

Francesco Becattini

# La temperatura più alta sulla terra

*The highest temperature on earth*

Dipartimento di Fisica e Astronomia, Università di Firenze



Il Colle di  
Galileo

**Sommario.** La temperatura più alta mai misurata in un laboratorio terrestre è quella dell'adronizzazione del plasma di quark e gluoni prodotto nelle collisioni di nuclei atomici ad altissima energia, che supera i 1900 miliardi di gradi. Viene determinata analizzando le molteplicità delle particelle prodotte in funzione della loro massa.

**Parole chiave.** Temperatura, interazioni nucleari forti, acceleratori di particelle

Se cerchiamo la temperatura più alta mai registrata sulla Terra con un motore di ricerca, la maggior parte delle pagine che troviamo fanno riferimento alle temperature misurate in questo o quel deserto, magari di 60 gradi e oltre. Naturalmente, in questi casi si parla della temperatura della massa d'aria che si trova in quella determinata località a quel dato momento. In realtà, sulla terra si producono spesso temperature ben più alte: per rimanere nell'ambito dei fenomeni naturali, sappiamo che la temperatura di un gas fortemente ionizzato all'interno di un fulmine può arrivare a 30.000 gradi. Se poi rivolgiamo l'attenzione a fenome-

**Abstract.** The highest temperature ever measured in a terrestrial laboratory is that of the hadronisation of the quark-gluon plasma produced in the collisions of atomic nuclei at ultra-high energy, exceeding 1,900 billion degrees. It is determined by analysing the multiplicity of the particles produced depending on their mass.

**Keywords.** Temperature, strong nuclear reactions, particle accelerators

If we look up the highest temperature ever recorded on the earth using a search engine most of the pages we find refer to temperatures, measured in some desert or other, of maybe 60° or more. Naturally, in such cases we are talking about the temperature of the mass of air that is found in that specific place at that particular moment. In actual fact, much higher temperatures are frequently produced on earth: to remain within the realm of natural phenomena, we know that the temperature of a strongly ionised gas inside a stroke of lightning can reach up

ni prodotti in laboratorio, scopriamo che sono stati creati sistemi assai più caldi. Per esempio, all'interno dei reattori sperimentali per la fusione nucleare, si sono prodotti, seppure per pochi secondi, plasmi di deuterio e trizio a temperature di circa cento milioni di gradi.

Ma quale è il sistema fisico più caldo in assoluto che l'uomo abbia creato sulla terra? Questo sistema è il plasma di quark e gluoni, uno stato della materia che si produce quando si fanno urtare violentemente due nuclei atomici a velocità molto prossime a quella della luce. In questo caso, infatti, si supera la temperatura di 2000 miliardi di gradi. Come è possibile raggiungere temperature così alte, oltre centomila volte più elevate di quella del nucleo del Sole, che è di «appena» 15 milioni di gradi? Il punto è che il plasma di quark e gluoni ha un volume talmente piccolo che l'energia necessaria per realizzarlo è in verità minuscola. Tutta la difficoltà sta nel riuscire a concentrarla in un volume estremamente piccolo e, siccome si tratta del volume occupato da un nucleo atomico, dobbiamo avvalerci di strumenti complessi come gli acceleratori di particelle. Il *Large Hadron Collider* (LHC) del CERN di Ginevra, ha recentemente prodotto e continuerà a produrre nei prossimi anni il plasma di quark e gluoni più caldo di sempre proprio facendo urtare nuclei di piombo dotati di energia cinetica elevatissima.

Quando due nuclei urtano a energie elevate, la materia nucleare si comprime e si scalda enormemente fino a diventare proprio il plasma di quark e gluoni, ovvero un sistema in cui essi, i costituenti più elementari dei protoni e neutroni, sono liberi di muoversi oltre le distanze usuali entro le quali sono solitamente confinati, circa  $10^{-13}$  cm.

to 30,000 degrees. Then, if we turn our attention to phenomena produced in the laboratory, we discover that much hotter systems have been created. For example, within the experimental reactors for nuclear fusion plasmas of deuterium and tritium at temperatures of around one hundred million degrees have been produced, albeit for just a few seconds.

But which is the hottest system overall that man has ever created on the earth? It is the quark-gluon plasma, a state of matter that is produced when two atomic nuclei are made to collide violently at speeds very close to that of light. In this case, indeed, the temperature of two thousand billion degrees is exceeded. How is it possible to reach such high temperature, over a hundred thousand times higher than that of the nucleus of the Sun, which is "just" 15 million degrees? The point is that the quark-gluon plasma has such a small volume that the energy required to produce it is actually tiny. The difficulty lies entirely in successfully concentrating it in an extremely tiny volume and, since we are dealing with the volume occupied by an atomic nucleus, we have to avail of complex instruments such as particle accelerators. The *Large Hadron Collider* (LHC) at the CERN in Geneva has recently produced – and over the coming years will continue to produce – the hottest quark-gluon plasma ever, by colliding lead nuclei at extremely high kinetic energy.

When two nuclei collide at high energy the nuclear matter is compressed and heats enormously until it becomes quark-gluon plasma, in other words a system in which the quarks and gluons – the most elementary components of protons and neutrons – are free to move beyond the usual distances within which they are normally confined, approximately  $10^{-13}$  cm.

Il plasma occupa inizialmente un volume che è circa lo stesso di quello di un nucleo atomico, ma non è destinato a sopravvivere a lungo perché si trova immerso nel vuoto e dunque si espande rapidamente. Il processo di espansione è accompagnato da un altrettanto rapido raffreddamento e nel giro di circa  $10^{-22}$  secondi raggiunge una temperatura critica alla quale quark e gluoni si ricondensano in particelle che sono parenti strette degli originali protoni e neutroni, gli adroni. Questo processo si chiama adronizzazione e coincide con quella che in fisica si definisce una transizione di fase, ovvero un cambiamento repentino – al variare della temperatura – nello stato di aggregazione della materia. La temperatura a cui questa particolare transizione di fase ha luogo – che a rigore non presenta discontinuità [Fodor 2006] – vale all'incirca 1900 miliardi di gradi. Il plasma conclude dunque la sua vita a questa temperatura avendo trascorso il resto a temperature più alte.

Tuttavia, la temperatura che esso aveva prima della transizione è molto difficilmente accessibile alla misura diretta. Si può stimare indirettamente attraverso modelli matematici che cercano di riprodurre, nel modo più realistico possibile, il processo di espansione del plasma. La temperatura che si riesce a determinare direttamente con una certa precisione è quella del momento in cui il plasma condensa in adroni, o, a rigore, quella del momento nel quale gli adroni cessano di dar luogo a reazioni degli uni con gli altri che ne cambiano la specie, detto anche *congelamento chimico*.

In generale, la temperatura di un sistema fisico può essere misurata in due modi: ponendo un altro sistema fisico in contatto diretto con quello in esame op-

The plasma initially occupies a volume that is about the same as that of the atomic nucleus, but it is not destined to survive for long because it is immersed in the vacuum and therefore expands rapidly. The process of expansion is accompanied by an equally rapid cooling, and within  $10^{-22}$  seconds it reaches the critical temperature at which quarks and gluons recondense into particles that are closely related to the original protons and neutrons: that is, hadrons. This process is called hadronisation and it coincides with what is referred to in physics as a phase transition, in other words an abrupt change in the state of aggregation of matter caused by variation in temperature. The temperature at which this particular phase transition takes place – which strictly shows no discontinuity [Fodor 2006] – is around 1,900 billion degrees. The plasma thus ends its life at this temperature, having spent the rest of it at higher temperatures.

Nevertheless, the temperature which it had before the transmission is extremely difficult to measure directly. It can be indirectly estimated through mathematical models that seek to reproduce the process of expansion of the plasma as realistically as possible. The temperature that can be determined directly with a certain precision is that of the moment at which the plasma condenses into hadrons, or, more precisely, that of the moment at which the hadrons cease to react with one another in such a way as to change their species, also known as *chemical freeze-out*.

In general, the temperature of a physical system can be measured in two ways: by placing another physical system in direct contact with the one in question, or by measuring the electromagnetic radiation emitted by the system itself. The resulting spectrum, that is the intensity

pure misurando la radiazione elettromagnetica emessa dal sistema stesso. Il suo spettro, ovvero l'intensità alle varie frequenze, fornisce l'informazione quantitativa sulla temperatura del corpo. È questo il metodo che si usa per misurare la temperatura superficiale del sole: in questo caso la radiazione ha il suo picco di intensità nella porzione visibile dello spettro elettromagnetico e la distribuzione delle frequenze è con buona approssimazione quella di un corpo nero alla temperatura di circa 5780 gradi Kelvin.

La tecnica che viene usata per determinare la temperatura del plasma «condensato» in adroni, è del tutto analoga, con la sostanziale differenza che la radiazione di cui viene misurata l'intensità non è quella elettromagnetica, ma direttamente quella adronica, ossia quella composta dalle particelle, gli adroni, nei quali il plasma stesso si è trasformato distruggendosi. Mentre dunque del sole, che è un oggetto stabile, si misura la temperatura della sua superficie esterna, del plasma di quark e gluoni, che è un sistema instabile, si misura la temperatura nel momento della sua fine. La relazione matematica che lega l'intensità delle varie specie adroniche alla temperatura è l'analoga della legge della radiazione di corpo nero di Planck. Da questa si deduce che a masse più alte corrisponde una minore molteplicità a causa della presenza del fattore esponenziale  $\exp(-mc^2/kT)$  dove  $m$  è la massa,  $c$  la velocità della luce,  $T$  la temperatura e  $k$  è la costante di Boltzmann.

Come detto sopra, questa è la temperatura del sistema al momento in cui gli adroni cessano di dar luogo a reazioni anelastiche tra di essi e non proprio quella che caratterizza l'adronizzazione del plasma. Recentemente, è stato mostrato che quest'ultima è in effetti leggermente più alta della prima nelle collisioni di nuclei

at the various frequencies, provides the quantitative information about the temperature of the body. This is the method used to measure the surface temperature of the sun: in this case the peak of intensity of the radiation is in the visible portion of the electromagnetic spectrum, and the distribution of the frequencies is, fairly accurately, that of a blackbody at a temperature of around 5,780 degrees Kelvin.

The technique used to determine the temperature of the plasma «condensed» into hadrons is entirely analogous, the only substantial difference being that the intensity of radiation which is measured is not the electromagnetic radiation but directly the hadronic: in other words the compound of particles – hadrons – into which the plasma was transformed when it destroyed itself. And so while for the sun, which is a stable object, what we measure is the temperature of its external surface, what we measure of the unstable system of the quark-gluon plasma is the temperature at the time of its end. The mathematical relation linking the intensity of the various hadronic species to temperature is the analogue of Planck's law of blackbody radiation. We can deduce from this that higher masses correspond to a lower multiplicity as a result of the presence of the exponential factor  $\exp[-mc^2/kT]$  where  $m$  is the mass,  $c$  the speed of light,  $T$  the temperature and  $k$  the Boltzmann constant.

As we said above, this is the temperature of the system at the time when the hadrons cease to generate inelastic reactions between each other, and not exactly the moment characterising the hadronisation of the plasma. It has recently been demonstrated that the latter temperature is indeed slightly higher than the former in the collisions of heavier nuclei, as in the LHC, when

più pesanti, come a LHC, laddove è maggiore il numero totale di adroni prodotti [Becattini 2013]. La differenza stimata tra temperatura di adronizzazione e di congelamento chimico è dell'ordine del 5% e questa correzione porta ad un migliore accordo tra dati e modello.

Una delle domande fondamentali che ci si pone intorno a questo fenomeno è il perché e il come si arrivi ad una situazione di sistema «caldo», ovvero che possiede una determinata temperatura, nel tempo brevissimo di una collisione tra due nuclei atomici. Esistono indicazioni chiare, da molte altre osservazioni, che l'equilibrio termodinamico locale è raggiunto molto rapidamente nelle collisioni di due nuclei e che dunque si crei effettivamente un plasma di quark e gluoni propriamente detto.

Certamente, il successo del modello termodinamico nel determinare le intensità medie degli adroni prodotti costituisce un'altra forte indicazione del fatto che il sistema raggiunga l'equilibrio termico. Questo però sembra non essere un'esclusiva delle collisioni di nuclei atomici, ma si ritrova in tutte le collisioni di alta energia, come protone-protone e elettrone-positrone, laddove sono coinvolte le interazioni nucleari forti. In altre parole, le molteplicità medie delle varie specie adroniche – ed anche altre osservabili – sono in ottimo accordo con una sorgente sempre alla stessa temperatura di circa 1900 miliardi di gradi.

Dato che in queste collisioni si pensa, con buone motivazioni, che non si sia formato un vero plasma di quark e gluoni pre-esistente agli adroni finali, ne discende che il processo di adronizzazione possa essere intrinsecamente un fenomeno di tipo statistico, a prescindere dalle condizioni in cui si svolge.

the total number of hadrons produced is greater [Becattini 2013]. The estimated difference between the temperature of hadronisation and chemical freezing is in the order of 5% and this correction leads to a better matching between the data and the model.

One of the fundamental questions that is posed regarding this phenomenon is why and how we arrive at a situation of «hot» system – that is one possessing a certain temperature – within the incredibly short time of the collision between two atomic nuclei. Numerous other observations have yielded clear indications that the local thermodynamic equilibrium is achieved extremely rapidly in the collisions of two nuclei and that therefore a quark-gluon plasma in the strict sense is in effect created.

Certainly, the success of the thermodynamic model in determining the average intensity of the hadrons produced represents another strong indication of the fact that the system achieves thermal equilibrium. However, this does not appear to be restricted exclusively to the collisions of atomic nuclei, but is found in all high-energy collisions, such as proton-proton and electron-positron, when strong nuclear interactions are involved. In other words, the average multiplicities of the various hadronic species – and also others that can be observed – are in perfect agreement with a source that is always at the same temperature of around 1,900 billion degrees.

Given that we have good reason to believe that in these collisions a quark-gluon plasma was not created prior to the final hadrons, it follows that the hadronisation process may be intrinsically a phenomenon of a statistical nature, irrespective of the conditions in which it takes place.

I motivi per cui questo fenomeno si presenta sono tuttora oggetto di indagine. Purtroppo non è ancora possibile darne un'interpretazione teorica chiara a causa della difficoltà di fare calcoli numerici affidabili a partire dai principi primi della teoria delle interazioni nucleari forti, la cromodinamica quantistica. Tuttavia è convinzione di alcuni, tra cui l'autore, che le ragioni siano da cercare in alcune sue caratteristiche – la non-linearità e l'accoppiamento forte – che fanno sì che si possa forse produrre un fenomeno che alcuni teorici chiamano «termalizzazione quantistica» (Srednicki 1994). Si tratta al momento però solo di ipotesi non suffragate da calcoli quantitativi, ma è certamente una strada da esplorare che ci potrà forse permettere di estendere il concetto stesso di temperatura.

### Bibliografia

- (Fodor 2006) Y. Aoki et al., *Nature* 443, 675-678  
 (Becattini 2013) F. Becattini et al., *Phys. Rev. Lett.* 111, 082302  
 (Srednicki 1994) M. Srednicki, *Phys. Rev. E* 50, 888

*Francesco Becattini* è professore associato presso il Dipartimento di Fisica e Astronomia dell'Università di Firenze dove insegna relatività. È coordinatore nazionale dell'iniziativa teorica SIM (*Strongly Interacting Matter*) dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare e autore di numerose pubblicazioni scientifiche sulla fisica delle collisioni nucleari di alta energia e sul processo di adronizzazione.

The reasons for which this phenomenon occurs are still the subject of investigation. Unfortunately it is not yet possible to provide a clear theoretical interpretation of it on account of the difficulty of making reliable numerical calculations starting from the first principles of the theory of strong nuclear reactions, quantum chromodynamics. Nevertheless a number of scientists, including the author, are convinced that the reasons are to be sought in certain of its characteristics – the non-linearity and the strong bonding – which may perhaps mean that it is possible to produce a phenomenon that certain theorists call «quantum thermalisation» (Srednicki 1994). However, at present this is purely a hypothesis, unsupported by quantitative calculations, although it is undoubtedly a path to be explored which could even allow us to extend the very notion of temperature.

*Francesco Becattini* is associate professor in the Department of Physics and Astronomy of the University of Florence where he lectures on relativity. He is the national co-ordinator of the theoretical initiative SIM (*Strongly Interacting Matter*) of the National Institute of Nuclear Physics, and has to his credit numerous scientific publications on high-energy nuclear collisions and the process of hadronisation.