LE COMUNITÀ SCIENTIFICHE DELLA BIG SCIENCE

Toni Baroncelli, Roberto Chierici

Sommario

In questo articolo si analizzano e si discutono le motivazioni della ricerca fondamentale e la necessità che essa venga fatta attraverso collaborazioni scientifiche organizzate a livello mondiale, in quella che viene spesso definita "Big Science". Il caso specifico della fisica delle particelle, cui entrambi gli autori hanno contribuito per decenni, è presentato con grande dettaglio: si discutono i processi formali per creare organizzazioni scientifiche di migliaia di persone e per mantenerle in opera per decine d'anni, nonché i costi derivanti. Si illustra come i fisici siano stati capaci di creare collaborazioni su scala mondiale dotate di una efficiente organizzazione interna, sia dal punto di vista della divisione dei compiti che del sistema della produzione di pubblicazioni, lasciando anche spazio a considerazioni più di natura personale sugli aspetti umani legati a simili imprese.

Parole chiave: *Big Science, fisica alte energie, CERN, ATLAS, CMS.*

Introduzione alla ricerca fondamentale e alla Big Science

L'uomo ha sempre cercato di trovare risposte a domande fondamentali sulla natura che lo circonda, nella perenne ricerca di comprendere i meccanismi e le leggi che regolano il funzionamento di ciò che percepiamo. Lo scopo della cosiddetta ricerca "fondamentale", o "pura", o di "base", è proprio quello di affrontare queste domande utilizzando l'approccio del metodo scientifico e facendosi guidare dall'esperienza nello studio della Natura.

Sebbene, ad una prima analisi superficiale, la ricerca fondamentale possa apparire solo come un esercizio intellettuale privo di un impatto sulla vita umana, non vi è in realtà nulla che sia più necessario per lo sviluppo scientifico e tecnologico, con conseguenze talvolta di portata epocale per l'evoluzione delle condizioni umane. Purtroppo ancora oggi, in una società che dà troppo poco risalto a notizie scientifiche ed in una cultura dove i valori della ricerca e della sperimentazione sono assolutamente secondari, vi sono persone che si pongono domande riguardo l'utilità della ricerca fondamentale, esprimendo talvolta dubbi su quegli stessi mezzi di comunicazione che dovrebbero invece servire a diffondere e creare una cultura della scienza. È utile ricordare uno qualsiasi dei molti esempi di studio di fenomeni sconosciuti che ha avuto conseguenze memorabili nella storia dello sviluppo umano. Si provi ad immaginare, per esempio, il XX secolo senza gli studi di Faraday sulla trasmissione di elettroni all'interno di un filo, e la vita di oggi senza l'elettricità e l'elettronica. Più in generale è vero che gli studi sulla materia e i suoi costituenti hanno portato a grandi successi dal punto di vista dell'avanzamento tecnologico: si pensi a come la comprensione dei meccanismi che regolano il comportamento della materia a livello atomico ha portato, con la meccanica quantistica, alla teoria dei solidi, allo sviluppo dei transistor e quindi a tutta la microelettronica, o di come la comprensione della radiazione abbia dato un impulso notevole allo sviluppo energetico e alla nascita di molte applicazioni di diagnostica medica. Non soltanto la comprensione più approfondita dei fenomeni che osserviamo può aprire porte insperate allo sviluppo tecnologico, ma anche gli stessi metodi degli esperimenti nella ricerca di base, che implicano sempre l'uso di tecnologie anch'esse ai confini della conoscenza, stimolano in modo costante la nascita di nuove idee. Rimanendo nel dominio dello studio della materia e della sua struttura più intima, esempi di come la ricerca pura possa giovare alla società vengono proprio dalla fisica delle particelle presso i grandi acceleratori. Internet, per citare l'esempio più conosciuto, è stato ideato per la prima volta come strumento di comunicazione tra fisici nel laboratorio del *CERN* di Ginevra. Le tecniche di accelerazione di particelle sono oramai applicate in ambienti medici e biologici, nell'industria dei semiconduttori, nelle tecniche di smaltimento di rifiuti radioattivi. Ancora, si possono trovare *spin-off* da tecniche di rivelazione di particelle in metodi di ispezione non invasive e diagnostica medica.

Anche se questi esempi non sono che una piccola parte di ciò che potremmo citare a supporto della ricerca di base, dovrebbe già apparire evidente che dubitare oggi dell'utilità di una ricerca senza immediate applicazioni pratiche significa non comprendere l'enorme valore economico e la ricaduta sulla società della scienza di base e come le scoperte scientifiche

siano il seme dello sviluppo tecnologico. Il processo con il quale questo seme porta i suoi frutti è complesso e talvolta lento, ma le ricadute sociali ed economiche sono di portata potenzialmente enorme. Il mondo come lo conosciamo oggi sarebbe impensabile senza la ricerca fondamentale avvenuta nell'ultimo secolo, e lo sviluppo tecnologico da essa derivato. Analogamente, la civiltà umana tra un secolo è inimmaginabile con solo le conoscenze odierne, ma sarà formata da quanto e come investiamo oggi nella ricerca: aumentare la conoscenza dell'uomo è, da sempre, il migliore investimento possibile.

Le domande fondamentali riguardo la realtà che ci circonda, e che hanno guidato lo sviluppo umano, sono ovviamente cambiate anch'esse con il progresso della conoscenza e della tecnologia, diventando sempre più articolate e profonde. I principali interrogativi di oggi riguardano quegli aspetti della realtà che sono più difficilmente accessibili, come lo studio della struttura più intima della materia o la storia e il comportamento dell'Universo. Questi due estremi, l'infinitamente piccolo e l'infinitamente grande, sono spesso collegati da problematiche comuni, il che rende il loro studio ancora più affascinante: quali sono i costituenti elementari della materia e con quali tipi di forze interagiscono tra di loro? Perché l'Universo è come lo osserviamo? Come si è formato? Ci sono forze e materia ad oggi ancora sconosciuti? La fisica dell'infinitamente piccolo e dell'infinitamente grande racchiude molti dei misteri che sono all'origine dei meccanismi che regolano la nostra realtà, e il denominatore comune di queste domande fondamentali è il fatto che siano spostate a scale di distanza sempre più lontane rispetto a quelle di cui abbiamo quotidiana percezione.

Questo fatto, estremamente interessante per sé, è denso di conseguenze ed è utile cercare di quantificarlo. Se la distanza tipica di cui abbiamo percezione diretta è dell'ordine del metro per gli oggetti che possiamo maneggiare e dell'ordine del millimetro per gli oggetti che possiamo vedere a occhio nudo, investigare oggi la struttura della materia significa essere capaci di studiare distanze circa 15 ordini di grandezza più piccole (ossia un milionesimo di un miliardesimo di volte), mentre lo studio del nostro universo richiede di investigare regioni di miliardi di anni luce, 25 ordini di grandezza (ossia dieci milioni di miliardi di miliardi di volte) più grandi di un metro.

È proprio questa grande lontananza delle scale di distanze che si vogliono studiare l'origine di quello che viene definito come "gigantismo" nelle scienze fondamentali moderne, e che cercheremo di discutere con qualche dettaglio.

Questo concetto è illustrato graficamente in Figura 1, dove la grandezza degli apparati di misura

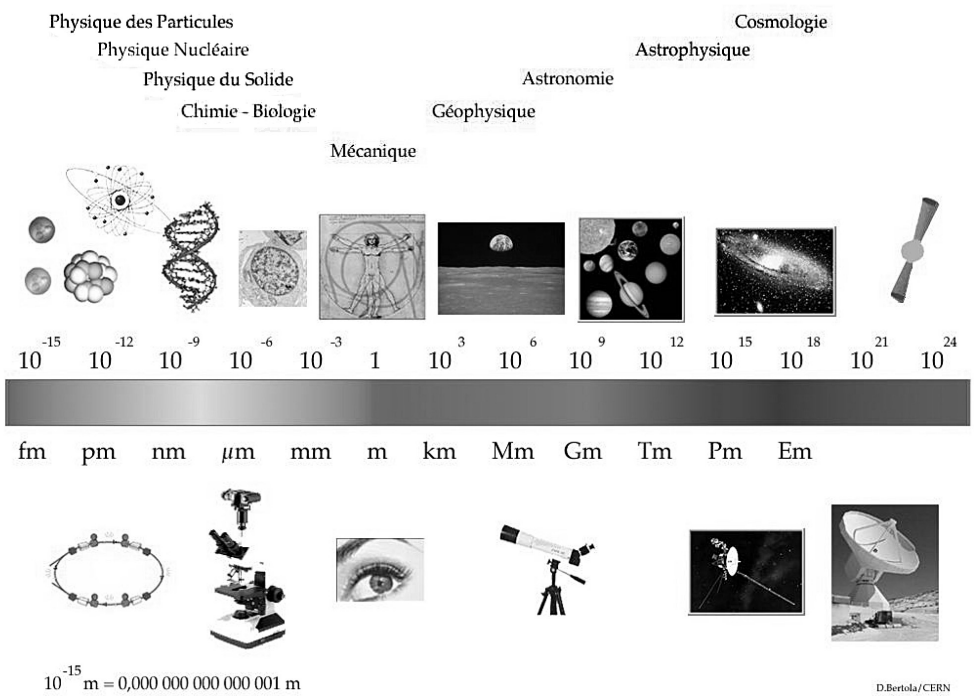

Fig. 1. La Big Science e le scale di distanza.

è messa in relazione con le distanze in gioco per alcuni esempi specifici in fisica delle particelle e in fisica del cosmo che discuteremo brevemente nel seguito. Per grandissime e piccolissime distanze si ha bisogno di apparecchiature sempre più sofisticate. Si parla spesso di "*Big Science*", ad indicare scienze che necessitano di apparecchiature così grandi e complesse d'aver bisogno non solo del coinvolgimento di grandi gruppi di scienziati e tecnici per farle funzionare, ma anche di finanziamenti così importanti da dovere essere condivisi tra più nazioni.

La necessità della *Big Science* si può spiegare in modo facilmente comprensibile per la fisica dell'infinitamente piccolo utilizzando un'analogia con l'ottica. L'occhio umano percepisce gli oggetti "rilevando" la luce da essi riflessa. Esso può risolvere particolari ad una distanza superiore o confrontabile con la lunghezza d'onda della luce incidente. Quando si vuole andare a distanze più piccole di quelle permesse dalle lunghezze d'onda della luce nel visibile, occorre quindi usare una sorgente di radiazione elettromagnetica a più alta energia (cioè a più piccola lunghezza d'onda, come per esempio i raggi X), e sostituire l'occhio umano con macchine sensibili a quel tipo di radiazione. Se si suppone di spingere lo studio fino a distanze confrontabili con le dimensioni di un atomo, o di una sua particella costituente, è la meccanica quantistica a suggerire di usare altre particelle come sonde. Infatti, secondo la meccanica quantistica, ogni particella si comporta, a brevissime distanze, come un'onda la cui lunghezza è inversamente proporzionale alla sua energia (come per la luce). Quindi più alta l'energia delle particelle incidenti su un bersaglio del quale si vuole studiare la struttura, più piccoli i dettagli ai quali si sarà sensibili quando si andrà a rilevare le particelle prodotte dall'urto. Questo è il principio fisico di base per comprendere l'importanza degli acceleratori di particelle visti come grandi microscopi per lo studio delle piccolissime distanze. Sfortunatamente, accelerare particelle a grandi energie è molto costoso e richiede macchinari di dimensioni sempre più grandi che siano in grado di immagazzinarle e farle scontrare tra di loro, o contro un bersaglio fisso. I moderni acceleratori al *CERN* e al *Tevatron*, negli Stati Uniti, permettono di immagazzinare particelle mantenendole su orbite fisse mentre vengono accelerate. Esse sono raggruppate in fasci, che hanno dimensioni trasversali tipiche della sezione di un capello, accelerati fino a velocità prossime a quelle della luce. Gli acceleratori circolari permettono di fare avvenire centinaia di milioni di collisioni al secondo ad energie formidabili. Per prendere l'esempio dell'acceleratore *LHC*, durante ognuna di queste collisioni si possono generare temperature, per una brevissima frazione di secondo, anche miliardi di volte superiori alla temperatura del centro del Sole. Per questo motivo, sebbene la fisica delle particelle sugli acceleratori viene spesso indicata con il nome di fisica delle alte energie (o *High Energy Physics*) sarebbe più corretto chiamarla fisica delle alte concentrazioni di energia.

Proseguendo nell'analogia con l'ottica, è chiaro che, in un esperimento di fisica delle alte energie, il ruolo degli occhi umani deve essere preso da rivelatori in grado di poter rilevare le particelle prodotte nelle collisioni. Questi devono avere l'abilità di potere osservare particelle note o ignote, prodotte grazie alla conversione della grande energia disponibile in massa, e particelle stabili o instabili, in quest'ultimo caso ricostruendole dai loro prodotti di decadimento. Lo scopo di un rivelatore nel punto di collisione delle particelle consiste quindi nel memorizzare, come in una fotografia gigante, l'evento che si è prodotto, per poterlo poi studiare in dettaglio. Con una grande energia a disposizione vengono prodotte particelle molto veloci, per le quali sono necessari rivelatori sempre

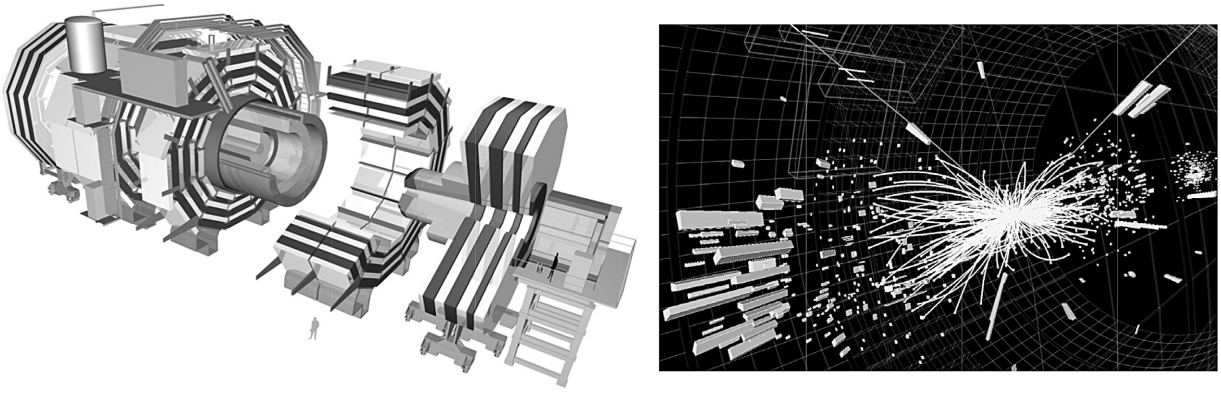

Fig. 2. L'apparato CMS al LHC e un suo evento.

più grandi per contenerle e studiarle. Rivelatori come *ATLAS* o *CMS* al *LHC* (Figura 2), che pesano più di diecimila tonnellate e hanno dimensioni di svariate decine di metri, possono essere quindi paragonati a macchine fotografiche gigantesche capaci di prendere una istantanea con una risoluzione di 75 milioni di pixel per ben 40 milioni di volte al secondo. Una di queste "fotografie" è mostrata in Figura 2. Incidentalmente, volumi di dati simili richiedono anche una rapidissima frequenza di trasferimento e di elaborazione che hanno comportato lo sviluppo di tecniche specifiche riguardo la distribuzione di dati e della loro analisi e che sono ora utilizzati in altri aspetti delle scienze applicate.

Sebbene ci si concentri, in questo articolo, sulle comunità della fisica delle alte energie al *LHC*, e senza dimenticare che altri acceleratori di grandi dimensioni sono stati operati al *CERN* come in altri laboratori, vi sono molti altri esempi nella fisica moderna in cui i grandi apparati della *Big Science* sono necessari. Per esempio, l'osservazione del cosmo implica la costruzione di grandi strutture già a livello della superficie terrestre, quali i radiotelescopi di dimensioni di centinaia di metri o strutture di antenne replicate su superfici di centinaia di chilometri quadrati. Il loro scopo è quello di potere osservare gli oggetti più lontani del nostro universo tramite la rivelazione della radiazione elettromagnetica da loro emessi. Una mappatura dettagliata del cielo si effettua poi direttamente con rivelatori in orbita, per non essere contaminati dai fenomeni di assorbimento e rifrazione dovuti alla presenza dell'atmosfera terrestre.

Un altro esempio di estrema attualità è rappresentato dalla ricerca di onde gravitazionali, che richiedono precisioni elevatissime per rivelare un segnale di distorsione dello spazio-tempo che viaggia alla velocità della luce. Questi esperimenti si basano sul principio di interferometria e richiedono enormi distanze: due interferometri di 4 Km costruiti a 3000 Km di distanza negli Stati Uniti sono stati capaci recentemente di mettere in evidenza un inequivocabile segnale di presenza di onde gravitazionali che hanno raggiunto la Terra e che hanno avuto origine provenienti dalla fusione di due buchi neri avvenuta 1.3 miliardi di anni fa.

Questi esempi testimoniano chiaramente di quanto siano necessarie grandi energie e grandi dimensioni ogni volta che si vogliano studiare fenomeni ad una scala molto piccola o ad una scala molto grande. Qualora questi fenomeni, sia a causa dell'enormità delle distanze o della debolezza delle interazioni che si studiano, portano a fenomeni rari, c'è un'altra forma di gigantismo che si manifesta, ossia quella delle grandi scale di tempi necessarie per portare a termine un'osservazione convincente. Si potrebbe riassumere dicendo che il gigantismo della scienza fondamentale non è nient'altro che la conseguenza di quanto la vita umana sulla Terra sia limitata, in spazio e in tempo, rispetto alla realtà dell'Universo.

Nel seguito di questo articolo verranno esaminati soprattutto gli aspetti organizzativi legati agli esperimenti di ultima generazione alla macchina *LHC* del *CERN* di Ginevra, esperimenti nei quali gli autori sono attivamente coinvolti.

I grandi laboratori, i numeri delle grandi Collaborazioni i tempi degli esperimenti

L'apparizione della *Big Science* nell'ambito della ricerca fondamentale ha implicato un cambiamento importante dell'organizzazione della ricerca scientifica, delle infrastrutture all'interno delle quali la ricerca viene portata avanti, del modo in cui la scienza e la ricerca scientifica viene realizzata. La crescente complessità della ricerca scientifica ha portato nel corso degli ultimi decenni ad una corrispondente crescita degli investimenti in Ricerca e Sviluppo (R&D). I finanziamenti destinati alla ricerca scientifica, espressi come percentuale sul prodotto interno lordo, dal 1980 fino ad oggi sono mostrati nella Figura 3 con alcuni paesi o gruppi di paesi (*OECD Total*) messi in evidenza. Gli investimenti in ricerca sono aumentati con lenta continuità passando, come esempio, da 1.7% al 2.4% per i paesi OECD[i] e dal 2.2 al 2.7% nel caso degli Stati Uniti. Ma la crescita è ancora più impressionante se la variazione viene data in valore assoluto, tenendo in conto l'aumento del prodotto interno lordo: i paesi OECD sono passati da 0.36 a 1.10 Miliardi di dollari americani mentre gli Stati Uniti sono passati da 0.15 a 0.43 Miliardi di dollari americani. Corrispondentemente il numero di ricercatori è passato da 4.3 a 7.8 per 10000 abitanti dei paesi OECD e da 5.3 a 8.7 per 10000 abitanti negli Stati Uniti nello stesso periodo di tempo.

Per relativizzare queste cifre in un contesto più ampio, in Tabella 1 vengono riassunti i costi di alcune iniziative di carattere scientifico che sono avvenute nel corso degli ultimi 80 anni circa, specificando i costi totali e i costi per anno. Il confronto mette immediatamente in prospettiva quanto gli investimenti in ricerca fondamentale siano poco confrontabili con altri che, sebbene coinvolgano tecnologie di punta, sono realizzati per applicazioni belliche. In particolare l'ultima linea riporta gli investimenti in ricerca e produzione applicata ai caccia da bombardamento "*Rafales*" francesi, ad oggi la punta dell'aviazione militare mondiale. Il paragone non solo non lascia dubbi

Tab. 1. Costi di grandi progetti scientifici confrontati con i costi di fabbricazione di aerei da guerra moderni.

Project	Total cost	Cost per year
Manhattan Project	24 billion $(*)	5 billion $
The Space Projects(1957-1975)	100 billion $(*)	5.5 billion $(*)
International Space Station (>30 years)	100 billion €(*)	2.5 billion €
Hubble Space Telescope (>20 years)	10 billion $(*)	0.5 billion $(*)
LHC (>10 years)	5 billion €(*)	0.5 billion €(*)
Progetto caccia "Rafales"(2010-2014*)	220 billion €	45 billion €

(*) *Fonte*: https://fr.wikipedia.org/wiki/Dassault_Rafale#Co.C3.BBt_du_programme_Rafale.

sull'enorme disparità di investimenti, ma è ancora più impietoso quando si riflette sul fatto che l'opera di ricerca fondamentale al *CERN* è frutto di una collaborazione mondiale, mentre l'esempio riportato deriva dagli investimenti di un solo paese.

La crescita delle comunità scientifiche che si raccolgono attorno a questi grandi esperimenti di *Big Science* ha portato ad una indiscutibile crescita a livello culturale, ma ha anche, inevitabilmente, richiesto nuovi meccanismi per la gestione dell'informazione e di coordinamento mai conosciuti prima. È cambiato il modo di fare ricerca, dalla discussione attorno ad un tavolo ad una organizzazione strutturata, codificata e talvolta regolata da accordi internazionali. E cambia il modo in cui la creatività del singolo ricercatore può esprimersi in una realtà complessa che per funzionare richiede un'organizzazione rigida. Questa strutturazione disciplinata di una grande comunità ha rappresentato in se stessa una sfida che i ricercatori hanno dovuto affrontare e risolvere attraverso l'esperienza di pochi decenni, diversamente da altre comunità tecniche e scientifiche di natura industriale o militare in cui le strutture organizzative sono state affinate ed ottimizzate nel corso di secoli di esperienza. La parte più

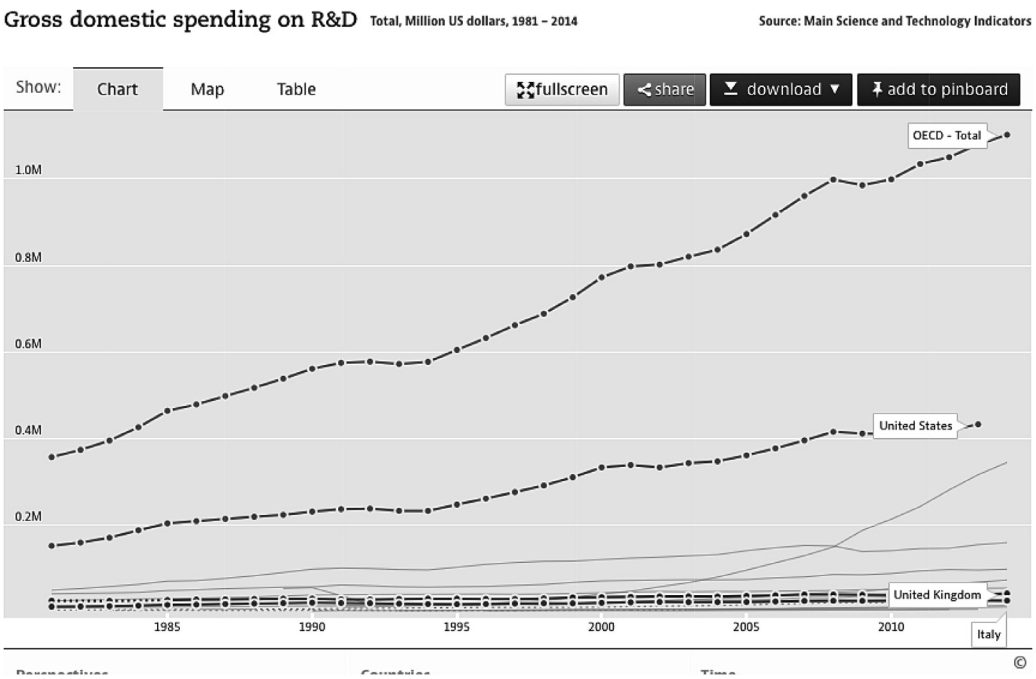

Fig. 3. Frazione di prodotto interno lordo, PIL, investito in ricerca in alcuni paesi o gruppi di paesi dal 1980 ad oggi.

difficile di questa sfida è forse rappresentata dal fatto che il lavoro di ricerca, motivato alla base da iniziative spontanee e da un investimento personale volontario, debba essere codificato e canalizzato in modo da coprire tutti quegli aspetti necessari al funzionamento di macchine di una complessità incredibile.

Per discutere i dettagli dell'organizzazione di una di queste grandi strutture prenderemo come esempio quello di due delle grandi collaborazioni al *LHC*, come *ATLAS*[2] o *CMS*. Gli addetti ai lavori definiscono spesso queste grandi imprese come "esperimenti", con un'accezione che ha un significato molto diverso da quello della vita comune. Un esperimento non è più una singola misura di fisica, bensì l'apparato stesso, e va piuttosto inteso come strumento generalista che consenta, nel caso del *LHC*, qualunque tipo di studio di fisica delle particelle elementari e che sia sensibile a fenomeni fisici attesi ma anche a quelli che a priori non possono essere previsti.

Un colpo d'occhio sui numeri delle collaborazioni di fisica delle alte energie è mostrato in Tabella 2. Nella tabella sono mostrati, con una scelta totalmente arbitraria, il numero di partecipanti e di istituti coinvolti in esperimenti degli ultimi 50 anni. La Tabella copre quasi 5 decenni di storia e mostra come il gigantismo di queste collaborazioni si sia sviluppato con continuità nel corso del tempo. L'enorme cambiamento si apprezza semplicemente riflettendo sul fatto che il numero di persone che contribuivano ad un esperimento negli anni 70 corrisponde oggi al numero di nazioni coinvolte.

Per apprezzare come la creazione di simili imprese si possa realizzare nel tempo, è interessante descrivere brevemente i documenti formali che precedono e accompagnano la nascita di una grande collaborazione come *ATLAS* o *CMS* al *CERN*. Il primo passo è la redazione di una "*Letter of Intent*", indicata con *LoI*, con la quale un gruppo di ricercatori manifesta l'intenzione di dar vita ad una comunità per la costruzione di un nuovo esperimento. Nel caso di *ATLAS* e *CMS* la *LoI* è sottoposta ad un comitato *CERN*, definito dall'acronimo *LHCC (LHC Experiment Committee)*, incaricato di selezionare gli esperimenti da approvare e di supervisionarne poi l'evoluzione in termini di realizzazione, installazione e aggiornamento. Nel caso dell'esperimento *ATLAS* la *LoI* consiste di un documento di 120 pagine, sottomesso nel 1992, nel quale viene dettagliatamente descritta la struttura dell'esperimento, le soluzioni tecniche da adottare e una raccolta degli studi di fisica che possono essere svolti. Non ultimo, la *LoI* contiene una stima dei costi dell'esperimento ed è un documento formale con il quale rappresentanti di vari istituti e le Agenzie finanziatrici dei vari paesi si impegnano, in caso di approvazione, a finanziare il costo della costruzione e a mettere nei bilanci di previsione i costi di funzionamento per diversi anni. Il comitato *LHCC* ha scelto nel 1994 quali esperimenti approvare e le collaborazioni approvate hanno, da quella data, iniziato un lungo lavoro di sviluppo e ricerca, di prototipizzazione e di ingegnerizzazione degli esperimenti.

I documenti formali sui quali si basa l'organizzazione di queste grandi comunità scientifiche, generalmente indicati con *Memorandum of understanding (MoU)*, vengono approvati dalle istituzioni nazionali e dal laboratorio ospitante, e descrivono la suddivisione dei costi e delle responsabilità dei vari paesi partecipanti all'esperimento in maniera più dettagliata rispetto alla *LoI*. Le agenzie nazionali, oltre al sostegno economico per le spese comuni legate alla costruzione dell'esperimento, sostengono anche gli studi legati alla realizzazione in scala progressivamente più grande di prototipi di quelle parti di rivelatore che si sono impegnati a costruire. L'ultimo documento di natura tecnico-scientifica che le collaborazioni approvate devono preparare perché

Tab. 2. I numeri di collaborazioni di fisica delle alte energie.

Esperimento	Gargamelle	Charm	UA1	UA2	Delphi	Babar	ATLAS	CMS
Periodo di attività	1970-1976	1978-1984	1981-1990	1981-1990	1989-2000	1998-2008	2008 --	2008 --
Numero di fisici (studenti)	55	42	190	80	550	284	2850 (1000)	2680 (891)
Ingegneri								859
Tecnici								281
Numero di Istituti	7	5	22	9	54	88	174	182
Numero di Nazioni							38	42

sia approvato da organismi terzi è il *TDR*, acronimo per *Technical Design Report*. Questo documento descrive dettagliatamente gli aspetti tecnici e le soluzione tecnologiche usate per l'esperimento nella versione finale che si è deciso di adottare. Nel caso degli esperimenti *LHC* questo progetto dettagliato è stato sottoposto al vaglio del *LHCC* nel 1998, 6 anni dopo la *LoI*. Nel caso dell'esperimento *ATLAS* il documento *TDR* consiste di circa 1000 pagine, ed è stato firmato da circa 1800 fisici.

Il costo della costruzione e dello sfruttamento di un esperimento di queste dimensioni è tale che la durata dell'esperimento deve inevitabilmente prolungarsi per un periodo di molti anni. Questo implica che la scelta di alcune soluzioni tecniche viene posposta fino all'ultimo momento possibile per evitare che tecnologie scelte troppo prematuramente siano già obsolete nella fase iniziale dell'esperimento.

La costruzione degli esperimenti di fisica delle alte energie ha aspetti totalmente unici. La parte di sviluppo di una tecnologia e prototipizzazione dei rivelatori avviene negli istituti che fanno parte della collaborazione: non esistendo rivelatori già disponibili sul mercato tutto viene sviluppato, spesso in collaborazione con industrie *high-tech*, dai ricercatori e tecnologi dell'esperimento. La parte successiva agli studi di ricerca e sviluppo, cioè quella della produzione in serie, è condivisa con diverse industrie alle quali viene affidata la produzione di componenti necessarie alla realizzazione dei vari rivelatori. I test di qualità, di accettazione delle componenti, nonché l'assemblaggio del rivelatore e la certificazione del suo funzionamento dopo l'assemblaggio, vengono realizzati interamente nei laboratori di decine di istituti di ricerca e universitari e nelle grandi infrastrutture di alcuni laboratori nazionali dove disponibili. Va anche posto l'accento che l'installazione di questi esperimenti è così complessa (della durata di alcuni anni) che, una volta assemblato, l'esperimento diventa di fatto inaccessibile ed è impensabile intervenire in tempi brevi per riparare eventuali malfunzionamenti che dovessero manifestarsi durante la fase di operazione. Siccome ogni intervento richiede lunghi tempi di accesso, la macchina acceleratrice, sulla quale gli esperimenti sono installati, programma, con anticipo di anni, dei periodi di interruzione di attività durante i quali si possa intervenire per eventuali riparazioni, manutenzioni o aggiornamenti della macchina stessa e degli esperimenti. Il periodo di funzionamento normale dell'acceleratore, della durata di circa 8 mesi per anno solare e coincidenti con i mesi più caldi per minimizzare i consumi di potenza elettrica, si alterna a periodi di sospensione di pochi mesi nei quali possono invece essere realizzati alcuni interventi minori che non prevedono l'apertura dell'esperimento ma solo accessi limitati alle parti più esterne. Nella Figura 4 viene mostrato, in maniera semplificata, il *cursus* temporale di un esperimento al *LHC*. Si estende su molti decenni e comprende diverse fasi caratteristiche, ciascuna lunga circa una decina di anni: dieci anni per concepirlo, dieci anni per costruirlo, una presa dati prevista di circa venti anni con interruzioni di due o tre anni per interventi di manutenzione e/o aggiornamento del rivelatore. Questa stessa tabella di marcia deve essere anch'essa progettata, tipicamente, con decine di anni di anticipo.

Una riflessione immediata suggerita dalla Figura 4 è che la vita di un esperimento si estende su così tanti anni che, oramai, un ricercatore potrebbe svolgere tutta la sua carriera all'interno di uno solo di questi esperimenti. Quando questo succede, ciò che accade in pratica è che, nel corso degli anni, il profilo e l'attività di una persona cambia in modo tale da coprire interessi e necessità continuamente diverse, anche se sempre applicate al medesimo esperimento.

I grandi numeri delle moderne collaborazioni hanno come immediato riflesso un corrispondente costo. Come abbiamo descritto, per queste collaborazioni a livello mondiale, tutto avviene attraverso accordi internazionali che vengono firmati tra le agenzie finanziatrici dei vari paesi e il paese o l'istituzione che ospita l'esperimento o l'infrastruttura di ricerca. Nel

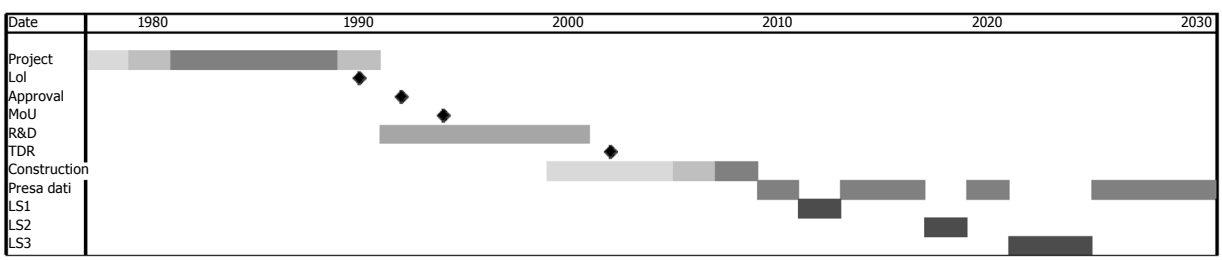

Fig. 4. La scala di tempi di un esperimento al LHC.

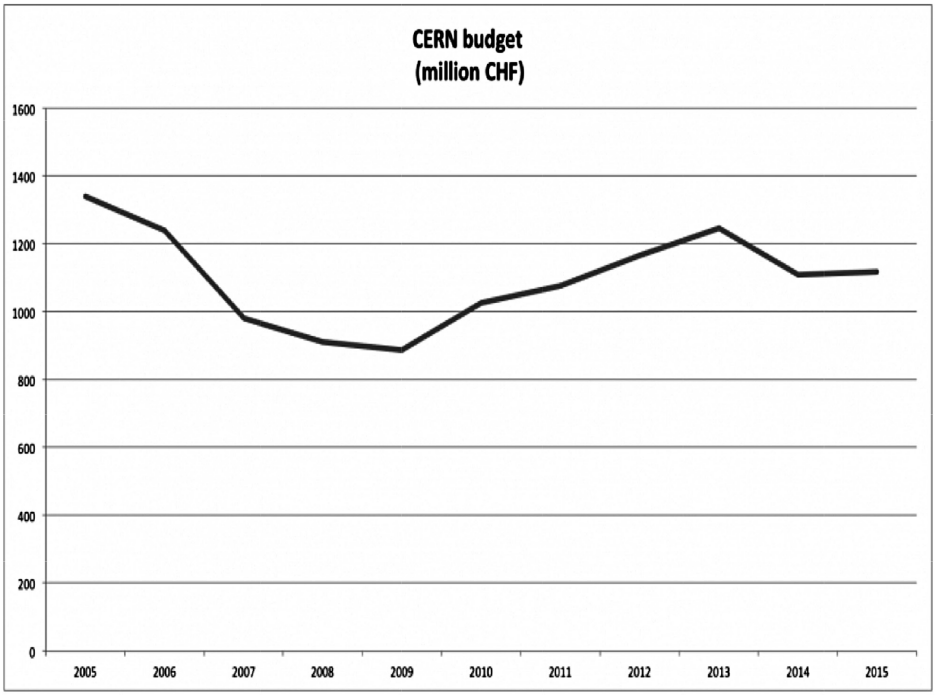

Fig. 5. Bilancio del CERN negli anni 2005-2015.

caso degli esperimenti al *LHC* l'istituzione ospitante è ovviamente il *CERN*.

Il bilancio del *CERN* è mostrato nella Figura 5 per gli anni 200-2015 in milioni di franchi svizzeri (MCHF). L'andamento mostra importanti variazioni nel corso degli anni che riflettono l'impegno del *CERN* nella costruzione del *LHC* tra un minimo di 900 MCHF nel 2009 e 1400 MCHF nel 2005 nel pieno della costruzione della macchina acceleratrice. Il costo totale per la costruzione della macchina, integrato su molti anni, è stato pari a 4980 MCHF di cui ¼ per personale e ¾ per materiale. La parte del costo investito in materiale è stato speso in commesse ad industrie *high-tech*, quasi sempre coinvolte nello sviluppo iniziale delle tecnologie usate per l'acceleratore e per gli esperimenti. Si fa molta attenzione a mantenere un corretto bilancio tra i finanziamenti di un dato paese e le commesse che ritornano in quel paese. Quello che una agenzia nazionale investe torna con ottima approssimazione nelle industrie avanzate del paese. Va anche considerato il costo del funzionamento della macchina acceleratrice *LHC* che è pari a 1100 MCHF per anno negli anni 2009-2012, corrispondente ad una frazione di circa l'80% del budget totale del *CERN*. Nel periodo di interruzione della macchina il costo dei lavori di manutenzione di tutto il complesso di acceleratori del *CERN* è stato pari a circa 150 MCHF.

Il *CERN* ha anche contribuito, come istituto partecipante alle collaborazioni del *LHC*, alla costruzione di parte dei rivelatori dei diversi esperimenti con una somma pari a 1360 MCHF, pari a circa il 20% del costo totale. Ha inoltre partecipato alla infrastruttura di calcolo con 168 MCHF. Il totale dell'investimento del *CERN* nella costruzione del *LHC* è stata pari a un totale di 6500 MCHF quando vengono incluse anche le spese per le infrastrutture. Le spese totali dell'esperimento *CMS* previste per i costi di mantenimento anno 2016 sono pari a 18,9 MCHF, cifra dello stesso ordine di grandezza di *ATLAS*.

L'organismo fondamentale per seguire le spese associate a questi giganteschi rivelatori è il *Resources Review Board (RRB)*, un comitato del *CERN* formato da rappresentanti delle agenzie finanziatrici nazionali, del *CERN* stesso e delle collaborazioni ed è coordinato dal Direttore della Ricerca del *CERN*. Questo organismo è particolarmente importante ed ha un mandato che evolve di pari passo con le diverse fasi degli esperimenti e comprende la discussione e l'approvazione del *MoU* presentato dagli esperimenti (nella fase iniziale di una collaborazione), il monitoraggio degli esperimenti e del modo in cui le risorse economiche messe a disposizione dalle Agenzie vengono spese, tanto per spese eccezionali degli esperimenti quanto per quelle di manutenzione ordinaria. Gli esperimenti sono tenuti a presentare rapporti a questo comitato ed hanno bisogno dell'approvazione

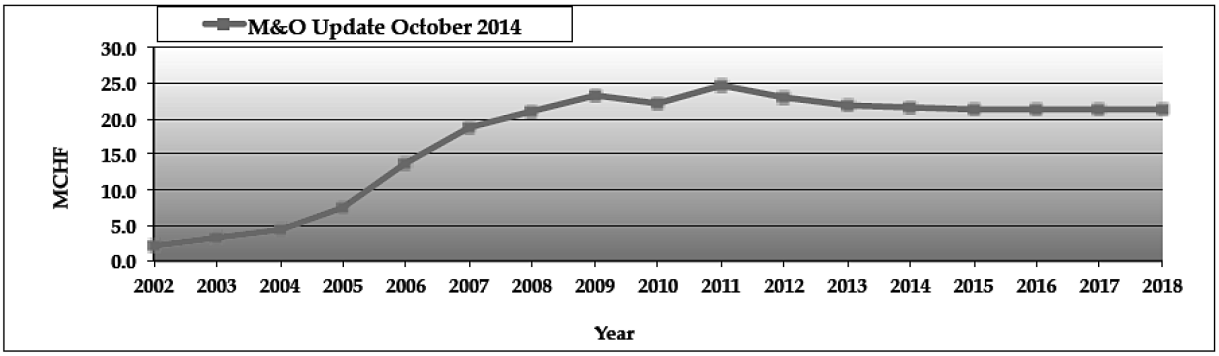

Fig. 6. Spese di manutenzione ordinarie dell'esperimento ATLAS in MCHF per gli anni dal 2002 al 2018.

e della ratifica di praticamente tutti gli aspetti della vita di un esperimento.

Le spese di manutenzione ordinaria di un esperimento sono particolarmente importanti e vengono finanziate dalle agenzie finanziatrici dell'esperimento in proporzione al numero di firmatari (studenti, Ph.D. esclusi) di una certa nazionalità. Queste spese, dette *Maintenance and Operation (M&O)*, sono divise in due categorie, tipo A e B. Nella prima categoria vengono incluse le spese di carattere generale e che non possono essere ricondotte ad un singolo rivelatore: spese legate alla sicurezza dell'esperimento, ai costi del sistema di raffreddamento (aspetto fondamentale negli esperimenti moderni), alle infrastrutture di calcolo, al mantenimento di laboratori, al consumo di energia, ai contratti temporanei legati ad attività specifiche non coperte dagli istituti nazionali. La seconda categoria di costi ordinari è invece legata al singolo rivelatore dell'esperimento. La Figura 6 mostra l'evoluzione del M&O negli anni dal 2002 al 2018 dell'esperimento *ATLAS*. Le cifre sono certamente importanti, nel 2015 la somma delle spese di tipo A e di tipo B ammonta a 21.3 MCHF totali ripartiti in misura di 16.8 MCHF e 4.5 MCHF per le spese di tipo A e B rispettivamente. Queste sono ripartite tra i firmatari delle pubblicazioni dell'esperimento (circa 1800 quando non sono inclusi gli studenti) e corrispondono a un costo di circa 10 KCHF per ogni firmatario. L'Italia contribuisce al circa il 10% delle spese totali di *M&O*. Benché queste spese siano in assoluto molto importanti, esse rappresentano percentualmente una cifra molto piccola rispetto al costo totale dell'esperimento.

Strutture di coordinamento: approccio storico di autogestione di un organismo internazionale

Nelle collaborazioni scientifiche in fisica fondamentale degli anni 70 la struttura organizzativa era assai limitata. Sebbene il responsabile di un esperimento fosse chiaramente identificato, non v'erano ancora regole e strutture chiare per la nomina ad altre responsabilità o per la durata dei mandati. Le collaborazioni si riunivano poche volte all'anno, in riunioni fatte di persona e la maggior parte della vita dell'esperimento si svolgeva presso l'istituzione ospitante. Anche il lavoro di analisi dei dati, oggi totalmente delocalizzato grazie a internet e alla griglia di calcolo, era quasi totalmente concentrato nel laboratorio ospitante con risorse di calcolo negli istituti della collaborazione praticamente inesistenti.

Gli esperimenti *UA1* e *UA2* al *CERN* negli anni '80 hanno rappresentato una fase intermedia, ma il vero salto verso la *Big Science* in fisica delle particelle elementari si è registrato con le grandi collaborazioni costruite attorno all'acceleratore *LEP* di elettroni e positroni, sempre al *CERN*, attive nell'ultimo decennio dello scorso secolo. In questi esperimenti la dimensione della collaborazione raggiunge un livello tale da richiedere, per la prima volta, una forte struttura organizzativa che si concretizza in un certo numero di strutture, di corpi operativi, che vengono sommariamente mostrati nella Figura 7 per l'esperimento *DELPHI*, uno dei quattro costruiti sull'anello acceleratore del *LEP*, al quale entrambi gli autori di questo articolo hanno avuto l'onore di partecipare.

La tipica collaborazione al *LEP* rimane incentrata attorno alla figura del portavoce dell'esperimento, lo *Spokeperson*, cui fanno capo diversi corpi con funzionalità e poteri diversi. Il più importante, nonché il più rilevante politicamente, è il *Collaboration Board*, nel quale ogni istituto è presente con un delegato e all'interno del quale vengono discussi tutti gli aspetti organizzativi di alto livello e la politica scientifica dell'esperimento. Elegge lo *Spokeperson* e le figure operative più rilevanti. Lo *Spokeperson* è affiancato da una giunta esecutiva, da un pannello tecnico, da un gruppo di coordinatori dell'analisi e del *software*

dell'esperimento. La vita collettiva della collaborazione al *LEP* ruota attorno a riunioni periodiche di due tipi che si alternano con una frequenza tipica di una ogni due mesi: riunioni di collaborazione che coprono tutti gli aspetti dell'esperimento (tecnici, organizzativi, politici, e ovviamente discussione dei risultati delle analisi dei dati) e riunioni di analisi nel corso delle quali sono presentati solo risultati di vari studi di fisica. Il *Collaboration Board* si riunisce ogni settimana di collaborazione. È durante il periodo del *LEP* che internet entra prepotentemente nella vita dei ricercatori e la posta elettronica sostituisce completamente il telefono, anche se il tempo delle riunioni telematiche deve ancora arrivare. È un bel ricordo la prima riunione di collaborazione che si tenne a Delphi[3], in Grecia. La cosa nacque prima dell'approvazione da parte del *CERN* quando i primi firmatari della collaborazione, dopo aver sottoposto la proposta tecnica di esperimento al comitato del *CERN* che avrebbe dovuto sceglierne 4 dei 6 che si erano fatti avanti, decise, quasi una scommessa, che se l'esperimento fosse stato scelto si sarebbero riuniti, per assonanza, per la prima volta proprio a Delphi, in Grecia. E alcune delle riunioni si tennero, simbolicamente, nell'anfiteatro dell'oracolo. Anche il logo dell'esperimento venne deciso nel corso di una delle prime riunioni del *Collaboration Board* nel corso di una votazione. Il "delfino" vinse e rimase per sempre ad indicare la collaborazione e l'esperimento.

Mentre gli esperimenti al *LEP* erano in piena attività, nel corso degli anni 1990, si formano nuove collaborazioni attorno alla macchina acceleratrice del *CERN*, al tempo in fase di progettazione, ideata per succedere e sostituirsi al *LEP*: l'*LHC*.

Questa nuova generazione di esperimenti raggiunge dimensioni e complessità ancora più grandi e tutta la struttura organizzativa appena descritta si complica e si arricchisce. Nella Figura 8 viene mostrata l'organigramma delle strutture di coordinamento degli esperimenti *ATLAS* e *CMS*, come esempio. Seppure i ruoli fondamentali del management siano circa gli stessi che compaiono nella struttura degli esperimenti al *LEP*, il cambiamento fondamentale è che la complessità dell'apparato cambia a tutte le scale: mentre il mandato di un ruolo rimane sostanzialmente lo stesso, spesso ad una casella non corrisponde più una singola figura ma un gruppo di persone più o meno piccolo che segue quel tipo di attività.

Nuove strutture organizzative devono quindi nascere, ciascuna delle quali corrisponde ad una necessità tecnica dell'esperimento: dal complesso dei rivelatori, alla scrittura dei programmi di acquisizione dati, alla gestione dei programmi di analisi dati, ai vari studi di fisica. Cercheremo di dare un'idea

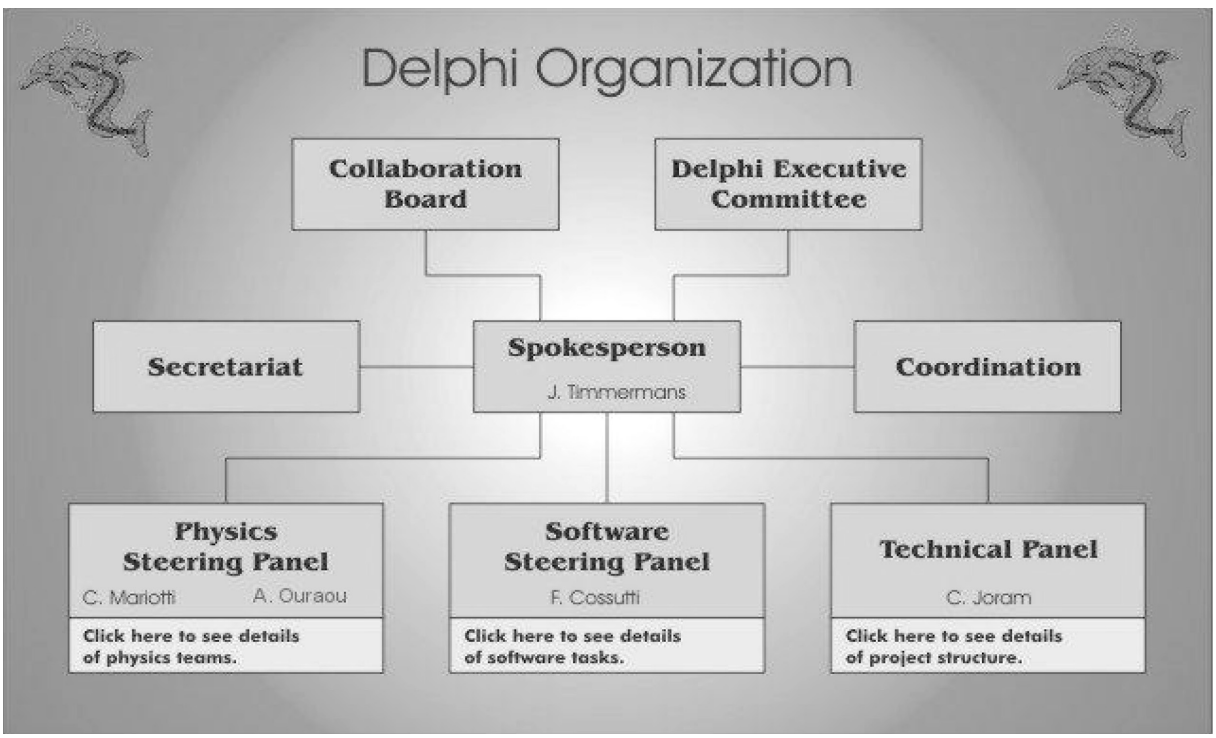

Fig. 7. La struttura organizzativa dell'esperimento DELPHI.

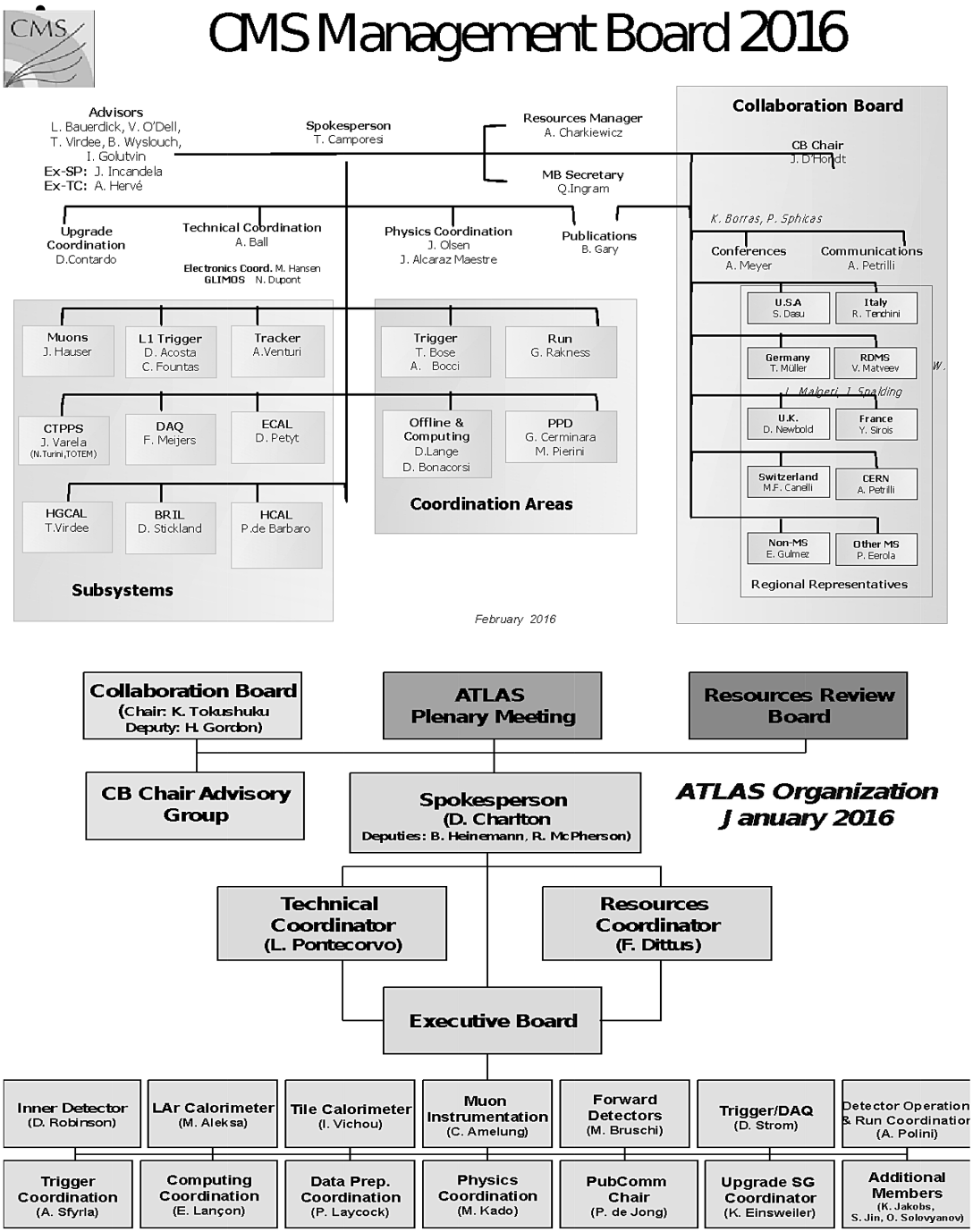

Fig. 8. Struttura organizzativa delle collaborazioni ATLAS e CMS.

sommaria della complessità racchiusa in ognuna di queste tematiche.

I rivelatori devono essere pienamente operativi in fase di presa dati e mantenuti in condizioni ottimali di funzionamento. Eventuali problematiche dovute all'invecchiamento dei componenti devono essere continuamente monitorate e la loro funzionalità, per quanto possibile, mantenuta al massimo livello. Nello stesso tempo occorre continuare una linea di sviluppo e ricerca mirata ad una futura sostituzione, parziale o completa, di un rivelatore o di una sua parte attraverso il ricorso a tecnologia più moderna di quella che è

stata usata al momento della costruzione e dell'installazione.

Vengono poi gli aspetti legati allo sviluppo del *software* necessario tanto all'acquisizione dei dati quanto sulla gestione, l'immagazzinamento e l'analisi della gigantesca mole di informazioni prodotte dall'esperimento. La parte "*on-line*" del *software* consiste nel memorizzare le "fotografie" generate delle collisioni all'interno dell'acceleratore attraverso un colloquio estremamente complesso tra i calcolatori che interfacciano le diverse parti di cui il rivelatore è composto. L'immagazzinamento di queste informazioni viene controllato da programmi molto sofisticati che sono eseguiti in tempo reale durante il funzionamento dell'acceleratore. La parte "*off-line*" riguarda invece l'elaborazione delle immagini raccolte dai singoli rivelatori per ricostruire quello che si chiama un "evento" di fisica, ciascuno dei quali rappresenta una singola collisione, per poterlo poi tradurre in quantità fisiche fruibili dai ricercatori che si occupano delle analisi dei dati. La ricostruzione di un evento si basa quindi sulla messa in corrispondenza delle informazioni provenienti da ogni singolo sotto-rivelatore di cui l'esperimento è composto.

Per ciascuna di queste fasi esistono gruppi di raccordo e coordinamento formati da diverse persone. In genere a capo di questi gruppi di lavoro, siano essi di analisi, di rivelatore, di *on-line o off-line*, c'è una persona di riferimento, un coordinatore, che viene identificato attraverso meccanismi che sono sempre basati sull'individuazione di persone riconosciute dalla comunità come dotate di altissima professionalità e competenza. Le persone sono scelte tra quelle che hanno contribuito in maniera rilevante al progresso dei lavori nel passato recente delle attività di un gruppo. Il tipo di lavoro che si richiede ai coordinatori è dettato dalla necessità di seguire attività talmente diversificate e complesse da lasciare poco spazio alle funzioni che prima poteva svolgere in prima persona. La capacità di relazione, di ascoltare e capire il dialogo scientifico e tecnico che avviene all'interno dei gruppi è molto importante nel lavoro del coordinatore e una parte importante del suo tempo va nella gestione di risorse umane e nella diffusione delle informazioni. Il meccanismo di scelta della persona dipende molto dalla importanza del ruolo e si passa da forme di cooptazione, per attività molto specialistiche, a meccanismi basati su nomine per ruoli più importanti. In questo secondo caso, la scelta avviene attraverso indicazioni inviate da parte della comunità di riferimento ad un comitato di persone preposto alla scelta finale, che presenterà la sua proposta al *Collaboration Board* per essere approvata o, eventualmente, ridiscussa. Il lavoro di indagine e sondaggio presso le comunità di riferimento viene svolto o direttamente dal *management* dell'esperimento o da un gruppo di persone espressamente delegato, il *search committee*. Spesso, contrariamente a quello che avviene in altre organizzazioni scientifiche, l'età delle persone alle quali è affidato un lavoro di coordinamento non ha un grande peso nella scelta. Non è raro trovare gruppi di lavoro dove i responsabili sono significativamente più giovani di molti degli altri membri del gruppo senza che questo abbia impatto sulla funzionalità del gruppo, o intacchi lo spirito di collaborazione.

Il management di un esperimento al *LHC* è strutturato in organismi con ruoli di due tipi diversi: di indirizzo di politica scientifica ed esecutivo. La componente più importante del primo gruppo di organismi è il *Collaboration Board*, che ha esattamente le stesse funzioni che aveva al *LEP*. Il Collaboration Board si riunisce nelle settimane specificatamente dedicate a riunioni plenarie della collaborazione, tipicamente 4 volte all'anno, ed è la struttura con il maggior potere politico dell'esperimento.

Altre strutture operative affiancano lo *Spokeperson*: il *Technical Coordination* che ha la supervisione degli aspetti tecnici di tutto l'esperimento, il *Resource Coordination* con il controllo e monitoraggio degli aspetti economici, il *Physics Coordination* che soprassiede agli aspetti legati ai risultati di fisica. In ultimo, e probabilmente il vero cuore della collaborazione, l'insieme dei sottosistemi: ogni rivelatore dell'esperimento corrisponde a una comunità con una struttura interna basata su *Detector Institute Board* con la responsabilità di prendere decisioni sulle maggiori scelte tecniche e sulla suddivisione delle risorse e delle responsabilità. Ogni sottosistema è anch'esso coordinato e rappresentato da un *Project Leader*. Il raccordo tra il *management* e tutte le strutture brevemente descritte è *l'Executive Board* nel quale sono rappresentati tutti gli organismi della Collaborazione.

Come si capisce da questa breve descrizione, il coordinamento di un esperimento di fisica delle alte energie è complesso al punto di non avere nulla da invidiare all'organizzazione di una industria, con la complicazione di essere una cooperazione su scala mondiale e non locale, il che aggiunge una complessità logistica decisamente maggiore, soprattutto per quanto riguarda la gestione delle riunioni e la circolazione di informazioni.

Se agli albori della fisica delle particelle le riunioni avvenivano di persona in sale riunioni di modeste dimensioni, con le collaborazioni di oggi che sono composte da migliaia di persone, ciò non è naturalmente più possibile. Questo problema è stato ben risolto sfruttando l'aumento rapidissimo delle risorse di calcolo e di connessione a distanza, il che ha reso pos-

sibile il ricorso a riunioni telematiche in modo diffuso. La quasi totalità delle riunioni delle collaborazioni *ATLAS* e *CMS* avviene oramai con l'ausilio di computer connessi in rete e programmi (commerciali, ma scelti dal *CERN* che ne sostiene i costi e ne controlla il funzionamento) che consentono il collegamento e l'interazione contemporanea di centinaia di persone alla medesima riunione. L'agenda della riunione è caricata su una pagina internet dedicata allo scopo, così come ogni intervento dei diversi oratori: la presentazione viene proiettata in tempo reale (tipicamente dal *CERN*, dove vi sono il più grande numero di presenti), insieme al video della sala di riunioni. Le persone connesse, spesso più numerose di coloro che si trovano al *CERN*, possono intervenire in ogni momento nella discussione, porre domande o, eventualmente, presentare materiale a loro volta.

Sebbene il contatto umano in persona non possa essere sostituibile, questo cambiamento radicale del modo di organizzare riunioni ha segnato un grande passo avanti nell'efficienza logistica delle grandi collaborazioni, evitando in particolare molti viaggi che sarebbero altrimenti stati necessari. È forse la semplicità di organizzare una riunione che permette oggi a queste collaborazioni di avere svariate riunioni a cadenza giornaliera: sebbene ciò rappresenti un impegno costante dei partecipanti e dei responsabili di gruppo, permette di avere un livello di coinvolgimento e di sintonia altrimenti impossibile da raggiungere in un esperimento di *Big Science*. Un aspetto interessante delle riunioni di collaborazioni su scala mondiale è che diventa spesso difficile l'individuazione di possibili orari per le riunioni: non è raro dovere coinvolgere nella discussione persone che stanno agli antipodi (per esempio Europa, Stati Uniti, Cina e Australia) ed in questi casi è d'obbligo scegliere un orario che minimizzi il disagio e tenga in conto i diversi fusi orari. Qualcuno dovrà comunque stare alzato fino alla tarda serata o alzarsi all'alba.

L'organizzazione della produzione scientifica degli esperimenti al LHC

La ragion d'essere della ricerca fondamentale è di produrre conoscenza, e di documentarla in modo tale che sia disponibile a tutti. Non esistono infatti diritti di autore per una scoperta scientifica, e l'accesso alla conoscenza deve rimanere aperto a chiunque vi sia interessato. I risultati di un esperimento come quelli al *LHC* sono pubblicati su riviste internazionali (molte delle quali oramai *on-line*) dopo un attentissimo vaglio da parte delle stesse collaborazioni. In quanto segue ci interesseremo alla descrizione del percorso di uno studio in uno di questi grandi esperimenti, dalla sua concezione alla sua pubblicazione, indicando in breve i complessi sistemi di revisione interna che le collaborazioni al LHC hanno dovuto e saputo mettere in atto.

Per poterlo fare occorre innanzitutto illustrare come il lavoro pratico di analisi dei dati finalizzato al raggiungimento di un certo risultato di fisica viene organizzato in queste grandi collaborazioni. Ognuna delle tematiche di ricerca è organizzata a sua volta in gruppi di lavoro che raccolgono studenti e esperti del dominio di corrispondenza che appartengono a svariate istituzioni internazionali, e sono organizzati da responsabili nominati dal *management* e con il consenso delle varie istanze nazionali, come discusso nella sezione precedente. È all'interno di questi gruppi di lavoro, che possono facilmente raccogliere centinaia di fisici, che gli studi sono ideati, sviluppati e messi in pratica: i dati resi disponibili dall'esperimento sono quindi internamente analizzati alla luce dello studio che si vuole fare. Una specifica analisi coinvolge tipicamente una o qualche istituzione di ricerca, con un contributo che varia da poche persone a qualche decina di persone, e solitamente associata ad uno o più lavori di tesi di dottorato. Per tematiche particolarmente importanti, come la ricerca di un bosone di *Higgs* o di segnali di nuova fisica, è comune bene avere diversi gruppi di studio che lavorano in parallelo sullo stesso soggetto, ma con tecniche differenti. Questa è spesso una decisione strategica basata sul fatto che una scoperta in fisica necessita sempre di una verifica reciproca dei risultati, ma presenta anche il vantaggio di potere scegliere il risultato più convincente al momento della pubblicazione.

Il gruppo di lavoro, tramite i suoi organizzatori, decide quando uno studio è sufficientemente maturo ed interessante ed i suoi risultati ben documentati in una prima bozza di articolo. Questo viene quindi sottoposto al vaglio di tutti i membri della collaborazione in una procedura a più livelli di revisione. Dapprima una commissione di esperti esterni al gruppo di lavoro esamina con estremo dettaglio i contenuti della bozza di documento, intervenendo spesso in modo attivo alla sua messa a punto e interagendo con gli autori per rendere il risultato più chiaro e convincente, qualora ve ne sia necessità. Se il lavoro passa anche questa revisione viene poi fatto circolare liberamente all'interno di tutta la collaborazione. È il momento in cui uno qualsiasi dei membri può porre domande agli autori e contribuire al miglioramento dell'articolo prima che possa diventare, dopo un dettagliato controllo anche degli aspetti editoriali e stilistici, un articolo a nome della collaborazione. Sebbene non frequentemente, l'ultimo processo di revisione può ancora mettere in

discussione i risultati presentati ed, eventualmente, richiedere un controllo completo degli stessi da parte del gruppo di lavoro originale. Ognuno dei passi illustrati culmina con una o più presentazioni da parte degli autori in riunioni aperte a tutti i membri dell'esperimento perché lo studio possa essere presentato pubblicamente e apertamente discusso.

Il processo completo che porta ad una pubblicazione a partire dall'ideazione di uno studio specifico può facilmente implicare svariati mesi, se non anni, di lavoro di un gruppo. In una grande collaborazione è impensabile arrivare ad una pubblicazione su rivista prima di sei mesi dal momento in cui il processo di revisione di una analisi è iniziato. Questa è una conseguenza diretta del grande numero di fisici che contribuiscono alla revisione e della alta qualità che si cerca di raggiungere per una pubblicazione, ma può talvolta impedire l'annuncio rapido di risultati particolarmente significativi. Per questa ragione esiste, in parallelo, la possibilità di effettuare una documentazione rapida di un lavoro, che segue una procedura di revisione accelerata, anche se simile a quella appena presentata, per permettere di contribuire un risultato importante a conferenze internazionali in modo preliminare, nell'attesa di completare una vera pubblicazione con tempi più lunghi.

Questa infrastruttura di revisione, che è simile in tutte le collaborazioni sperimentali al *LHC*, cura con tale minuzia la qualità del testo, nonché del contenuto, di un articolo, da richiedere minimi aggiustamenti prima della pubblicazione effettiva su rivista.

La quantità di studi possibili con i dati del *LHC* è talmente grande che il numero di pubblicazioni per anno e per collaborazione scientifica è impressionante. Una collaborazione come *CMS* o *ATLAS* permette un centinaio di pubblicazioni all'anno su riviste ad alto impatto scientifico, come mostrato in Figura 9 per la collaborazione *ATLAS*, e un grande numero di citazioni della comunità scientifica. Gli articoli sulla scoperta del bosone di *Higgs*, per esempio, ricevono ancora oggi circa un centinaio di citazioni al mese.

Gli articoli di queste grandi collaborazioni sono firmati collegialmente da tutti i membri che ne fanno parte: questa scelta è certamente dovuta al fatto che qualsiasi membro dell'esperimento può contribuire al miglioramento di un lavoro, ma soprattutto alla volontà di riconoscere il merito a tutte le moltissime persone che, negli anni, hanno lavorato sul rivelatore, il suo funzionamento, le infrastrutture *software* e senza i quali non sarebbe stato possibile avere dati da analizzare in primo luogo. I firmatari autori delle pubblicazioni scientifiche della collaborazione *ATLAS (CMS)*, per fornire gli esempi più popolosi, sono, ad oggi, 2700 (2300) circa.

La caratteristica dell'avere articoli firmati da moltissimi autori differenzia enormemente le pubblicazioni della *Big Science* rispetto ad altri domini di ricerca, dove gli articoli sono normalmente firmati da poche persone, ed è spesso oggetto di preoccupazione e di discussione nella comunità scientifica. Riuscire ad emergere in modo chiaro, soprattutto per giovani e brillanti fisici in cerca di lavoro, è sicuramente più problematico quando le proprie idee rischiano di esser confuse in una enorme mole di lavoro effettuata da migliaia di persone senza una traccia evidente, negli articoli finali, di chi ha fatto cosa. Una parte di que-

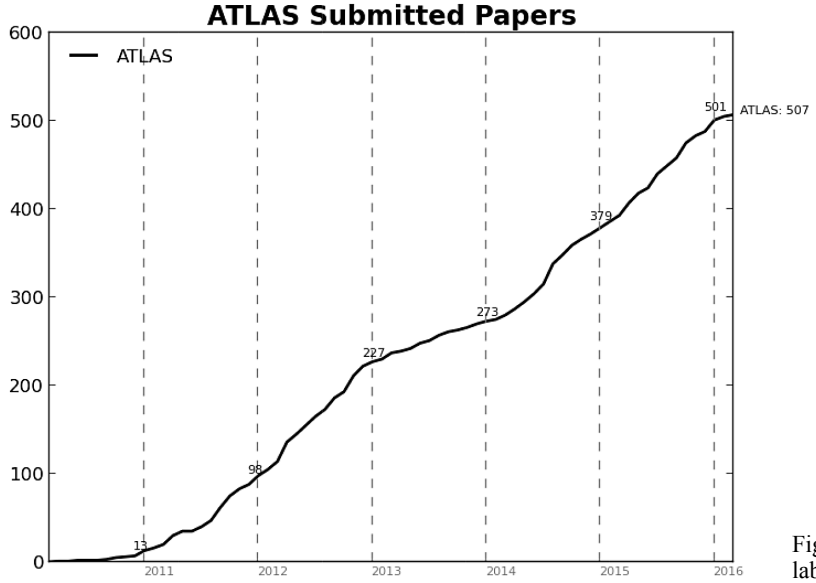

Fig. 9. Numero di pubblicazioni della Collaborazione ATLAS in funzione del tempo.

sto handicap è superata proprio nella (e dalla) stessa comunità scientifica della *Big Science*, che mantiene memoria dei contributi dei singoli ed è in grado, in genere, di applicare criteri meritocratici nel momento di assegnare dei riconoscimenti quali un ruolo di responsabilità o un contratto di lavoro. È meno evidente, per un fisico che contribuisce a queste grandi collaborazioni, la conversione in altri settori della ricerca dove questo supporto interno da parte della comunità viene a mancare. Metodi alternativi per riconoscere esplicitamente il merito di singoli negli articoli firmati da moltissime persone sarebbero in effetti auspicabili, e sono correntemente in studio.

Un aspetto interessante e importante da sottolineare nella produzione scientifica della ricerca in genere consiste nella necessità di ridondanza. La veridicità di un risultato, o di una scoperta, viene affermata dalla capacità di confermarlo, e eventualmente riprodurlo, da una osservazione indipendente. Questa regola di buon senso suggerisce che uno studio sia fatto da più persone e, se possibile, più gruppi, ma anche che diversi esperimenti vengano dedicati a studi simili. È il caso, come discusso, di rivelatori costruiti sullo stesso anello di accelerazione come *ATLAS* e *CMS*, in grado di fornire osservazioni indipendenti degli stessi fenomeni. Gli esperimenti, che producono risultati scientifici in modo indipendente, si trovano spesso in competizione tra di loro per potere presentare un risultato con la migliore precisione o per annunciare per primi la scoperta di fenomeni ignoti. Questa competizione, di per se' positiva e motivante, si trasforma spesso in genuina collaborazione quando si vogliono combinare i risultati di una misura o di una ricerca di nuova fisica per raggiungere una migliore sensibilità da presentare alla comunità scientifica. È in questo senso che, nell'esempio specifico al *LHC*, si sono sviluppati svariati gruppi di lavoro, certamente su base volontaria e gestiti in modo autonomo, con rappresentative di esperti di entrambe le collaborazioni, nonché della comunità di fisica teorica, per confrontare e discutere risultati di studi specifici e, eventualmente, combinarli tra di loro. Due splendidi esempi di collaborazione tra collaborazioni e comunità teorica (sebbene non gli unici) sono dati dal *LHCHWG* (*LHC Higgs Working Group*, per confronto e combinazioni di risultati sulla ricerca e lo studio di un bosone di *Higgs*) e il *LHCTOPWG* (*LHC Top Working Group*, per confronto e combinazione di risultati sulla fisica del top).

La sostenibilità della Big Science

Abbiamo cercato di spiegare come il gigantismo della fisica fondamentale altro non sia, in fondo, che una necessità dettata dalla stessa fisica. Esso tocca tutti gli aspetti della ricerca scientifica ad essa connessa: la dimensione degli apparati, i tempi necessari per la costruzione e l'operazione di tali macchine, la quantità di personale altamente qualificato necessario per il loro funzionamento, l'analisi dei dati, la comprensione dei risultati così come il grande numero di risultati pubblicati.

Dalla Figura 1 abbiamo visto come si possa mettere in relazione questo gigantismo con le energie/distanze che si vogliono esplorare. È quindi ovvio e lecito porsi a questo momento la domanda riguardo l'estrapolazione di questa relazione a energie sempre più grandi e, implicitamente, interrogarsi sulla sostenibilità della *Big Science* su un futuro a lungo termine.

Da una semplice estrapolazione lineare delle scale di distanza sembrerebbe ovvio concludere che un andamento simile per la ricerca fondamentale in fisica delle alte energie non potrà essere sostenibile per sempre, a meno di non coinvolgere comunità ed investimenti sempre maggiori. Questa conclusione può essere mitigata dallo studio di nuovi progetti di macchine acceleratrici, ma anche nuove tecniche di accelerazione che ci permetteranno di migliorare la nostra capacità' di investigare la materia. In questo campo di ricerca è fondamentale approfittare di sviluppi tecnologici, con tempi molto difficili da prevedere, sia in tecniche di accelerazione come di rivelazione, e che ci potrebbero portare alla prossima generazione di "microscopi dell'infinitamente piccolo" in tempi molto più rapidi del previsto.

È impossibile terminare questo articolo senza menzionare l'aspetto umano e sociologico di queste grandi collaborazioni di persone, unite dal comune scopo di ampliare la frontiera della conoscenza umana. Per fornire un esempio diretto consideriamo come il *CERN*, di cui gli autori hanno esperienza diretta, e che è uno dei modelli più noti di *Big Science*, possa essere considerato uno stato tra gli stati, dove migliaia di persone di decine di nazionalità e culture diverse sono accomunate dalla passione per la ricerca e unite nel linguaggio della scienza. Le collaborazioni scientifiche al *CERN* sono formidabili esempi di collaborazioni internazionali e, come tali, presentano aspetti unici nel modo di rapportarsi agli altri sull'ambiente di lavoro ma, inevitabilmente, anche al di fuori di esso. Se, dal punto di vista professionale, la competizione e la collaborazione spesso si fondono insieme, dal punto di vista umano il denominatore comune diventa l'apertura verso l'altro, mentre la mescolanza di culture e la diversità diventano la norma. Simili esperienze arricchiscono enormemente la capacità di relazionarsi agli altri e formano quell'apertura mentale che sarebbe auspicabile per tutti e che permette di superare

una visione spesso troppo parziale della società in cui si vive. Avere una esperienza di lavoro in queste collaborazioni rimane un modo ideale per maturare, sia professionalmente che umanamente.

Chi scrive pensa che non vi sia nulla di più nobile e necessario che cooperare, senza barriere culturali di sorta, ad uno scopo comune che sia più ambizioso di interessi di parte. L'avventura scientifica delle grandi collaborazioni della *Big Science* è un esempio formidabile di quanto questa utopia sia realizzabile e ha già saputo dimostrare quali frutti si possono cogliere investendo, insieme, nella ricerca fondamentale. Questa avventura rimane un'esperienza scientifica ed umana alla quale i due autori sono onorati di aver potuto contribuire e che gli autori sperano diventi sempre più comune, non soltanto nell'ambito della ricerca.

Note

[1] L'Organizzazione per la Cooperazione e lo sviluppo Economico (OECD) raccoglie la maggior parte dei paesi industrializzati.

[2] Gli acronimi ATLAS e CMS stanno per "A Toroidal Lhc ApparatuS" e "Compact Muon Solenoid" rispettivamente. Queste sigle raccolgono in pochissime parole le principali caratteristiche tecniche degli esperimenti.

[3] I nomi degli esperimenti sono acronimi che vengono scelti dalle collaborazioni (in genere con una specie di consultazione) per ricordare le caratteristiche tecniche e o le funzionalità che caratterizzano l'esperimento stesso.

TONI BARONCELLI

Laureato in fisica alla Sapienza di Roma, ha svolto tutta la sua carriera in esperimenti di fisica delle alte energie al CERN contribuendo ad esperimenti dalla fine egli anni 1970: CHARM, DELPHI ed ora ATLAS. Dipendente dell'INFN è attualmente dirigente di ricerca. Ha ricoperto numerosi incarichi di responsabilità nei vari esperimenti nei quali ha lavorato.

ROBERTO CHIERICI

Laureato in fisica all'università di Genova con un dottorato di ricerca ottenuto presso l'università di Torino, è stato membro dello staff scientifico del CERN di Ginevra ed è ora Direttore di Ricerca al CNRS (Centre National de la Recherche Scientifique) in Francia, presso l'IPN di Lione. Nella sua carriera in fisica delle alte energie ha contribuito agli esperimenti DELPHI al LEP e CMS al LHC, ed è specializzato in analisi e interpretazione dei dati.