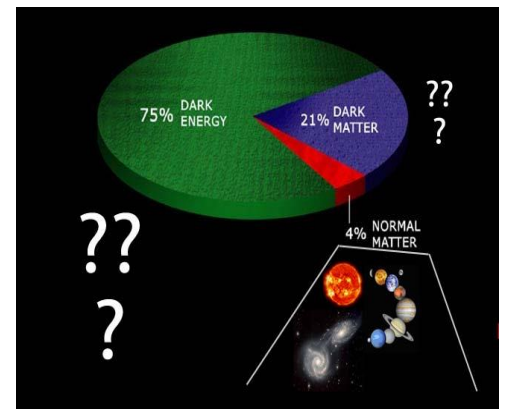


IL DUPLICE MISTERO DELLA MATERIA OSCURA E DELL'ENERGIA OSCURA

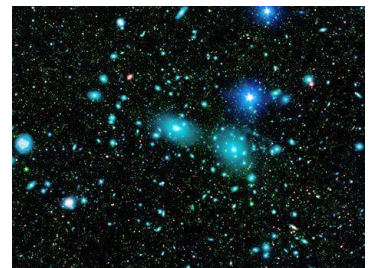
Solo recentemente si è venuti a conoscenza che la materia ordinaria di cui è composto il nostro universo, quindi ad esempio noi, i pianeti, le stelle, le galassie, può giustificare solo una piccola percentuale di quello che è contenuto nell'universo. Quasi un quarto di tutta la materia nell'universo è costituito di sostanza invisibile, ovvero si intende materia che non assorbe, non emette, non riflette e non interagisce con lo spettro elettromagnetico.

Nonostante ciò, si conosce la sua esistenza grazie agli effetti gravitazionali: in effetti, questa **materia oscura** domina le forze gravitazionali di tutto l'universo. Per quanto riguarda il resto dell'energia dell'universo, invece, è composta da una sostanza misteriosa chiamata **energia oscura**.



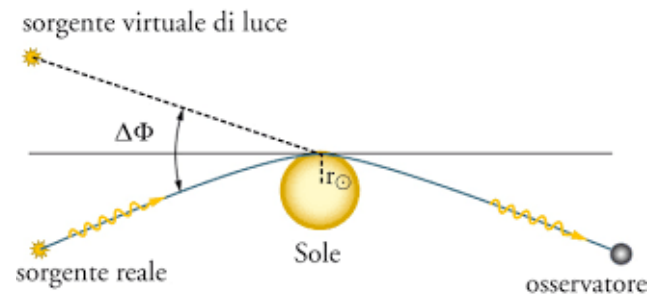
Dimostrazione dell'esistenza della materia ed energia oscura

Tutte le galassie sembrano essere avvolte in una nuvola di questa invisibile materia oscura; essa è molto più sferica delle galassie stesse e si estende per un raggio molto più vasto della galassia. Noi vediamo la galassia, ma in realtà è la nuvola di materia oscura a dominare la struttura e le dinamiche stesse della galassia. Le galassie inoltre non si trovano sparse a caso nello spazio, tendono a formare un ammasso, come il famoso ammasso della Chioma. Queste galassie si muovono a velocità altissime e si muovono intorno al pozzo gravitazionale creato dall'ammasso; possiamo misurare le velocità orbitali di queste galassie e quindi ricavare quanta massa esiste in questi agglomerati. Scopriamo che c'è molta più massa di quanto possiamo giustificare con le galassie che vediamo o, se guardiamo in altre parti dello spettro elettromagnetico, si nota che c'è molto gas in questo ammasso, ma neanche questo può rendere conto della massa. A conti fatti, per quanto riguarda l'ammasso della Chioma, sembra che ci sia una massa circa 10 volte maggiore sotto forma di materia oscura invisibile rispetto alla materia ordinaria.



In realtà questa materia oscura è possibile renderla più chiaramente visibile. La presenza di materia oscura è visibile indirettamente nelle fotografie dello spazio profondo grazie al suo effetto gravitazione sulla materia ordinaria. Immaginiamo di avere un osservatore e una galassia: come vediamo la galassia? Un raggio di luce parte dalla galassia e, dopo aver attraversato l'universo, giunge all'occhio dell'osservatore. Come deduciamo la posizione della galassia? Lo capiamo dalla

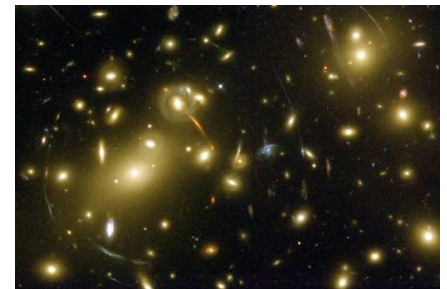
direzione in cui il raggio si muove quando arriva all'occhio. Ora supponiamo che nel mezzo ci sia un ammasso di galassie, senza dimenticarsi della materia oscura: se immaginiamo un raggio di luce che parte in questa direzione, bisogna tenere in considerazione quello che Einstein aveva predetto quando ha sviluppato la Relatività Generale e cioè che il campo gravitazionale, a causa della massa, defletterà non solo la traiettoria delle



particelle ma anche la luce stessa. Quindi il raggio di luce analizzato non viaggerà lungo una linea retta ma piegherà la sua rotta e potrebbe giungere al nostro occhio. Dove vedrebbe la galassia ora l'osservatore? La vedrebbe spostata verso l'alto. Si crea così una serie di raggi disposti su un cono, che verrebbero deviati dall'ammasso centrale, per poi finire nell'occhio dell'osservatore.

L'osservatore vedrà quindi un anello, chiamato Anello di Einstein e sarà un anello perfetto solo se la fonte, l'oggetto deflettore e l'occhio si trovano perfettamente allineati.

Se sono spostati anche di un poco, l'immagine sarà diversa. Noi vediamo nel cielo questi ammassi deformati, con forma circolare, avvolte dal mare di materia oscura che causano la deviazione della luce, che provoca le illusioni ottiche. Quello che possiamo fare, studiando l'effetto della distorsione presente nelle immagini, è quantificare la massa presente



negli ammassi che, come già detto, risulta essere superiore rispetto alla massa stimata considerando solo la materia visibile. Questo è il fenomeno più vicino per vedere davvero ad occhio nudo almeno gli effetti che può creare la materia oscura.

Perciò, la prova che abbiamo dell'esistenza della materia oscura è dovuta ai suoi effetti gravitazionali sulla materia ordinaria. In particolare al suo effetto sulla velocità delle galassie all'interno degli ammassi, che risulta essere troppo alta per essere sostenuta esclusivamente dalla materia visibile. Inoltre vediamo questi effetti da lente gravitazionale: le distorsioni ci dicono che gli ammassi sono composti prevalentemente da materia non visibile, e quindi oscura.

Adesso concentriamoci sulla **energia oscura**. Per comprendere l'esistenza dell'energia oscura, bisogna fare riferimento al fatto che lo spazio stesso si sta espandendo. Immaginiamo una sezione del nostro universo infinito, dove abbiamo quattro galassie a spirale e immaginiamo di disporre una serie di metri a nastro (ogni linea quindi corrisponde a un metro), orizzontali e verticali, per misurare dove sono posizionati i vari elementi. Se lo potessimo fare, scopriremmo che al passare dei giorni, degli anni, la distanza delle galassie aumenta. Questo non accade perché le galassie si allontanano le une alle altre attraverso lo spazio, non si stanno muovendo in uno spazio immobile:

si allontanano le une dalle altre poichè lo spazio stesso di sta espandendo a seguito del Big Bang. Ma dato che all'interno dello spazio troviamo materia che crea attrazione gravitazionale, questa tende a rallentare l'espansione, quindi l'espansione si fa più lenta con il tempo. Nell'ultimo secolo le persone hanno dibattuto sull'evoluzione futura dell'Universo e cioè se l'espansione dello spazio continuerà per sempre, andrà rallentando fino a fermarsi in maniera asintotica oppure se a un certo punto si fermerà e comincerà un processo inverso di contrazione.

Due gruppi di fisici e astronomi, più di venti anni fa, hanno cominciato a misurare la velocità con cui l'espansione dell'universo stava rallentando. La risposta stupefacente ottenuta da questi esperimenti è che lo spazio non solo si sta espandendo ma l'espansione è accelerata: non c'era nessuna teoria scientifica in grado di dare una giustificazione a quanto osservato. Per considerare questo fenomeno è stato introdotto un termine nelle equazioni che descrivono il comportamento dell'Universo, un termine che rappresenta un'energia, ma è un tipo di energia completamente diverso da quello che conosciamo al momento. **Si chiama Energia Oscura ed è la causa dell'espansione dell'universo.** Ma non vi è ancora una valida spiegazione per inserirla nei calcoli.

L'enigma della materia oscura

La presenza di materia oscura nell'Universo è un fatto assodato per l'astrofisica contemporanea grazie alla molteplicità delle prove raccolte dagli scienziati in questi ultimi decenni. Le teorie più recenti sull'origine dell'Universo devono tenere in considerazione la presenza della materia oscura, invisibile ma fondamentale per le strutture dell'Universo.

Se si considerano le galassie, ognuna con il suo alone di materia oscura, e si va indietro nel tempo, ci deve essere stato un momento nella storia dell'Universo in cui gli aloni si toccavano fra loro. Andando ancora più indietro, si arriva a un momento in cui gli aloni erano molto densi e si compenetravano. Le equazioni e i modelli matematici usati per descrivere questo processo hanno indicato che deve esserci stata una fase dell'evoluzione dell'Universo in cui la materia oscura era estremamente densa e omogenea. Circa un milione di anni dopo il Big Bang questo mare omogeneo di materia oscura è diventato instabile e ha cominciato a dividersi, dando origine a strutture le quali, a loro volta, si sono frammentate. Al contrario delle teorie classiche, questa nuova prospettiva considera le galassie come il risultato più recente dell'evoluzione dell'Universo.

Le cosiddette "celle frattali" sono un altro prodotto della teoria cosmologica basata sulla materia oscura e oggi considerate i mattoni dell'Universo da gran parte degli astrofisici. Si tratta di spazi enormi, dalle dimensioni dell'ordine di un centinaio di milioni di anni-luce, all'interno dei quali la materia visibile si alterna a grandi vuoti in un modo apparentemente disordinato e casuale. Soltanto

da poco quest'ordine non omogeneo è stato riconosciuto come una struttura frattale, nella quale la regolarità della distribuzione della materia ricorda quella di altri sistemi naturali, come gli alberi o le terminazioni nervose. Pertanto con la scoperta delle celle frattali la materia oscura ha inflitto un grave colpo a un'altra delle "certezze" dell'astrofisica: l'immagine tradizionale dell'omogeneità e della regolarità dell'Universo. Un'idea che non è in grado di spiegare la struttura delle celle frattali, ma che ancora non si adatta perfettamente per calcolare la distribuzione media della materia nell'Universo, o meglio su un insieme composto da molte celle frattali.

Le differenze e i quesiti sulla materia oscura

A questo punto bisogna enfatizzare il fatto che **materia oscura ed energia oscura sono due elementi completamente distinti e creano effetti diversi:** la materia oscura, per il fatto che crea attrazione gravitazionale, tende ad incoraggiare la crescita delle strutture. Al contrario, l'energia oscura sta creando sempre più spazio tra le galassie, fa in modo che l'attrazione gravitazionale tra di esse diminuisca, impedendo quindi la formazione di strutture. Quindi studiando gli ammassi di galassie (il loro numero, la loro densità, quante ce ne sono in funzione del tempo), possiamo capire come **la materia oscura e l'energia oscura competano l'una contro l'altra nella formazione di strutture.** Non si ha ancora una spiegazione convincente per l'energia oscura; mentre per la materia oscura sì: **si sono trovati dei candidati attendibili per la materia oscura.** Per attendibili si intende che sono state trovate teorie matematiche coerenti che in realtà sono state introdotte per spiegare fenomeni completamente diversi: ognuna di queste teorie predice l'esistenza di una nuova particella che interagisce in modo molto debole e potrebbe essere un buon candidato per la materia oscura. E questo è esattamente ciò che si desidera in fisica: quando una predizione viene fuori da una teoria matematicamente coerente che in realtà è stata sviluppata per qualcos'altro. Un modo per cercare queste particelle è costruire dei rivelatori estremamente sensibili alle particelle di materia oscura che li attraversano e li urtano. Un rivelatore di questo tipo è stato realizzato da la fisica Patricia Burchat e i suoi colleghi, i quali hanno posizionato il rivelatore in fondo ad una miniera di ferro in Minnesota: non sono stati in grado ancora di vedere niente, ma questo strumento permette loro, comunque, di mettere limiti sulla massa e sulla forza di interazione che queste particelle hanno.

Rimanendo sul tema del dibattito in merito della composizione della materia oscura, una delle prime ipotesi considerava la materia oscura un insieme di stelle molto deboli e di piccola massa, o di buchi neri. Ma nuove teorie, più interessanti, stanno nascendo dalla collaborazione tra astrofisici e fisici delle particelle. Gli assioni, i fotini, le corde cosmiche, i monopoli magnetici e i gravitini sono alcune delle nuove particelle che potrebbero, forse, costituire la materia oscura. Non si tratta che di teorie, perchè nessuna di queste particelle è mai stata osservata.

Tuttavia i fisici sono abbastanza concordi nell'affermare che queste particelle esistono, e molti elementi inducono a pensare che tali particelle debbano essere presenti in grandi quantità nell'Universo.

I contrasti riguardano essenzialmente riguardo alla natura delle particelle. Una parte degli astrofisici ritiene che debbano essere particelle “fredde”, ossia che si muovono a velocità molto inferiore a quella della luce. Altri, fra cui il fisico dissidente cinese Fang Li Zhi, sono propensi all'ipotesi che la materia oscura sia composta da particelle “calde”, come i neutrini, che si muovono a una velocità vicina a quella della luce. Questa posizione è ulteriormente rafforzata in seguito all'accettazione comune, da parte dei fisici, che non c'è alcun motivo teorico per escludere che i neutrini abbiano una massa, anche se piccolissima. È stato dimostrato che il neutrino elettronico (uno dei tre tipi noti, accanto al neutrino tauonico e a quello muonico) abbia una massa compresa fra un decimillesimo e un centomillesimo rispetto a quella dell'elettrone, e si ritiene che debbano essere talmente numerosi da superare, comunque, quella dei protoni e dei neutroni presi insieme. Ci sarebbe cioè nell'Universo una massa di neutrini sufficiente a renderlo chiuso e ad assicurare che prima o poi l'espansione cesserà, e l'Universo ricomincerà a contrarsi.

Non ci sono tuttavia certezze sufficienti per affermare che la materia oscura sia composta da neutrini. Per il momento gli astrofisici le chiamano particelle “ini”, data la loro piccolezza. Con molta probabilità, infatti, dovrebbero essere particelle piccolissime, pari a un milionesimo di volte la massa del protone e del neutrone, di carica nulla, con caratteristiche molto simili a quelle dei neutrini e una velocità pari a un milionesimo della velocità della luce.

È stato inoltre lanciato un telescopio ed è stato puntato verso il centro della Terra per cercare particelle di materia oscura che si disintegrano e producono raggi gamma che possono essere individuati dal telescopio. Il Large Hadron Collider, un acceleratore di particelle, è stato messo in funzione nel 2014: è possibile che si producano particelle di materia oscura nell'acceleratore. Visto che interagiscono così poco, in realtà usciranno dai rivelatori, quindi la loro “firma” sarà dell'energia mancante.

Infine si stanno progettando telescopi specifici per affrontare le domande sulla materia oscura e l'energia oscura. Questi sono stati installati a terra e ci sono anche tre telescopi spaziali.

Ad ogni modo, nuovi approcci verso la tematica della materia oscura sono stati realizzati negli ultimi anni: guardando allo spazio, i pianeti percorrono le loro orbite seguendo la legge newtoniana, secondo cui la forza gravitazionale tra due corpi è attrattiva, diretta lungo la congiungente e di intensità direttamente proporzionale al prodotto delle masse e inversamente proporzionale

all'inverso del quadrato della mutua distanza. La legge di gravitazione newtoniana viene poi trovata come limite della più ampia legge di gravitazione di Einstein, meglio nota come teoria della Relatività Generale. Se si ritiene valida la teoria della gravitazione di Newton, tuttavia, osservando il moto di galassie a spirale qualcosa non funziona: la massa che risiede nelle loro componenti ordinarie (stelle, polveri e gas) e osservabili attraverso la "luce" che esse emettono non è sufficiente per rendere conto della velocità di rotazione misurate da Terra. È così che è sorto il problema della "massa mancante" dell'universo, ribattezzata anche "materia oscura" per evidenziare come, per far tornare i conti, essa debba esistere senza poter essere osservata direttamente.

E se si facesse a meno dell'ipotesi della materia oscura, modificando le leggi dinamiche della gravitazione per rendere conto dei dati osservativi? È quello che si sta facendo ormai da quasi tre decenni con la cosiddetta dinamica newtoniana modificata (MOND) proposta per la prima volta da Mordehai Milgrom nel 1983. Un approccio diverso da MOND è stato invece utilizzato nell'analisi di galassie ellittiche in uno studio di un'ampia collaborazione internazionale che comprende un gruppo di ricercatori dell'INAF-Osservatorio di Capodimonte e delle Università di Napoli, California Santa Cruz e Zurigo. Questi fisici utilizzano come traccianti delle velocità e della distribuzione dei moti all'interno delle galassie ellittiche le nebulose planetarie, stelle giunte al termine del loro ciclo evolutivo, per trovare segnali della presenza di materia oscura.

Si è dimostrato in diversi lavori come i moti delle stelle, e in particolare di queste nebulose planetarie, potesse essere giustificato con la presenza di questi aloni di materia oscura; contemporaneamente, all'Università Federico II di Napoli, il prof. Salvatore Capozziello studiava le teorie estese della gravitazione note come teorie $f(R)$ che sostanzialmente modificano l'approccio di Einstein senza minarlo nei suoi fondamenti, verificandone gli effetti dinamici a tutte le scale, da quelle del sistema solare fino a quelle cosmologiche.

Il trait d'union tra i due campi di ricerca è rappresentato al fatto che queste teorie, quando si considerano i limiti alle basse velocità tipiche del moto di tutte le stelle, producono modifiche ai potenziali gravitazionali derivati dalla teoria classica newtoniana. Così è nata l'idea di verificare che cosa potesse succedere applicando tali potenziali alle galassie ellittiche. E i risultati sono stati sorprendenti. Il fatto è che le teorie $f(R)$ modificano il potenziale newtoniano aggiungendo un termine di forza che rende conto dei moti delle galassie senza bisogno di postulare la presenza della materia oscura. L'ipotesi della materia oscura è superflua, dunque? È presto per dirlo. Occorreranno altre conferme sperimentali per questo tipo di approccio.

Chiaramente per ora i fisici mantengono un approccio neutrale: la discriminante verrà probabilmente dagli esperimenti di fisica delle particelle che nelle dovrebbe aiutare a chiarire la natura dei costituenti della materia oscura o a escluderne l'esistenza.

I misteri della matematica

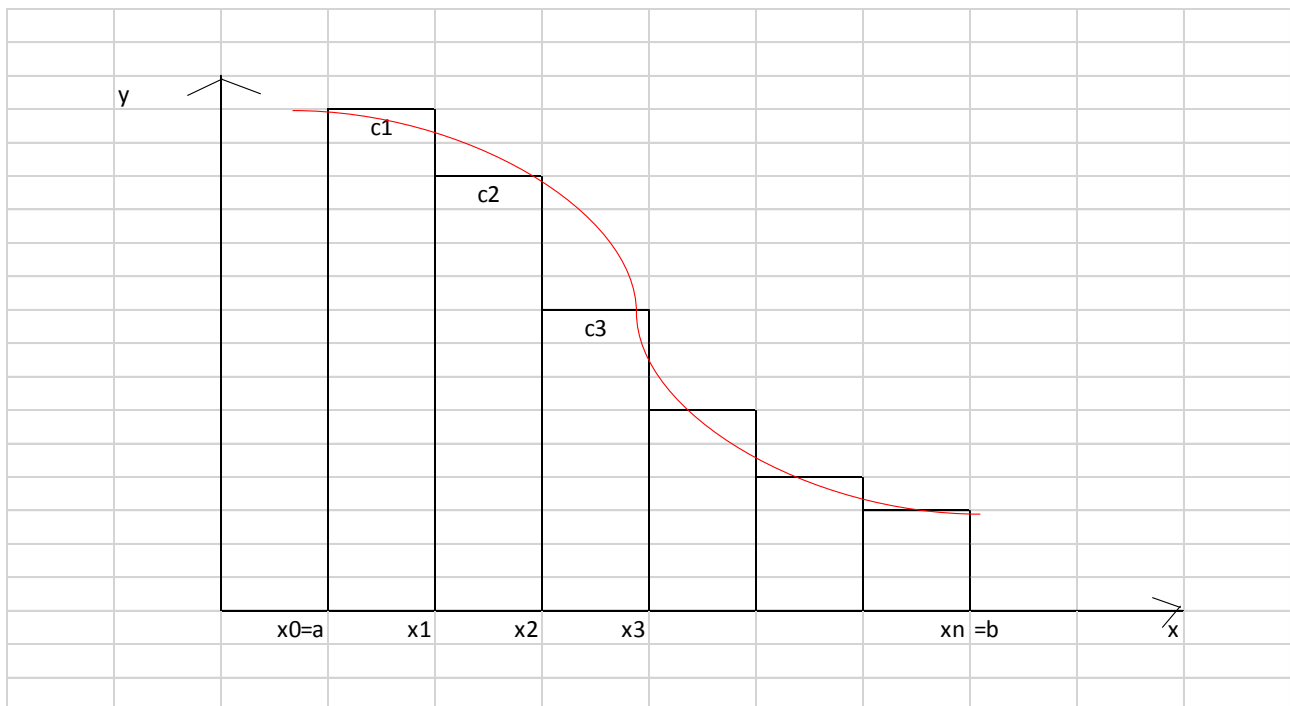
La materia oscura e l'energia oscura sono due dei più grossi misteri della Fisica degli anni duemila. Anche la matematica tuttavia ha ancora ampi lati oscuri: basta pensare ai cosiddetti “Problemi per il millennio” (*Millennium problems*), ovvero sono sette problemi irrisolti della matematica proposti dall'istituto matematico Clay di Cambridge; per ognuno di essi di cui si fornisca la dimostrazione è stato assegnato un premio di un milione di dollari. Tutti i problemi del millennio hanno profonde implicazioni economiche, dalla sicurezza bancaria alle transazioni via internet, all'applicabilità diretta nella soluzione di problemi tecnologici pressanti: ad esempio se la congettura di Birch e Swinnerton-Dyer fosse provata vera, sarebbe possibile rompere la cifratura basata sulle funzioni ellittiche in tempo polinomiale, e non esponenziale.

Durante i nostri studi matematici abbiamo riscontrato alcuni problemi matematici ardui e complicati, come **l'esistenza di integrali non risolubili**: difatti sussistono funzioni la cui primitiva non è una funzione elementare. Prima converrebbe spiegare la definizione di integrale: innanzitutto esistono due tipi principali di integrale, indefinito e definito; per integrale indefinito si definisce l'insieme di tutte le primitive di una funzione f e si indica con il simbolo: $\int f(x)dx$ che si legge «integrale indefinito di $f(x)$ in dx ». Invece sia $f: [a, b] \rightarrow \mathbf{R}$ una funzione continua; si chiama integrale definito della funzione f nell'intervallo $[a; b]$ l'integrale: $\int_a^b f(x)dx$ che si legge «integrale da a a b di $f(x)$ in dx ».

Ritornando al problema esposto precedentemente, ad esempio l'integrale della funzione $y=e^{-x^2}$ non è risolvibile poichè, per risolvere un integrale di questo genere, necessiteremmo della derivata prima di $-x^2$, ovvero $-2x$. Perciò l'integrale può essere calcolato solo in maniera approssimativa grazie a metodi numerici. Prendiamo in considerazione ad esempio l'integrale $\int_1^3 e^{-x^2} dx$. È possibile risolverlo attraverso il metodo dei rettangoli: dividiamo l'intervallo di integrazione $[a; b]$ in n intervalli di ampiezza $\Delta x = \frac{b-a}{n}$. Gli estremi degli intervalli più piccoli sono $x_0 = a$, $x_1 = a + \Delta x$, $x_2 = a + 2\Delta x$... fino a $x_n = b$. Approssimo l'area da determinare con quella degli n rettangoli di base Δx e altezza $f(c_k)$, dove c_k è il punto medio di $[x_{k-1}; x_k]$. La formula approssimata vale:

$$\int_a^b f(x)dx = \Delta x [f(c_1) + f(c_2) + \dots + f(c_n)]$$

dove $\Delta x = \frac{b-a}{n}$ e $c_k = \frac{x_{k-1} + x_k}{2}$.



Nel nostro caso, ad esempio, è $f(x) = e^{-x^2}$. Dividiamo il trapezoide in cinque parti ($n=4$). Allora $\Delta x = \frac{3-1}{4} = 0,5$, e quindi avremo $x_0 = 1$, $x_1 = 1,5$, $x_2 = 2$, $x_3 = 2,5$, $x_4 = 3$, mentre $c_1 = 1,25$, $c_2 = 1,75$, $c_3 = 2,25$ e $c_4 = 2,75$.

Allora avremo:

$$\int_1^3 e^{-x^2} dx \cong 0,5[f(1,25) + f(1,75) + f(2,25) + f(2,75)]$$

$$= 0,5[e^{-(1,25)^2} + e^{-(1,75)^2} + e^{-(2,25)^2} + e^{-(2,75)^2}] \cong 0,13$$

Quindi si riesce a trovare, come detto, un risultato, ma rimane approssimativo.

Esercizi illustrativi dell'argomento:

Esercizio 1: "Trovare la distanza che separa due corpi puntiformi, con masse 5.2 kg e 2.4 kg, anche la loro attrazione gravitazionale sia $2.3 \cdot 10^{-12}$ N."

La legge di gravitazione universale newtoniana è basata sul concetto di forza a distanza, dove tale forza dipende dall'inverso del quadrato della distanza $F=G \frac{m_1 m_2}{d^2}$ dove G è la costante di gravitazione universale ($G = 6.67 \cdot 10^{-11} \frac{Nm^2}{kg^2}$) I due corpi sono ritenuti puntiformi, e quindi la distanza tra i loro

due centri coincide con la distanza tra i due punti. La soluzione si ricava: $d = \sqrt{\frac{Gm_1m_2}{F}}$

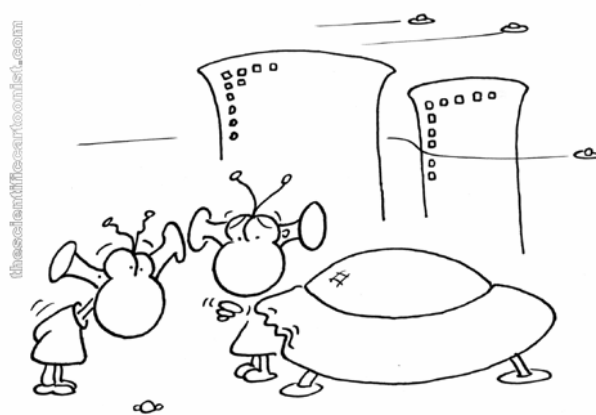
$$= \sqrt{\frac{(6.67 \cdot 10^{-11} \frac{Nm^2}{kg^2}) \cdot 5.2kg \cdot 2.4kg}{2.3 \cdot 10^{-12}N}} = 19m$$

Esercizio 2: “La velocità di recessione di una galassia osservata a una distanza di 33 milioni di anni luce è pari a 800 km/s. Fornisci una stima della costante di Hubble basandoti su queste informazioni.”

La distanza di 33 milioni di anni luce corrisponde a $d = \frac{33 \cdot 10^6 a.l.}{3,26 a.l./pc} = 1,0 \cdot 10^7 pc = 10 Mpc$.

Ricordando la legge di Hubble $v = H_0 d$, con queste misure il valore di H_0 sarebbe

$$H_0 = \frac{v}{d} = \frac{800 km/s}{10 Mpc} = 80(km/s)/Mpc$$



"A piece of dark matter appeared from nowhere and... you know."

Sitografia: TED.com, https://www.youtube.com/watch?v=km8qtIw-BQY&feature=emb_logo;
focus.it; lescienze.it; wikipedia.en;

Bibliografia: “Enciclopedia Curcio di scienza e tecnica – Annuario 1991”, Armando Curcio editore