

ALLA SCOPERTA DELLE TECNICHE UTILIZZATE NELLA FISICA DELLE PARTICELLE ELEMENTARI



Pablo Genova

Assegnista di Ricerca in Fisica presso l'Università di Pavia.

*“Una supposta scoperta scientifica non ha alcun merito,
se non può essere spiegata ad un barista.”*

***Ernest Rutherford**, scopritore del nucleo atomico*

PARTE PRIMA

Breve introduzione

Il recente avvio del Grande Collisore di Adroni (LHC “Large Hadron Collider” in inglese) del CERN (“Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire”) di Ginevra ha suscitato un rinnovato interesse per la fisica delle particelle elementari, anche presso il grande pubblico. La ricerca scientifica di frontiera affascina da sempre gli scienziati non solo per le eventuali applicazioni che potranno, un giorno, sorgere, ma anche per la passione di spingere più oltre il limite tra il noto e l'ignoto, che è una delle caratteristiche salienti dell'animale chiamato uomo.

LHC è un acceleratore di protoni che raggiunge delle energie mai viste: esso permette di far collidere due fasci di protoni (uno contro l'altro) ad energia di 7 Tera elettronvolt nel centro di massa (ovvero 7 mila miliardi di elettronvolt che è un'energia assai elevata per una particella elementare). Per fare ciò, esso utilizza più di 1600 magneti superconduttori (ciascuno dei quali è raffreddato a temperature vicine allo zero assoluto) ed è situato in un anello di 27 km di circonferenza (posto 150 metri sotto il suolo nella campagna ginevrina). Non è esagerato affermare che LHC è un concentrato dell'avanguardia della scienza e della tecnica in tanti settori che vanno dall'elettronica alla criogenia, dall'informatica alla meccanica stessa, dalle tecniche di alto vuoto alle tecniche di lettura di enormi quantità di dati.

L'obiettivo forse principale di questa grande macchina è studiare i tipi di particelle che si possono produrre a tali energie, in particolare si vuole investigare la prevista, ma mai osservata, esistenza del *bosone di Higgs*, una particella di grande importanza perché, secondo il *modello standard*, essa permette di “dare massa” a tutte le altre particelle. I fisici teorici, infatti, ritengono che, attraverso un meccanismo noto come *rottura spontanea di simmetria*, in cui si passa da un sistema simmetrico ad un sistema non simmetrico, sia possibile fare sì che le particelle responsabili delle interazioni deboli ovvero i bosoni W e Z₀, scoperti negli anni '80 sempre al CERN, vengano ad avere la massa che hanno. Però, perché la rottura spontanea di simmetria possa avvenire, *deve* esistere appunto il bosone di Higgs e fino a quando questo bosone non verrà scoperto, il *modello standard* è in qualche modo incompleto. Facciamo notare che se il bosone di Higgs non dovesse esistere, ciò sarebbe una scoperta forse ancora più grande perché costringerebbe i fisici a ripensare completamente le fondamenta del modello standard. Quando i fisici ed in particolare Einstein tra Ottocento e Novecento compresero che l'*etere* non esisteva, si dovette formulare una meccanica completamente nuova, la Teoria della Relatività, una vera e propria rivoluzione scientifica. Tuttavia ci sono ragionevoli motivi teorici per credere che il bosone di Higgs esista effettivamente, ma ... lasciamo l'ultima parola agli esperimenti, perché, come diceva Galileo, “i discorsi nostri hanno a essere intorno al mondo sensibile, e non sopra un mondo di carta”

Molte altre sono le particelle che possono esistere perché previste da talune teorie, ma mai osservate finora e molte sono le questioni ancora aperte e non comprese appieno. Si noti che l'esistenza o meno di nuove particelle ha anche importanti conseguenze *cosmologiche*, ovvero ci permette, entro certi limiti, di capire come è stato l'Universo e come diventerà.

Un altro ampio settore di ricerca, anch'esso connesso con la cosmologia, è la riproduzione in laboratorio del *Plasma di Quark e Gluoni* uno stato della materia previsto dalla *Cromodinamica Quantistica* (teoria standard delle interazioni forti), che si pensa sia esistito in stadi iniziali della vita dell'Universo. In questo stato, i *quark* e i *gluoni*, che sono, per quanto

ne sappiamo, i costituenti fondamentali dei protoni e dei neutroni (e non solo) si trovano *liberi*, non legati a formare protoni e neutroni come avviene normalmente.

Per cercare di ottenere tale stato particolare della materia si fanno collidere ioni di piombo contro ioni di piombo (a 3 Tera elettronvolt per nucleone, si tenga presente che il piombo ha 82 protoni e 126 neutroni nell'isotopo più diffuso, si può immaginare la complessità della collisione fra due nuclei siffatti, per ione si intende un atomo a cui siano stati tolti uno o più elettroni, per nucleone si intende il neutrone o il protone, entrambi detti nucleoni).

Queste sono solo alcune possibili linee di ricerca tra tantissime altre di cui qui non parliamo e non dimentichiamo che molte interessantissime scoperte possono essere del tutto impreviste o imprevedibili. Nel seguito però vogliamo porre l'attenzione sui *metodi e le tecniche* utilizzate per raggiungere tale obiettivo, cercando di spiegarli in linguaggio semplice, comprensibile anche a chi non ha conoscenze fisico-matematiche. Naturalmente la nostra presentazione sarà estremamente limitata ed incompleta, perché più che il dettaglio tecnico ciò che vogliamo mostrare al lettore è che non c'è nulla di magico o di intrinsecamente difficile nella fisica delle particelle, bensì essa è il frutto dell'ingegno umano nel rendere visibile, mediante opportuni *rivelatori*, ciò che non è visibile direttamente con gli occhi.

Come intuì il filosofo materialista Democrito, i costituenti elementari della realtà sono discreti, essi sono atomi, particelle, nuclei, strutture discrete che hanno determinate caratteristiche fisiche che intendiamo misurare, quali massa, carica elettrica ed altre proprietà "meno comuni", ma non per questo meno interessanti ed importanti. Gran parte della fisica delle particelle riguarda proprio lo studio delle proprietà fisiche delle particelle note e la ricerca di particelle per ora ignote, per ora mai osservate, ma esistenti in natura. Per fare ciò, un primo tipo di rivelatori pressoché indispensabili sono quelli che permettono il *tracciamento* e la *localizzazione* delle particelle, usualmente noti come *rivelatori di posizione*.

Camere a nebbia, camere a diffusione, camere a bolle ed emulsioni nucleari

Storicamente tra i primi rivelatori di particelle vi sono le *camere a nebbia* o di Wilson, le *camere a diffusione* e le *camere a bolle*. Questi rivelatori sono ormai principalmente di interesse storico o didattico, tuttavia tantissime scoperte sono state fatte con tale tecnologia. Le *camere a nebbia* o di Wilson utilizzano vapore d'acqua o alcool sovrasaturato (una soluzione, composta di solvente e soluto, si dice sovrasatura quando il solvente contiene più soluto che in condizioni normali di pressione e temperatura). Il passaggio di particelle *cariche* nelle camere determina la *ionizzazione* del gas, ovvero la formazione di coppie ioni-elettroni (gli ioni sono semplicemente degli atomi con uno o più elettroni in meno, quindi carichi positivamente). Di per sé questa ionizzazione non sarebbe affatto visibile, però nelle particolari condizioni della soluzione sovrasatura questi ioni costituiscono dei *nuclei di condensazione*, ovvero attorno di essi si formano delle goccioline di liquido che appaiono come una specie di nebbia (da cui "camera a nebbia"). La cosa sorprendente è che in questo modo si può rivelare, *nel senso di vedere*, la particella poiché questi nuclei di condensazione si formano proprio *lungo il percorso compiuto dalla particella* e non altrove.

E' una visione indiretta, perché mediata dalla produzione degli ioni e delle goccioline macroscopiche, tuttavia perfettamente sufficiente per ricostruire con notevole precisione il percorso della particella. E non solo, le tracce sono diverse se prodotte da particelle α (alpha, nuclei di elio) o da particelle β (beta, elettroni), le prime sono più grosse, le seconde più fini.

Inoltre, se la camera a nebbia viene posta in un campo magnetico uniforme, si osserva

che le tracce sono incurvate (come deve essere per il moto delle particelle cariche in campo magnetico) ed in particolare la curvatura delle particelle α è opposta a quelle delle β ovvero gli elettroni! Già questa semplice osservazione permette di distinguere due differenti tipi di particelle e di scoprire che esse hanno carica opposta: assumendo, per convenzione, negativa la carica degli elettroni, sarà positiva la carica delle particelle α (essa infatti è dovuta alle cariche positive dei due protoni che le compongono insieme a due neutroni). Misurando con precisione il *raggio di curvatura* della traiettoria delle particelle, misurando il campo magnetico e conoscendone la carica, è possibile misurare l'*impulso* (o quantità di moto) delle particelle, grandezza assai importante per comprenderne la *dinamica* di produzione.

Non entriamo nei dettagli tecnici e nelle varianti delle camere a nebbia, l'importante è comprendere che il principio di funzionamento è l'utilizzo di una soluzione sovrasatura (aria/vapore d'acqua, alcool e vapore d'alcool) che condensa al passaggio delle particelle. Nelle *camere a diffusione* la condizione di sovrasaturazione è ottenuta con una differenza di temperatura (si deve raggiungere almeno la temperatura di solidificazione dell'anidride carbonica -78 gradi C o temperature inferiori), mentre nelle camere a nebbia o di Wilson è ottenuta mediante espansione adiabatica (senza scambio di calore) del gas. Nella camera a nebbia *solamente durante i cicli di espansione* ci sono le condizioni opportune per vedere le particelle (modalità *pulsata* di rivelazione), mentre la camera a diffusione permette di vedere *continuamente* le particelle (fintanto che funziona l'apparato di raffreddamento).

Nelle *camere a bolle* si usa invece un liquido sovrariscaldato, ovvero una sostanza che, in opportune condizioni di pressione, si trova allo stato liquido pur essendo ad una temperatura superiore alla temperatura di ebollizione (ovvero di passaggio allo stato gassoso, ciò accade con l'acqua nella pentola a pressione per intenderci), tipicamente si utilizza idrogeno liquido (temperatura attorno ai 20 gradi K cioè circa -250 gradi C). Il meccanismo di rivelazione delle particelle è simile a quello delle camere nebbia: l'espansione adiabatica del liquido crea la condizione di sovrariscaldamento durante la quale, al passaggio di particelle cariche, si formano delle bolle inizialmente microscopiche, ma che arrivano poi alla dimensione del visibile e possono così venire fotografate. Attorno alle camere a bolle, che possono raggiungere dimensioni notevoli (anche cilindri di 5 metri di lunghezza e 2 metri di diametro come la famosa "Gargamelle" del CERN), vengono poste delle macchine fotografiche in modo che durante i cicli di funzionamento vengono scattate delle fotografie che possono essere studiate una per una (manualmente!) in un secondo tempo.

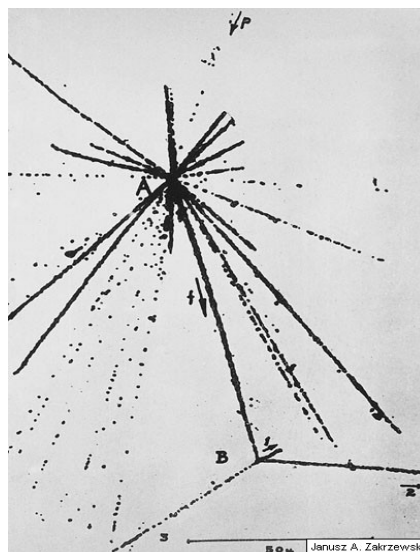
Tutti questi dispositivi non sono più utilizzati perché ciò che manca rispetto a quelli della generazione odierna è l'integrazione con l'*elettronica* e l'*informatica*, le quali permettono di misurare e di studiare un numero *più grande di dati in un tempo estremamente minore*. Infatti se le informazioni relative al passaggio delle particelle vengono trasformate in opportuni valori di corrente elettrica o tensione (ciò che fa l'elettronica) e successivamente digitalizzate (ovvero trasformate in sistema binario 1-0) in modo da potere essere elaborate dai calcolatori (informatica), allora è possibile fare in modo *automatico* lo studio dei dati raccolti, impiegando un tempo estremamente piccolo al confronto (e anche la velocità massima di acquisizione dei dati è molto più grande nei rivelatori odierni).

Per rendere l'idea della mole dei dati da analizzare in questi esperimenti si pensi che con la camera a bolle *Gargamelle* sono stati studiati circa 80.000 eventi "neutrino", cioè 80.000 fotografie analizzate *una per una*, negli esperimenti successivi è normale studiare *miliardi* (1.000.000.000) di dati (= Giga byte di informazione= 10^9 bytes), ma anche *migliaia di miliardi* (Tera byte 10^{12} bytes) e LHC produrrà *milioni di miliardi di dati* all'anno (Peta byte 10^{15}

bytes). Si comprende che senza elettronica ed informatica ciò è semplicemente impossibile, tuttavia i dispositivi storici avevano il vantaggio di mostrare più direttamente le particelle (senza la mediazione dell'elettronica e dell'informatica, il rivelatore era subito "collegato" all'occhio umano, per così dire).

Prima di prendere in esame i dispositivi di tracciamento moderni parliamo però delle *emulsioni nucleari*, dispositivi anch'essi "antichi", tuttavia ancora utilizzati in esperimenti particolari che richiedano alta risoluzione spaziale e basso costo economico. L'*emulsione nucleare* è una speciale lastra fotografica, più spessa rispetto alle normali lastre fotografiche. Usualmente è costituita da grani di bromuro d'argento in sospensione in un *gel* organico, rispetto alle lastre fotografiche ordinarie i grani sono più numerosi, più piccoli e più omogenei. Essa viene esposta alle particelle e successivamente sviluppata come nelle lastre fotografiche normali, anche in questo caso il passaggio delle particelle determina la *ionizzazione* dei grani di bromuro d'argento, che vengono evidenziati nel processo di sviluppo, diventando visibili all'occhio nudo o al microscopio. Nonostante la semplicità (e lo scarso costo) della tecnica si può raggiungere la notevole accuratezza del *micron* (milionesimo di metro).

L'immagine che segue, che vale più di mille parole su queste tecniche, mostra uno storico esempio di emulsione nucleare: il primo evento ipernucleare della storia, scoperto dai fisici polacchi Marian Danysz e Jerzy Pniewski [Danysz e Pniewski, Philosophical Magazine 44 348 (1953), esperimento effettuato nell'allora Polonia socialista].



La traccia che viene "dall'alto", indicata con p , è un protone, un raggio cosmico proveniente dallo spazio, che, urtando con un nucleo, produce un nucleo *strano* (termine tecnico!) ovvero un nucleo contenente una particella, la Λ (Lambda) che è dotata di *stranezza*. Questo nucleo "speciale" non è stabile come gli ordinari nuclei atomici e decade generando quella che si vede in figura e che viene chiamata *stella* adronica (dalla forma vagamente a stella della figura complessiva, *adronica* in quanto il processo coinvolge *adroni* una famiglia di particelle che interagiscono secondo l'interazione *forte* [*adròs* vuol dire forte in greco]). La particella indicata f in figura, che probabilmente è un *frammento nucleare*, interagisce nuovamente nel punto B con un altro nucleo, e la particella in basso a sinistra,

indicata col numero 3, è presumibilmente un pione, particella di massa molto più piccola dei protoni e dei frammenti nucleari, infatti la sua traccia è più fine e sottile di quelle prodotte dalle particelle più pesanti.

Da questa immagine è possibile misurare l'energia *totale* rilasciata nell'evento iniziale che è l'interazione protone - nucleo (l'energia rilasciata da ogni particella è infatti proporzionale alla lunghezza percorsa, ovvero la lunghezza delle tracce in figura, con una costante di proporzionalità che dipende dal tipo di particella, quindi "convertendo" opportunamente le lunghezze in energia e sommando le energie si trova l'energia *totale* depositata) e si ricava che questa energia è compatibile con l'avvenuta formazione della particella Λ (Lambda) all'interno del nucleo, ovvero la formazione dell'ipernucleo.

Si noti che la particella Λ (Lambda) è neutra, non visibile nell'emulsione e decade in brevissimo tempo all'interno del nucleo stesso, tuttavia, indirettamente, dal prodotto del suo decadimento possiamo ben dire di averla vista!

E' forse chiaro da questo esempio quali e quante preziose informazioni fisiche sono contenute in un singolo evento "buono" di fisica nucleare, anche senza fare conti precisi. Non dimentichiamo però che usualmente gli eventi buoni sono anche *rari*, circondati da una marea di eventi non interessanti, che i fisici chiamano *fondo*. Il fisico sperimentale ha, per così dire, la missione di far emergere il *segnale*, gli eventi buoni, rispetto al *fondo*, gli eventi non interessanti per la misura che si vuole fare.

L'immagine qui sotto è invece il francobollo polacco del 1993 direttamente ispirato all'emulsione di cui sopra:



Nella prossima parte vedremo invece il funzionamento di *alcuni* dei moderni rivelatori di posizione attualmente utilizzati.

PARTE SECONDA

Descriveremo solo alcuni dei rivelatori utilizzati attualmente (sono infatti tantissimi) senza scendere troppo nei dettagli tecnici, ma cercando di evidenziare il principio essenziale di funzionamento di ciascun rivelatore. Come in precedenza eviteremo la matematica, che però è necessaria nella pratica del fisico (vedi alla fine per un breve rimando alle pubblicazioni specialistiche).

Rivelatori a gas

Per esemplificare la vasta categoria di rivelatori a gas possiamo descrivere brevemente il *contatore proporzionale*. Esso è costituito da un tubo cilindrico metallico attraversato da un filo conduttore al centro e riempito di una opportuna miscela di gas. Tra il filo e la parete è applicata una differenza di potenziale elettrico, tipicamente dell'ordine di 500-1000 V (il filo usualmente costituisce l'anodo cioè il polo positivo, la parete il catodo cioè quello negativo), la miscela di gas può essere ad esempio argon 90% e metano 10%. Al

passaggio di una particella carica, essa, come nei rivelatori precedentemente descritti, ionizza il gas, producendo così coppie ioni-elettroni. Ma il forte campo elettrico presente nel tubo fa sì che alla ionizzazione primaria si aggiunga una produzione di elettroni ed ioni a *valanga*, i quali migrano i primi verso l'anodo (il filo), i secondi verso il catodo (la parete). Di conseguenza nel circuito elettrico si produce un segnale che può essere misurato, analizzato e digitalizzato. Se la tensione applicata tra filo e parete è opportunamente scelta, il segnale prodotto risulta *proporzionale alla carica* totale prodotta nel tubo, a sua volta *proporzionale all'energia depositata* dalla particella, da cui il nome di *contatore proporzionale*. Esso permette così di misurare l'energia depositata dalla particella. Se questo stesso tipo di rivelatore viene utilizzato a tensioni più alte allora si ha il contatore *Geiger-Müller* in cui non vi è più alcuna proporzionalità tra segnale ed energia e viene utilizzato solo per rivelare il passaggio o meno di una particella, ovvero per *contare* il numero di particelle che passano in un dato tempo (contatori Geiger, usati anche per il conteggio delle particelle emesse per la radioattività naturale).

Ma come si fa a misurare la *posizione* ovvero la traccia percorsa dalla particella con questi dispositivi? Nella *MPWC, camera proporzionale a molti fili*, invece di un unico filo sono posti uno strato di fili equidistanziati, lungo una coordinata spaziale, allora accade che al passaggio della particella si accendono *solo* il filo o i fili più vicini ai quali la particella è passata, e, quindi, dalla posizione di questi fili, si può risalire ad una coordinata della particella. Ponendo uno strato con i fili disposti lungo un asse cartesiano e un altro strato di fili disposti invece lungo l'altro asse cartesiano è dunque possibile ricostruire due coordinate. Vi sono numerose varianti di questa tecnica, che per brevità non descriviamo, alcune delle quali permettono una completa ricostruzione *tridimensionale* della traccia della particella. Come si vede, questi rivelatori sono in qualche modo gli eredi dei rivelatori "storici" precedentemente descritti, tuttavia in questo campo grande è la ricerca di nuovi tipi di rivelatori a gas, con risoluzioni spaziali e temporali sempre migliori.

Rivelatori a semiconduttore

Un altro ramo della fisica, quello della fisica dello *stato solido*, ha portato grande aiuto alla fisica nucleare. Infatti i dispositivi a silicio e a germanio, che sono anche la base per gli odierni calcolatori elettronici (che usano diodi, transistor, circuiti integrati al silicio e al germanio, che hanno soppiantato le valvole termo-ioniche precedentemente usate), vengono correntemente utilizzati come rivelatori di posizione (e non solo). In questo caso il fenomeno fisico sottostante è che al passaggio di una particella carica si produce una coppia "buca"-elettrone, dove per "buca" si intende una vacanza, un posto vuoto nella banda energetica dove usualmente stanno gli elettroni e che si comporta come se fosse essa stessa una particella. Senza entrare nel dettaglio, questi dispositivi, usualmente planari, riescono a ricostruire *due* coordinate del passaggio di una particella, con risoluzione che arriva al *micron* (millesimo di metro) nei modelli più sofisticati.

Questo è tantissimo, in quanto, mettendo più strati di rivelatori a silicio in modo opportuno e studiando i dati misurati con opportuni algoritmi matematici, detti di *ricostruzione della traccia*, è possibile tracciare con elevata precisione *tutto* il percorso compiuto dalla particella (dato che si conosce la legge del moto della particella, non è necessario misurare tutti i punti di passaggio per capirne la traiettoria). In particolare spesso quello che serve è il *vertice di interazione*, ovvero dove proveniva la particella (la stella adronica A o B nell'evento

ipernucleare precedentemente mostrato), pertanto questi rivelatori sono spesso detti “di vertice” e posti in prossimità della zona di interazione. E' assai utile porre questi rivelatori in campo magnetico uniforme in modo tale che, una volta ricostruita la traccia, si misura il raggio di curvatura e da questo si ricava la quantità di moto della particella.

Rivelatori ad effetto Čerenkov

Questo interessante tipo di rivelatore sfrutta l'effetto Vavilov-Čerenkov (dal nome degli scienziati sovietici che lo scoprirono, Tamm e Frank ne diedero la spiegazione teorica, tutti e quattro presero il premio Stalin per la fisica, massimo riconoscimento del mondo socialista di allora, soltanto gli ultimi tre il premio Nobel, massimo riconoscimento del mondo capitalista). Tale effetto avviene quando una particella attraversa un mezzo con velocità *maggiore* della velocità della luce *in tale mezzo* (nel vuoto la cosa è impossibile). In tali condizioni si genera una sorta d'onda d'urto, l'analogo elettromagnetico del *bang* supersonico, che consiste in fotoni aventi una ben precisa direzionalità (un angolo ben preciso) legato proprio alla *velocità della particella*.

Così la misura di tale angolo, detto angolo di Čerenkov, permette la misura della *velocità* della particella, con l'utile proprietà che l'effetto si ha solo se la particella ha una velocità *superiore* a quella della luce nel mezzo, quindi tale rivelatore può funzionare come contatore *a soglia* (ovvero un contatore che conta la particella solo se essa ha una velocità superiore ad una certa soglia, rispondendo così ad un criterio aggiuntivo al mero passaggio della particella).

Combinando le informazioni date da questo rivelatore con una misura di impulso, che per esempio può essere fatta tracciando il percorso della particella in campo magnetico mediante rivelatori a gas o al silicio, si può, conoscendo le leggi della meccanica (nell'estensione data dalla Teoria della Relatività di Einstein), ricavare la *massa* e quindi *identificare* la particella, distinguere cioè se si tratta di un protone, di un elettrone, di un pione o di una nuova particella mai vista etc. etc. Questi rivelatori estremamente versatili, di cui vi sono numerose varianti, sono sempre più utilizzati negli attuali esperimenti.

Scintillatori

Questi rivelatori hanno una lunga storia, se si pensa che l'esperimento di Geiger, Marsden e Rutherford del 1909, che comportò la scoperta dell'esistenza del nucleo atomico, utilizzò uno schermo di scintillatori di solfuro di zinco. Gli scintillatori sono tuttora utilizzati negli esperimenti di fisica. Per scintillatore si intende un materiale organico o inorganico che abbia la proprietà, detta di *scintillazione*, di *emettere luce visibile in seguito al passaggio di particelle* (in questo caso non necessariamente cariche). Le particelle interagiscono con le molecole o gli atomi del materiale e cedono loro energia, eccitandole, ed esse, molecole o atomi, per diseccitarsi emettono fotoni nella frequenza del visibile (il processo è più complicato e diverso tra scintillatori organici ed inorganici, però in sostanza è un meccanismo di interazione-eccitazione-diseccitazione, eventualmente con passaggi intermedi di diseccitazione). Se il processo è rapido (miliardesimo di secondo) si chiama *fluorescenza*, se più lento *fosforescenza* o *fluorescenza ritardata*.

Tantissimi sono i materiali che possono essere usati come scintillatori, si va da quelli organici che sono vari tipi di plastica (che non esistevano nemmeno ai tempi di Rutherford,

ma comunissimi oggi) a quelli inorganici, particolarmente usati nei calorimetri (vedi oltre). Ai tempi di Rutherford, lo sperimentatore osservava, al buio e con grande difficoltà, la luce emessa dagli scintillatori, oggi invece ciò che si fa usualmente è associare allo scintillatore un *fotomoltiplicatore* che è un dispositivo che converte i fotoni in elettroni, mediante effetto fotoelettrico (spiegato da Einstein, per il quale, e non per la Relatività, prese il Nobel). La corrente di elettroni così ottenuta può essere misurata e digitalizzata, in modo da studiare i dati anche mediante calcolatore. Gli scintillatori organici plastici hanno il grande vantaggio di essere veloci (cioè impiegano poco tempo a misurare il passaggio della particella, dell'ordine del miliardesimo di secondo, per questo motivo sono ottimi per misurare il *tempo* di passaggio di una particella) e poco costosi, e sono molto usati come contatori, mentre quelli inorganici sono usati nei calorimetri di cui parleremo nel prossimo paragrafo.

Calorimetri

In fisica delle particelle un calorimetro è un dispositivo per misurare l'*energia* delle particelle (a differenza della terminologia adottata in termodinamica per indicare la misura del *calore*). Anche l'energia è una grandezza molto importante da misurare per capire quale interazione sta avvenendo e, per la Teoria della Relatività di Einstein, essa è legata alla massa e alla quantità di moto da una importante relazione matematica, quindi è importante conoscerla anche per capire la massa delle particelle (più precisamente dalla conoscenza dell'energia e della quantità di moto di una particella, misurate entrambi in modo indipendente, si può determinarne la massa).

E' interessante notare che pure particelle neutre come i fotoni, che sono i quanti, i pacchetti discreti della radiazione elettromagnetica, rilasciano energia nei calorimetri (per una serie di processi di interazione che non descriviamo, uno dei quali è il già citato effetto fotoelettrico) e quindi anche essi possono essere rivelati (la loro presenza e l'energia da loro depositata), mentre i rivelatori precedentemente visti funzionano solo con particelle cariche. Anche i neutroni possono essere rivelati dai calorimetri, sia pure con maggiore difficoltà. Vi sono anche altri rivelatori per particelle neutre oltre ai calorimetri, di cui non parliamo per brevità (i rivelatori per i neutroni sono tutto un interessante capitolo "a parte", tanto caro ai fisici nucleari veri e propri).

Ad alte energie, nei calorimetri, a partire da una particella primaria carica o neutra si generano tutta una serie di *particelle a cascata*, il cosiddetto *sciame* elettromagnetico o adronico (a seconda che prevalga l'interazione elettromagnetica o quella forte). Il calorimetro, per poter misurare l'energia della particella incidente, che ha generato lo sciame, deve cercare di contenere tutte le particelle prodotte nello sciame, in modo tale che esse rilascino *tutta* la loro energia all'interno del calorimetro stesso e così il processo di scintillazione produce i fotoni che, convertiti in elettroni dai fotomoltiplicatori, danno un segnale elettrico *proporzionale* all'energia della particella iniziale.

Tipicamente i calorimetri sono costituiti da tanti scintillatori inorganici associati a tanti fotomoltiplicatori e possono avere grandi dimensioni (dell'ordine di parecchi metri e quindi anche grandi costi) per poter contenere tutte le particelle prodotte e misurare correttamente l'energia delle particelle. Anche questo settore è in continuo sviluppo al fine di migliorare sempre di più la risoluzione in energia e avere misure sempre più precise.

Com'è fatto un rivelatore "completo" di fisica delle particelle?

La precedente rapida e schematica trattazione di alcuni dei dispositivi utilizzati vuole rendere l'idea della complessità e della vastità delle misure necessarie ad un esperimento di fisica delle particelle. Tuttavia forse è emerso come taluni dispositivi sono basati su principi relativamente semplici, talvolta scoperti per caso mentre si facevano altre misure. In un esperimento come quelli del Grande Collisore di Adroni, LHC, sono presenti tantissimi rivelatori insieme, perché soltanto l'uso combinato e contemporaneo di più rivelatori diversi può fornire *tutte* le informazioni richieste. Come si è visto taluni rivelatori misurano meglio la posizione, altri il tempo di arrivo, altri ancora l'energia, alcuni funzionano solo con le particelle cariche, altri sono indispensabili per quelle neutre e quindi si tratta di combinare abilmente le tecnologie note tenendo anche conto della quantità di soldi a disposizione che è un parametro anch'esso importante (in particolare in questi periodi di continui tagli alle attività di ricerca scientifica!).

Tipicamente un esperimento di fisica delle particelle è composto da un rivelatore di vertice centrale, costituito da svariati strati di rivelatori al silicio che permettono di ricostruire le tracce delle particelle "primarie", quelle provenienti dalla regione iniziale di interazione. Più esternamente sono posti altri rivelatori, ad esempio a gas, che, in combinazione con quelli al silicio, permettono di tracciare il percorso delle particelle in uno spazio più grande (che può raggiungere e superare il metro di lunghezza). Come abbiamo visto, il campo magnetico uniforme è spesso utilizzato per incurvare le tracce e così misurarne la quantità di moto (essendo noto il campo) e a tal fine grossi magneti sono posti esternamente ai tracciatori centrali.

Altri rivelatori come quelli ad effetto Čerenkov servono ad identificare le particelle (misurarne la massa) ed i calorimetri a misurarne l'energia. Usualmente esternamente ai tracciatori sono posti i calorimetri elettromagnetici e più esternamente ancora quelli adronici, infine ancora più esternamente appositi rivelatori per i *muoni* (diciamo i cugini pesanti degli elettroni) i quali, interagendo debolmente, attraversano tutto il rivelatore senza venire assorbiti e quindi la loro traccia può (e deve) essere ricostruita anche molto lontano dalla interazione iniziale. Il canale di produzione dei muoni è spesso assai interessante, per esempio, si prevede che lo sarà nelle ricerche del cosiddetto *bosone di Higgs* ad LHC.

Non dimentichiamo, infine, che ogni rivelatore moderno ha uno o più (più spesso tanti) cavi coassiali attraverso i quali viaggia il segnale (elettrico) che contiene la misura effettuata. Questi cavi vanno a finire in opportuni moduli elettronici in modo da digitalizzare l'informazione e studiarla mediante calcolatore (e solo alla fine arriva l'occhio umano!). Per questo una inconfondibile caratteristica di questi esperimenti sono le grandi quantità di cavi coassiali che fuoriescono dal rivelatore, così come la struttura "a catena", una catena in cui *tutti* gli anelli *devono* funzionare correttamente perché la misura sia effettuata correttamente.

Questa *breve* panoramica dell'affascinante mondo delle particelle e dei nuclei si ferma qui, speriamo di avere dato un'idea chiara, sia pur approssimata, di come l'uomo riesce a sondare il mondo subatomico, nucleare e subnucleare. E' un'impresa ardua, ma foriera di grande soddisfazione per chi la compie e per l'umanità intera.

Per chi volesse approfondire

Abbiamo preferito non aggiungere un apparato di note alle pubblicazioni, spesso soltanto in inglese, relative a quanto detto, tuttavia per chi volesse approfondire consigliamo

in prima lettura le pagine dell'Enciclopedia Libera *wikipedia* <http://it.wikipedia.org/wiki/Wiki> (in italiano ed in inglese) che sono curate in modo sufficientemente preciso. Per il lettore già mediamente esperto e con una preparazione in fisica si consiglia, solo in inglese, la rassegna "Passage of particles through matter", "Particle detectors for accelerators", "Particle detectors for non-accelerator physics" costantemente aggiornata dal Particle Data Group, scaricabile gratuitamente dal sito <http://pdg.lbl.gov/> (nella sezione "Reviews, Tables and Plots") e contenente tantissimi rimandi alle pubblicazioni scientifiche originali.

E' anche possibile inviare una mail al sottoscritto (pablo.genova@pv.infn.it) che potrà suggerirvi ulteriori articoli e pubblicazioni, nei limiti della sua appunto *limitata* conoscenza dell'argomento.