce nel Vuoto (lo SpazioTempo !) **SEMBRA (per Maxwell)** essere **determinata** dalle proprietà del Vuoto stesso (ϵ_0 and μ_0) e abbiamo visto che la Luce è un **Campo Elettromagnetico Variabile che si propaga nello SpazioTempo** (the «Vacuum»)
- Perché anche le «Increspature» (Deformazioni) dello **SpazioTempo stesso**, ovvero le **Onde Gravitazionali**, **viaggiano anche alla Velocità della Luce ?**
- **Sono due fenomeni fisici completamente diversi !!**

Però è INTUITIVO ...

che una **VELOCITA' LIMITE** deve necessariamente esserci !!

• Un DUBBIO Notevole ! Risposta ...

Il contesto fisico qui non è che un tipo di onda (**Campo E.M. - Luce**) abbia la stessa velocità dell'altra (**Onda Gravitazionale**) per una sorta di coincidenza,

ma piuttosto che **entrambe hanno il limite di velocità associato allo spaziotempo stesso.**

Le velocità di entrambe le onde sono ovviamente previste dalle equazioni che descrivono i diversi fenomeni fisici (equazioni di Maxwell ed equazioni di Einstein),

ma non è una coincidenza che entrambe abbiano la stessa velocità

Perché questa velocità è parte della natura dello spaziotempo.

Le equazioni di Maxwell sono praticamente l'insieme di equazioni più semplice che si possa trovare per un campo ondulatorio che rispetti il principio di relatività in uno spaziotempo con un limite di velocità.

L'equazione di Einstein è praticamente la più semplice in grado di esprimere un legame tra materia e proprietà geometriche dello spaziotempo.

Un DUBBIO Notevole ! Risposta ...

Quando affermiamo che lo spaziotempo stesso ha un limite di velocità naturale, non abbiamo bisogno di fare riferimento alla luce, alla gravitazione o a qualsiasi altro tipo di perturbazione.

Piuttosto, l'affermazione **riflette i tipi di entità fisico-matematiche che descrivono accuratamente i fenomeni fisici.**

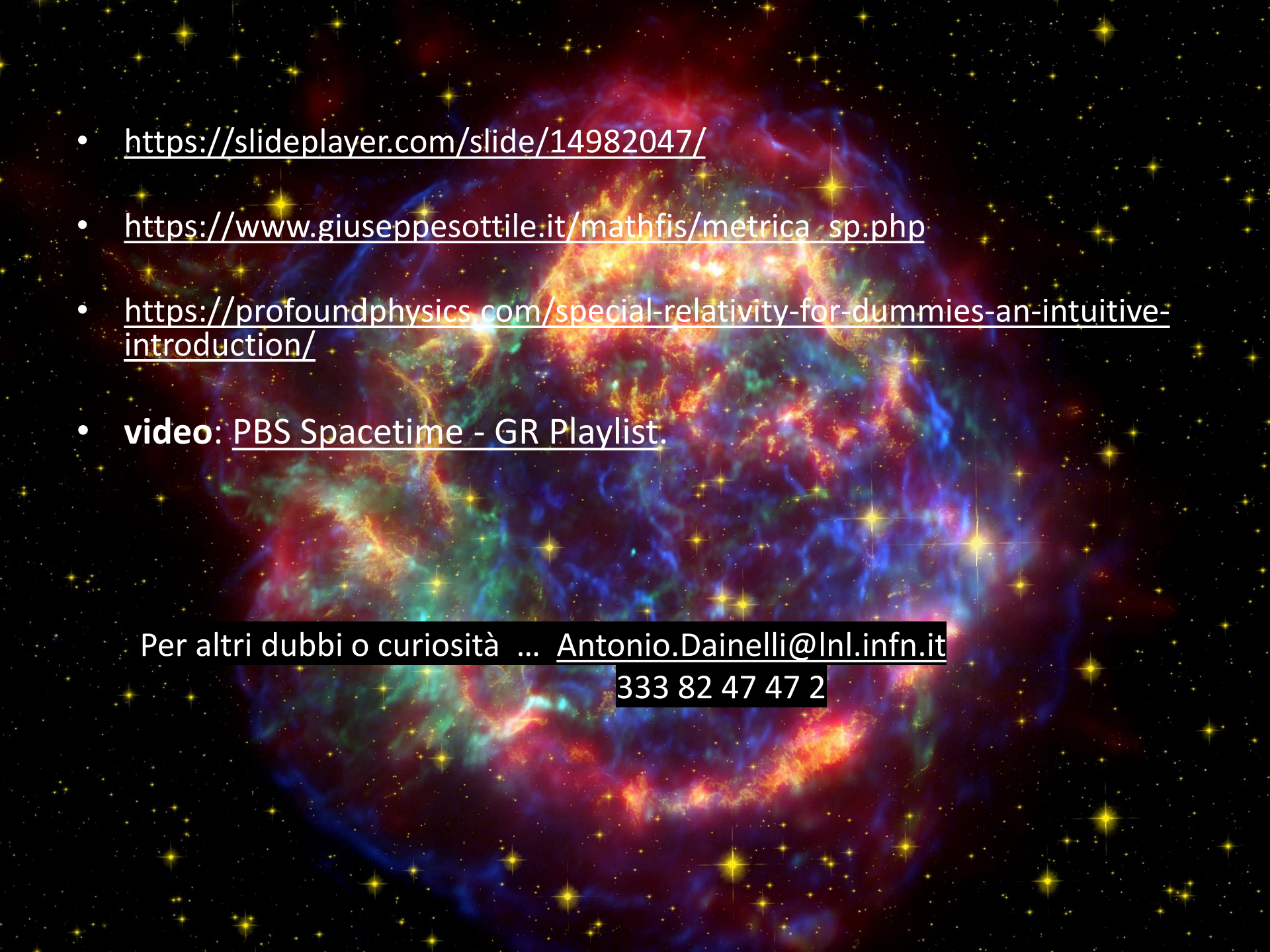
In questo caso, queste entità sono chiamati **tensori** e **spinori**, e possiedono determinate proprietà simmetriche che consentono loro di **esprimere correttamente il modo in cui le separazioni temporali e spaziali si relazionano tra loro quando un dato fenomeno viene considerato dalla prospettiva di diversi sistemi di riferimento.**

In tale contesto, si scopre che **nessun segnale di alcun tipo** (dove per "segnali" intendiamo influenze che possono consentire a un evento di influenzarne un altro) **viaggia più velocemente della Velocità Limite**, e i **fenomeni fisici più semplici si verificano alla Velocità Limite.**

Una «Risposta Intrigante» ...

E con questa «Risposta Intrigante» vi lascio sperando che tutto quello che abbiamo solo intravisto vi abbia entusiasmato abbastanza da farvi venire la voglia di affrontare nel modo giusto questi argomenti ed in particolare la «Risposta Intrigante» vi faccia venire la voglia di indagare a fondo ...

Ci sono ancora tanti aspetti interessanti da indagare ...

- 
- <https://slideplayer.com/slide/14982047/>
 - https://www.giuseppesottile.it/mathfis/metrica_sp.php
 - <https://profoundphysics.com/special-relativity-for-dummies-an-intuitive-introduction/>
 - **video:** [PBS Spacetime - GR Playlist.](#)

Per altri dubbi o curiosità ... Antonio.Dainelli@Inl.infn.it

333 82 47 47 2