

Tu che sei un fisico - Episodio 2

TITOLO

Perché costruire un nuovo acceleratore lineare, e che forma ha il fuoco?

SHOW NOTES

Oggi parliamo dei progetti per i futuri acceleratori di particelle, e scopriamo se è possibile leggere a lume di candela nello spazio.

Per approfondire:

- Come funziona LHC?
<https://www.borborgimi.org/2010/10/22/come-funziona-lhc-la-serie-completa-in-pdf/>
- La foto della fiamma di una candela in condizioni di microgravità (fonte: NASA)
<https://www.nasa.gov/audience/foreducators/microgravity/multimedia/me-candleFlame.html>

Mandami le tue domande a:

tucheseiunfisico@borborgimi.org

O anche su:

twitter.com/tucheseiunfisi1

facebook.com/Tu-che-sei-un-fisico-103204041288333/

borborgimi.org/tu-che-sei-un-fisico

Seguimi su:

twitter.com/marcodelmastro

instagram.com/marcodelmastro

SIGLA

Oggi parliamo di futuri acceleratori di particelle, e scopriamo se è possibile leggere a lume di candela nello spazio.

INTRO

Benvenuti a questa seconda puntata di “Tu che sei un fisico”. La puntata pilota sembra aver avuto un certo successo, e mi sono arrivate un sacco di domande. Cercherò di rispondere a tutte, ma dovrete essere pazienti: visto il ritmo mi ci vorrà un bel po’.

Tra l’altro, oltre alle domande, mandatemi anche dei *feedback* sul formato degli episodi. La mia idea è cercare di rispondere a due domande per episodio: una domanda più tecnica, legata a qualche dettaglio della fisica delle particelle, o ad aspetti un po’ più oscuri della disciplina in generale, e una domanda più semplice e orientata agli aspetti diciamo più quotidiani della fisica.

È perlomeno quello che farò in questo episodio: se per caso vi sentite un po’ persi ascoltando la risposta alla prima domanda, tenete duro! La seconda andrà meglio di sicuro. Promesso.

PROGETTI PER FUTURI ACCELERATORI DI PARTICELLE

La prima domanda di oggi viene da Juhan, che chiede:

- Tu che sei un fisico... mi sai dire perché si pensa di costruire un acceleratore lineare lungo 20 km in Giappone? Non sarebbe meglio farlo circolare, in modo che le particelle possano fare più giri?

Prima di addentrarci nei dettagli della domanda, cominciamo con lo spiegare brevemente cosa sia un acceleratore di particelle, e perché li costruiamo. Un acceleratore di particelle serve, come dice il nome, ad accelerare, ovvero ad aumentare la velocità, di una particella.

Normalmente si accelerano le particelle per mandarle a sbattere contro un bersaglio, oppure, come nel caso dell’acceleratore LHC che è in funzione oggi al CERN di Ginevra, per far collidere l’uno contro l’altro due fasci di particelle accelerate provenienti da direzioni opposte: in quest’ultimo caso l’acceleratore viene anche chiamato un “collisionatore”.

Perché acceleriamo particelle? Esiste un’idea molto diffusa, secondo la quale mandare a sbattere una particella accelerata contro un’altra particella serve a romperla, con lo scopo di vedere che cosa la compone, che cosa ci sia “dentro”. Questo è certamente possibile, ed è qualcosa che abbiamo fatto a lungo in passato, ma non è più lo scopo degli acceleratori di particelle che i fisici costruiscono oggi. Un acceleratore di particelle è piuttosto una macchina che serve a trasformare velocità in materia. Mi spiego.

Sono sicuro conoscete la formula di Einstein $E = mc^2$, che rappresenta l'equivalenza tra l'energia di un corpo E e la sua massa m . Se la leggete nel verso per cui la massa è uguale all'energia, questa formula spiega alcuni fenomeni, per esempio la fissione nucleare. Se spezzate un atomo di uranio, una parte della massa viene trasformata in energia, e con questa energia potete far funzionare una centrale nucleare, o esplodere una bomba atomica. L'equazione però è valida anche al contrario: in determinate condizioni e seguendo certe regole, è possibile cioè trasformare l'energia in materia. È quello che fa un acceleratore di particelle.

Prendiamo il caso di LHC (che è una sigla che sta per) : LHC è un collisionatore di protoni, cioè delle particelle che costituiscono il nucleo dell'atomo di idrogeno. LHC riesce a accelerare i protoni arrivando a farli viaggiare a una velocità pari al 99.999999% della velocità della luce: a questa velocità, un protone dentro LHC ha un'energia pari a 7000 volte l'energia che corrisponde alla sua massa da fermo. La sua energia totale è in effetti la somma dell'energia immagazzinata nella sua massa - molto piccola - e dell'energia che viene dal suo movimento, quella che i fisici la chiamano energia *cinetica*.

I protoni accelerati da LHC hanno un'energia cinetica decisamente grande. Quando due protoni di LHC si scontrano, la somma delle loro energie, corrispondente a 14.000 volte quella associata alla massa di un solo protone, viene messa a disposizione per creare nuove particelle anche molto più pesanti dei protoni, per esempio un bosone di Higgs, che ha una massa 125 volte più grande di quella di un protone. Ripetiamolo dunque: un acceleratore di particelle è una macchina che crea particelle nuove e potenzialmente anche molto pesanti, a partire dalla velocità impressa a particelle leggere e comuni.

Se siete interessati a capire meglio come si faccia ad accelerare una particella, vi rimando a una serie di articoli che avevo scritto sul mio blog. Cercate su borborigmi.org "Come funziona LHC?" e troverete anche un PDF scaricabile con tutti i dettagli. Trovate il link anche nelle note a questo episodio.

Come ci ricorda Juhan nella sua domanda, LHC è un acceleratore circolare: i protoni viaggiano su una traiettoria chiusa di 27 km, percorrendo la circonferenza dell'acceleratore 11000 volte al secondo. Il vantaggio di un acceleratore circolare consiste nel poter far passare ripetutamente le particelle nel punto in cui vengono accelerate. Questo permette di aumentarne la velocità sino a valori molto elevati, sfruttando più volte le stesse camere acceleranti.

Esistono anche degli acceleratori detti "lineari", dove la traiettoria delle particelle non curva, e l'accelerazione si compie - semplificando molto - nella sola lunghezza dell'acceleratore. La limitazione evidente di questo modello di acceleratori è l'impossibilità di riutilizzare più volte le stesse strutture acceleranti come si fa invece nel caso di un acceleratore circolare. Perché dunque si parla di costruire un nuovo acceleratore lineare?

Perché la risposta sia chiara, ci serve fare una piccola parentesi, e parlare di quali sono le particelle che normalmente acceleriamo nei nostri collisionatori. Intanto, per poter essere accelerate, le particelle devono essere dotate di una carica elettrica, e poi, almeno per quello che siamo in grado di fare oggi, devono essere particelle stabili, ovvero non devono disintegrarsi mentre le acceleriamo.

La scelta cade dunque su protoni ed elettroni (ed eventualmente le loro antiparticelle, aspetto su cui oggi sorvoleremo). Allora, un elettrone è una particella elementare, mentre un protone è una particella composta. Un protone è infatti formato, nel modello più semplice che potete immaginare, da tre quark tenuti insieme da gluoni. Inoltre, la massa di un elettrone è circa 2000 volte più piccola della massa di un protone. Questi due aspetti - accelerare una particella elementare oppure una composta, e la massa della particella accelerata - hanno delle conseguenze sul disegno dell'acceleratore, e sulla fisica che sarà possibile studiare a partire dalle sue collisioni.

Se faccio collidere un elettrone con un positrone, come si faceva nell'acceleratore in funzione al CERN prima di LHC, sto facendo interagire tra loro due particelle elementari, e dunque tutta la loro energia verrà trasformata in materia nella collisione, senza alcun rimasuglio a sporcare la misura. Un collisionatore di elettroni e positroni è in generale dunque una macchina pensata per fare misure di precisione.

Se invece faccio collidere un protone con un altro protone, come facciamo ora a LHC, essendo i protoni delle particelle composte, l'interazione avviene in realtà tra un componente del primo protone e un componente del secondo, per esempio tra un gluone e un gluone.

Siccome i componenti del protone condividono l'energia del protone, ognuno di loro ne porta soltanto una frazione, e l'energia messa dunque a disposizione nella collisione non è mai l'energia totale dei due protoni, anzi, è spesso molto inferiore. Come se non bastasse, l'energia effettiva della collisione è sempre sconosciuta, perché siamo in grado di predirre solo quale sia la probabilità che un certo componente abbia una certa energia, e solo quale sia la probabilità che sia proprio quel componente a interagire. Per finire, mentre i due componenti dei due protoni interagiscono, le parti restanti dei due protoni rimangono in giro a sporcare la misura. Questo rende un collisionatore di protoni uno strumento un po' meno preciso di un collisionatore di elettroni.

Se le cose stessero semplicemente così, verrebbe naturalmente da costruire soltanto collisionatori di elettroni e positroni, puliti e adatti alle misure di precisione. C'è però un altro fattore da considerare.

Quando una particella carica si muove su una traiettoria circolare, avviene un fenomeno che ha un nome tedesco un po' spaventoso, *bremstrahlung*, che significa "radiazione di frenamento". La particella carica, proprio perché costretta a curvare, perde una parte della sua energia, sotto forma di radiazione. Quanta ne perde? Dipende dalla sua massa, e dal raggio della traiettoria circolare su cui la particella è costretta. Più piccola è la massa, maggiore è la perdita di energia:

a parità di velocità, sulla stessa traiettoria circolare un elettrone perde 16000 miliardi più di energia che un protone! È infinitamente più facile accelerare un protone ad altissime velocità che un elettrone, ed è per questa ragione che con LHC accettiamo di avere collisioni meno precise e più sporche in cambio della possibilità di produrre nuove particelle rare e pesanti.

Tutto questo ci porta finalmente alla domanda di Juhan: perché si pensa di costruire un acceleratore lineare lungo 20 km in Giappone? Questo acceleratore sarebbe un collisionatore di elettroni e positroni. Lineare dunque, per evitare le perdite di energia dovute alla radiazione di frenamento che si avrebbero su un acceleratore circolare, e pensato piuttosto per fare misure di precisione delle proprietà di particelle già note come il bosone di Higgs, e non tanto per tentare di scoprirne di nuove.

Non è impossibile pensare di fare un collisionatore di elettroni e positroni circolare, ma occorrerebbe in questo caso mitigare la perdita di energia. Siccome la *bremstrahlung* diminuisce all'aumentare del raggio della traiettoria circolare, una possibilità sarebbe scavare un tunnel circolare molto più grande di quello attuale: è infatti questo è proprio uno dei progetti in discussione per il successore di LHC al CERN: un tunnel di 100 km - quello attuale ne misura 27 - che ospiterebbe prima un collisionatore elettrone-positrone per misure di precisione, e poi, una volta sviluppata la tecnologia necessaria, un nuovo collisionatore di protoni capace di portare i protoni a un'energia 50000 volte superiore alla loro massa, aprendo così la strada alla ricerca di nuovi fenomeni oggi inaccessibili.

La domanda di Juhan si chiude con un commento, che dice: "E poi a Ginevra c'è già quasi tutto quello che serve (ed è anche più vicino)". Chiaramente, sulla scelta di quale sarà il collisionatore che succederà a LHC, e su dove verrà costruito, non pesano solo considerazioni scientifiche, ma anche valutazioni di tipo tecnologico, economico e geopolitico. Di queste, se volete, parleremo magari un'altra volta.

LA FORMA DEL FUOCO

La seconda domanda di oggi viene da Tommaso, che ha 12 anni e chiede:

- Perché il fuoco appare in questa forma?

La metto insieme alla domanda di Nicola, che chiede:

- Qual è il meccanismo di diffusione del calore di una candela? Perché, a parità di distanza, è più calda l'aria sopra che quella di lato?

Come sempre, è necessaria una minima introduzione: che cos'è il fuoco?

In genere chiamiamo "fuoco" il risultato di una reazione chimica di ossidazione rapida e che rilascia luce e calore - i chimici la chiamerebbero esotermica. È importante dire che si tratta di

una reazione *rapida*, perché esistono altri fenomeni di ossidazione più lenta, per esempio l'arrugginimento o la digestione, che non possono certo definirsi "fuoco".

Proprio perché si tratta di una reazione chimica che produce calore e luce, uno degli effetti collaterali del fuoco è la presenza di fiamme, che sono la porzione visibile di un fuoco. Una fiamma è composta da gas caldi, principalmente anidride carbonica, vapore acqueo, ossigeno e azoto. A seconda di che cosa stiamo bruciando, potrebbero esserci altre componenti chimiche, alcune anche ancora allo stato solido, che possono dare alle fiamme dei colori caratteristici. Per esempio, quando bruciamo del legno o la cera di una candela, le fiamme contengono una certa quantità di particelle solide incandescenti di una sostanza che chiamiamo fuliggine, e a cui siamo abituati a pensare come a una polvere nera appiccicosa, che troviamo alla fine di un fuoco per esempio nella canna del camino di un stufa, ma che esiste già nelle fiamme, e che, essendo incandescente, dà loro quel caratteristico colore arancione che associamo al fuoco.

La temperatura della fiamma d'una candela varia tra i 600 gradi della zona non luminosa intorno allo stoppino, agli 800 della zona blu, per salire ai 1200 gradi della zona luminosa arancione, e ancora di più a circa 1400 nella zona incolore intorno alla fiamma. Può sembrare controintuitivo, ma la temperatura è dunque maggiore nella zona invisibile intorno a una fiamma, piuttosto che la fiamma stessa, che è però già ben calda!

Le fiamme di un fuoco sembra spesso muoversi come fossero vive: è il flusso dei gas caldi che formano le fiamme a generare il movimento. Nel caso di una candela accesa in una stanza senza vento e movimenti d'aria, la fiamma si comporta di solito in modo molto ordinato. Il movimento dei gas che formano la fiamma e dell'ossigeno dell'aria che alimenta la combustione, che seguono un regime che i fisici chiamano "laminare", ovvero con i gas che scorrono gentilmente in strati sovrapposti senza mescolarsi, come le acque di un fiume calmo e placido. Le fiamme del fuoco di un falò sono invece agitate come l'acqua di un cascata, con i gas che sbattono e si avvolgono caoticamente su se stessi, in un flusso che non a caso i fisici chiamano "turbolento".

Tommaso, che ha 12 anni e che dunque sta probabilmente studiano alla scuola media i diversi stati della materia, avrà certamente imparato che ne esistono tre: solido, liquido e gassoso. In realtà gli insegnanti di scienze dimenticano spesso di ricordare che esiste un quarto stato della materia, chiamato "plasma". È quello stato della materia in cui la temperatura è talmente alta che gli atomi che la compongono perdono i loro elettroni, e la materia forma dunque un gas di ioni e elettroni. Non sono molte le situazioni in natura in cui si forma un plasma: la più comune è l'atmosfera ionizzata intorno a un fulmine, senza contare naturalmente l'interno del Sole e delle stelle. Certe fiamme, però, raggiungono a volte temperature così alte da provocare la perdita degli elettroni agli atomi dei gas che le compongono - a "ionizzarli", direbbe un fisico - e diventare dunque un plasma. Bisogna però che la temperatura sia veramente molto elevata, come per esempio nella combustione di certi metalli come il magnesio. Nei fuochi casalinghi le fiamme sono principalmente composte da gas, con forse una piccolissima frazione di plasma nelle zone più calde.

Il calore di una fiamma si diffonde con due meccanismi: per convezione, ovvero per lo spostamento delle molecole calde dei gas dentro la fiamme, e per irradiazione, ovvero per l'emissione di calore sotto forma di luce o di radiazione infrarossa. Il primo meccanismo segue una direzione ben precisa. Siccome la candela brucia sulla Terra, e i gas della fiamma sentono dunque gli effetti della gravità, si muovono sotto la spinta di archimede: i più caldi e meno densi tendono a salire, dando alla fiamma della candela la sua caratteristica forma allungata. Questo flusso di gas caldi verso l'alto è la ragione per cui la candela scalda molto di più sopra di lei che di fianco. Ai lati della candela domina infatti l'emissione di calore per irraggiamento, che è uniforme in tutte le direzioni, e meno importante di quello per convezione. Il che non vuol dire che un fuoco non scaldi anche ai suoi bordi, anzi: un falò scalda le persone che gli stanno intorno principalmente per irraggiamento!

Sottolineavo prima la necessità della gravità perché si formino quei movimenti dei gas che danno la forma caratteristica alla fiamma d'una candela. Le cose sono infatti decisamente diverse se accendiamo una fiamma in assenza di gravità. È un esperimento che è stato effettuato sulle stazioni spaziali: se cercate in rete troverete fotografie e video, vi ho messo il link a una foto della NASA nelle note a questo episodio.

In condizioni di microgravità, per via dell'assenza dei moti convettivi dovuti alla spinta di Archimede, la fiamma della candela non si allunga e rimane pressoché sferica. L'assenza del flusso di gas verso l'alto limita anche l'arrivo dell'ossigeno, che normalmente viene aspirato dalla fiamma dal basso e va a alimentare la combustione, e l'eliminazione dell'anidride carbonica verso l'altro. La combustione nello spazio è dunque molto meno efficiente, la temperatura della fiamma non cresce come sulla terra, la fiamma ha un colore azzurrino quasi invisibile, e non illumina per niente.

Leggere a lume di candela nello spazio, in assenza di gravità, è semplicemente impossibile.