
Esperimenti a LHC come motori di innovazione

Gabriele Chiodini

Istituto Nazionale di Fisica Nucleare - Sezione di Lecce

La scoperta del bosone di Higgs, in particolare, e la ricerca scientifica, in generale, sono un motore vitale della modernità e della competitività globale. I ricercatori che hanno ideato e costruito gli esperimenti a LHC hanno dovuto inventare e sviluppare nuove tecnologie per perseguire gli ambiziosi scopi di fisica fondamentale che si prefiggevano. Molte di queste innovazioni hanno avuto delle ricadute tecnologiche concrete e delle applicazioni immediate nella nostra società.

Gli strumenti complessi e sofisticati della fisica delle particelle sono ricche fonti di concetti nuovi e di tecnologie innovative che vanno a beneficio di varie discipline della ricerca ed, in un secondo tempo, producono applicazioni con un impatto significativo nell'economia, nell'industria e nella società.

Scienza di base e applicata vanno di pari passo, basandosi l'una sull'altra, e stimolandosi a vicenda. Il sostegno pubblico è decisivo per favorire questa alchimia delicata. La prosperità ed il futuro della società dipende da questo.

Il Large Hadron Collider (LHC) del CERN è il più potente acceleratore di particelle mai realizzato [1]. Il CERN è nato nel 1954, dopo la seconda Guerra Mondiale, ed oggi garantisce la condivisione di risorse e di sapere scientifico tra

i 20 Stati Membri Europei e favorisce collaborazioni con scienziati da tutto il mondo. A LHC si fa ricerca pura per capire come è fatto l'universo, e stupefacenti innovazioni tecnologiche sono state necessarie per la sua costruzione e per il suo funzionamento.

Il progetto LHC nasce agli inizi degli anni novanta come risposta europea al progetto concorrente statunitense Superconducting Super Collider (SSC) che doveva essere costruito in Texas in un nuovo tunnel da 87 km e con una energia nel centro di massa di 20 TeV. LHC aveva a disposizione il vecchio tunnel del Large Electron-Positron collider (LEP) al CERN di Ginevra, di "soli" 27 km, e puntava a raggiungere un'energia nel centro di massa di 14 TeV. Quindi, LHC all'inizio appariva uno strumento meno potente del suo competitore, ma più sostenibile da un punto di vista economico con un costo di circa 4.4 miliardi di dollari, contro i 12 miliardi stimati per SSC agli inizi degli anni '90. La necessità di costruire un nuovo acceleratore in un tunnel esistente richiese la progettazione di magneti più potenti di quelli allora esistenti per poter mantenere la traiettoria di un fascio di protoni di energia molto alta in una geometria pre-definita. Il gruppo di lavoro di LHC affrontò questa sfida ideando dipoli magneti superconduttori innovativi e compatti, con un campo nominale di 8 T e operanti a 1.8°K, una temperatura inferiore a quella della radiazione cosmica di fondo. In questo modo si riuscì a raggiungere un'energia

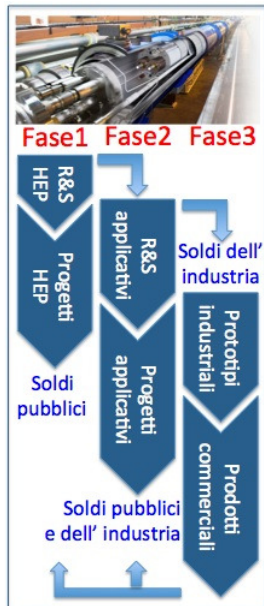


Figura 1: Il diagramma schematizza le fasi e le sorgenti di finanziamento che rendono possibile il trasferimento tecnologico all'industria delle innovazioni tecniche della Fisica delle Alte Energie (HEP) [2].

superiore alla metà di quella di SSC, ed una luminosità nominale nelle zone di interazione di circa 10^{34} protoni al cm^2 per secondo, ben un ordine di grandezza superiore a quella prevista per SSC.

Fu chiaro fin dall'inizio che tali scelte progettuali portavano con sé altissimi rischi per l'acceleratore e gli esperimenti. Una perdita incontrollata della superconduttività dei magneti, a seguito dell'elevata densità di energia immagazzinata, avrebbe comportato un'esplosione, come avvenne nell'incidente del 2008. La costruzione di LHC imponeva, inoltre, sfide tecnologiche innovative. I rivelatori, l'elettronica e tutta la componentistica avrebbero dovuto resistere ad un livello di radiazioni senza precedenti. Per poter ricostruire eventi contenenti interazioni multiple i rivelatori dovevano avere una granularità elevatissima ed impiegare complessi sistemi hardware per selezionare gli eventi interessanti e ridurre la quantità dei dati da salvare. Infine, un sistema distribuito delle risorse di calcolo e di immagazzinamento dati, impiegando sofisticatissimi software sviluppati ed usati da migliaia di ricercatori sparsi nel mondo, era necessario per poter compiere analisi di fisica in tempi ragionevoli.

Il CERN affrontò l'impresa impostando una

precisa strategia con le industrie della comunità europea agendo come *General Contractor* dell'acceleratore e di parti importanti degli esperimenti. Per ogni aspetto riguardante l'acceleratore e i rivelatori, questo fu fatto in due fasi separate. Nella prima fase fu definito lo schema concettuale (Conceptual Design Report), e nella fase successiva furono specificati i dettagli tecnici (Technical Design Report). I prodotti sono stati suddivisi in due categorie: standard ed innovativi. I prodotti standard (ad esempio alimentatori, trasformatori e sistemi criogenici) erano disponibili sul mercato ed erano di intera responsabilità delle ditte aggiudicatesi l'appalto. I prodotti innovativi, quelli di massima innovazione tecnologica e strategici, sono stati progettati esclusivamente per il CERN, il quale, per ridurre rischi e costi, ha acquistato direttamente le componenti e si è assunto la responsabilità della realizzazione e dell'integrazione nel sistema finale.

Circa 6400 industrie hanno avuto commesse per LHC ed i suoi esperimenti, e, successivamente, hanno registrato un aumento delle loro vendite. Per ogni euro ottenuto dal CERN, tali industrie hanno prodotto tre euro di commesse nuove di cui il 75% fuori dall'ambito di Fisica delle Particelle come: energia solare, industria elettrica, trasporti, computer e telecomunicazioni. Inoltre, hanno ridotto i costi di produzione ed innovato le procedure di qualificazione. Per l'industria italiana il bilancio meramente monetario è stato positivo: per ogni euro di fondi pubblici investito nel progetto LHC le nostre industrie hanno ricevuto un euro e mezzo di commesse, ma ciò che deve far riflettere sono le ricadute a posteriori che potranno essere valutate solo a lungo termine.

Dal 2000 al 2009 al CERN sono stati registrati 163 casi di trasferimento tecnologico di cui il 90% connessi a LHC, e uniformemente distribuiti sui quattro domini tecnologici di LHC: acceleratori, rivelatori, elettronica ed informatica. Durante la costruzione dell'acceleratore, i progetti trasferiti all'industria sono stati circa 22 all'anno, riducendosi, per ovvie ragioni, a circa 9 all'anno terminata la costruzione. Tutta la ricerca innova, ma mai come quella prodotta dalla realizzazione di LHC e dai suoi esperimenti.

In questo articolo illustrerò alcune delle ricadute tecnologiche in quattro specifici ambiti: ap-

plicazioni mediche, strumentazione, tecnologie eco-compatibili e tecnologia informatica.

Applicazioni mediche

La fisica nucleare fin dalla sua nascita ha avuto dirette ricadute nella diagnostica medica, e negli ultimi decenni anche nelle tecniche terapeutiche per la cura dei tumori. Le tecniche diagnostiche di medicina nucleare, le tomografie di vario tipo come la PET (tomografia a emissione di positroni), la SPECT (tomografia computerizzata a emissione di singolo fotone), la CT (tomografia computerizzata), sono basate sulla rivelazione di fotoni. Per avere un'immagine sempre più precisa, magari a tre dimensioni, degli organi e dei tessuti in esame, sono necessari rivelatori che riescano ad identificare il punto di emissione, o di diffusione, del fotone con sempre maggior precisione. Questa richiesta si scontra con la necessità di minimizzare la dose di radiazione assorbita dal paziente. Queste due necessità contrastanti spingono a progettare e costruire rivelatori di fotoni di sensibilità sempre maggiore e ad alta segmentazione spaziale. In questo campo, le innovazioni tecnologiche legate a LHC sono moltissime, e quindi mi limiterò a descriverne solo alcune piuttosto significative ed emblematiche.

Rivelatori a pixel ibridi di silicio

Il rivelatore a pixel ibrido di silicio è stato interamente ideato e realizzato per gli esperimenti ad LHC. Esso rappresenta l'evoluzione naturale del rivelatore a strisce di silicio ottenuto segmentando tali strisce trasversalmente per ottenere una matrice di diodi. Una precisa ricostruzione dei vertici primari e di decadimento delle particelle richiede il posizionamento dei tracciatori a pochi centimetri dalla zona di interazione. Ad LHC il flusso di particelle è così intenso che solo un tracciatore a pixel ibridi di silicio è in grado di separare le tracce vicine prodotte da particelle cariche e anche di resistere alla radiazione. I rivelatori ibridi a pixel, diversamente dai cosiddetti monolitici come i chip CMOS delle fotocamere digitali, permettono di ottimizzare il sensore ed il chip in modo indipendente, richiedendo, però, una speciale tecnica di inter-connesione ad alta densità

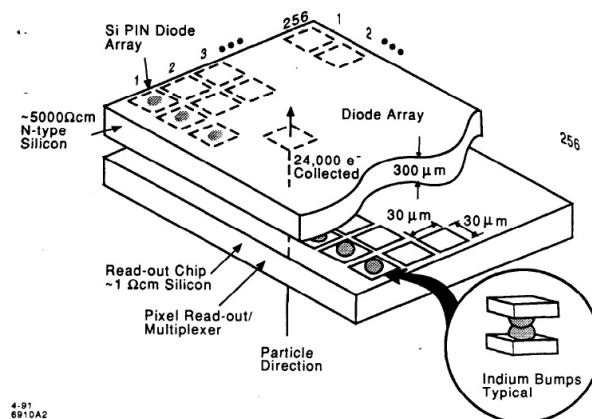


Figura 2: Rappresentazione schematica di un rivelatore a pixel ibridi costituito da una matrice di celle di elettronica (chip di lettura) e una matrice di diodi semiconduttori (sensore al silicio) interconnessi per bump-bonding con indio mediante la tecnica di Flip-Chip [3].

mutuata dall'industria ma miniaturizzata di due ordini di grandezza.

Questo tipo di rivelatori è subito apparso molto ambizioso e necessitava di soluzioni tecnologiche avanzate che non erano allora disponibili. È composto da circa 65 milioni di diodi al silicio (pixel) grandi $50 \mu\text{m} \times 500 \mu\text{m}$ che sono interconnessi (bump-bonding) con altrettanti canali di elettronica implementati in un chip di lettura in tecnologia CMOS (Complementary Metal-Oxide Semiconductor) a larghissima scala di integrazione. Ogni pixel è dotato di un amplificatore di carica veloce, un sample-and-hold analogico ed un discriminatore di conferma. Infine, una sofisticata architettura digitale permette l'estrazione dei dati utili con una velocità senza precedenti, questo grazie alla organizzazione a colonne della lettura dei pixel e al trasferimento dei dati dei soli pixel colpiti (sparse-read-out).

Rivelatori simili ma più semplici sono impiegati per ricostruire immagini estese in diverse applicazioni: indagini cristallografiche di proteine presso sorgenti di luce di sincrotrone, radiografie di materiali presso sorgenti a spallazione di neutroni ed in campo medico.

Sui pixel ibridi denominati Medipix e Timepix si basa una nuova invenzione del CERN denominata Dosimetro Quantistico (Quantum Dosimetry). Essa comprende un algoritmo, un software ed una apparecchiatura portatile, dotata di chiave USB, in grado di determinare dose e composizione della radiazione ambientale. Il Quantum

Elettronica del "Day After"

Lo sviluppo di elettronica resistente ad altissime dosi di radiazione è stato sempre dominio della ricerca militare, la quale ha potuto contare su notevoli finanziamenti per almeno un cinquantennio in vari paesi che avevano sviluppato armanenti nucleari. Agli inizi degli anni '90 erano disponibili diverse tecnologie elettroniche resistenti a dosi di radiazione dell'ordine di qualche Mrad ma con un livello di affidabilità molto basso, costi elevati e regole circuitali molto rigide. Il chip di lettura dei rivelatori a pixel ibridi deve resistere a dosi totali di radiazione di decine di Mrad. Questa necessità ha stimolato il gruppo di progettisti del CERN a sviluppare con successo metodologie per realizzare chip di elettronica ultra resistenti alla radiazione [4]. È stata implementata la tecnologia CMOS a larghissima scala di integrazione messa a disposizione da IBM grazie ad un accordo. In questa tecnologia lo spessore del biossido di silicio sottostante il gate dei transistor è così sottile (~ 5 nm) che, per effetto tunnel, l'accumulo di carica positiva nel canale, causato dalla radiazione ionizzante, diffonde rapidamente senza produrre spostamenti significativi della soglia. Rimaneva il problema dell'elevato spessore del biossido tra dispositivi che a seguito dell'irraggiamento produceva un aumento della corrente di leakage tra drain e source. Questi effetti sono stati eliminati impiegando transistor con il source circondato dal drain (enclosed layout transistor) ed anelli di guardia per isolare dispositivi vicini. I chip sviluppati seguendo queste regole funzionano senza difficoltà fino a dosi di centinaia di Mrad.

Dosimetry si basa sulla separazione dei diversi costituenti delle radiazioni, come elettroni, fotoni, particelle alfa, neutroni, ioni, muoni, e così via. Questa tecnologia è utilizzata per misurare la radiazione nella caverna dell'esperimento ATLAS e potrebbe avere interessanti risvolti commerciali nel futuro.

Fotomoltiplicatori a stato solido

Tradizionalmente, la rivelazione di singoli fotoni si effettua mediante un fotomoltiplicatore. Ad esempio, nella PET i fotomoltiplicatori sono accoppiati otticamente a cristalli di scintillazione. Nel fotomoltiplicatore il fotone che incide sul catodo produce un fotoelettrone che viene poi moltiplicato mediante una struttura a dinodi posti nel vuoto, generando così un impulso di corrente in un circuito esterno. Il fotomoltiplicatore è un oggetto costoso, delicato, ha bisogno di alta tensione per funzionare e non è adatto a lavorare in campo magnetico, come in prossimità di una risonanza magnetica nucleare. Per tali ragioni, da molto tempo si cerca di rimpiazzarlo con un dispositivo a stato solido.

Fotodiodi semiconduttori sensibili alla luce sono da tempo utilizzati nella fisica delle alte energie per leggere segnali da fibre scintillanti, poiché

i grandi campi magnetici o lo spazio a disposizione impediscono l'uso di dispositivi sotto-vuoto. Un semplice fotodiodo, denominato pin-diode, è formato da uno strato di semiconduttore intrinseco a sandwich tra due strati drogati p e n. Un miglioramento rispetto a questa configurazione di base è stato il fotodiodo a valanga (APD), ove l'applicazione di una tensione di polarizzazione produce una regione con un grande campo (150 kV/cm o più) in cui gli elettroni liberi generano elettroni secondari ed il segnale risulta amplificato. Questa tecnica ha il vantaggio di moltiplicare solo gli elettroni liberi generati in superficie dalla luce di scintillazione, mentre quelli generati nel diodo dall'attraversamento di particelle ionizzanti non sono amplificati. La tecnica è stata perfezionata ulteriormente all'inizio degli anni '90 riducendo notevolmente lo spessore dello strato di fotoconversione (struttura "reverse"). I cristalli scintillanti, che vengono utilizzati per la registrazione di energia elettromagnetica, sono uno dei grandi spin-off di successo della fisica delle particelle.

Lo sviluppo e l'ottimizzazione degli APD sono stati fortemente stimolati dalla realizzazione del calorimetro elettromagnetico omogeneo di CMS, il quale necessitava di circa 130000 sensori estremamente sensibili, resistenti alla radiazione, non

ingombranti e funzionanti in campo magnetico, per poter rilevare in modo lineare e stabile la luce di scintillazione dei nuovi e promettenti cristalli di tungstato di piombo. In questa fase di ricerca sono stati sviluppati due metodi di produzione degli APD (crescita epitassiale e diffusione) e due regimi di funzionamento (proporzionale e Geiger) [5]. Nel regime Geiger il campo elettrico è così intenso che la moltiplicazione a valanga si trasforma in una vera e propria scarica. Il dispositivo è denominato Silicon-Photomultiplier (Si-Pm) e grazie alla sua altissima sensibilità è il candidato ideale per sostituire i fotomoltiplicatori nella diagnostica PET.

Strumentazione

La costruzione ed il funzionamento di apparecchiature complesse come gli acceleratori ed i rivelatori di particelle di grandi dimensioni, devono avvenire garantendo la sicurezza delle persone e la conservazione delle strutture. Inoltre, bisogna raggiungere la precisione richiesta dalle misure. Questi obiettivi richiedono un costante e distribuito monitoraggio e calibrazione di diverse quantità fisiche, come temperature, pressioni, tensioni elettriche, grado di purezza dei fluidi e così via. Reti estese ed integrate di sensori di ogni tipo e tecniche di monitoraggio multi-canale consentono un controllo di qualità e di intervento in tempo reale. Poiché la strumentazione e la sensoristica non erano disponibili sul mercato, oppure non erano adeguate alle necessità di LHC, nuove apparecchiature sono state inventate. A titolo di esempio riporto due dei tanti strumenti di misura inventati esplicitamente per LHC.

Misura distribuita di temperature criogeniche con fibre

Cavi superconduttori sono comunemente utilizzati in impianti di grandi dimensioni, come ad esempio nelle centrali elettriche e negli acceleratori di particelle. Questi richiedono una temperatura di lavoro molto bassa e misure di temperatura da 1°K a 77 °K che sono possibili solo con sonde criogeniche molto costose. LHC ha sviluppato una nuova, semplice ed economica tecnologia per la misura di temperatura in un

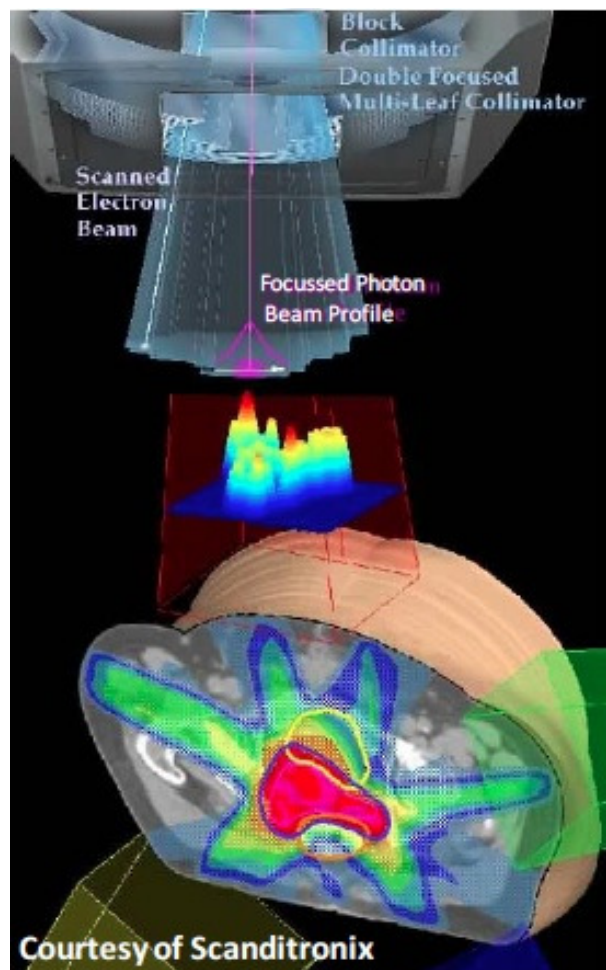


Figura 3: La IMRT (Intensity Modulated Radio Therapy) è una tecnica moderna di radioterapia che consente di conformare la dose radiante all'immagine spaziale del tumore e modulare l'intensità su piccoli volumi. Focalizzando la dose sull'area tumorale si risparmia il tessuto sano circostante, con notevole riduzione dei danni collaterali del trattamento tradizionale. Un dosimetro bidimensionale è necessario per la preparazione del fascio, ed attualmente si impiega come materiale attivo il silicio. Molto più promettente è l'impiego di diamante sintetico di alta qualità depositato per CVD (deposizione chimica da fase di vapore a bassa pressione), sviluppato per monitorare i fasci di LHC e la radiazione assorbita dai rivelatori. L'impiego del diamante è di notevole interesse nel campo della clinica radioterapeutica (e quindi industriale e medica) grazie alle sue uniche proprietà: assorbimento della radiazione simile al corpo umano, elevata linearità, assenza di tossicità e resistenza alla radiazione senza precedenti [6].

ampia gamma (da 1°K a 1000°K) utilizzando un sensore costituito da una fibra ottica ed un analizzatore di spettro di luce. Una volta misurati i

parametri dello scattering stimolato di Brillouin all'interno della fibra ottica è possibile determinarne la temperatura, consentendo anche misure distribuite in sistemi di grandi dimensioni. I campi di applicazione di questa strumentazione sono molteplici: termometria criogenica a basso costo e monitoraggio-distribuito d'incendio, di perdite di olio in tubi e lungo le rive dei fiumi.

Mappatura 3D del campo magnetico

Il controllo dei fasci in LHC e la misura di precisione dell'impulso delle particelle cariche negli esperimenti dipende in modo cruciale dalla misura e dalla verifica accurata dell'intensità dei campi magnetici prodotti. A tal scopo è stato ideato un dispositivo di calibrazione ad alta risoluzione per la misura del campo magnetico lungo tre assi. Tale dispositivo esegue una scansione completa attorno alla sfera unitaria, indipendentemente dal suo orientamento rispetto al campo magnetico, così da estrarre direzione e modulo del campo magnetico locale. Il sistema consente la calibrazione automatica e precisa dei sensori di Hall in un tempo molto breve, impossibile da ottenere con le sonde commerciali esistenti.

Tecnologie eco-compatibili

LHC ed i suoi esperimenti per poter funzionare richiedono notevoli quantità di energia elettrica e di gas refrigeranti. La necessità di limitare il più possibile il consumo di energia e l'impiego di gas non ecologici ha stimolato diverse tecnologie amiche dell'ambiente con interessanti applicazioni industriali.

Collettori solari avanzati

Il CERN ha sviluppato una nuova tecnologia per realizzare collettori solari avanzati che funzionano sia con luce solare diretta che con quella diffusa ed hanno elevate temperature di esercizio (fino a 450 °C). Tali dispositivi trovano impiego nella produzione di acqua calda, nel riscaldamento e raffreddamento di edifici, nella produzione di energia elettrica e nella desalinizzazione dell'acqua marina.

I collettori solari sono dispositivi utilizzati per assorbire e trasferire l'energia solare in un fluido

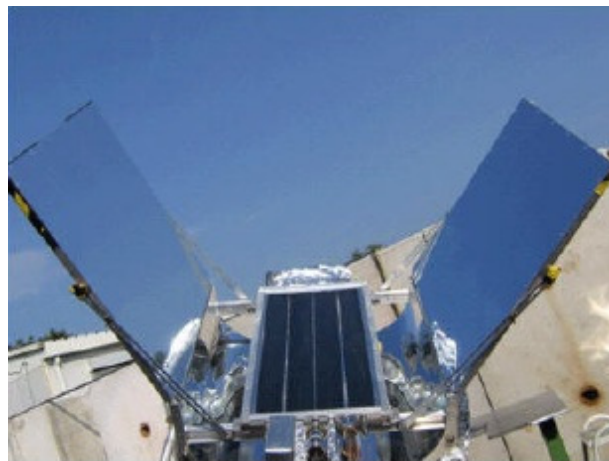


Figura 4: Un'immagine del collettore solare ad ultra-alto vuoto a schermo piatto realizzato al CERN impiegando diverse tecniche sviluppate per LHC e pienamente commercializzato (ad esempio l'impianto di 1200 metri quadri realizzato all'aeroporto di Ginevra).

di immagazzinamento. Tradizionalmente sono costituiti da tubi (o piastre annerite) di assorbimento inseriti in un contenitore chiuso frontalmente da una finestra trasparente. Per ridurre le dispersioni termiche ed incrementare la temperatura di utilizzo, senza ricorrere a specchi concentratori, spesso si realizzano sistemi sotto-vuoto, così da eliminare le perdite dovute alla convezione e conduzione molecolare dell'aria.

Il CERN ha creato collettori solari altamente competitivi e più promettenti di quelli esistenti grazie all'impiego delle tecniche di ultra-alto vuoto sviluppate per LHC, come, ad esempio, il pompaggio continuo di gas ottenuto con rivestimenti a film sottile di Getter non evaporabili (NEG). Questi rivestimenti, prodotti attraverso la tecnica di sputtering, possono recuperare la loro reattività chimica (cioè la funzione di pompaggio) mediante riscaldamento a partire da temperature di 180 °C. I NEG sono stati caratterizzati con 20 diversi tipi di materiali e trovano moltissime applicazioni in pompe innovative, in tubi catodici, in componentistica da vuoto di ogni tipo nella microelettronica e nell'isolamento termico sotto-vuoto a bassa ed alta temperatura.

Unità criogenica a risparmio energetico

Durante lo sviluppo del progetto LHC sono stati necessari molti test con magneti superconduttori. Al fine di ridurre i costi è stata sviluppata una

nuova configurazione per il raffreddamento dei magneti superconduttori costituita da due parti: il criostato ed il recipiente di recupero. Quando si verifica una perdita di superconduttività ed un conseguente rapido aumento della resistenza e della temperatura, nel criostato la pressione aumenta e l'elio liquido viene spinto rapidamente nel recipiente di recupero dove viene immagazzinato per un uso successivo. Quando il cosiddetto "quench" del magnete è finito, la pressione nel criostato scende, la differenza di livello idrostatico tra i vasi e la caduta di pressione fanno rifluire l'elio liquido nel criostato e si riavvia il raffreddamento. In questo modo si riduce il periodo di recupero di un fattore tre e si possono risparmiare fino a 7,5 kg di elio per quench, con notevoli vantaggi economici.

Sistema di raffreddamento integrato a CO₂ bi-fase

Un sistema di raffreddamento innovativo a fase liquida e gassosa di CO₂ è stato sviluppato al CERN sia per il tracciante a silici dell'esperimento LHCb (studio del quark b) a LHC, sia per l'esperimento AMS (Anti-Matter-Search) posto sulla stazione spaziale internazionale. Il sistema è costituito da un accumulatore per il liquido di raffreddamento, integrato con uno scambiatore interno di calore, controllato da un semplice riscaldatore posto nell'accumulatore. Questo schema integrato di raffreddamento è facile da utilizzare, molto economico e impiega un gas poco costoso ed ecologico. Esso trova molte applicazioni in apparecchiature hi-tech ed in tecnologie pulite.

Tecnologie informatiche

Le tecnologie informatiche hanno reso possibile la gestione, a diversi livelli e fasi, di una sistema complesso senza precedenti quale è quello costituito da LHC, dai suoi rivelatori e anche dalla comunità internazionale di scienziati coinvolta. In questo ambito LHC non solo ha creato nuove tecnologie ma addirittura ha creato nuovi paradigmi, quali il calcolo distribuito ed il tele-lavoro. Sono numerose le innovazioni legate al cosiddetto campo dell'*Information Technology* (IT) scaturite dalla costruzione e dal funzionamento di LHC

e dei suoi rivelatori. Vorrei però menzionarne solo alcune che hanno la caratteristica comune di essere necessarie per il successo del programma di fisica di LHC e nel contempo hanno un impatto significativo in altri campi scientifici e sociali: i software di simulazione, i database ed il calcolo distribuito GRID.

Geant4

La collaborazione internazionale di fisici e scienziati informatici denominata Geant4 ([7]) ha sviluppato un toolkit software basato sul linguaggio object-oriented C++ per la simulazione del passaggio di particelle attraverso i rivelatori. Oltre alla fisica delle alte energie, nucleare e degli acceleratori, Geant4 trova applicazione negli studi in medicina e nella scienza dello spazio dove è necessario simulare con precisione le interazioni primarie e secondarie tra radiazione e apparato sperimentale. Il rapporto aperto e di collaborazione tra il team di sviluppo e le sue utenze ha portato ad un trasferimento di tecnologia bidirezionale. Infatti gli utenti, in settori anche diversi dalla fisica delle particelle, hanno contribuito attivamente allo sviluppo del software menzionato.

Geant4 oramai riveste un ruolo leader nella progettazione di esperimenti e macchinari, nello sviluppo di programmi di ricostruzione fornendo i dati grezzi simulati, nonché nella comprensione dell'influenza dei processi di background e degli effetti della radiazione sui dispositivi elettronici. In particolare Geant4 possiede un set esteso di modelli di interazioni elettromagnetiche e adroniche e può essere utilizzato per affrontare una vasta gamma di applicazioni mediche per la radioterapia (fotoni), per la brachiterapia (sorgenti radioattive), per la adroterapia (adroni carichi) e per la terapia a cattura di neutroni del boro.

Database

Grazie al progetto Openlab del CERN che vede la collaborazione con diverse case produttrici di software, è stato possibile avere a disposizione hardware, software e prodotti di rete innovativi ancor prima della loro commercializzazione. Openlab è stato un banco di prova ideale per la valutazione e l'integrazione di nuove tecnologie

GRID e CLOUD a confronto

Cloud e Grid computing [9] sono i principali esempi di architetture di calcolo distribuito, entrambi utilizzati per risparmiare calcolo massimizzando le risorse esistenti. Al CERN sono in corso esperimenti pilota per sostituire la Grid con la Cloud, nella speranza di rendere il calcolo distribuito più "user-friendly", sfruttare le nuove potenzialità offerte dal mercato e magari risparmiare in risorse e costi di gestione. La Cloud infatti nasconde i veri processi necessari per svolgere il lavoro richiesto dall'utente, permettendo all'utente di usufruire di vari servizi senza investire nell'architettura sottostante.

Il Grid computing è un modello decentrato di risorse in cui la computazione potrebbe verificarsi su diversi domini, mentre il Cloud computing è un modello centralizzato. La griglia è un insieme di computer che è di proprietà di più parti che stanno in più posizioni e sono collegati tra loro in modo che gli utenti possano condividere la potenza combinata delle risorse. La Cloud è un insieme di computer solitamente di proprietà di un unico soggetto. Esempi di griglie sono: WLCG e FutureGrid. Esempi di Cloud sono: Amazon Web Services e Google App Engine, ed esempi di servizi della Cloud sono: Dropbox, Gmail, Facebook, Youtube e Rapidshare. In un grid computing il numero di Virtual Machine (o istanze di lavoro) non può superare il numero di server fisici. Questo sistema si presta bene per lavori separabili in numerose piccole porzioni parallele, esose di risorse di calcolo ed eseguite su più macchine con un server di controllo che si occuperà prevalentemente di gestire l'ordine temporale dei lavori. Nel Cloud computing, invece, il numero di Virtual Machine supera sempre il numero di server fisici, quindi su una macchina girano contemporaneamente numerose piccole istanze e quindi non è possibile concepire un meccanismo di ordinamento temporale delle stesse.

e servizi, grazie alla realizzazione di soluzioni d'avanguardia su larga scala che si renderanno utili nel mercato tradizionale. Ad esempio il colosso Oracle è stato in grado di sviluppare prodotti migliori grazie alla collaborazione Openlab. Oracle ha indubbiamente aiutato il CERN a disporre della miglior tecnologia esistente per la gestione dei database e, a sua volta, il CERN ha aiutato Oracle a migliorare i suoi prodotti nel settore pubblico, nella sanità, nell'istruzione e nell'industria. LHC ed i suoi esperimenti usano una varietà immensa di database: costanti di calibrazione, configurazioni hardware e geometriche degli apparati, gestione di conferenze e turni, e così via.

Grid

Senza la griglia (Grid [8]) i progressi scientifici della fisica delle alte energie negli ultimi decenni non sarebbero stati possibili. La collaborazione del Worldwide LHC Computing Grid (WLCG) è stata fondata nel 2002 per fornire l'enorme potenza di calcolo necessaria agli esperimenti di LHC. La griglia è un modo per legare tutte le risorse

insieme e farle sembrare come un'unica risorsa. Essa differisce da un cloud pubblico, in cui i dati ed i mezzi di calcolo sono in genere alloggiati in uno o qualche data center gestiti centralmente con utenti che si connettono a tali risorse. La griglia è composta da oltre 170 centri di calcolo in 36 paesi, e questo la rende la più grande rete di calcolo scientifico in tutto il mondo. È costruita su tre livelli: il Tier-0, che si trova al CERN, con una capacità di calcolo di circa 68.000 core, cioè circa un terzo della capacità totale della Grid. Il Tier-0 è collegato con i centri Tier-1, che sono in genere gli istituti di ricerca regionali, normalmente uno per nazione, e ognuno di questi ultimi è collegato con una serie di centri di calcolo Tier-2, per lo più situati nelle università. La larghezza di banda utilizzata è impressionante. Infatti la connessione tra il centro Tier-0 ed i centri Tier-1 è garantita per un flusso continuo di dati tra 1,5 e 2 Gbyte/s con un flusso mondiale di dati relativi a LHC tra i 7,5 e i 10 Gbyte/s. Nella presa dati del 2011 e del 2012 il solo esperimento ATLAS ha generato circa sei petabyte di dati grezzi ed una quantità analoga di dati derivati.

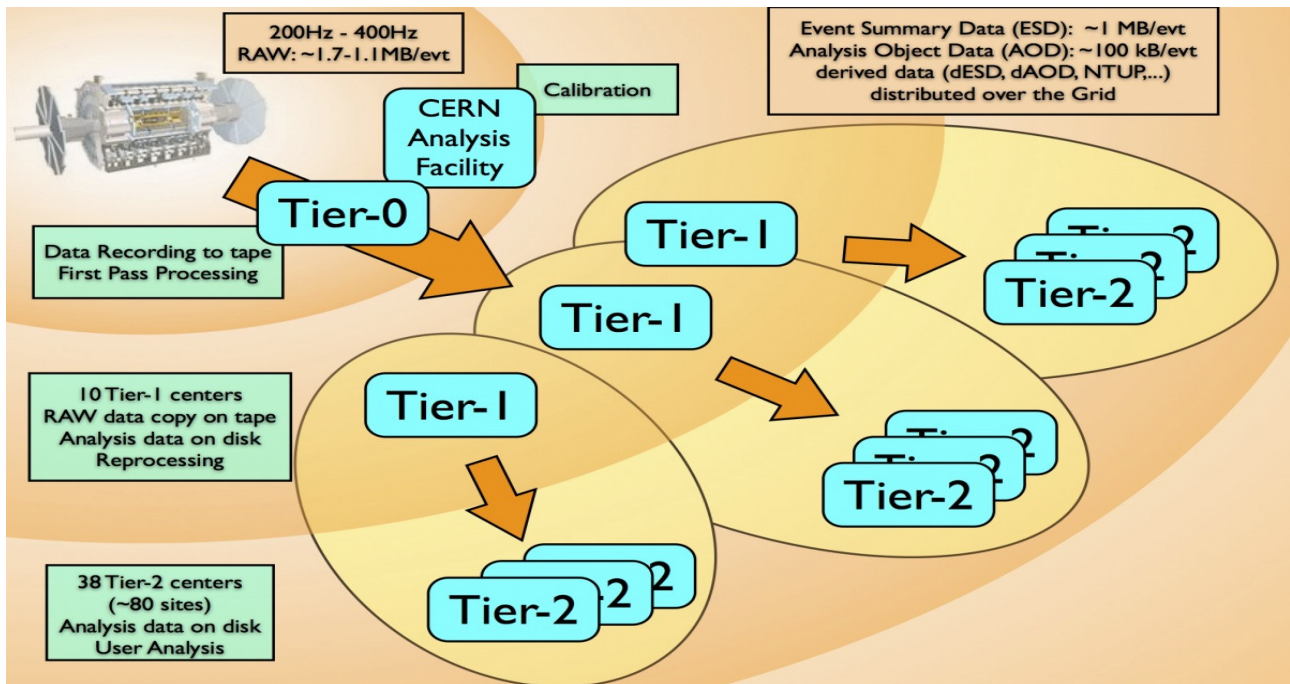


Figura 5: Il Worldwide LHC Computing Grid (WLCG) degli esperimenti di LHC. In alto a sinistra il rivelatore dell'esperimento ATLAS produce dati grezzi (digitalizzati o RAW) organizzati in eventi ad un ritmo di 200-400 Hz di dimensioni di 1.1-1.7 MB per evento. L'evento contiene tutte le informazioni necessarie a ricostruire i segnali elettrici indotti nelle parti attive del rivelatore al passaggio delle particelle prodotte nelle collisioni primarie tra protoni accelerati, al fine di studiare le interazioni fondamentali della natura. I dati grezzi in tempo reale vengono poi ridotti in dati strumentali, denominati Event Summary Data (ESD), contenenti coordinate spazio-temporali, tracce ed energia delle particelle. A loro volta gli ESD vengono ridotti in dati fisici, denominati Analysis Object Data (AOD), contenenti direzione ed energia di particelle cariche, di fotoni e di adroni. I dati RAW, ESD e AOD vengono copiati in tempo reale dal Tier-0, situato al CERN, nei centri regionali, denominati Tier-1, che a loro volta li duplicano, in parte, nei vari Tier-2 per le analisi di fisica, condotte su un insieme ridotto di dati derivati (D3PD). Oltre alla ricostruzione dei dati dei rivelatori, sulla griglia si producono anche dati simulati mediante ciò che la teoria fondamentale prevede nel rivelatore. I dati simulati sono quelli che impiegano gran parte delle risorse di calcolo e disco.

Oggi la Grid è in grado di sostenere un traffico di dati settimanale di circa 1.5 petabyte su una topologia complessa di centri Tier. La facilità d'accesso a grandi volumi di dati è stata fondamentale per utilizzare al meglio il potenziale di fisica degli esperimenti di LHC. Il volume dei dati è particolarmente elevato perché gli esperimenti dispongono di circa 100 milioni di canali di lettura. Inoltre, LHC ha fornito dei record di luminosità senza precedenti nel 2012, causando una sovrapposizione di collisioni protone-protone per evento (pile-up) oltre il livello di progetto della macchina.

Per i primi due anni l'infrastruttura di grid computing ha gestito 15-20 petabyte di dati ogni anno. Quest'anno il CERN prevede di produrre fino a 30 petabyte di dati. Da questa prima esperienza di successo si stanno già traendo le

conclusioni e ad esempio, si pensa di cambiare i modelli di calcolo per richiedere meno copie dei dati in tutto il mondo e per ridurre i byte necessari a memorizzare un evento. Si stanno valutando tecniche di collocamento dati più dinamiche, si sta estendendo l'uso di tecniche di accesso remoto, e si stanno impiegando unità di elaborazione specializzate (originariamente sviluppate per la grafica al computer) e processi *multi-threading*.

Limiti del modello attuale

Fino alla fine degli anni '90 la struttura e l'organizzazione del lavoro di ricerca nella fisica delle alte energie imponeva lo sviluppo di soluzioni innovative a vari problemi, soluzioni che venivano ideate e realizzate all'interno della stessa comunità dei ricercatori. Per questo motivo i fisi-

ci delle alte energie primeggiavano in moltissimi campi: le ampie collaborazioni internazionali richiedevano scambio di informazioni in tempo reale, era necessario sviluppare tecniche avanzate di software e di elaborazione massiva di dati, utilizzare elettronica a larghissima scala di integrazione, e molto altro. Questo carattere di avanguardia e di frontiera, ma anche un po' d'élite, si sta perdendo, anche se questo fatto non è sempre avvertito in modo cosciente.

La ragione di questo cambiamento è dovuta al fatto che, oggi, i tempi per progettare, costruire ed esplorare la fisica di un esperimento sono di gran lunga maggiori di quelli dell'evoluzione delle tecnologie nella società. Si pensi allo sviluppo delle tecnologie informatiche e della rete di comunicazioni (ad esempio e-cloud e telecomunicazioni wire-less).

Per meglio chiarire questo aspetto, è utile ricordare che gli esperimenti a LHC hanno congelato gran parte della tecnologia utilizzata agli inizi degli anni 2000 per poter costruire l'acceleratore ed i rivelatori, ed essere pronti a raccogliere dati nel 2010. Se la fase progettuale e costruttiva è stata molto lunga rispetto al passato, al contrario, l'analisi accurata dei dati, con la conseguente scoperta del bosone di Higgs, è stata estremamente rapida. Questo grazie ad una tecnologia non disponibile nel 2000, la grid computing, e ad una innovativa organizzazione del lavoro, che ha portato alla certificazione completa e scrupolosa dei componenti di LHC e dei rivelatori.

La velocità di innovazione tecnologica e di organizzazione del lavoro, presente attualmente nella nostra società globalizzata, impone alla fisica delle alte energie un cambio di passo, in parte già messo in moto.



- [1] AA.VV.: "The Large Hadron Collider. Conceptual Design" CERN/AC-95-05 (LHC) (October 20, 1995).
- [2] JEAN-MARIE LE GOFF: The impact of CERN on high tech industry developments. Focus: The construction of the LHC. In: *Workshop: Research infrastructures for industrial innovation European Commission*. Brussels, (October 20, 2011).
- [3] M. WRIGHT, J. MILLAUD, AND D. NYGREN: A pixel Unit-Cell Targeting 16 ns Resolution and Radiation Hardness in a Column Read-Out Particle Vertex Detector. In: *Proceedings of the Third International Conference on*

Advanced Technology and Particle Physics Como, Italy, (June 22-26, 1992).

- [4] P. JARRON: Radiation tolerant electronics for the LHC experiments. In: *Proceedings of the 4th Workshop Electronics for LHC experiments*. Rome, Italy, (September 21-25, 1998).
- [5] D. RENKER: "Geiger-mode avalanche photodiodes, history, properties and problems.", *Nucl. Instrum. and Meth.* **A567** (2006), 48-56..
- [6] M. BRUZZI, C. DE ANGELIS, M. SCARINGELLA, C. TALAMONTI, D. VISCOMI, M. BUCCIOLINI: "Zero-bias operation of polycrystalline chemically vapour deposited diamond films for Intensity Modulated Radiation Therapy", *Diamond and Related Materials* **20** (2011), 84-92.
- [7] S. AGOSTINELLI ET AL.: "Geant4 - a simulation toolkit", *Nucl. Instrum. and Meth.* **A506** (2003), 250-303.
J. ALLISON ET AL.: "Geant4 developments and applications", *IEEE Transactions on Nuclear Science* **53 No. 1** (2006), 270-278.
- [8] AA.VV.: "LHC Computing Grid: Technical Design Report", CERN-LHCC-2005-024 (20 June 2005).
AA.VV.: "LHC e la Big Science come modello: Computing Grid: Technical Design Report" CERN-LHCC-2005-024 (20 June 2005).
- [9] <http://www.networkworld.com/news/2012/071112-higgs-boson-cloud-computing-260827.html>
<http://www.brighthub.com/environment/green-computing/articles/68785.aspx>



Gabriele Chiodini: Nato a Bergamo nel 1967. Si è laureato a Milano nel 1995 con una tesi sui rivelatori a pixel al silicio per ATLAS a LHC e nel 1998 ha conseguito il PhD con uno studio sperimentale sulla turbolenza nei plasmi. Dal 1999 al 2002 è stato ricercatore al Fermi National Accelerator Laboratory di Chicago dove ha lavorato alla proposta dell'esperimento BTeV e all'analisi dei dati dell'esperimento FOCUS. Dal 2003 è ricercatore presso la sezione INFN di Lecce dove è inserito nel gruppo di lavoro della collaborazione ATLAS a LHC. Attualmente si interessa dello sviluppo dei rivelatori a diamante che potrebbero essere utilizzati nella nuova configurazione di LHC. È membro della commissione scientifica nazionale tecnologica INFN e responsabile nazionale dell'esperimento DIAMOND PIXEL.