

Stefano Accorsi

Liceo "Archimede" di San Giovanni in Persiceto – BO

Gabriele Tassinari

ISIT "Bassi-Burgatti" di Cento – FE

Carlo Bertoni, Elisa Targa

Liceo "Copernico" di Bologna

Gisella Greggi

Liceo "Ferrari di Cesenatico" – FC

Alessandro Foschi

Liceo "Fulcieri Paulucci" di Calboli di Forlì

Mariagrazia Fabbri, Marina Maiani,

Ivan Poluzzi, Roberta Quadrio

Liceo "Galvani" di Bologna

Benedetta Amicizia

Liceo "Laurana" di Urbino

Azizollah Kahleggi, Mauro Baiamonte,

Franca Maria Mancino,

Manuela Tempesta

Liceo "Marconi" di Pesaro

Fabio Gasparrini, Daniela Travaglini

Liceo "Orsini" di Ascoli Piceno

Gastone Donini, Fabio Arcidiacono,

Riccardo Righi, Michele Severi

Liceo "Torelli" di Fano

Sara Orsola Parolin, Peter Helgesson

Liceo "Faenza" di Faenza

Barbara Poli

Segretaria sezione AIF di Bologna

MICRO_MACRO A.S. 2013-2014

Acceleratori di particelle e rivelatori per una migliore comprensione della fisica subnucleare, e i loro sviluppi applicativi

Il progetto

Da alcuni anni l'AIF sezione di Bologna e la Fondazione Giuseppe Occhialini di Pesaro collaborano nell'organizzazione di attività rivolte all'aggiornamento degli insegnanti in servizio e di iniziative atte a promuovere lo studio delle discipline scientifiche (in particolare la Fisica) fra i giovani. Fra queste, il Progetto MICRO_MACRO si configura come un innovativo corso d'aggiornamento in Fisica rivolto a docenti di questa disciplina in servizio presso i Licei.

Le Indicazioni Nazionali sugli obiettivi specifici di apprendimento per i licei invitano, per la classe V, all'approfondimento di alcune moderne tematiche in grado di riscuotere particolare interesse fra gli studenti e di evidenziare la profonda connessione tra scienza e tecnologia.

In accordo con questi suggerimenti il corso si è concentrato su due particolari temi di Fisica moderna, la fisica del Micro (A.S. 2013-2014) e Macro Cosmo (A.S. 2014-2015).

Poiché le indicazioni nazionali suggeriscono, quando possibile, che la dimensione sperimentale a scuola sia approfondita con attività da svolgersi non solo nel laboratorio didattico scolastico, ma anche presso laboratori ed enti di ricerca, abbiamo ritenuto che la scelta di svolgere il corso d'aggiornamento presso laboratori di rilevanza europea potesse essere un punto di forza.

Durante il primo A.S. il corso d'aggiornamento ha avuto luogo, nel periodo autunnale, a Ginevra presso il Laboratorio Europeo per la Fisica delle Particelle, CERN. Referenti scientifici del Progetto sono stati Barbara Poli, segretaria sezione AIF Bologna, che ha curato anche tutta l'organizzazione, Antonio Zoccoli, presidente della Fondazione Giuseppe Occhialini, Antonella Del Rosso e Mick Storr del CERN Communication & Education Group. Il tema scelto, *"Acceleratori di particelle e rivelatori per una migliore comprensione*

della fisica subnucleare, e i loro sviluppi applicativi", ha permesso di fare connessioni con l'elettromagnetismo e la relatività ristretta. Le lezioni, 7 ore al giorno, sono state effettuate da ricercatori del CERN dal lunedì al giovedì, mentre la giornata di venerdì è stata dedicata al lavoro di programmazione didattica di gruppo.



Figura 1. Stralcio dell'articolo apparso su Repubblica Bologna. La foto ritrae il gruppo con gli Spokepersons di CMS Joe Incandela e Tiziano Camporesi.

Nella descrizione del Progetto, non possiamo non citare una piacevole coincidenza che ha trasmesso emozione ed entusiasmo fra i partecipanti: durante la permanenza al CERN, i docenti hanno assistito, insieme ai ricercatori e al Direttore Generale, all'annuncio di attribuzione del Premio Nobel per la Fisica ai fisici teorici *François Englert* e *Peter Higgs*, per la formulazione di una teoria che predice l'esistenza di una nuova particella, il *bosone di Higgs* e, con i suoi scopritori, hanno partecipato ai festeggiamenti.

Nel periodo primaverile, dopo un impegnativo lavoro di preparazione, i corsisti hanno affrontato il tema nelle classi V delle loro scuole con un modulo di almeno 5 ore curriculari, con approfondimenti fino a 10-15 ore anche pomeridiane. Per le lezioni sono stati di solito utilizzati powerpoint, schede del CERN per la costruzione di camere a nebbia, esercitazioni proposte nelle International Masterclasses for Particle Physics. In generale i temi trattati hanno riguardato: acceleratori – rivelatori – scoperta di particelle – Modello Standard e in molti casi il percorso didattico si è concluso con una visita al laboratorio Nazionale INFN di Frascati o al laboratorio CERN. Dei 30 insegnanti che hanno seguito le lezioni al CERN, 26 hanno effettuato la sperimentazione in classe, fra loro tre docenti non di ruolo.

Nelle successive sezioni sono descritte 4 macro aree nelle quali è stato suddiviso, a grandi linee, il lavoro documentato dei partecipanti al corso.

Nelle successive sezioni sono descritte 4 macro aree nelle quali è stato suddiviso, a grandi linee, il lavoro documentato dei partecipanti al corso.

Il percorso didattico strutturato col metodo PBL

In cinque classi quinte di tre diversi licei scientifici si è voluto sperimentare la modalità *Problem Based Learning* (PBL) su alcuni aspetti della Fisica delle Particelle per verificare quali potessero essere le potenzialità di questo metodo sull'apprendimento.

Ma cos'è il metodo PBL? Nella vita lavorativa, lo sviluppo di una impresa avviene attraverso il lavoro di gruppo,



Figura 2. Foto di gruppo all'ingresso della Hall sperimentale dell'Esperimento CMS.



Figura 3. Foto di gruppo con Sergio Bertolucci, Direttore di Ricerca del CERN.

detto *team work*. Nel *team* ognuno ha il proprio ruolo e la propria responsabilità nel creare o migliorare un prodotto o un servizio. Le sole conoscenze apprese a scuola o all'università, non sono sufficienti alla crescita di un ambiente aziendale-imprenditoriale (ma anche di un gruppo di ricerca scientifica o di un team di medici in ospedale), per questo è necessario creare le condizioni affinché l'apprendimento sia continuo e autonomo. Se apprendere è importante, lo è, contemporaneamente, anche il saper collaborare ad es. attraverso l'ascolto, l'apporto di un contributo oppure la comunicazione chiara ed efficace delle proprie idee.

Il metodo PBL è quindi una modalità di apprendimento che vuole aiutare gli alunni a prepararsi al mondo lavorativo fornendo competenze che normalmente la scuola, per come sono strutturate le lezioni frontali, non può dare. Esso è una strategia formativa in cui gli studenti:

- *Ascoltano una presentazione, da parte del docente, su un problema contestualizzato e "mal strutturato" (nel senso che presenta più approcci risolutivi e più di una soluzione)*
- *si dividono in gruppi (team di progettazione)*
- *in una prima sessione di gruppo, discutono sul problema basandosi su conoscenze preesistenti, poi si assegnano l'un l'altro compiti e responsabilità*
- *si sforzano di trovare informazioni significative, in modo autonomo*
- *in una seconda sessione di gruppo, si confrontano mettendo a disposizione di tutto il team le idee ed informazioni raccolte, fino al raggiungimento di una ipotesi comune di spiegazione.*
- *memorizzano le nuove conoscenze e preparano una presentazione sul lavoro svolto. Ciascuno ha come responsabilità quella che tutto il gruppo impari e il successo del gruppo è il successo del singolo.*
- *vengono eventualmente valutati dal docente.*

Il metodo dovrebbe migliorare la persistenza nel tempo delle conoscenze acquisite, ottimizzarne il trasferimento a nuovi problemi, aumentare la motivazione e l'interesse sull'argomento trattato.

Nel caso specifico, gli argomenti della Fisica delle Particelle affrontati dalle classi con questo approccio sono stati l'antimateria, il modello standard, i dispositivi e le tecniche per la rivelazione delle particelle con particolare riferimento a quelli utilizzati dall'esperimento CMS. Nel tempo di due ore di lezione, il progetto ha previsto la presentazione, la discussione e risoluzione di tre problemi: un'ora, per una prima analisi e una, per la discussione finale. Un'ora introduttiva aggiuntiva è stata utilizzata per descrivere il metodo nelle sue linee generali, per formare i gruppi e individuare le varie fonti (siti, podcast, filmati, libri ecc.) da cui poter attingere le informazioni. Altre due ore sono state infine impiegate per una verifica con una prova strutturata e un test di gradimento. Durante la seconda ora di lezione è stata mostrata la parte iniziale del film "Angeli e Demoni" e presentato il **primo problema** sul tema dell'antimateria. Il testo raccontava che l'ingegner Tanteidee, dopo aver visto il film "Angeli e Demoni", aveva inventato un motore per aerei che usava l'antimateria come combustibile e ora lui offriva agli alunni uno stage nella sua azienda. Il compito degli studenti era quello di elaborare un rapporto con informazioni su che cosa è l'antimateria e su come viene ottenuta al CERN. Il rapporto doveva contenere alcuni dettagli quali ad es. la stima della produzione giornaliera e un'indicazione sui modi di contenere l'antimateria una volta prodotta. Gli studenti dovevano inoltre riportare dati significativi, trovare notizie e presentarle in modo sintetico, ma chiaro. Il **secondo problema** è stato introdotto da una scena di "Terminator 3" girata in un acceleratore di particelle. Esso chiedeva di preparare una mappa concettuale su come fosse possibile "vedere" le particelle subatomiche e su quali grandezze occorressero per misurare e per riconoscere quelle più conosciute dopo averle opportunamente descritte. Il **terzo problema** (diverso per ogni classe) attribuiva ai ragazzi il ruolo di ricercatori di Fisica delle Particelle della Collaborazione CMS. A ciascuno di loro si chiedeva di spiegare, in quindici minuti durante una conferenza tenuta nella "Settimana della Cultura Scientifica" a Faenza, il funzionamento della parte del rivelatore CMS di cui il proprio gruppo aveva la responsabilità.

Alla fine dell'intero percorso, tutte le classi si sono effettivamente ritrovate per conoscersi e confrontarsi in un evento organizzato ad hoc nell'ambito della settimana della Cultura Scientifica di Faenza. In questa occasione, dopo aver ascoltato la relazione tenuta da un ricercatore dell'INFN dal titolo "Perché il modello standard non ci soddisfa? Nuove teorie per cercare di superare quella che, al momento, è la migliore che abbiamo", gli studenti hanno presentato i loro risultati, come richiesto nell'ultimo dei 3 problemi proposti.

Il metodo PBL è già stato utilizzato nell'insegnamento della Fisica, in particolare nei paesi anglosassoni (http://pbl.ccdmd.qc.ca/resultat.php?action=prob_tous&he=768), questa però è la prima volta che viene applicato allo studio della Fisica delle Particelle.

I risultati della verifica (tab. 1) indicano che l'apprendimento è stato medio alto; i ragazzi hanno inoltre dimostrato di ricordare e capire le informazioni auto-apprese. Il metodo ha effettivamente avuto il merito di responsabilizzare, di fare sentire partecipi gli studenti e di insegnare loro come si lavora in un gruppo, per questo lo riteniamo particolarmente indicato al Laboratorio di Fisica del Biennio dei Licei Scientifici dove i ragazzi spesso devono lavorare in team. Il gradimento degli alunni è stato abbastanza alto (fig. 4), grazie anche al contributo della mattinata-evento che è stata ritenuta moltocoinvolgente.

Punteggio	Percentuale alunni
170-200	13%
150-169	36%
130-149	31%
110-129	14%

Tabella 1. Risultati del test di verifica (40 domande): un punteggio superiore a 129 è da considerarsi sufficiente.

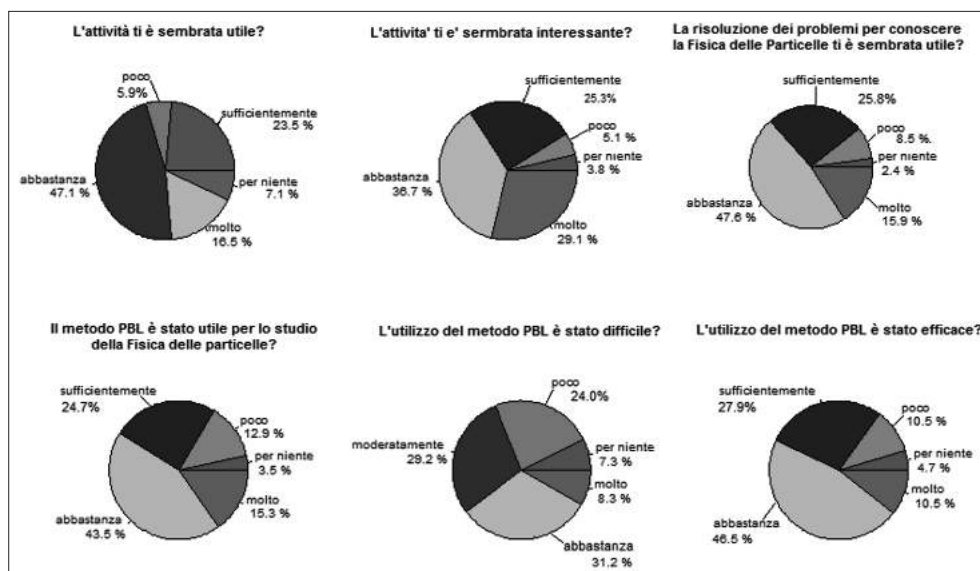


Figura 4. Statistiche relative ad alcune domande del test di gradimento anonimo poste ai ragazzi.

Infine vorremo segnalare alcuni aspetti critici, primo fra tutti, il ruolo del docente che è così innaturale per un insegnante italiano abituato alla lezione frontale. Nel metodo PBL, prima di entrare in aula, il professore ha il compito, particolarmente importante dal punto di vista della progettazione didattica, di scegliere attentamente il problema, di produrre una dispensa introduttiva in grado di delineare le aspettative del processo di apprendimento, di responsabilizzare i ragazzi e di stimolarli sul nuovo metodo. In aula invece deve essere solo un tutor, un facilitatore che deve supportare gli allievi nella ricerca senza fornire mai, in modo diretto, informazioni per la risoluzione.

Un altro fattore da tenere in considerazione è il tempo che gli studenti devono dedicare all'autoapprendimento e che non tutti sono disposti a spendere: i ragazzi, infatti, preferiscono una lezione frontale più veloce e alla prima difficoltà cercano l'aiuto dell'insegnante. Il processo di apprendimento col metodo PBL può sembrare frustrante per gli studenti: non è necessariamente efficiente, perché ad es. non inibisce la scelta iniziale di strade sbagliate, ma è efficace, perché, giunti alla strada giusta, ognuno ha realmente appreso il modo in cui vi è arrivato.

Lezioni sui raggi cosmici con metodologia CLIL

Molti dei percorsi svolti nelle diverse scuole sono partiti dall'osservazione delle tracce di raggi cosmici in una camera a nebbia costruita artigianalmente a scuola e dall'analisi quantitativa della famosa fotografia di Anderson del positrone. L'idea e la modalità costruttiva della camera sono state tratte da una delle lezioni laboratoriali seguite al CERN seguendo la scheda fornita e reperibile al link <https://teachers.web.cern.ch/teachers/document/cloud-final.pdf>.

Poiché il materiale a disposizione e l'articolo di Anderson erano in inglese si è pensato di strutturare alcune lezioni secondo la metodologia CLIL. I ragazzi hanno quindi seguito le istruzioni per assemblare la camera a nebbia, descritto le osservazioni delle tracce e formulato ipotesi sulla loro origine utilizzando il linguaggio scientifico specifico in inglese. Le lezioni, strutturate secondo un *Inquiry Based Approach*, e l'argomento estre-

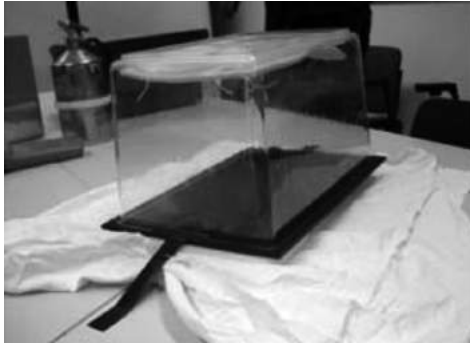


Figura 5. Camera a nebbia a ghiaccio secco.

mamente attuale hanno motivato i ragazzi che si sono impegnati sia nella ricerca di spiegazioni scientifiche, sia dal punto di vista linguistico.

Nella prima lezione gli studenti hanno assemblato e resa operativa una rudimentale camera a nebbia a ghiaccio secco (fig. 5), seguendo le istruzioni dalla scheda citata sopra, da cui riportiamo l'immagine schematica della camera (fig. 6) con il relativo vocabolario specifico.

I ragazzi sono poi stati stimolati nell'osservazione con le seguenti domande (la fig. 7 mostra una delle tracce ottenute):

- Describe in detail what you observe during the first ten minutes. Take special note of any sounds, droplets, formation of clouds, movement of clouds, frost and any other interesting phenomena.
- After you have spent some time observing the track formations, draw some of the shapes that you see. Do all of the tracks appear the same? Is there any difference in thickness? In length? Do they appear twisted or straight?

Nelle lezioni successive, dopo una introduzione sulla natura dei raggi cosmici e sulla scoperta delle prime particelle elementari, i ragazzi sono stati guidati alla lettura e alla comprensione di alcune parti dell'articolo di Anderson sulla scoperta del positrone (Carl D. Anderson, *The Positive Electron*, Phys. Rev, 43, 491, 1933).

Inizialmente hanno letto l'abstract e la parte introduttiva dell'articolo, rispondendo poi ad alcune domande sulla comprensione del testo per cogliere le caratteristiche fondamentali della particella osservata (massa e carica).

- 1) Read the **abstract** of the paper.

What has been observed?

What limits have been established about the charge?

What limits have been established about the mass?

- 2) Read the paper until line 14. What are the properties (mass and charge) of the observed particle according to Anderson?

In modo analogo a quanto descritto nell'articolo, hanno osservato la figura della traccia e dedotto la direzione del moto e il tipo di carica della particella, nota la direzio-

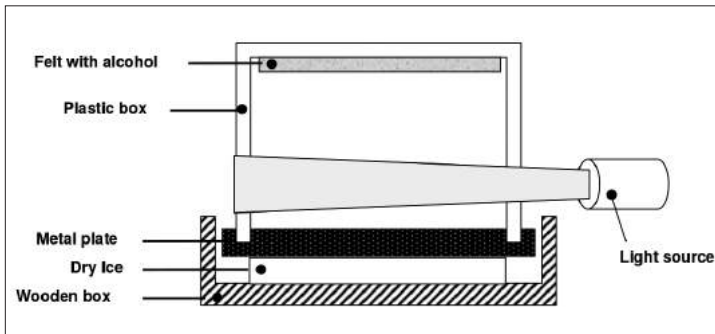


Figura 6. Immagine schematica della camera a nebbia con didascalie in lingua inglese.

Figura 7. Foto di una traccia.

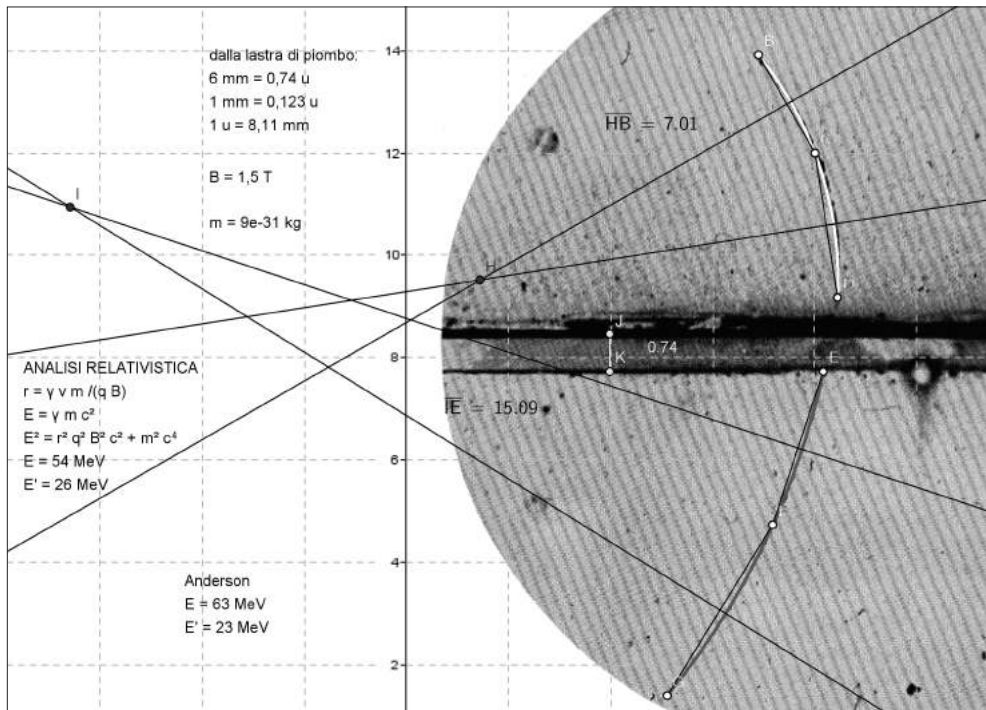


Figura 8. La traccia del positrone ottenuta da Anderson posta come sfondo a GeoGebra per determinare i raggi di curvatura della traiettoria.

ne del campo magnetico. Dal punto di vista quantitativo i ragazzi hanno misurato i due raggi di curvatura (prima e dopo il passaggio attraverso la lamina di piombo) importando la figura in un foglio di GeoGebra (fig. 8) e da questi hanno ricavato la perdita di energia utilizzando le formule relativistiche (in particolare $E^2 = p^2 \cdot c^2 + m_0^2 \cdot c^4 = r^2 q^2 B^2 c^2 + m_0^2 \cdot c^4$) nell'ipotesi di diversi possibili valori per massa e carica.

I dati ottenuti sono stati confrontati con due grafici (uno in fig. 5) che riportano la perdita di energia di diversi tipi di particelle (protone, Kaone, pione, muone, elettrone) in piombo. Questo approccio ha permesso la comprensione della parte dell'articolo di Anderson in cui l'autore dopo aver analizzato, e, successivamente, scartato la possibilità che si trattasse di una particella nota, ipotizzò l'esistenza di una particella non conosciuta di carica positiva e con massa uguale a quella dell'elettrone.

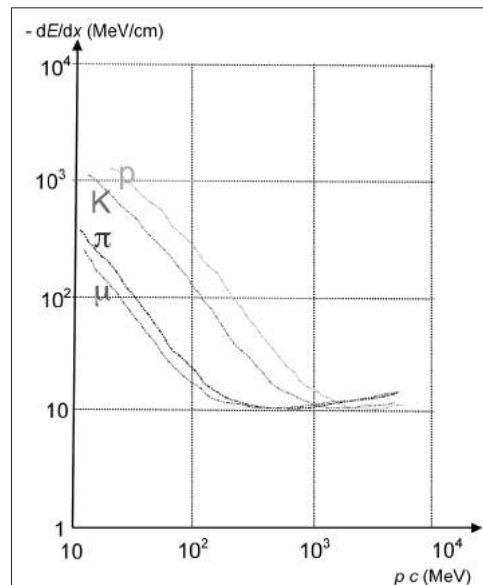


Figura 9. La perdita di energia per cm di cammino in piombo in funzione dell'impulso per protone, kaone, pione e muone.

Utilizzo del materiale di CMS, ATLAS e delle International Masterclass per il riconoscimento di particelle ed eventi

Passaggio obbligato, nella fase centrale del Progetto che richiedeva la sperimentazione all'interno delle classi quinte dei temi affrontati nel corso d'aggiornamento, è stata la comprensione del funzionamento di alcuni rivelatori in funzione all'acceleratore LHC. Nello specifico, si è cercato di guidare gli studenti alla conoscenza della struttura dei rivelatori dei due principali esperimenti ATLAS e CMS, con lo scopo finale di padroneggiare i concetti alla base del riconoscimento delle particelle, necessario per la ricostruzione degli eventi all'interno di tali rivelatori. Questa fase, oltre a essere fondamentale in quanto punto di connessione tra approccio teorico e sperimentale alla fisica delle particelle, è risultata particolarmente gradita agli studenti, stimolati dalla sfida del riconoscimento delle particelle, oltre che in qualche modo "rassicurati" dall'utilizzo di concetti già ben noti, primo fra tutti il moto di una carica in un campo magnetico.

Ecco le fasi affrontate in classe:

1. studio della struttura dei rivelatori ATLAS e CMS;
2. riconoscimento di una singola particella;
3. studio di eventi.

Fase 1

Per iniziare

Cosa è importante conoscere delle particelle prodotte nelle collisioni? Traiettoria, energia, e introduzione intuitiva del concetto di momento trasverso.

In cosa si differenziano le diverse particelle prodotte nelle collisioni? Perché i rivelatori sono composti di diversi "strati"?

Contenuti

Struttura dei rivelatori: tracciatore, calorimetri elettromagnetico e adronico, rivelatore di muoni.

Materiali

Fondamentale l'utilizzo di contenuti multimediali dei siti di ATLAS e CMS.

Per il rivelatore dell'esperimento ATLAS, ad esempio, sono stati utilizzati, oltre all'immagine interattiva <http://www.atlas.ch/detector.html> i seguenti contenuti video: il primo riguarda la struttura del rivelatore, gli altri entrano nei dettagli delle varie parti:

- <http://www.atlas.ch/multimedia/#how-atlas-detects-particles>
- <http://www.atlas.ch/multimedia/pixel-silicon-tracker.html>
- <http://www.atlas.ch/multimedia/electromagnetic-cal.html>
- <http://www.atlas.ch/multimedia/hadronic-cal.html>
- <http://www.atlas.ch/multimedia/muon-detectors.html>

Analoghi contenuti sono disponibili, per il rivelatore CMS, al sito <http://cms.web.cern.ch/news/what-cms>

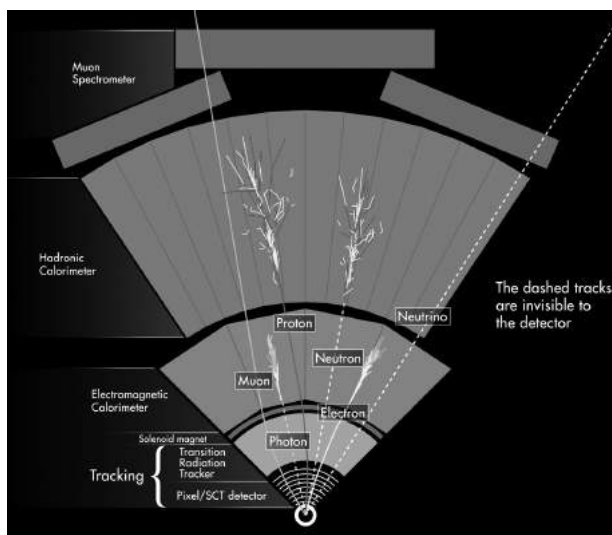


Figura 10. Struttura del rivelatore dell'esperimento ATLAS.

Fase 2

Per iniziare

Che informazioni possiamo ottenere studiando la traccia di una carica in un campo magnetico?

Quali parti del rivelatore saranno attivate dalle varie particelle (elettroni, fotoni, protoni, neutroni, muoni, neutrini)?

Contenuti

Esercitazioni sul riconoscimento di particelle a partire dalle tracce nei rivelatori.

Materiali

Immagini animate dei rivelatori CMS e ATLAS, disponibili ai siti

- <http://cms.web.cern.ch/news/how-cms-detects-particles>
- http://www.physicsmasterclasses.org/exercises/ATLAS/videos/ATLAS_animation-2010-11-22.swf

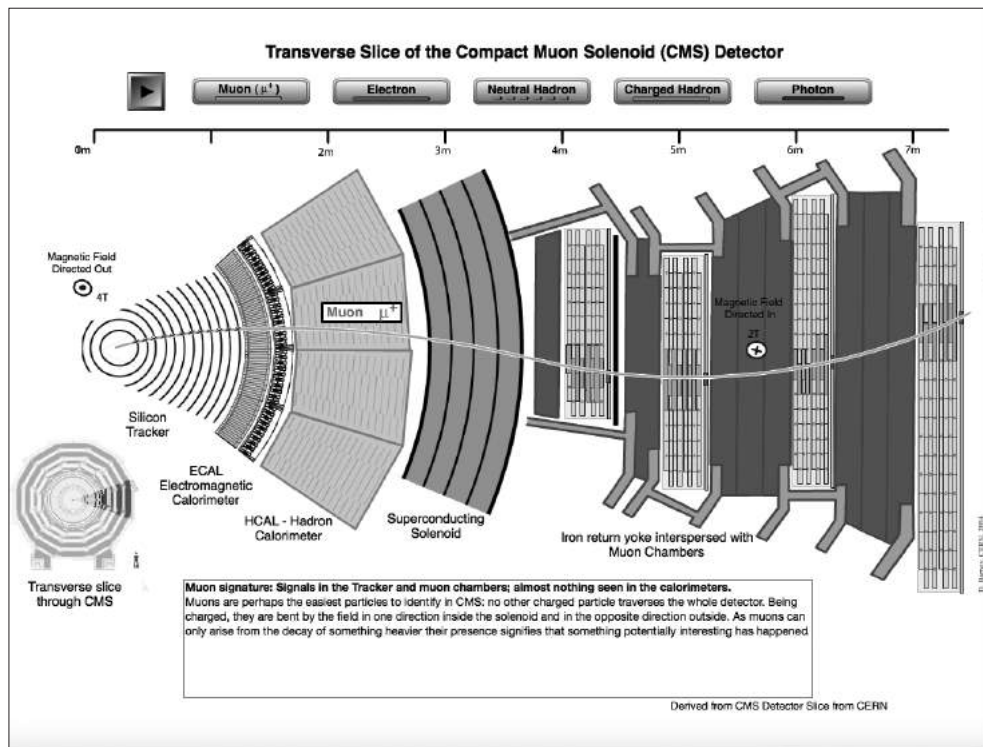


Figura 11. Riconoscimento di particelle nel rivelatore dell'esperimento CMS.

Fase 3

Per iniziare

Riusciamo a ricostruire un evento dalle tracce di più particelle?

Contenuti

Come esempio, con gli studenti si è studiato tramite software un evento di decadimento bosone di Higgs in due bosoni W , che a loro volta decadono in due leptoni e due neutrini.

Si parte dall'analisi del momento trasverso mancante (che denota la presenza di neutrini, non rivelabili). Se questo è maggiore di 20 GeV (possibile presenza di due neutrini) si esegue via software un taglio, per selezionare solo le particelle con momento trasverso alto (maggiore di 20 GeV). Rimangono solo due tracce: una si ferma nel calorimetro elettromagnetico, l'altra è rilevata dalle camere a muoni: si tratta di un elettrone e di un anti-muone.

L'evento è un candidato WW!

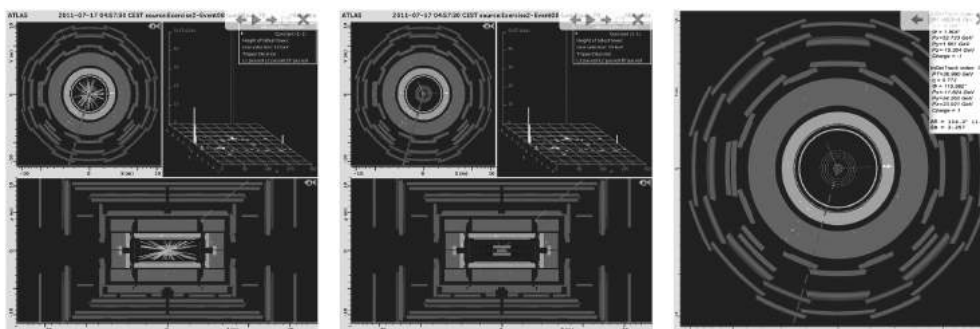


Figura 12. Masterclass: fasi della ricostruzione di un evento WW con software online.

Materiali

Software di esercitazione online dal sito della Masterclass, disponibile al sito

– http://atlas.physicsmasterclasses.org/it/wpath_higgs.htm

Alcuni esempi di verifica sommativa

Data l'eterogeneità delle scuole rappresentate dagli insegnanti che hanno partecipato al Progetto, i livelli d'approfondimento sull'argomento si sono molto diversificati tra loro. Questa differenziazione ha prodotto un effetto molto positivo perché ha consentito la raccolta e l'elaborazione di materiali a livelli differenziati, con difficoltà crescenti e adattabili non solo a studenti di Licei Scientifici.

Anche le verifiche di carattere formativo o sommativo sono risultate in particolare indicate a contesti scolastici molto diversi e hanno permesso un ottimo raccordo con gli argomenti di fisica trattati nel corso di studi (moto di particelle cariche in un campo magnetico, accelerazione di particelle cariche in un campo elettrico, equivalenza massa energia, cinematica relativistica, interazioni elettromagnetiche delle particelle con la materia).

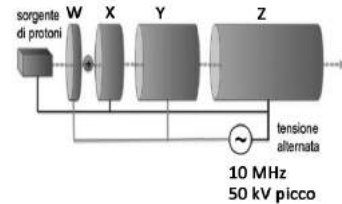
Ci è sembrato ragionevole organizzare il materiale di verifica, prodotto dai vari gruppi, nel seguente modo:

- 1) **Primo livello:** esercizi nei quali, utilizzando i principi della fisica classica (campi elettrici e campi magnetici), si richiedono le caratteristiche di un acceleratore di particelle elementari. Ne sono un esempio i classici esercizi sul sincrotrone reperibili in ogni libro di testo oppure esercizi del tipo:

Consideriamo lo schema di un acceleratore lineare. Il fascio acquista energia passando attraverso successivi elettrodi cilindrici (WX, YZ, e così via) come mostrato in figura.

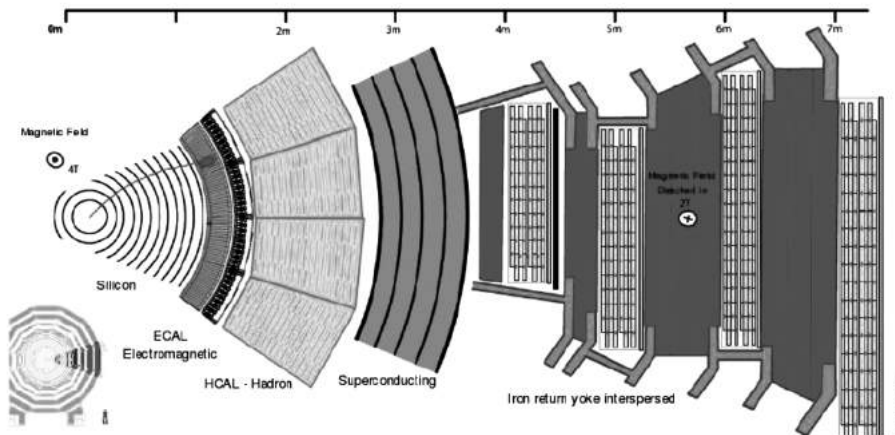
La lunghezza dei cilindri è tale che, nel tempo impiegato dal protone a percorrere un dato cilindro, cambia la polarità e quindi, in uscita, si ha un'ulteriore guadagno di energia. Per questo motivo la lunghezza di ciascun cilindro è tale che il tempo di transito sia metà del periodo della d.d.p. alternata.

- a) Spiega perché le particelle non aumentano la loro energia all'interno del cilindro, nonostante il cilindro sia ad un potenziale molto elevato.
- b) Calcola la lunghezza WX del primo cilindro (assumendo $v_0 = 0$) in modo che il protone arrivi in tempo per essere accelerato dalla d.d.p. tra X e Y (utilizza le relazioni non relativistiche).



- 2) **Secondo livello:** esercizi di riconoscimento di particelle identificate nel rivelatore CMS o ATLAS dell'acceleratore LHC. Questo tipo di esercizi richiede da parte dello studente, l'aver capito quali tipi di particelle attraversino i rivelatori di LHC (elettroni/positroni, fotoni, adroni, muoni), l'aver capito con quale sotto-rivelatore interagiscono e quindi l'aver capito quali siano i sotto-rivelatori attivi per ciascuna particella. Per le esercitazioni sono risultati estremamente utili e interessanti i materiali reperibili sul sito delle International Masterclasses, già descritti nella omonima sezione, che hanno permesso alcuni esercizi di raccordo con il programma di fisica classica, come per es. la richiesta di risalire dal raggio di curvatura di una particella, al suo impulso, e quindi alla sua energia. L'esercizio completo è riportato di seguito.

- 4) Identifica la particella che ha lasciato la traccia fucsia nel rivelatore in figura. Determina la sua energia.



- 3) **Terzo livello:** esercizi in cui si utilizza l'equivalenza massa-energia e/o la cinematica relativistica. Più in dettaglio alcuni degli esercizi proposti richiedono l'analisi del decadimento di una particella o del confronto tra un acceleratore a bersaglio fisso e un collisionatore:

Calcola l'energia disponibile nel centro di massa usando un fascio di positroni con energia cinetica di 100 GeV nel laboratorio contro:

- a) un elettrone a riposo.
- b) un elettrone con la stessa energia ma quantità di moto opposta.
- c) Calcola l'energia di soglia per la reazione $e^+ + e^- \rightarrow W^+ + W^-$, studiata al LEP.
- d) Spiega perché al LEP era utilizzata la collisione tra due fasci elettronici-positronici e non la collisione di un fascio di positroni su un bersaglio fisso.
- e) Spiega perché la reazione $e^+ + e^- \rightarrow W^+$ non è possibile.

- 4) **Quarto livello:** esercizi in cui si studiano le interazioni elettromagnetiche tra particelle ionizzanti e materia, come per esempio l'istruttivo esercizio sull'articolo di Anderson relativo alla scoperta del positrone, già descritto nella sezione relativa all'esperienza CLIL.

Gli insegnanti hanno notato negli studenti un diffuso interesse per l'argomento della Fisica delle Particelle Elementari soprattutto perché è stato percepito come un argomento d'attualità che ha avuto rilievo anche in riviste non specializzate. Questo interesse è stato confermato sia dagli esiti generalmente positivi delle prove di verifica, sia dalle risposte ai questionari di gradimento che qualche insegnante ha proposto ai propri studenti al termine dell'attività.

Conclusioni

Se MICRO_MACRO ha avuto come obiettivo quello di incentivare e motivare gli insegnanti su temi di fisica moderna, la richiesta dell'immediata sperimentazione nelle classi ha fatto sì che l'esperienza non rimanesse unicamente un evento di crescita personale del docente, ma si traducesse in un effettivo strumento utile alla didattica. Un insegnamento moderno e consapevole è il primo passo per creare giovani interessati alla scienza.

