Buona sera, ben arrivati come sapete dal programma questa sera cercherò di tenervi svegli per circa un’oretta parlandovi del sole e di quello che avviene nel suo interno ci servirà anche da trampolino di lancio verso la chiacchierata della volta prossima in cui generalizzeremo il discorso e parleremo anche delle stelle;

parliamo del sole e delle reazioni nucleari affronteremo alcune delle domande che vedremo saranno quanto è grande il sole, di che cosa è fatto, come mai brilla… che sono un po’ le domande che l’uomo si è sempre posto, fin dalla notte dei tempi.

Per fare questo dovremo passare da una visione un po’ romantica del sole andando invece a studiare un po’ la fisica che ci sta dietro; questo è un passaggio che di solito non è troppo apprezzato perché parecchia gente pensa che si perda molto passando da questa visione romantica delle cose a una visione più approfondita , spero di convincervi che in realtà questo non è una perdita ma piuttosto un modo migliore di comprendere le cose.

Introdurremo concetti fisici man mano che ci servono e cercherò di spiegarli con degli esempi.

Il sommario è questo:

* prima strumenti di indagine sul sole che sono fondamentalmente: gli osservatorio solari e le sonde spaziali
* poi alcuni dati fondamentali del sole
* poi il sole come lo vediamo , ci sono alcune cose che sono date per scontate e vediamo di approfondire,
* poi vedremo anche come facciamo a capire cosa c’è all’interno del sole e diremo qualcosa sull’eliosismologia che permette di sondare quello che c’è all’interno del sole, esattamente come la sismologia ordinaria permette di sondare quello c’è all’interno della terra.
* Poi affronteremo la domanda fatidica cosa fa brillare il sole: parlando dell’interno affronteremo il problema delle reazioni termonucleari e come possiamo essere certi che queste reazioni termonucleari davvero avvengono e questo ci riporta che è stato risolto solo di recente che è il problema dei neutrini solari: particelle prodotte da queste reazioni del sole.
* Se avremo tempo parleremo dell’attività solare: vedremo come il sole non è una stella sempre immutabile ma ha un aspetto che cambia periodicamente ogni circa 11 anni con delle conseguenze anche interessanti sulla terra.

Vediamo quindi come primo punto come facciamo a studiare il sole.

Uno di solito è abituato a vedere degli osservatorio con i telescopi all’interno perché i telecopi normali per studiare le stelle lontane devono raccogliere quanta più luce possibile da queste stelle per formare delle immagini e poi gli spettri da cui è possibile analizzare; per l’osservazione solare il problema è leggermente diverso perché il sole di luce ne emette tanta quindi dobbiamo cercare di sfruttarla nel migliore dei odi; questo è un tipico esempio di telecopio solare, il più grande esistente e se uno lo guarda da fuori ha tutto tranne che la faccia di un osservatorio è a Kitt peak in Arizona ed è formato da un parte esterna però prosegue anche nel sottosuolo quindi cominciamo a vedere cosa c’è fuori: è una struttura che rimane ferma però il sole si muove nella volta celeste e quindi qua in cima c’è uno specchio che si chiama celostata che segue i lmovimenti del sole durante il suo spostamento diurno e tramite questo specchio concavo riflette l’immagine del sole all’interno di questa struttura dove c’è l’asse ottico del telescopio qui è meglio riferirsi alla figura, questa luce arriva, l’immagine viene formata da uno specchio e riflessa a circa metà lunghezza e viene poi rimandata in questo pozzo al fondo di questo pozzo si forma proprio un’immagine del sole grande circa 1 metro e qui sono sistemati i vari strumenti che saranno spettrografi e altre cose che vedremo in dettaglio più avanti.

Questo mi dà l’occasione di avvertire se qualcuno volesse osservare il sole ci sono un po’ di cautele da osservare, per esempio mai l’osservazione diretta poi se magari c’è una domanda in proposito ne parliamo alla fine però c’è il rischio davvero di rimetterci la vista se uno non adotta delle precauzioni.

Se vogliamo far avere una visione completa del sole gli osservatori da terra non bastano, infatti sappiamo che il sole oltre ad emettere luce visibile emette anche altri tipi di radiazioni che vanno dalle onde radio fino all’infrarosso fino al visibile, ultravioletto e poi raggi x e gamma; la maggior parte di queste radiazioni vengono bloccate dall’atmosfera terrestre: questo grafico rappresenta in modo un po’ schematico la quota a cui le radiazioni vengono fermate per fortuna raggi gamma x e UV che sono i più dannosi per noi vengono fermati ad alta quota e non arrivano a terra; quindi se volessimo studiare il sole in UV o raggi X dovremmo prendere degli osservatorio e mandarli sopra l’atmosfera; questo è quello che si è iniziato a fare di recente …

D. Anche gli infrarossi vengono bloccati?

R. Gli infrarossi vengono sporcati tantissimo dall’atmosfera terrestre perché ci sono un sacco di righe di assorbimento nell’infrarosso che disturbano un po’ l’immagine diciamo che fuori dall’atmosfera uno è sicuro di non avere queste interferenze.

Questa è il lancio di uno dei satelliti attualmente attivi per lo studio dell’attività del sole e questa è una panoramica di tutti gli osservatori solari nello spazio che sono attivi attualmente; l’ultimo che è il Solar.---- Observatory è stato lanciato nel febbraio di quest’anno ed è l’ultimo arrivato in questa corte di strumenti.

Che cosa impariamo da queste osservazioni? Cominciamo a vedere alcuni dati fondamentali sul sole:

le prime cose che si possono dedurre in realtà dalla legge di Keplero : la prima è la distanza tra sole e terra che è di circa 150 milioni di km poi sapendo che il sole ha una dimensione angolare di circa mezzo grado, conoscendo questa distanza è possibile calcolare il diametro che è di un po’ più di un milione di km, vale sempre la pena di riferirsi alla terra come unità di misura e ha un diametro di circa 109 volte quello della terra quindi una stella grande ma non eccessivamente grande come invece ce ne sono altre; la sua massa è di circa 2x10^33 g (spero che nessuno si spaventi per questa notazione : 10^30 è 1 seguito da 30 zeri) ; è 300000 mila volte la massa della terra e questi sono dati che si possono rilevare con un’indagine abbastanza diretta; poi ci sono anche altre quantità che sono più difficili da trovare che però quando si va a studiare la fisica del sole sono fondamentali; la prima è quanto è luminoso il sole bene questo è ancora abbastanza facile infatti sappiamo che su un metro quadro della terra piovono circa 1400 W di potenza che derivano dal sole adesso questo metro quadro è uno dei tanti metri quadri che formano una superficie di una sfera di 150 milioni di km di raggio quindi moltiplicando la superficie di questa sfera troviamo la luminosità totale irraggiata del sole che è di circa 4x10^26 W quindi una quantità veramente enorme; sappiamo anche che questa emissione continua di radiazione dura con poche variazioni da circa 5 miliardi di anni e quindi il primo problema che ci si presenterà sarà capire come mai questo può succedere; poi dalla luminosità possiamo anche calcolare la temperatura del sole che sappiamo deve essere di circa 6000 gradi; questa è già una cosa più strana da capire; proviamo a vedere come si fa perché vale la pena e permette di vedere che è uno dei primi casi in cui possiamo vedere che la fisica che governa la vita delle stelle, del sole e dello spazio è al stessa fisica che vediamo nei laboratori terrestri. Che è una scoperta che non è eccessivamente antica che fondamentalmente risale a Galileo; come facciamo a calcolare questa temperatura?

La parolina magica che dobbiamo tenere a mente è quella di radiazione di “corpo nero” cos succede?

Proviamo a fare un esperimento.

Questa è una monetina da 5 centesimi riscaldata e man a mano che la temperatura aumenta la monetina si scalda e diventa più luminosa; man mano che si scalda intanto aumenta la luminosità, primo e secondo il colore vira dal rosso al giallo andando verso il bianco; questa caratteristica di emettere tutta la radiazione in questo modo è caratteristica di molti oggetti e si chiama radiazione di corpo nero: un corpo che una volta riscaldato è in grado di emettere qualunque tipo di radiazione; si chiama corpo nero perché , dobbiamo entrare nei meandri contorti della testa dei fisici, un corpo che è capace di emettere tutta la radiazione è capace anche di assorbirla tutta e quindi apparirebbe nero; da questa osservazione, fortunatamente la radiazione di corpo nero è interessante perché le caratteristiche di questa emissione quindi la luminosità e il colore dominante non dipendono da fatti particolari di cosa è fatto il corpo se è allo stato solito, liquido o gassoso ma dipendono unicamente dalla temperatura e quindi questo permette senza sapere niente di questo oggetto che emette come corpo nero è possibile determinare la temperatura; i corpi neri sono stati studiati in modo molto esteso specialmente alla fine dell’800 inizi del’900 e hanno portato tra l’altro ad una rivoluzione nel campo della fisica e le cose da tenere a mente sono sostanzialmente due:

il primo è quello che abbiamo detto prima: la luminosità di questo corpo aumenta man mano che viene riscaldato, questa è una legge fisica nota come legge di Stefan-Boltzmann, e poi il fatto che il colore viri dal rosso al giallo e poi verso il bleu, verso frequenze più alte è nota come legge di Wien; quindi la buona notizia è che queste cose ci servono per studiar anche il sole oltre alle monetine da 5 centesimi infatti il sole per una grazia ricevuta dalla natura si comporta in buona approssimazione come corpo nero quindi i gas del sole se sono riscaldati si comportano come una monetina da 5 centesimi quindi in base a queste leggi in particolare in base alla legge di Stefan e Wien possiamo calcolare la temperatura superficiale del sole che è di circa 6000 gradi come abbiamo visto prima.

Questo ci solleva un primo problema , sappiamo dagli studi di fisica che un gas quando viene riscaldato tende ad aumentare la propria pressione quindi il sole è una palla che è immersa nello spazio quindi è immersa nel vuoto quindi come mai questi gas che sono così caldi non si espandono? Questa domanda ci porta al concetto di equilibrio idrostatico parola difficile per dire che in realtà la pressione che tende a fare espandere il sole in realtà non è l’unica forza che c’è, la seconda forza , abbastanza comprensibilmente, è la gravità infatti anche i gas del sole pesano e la gravità tenderebbe si suo a far collassare il sole verso il suo centro quindi questo equilibrio tra pressione del gas che tende a far espandere e la gravità che tende a concentrarlo risulta un equilibrio di forze che si chiama equilibrio idrostatico vedremo che è importante per il sole ma è importantissimo anche quando si va a studiare la vita delle altre stelle infatti la vita di una stella da quando nasce fino alle sue fasi esplosive è tutta una lotta per riuscire a raggiungere questo equilibrio idrostatico vedremo che ci sono alcune forze che devono essere compensate per raggiungerlo.

Questo concetto di equilibrio idrostatico ci permette di dare anche uno sguarda in avanti come aperitivo di quello che verrà, infatti non vale solo per il sole ma anche le altre stelle hanno una massa, una pressione interna che devono controbilanciarsi quindi possiamo pensare che le stelle molto massicce e molto pensanti esercitano un peso enorme sulle parti centrali e quindi per controbilanciare questo peso enorme serve una pressione enorme, che corrisponde ad una attività enorme e quindi l’idea è che le stelle più massicce siano anche quelle più calde; questo è un risvolto abbastanza scientifico che deriva da questo concetto di equilibrio che ci permette di capire una buna parte delle stelle che ci sono in circolazione e infatti quello che è stato fatto è un diagramma di questo tipo.

Quelle più grandi durano meno perché devono bruciare molto più velocemente il combustibile nucleare.

Questo è un grafico, diagramma famoso in cui ogni puntino rappresenta una stella e questa stella è raffigurata sull’asse delle x la temperatura, la cosa singolare è che la temperatura anziché salire da qua a qua fa il contrario, questa è l’unica cosa un po’ strana di questo grafico e la seconda quantità è la luminosità di una stella che grosso modo possiamo fare finta che sia la massa; diciamo che una stella molto massiccia ha una superficie molto grande e quindi è molto luminosa quindi questo prendetelo come un indicatore della massa, come prima approssimazione quindi se prendiamo una stella come il sole che ha una temperatura di 6000 gradi e una luminosità la troviamo qui in mezzo; prendiamo altre 50000 stelle che troviamo in circolazione e riportiamo le loro luminosità e le loro temperature e vediamo che la maggior parte delle stelle si dispone lungo questa diagonale che si chiama sequenza principale che va dalle stelle molto piccole quindi molto leggere con basse temperature andando verso stelle più massicce con temperature più alte quindi tutte le stelle che compongono questa diagonale hanno questa relazione di proporzionalità tra pressione idrostatica generata dai gas e gravità che le tiene insieme però ci son alcune eccezioni infatti non tutte le stelle si dispongono sulla sequenza principale: abbiamo le supergiganti che sono piuttosto fredde e enormi e le nane bianche che sono molto calde però piccole quindi questa esistenza di questi intrusi in questo diagramma ci fa già sospettare che le stelle in qualche modo non sono tutte così facili da capire come il sole infatti un diagramma di questo genere è quello che ha innescato tutti gli studi dell’evoluzione stellare che vedremo la prossima volta.

Domanda: di che cosa è fatto il sole? Questa è un’altra delle domande che si è sempre fatto l’uomo e che ha avuto una risposta in tempi molto recenti , verso la fine dell’ottocento, quando si è cominciato a capire come era fatta la materia; sapete che la materia è composta da atomi, un atomo è composta da una parte centrale che è il nucleo formato da protoni e neutroni , attorno a cui orbitano elettroni che sono particelle molto più leggere con carica elettrica negativa; la cosa interessante di un atomo è che uno di solito può pensare ad un atomo come un sistema solare in miniatura con pianeti al posto degli elettroni, in realtà le cose sono leggermente diverse perché mentre un pianeta in linea di principio può orbitare dove vuole attorno al sole, le orbite degli elettroni sono ben determinate cioè per ogni atomo esiste una serie ben precisa di orbite possibili cioè un elettrone può orbitare solo su una di queste non può orbitare in mezzo, ma qui o qui; ciascun atomo ha una sua serie caratteristica di orbite per esempio le orbita possibili per una atomo di idrogeno sono diverse da quelle possibili per un atomo di elio e così via… Cosa succede se un atomo come questo viene investito da una radiazione per esempio? Oppure un elettrone esterno colpisce un elettrone sull’orbita bassa? Be’ succede che questo che inizialmente pascola tranquillo sulla sua orbita più bassa viene fatto saltare ad un’orbita più alta e durante questa processo assorbe solamente l’energia che gli serve.

Se abbiamo una radiazione che colpisce questo atomo, l’elettrone può assorbire parte di questa radiazione quindi acquisisce energia per saltare su un’orbita più elevata; supponiamo di voler far saltare questo elettrone da qui alla prima orbita, questo elettrone assorbe solamente la radiazione che gli serve per poter l’energia che gli serve per compiere questo salto, né più né meno, quindi se per esempio il nostro atomo è investito da un flusso di radiazione di diverse energie , quindi di diversi colori, questo atomo assorbirà solamente la luce o la radiazione, quell’energia che gli serve per compiere questo salto.

In un atomo gli elettroni, l’idrogeno è il caso più semplice, ha delle le orbite che sono ben determinate, un elettrone può rimanere solo a certe distanze, per capirci, dal nucleo, non può capitarci in mezzo; a ciascuna di queste orbite corrisponde una sua energia, se volgiamo una energia potenziale sulla parte centrale diciamo che un atomo più vicino al nucleo sarà molto più legato rispetto ad un elettrone che è su un’orbita più periferica; in questo caso non è gravità ma sono forze elettrostatiche. La forza elettrostatica è quella che domina su queste scale.

Quindi se io voglio spostare un elettrone da un’orbita ad un'altra devo dargli energia esattamente come se volessi far uscire la terra dal sistema solare o riportarla sull’orbita di giove gli devo dare energia per poter portarsi su un’orbita più esterna.

D. Ma quindi cambia la struttura della materia?

R. Quello che cambia è solo l’elettrone che salta da qui a qui; di solito però questa transizione dura pochissimo perché l’elettrone appena finisce la forzante della radiazione ritorna sul suo stato fondamentale;

D. che tipo di energia bisogna dargli?

R. Qualsiasi, un elettrone libero che vaga per i fatti suoi può cozzare contro questo elettrone con una energia pari alla energia cinetica oppure per radiazione: l’elettrone può assorbire della radiazione e può usarla per compiere il salto.

Cosa succede? Supponiamo di avere un atomo di quello che volete nel sole dalla parte centrale del sole che è più calda arriva continuamente questa energia e quindi gli atomi che sono nella parte periferica del sole, nella sua atmosfera possono assorbire questa energia facciamo il caso dell’atomo di idrogeno, fare un salto verso l’orbita più alta dopodiché ritornano subito allo stato fondamentale poi questo si può ripetere più e più volte; la radiazione che arriva ha una sua direzione ben determinata, una volta che poi l’elettrone ricade sullo stato fondamentale riemette l’energia che ha assorbito solo che anziché emetterla nella stessa direzione incidente la emette dappertutto in modo casuale il risultato è che noi quando vediamo questo atomo ci manca esattamente per esempio nello spettro luminoso ci manca la luce che corrisponde a quella che è stata assorbita dal nostro atomo per compiere un salto da qui a qui; e in effetti quello che si può osservare anche facendo incidere la luce del sole attraverso un spettrografo o un prisma con una fenditura

Possiamo osservare uno spettro elettromagnetico solcato da tante righe scure, ciascuna di queste righe scure corrisponde ad uno di questi salti energetici in un particolare atomo; per esempio, queste due righe molto evidenti nel giallo corrispondono al salto tra due orbite nell’atomo del sodio; quindi se nello spettro del sole osserviamo queste due righe nel giallo sappiamo dai nostri laboratori che l’unico atomo esistente in natura che è capace di fare queste due righe è l’atomo di sodio quindi da questa analisi possiamo capire che nel sole c’è l’atomo di sodio.

Poi ogni atomo ha una sua famiglia particolare di orbite possibili e quindi è possibili per ogni atomo una serie di salti tra un’orbita e l’altra e quindi ogni atomo ha una sua sequenza di righe che qui nello spettro vediamo tutte mescolate; però il buon spettroscopista le conosce tutte ed è in grado di calcolare quindi quali elementi sono responsabili dell’emissione, della presenza di queste righe e quindi capire di cosa è fatto il sole; quello che si trova è che l’elemento di gran lunga più abbondante è l’idrogeno, seguito dell’elio ossigeno e carbonio, e altri elementi pensati che diventano sempre più presenti in percentuali minori; la cosa interessante riguardo all’elio è proprio il nome perché helios che deriva dal greco è l’elemento chimico che è stato identificato per la prima volta negli spettri solari: sulla terra non si conosceva.

Poi un’altra cosa interessante sugli spettri è che la forma e la posizione di queste righe dipendono anche da altri fattori ad esempio se questi atomi sono in movimento o sono presenti delle forze magnetiche perché in un caso e nell’altro è possibile dalla forma di queste righe calcolare per esempio eventualmente se il gas è immerso in campo magnetico oppure se questo atomo si sta spostando e quindi se ci sono dei movimenti di massa all’interno del gas questo senza muoversi dal laboratorio; la cosa interessante è che questa tecnica di spettroscopia la possiamo applicare anche a stelle a distanza decine di anni luce, addirittura a galassie che sono molto distanti senza muoverci dal nostro laboratorio.

Ciò detto possiamo cominciare una panoramica più dettagliata su come è fatto il sole. Ora abbiamo un po’ di dettagli fisici a disposizione.

Il sole è una sfera di gas quindi ci si aspetta che non abbia una superficie solida come la terra piuttosto ci si aspetta che questo suo gas sia un po’ assimilabile ad una cipolla formata da tanti strati; qui ci sono tanti strati formati da gas hanno delle condizioni di temperatura, pressione e densità diverse che quindi bisogna caratterizzare in altro modo ; per esempio la maggior parte della luce che vediamo nel sole deriva da uno strato che si chiama fotosfera che è quello di gran lunga più importante che vediamo già qui non è sempre perfettamente giallo uniforme, ogni tanto è punteggiato da queste macchioline che sono molto interessanti e che vedremo meglio tra poco.

La fotosfera però non è lo strato più esterno del sole infatti oltre la fotosfera c’è una corona che si chiama corona solare formata da gas molto rarefatti che sono estremamente tenui come luminosità e quindi è possibile vederli solamente quanto, durante un’eclissi di sole c’è la luna che ci si piazza davanti il diametro angolare della luna è uguale a quello del sole quindi la luna cancella, maschera i raggi più luminosi che arrivano dalla fotosfera e ci permette di vedere la parte periferica della corona del sole; notate questa è una fotografia presa durante un’eclisse , si vedono questi raggi della corona solare in posizione piuttosto strana e la cosa interessante da notare è che sono di milioni di km quindi questa corona solare si estende per diversi milioni di km dal sole quindi è veramente estesa, non è solo un’atmosfera piccolina come quella della terra che sono solo 10 km rispetto al 10000 km di diametro del pianeta.

Durante l’eclissi si può vedere anche un’altra parte dell’atmosfera solare che si chiama cromosfera, che se io metto un filtro su fotosfera e la corona più rarefatta esterna , si chiama cromosfera perché è formata da questi pennacchi che sono di un colore rosa, dovuto ad una particolare riga di emissione dell’idrogeno, con certe condizioni di densità un atomo anziché assorbire radiazione, la emette in particolare l’idrogeno in queste condizioni emette luce di un colore ben caratteristico un po’ come i tubi al neon quando sono sollecitati dall’elettricità che emettono una colore ben determinato.

Adesso cerchiamo di capire come tutti questi pezzi si mettono insieme cercando anche di capire come è fatto l’interno del sole; questa è un’immagine accelerata in cui si vede la rotazione del sole e la prima cosa che salta all’occhio è che ci sono un sacco di queste strutture che si chiamano macchie solari che si osservano da migliaia di anni però si è cominciato a studiarle in modo sistematico con l’invenzione del telescopio dal 1610 in avanti.

Poi un’altra cosa che già aveva notato galileo nelle sue prime osservazione era che usando le macchie come traccianti aveva capito che il sole ruota più velocemente verso l’equatore che non verso i poli questo è una cosa che è diversa ad esempio dalla terra perché sulla terra un punto sull’equatore e un punto a Roma o Milano ci mette esattamente 24 h a fare il giro. Qui invece l’equatore è un po’ più veloce e questo ha delle conseguenze piuttosto interessanti riguardo allo sviluppo dei campi magnetici del sole; poi c’è anche questo fenomeno che si chiama oscuramento al bordo di cui però ora non mi occupo perché è un po’ complicato.

Utilizziamo un po’ le cose dette: per cercare di capire come è fatto l’interno del sole chiaramente quando osserviamo il sole abbiamo detto che vediamo solo la parte esterne i gas del sole sono molto opachi quindi non possiamo vedere troppo in profondità però se utilizziamo per esempio l’effetto doppler quindi lo spostamento dovuto ai movimenti del gas solari possiamo ricostruire un filmatino come quello che vi faccio vedere adesso che è questo…

Questo è un filmato accelerato della fotosfera del sole in cui vedete che la fotosfera è in continuo movimento ci sono zone che si alzano e zone che si abbassano. È un po’ come la pelle del tamburo quando uno la suona ; questi spostamenti sono proprio delle oscillazioni della superficie del sole che in effetti si muove in modo simile a come si muove la pelle del tamburi quando viene percossa e queste onde noi le vediamo solamente alla sommità del sole però propagano anche all’interno, attraverso tutto il sole e sappiamo anche che un’onda, un’oscillazione come questa può propagare oppure meglio ancora le sue modalità di propagazione dipendono anche dalla densità del mezzo in cui si muovono e dalle condizioni di pressione temperatura e densità quindi noi osservando semplicemente la parte periferica, queste oscillazioni sulla fotosfera siamo in grado di ricostruire con tecniche abbastanza complicate che vanno sotto il nome di eliosismologia come queste onde propagano all’interno del sole e quindi ricostruire per esempio profili di temperatura, densità e pressione all’interno del sole questa è una tecnica di indagine che si è sviluppata abbastanza di recente che però ha contribuito a fissare in modo abbastanza chiaro il modello solare standard cioè quello che sappiamo oggi del sole quindi quali sono le condizioni di temperatura, densità, tasso di reazioni nucleari e così via e sono tra l’altro queste tecniche di indagine ci danno poi temperature che sono in ottimo accordo con quelle che possiamo dedurre la presenza di reazioni termonucleari.

Quindi vedendo come è fatto il sole adesso possiamo dargli un’occhiata questo è un immaginario spaccato del sole in cui abbiamo nella parte centrale il nucleo in cui risiede il motore del sole, le reazioni termonucleari e poi questo calore viene un po’ alla volta trasportato verso l’esterno dalla parte centrale tramite irraggiamento , lo stesso che avviene ad esempio con una lampada per abbronzarsi, il calore prodotto dalla lampada viene irraggiato fino a colpire la nostra pelle e poi nella parte più periferica questo modo di traferire calore diventa più inefficiente e viene sostituito da un altro che si chiama convezione ed è lo stesso fenomeno che succede quando accendiamo il gas sotto la pentola, l’acqua fredda a contatto con la fiamma viene riscaldata diventa più leggera, sale, quella più fredda ricade e si formano questi cicli.

Quindi la convezione che appunto si sperimenta tutti i giorni nella pentola del minestrone sappiamo che funziona nella stesso modo anche nel sole e quindi trasporta il calore anche nelle zone più esterne.

Nella parte centrale del sole raggiungiamo temperature dell’ordine di 15 milioni di gradi quindi molto più alte che non nella fotosfera circostante; adesso possiamo arrivare alla domanda come mail sole brilla?

Il sole ha una luminosità di 4 x 10^26 Watt e sappiamo da evidenze geologiche che la terra ha un’età di circa 4,5 miliardi di anni e se la terra il sole si sono formati insieme chiaramente il sole non può essere più giovane poi sappiamo che la luminosità del sole non è variata di molto nel corso delle ere geologiche e quindi il motore del sole, qualunque sia il candidato deve fornire questo tipo di luminosità da miliardi di anni naturalmente per un bel po’ di tempo non si è capito troppo come il sole facesse; una delle prime pensate era che nel sole avvenisse un qualche tipo di reazione chimica però con un rapido calcolo si può vedere che potrebbe sostenere il sole solo per poche migliaia di anni quindi le reazioni chimiche no; un altro fenomeno un po’ più sottile è quello della contrazione gravitazionale se prendete una sfera di gas e la contraete sotto l’azione del proprio peso questa libera una parte della sua energia sotto forma di radiazione anche questo è un meccanismo che le stelle in alcuni frangenti usano però questo fornisce energia solo per pochi milioni di anni. Quindi anche questo non funziona.

Il mistero totale fino al 1938 quando Hans Bethe che è un fisico tedesco emigrato negli stati uniti ha suggerito l’esistenza di reazioni nucleari.

Cosa succede?

Abbiamo visto come è fatto un atomo, la parte che ci interessava per la spettroscopia era la parte degli elettroni, che è la parte più esterna dell’atomo. In realtà ad esso vogliamo vedere cosa c’è nella parte centrale di un atomo: è formato da un nucleo che a sua volta è formato da particelle con la stessa carica elettrica che sono i protoni e particelle a carica neutra che sono neutroni.

Vale la pena di dare delle scale ad esempio se immaginiamo di portar questo nucleo ad un centimetro di diametro l’elettrone orbiterebbe a circa un km di distanza quindi vedete come un atomo nomale in condizioni nomarli praticamente è vuoto.

Che cosa succede all’interno del nucleo? Le particelle, i protoni hanno la stessa carica elettrica però ci hanno sempre insegnato che le particelle con la stessa carica elettrica tendono a respingersi; allora come mai i protoni rimangono così vicini all’interno dell’atomo? La risposta è dovuta al fatto che su queste scale di circa 10^-13 cm , le scale di un nucleo atomico, in realtà interviene un’altra forza oltre a quella elettrostatica che si chiama forza nucleare forte e come suggerisce il nome è nucleare forte perché è molto più forte della forza elettrostatica ed è una forza attrattiva quindi anche se due particelle come due protoni hanno la stessa carica elettrica a queste distanze la forza elettrostatica non conta quasi niente conta solo la forza forte che le tiene insieme; quindi come questo può servire in un sole? In un gas ad altissima temperatura come trovate nel nucleo del sole abbiamo che due protoni possono tramite i loro spostamenti caotici possono avvicinarsi fino a distanze dell’ordine del nucleo atomico dove la forza forte prevale quindi in questo caso i due protoni si agganciano dalla forza nucleare forte e danno vita ad un nucleo di un elemento più pesante che si chiama deuterio e in questo processo liberano un quantità enorme di energia che è un milione di volte più elevata di quella che si può ottenere con una reazione chimica; se si fa un rapido conte se il sole con una reazione chimica poteva rimanere vivo per un mille anni, poniamo, con una reazione nucleare può rimanere vivo per un miliardo di anni, questa è la risposta che stavamo cercando; nel sole avvengono reazioni nucleari; ce ne sono di diverso tipo, quella più semplice, che dà anche la maggioranza dell’energia è la catena protone - protone che è quella lì sopra in cui in diversi stadi che non sto a descrivere nei dettagli abbiamo quattro protoni in diverse fasi si fondono insieme per dare un nucleo di elio che è formato da due protoni e due neutroni; c’è poi un altro ciclo che è molto importante ma dà un contributo percentualmente molto più piccolo in cui intervengono atomi di carbonio azoto e ossigeno che però fanno solamente da catalizzatori cioè accendono la relazione ma non intervengono quindi avete quattro atomi di idrogeno all’inizio e un atomo di elio alla fine anche in questo caso.

Ma siamo sicuri che queste reazioni avvengano nel sole?

La domanda è chi è chi entra a vedere?

Ovviamente questo non è possibile quindi bisogna aguzzare l’ingegno e cercare di capire se abbiamo degli indizi indiretti che queste reazioni avvengano; fino ad una decina di anni fa non era possibile, fino a quando qualcuno ha pensato di andare a vedere gli altri prodotti di questa reazione infatti non è importante solamente l’elio ma nel processo vendono prodotte altre particelle che qui sono indicate con pallini rossi che si chiamano neutrini che sono risaliti di recente agli onori della cronaca.

Questi neutrini hanno una caratteristica bellissima: appena vengono prodotti attraversano tutto il sole come se questo fosse trasparente, una volta prodotti non interagiscono più con niente e scappano dal sole tanto per darvi un’idea ci si aspetta che un cm2 , la superficie della nostra unghia sia attraversata ogni secondo da 60 miliardi di neutrini prodotti dal sole nelle reazioni termonucleari quindi a qualcuno alla fine degli anni sessanta è venuto in mente di andare a cercare i neutrini.

Per fare questo ha allestito un esperimento che vi descrivo perché è eccezionale , un esperimento che è stato allestito in una miniera nel sottosuolo perché i neutrini se attraversano il sole come se fosse trasparente è perché interagiscono molto poco con la materia quindi ci danno un segnale molto debole quindi dobbiamo mascherare tutte le possibili sorgenti di errore quali? Per esempio i raggi cosmici infatti la terra viene investita da una continua pioggia di particelle molto energetiche che si chiamano raggi cosmici che in esperimenti di questo tipo potrebbero disturbare. Se noi l’esperimento lo mettiamo a 1000 metri sotto il suolo, la roccia sottostante ferma tutti i raggi cosmici e fa passare solo i neutrini. Che cosa mettiamo sottoterra? Una specie di bidone che contiene circa 600 tonnellate di un composto di cloro percloroetilene; succede che uno di questi neutrini prodotti del sole attraversa tutto come se non esistesse può andare a colpire uno degli atomi di cloro che ci son in questo bidone e lo trasforma in un atomo di argon che è un altro elemento chimico; questo atomo di argon è radioattivo e quindi è facilmente identificabile quindi tutto queste esperimento era che si riempiva di composto di cloro il bidone, si aspettavano ottanta giorni dopodiché si svuotava e si andavano a cercare i 30 atomi di argon che ci si aspettava su 610 tonnellate di contenuto… Contando quanti atomi di argon c’erano era possibile capire quanti neutrini erano arrivati e quindi quanti neutrini venivano prodotti dal sole quello che è successo con somma costernazione di qualcuno era che si ottenevano solo un terzo dei neutrini aspettati; quindi i casi erano due o non capiamo niente dei neutrini o non capiamo niente del sole; l’altra alternativa che non capiamo niente di tutt’è due non l’hanno mai presa in considerazione.

Alla fine dopo che qualcuno ha sudato freddo si è capito che non capivamo niente dei neutrini e la spiegazione di questo fenomeno è dovuta da un fisico italiano che è Bruno Pontecorvo, il fratello del regista che ha avanzato la seguente ipotesi, sappiamo che i neutrini esistono in tre famiglie: tau, mu e quelli elettronici; i neutrini che vengono prodotti nel sole e che questo esperimento è in grado di rivelare sono quelli elettronici; Pontecorvo ha pensato che possa essere possibile in certe condizioni che un neutrino di una specie si trasformi in un neutrino di un’altra specie; morale se dal sole partono 90 neutrini elettronici durante il volo 2/3 si trasformano in neutrini di un altro tipo che questo esperimento non è in gradi di rivelare e quindi ne vedremo solamente 1/3.

È vero?

Si è vero, alla fine sono stati allestiti altri tipi di esperimento come questo in Giappone anche questo in una miniera di Kamioka

D. è possibile calcolare il possibile numero di neutrini?

R. Sapendo la temperatura del sole e la densità sappiamo che avvengono un certo numero di reazioni nucleari e quindi siamo in grado di stabilire con precisione quanti neutrini vengono prodotti.

In questo altro esperimento anche questo piuttosto curioso, questo è allestito in una miniera, e in questo caso c’era una vasca di un diametro di circa 40 metri riempita con 50 tonnellate d’acqua e le parti di questo contenitore erano rivestite da queste palle che si chiamano fotomoltiplicatori, qui vedete due tecnici sul canotto che stanno sistemando, per dare un’idea delle dimensioni, quando questo esperimento funziona la vasca è completamente riempita d’acqua.

Arriva un neutrino solare, questo può interagire con un elettrone che c’è , compone gli atomi delle molecole dell’acqua e produrre un debolissimo lampo di energia, di luce.

Questo lampo di luce viene preso e amplificato da questi fotomoltiplicatori e quindi viene rivelato; la cosa interessante è che questo esperimento è sensibile a tutti i tipi di neutrini, non solo quelli elettronici e quindi con questo esperimento si è ottenuta per la prima volta la prova che questi neutrini oscillano.

Però siamo nel 1998, l’idea di Pontecorvo era della fine degli anni ’60. Poi la prima evidenza diretta che effettivamente i neutrini solari oscillano è venuta da un esperimento che è simile a quello di prima che però è stata portato avanti in Canada, in Ontario.

In questo caso è stato possibile osservare direttamente i neutrini del sole e conteggiare separatamente i neutrini delle varie specie.

Questa è la prima evidenza che abbiamo che il sole produce neutrini con il tasso aspettato e che quindi nel sole avvengono le reazioni termo nucleari è del 2001 quindi non stiamo parlando di secoli fa, è roba veramente recente.

Come nota a margine anche l’esperimento opera di cui si è parlato molto, che pare abbia trovato i neutroni più veloci della luce, è stato progettato come esperimento per studiare le oscillazioni dei neutrini quindi queste trasformazioni da neutrino mu a neutrino tao e viceversa.

Filmato

In cui vedete accelerato in cui si vede che la superficie del sole abbastanza spesso è costellata da queste macchie scure e da zone più chiare chiamate facole; se uno osserva il sole non le vede sempre ma le vede che occorrono con delle periodicità, circa ogni 11 anni: ogni 11 vede un numero molto alto di macchie dopo 11 anni il numero decresce e così via… in modo abbastanza periodico (con alcune eccezioni).

Come dimensioni stiamo parlando di 1000 km un grano del genere e queste zone sono le sommità delle celle di convezione che portano il calore dalla parte interna del sole verso la superficie; abbiamo questa macchie scure che hanno una struttura un po’ complicata: abbiamo una parte interna più scura che si chiama ombra e una parte più periferica che si chiama penombra .

Perché queste macchie appaiono scure? Dobbiamo rispolverare quello che abbiamo detto sul corpo nero e in particolare sulla legge di Wien e di Stefan-Boltzmann: un corpo è tanto più luminoso quanto più è caldo; quindi se uno applica queste idee anche alle macchie solari questo vuol dire che la macchia solare è più fredda della superficie che gli sta intorno ed in effetti è stato possibile misurare che hanno una temperatura di circa 2000 gradi più bassa di quella della fotosfera circostante quindi si vedono per contrasto perché se una prendesse una macchia solare, solo la macchia solare e la mettesse in cielo la vedrebbe rossa mentre qui la vede più scura.

Quindi queste macchie sono zone più scure sulla superficie del sole, zone più fredde; come mai sono fredde? Quello che si è capito di questo fenomeno è che queste macchie sono legate alla presenza di campi magnetici molto forti e locali; nella nostra vita quotidiana sperimentiamo i campi magnetici solamente o con perturbazioni radio o con le bussole ed esercitano una forza che nella vita quotidiana possiamo anche dimenticarci ma in questi gas queste forze magnetiche sono molto più forti di quelli della terra (1000 volte più forti) che possono influenzare il comportamento del gas; in particolare se prendete una zona della fotosfera e ci mettete un campo magnetico verticale, perpendicolare alla superficie succede che queste forze magnetiche in qualche modo vi fanno da tappo termico ossia impediscono al flusso di materia calda sotto la fotosfera di arrivare in superfice, risultato la zona in cui c’è questo campo magnetici si raffredda e quindi sembra scura. E in effetti anche questo è stato poi possibili misurare queste campi magnetici e sono dell’ordine di 3000 gauss, 4000 gauss, qualche migliaia di volte del campo totale del sole e della terra.

Il sole è leggermente più caldo quando ci sono tante macchie perché ci sono tante facole che anche queste sono legate ai campi magnetici però per un altro motivo che non sto ad approfondire sono più luminose; al netto (il contributo negativo delle macchie con il contributo positivo delle facole) si trova che vincono di pochissimo le facole e quindi quando il sole è molto attivo è in genere più caldo di quando non c’è niente però proprio di poco, sotto l’1% come variazione totale.

Alcune immagini come questa presa dal satellite che vi ho evidenziato prima a raggi x permette di capire, di visualizzare questi campi magnetici.