

Pietro Greco

86. Articoli di Scienza&Società Formidabili quegli anni*



Lectio Magistralis dal titolo "Alcuni ricordi personali della fisica del secolo scorso" tenuta dal professor Giorgio Parisi il 24 maggio 2018 nel Dipartimento di Fisica dell'Università di Roma "Sapienza". Credit: Chimera Sapienza / Youtube.

Quest'ultimo è stato un mese davvero importante per Giorgio Parisi, fisico teorico tra i più apprezzati al mondo e membro del Gruppo 2003. A fine maggio La Sapienza, Università di Roma lo ha voluto solennemente omaggiare in vista della messa in pensione, che avverrà in autunno. Subito dopo l'Accademia dei Lincei lo ha nominato suo Presidente.

La prolusione alla Sapienza di Giorgio Parisi – che è stata videoregistrata e che Scienzainrete ripropone – si è trasformata in una rievocazione storica del tutto informale e arricchita da un filo di gustosa ironia di un periodo storico importante per la fisica e, in particolare per la fisica teorica, a cavallo tra gli anni '60 e gli anni '70 del secolo scorso.



Conviene davvero riascoltarla. Nella speranza di aiutare chi non conosce la storia della fisica teorica delle alte energie, nota anche come fisica delle particelle, ne offriamo un succinto compendio.

«La moderna fisica delle particelle nasce negli ultimi giorni della Seconda guerra mondiale, quando un gruppo di giovani italiani, Conversi, Pancini e Piccioni che si erano nascosti alle forze di occupazione tedesca, iniziarono un esperimento davvero importante». Questa affermazione è di Louis Alvarez ed è stata proposta durante la sua *Nobel Lecture*nel dicembre 1968, proprio mentre Giorgio Parisi ha completato il biennio di fisica e può finalmente entrare dalla porta principale dell'Istituto dove esercita la sua leadership scientifica e organizzativa Edoardo Amaldi, lì a Roma. Quell'Amaldi che ha fatto parte dei "ragazzi di via Panisperna" che, negli anni '30 aveva fatto di Roma la capitale mondiale della "fisica nucleare". Che poi aveva rilanciato la fisica italiana dopo il disastro consumatosi tra il 1938 e il 1943, con il varo delle leggi razziali e l'entrata in guerra al fianco di Hitler da parte del governo fascista, proteggendo e facendo in modo che Marcello Conversi, Ettore Pancini e Oreste Piccioni con pochi mezzi e ottime idee realizzassero l'esperimento che tiene a battesimo la fisica delle alte energie, tra la fine del 1943 e l'inizio del 1944.

L'esperimento consente di individuare una nuova particella elementare, che sarà chiamata muone e che andrà ad arricchire il quadro dei costituenti elementari noti dell'universo. Un quadro tutto sommato semplice. Fino al 1932 i fisici conoscono solo tre particelle considerate fondamentali: i protoni, gli elettroni e i fotoni.

Quell'anno l'inglese James <u>Chadwick</u> scopre il neutrone. La scoperta consente di avere un quadro chiaro dell'atomo: che appare composto da un nucleo contenente protoni e neutroni e da elettroni che gli ruotano intorno. Quanto al fotone, è una particella, neutra e priva di massa, che trasmette l'interazione elettromagnetica.

La descrizione della fisica a livello subatomico è abbastanza chiara, anche perché la meccanica quantistica, che ha avuto un rapidissimo sviluppo nella seconda parte degli anni '20 – con i lavori, tra gli altri, di Werner Heisenberg, Erwin Schrödinger, Max Born, Paul Dirac –, spiega molto bene il comportamento degli elettroni, le loro interazioni con il nucleo atomico, le loro interazioni con i fotoni.

Molti sono, tuttavia, i punti oscuri e le domande cui occorre trovare una risposta. La principale è: cosa tiene insieme in una regione di spazio molto confinata qual è il nucleo di un atomo i protoni, carichi positivamente, e i neutroni? Deve essere una interazione piuttosto forte, tanto da vincere la repulsione elettromagnetica tra le cariche elettriche positive dei protoni: ma qual è la natura di questa forte interazione?

A questa domanda cerca di rispondere nel 1935 il fisico teorico giapponese Hideki <u>Yukawa</u>, avanzando l'ipotesi che a tenere unito nei nuclei atomici i protoni e i neutroni sia un'interazione – oggi nota come interazione forte – la cui intensità dipende in maniera marcata dalla distanza tra i nucleoni (protoni e neutroni). La teoria di Yukawa prevede l'esistenza di una nuova particella con massa intermedia tra quella dei protoni e quella degli elettroni: sarà chiamata "particella di Yukawa".

Nello stesso anno in cui Chadwick scopre il neutrone, il 1932, si registra un altro evento che viene a turbare il semplice quadro della fisica delle particelle. Carl Anderson, un fisico americano che lavora a Pasadena in California, rileva il positrone, particella del tutto simile all'elettrone, ma con carica elettrica positiva. L'esistenza del positrone è prevista dall'elegante teoria dell'elettrone elaborata nel 1928 da Paul Dirac.

Problema: qual è il ruolo delle «antiparticelle» nel panorama dei costituenti ultimi della materia?

Pochi mesi dopo Enrico Fermi elabora la teoria dell'interazione debole, che spiega la radioattività del nucleo atomico e prevede l'esistenza di un'altra particella, che l'italiano battezza con il nome di neutrino. A questo punto lo zoo delle particelle si è alquanto affollato. Nel giro di due anni a elettroni, protoni e fotoni si sono aggiunti neutroni e positroni, inoltre si è ipotizzata l'esistenza di altre due particelle, quella di Yukawa e quella dei neutrini. Intanto resta aperto il problema dei raggi cosmici, studiati da Bruno Rossi. Si tratta certamente di particelle: ma qual è la loro natura?

Per rispondere a quest'ultima domanda alla fine degli anni '30 sono in atto una serie di esperimenti, nel cui novero possiamo includere anche quello che tre ragazzi sotto l'ala protettrice di Amaldi realizzano negli scantinati del liceo Virgilio in via Giulia a Roma, a un passo dal Vaticano. In realtà gli esperimenti proseguono fino alla fine del 1946 e dimostrano che nei raggi cosmici ci sono due tipi di particelle (allora chiamate mesotroni), una con carica positiva e l'altra con carica negativa, che hanno differenti comportamenti. Entrambe sono instabili e decadono in tempi diversi.

I mesotroni negativi costituiscono la componente penetrante dei raggi cosmici e giungono fino a bassa quota, non si comportano in presenza di materiali assorbenti come prevede la teoria di Yukawa, intanto rielaborata da altri due fisici giapponesi, Sin-Itiro Tomonaga e Gentaro Araki.

La notizia raggiunge Amaldi in America, che subito la trasmette a Fermi. Il quale, a sua volta, dopo aver consultato Edward Teller e Victor Weisskopf, avanza l'ipotesi che l'interazione col nucleo della particella individuata dai tre giovani "romani" è troppo debole per poter essere portatrice dell'interazione forte. Il mesotrone studiato da Piccioni, Conversi e Pancini non è la particella di Yukawa.

Di lì a qualche tempo Hans Bethe e Robert Marshak propongono la cosiddetta «teoria del doppio mesone», secondo cui i mesotroni osservati da Conversi, Pancini e Piccioni a livello del mare sono il prodotto secondario del decadimento dei mesotroni primari che vanno rintracciati negli strati alti dell'atmosfera.

Ma qual è la loro rispettiva natura? La risposta a questa domanda viene data in maniera definitiva qualche mese dopo, nel 1947, con una serie di misure realizzate da Cecil Powell, Cesare Lattes e Giuseppe (Beppo) Occhialini a Bristol con la tecnica delle emulsioni fotografiche esposte ai raggi cosmici ad alta quota. Le misure confermano e spiegano nei dettagli la teoria del doppio mesone: il mesotrone positivo – oggi noto come pione o mesone π – che si rileva ad alta quota decade in un mesone μ – il mesotrone osservato dai tre romani a livello del mare – e in un neutrino. In particolare, il mesotrone positivo è la particella di Yukawa, capace di interagire in maniera significativa con la materia nucleare. Esso si disintegra spontaneamente nei tempi già misurati in precedenza e non arriva a bassa quota. Dalla sua disintegrazione si crea, tra l'altro, il mesotrone con carica elettrica negativa, che decade più lentamente e quindi ha tutto il tempo di raggiungere il livello del mare.

Sarà Giampiero Puppi nel 1948 a dimostrare che il mesotrone negativo individuato da Piccioni, Conversi e Pancini è una particella con spin semintero e ha una natura leptonica: somiglia a un elettrone. Puppi sviluppa fino in fondo l'intuizione avuta da Bruno Pontecorvo nel 1947 in Canada, secondo cui il mesotrone negativo ha le medesime proprietà dell'elettrone, ivi incluse le proprietà coinvolte nel decadimento beta. L'interazione debole, dunque, non riguarda solo il decadimento del neutrone in protone ed elettrone, ma, sostiene Pontecorvo, ha una valenza più generale. Giampiero Puppi corrobora l'intuizione di Pontecorvo e dimostra che l'interazione debole ha il carattere della universalità.

Intanto, nel 1946 è già chiaro che il mesotrone negativo non ha nulla a che fare con le forze nucleari e, quindi, non può essere in alcun modo la particella ipotizzata da Yukawa. Anche se ha una massa enorme, 210 volte maggiore di un elettrone, è attratto dai nuclei atomici e, più in generale, interagisce con la materia circostante proprio come un elettrone. Ma, poi, non sopravvive a quelle reazioni. E decade, a causa della sua instabile pinguedine.

In breve: i tre giovani fisici romani hanno scoperto quello che più tardi sarà chiamato muone, il fratello più pesante dell'elettrone. E hanno dato così inizio, come sostiene Alvarez, a una nuova stagione della fisica: la fisica delle particelle o, meglio, la fisica delle alte energie che dominerà la seconda parte del XX secolo.

La nuova disciplina miete rapidi successi anche a Stoccolma, dove nel 1948 viene conferito il Nobel per la Fisica a Patrick Blackett per i suoi studi, con la camera di Wilson, della fisica nucleare e dei raggi cosmici; nel 1949 a Hideki Yukawa per la sua teoria dei mesoni; e nel 1950 a Cecil Powell, per la scoperta del pione.

Il premio stranamente non viene conferito a Conversi, Pancini e Piccioni, ma sta di fatto che con l'esperimento dei "tre romani" la famiglia delle particelle si arricchisce di una nuova particella, il muone, e nel 1947, con la misura di Lattes, Occhialini e Powell, di un'altra particella, il pione. Così che il numero delle particelle continua ad aumentare, preludendo a uno scenario che, di lì a qualche anno, sarò molto più ricco e verrà chiamato «zoo delle particelle».

E sta di fatto che l'esperimento di Conversi, Pancini e Piccioni con il loro apparato elettronico ha dato la stura a un'intera costellazione di ricerche sperimentali e di ipotesi teoriche tali non solo da ridefinire il quadro della "fisica delle particelle", ma da ridefinire la posizione strategica di questo tipo di ricerche nell'ambito dell'intera ricerca fisica.

Verso il Modello Standard delle Alte Energie

Come è sempre successo in fisica e un po' in tutte le scienze naturali, lo sviluppo della teoria si accompagna a quello della tecnologia. Nell'ambito della fisica delle particelle elementari la tecnologia dominante è quella delle macchine acceleratrici, inventata negli anni '30. Non ne faremo la storia. Diciamo solo che: a) ora gli studi principali (m non unici) in fisica delle particelle si faranno con gli acceleratori; b) che USA e anche URSS sono avanti in questa tecnologia, ma già a metà degli anni '50 c'è la risposta notevole dell'Europa con la realizzazione del CERN di Ginevra, fortissimamente voluta da Amaldi; c)

all'inizio degli anni '60 Bruno Touschek, fisico teorico di origine austriaca che insegna all'università La Sapienza propone e realizza, con un gruppo di giovani tra cui Carlo Bernardini, quell'Anello di Accumulazione (AdA) che rappresenta la "via italiana alle alte energie". Tra i teorici che partecipano all'impresa c'è un giovanissimo Nicola Cabibbo.

Gli acceleratori forniscono una quantità di dati sperimentali sul mondo delle particelle che è senza precedenti e – soprattutto quando col Cosmotron entrano nel dominio dei GeV, ovvero delle altissime energie – scoprono una quantità di oggetti mai prima né osservati né immaginati che vanno ad arricchire lo "zoo delle particelle". Si tratta di adroni (particelle che come i protoni e i neutroni sentono l'interazione forte), tra cui spicca la classe delle particelle "strane", a loro volta divise in due famiglie, quella dei mesoni (otto diverse particelle con spin zero) e quella degli "iperoni" (sette particelle con spin semintero).

Tutte le particelle "strane" hanno una massa che va dai 135 ai 1672 MeV, dell'ordine di quella del protone, dunque. Ma hanno una vita media brevissima, compresa tra 10⁻⁸e 10⁻¹⁹secondi.

Come mettere ordine in questo universo di particelle sempre più ricco e incomprensibile? Nel 1953 Murray Gell-Mann e KazuhikoNishijima elaborano una teoria per descrivere il comportamento di queste particelle e individuano un nuovo numero quantico, chiamato stranezza appunto, che si conserva nell'interazione forte e nell'interazione elettromagnetica, ma non nell'interazione debole. La teoria consente di prevedere l'esistenza di nuove particelle, come la Ω^- , che verranno poi effettivamente osservate per via sperimentale.

Gli sviluppi della fisica delle particelle procede veloce sia in campo teorico che in campo sperimentale. Nel 1955, per esempio, Emilio Segré e Owen Chamberlain scoprono con il Bevatron, a Berkeley, l'antiprotone, la cui esistenza era stata prevista da Paul Dirac. La scoperta coinvolge anche altri italiani ed è emblematica del nuovo clima e dei nuovi rapporti di forza, anche tra Europa e America, creati dalla *Big Science*. Probabilmente l'antiprotone era stato individuato anche da Edoardo Amaldi, con le più economiche tecniche del rilevamento dei raggi cosmici. E, inoltre, viene rivendicata da Oreste Piccioni, ormai emigrato egli USA, che accusa Segré di plagio. Ma alla fine, nell'attribuzione della scoperta, si impone il gruppo più forte, quello di Segré, che dispone di una macchina costata milioni di dollari.

Intanto, nel portare ordine nello zoo delle particelle elementari interviene, nel 1954, lo studio mediante concetti di simmetria e, in questo ambito, la dimostrazione del "teorema CTP" da parte sia di Gerhart Lüders e di Wolfgang Pauli sia, in maniera indipendente, di John Bell. Per C si intende la simmetria delle leggi fisiche riguardo alla carica elettrica (materia e antimateria), per T la simmetria rispetto al tempo e per P, parità, la simmetria rispetto all'inversione delle coordinate spaziali. Tutto nel mondo delle particelle può avvenire, purché rispetti l'invarianza complessiva della simmetria CTP.

La "stranezza" e il teorema CTP impongono dei vincoli importanti e, dunque, delle razionalizzazioni nel mondo delle particelle elementari. E tuttavia, sempre grazie alle macchine acceleratrici, lo "zoo" continua ad affollarsi e a complicarsi. All'esigenza di semplificazione risponde il modello proposto nel 1956 da Shoichi Sakata (1911-1970), secondo cui tutti gli adroni sono particelle composte da sole tre particelle più elementari (con le loro antiparticelle): il protone, il neutrone e il barione lambda (Λ^0). Il modello porta certo ordine nello "zoo delle particelle", ma non è ancora soddisfacente. Molte domande restano senza risposta.

A molti appare, appunto, una vitella da buttare farcita però di ottima carne di fagiano.

Nel 1961 Murray Gell-Mann e Yuval Ne'eman propongono un modello alternativo, basato su una matematica piuttosto sofisticata, quella dei gruppi di Lie. Come spesso succede in fisica, ora ci sono molti modelli diversi che spiegano bene i fenomeni noti e che, tuttavia, fanno previsioni differenti. Il modello di Gell-Mann e di Ne'eman prevede l'esistenza della particella Ω^- , che viene effettivamente osservata nel 1963 e, dunque, si impone sul modello di Sakata.

Ma lo sviluppo della teoria galoppa veloce. In quel medesimo 1963 lo stesso Murray Gell-Mann e George Zweig ipotizzano che gli adroni siano tutti costituiti da particelle più elementari, che Gell-Mann battezza con un nome, quark, tratto da una novella di James Joyce, *Three quarks for Muster Mark*. Ben presto si dimostra che i quark hanno una carica elettrica frazionaria.

Il protone, per esempio, è costituito da due quark "up", ciascuno con carica +2/3, e da un quark "down", con carica -1/3. Per cui la carica complessiva del protone è +3/3, ovvero +1. Allo stesso modo il neutrone è costituito da un quark "up" e due "down", con carica complessiva 0.

Per far quadrare i conti fisici di tutta questa nuova visione degli adroni e, dunque, dell'interazione forte, vengono introdotti altri numeri quantici, quali il "colore" e il "sapore". A questo punto tutto torna e nel 1965 nasce la OCD (cromodinamica quantistica), in perfetta analogia con la OED (elettrodinamica quan-

istica) di Dirac rielaborata da Richard Feynman. Come l'interazione elettromagnetica tra particelle cariche è "mediata" dai fotoni, così l'interazione forte tra i quark, responsabile della stabilità dei nuclei atomici, è mediata da particelle (sono ben otto) chiamate gluoni (dall'inglese glue, colla).

Anche sul fronte dell'interazione debole, descritta nel 1934 da Enrico Fermi, ci sono progressi teorici decisivi. Nel 1963 il già citato Nicola Cabibbo estende il concetto di universalità di questa interazione proposto a fine anni '40 da Bruno Pontecorvo. Pochi anni dopo Nicola Cabibbo diventerà il punto di riferimento di Giorgio Parisi,

Ma, tornando al 1963, diciamo che a questo punto l'edificio fisico si regge su quattro interazioni fondamentali – gravitazionale, elettromagnetica, forte e debole – descritte da altrettanti modelli.

Nel 1966 Giorgio Parisi si iscrive a fisica. E chissà se l'anno dopo, nel 1967, ha notizia che l'americano Steven Weinberg e il pakistano Abdus Salam, sulla base di idee proposte da Sheldon Glashow, elaborano una nuova teoria che dimostra come, a una certa energia, l'interazione elettromagnetica e quella debole si unifichino in una sola interazione, quella elettrodebole. La teoria prevede l'esistenza di tre bosoni finora sconosciuti – W⁺, W⁻e Z⁰, dotati di massa – che mediano l'interazione debole, così come il fotone, privo di massa, media l'interazione elettromagnetica.

Occorrerà attender e il 1983 al CERN di Ginevra, con l'acceleratore SPS, l'italiano Carlo Rubbia, grazie a una tecnica originale messa a punto dall'olandese Simon Van der Meer, dimostra che i bosoni W⁺, W⁻e Z⁰ esistono effettivamente.

Il modello di Glashow, Weinberg e Salam era fagiano puro.

Nella sua proposta teorica Abdus Salam, direttore dell'International Center for Theoretical Physics (ICTP) di Trieste, fa riferimento in particolare al "meccanismo di Higgs" e al "bosone di Higgs". Il primo è un meccanismo che prevede l'esistenza di un campo – il "campo di Higgs" – da cui deriva sia la massa dei leptoni che dei quark. L'esistenza di questo meccanismo è stata prevista da una serie di fisici, tra cui François Englert, Robert Brout, Gerald Stanford Guralnik, Carl Richard Hagen, Thomas Kibble e, naturalmente, Peter Higgs. Quest'ultimo, però, è l'unico a proporre anche l'esistenza di un bosone, dotato di massa, che media il campo di Higgs. La teoria elettrodebole dunque ingloba il bosone di Higgs, la cui esistenza è stata rilevata solo mezzo secolo dopo, nel 2012 al CERN di Ginevra con l'acceleratore LHC da parte di due gruppi indipendenti, guidati rispettivamente dall'italiana Fabiola Gianotti e dall'americano Joseph Incandela (che ha preso il posto di un altro italiano, Guido Tonelli). Era ottimo fagiano, ma c'è voluto tempo per cucinarlo nel forno degli sperimentali.

L'insieme di queste scoperte contribuisce a definire il "Modello Standard delle Alte Energie", che possiamo riassumere in due tabelle, una relativa alle interazioni fondamentali e alle particelle chiamate bosoni mediatori; l'altra alle tre famiglie di particelle chiamate fermioni.

I bosoni sono particelle che seguono la statistica di Bose-Einstein, hanno spin intero e non obbediscono al principio di esclusione di Pauli, il che significa che in un sistema possiamo trovare più bosoni con il medesimo stato quantico.

I fermioni sono particelle che seguono la statistica di Fermi-Dirac, hanno spin semintero e obbediscono al principio di esclusione di Pauli: in un sistema non possono esserci due fermioni con il medesimo stato quantico. I fermioni si suddividono a loro volta in adroni (formati da quark), che sentono l'interazione forte e in leptoni, che non sentono l'interazione forte. Lo zoo di adroni e leptoni è simmetrico, nel senso che ciascun gruppo ha tre famiglie o generazioni di particelle (Tabella 1).

| | Tabella 4.1 - I fermioni | | | | | | | | | | |
|--|--------------------------|----------------------|-----------|------------------|------------|-------------------|----|--|--|--|--|
| | | Famiglia 1 | | Famiglia 2 | | Famiglia 3 | | | | | |
| | | | | | | | | | | | |
| | Quark | Up | u | Charm | c | Top | t | | | | |
| | | Down | d | Strange | s | Bottom | b | | | | |
| | | | | | | | | | | | |
| | Leptoni | Neutrino elettronico | ν_{e} | Neutrino Muonico | $ u_{\mu}$ | Neutrino tauonico | ντ | | | | |
| | | Elettrone | e | Muone | μ | Particella Tau | τ | | | | |

Le forze fondamentali della natura, come abbiamo detto, sono quattro: l'interazione gravitazionale, descritta dalla relatività generale di Einstein; l'interazione elettromagnetica, descritta dalla elettrodinamica quantistica (QED); l'interazione debole, descritta dalla teoria di Enrico Fermi con successivi aggiustamenti e l'interazione forte, descritta dalla cromodinamica quantistica (QCD).

Queste forze sono tutte espressione di un campo, in cui l'interazione tra le particelle avviene attraverso lo scambio di un bosone, che per questo viene detto mediatore (Tabella 2).

| Tabella 4.2 - Le interazioni fondamentali | | | | | | | | | | |
|---|--------------------|---------------------|---|--|--|--|--|--|--|--|
| Interazione | Magnitudo relativa | Raggio d'azione | Bosone mediatore | | | | | | | |
| Gravità | 1 | ∞ | gravitone (?) | | | | | | | |
| Elettromagnetismo | 10^{36} | ∞ | Fotone | | | | | | | |
| Debole | 10^{25} | 10 ^{-18 m} | bosoni W ⁺ , W ⁻ , Z ⁰ | | | | | | | |
| Forte | 10^{38} | 10 ^{-15 m} | otto gluoni | | | | | | | |

Il quadro del Modello Standard della Fisica delle Alte Energie è stato, per così dire, completato con la rilevazione del "bosone di Higgs" avvenuta al CERN di Ginevra nel 2012. Ma il Modello Standard non è in grado di risolvere una serie di problemi. Il primo dei quali riguarda l'interazione gravitazionale. Dall'elaborazione della relatività generale, in un secolo di tentativi, i fisici non sono riusciti a coniugare la gravità con le altre tre interazioni fondamentali. Le due colonne portanti su cui si regge la fisica contemporanea, la relatività generale e la meccanica quantistica, sembrano rifiutarsi di entrare in un quadro teorico unitario. La gravità quantistica, come ha rilevato Giorgio Parisi, è il più grande problema aperto della fisica.

Ma non il solo. Il Modello Standard prevede che i neutrini non abbiano massa. Ma gli sperimentali hanno dimostrato, invece, che quelle particelle una massa ce l'hanno, per quanto piccola. Inoltre i tre quarti della massa pesata dell'universo è "materia oscura", nel doppio senso che non si vede e che non ne conosciamo la natura.

È chiaro, i fisici teorici hanno ancora da lavorare.

I fisici vivono, sostiene Parisi, in una condizione non molto diversa da quella "nucleare democracy" esistente alla fine degli anni '60.

Ma sono anche chiari i due messaggi con cui Giorgio Parisi ha concluso la sua prolusione storica. Il primo è che senza dati sperimentali non si va avanti: occorreranno nuovi dati perché i teorici possano cucinare ottimo fagiano, magari utilizzando anche modelli vitella. Il secondo è rivolto ai giovani: il futuro vi stupirà come e forse più di quanto ha stupito la sua generazione.

*Pubblicato in Scienza in rete, il 24,6,2018