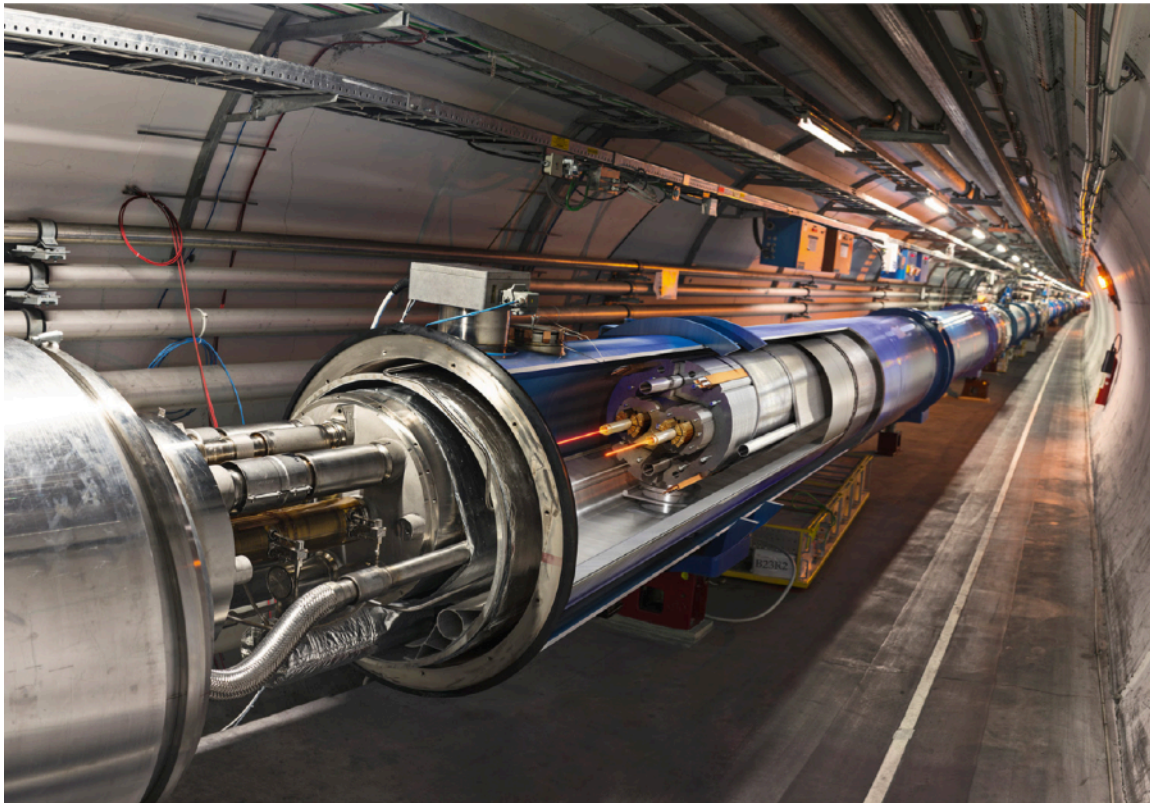


Large Hadron Collider

Il funzionamento e gli scopi dell'acceleratore LHC del CERN



Virginia Elena Scandroglio, 5^E
Liceo Scientifico L. Da Vinci Gallarate, A.s. 2019-2020

Large Hadron Collider

Il funzionamento e gli scopi dell'acceleratore LHC del CERN

Il CERN di Ginevra è il laboratorio di ricerca mondiale nel campo della fisica delle particelle, unico per complessità, prospettive scientifiche, tecnologiche e potenzialità industriali. Ospita il Large Hadron Collider (LHC) cioè il più grande e potente acceleratore di particelle finora costruito dall'uomo che permette di studiare i quark, costituenti elementari dei nuclei di materia.

LHC è un sincrotrone che accelera adroni, ossia protoni e ioni pesanti, fino al 99,999999 % della velocità della luce per poi farli successivamente scontrare con un'energia che ha raggiunto i 13TeV. E' costituito da un anello sotterraneo di 27 km di magneti superconduttori, in lega di niobio e titanio, raffreddati alla temperatura di 1,9K da elio liquido, che generano un campo magnetico di circa 8 Tesla. All'interno dell'acceleratore, dentro tubi a vuoto, viaggiano due fasci di particelle contro rotanti, che successivamente collidono in corrispondenza di quattro punti lungo l'orbita. Si tratta di quattro grandi stazioni sperimentali presso le quali sono stati installati i rivelatori di particelle che identificano, misurano e ricostruiscono le traiettorie di quasi tutte le particelle prodotte dalla collisione. Tali strumenti sono mastodontici e si chiamano ATLAS (A Toroidal LHC Apparatus), CMS (Compact Muon Solenoid), LHCb (Large Hadron Collider beauty) e ALICE (A Large Ion Collider Experiment). (Figura 1.1)



(Figura 1.1) Veduta aerea dell'area del CERN situato al confine tra Svizzera e Francia

I protoni accelerati da LHC vengono prodotti a partire dal gas idrogeno: attraverso un campo elettrico molto intenso, gli elettroni vengono strappati dagli atomi di idrogeno isolando quindi i

protoni liberi. I fasci di ioni vengono poi pre accelerati nel Sistema di Iniezione cominciando il percorso a partire dagli acceleratori lineari, continuando in quelli circolari, il Proton Synchrotron (PS), il Super Proton Synchrotron (SPS), giungendo infine in LHC.

Nel sincrotrone LHC il campo magnetico e il campo elettrico sono controllati in modo da mantenere l'orbita del fascio di particelle all'interno di un contenitore a forma di toroide cavo. Il sincrotrone è formato da un anello di accumulazione a sua volta costituito da quadrupoli magnetici, necessari a focalizzare il fascio di particelle e i dipoli magnetici in grado di curvare la loro traiettoria. Nei dipoli principali, la corrente passa all'interno di cavi superconduttori che sono in grado di trasportare correnti elevatissime (dell'ordine di 11800A) senza dissipare potenza. Per garantire la superconduttività, però, i materiali speciali utilizzati vanno fatti operare a temperature bassissime di circa 1,9K (-271 °C) motivo per cui, ad oggi, il sistema criogenico di LHC è il più grande che esista al mondo.

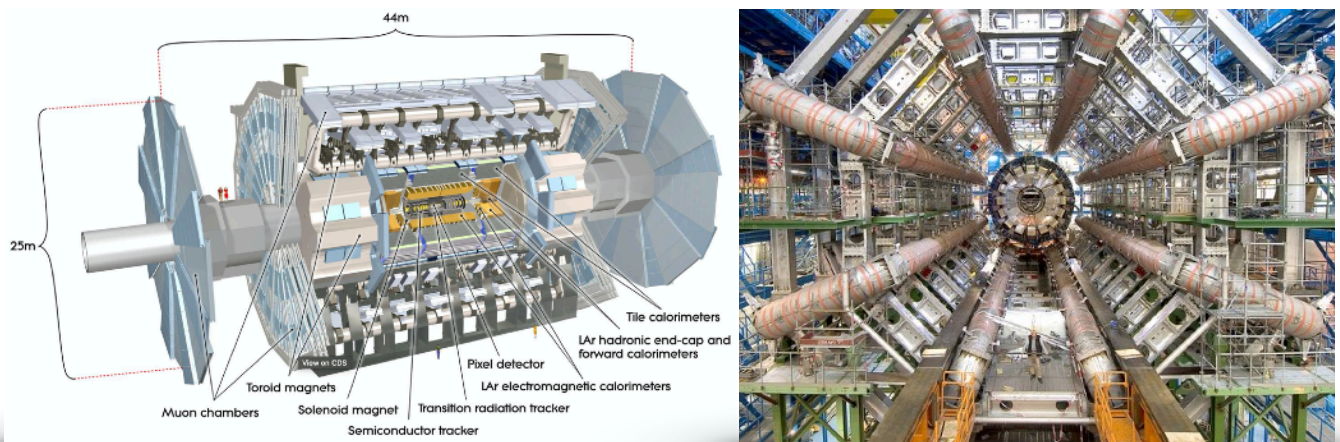
I rivelatori di particelle : ATLAS

I rivelatori di particelle permettono di studiare nella collisione tra i fasci di protoni la modalità di interazione dei quark e anche l'energia che si crea, e che può materializzarsi in particelle nuove, secondo l'equazione di Einstein $E = mc^2$. Più potente è l'acceleratore più pesanti sono le particelle che la collisione può produrre e che il rivelatore può captare.

I rivelatori di particelle inoltre permettono di riprodurre in laboratorio i fenomeni e le interazioni delle particelle che hanno caratterizzato i primi istanti dell'Universo. Quattordici miliardi di anni fa, dopo il Big Bang, l'Universo era formato da particelle elementari, libere, che con il tempo e il raffreddamento si sono unite a formare atomi, poi gli elementi chimici fino alle macrostrutture come stelle e pianeti. Le temperature prodotte all'LHC corrispondono alla temperatura che l'Universo aveva un centesimo di miliardesimo di secondo dopo il Big Bang. Quindi, studiare l'infinitamente piccolo in LHC corrisponde a studiare l'infinitamente grande cioè la struttura e l'evoluzione dell'Universo.

In LHC sono stati progettati e costruiti quattro esperimenti per la fisica delle particelle: ATLAS (A Toroidal LHC ApparatuS), con i suoi 46 m di lunghezza e 25 m di altezza, è il più grande e uno dei più complessi rivelatori di particelle mai costruito. L'apparato sperimentale è costituito da un rivelatore interno che ricostruisce le traiettorie delle particelle cariche e misura il loro impulso, da calorimetri che misurano le energie delle particelle, da uno spettrometro per muoni che identifica i

muoni e ne misura l'impulso, e da magneti che curvano le traiettorie delle particelle cariche per poterne misurare l'impulso; (Figura 1.2)

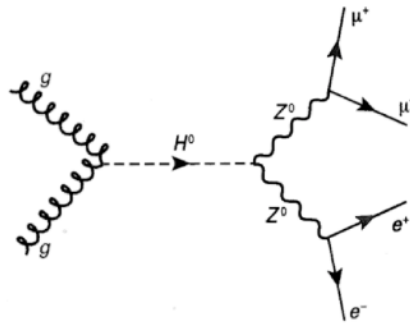


(Figura 1.2) ATLAS, A Toroidal LHC Apparatus

CMS (Compact Muon Solenoid), lungo 15 m e dal peso di 1400 tonnellate, è stato costruito al fine di compiere ricerche circa il bosone di Higgs, le particelle che potrebbero costituire la materia oscura e la supersimmetria; LHCb (Large Hadron Collider beauty) è un esperimento che ha lo scopo di misurare i parametri della violazione CP e decadimenti e fenomeni rari relativi agli adroni in cui è presente il quark beauty; ALICE (A Large Ion Collider Experiment) è un esperimento progettato per lo studio delle collisioni tra ioni pesanti alla ricerca del plasma di quark e gluoni, uno stato davvero esotico della materia.

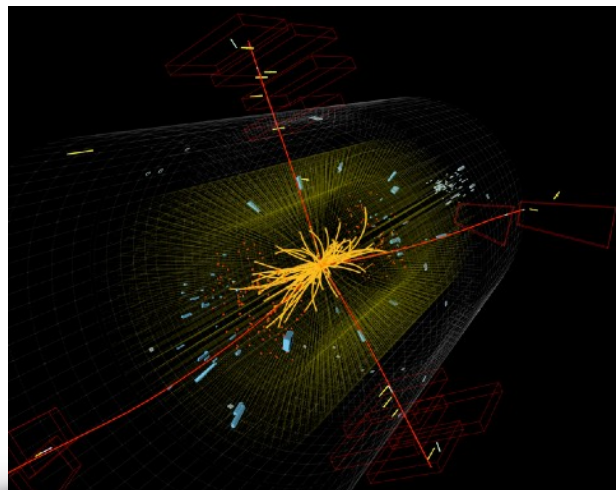
La scoperta del bosone di Higgs

Nel 2012 venne rivelato per la prima volta il bosone di Higgs (H^0) negli esperimenti ATLAS e CMS condotti con l'acceleratore LHC. Il bosone di Higgs è un bosone elementare, massivo e scalare associato al campo di Higgs, che conferisce massa alle particelle elementari del Modello standard. Nell'universo si trovano molti bosoni di Higgs virtuali, che si creano e si distruggono continuamente; essi si concentrano intorno ad una particella, come W^\pm e Z_0 , e interagendo con essa, la ostacolano nel suo moto, conferendole un'inerzia, e perciò una massa. E' possibile che una particella non sia in grado di interagire con il campo di Higgs, e quindi possa muoversi liberamente in linea retta, comportandosi come un corpuscolo privo di massa (fotoni, gluoni e gravitoni). H^0 si forma dalla fusione di due gluoni e decade in due fotoni Z_0 , di cui uno virtuale. Questi ultimi possono decadere secondo meccanismi diversi, per esempio in due coppie elettrone-positrone e muone-antimuone, come mostra il diagramma di Feynman (Figura 1.3).



(Figura 1.3) Formazione e decadimento di H^0

Nel 1964, i primi a ipotizzare l'esistenza del campo di Higgs che permea l'intero spazio mediato dal bosone di Higgs, furono i britannici Peter Higgs e Thomas Kibble, i belgi François Englert e Robert Brout e gli americani Gerald Stanford Guralnik e Carl Richard Hagen. Nel 2011, durante un seminario presso il CERN, vennero mostrati dati relativi agli esperimenti ATLAS e CMS coordinati da Fabiola Gianotti (Direttrice generale del CERN) e Guido Tonelli. Il bosone di Higgs era stato individuato in un intervallo di energia compreso tra i 124 e i 126 GeV con una probabilità prossima al 99%. Dopo anni di esperimenti condotti per affinare la precisione, il 4 luglio del 2012, in una conferenza presso CERN in cui presenziò Peter Higgs, i portavoce dei due esperimenti, Fabiola Gianotti per l'esperimento ATLAS e Joseph Incandela per l'esperimento CMS, annunciarono la scoperta di una particella compatibile con il bosone di Higgs, la cui massa risulta intorno ai 126,5 GeV per ATLAS e ai 125,3 GeV per CMS. (Figura 1.4). L'8 ottobre 2013 Peter Higgs e François Englert sono stati insigniti del premio Nobel per la fisica per la scoperta del meccanismo di Higgs.



(Figura 1.4) Il Bosone di Higgs, uno ogni diecimila miliardi di collisioni

Esperimenti a LHC come motori di innovazione

I ricercatori che hanno ideato e costruito gli esperimenti a LHC hanno dovuto inventare e sviluppare

nuove tecnologie per perseguire gli ambiziosi scopi di fisica fondamentale che si prefiggevano. Molte di queste innovazioni hanno avuto delle ricadute tecnologiche concrete e delle applicazioni immediate nella nostra società. Circa 6400 industrie hanno avuto commesse per LHC ed i suoi esperimenti, e, successivamente, hanno registrato un aumento delle loro vendite. Per ogni euro ottenuto dal CERN, tali industrie hanno prodotto tre euro di commesse nuove di cui il 75% fuori dall'ambito di Fisica delle Particelle come: energia solare, industria elettrica, trasporti, computer e telecomunicazioni.

Ad esempio, la fisica delle particelle fin dalla sua nascita ha avuto dirette ricadute nella diagnostica medica (PET, SPECT, CT), e negli ultimi decenni anche nelle tecniche terapeutiche per la cura dei tumori. In particolare il cosiddetto rivelatore a pixel ibrido di silicio è stato interamente ideato e realizzato per gli esperimenti dell'LHC, perché è l'unico che riesce a separare le tracce vicine prodotte da particelle cariche e resistere alle intensissime radiazioni. Presto questo rivelatore potrà essere usato per indagini molecolari di proteine, radiografie di materiali e, naturalmente, in campo medico. Anche i fotomoltiplicatori a stato solido inventati per l'esperimento ATLAS potranno essere utilizzati vantaggiosamente nella diagnostica medica.

Inoltre LHC ed i suoi esperimenti per poter funzionare richiedono notevoli quantità di energia elettrica e di gas refrigeranti. La necessità di limitare il più possibile il consumo di energia e l'impiego di gas non ecologici ha stimolato diverse tecnologie amiche dell'ambiente con interessanti applicazioni industriali: collettori solari avanzati che funzionano sia con luce solare diretta che con quella diffusa, magneti superconduttori a temperatura relativamente alta, sistemi innovativi di raffreddamento a base di CO₂ che potranno essere utilizzati anche sulla Stazione Spaziale Internazionale.

Esercizio sull' acceleratore di particelle LHC

Quanti giri del tunnel di LHC deve compiere un protone per acquistare l'energia propria del fascio? Lo spazio Δs percorso dal protone è dato dal prodotto tra la velocità v del protone all'ingresso in LHC ed il tempo Δt impiegato per raggiungere l'energia richiesta:

$$\Delta s = v \cdot \Delta t = (0,999997828c)m/s \cdot 1500s \approx (3 \cdot 10^8 m/s) \cdot (1,5 \cdot 10^3) \approx 4,5 \cdot 10^{11}m$$

Il numero di giri del tunnel n che un protone deve eseguire per raggiungere l'energia propria del fascio è il rapporto tra lo spazio Δs che esso percorre e la lunghezza l del tunnel.

$$n = \frac{\Delta s}{l} = \frac{4,5 \cdot 10^{11}m}{2,7 \cdot 10^4m} = 1,7 \cdot 10^7 \text{ giri}$$

Dunque ogni protone che entra nel tunnel di LHC (*Figura 1.6*) ha una velocità pari a 0,999 997 828 volte quella della luce, un'energia di 450 GeV e viene accelerato fino a raggiungere l'energia richiesta dal fascio, pari a 7 TeV, quando ormai si sta muovendo a una velocità di 0,999 999 991 c: per aumentare la sua velocità di questa quantità infinitesima, ogni protone deve percorrere l'anello sotterraneo circa 17 milioni di volte. Compiendo questo numero di giri a una velocità che praticamente è quella della luce, ogni protone percorre un tragitto di circa 450 milioni di chilometri, una lunghezza uguale a 3 volte la distanza che separa la Terra dal Sole.



(Figura 1.6) L'interno del tunnel di LHC dove sono stati installati i magneti superconduttori

Applicazioni del concetto di derivata in fisica: velocità e accelerazione

Avendo parlato di un acceleratore, è utile approfondire alcune applicazioni della derivata in fisica, relative a velocità e accelerazione.

Si suppone che una particella in moto rettilineo si muova secondo la legge oraria : $s = s(t)$

dove la variabile dipendente s rappresenta lo spazio percorso e la variabile indipendente t rappresenta il tempo t impiegato a percorrerlo.

La velocità media della particella in un intervallo di tempo $[t, t + \Delta t]$ è data dal rapporto tra lo spazio percorso e il tempo impiegato:
$$v_m = \frac{s(t + \Delta t) - s(t)}{\Delta t}$$

quindi è rappresentata dal rapporto incrementale della legge oraria. La velocità media calcolata nell'intervallo di tempo $[t, t + \Delta t]$ sarà un' approssimazione tanto migliore della velocità istantanea in t quanto più l'intervallo temporale è piccolo. E' ragionevole allora assumere come velocità della particella nell'istante t il *limite* cui tende la velocità media quando Δt tende a 0:

$$v_i(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{s(t + \Delta t) - s(t)}{\Delta t} = s'(t)$$

La velocità istantanea della particella in t coincide dunque con la derivata della legge oraria nel punto t .

Analogamente, l'accelerazione media, sempre nell'intervallo di tempo $[t, t + \Delta t]$, è definita dalla

$$\text{relazione: } a_m = \frac{v_i(t + \Delta t) - v_i(t)}{\Delta t}$$

quindi è rappresentata dal rapporto incrementale della funzione velocità istantanea.

Quando Δt tende a 0, il limite di questo rapporto rappresenta l'accelerazione istantanea che possiede la particella all'istante t e coincide con la derivata della funzione velocità istantanea nel punto t , ovvero con la derivata seconda della legge oraria nel punto t :

$$a_i(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{v_i(t + \Delta t) - v_i(t)}{\Delta t} = v_i'(t) = s''(t)$$

Esercizio

Una particella si muove nel piano xOy ; la traiettoria descritta dal corpo ha le seguenti equazioni parametriche:

$$\begin{cases} x = \frac{t}{2} \\ y = \frac{1}{2}t^2 - t + 2 \end{cases}$$

Dove t è misurato in secondi, mentre x e y sono espressi in metri.

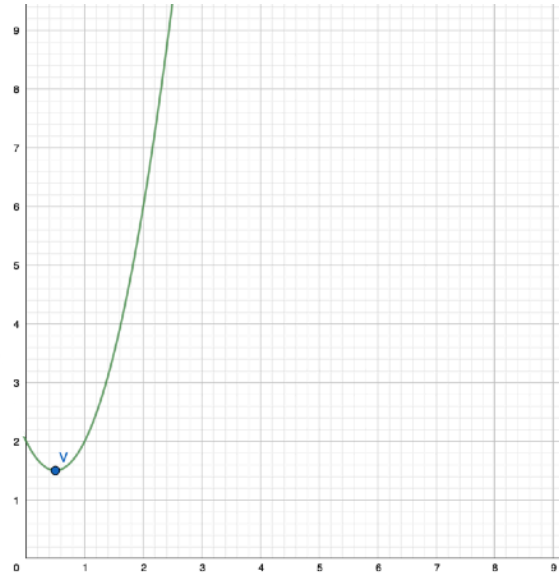
- Scrivi l'equazione cartesiana della traiettoria;
- Calcola il modulo della velocità dopo 3 s;
- Verifica che l'accelerazione è costante al variare del tempo.

Risoluzione:

$$\begin{cases} t = 2x \\ y = \frac{1}{2}4x^2 - 2x + 2 \end{cases}$$

$$\Rightarrow y = 2x^2 - 2x + 2 \text{ equazione cartesiana della traiettoria con } t \geq 0 \text{ e } V \left(\frac{1}{2}; \frac{3}{2} \right)$$

Rappresentazione grafica della parabola:



$$\begin{cases} x' = v_x = \frac{1}{2} \frac{m}{s} \\ y' = v_y = (t - 1) \frac{m}{s} \end{cases}$$

La velocità istantanea è $v_i(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{s(t + \Delta t) - s(t)}{\Delta t} = s'(t)$, dunque:

$$\begin{cases} t = 3s \\ v_x = 0,5 \frac{m}{s} \\ v_y = 2 \frac{m}{s} \end{cases}$$

Applico il teorema di Pitagora per calcolarne il modulo:

$$\Rightarrow v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} = \sqrt{\frac{1}{4} + 4} = \frac{\sqrt{17}}{2} \frac{m}{s}$$

L'accelerazione istantanea è $a_i(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{v_i(t + \Delta t) - v_i(t)}{\Delta t} = v_i'(t) = s''(t)$, dunque:

$$\begin{cases} x'' = a_x = 0 \frac{m}{s^2} \\ y'' = a_y = 1 \frac{m}{s^2} \end{cases}$$

$\Rightarrow a = 1 \frac{m}{s^2}$, è costante al variare del tempo.

Sitografia:

- Sito ufficiale *CERN (the European Organization for Nuclear Research)*:
<https://home.cern/science/accelerators/large-hadron-collider>
<https://home.cern/science/physics/higgs-boson>
- Sito ufficiale *ATLAS*
<https://atlas.cern/discover/physics>
<https://atlas.cern/discover/detector>
- *Sito ufficiale CMS*
<https://cms.cern/physics>
- Sito del *Prof. Ing Franco Maria Boschetto*
<http://www.fmboschetto.it/tde4/frame.htm>
- *Università degli studi di Milano, Dipartimento di fisica*
http://www2.fisica.unimi.it/andreazz/Istituzioni_1617/15-Acceleratori.pdf
- Documentario *LEZIONI DI SCIENZA, il bosone di Higgs con Fabiola Gianotti*
<https://www.youtube.com/watch?v=DQjOKINcbW8>
- Articolo: http://ithaca.unisalento.it/nr-01_06_13/chiodini.pdf

Bibliografia:

- LEONARDO SASSO, *La matematica a colori*, edizione Blu ED. Petrini, vol. 5
- J. D. CUTNELL, K.W. JOHNSON, D. YOUNG, S. STADLER, *I problemi della fisica*, vol. 3, ZANICHELLI