



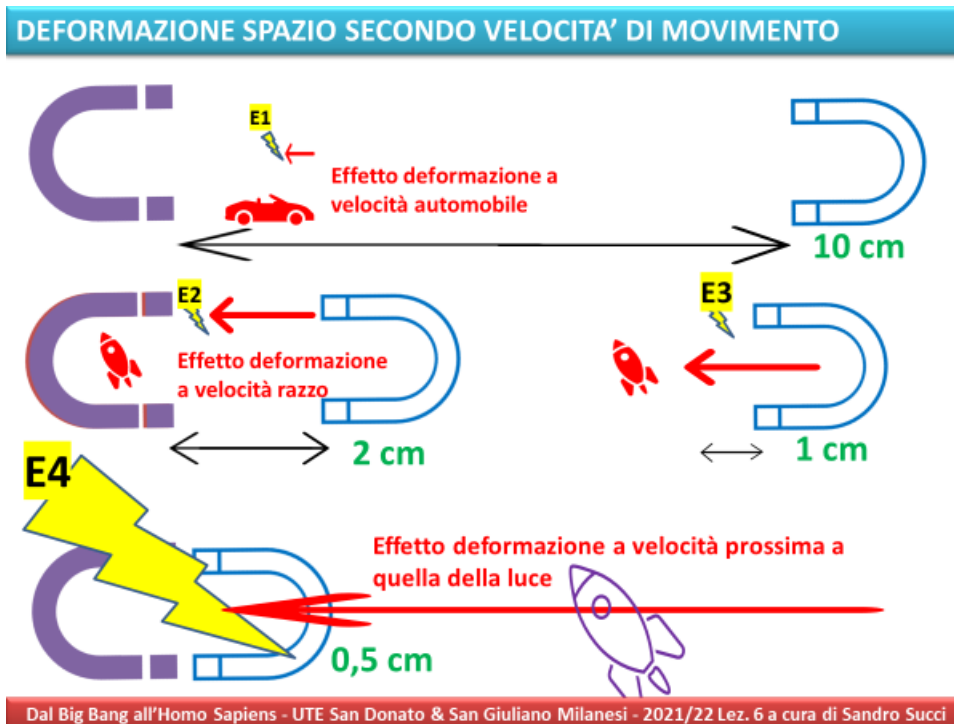
Einstein ci ha fatto capire che la gravità non è una forza magica che attira i corpi tra loro (una specie di attrazione magnetica che si ha tra due calamite) ma invece è solo la deformazione dello spazio-tempo che obbliga i corpi più piccoli ad entrare nell’affossamento provocato dai corpi più massicci nel tessuto spaziotemporale.



Nell'Universo descritto dalla Relatività, le misure di intervalli temporali e di lunghezze spaziali non corrispondono a quello che noi percepiamo, dando luogo a fenomeni come la dilatazione del tempo e la contrazione delle lunghezze, che sono espressione dell'unione dello spazio tridimensionale e del tempo in un'unica entità quadridimensionale chiamata appunto *spazio-tempo* nella quale si svolgono gli eventi.

Ma perché noi non percepiamo questi effetti?

Proviamo con questo esempio:



Immaginiamo due calamite a distanza di 10 cm. Sappiamo che esiste un campo magnetico che tende ad attrarle ma a 10 cm di distanza non se ne vedono gli effetti. Vedete come è piccolo l’effetto E1? Allo stesso modo possiamo immaginare che la velocità con cui si muove un’automobile, rispetto alla velocità della luce, abbia lo stesso effetto (E1) sulla distorsione spazio-temporale, paragonabile, appunto, all’attrazione delle due calamite a 10 cm di distanza.

Ora immaginiamo di aver avvicinato le due calamite a 2 cm di distanza. Gli effetti (E2) sono ancora molto piccoli e non percepibili, allo stesso modo che avrebbe la deformazione spazio-tempo se si viaggiasse alla velocità di un razzo.

A 1 cm cominciamo a percepire l’effetto del campo magnetico che attrae le calamite, (E3), lo stesso effetto che avrebbe la deformazione spazio-tempo se si viaggiasse alla velocità di un’astronave. Poco ma si cominciano a vedere gli effetti

Quando le due calamite sono a mezzo centimetro di distanza l’effetto attrattivo del campo magnetico diventa molto forte. Fatichiamo....Questo effetto, E4, vedete come è grande? è paragonabile alla distorsione spazio-tempo che influirebbe su una astronave relativistica che viaggiasse a velocità prossima a quella della luce.

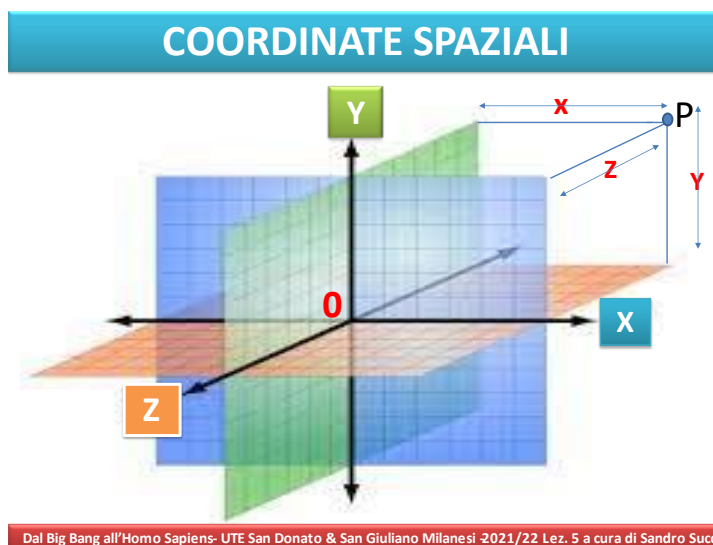
Ciò significa che come per le calamite l'effetto significativo si raggiunge solo quando la loro distanza è minima o nulla, anche gli effetti della distorsione spazio-temporale, dovuti alla velocità, si evidenziano soltanto quando si è molto vicini alla velocità massima che è quella della luce.

Insomma, sia l’attrazione magnetica che la distorsione spazio-tempo evidenziano i loro effetti macroscopici solo a fondo scala.

Se la nostra astronave relativistica viaggiasse alla velocità della luce la distorsione spazio-temporale diventerebbe massima, il tempo si arresterebbe e la massa dell’astronave diventerebbe infinita.

Vediamo che cosa significa, o meglio che cosa rappresentiamo, con spazio-tempo.

COORDINATE SPAZIALI CARTESIANE



Dal Big Bang all’Homo Sapiens- UTE San Donato & San Giuliano Milanese 2021/22 Lez. 5 a cura di Sandro Succi

Orbene con spazio-tempo identifichiamo, e quindi rappresentiamo, quattro dimensioni. Di queste quattro dimensioni, tre, sono dimensioni riferite allo spazio che conosciamo benissimo, sono la larghezza (x) rappresentata in azzurro, l’altezza (y) rappresentata in verde, e la profondità (z), rappresentata in arancione.

La quarta dimensione è il tempo.

Alla parola spazio daremo il valore risultante alla semplice domanda, dove si trova il punto P?

La risposta a questa domanda è ovvia: ho bisogno del valore delle tre coordinate, cioè quanto vale X rosso, quanto vale Y rosso, e quanto vale Z rossa.

Ecco all’incrocio di queste tre grandezze si trova il punto P

Pertanto, se prendiamo un oggetto qualsiasi, esso avrà delle coordinate precise e quindi la sua esatta collocazione nello spazio.

Ma aggiungendo una caratteristica che determina il **momento** in cui definiamo queste coordinate per trovare questo oggetto stiamo già parlando di **spazio-tempo**.

SUCCESSIONE EVENTI SPAZIO-TEMPO

ORE	11:20	11:21	11:22
Km	200	200	201
	EV1	EV2	EV3

Dal Big Bang all’Homo Sapiens- UTE San Donato & San Giuliano Milanese -2021/22 Lez. 6 a cura di Sandro Succi

Per semplificare, se prendiamo un oggetto, ad esempio, un’automobile che percorrere l’autostrada del Sole, ipotizziamo che alle 11:20 si trovi a percorrere il km 200.

Ecco, nella definizione spazio-tempo abbiamo che l’automobile si trova al Km 200 nello spazio, e alle 11:20 nel tempo. Ciò che abbiamo appena descritto viene indicato come **EVENTO** (EV 1).

Dove si trova la macchina alle 11:21? Se la macchina si trovasse ancora al km 200 (Km 200 nello spazio e alle 11:21 nel tempo) avremo un **secondo evento** (EV 2) e in più una informazione che consiste nello scoprire che tra il primo e il **secondo evento** la macchina non si è mossa nello spazio. La macchina è stata ferma. Ha viaggiato solo nel tempo. Ma se alle 11:22 si trovasse al km 201 vorrebbe dire che la macchina si è mossa sia nello spazio che nel tempo e avremmo ottenuto il **terzo evento** (EV 3). E così via, evento dopo evento, vedremo viaggiare la macchina nello spazio-tempo.

Relatività spiegata in concreto: GPS e la dilatazione del tempo

Iniziamo cercando di sfatare il mito che ritiene che la Teoria della Relatività, nella nostra vita quotidiana, sia priva di conseguenze pratiche.

Nella vita di tutti i giorni, in effetti, ci sembra impossibile considerare il tempo, altro, se non un inesorabile scorrere di ore, minuti e secondi dalla durata inalterabile. Grazie ad Einstein sappiamo che ciò non è vero, in determinate condizioni, il flusso del tempo può scorrere diversamente.

Un esempio entrato ormai nell’immaginario collettivo è il cosiddetto *paradosso dei gemelli*:



Ora supponiamo che uno dei due gemelli rimanga a casa e che uno dei due parta e vada a farsi un viaggio a velocità molto elevate, paragonabili a quella della luce.

Pro una parentesi, perché serve che la velocità dell’astronave sia vicina a quella della luce? Beh, perché l’effetto della dilatazione del tempo, come ho detto poco fa con l’esempio delle due calamite, si comincia a sentire quando l’astronave si muove a velocità prossima a quella della luce.

Quindi man mano che la velocità dell’astronave si avvicina a quella della luce questo effetto si fa più evidente.

Supponiamo che il gemello viaggiatore rimanga in viaggio per dieci anni, e che poi decida di tornare indietro, che cosa succederebbe? Beh, il suo orologio (altra parentesi, per parlare di orologio ci deve essere qualche cosa di periodico, un fenomeno fisico periodico ma naturale, ad esempio, il suo battito cardiaco. Supponiamo che non abbia aritmie come il mio, ma sia costante, 70 pulsazioni al minuto, questo è un fenomeno periodico naturale, quindi un orologio, il suo orologio).

Cioè in altre parole, la sua vita, il suo tempo biologico vengono scanditi dal ritmo del suo cuore. A pensarci bene il nostro cuore è il nostro orologio personale.

Viaggiando a quella velocità, l’orologio del gemello viaggiatore rallenterà rispetto a quello del gemello rimasto a terra. Pertanto, quando il gemello viaggiatore ritorna, a causa della dilatazione che ha subito il suo tempo, sarà più giovane dell’altro rimasto a terra.

Questo potrebbe essere un bell'argomento per le agenzie di viaggio che potrebbero sfruttarlo per motivi pubblicitari.

Viaggiare fa rimanere giovani, perché quando si viaggia il nostro tempo passa più lentamente, anche se quando viaggiamo ci sembra l'esatto contrario e cioè che passi più velocemente.

Beh, la cosa interessante è che questo fenomeno (la dilatazione del tempo) è stato verificato ormai milioni di volte, quindi non si tratta soltanto di ipotesi, ma di cose che succedono veramente, non nel senso che qualcuno possa partire e vada a farsi viaggi intergalattici, perché ancora non abbiamo delle astronavi che vanno a quelle velocità, ma ci sono prove inconfutabili sulla realtà di questo fenomeno. Per esempio, ci sono particelle che si creano all'interno del sole durante dei fenomeni nucleari. Sono particelle che anche noi riusciamo a creare qui sulla terra in laboratorio, constatando che hanno una vita media molto breve, alcuni secondi. Cioè queste particelle nascono, durano qualche secondo e poi come si dice in gergo, si annichilano, semplicemente scompaiono, muoiono.

La cosa strana è che queste stesse particelle, quando si creano sul Sole, abbiano il tempo di arrivare fino a noi. Come è possibile se vivono solo qualche secondo. Come è possibile che riescano a percorrere una distanza Sole Terra, distanza per la quale la luce impiega otto minuti?

Ecco la soluzione. Le particelle vivono effettivamente pochi secondi ma a noi sembra che vivano molto più a lungo, semplicemente perché noi misuriamo il tempo col nostro orologio, qui, sulla Terra.

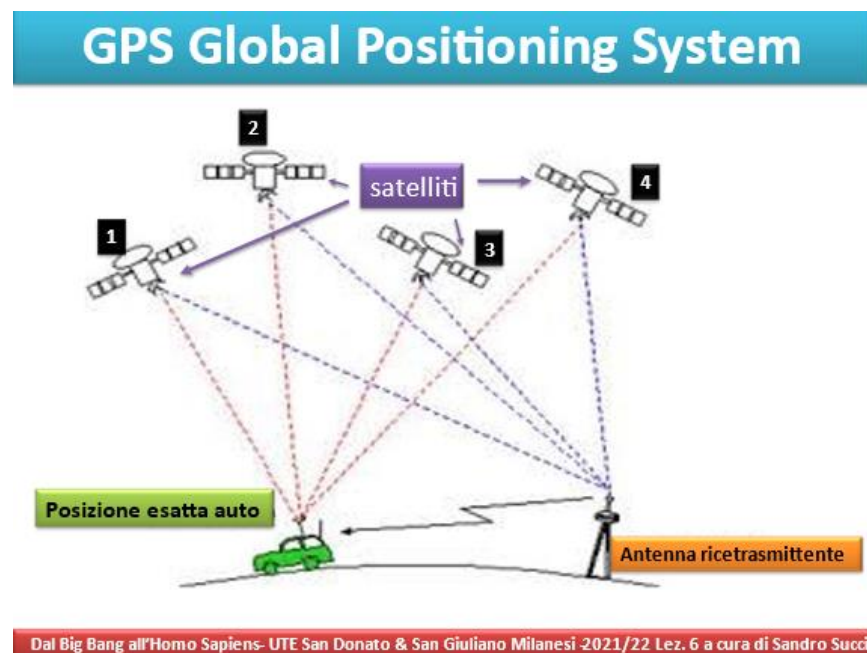
Ma se misurassimo il tempo col suo orologio, ci saremmo accorti che la particella è vissuta solo pochi secondi.

Ci sarebbe stata una dilatazione dei tempi e quindi quella che per le particelle è una breve vita, a noi appare, per l'appunto, una vita molto più lunga.

La stessa cosa accade per i fotoni (particelle o quanti che trasportano la luce), noi misuriamo in otto minuti il trascorrere del tempo perché giungano sulla terra, col nostro orologio.

Ma se misurassimo il tempo con l’orologio del fotone ci accorgeremmo che il fotone è partito ed arrivato nello stesso momento. Per lui, che ovviamente viaggia alla velocità della luce il tempo è zero, e anche lo spazio percorso è zero. In pratica l'Universo di quel fotone sarebbe un punto senza dimensioni e senza tempo.

C’è da domandarsi cosa c’entri tutto questo discutere dei tempi, nostri o di chi viaggia, dei fotoni, con lo smartphone che abbiamo in tasca. Beh, oggi, la gran parte di questi preziosi oggetti funge anche da navigatore satellitare.



Semplificando, il funzionamento del navigatore è il seguente: per rendere possibile la nostra localizzazione il sistema GPS deve effettuare una misura molto precisa del tempo che il segnale radio emesso dai satelliti impiega per raggiungere il nostro cellulare. La precisione richiesta affinché si definisca la posizione con una tolleranza di un metro è dell’ordine dei miliardesimi di secondo. Affinché ciò avvenga devono essere sempre visibili, da ogni punto della Terra, almeno quattro satelliti. Tre serviranno per triangolare la nostra posizione sulla superficie terrestre ed il quarto per “sincronizzare” l’orologio del telefono con quelli dei satelliti, permettendo così una localizzazione molto precisa (Il quarto satellite, quello che sincronizza, è

necessario in quanto l’orologio del telefonino è molto meno preciso di quello a bordo dei satelliti e quindi le incognite del sistema sono quattro: le 3 coordinate spaziali ed il tempo)

Vediamo ora dove entra in gioco la Relatività. Dato che i satelliti viaggiano intorno alla Terra ad una velocità di circa 14.000 km/h gli effetti relativistici iniziano a farsi sentire. Come nel caso del gemello astronauta, il tempo a bordo del satellite scorre più lentamente che sulla Terra e ogni giorno il suo orologio perde 38 microsecondi rispetto a quello del telefonino, ritardo che, se non venisse corretto in base alle leggi della Relatività, porterebbe ad un errore di localizzazione di ben 10 km al giorno, rendendo il navigatore inutilizzabile.



IL TEMPO STA CAMBIANDO:

La rivoluzione concettuale della Relatività Generale è che la presenza di grandi masse ed energie (per esempio un pianeta o una stella) altera la metrica spaziale, cioè le distanze che così possono addirittura variare con il tempo!

Secondo la Relatività Generale, è l’unità di misura spazio-temporale con cui misuriamo le distanze tra le galassie, in termini tecnici la metrica, dicevamo, è QUESTA unità di misura che cambia con il tempo. È come avere un metro elastico che si può estendere o restringere così che le tacche su di esso diventino più rade o più fitte.

Ora, ADESSO, NEL TEMPO CHEN STIAMO VIVENDO il metro si sta restringendo, nel senso che tra due punti o tra due galassie le tacche del metro aumentano. L'effetto nella nostra mente (che ragiona in termini euclidei) è che l'Universo si espanda. La differenza è, che con il metro che si restringe, l’espansione non ha bisogno di occupare uno spazio più grande. In questo modo non abbiamo bisogno di pensare a palloncini o panettoni che si espandono e poi cancellare quello che c’è fuori. Questo ci ha fatto scoprire la Teoria della Relatività Generale.

Per visualizzare la cosa faccio un esempio. Immaginate di essere dentro una stanza, per semplicità quadrata, e avere un metro per misurare la distanza tra le pareti. Il primo giorno effettuate la misura e la stanza risulta lunga 2 metri. Il secondo giorno 2 metri e 40 centimetri. Il terzo 3 metri, e così via. O la stanza si sta espandendo invadendo il soggiorno o...il metro si sta rimpicciolendo! Per quanto assurda possa suonare questa seconda opzione, questo è proprio quello che accade nell'Universo.

METRICA SPAZIO TEMPORALE

VELOCITA' ASTRONAVE

=1/3 VELOCITA' DELLA LUCE

DISTANZA ALFA CENTAURI

=4.36 ANNI LUCE

DURATA VIAGGIO CALCOLATA A TERRA

=13.08 ANNI

DILATAZIONE DEL TEMPO A VELOCITA' 1/3 DELLA LUCE

= 6%

DURATA VIAGGIO PER ASTRONAUTI

= 12.34 ANNI

DISTANZA ALFA CENTAURI PER ASTRONAVE

=4.11 ANNI LUCE

Dal Big Bang all’Homo Sapiens- UTE San Donato & San Giuliano Milanese -2021/22- Lez. 5 a cura di Sandro Succi

La dilatazione del tempo e la contrazione delle distanze alle alte velocità si implicano reciprocamente: dove c’è l’una c’è anche l’altra. Per comprendere la ragione di questa correlazione, immaginiamo di essere a bordo di un’astronave. Siamo in viaggio a velocità costante pari a $\frac{1}{3}$ della velocità della luce (100.000 km/sec) verso Alfa Centauri, la stella più vicina a noi. Nel sistema di riferimento della Terra, Alfa Centauri è distante **4,36** anni luce dal nostro pianeta e il viaggio dovrebbe durare **13,08** anni.

Invece, nel sistema di riferimento

astronave cioè per chi si trova sull’astronave, il viaggio dura di meno. Infatti, a causa della dilatazione del tempo, che a 100.000 km/sec è pari al **6%**, Alfa Centauri può essere raggiunta in soli **12,34** anni. Ora, se per l’astronave e i suoi occupanti il viaggio è più breve di alcuni mesi pur essendo la loro velocità sempre pari a 100.000 km/sec, allora non ci sono alternative: la distanza da percorrere deve essere minore rispetto a quella calcolata sulla Terra. Alfa Centauri, per gli occupanti dell’astronave, non dista più 4,36 anni luce, ma “solo” **4,11** anni luce. Lo spazio, per loro, si contrae di circa il 6% nella direzione del moto: la destinazione è più vicina. Ma se la distanza effettiva è di 4,11 anni luce e noi invece ne misuriamo 4,36, ciò dimostra che la nostra unità di misura, il nostro metro, si è contratto e la distanza tra le tacche è diminuita e pertanto ha calcolato una distanza maggiore.

LA TEORIA DELLA RELATIVITÀ

$$E = mc^2$$

Energia
Massa
Velocità

$E=mc^2$ è la formula della teoria della Relatività Ristretta partorita dal suo genio con l’ambiziosa volontà di descrivere l’essenza del mondo e dell’universo in un’unica semplice equazione. Ciò che vediamo, percepiamo, tocchiamo, respiriamo, e tutte le creature viventi (compresi noi) esistono, perché l’equazione è vera e, tutto e tutti, si riferiscono a essa.

Ma veniamo alla famosa equazione $E = mc^2$

Siamo nel 1915.

All’ultimo minuto Einstein ebbe un ripensamento. Mancava qualcosa. Riprese in mano l’articolo che aveva preparato per la prestigiosa rivista scientifica *Annalen der Physik*, e aggiunse un *post-scriptum*, tre pagine vergate con grafia nitida e ordinata, per illustrare un’ultima, inevitabile conseguenza della sua teoria: l’energia è equivalente alla materia,

$$E = mc^2.$$

Così, la formula più famosa dell’intera storia della scienza comparve per la prima volta nel *post-scriptum* di un articolo firmato da Albert Einstein, un oscuro impiegato dell’Ufficio brevetti di Berna.

Questa formula afferma che l’impalpabile energia si può trasformare in concreta materia, e viceversa... un evento quasi magico ma (forse proprio per questo) comprensibile a tutti. Il resto della Teoria della Relatività, invece, è più difficile da digerire: per comprenderla bisogna capovolgere ciò che ci dicono i sensi, l’esperienza e perfino i vecchi libri di fisica.

La Teoria della Relatività introduce quindi il concetto di una nuova prospettiva temporale causata dalla velocità.

**Se è vero che $E=mc^2$
allora è vero
che $m=E/c^2$**

Ogni corpo che si sposti a una velocità prossima a quella della luce si accorcia, diventa più pesante e subisce un rallentamento del tempo. Per poter continuare ad accelerare il corpo in oggetto occorrerà sempre più Energia. Più ci si avvicina alla velocità della luce e più l'oggetto diventa massiccio. Perché la Massa m , aumenta proporzionalmente all'aumentare dell'Energia E .

la Massa altro non è che una forma di Energia

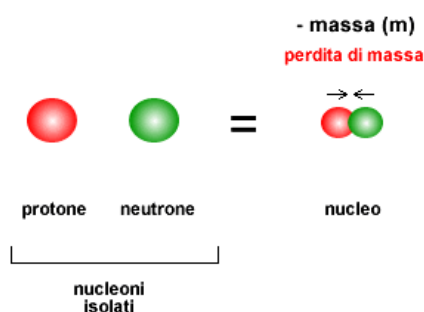
Dal Big Bang all’Homo Sapiens - UTE San Donato & San Giuliano Milanese - 2021/22 Lez. 6 a cura di Sandro Succi

Secondo le vecchie teorie, continuando a spingere un corpo la sua velocità dovrebbe aumentare all’infinito, e questo è impossibile: nulla può andare più veloce della luce. Che cosa succede, allora? Semplice: l’energia fornita non incrementa la velocità del corpo, ma la sua massa: il corpo diventa sempre più “pesante”. In questo senso, la massa non è che una forma di energia.

Infatti, per poter mantenere il corpo in oggetto alla velocità prossima a quella della luce, essendo esso diventato più pesante, occorrerà sempre più energia per farlo accelerare ancora; questo fa sì che più ci si avvicina alla velocità della luce e più l'oggetto diventa massiccio. Perché la massa, (in funzione dell’equazione $E=mc^2$ da cui $m=E/c^2$) aumenta con l’aumentare dell’energia, perché restando c^2 costante, l’aumento di energia necessaria a mantenere il corpo in accelerazione, E , si trasforma in aumento della massa, m .

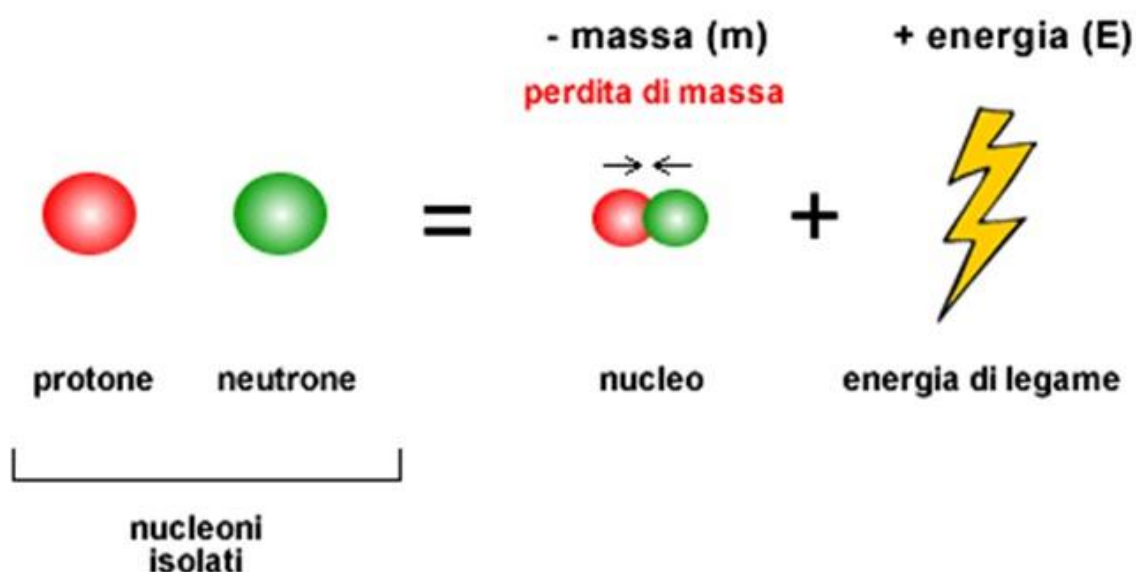
Pertanto, il corpo diventa sempre più “pesante”. In questo senso, la massa non è che una forma di energia.

La relazione di equivalenza tra massa ed energia è una delle fondamenta della fisica nucleare e della Teoria della Relatività di Einstein. Ha avuto diverse conferme sperimentali. Un esempio pratico di equivalenza.



Quando due particelle si avvicinano tra loro, scatta una forza di attrazione detta interazione nucleare forte. Le due particelle sono attratte l'uno all'altra, fino a unirsi e formare un nucleo atomico (fusione nucleare).

Tuttavia, dopo l'unione, le particelle hanno una massa inferiore. Hanno perso una parte della loro massa originaria. Dove è andata a finire la massa mancante? La massa mancante delle due particelle si è trasformata nell'energia che le tiene unite l'una all'altra.



Dal Big Bang all’Homo Sapiens - UTE San Donato & San Giuliano Milanese - 2021/22 Lez. 5 a cura di Sandro Succi

In breve, una parte della massa (m) delle particelle si è trasformata in energia (E). Questa equivalenza tra massa ed energia è spiegata, appunto, con l'equazione di Einstein.

L'elemento rivoluzionario della formula risiede nel fatto che la massa, fino a quel momento ritenuta una grandezza fisica indipendente, è messa in relazione con l'energia stabilendo la *equivalenza massa-energia* e, di conseguenza, il *principio di conservazione massa-energia*.

E il 6 agosto 1945, con il lancio della bomba atomica su Hiroshima, il mondo ebbe la dimostrazione più convincente di questo principio.