

Università degli Studi di Milano-Bicocca

Centro Interuniversitario MaCSIS

### **MaCSIS Working Paper Series**

# LE SFIDE DELLA SCIENZA NELLA SOCIETÀ DELL'INFORMAZIONE

Andrea Samuelli

Working Paper n.2/2016

# MASTER IN COMUNICAZIONE DELLA SCIENZA E DELL'INNOVAZIONE SOSTENIBILE



# LE SFIDE DELLA SCIENZA NELLA SOCIETÀ DELL'INFORMAZIONE

Andrea Samuelli Relatore: Stefano Sandrelli

# Indice

|                   |   | POLARE LA PARTICELLA DI DIO   |
|-------------------|---|---|
| 1.1               |   |   |
|                   |   | GRID: processare un flusso enorme di dati   |
| 1.2               | Proge   | tti di citizen science  |
|                   | 1.2.1   | and should be a second of the |
|                   | 1.2.2   | Higgs hunters   |
|                   |   |   |
| AS                | COLTA   | ARE LO SCIABORDARE DELLE ONDE   |
| 2 <b>AS</b> 2.1   |   | ARE LO SCIABORDARE DELLE ONDE blema del rumore  |
|                   | Il prol   |   |
|                   | Il prol<br>2.1.1                                      | olema del rumore  |
| 2.1               | Il prol<br>2.1.1<br>La ric                            | olema del rumore  |
| 2.1               | Il prol<br>2.1.1<br>La ric                            | blema del rumore  |
| 2.1               | Il prol<br>2.1.1<br>La ric<br>Proge                   | blema del rumore  |
| 2.1               | Il prol<br>2.1.1<br>La ric<br>Proge<br>2.3.1<br>2.3.2 | blema del rumore  |
| 2.1<br>2.2<br>2.3 | Il prol<br>2.1.1<br>La ric<br>Proge<br>2.3.1<br>2.3.2 | blema del rumore  |

## Introduzione

La diffusione rapida dei dati su scala globale è una caratteristica centrale della "società dell'informazione". Le grandi imprese tecnologiche che l'umanità sta affrontando oggi producono un flusso enorme di dati che gli scienziati di tutto il mondo devono raccogliere, condividere e analizzare, cooperando su scala globale. Oggi, il progresso delle tecnologie dell'informazione e della comunicazione rende possibile tutto questo. Infatti la società civile si è dotata di software, device e infrastrutture di rete in grado di gestire, diffondere e condividere in tutto il mondo quantità enormi di informazioni, che sono liberamente accessibili a chiunque abbia la possibilità di collegarsi in rete. I tempi sono ormai maturi affinchè ricerca e scienza possano essere condivise nella società in uno sforzo comune e coordinato. Oggi anche il cittadino comune, tramite la rete, può non solo informarsi ma può anche contribuire, nel suo piccolo, alle grandi sfide tecnologiche della scienza. Una scienza patrimonio di tutti, aperta a tutti, in tutto il mondo, non solo un "affare" per pochi esperti. I concetti di "open science", "citizen science" e "pupil science" sono più attuali che mai.

# Parte I LA CONDIVISIONE DELLA CONOSCENZA

Sin dalla sua nascita, la scienza è stata sempre un sistema di produzione della conoscenza aperto. La scienza moderna nasce con le prime accademie, l' "Accademia dei Lincei", la "Royal Society", l' "Académie des Sciences": istituzioni di condivisione del sapere, tentativi di costruire luoghi autorevoli di scienza aperta, di scambio libero di conoscenze tra gli accademici o tra i loro soci. Ma la situazione del tempo frapponeva ancora molti ostacoli che rendevano alquanto difficile la concreta realizzazione di queste aspirazioni. La comunicazione e la divulgazione di idee risultavano impegnative, lente e macchinose e non esistevano gli strumenti per la circolazione rapida e fluida delle informazioni.

Oggi, la società dell'informazione possiede gli strumenti e i supporti affinchè la trasmissione della conoscenza avvenga in modo veloce e capillare. La rivoluzione tecnologica, l'avvento del digitale, i progressi dell'automazione e in ultima istanza internet, il web, la rete, hanno ribaltato lo scenario. Assistiamo oggi a una produzione di dati enorme, anche sovrabbondante e quasi eccessiva che possiamo diffondere e ritrasmettere in tutto il mondo in un battito di ciglia. Abbiamo la tecnologia e i supporti informativi per condividere e divulgare facilmente qualsiasi forma di conoscenza, a tutti i livelli. I tempi sono quindi maturi affinchè le grandi sfide tecnologico-scientifiche dell'umanità possano essere accessibili alla società civile tutta e non solo a una ristretta élite di esperti.

L'espressione "citizen science" (CS) esprime proprio questo concetto. Si traduce come scienza del cittadino e rimanda al concetto di "open science", un modo di concepire la scienza aperto e condiviso all'interno di una società civile, senza barriere, nè distinzioni di classe sociale, professioni. Un' intera società civile che coopera nella stessa direzione, in uno sforzo comune, nel nome del progresso dell'umanità, uno scambio totale di informazioni, idee, concetti, una condivisione di metodi e teorie in cui ognuno può dare il suo contributo, nel suo piccolo, di concerto con il lavoro degli specialisti. Ma chi sono i cittadini della scienza? Sono volontari, cittadini della società civile che scelgono di usare il loro tempo libero per contribuire al processo scientifico. Vecchi e giovani, insegnanti, giornalisti, studenti, persone di varie provenienze con un interesse verso certi temi scientifici e un forte desiderio di progredire alla ricerca. Che i tempi siano favorevoli, lo dimostra anche il fatto che nel giugno 2014 il concetto di citizen science sia stato riconosciuto anche a livello accademico. E' stato infatti inserito nella lista di parole nuove del dizionario "Oxford English", che l'ha definito come «la raccolta e l'analisi di dati relativi al mondo naturale da parte di un pubblico, che prende parte a un progetto di collaborazione con scienziati professionisti».

A questa definizione si affiancano anche altri aspetti e in base al grado di coinvolgimento dei volontari si distinguono tipi di CS. Si spazia dai crowd-sourcing projects, dove i volontari semplicemente mettono a disposizione dei ricercatori dei loro strumenti. Ad esempio SETI@home della NASA sfrutta le memorie dei computer quando sono in stand-by per aumentare la capacità di calcolo di calcolatori condivisi; oppure progetti che tramite app installate su smartphone, inviano dati sul rumore per mappare l'inquinamento acustico nelle grandi città. In altri progetti, invece, i volontari raccolgono attivamente informazioni in svariati campi come biologia, ecologia, meteorologia, astronomia. Infine, ci sono progetti dove i volontari contribuiscono ad analizzare i dati o addirittura collaborano con i ricercatori nella creazione e sviluppo della ricerca (co-created CS).

In generale, la scienza, negli ultimi decenni, ha conosciuto un aumento della complessità che ha portato alla "ramificazione" delle discipline. Le discipline si sono specializzate e diversificate in branche diverse che, gradualmente, sono diventate esse stesse delle discipline a sè stanti con campi di ricerca autonomi. L'aumentata complessità dell'orizzonte scientifico ha portato inevitabilmente all'aumento dei dati e degli elementi da raccogliere e analizzare. Così oggi abbiamo un' enorme mole di dati da raccogliere, catalogare, analizzare e diffondere molti di più di quanto i ricercatori siano in grado di gestire. Questo è particolarmente evidente per le scienze pure, come la fisica, la biologia, la scienza dell'informazione e l'astronomia.

Di recente la citizen science ha iniziato a sfruttare internet per reclutare migliaia o anche centinaia di migliaia di volontari che, lavorando come una vera e propria "community" virtuale, possono dare il proprio contributo alla ricerca. Nei dieci anni appena passati c'è stato un cospicuo incremento dei progetti di CS e molti altri ne sorgeranno in futuro, di pari passo con il progresso delle tecnologie dell'informazione.

# Parte II

Gli esperimenti in cui la comunità scientifica è impegnata oggi indagano dimensioni fuori dalla portata della percezione umana: l'incommensurabilmente piccolo e le distanze siderali. In entrambi i casi si tratta di dimensioni impercettibili. Sia che si parli di genetica, di neuroscienze, di fisica quantistica, di cosmologia, le apparecchiature sperimentali, le strumentazioni sviluppate dalla ricerca di avanguardia, in grado di portare l'umanità a nuove scoperte, sono diventate ormai opere di ingegneria molto complesse, mastodontiche, onnicomprensive, con un contenuto di tecnologia che coinvolge ambiti anche molto distanti dalla disciplina per cui erano stati originariamente progettati.

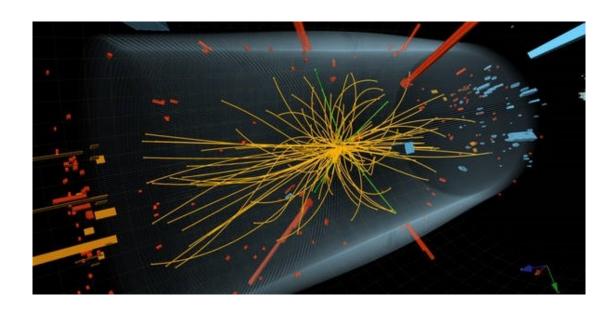
Inoltre, la scienza degli ultimi decenni, ha portato alla specializzazione delle discipline. Le discipline si sono ramificate in branche diverse che piano piano, sono diventate esse stesse delle discipline a sè stanti con campi di ricerca autonomi.

L'aumentata complessità dell'orizzonte scientifico ha portato inevitabilmente all'aumento dei dati e degli elementi di analizzare. Così oggi abbiamo un' enorme mole di dati da osservare, catalogare, analizzare, molti più di quanto i ricercatori da soli siano in grado di gestire. Questo è particolarmente evidente per le scienze pure, come la fisica, la biologia, la scienza dell'informazione, l'astronomia.

Gli ultimi 5 anni appena trascorsi sono stati anni di grande fermento per la comunità scientifica mondiale in particolare per i fisici. Infatti l'umanità è stata in grado di costruire e mettere a punto apparecchiature sperimentali mastodontiche che hanno portato a scoperte storiche, che sono diventate a pieno diritto momenti fondamentali dello sviluppo scientifico e che hanno aperto e apriranno spiragli di conoscenza nuovi e imprevedibili da qui agli anni che ci attendono. Le due sfide più rappresentative in questo senso sono la costruzione e il perfezionamento di LHC al CERN di Ginevra che ha già portato alla scoperta della "particella di Dio" e la costruzione di una rete mondiale di antenne per la rilevazione delle onde gravitazionali.

## Capitolo 1

# INTRAPPOLARE LA PARTICELLA DI DIO



Correva l'anno 1964 e il professor Peter Higgs, fisico teorico britannico, passeggiava tra le colline scozzesi del Cairngorm. Immerso in un'intensa riflessione, improvvisamente venne folgorato da una fascinazione, un'idea che gli avrebbe cambiato la vita. Tornato nel suo laboratorio, dichiarò di aver maturato "una grande idea". Quell' idea, che fu successivamente rielaborata e sviluppata con grande accuratezza, era il cosiddetto "Bosone di Higgs", ribattezzato in seguito la "particella di Dio".

Per capire che cosa è questa particella e perchè è così importante dobbiamo fare un ulteriore passo indietro agli inizi del '900. La fisica di quel periodo stava attraversando una fase di profonda crisi dei suoi fondamenti causata dall' osservazione sperimentale di fenomeni sconosciuti e sconcertanti. Fenomeni nuovi che la teoria e i modelli esistenti non erano in grado né di spiegare né tantomeno di prevedere. Per far tornare i conti, gradualmente, tutte le più importanti variabili della fisica «classica», che fino ad allora potevano assumere qualsiasi valore senza soluzione di continuità, vengono riviste e i fisici trovano che le grandezze non possono più assumere qualsiasi valore con continuità, ma solo alcuni valori discreti "permessi", che dipendono dal sistema fisico preso in esame. È il tramonto della fisica classica e l'alba della fisica quantistica. Dalla fine degli anni '20 del '900, si susseguono teorie quantistiche via via più complesse ed esaustive, fino ad arrivare alla teoria di riferimento odierna: il "modello standard". Questa teoria contiene e descrive tutte le forze e le particelle finora scoperte che compongono il nostro universo e negli anni è stato in grado di prevederne molte altre che non erano ancora state scoperte dimostrandosi una teoria affidabile e consistente. Perchè l'universo funzioni come lo conosciamo oggi, il modello standard prevede la presenza di una particella, il bosone di

Higgs appunto, che, tramite un meccanismo descritto dal fisico scozzese, si ritiene sia quella particella responsabile di conferire la massa a tutte le altre particelle elementari. Questo meccanismo è spiegato molto semplicemente da Fabiola Gianotti, insigne fisica italiana, attuale direttrice generale del CERN.

«All'inizio dell'universo subito dopo il big bang, le particelle elementari erano dei puri fiotti di energia senza massa e scorrazzavano nell'universo primordiale alla velocità della luce. Col passare del tempo la temperatura è scesa e ha raggiunto un certo valore chiave per cui è entrato in azione il campo di Higgs. Il campo di Higgs può essere immaginato come un campo che permea il vuoto, una "melassa" in cui è immerso lo spazio vuoto, le nostre particelle invece possiamo vederle come delle biglie diverse tra loro che corrono in questo spazio. Questa melassa, conferisce al vuoto una sorta di attrito e le biglie vengono "frenate" in modo diverso a seconda della loro superficie. Se è liscia, la particella passa attraverso la melassa senza essere frenata e rimane pura energia. Ma se è più rugosa, viene frenata di più e acquista massa. Il bosone di Higgs è la particella "associata al campo di Higgs" e la sua presenza è la prova della presenza del campo di Higgs, la melassa che rallentando le biglie, conferisce loro massa.

I fisici del CERN all'interno dell'esperimento LHC (Large Hadron Collider) "acceso" nel 2008, sono riusciti a ricreare in laboratorio le condizioni di energia e di temperatura dei primi istanti di vita dell'universo, poco dopo il Big Bang. Finchè in una conferenza tenuta nell'auditorium del CERN il 4 luglio 2012, veniva dato l'annuncio della scoperta di una particella compatibile con il bosone di Higgs. Seduto in platea era presente lo stesso Higgs, visibilmente commosso. L' intuizione che il fisico scozzese ebbe nel 1964 si materializza nel 2012: è la storia della forza di un pensiero che appoggiandosi agli indizi e alla ragione, è stato capace di viaggiare lontano nel futuro, così tanto che occhi e mani hanno avuto bisogno di un nuovo secolo per seguirlo. È la storia di un'idea che si materializza nella realtà e che rivoluziona la scienza.

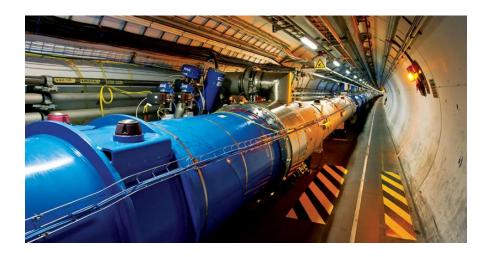


Fabiola Gianotti e Peter Higgs al Cern, nel giorno dell'annuncio della scoperta del bosone di Higgs

#### 1.1 LHC



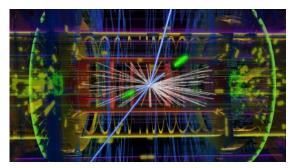
LHC (Large Hadron Collider) è l'acceleratore di particelle più potente nonchè la macchina più grande mai costruita dall'umanità. È un acceleratore ubicato presso il CERN di Ginevra, al confine tra la Francia e la Svizzera, in una regione compresa tra l'aeroporto di Ginevra e i monti Giura e costruito all'interno di un tunnel sotterraneo di forma anulare lungo 27 km a 100m di profondità media, originariamente scavato per realizzare il Large Electron-Positron Collider (LEP), il precedente acceleratore di particelle del CERN, oggi smantellato.



La macchina accelera fasci di adroni (particelle che risentono della forza nucleare) a velocità prossime a quelle della luce, in direzioni opposte, e li fa scontrare in quattro punti strategici dell'anello, nei quali sono stati installati i quattro principali esperimenti dell' acceleratore: ATLAS (A Toroidal LHC ApparatuS), CMS (Compact Muon Solenoid), LHCb (LHC-beauty) e ALICE (A Large Ion Collider Experiment). Questi enormi apparati analizzano minuziosamente le particelle e le energie che si vengono a creare nelle collisioni. Dal 10 Settembre 2008 (data della prima collisione), ad oggi, dentro LHC sono stati iniettati miliardi di fasci di adroni, producendo miliardi di miliardi di collisioni. Questo perchè la comparsa del bosone di Higgs è un evento molto raro.



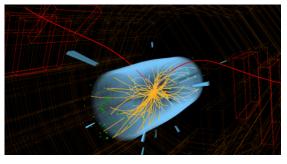
(a) Il rivelatore ATLAS



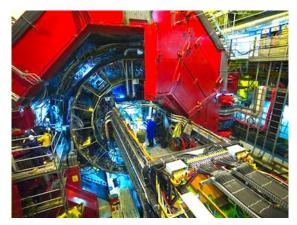
(b) Una collisione in ATLAS



(c) Il rivelatore CMS



(d) Una collisione in CMS



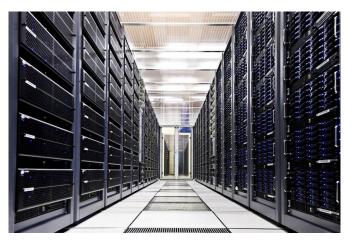
(e) Il rivelatore ALICE



(f) Il rivelatore LHC beauty

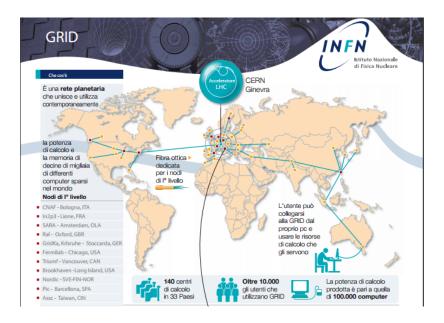
#### 1.1.1 GRID: processare un flusso enorme di dati

Le collisioni che avvengono in LHC producono una mole sconfinata di dati, stimati ogni anno in circa 15 milioni di gigabyte, pari a una pila di CD di 20mila metri, che corrisponde a 61 volte l'altezza della torre Eiffel (342 metri). Una quantità enorme di informazioni da analizzare che richiede un'infrastruttura informatica globale che permetta lo scambio veloce dei dati e in grado di aiutare i ricercatori a processarli. Questa infrastruttura è nata e si chiama GRID. GRID è una rete planetaria che nasce al



Centro di elaborazione primario dei dati al Cern

CERN di Ginevra e unisce e utilizza contemporaneamente la potenza di calcolo e la memoria di decine di migliaia di differenti computer sparsi nel mondo ed è stata sviluppata proprio per immagazzinare, processare, condividere e rendere accessibili i dati prodotti dall'acceleratore LHC. È una rete di calcolatori sparsi su scala globale formata da 11 centri di elaborazione che prendono il nome di nodi principali, che ricevono i dati direttamente da LHC e li smistano capillarmente a tutta la rete di nodi minori in tutto il globo. L'italia è in prima linea in questo progetto e l'INFN (Istituto Nazionale di Fisica Nucleare) è uno dei promotori principali del progetto Grid e ospita al CNAF di Bologna uno degli 11 nodi di primo livello di GRID.



Grazie a GRID gli scienziati hanno a disposizione una grande potenza di calcolo che ha permesso non solo la rivelazione del Bosone di Higgs ma consentirà anche di effettuare simulazioni numeriche di problemi estremamente complessi, come comprendere l'evoluzione dell'Universo dopo il Big Bang, l'effetto del riscaldamento globale, la ricerca di farmaci contro importanti malattie come la malaria o il cancro.

#### 1.2 Progetti di citizen science

#### 1.2.1 Lhc@home

CMS

Lhc@home è la piattaforma di calcolo distribuito con cui ogni utente dotato di un computer, scaricando il software apposito, può mettere a disposizione la potenza di calcolo del proprio device per aiutare gli scienziati del CERN a migliorare il funzionamento di LHC. Lhc@home, comprende progetti diversi a cui l'utente può aderire, contribuendo ai diversi esperimenti di LHC:

• ATLAS@home svolge simulazioni dell'esperimento ATLAS che i ricercatori confronteranno poi con i dati reali, ottenendo così utili raffronti per l'eventuale scoperta di nuove particelle

• Beauty svolge simulazioni utili per studiare la fisica del "bottom quark"

• CMS@home svolge simulazioni dell'esperimento CMS che i ricercatori confronteranno poi con i dati reali, ottenendo così utili raffronti per l'eventuale scoperta di nuova fisica

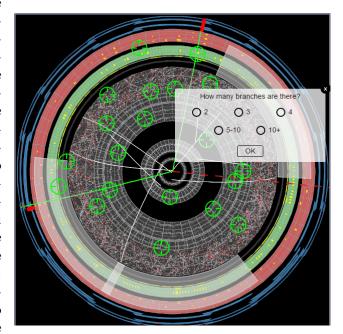
• SixTrack simula il percorso delle particelle attraverso l'acceleratore per evidenziare le traiettorie che queste seguirebbero. I dati prodotti vengono poi utilizzati per migliorare i parametri di funzionamento della macchina, per collimare meglio i fasci, rendendone le traiettorie più stabili, aumentando così la probabilità degli scontri

• Test4Theory simula le collisioni di particelle ad alta energia aiutando gli scienziati a calibrare la teoria con i risultati sperimentali.

Il progetto, partito nel 2004, fa parte di una forma ben consolidata di citizen science, si basa infatti sulla piattaforma BOINC (Berkeley Open Infrastructure for Network Computing), sistema non commerciale e senza scopo di lucro. L'unico obiettivo è quello di creare una community di utenti volontari che mettano in condivisione le loro risorse informatiche per creare una rete di calcolo distribuito di grande potenza che aiuti la comunità scientifica nella ricerca.

#### 1.2.2 Higgs hunters

È un progetto di citizen science che punta a coinvolgere il pubblico nello studio delle proprietà del bosone di Higgs. Come? Arruolando cacciatori di Higgs volontari che avranno il compito di cercare nuovi possibili decadimenti del bosone tra le migliaia d'immagini delle collisioni prodotte a LHC e fotografate dal rivelatore dell'esperimento ATLAS. Higgs Hunters è un progetto nato dalla collaborazione tra l'esperimento ATLAS, l'Università di New York, l'Università di Oxford e Zooniverse, un portale che riunisce numerosi progetti di citizen science. L'iniziativa segue il lancio del portale Open Data del Cern dove sono attualmente analizzabili i dati delle collisioni registrate dall'esperimento CMS nel 2010, oltre a una serie

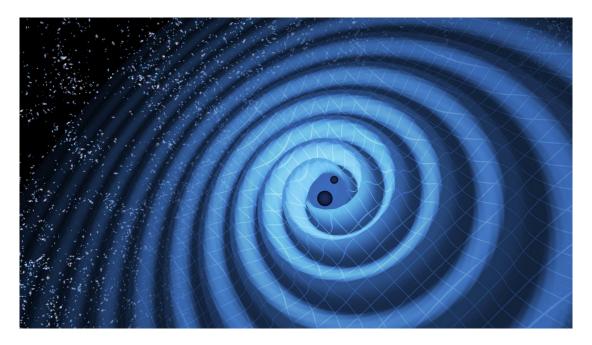


Una collisione su Higgs Hunters

di dati provenienti dagli esperimenti ALICE, ATLAS, CMS and LHCb e destinati alle scuole. "A tutti i volontari viene chiesto di analizzare le immagini prodotte dalle collisioni protone-protone per cercare decadimenti esotici del bosone di Higgs, previsti dai modelli di fisica oltre il Modello Standard, per esempio in particelle senza carica che sono invisibili ai rivelatori", spiega Anna Di Ciaccio, responsabile nazionale di ATLAS per l'INFN. "Queste particelle esotiche possono però decadere a loro volta in altre particelle cariche che sono facilmente identificabili anche ad occhio nudo nel rivelatore di tracce di ATLAS poiché producono quello che comunemente si chiama un vertice secondario (un punto del rivelatore in cui nascono nuove tracce), mentre sono difficilmente identificabili dai computer". Qui entra in gioco la community di Higgs hunters che esaminando e classificando a occhio immagini di collisioni reali di LHC e simulazioni create al pc, potranno dare indicazioni utili ai fisici per migliorare gli algoritmi usati per identificare questi vertici secondari.

### Capitolo 2

# ASCOLTARE LO SCIABORDARE DELLE ONDE



Facciamo un altro tuffo nel passato. Siamo nel 1915. Albert Einstein ha da poco dato alla luce la sua teoria della relatività generale in cui rivoluziona la comprensione dei fenomeni su grande scala. La relatività generale riformula i concetti di spazio e tempo e completa la legge di gravitazione universale proposta da Newton nel '600. Secondo Newton, la forza gravitazionale che due corpi dotati di massa sentono l'uno a causa della presenza dell'altro, è proporzionale al prodotto delle loro masse e inversamente proporzionale al quadrato della misura della distanza a cui si trovano. La legge venne espressa matematicamente da Newton con la celebre equazione:

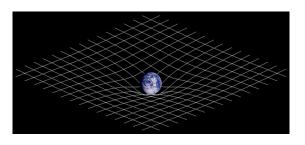
$$F = G \cdot \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

- $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \frac{Nm^2}{kg^2}$  è la costante di gravitazione universale
- m<sub>1</sub> e m<sub>2</sub> sono le masse dei due corpi in esame
- r è la distanza tra i due corpi

La teoria presentava però delle incompletezze che avevano fatto sorgere inevitabilmente dei problemi. Ad esempio, se il Sole fosse improvvisamente esploso, la Terra, a circa 144 milioni di chilometri di distanza, sarebbe stata istantaneamente scaraventata via dalla sua orbita ellittica come se l'informazione dell'evento si fosse potuta trasmettere a velocità infinita, superando quindi anche la velocità della luce prodotta dall'esplosione,

che come si sa impiegherebbe circa 8 minuti e mezzo per giungere fino a noi. Questo è incompatibile con la teoria della relatività ristretta che Einstein aveva già elaborato e verificato nel 1905, che impedisce a qualsiasi tipo di informazione di viaggiare più veloce della luce. Newton inoltre descrisse la gravità come un' interazione a distanza, senza però chiarire che cosa fosse effettivamente a provocarla e a trasmetterla. Come era possibile che due oggetti separati da milioni di chilometri sentissero la presenza l'uno dell'altro? Newton stesso fu consapevole del problema: «È inconcepibile che la materia bruta e inanimata possa (senza la mediazione di qualcosa di immateriale) agire e influire su altra materia senza reciproco contatto. [...] Che la gravità sia qualcosa di innato, di inerente ed essenziale alla materia, sì che un corpo possa agire a distanza su di un altro attraverso il vuoto, senza la mediazione di qualche altra cosa in virtù della quale, e per mezzo della quale, l'azione a distanza o la forza possa essere trasportata da un corpo all'altro, è per me un'assurdità così grande da farmi credere che nessun uomo il quale abbia una reale consapevolezza nelle materie filosofiche possa mai farla propria. La gravità deve necessariamente essere causata da un agente il quale agisca in modo costante secondo certe leggi; ma se questo agente sia materiale o immateriale è questione che lascio decidere ai lettori». Newton quindi, accettata l'esistenza della gravità, si mise a descriverne quantitativamente gli effetti, ma non riuscì mai a chiarirne completamente il "funzionamento".

Nella relatività generale invece, spazio e tempo vengono riuniti all'interno di un ente quadrimensionale, contenente le 3 dimensioni spaziali più quella temporale: lo spazio-tempo. Einstein introduce l'idea che la presenza della massa, la materia, «deforma» lo spazio-tempo che, di rimando, in accordo con il principio di azionereazione di Newton, agisce sulla massa



stessa, vincolandola a muoversi su traiettorie ben definite. Ragionando per immagini possiamo vedere lo spazio-tempo come un lenzuolo, sul quale vengono appoggiate le biglie che possiamo identificare come le masse. «Sembra che l'idea chiave sia venuta a Einstein tramite uno dei suoi famosi esperimenti mentali, immaginando un uomo chiuso dentro un ascensore nello spazio. L'uomo nell'ascensore non può sapere se la forza che lo tiene attaccato al pavimento è dovuta alla gravità o all'accelerazione, quindi la conclusione di Einstein è che accelerazione e gravità siano equivalenti e debbano avere gli stessi effetti. Einstein quindi riformula e integra in un quadro coerente la gravità di Newton, la relatività ristretta e chiarisce anche che cosa trasmette la gravità: il tessuto spaziotemporale. In questo modo rifiuta senza mezzi termini i concetti di azione a distanza e di "etere luminifero" che avevano tenuto banco nella fisica prima di lui. I marinai sanno benissimo che la rotta più breve per unire due punti su un mappamondo non è mai una linea retta, a causa della curvatura della Terra; Einstein immagina in maniera simile, che anche lo spazio sia curvo come la superficie terrestre. Questo spiega anche come mai la luce, priva di massa, possa curvare a causa della gravità. La luce segue il percorso più breve dovuto alla curvatura dello spazio. Come nel caso di una nave sulla superficie terrestre, questo percorso non è una retta ma una curva.

Einstein va oltre e dalle equazioni della relatività generale arriva a dedurre l'esistenza di increspature dello spazio-tempo. Queste increspature sono le onde gravitazionali. Un secolo più tardi le onde gravitazionali sono state rivelate. La storia si ripete: anche Maxwell, dalle equazioni del campo elettromagnetico aveva ipotizzato e previsto l'esistenza delle onde elettromagnetiche (poi rivelate da Hertz qualche anno più tardi). Quando un oggetto molto pesante accelera, modifica la curvatura locale nello spazio, producendo onde simili a quelle lasciate da un motoscafo che naviga in mare. In opportune condizioni, così come le cariche elettriche accelerate emettono radiazione sotto forme di onde elettromagnetiche, le masse accelerate dovrebbero emettere energia sotto forma di onde gravitazionali, deformazioni dello spazio-tempo che si propagano come onde. Lo spazio-tempo si increspa e oscilla come la superficie di un lago e l'oscillazione si propaga alla velocità della luce.

Fino alla loro scoperta eravamo riusciti a rilevarne la presenza solo indirettamente. La prima prova indiretta dell'esistenza di questo tipo di onde era stata ottenuta studiando il comportamento di una pulsar in orbita attorno ad un'altra stella di neutroni, un sistema scoperto nel 1974 da Joseph Taylor e Russell Hulse. Le osservazioni di questo sistema binario sono durate diversi anni e hanno dimostrato che le loro orbite si stanno riducendo esattamente al tasso previsto dalle equazioni di Einstein, che prevedono una perdita di energia del sistema sotto forma, appunto, di onde gravitazionali. Nel 1993 Taylor e Hulse ha ricevuto il Premo Nobel. Le prime onde gravitazionali sono state rilevate il 14 settembre 2015 ma la comunità scientifica per cautelarsi si è concessa un periodo di verifica dei dati sperimentali e l'annuncio della scoperta è stato diramato solo qualche mese più tardi, l'11 febbraio 2016. L'onda è stata soprannominata GW150914 ed è stata prodotta da un evento catastrofico: la coalescenza (collisione) di due buchi neri che si sono avvicinati l'un l'altro fino a compenetrarsi e a dare origine ad un nuovo buco nero più grande. Le onde gravitazionali rivelate sono state prodotte nell'ultima frazione di secondo del processo di fusione dei due buchi neri, di massa equivalente a circa 29 e 36 masse solari, in un unico buco nero ruotante più massiccio di circa 62 masse solari: le 3 masse solari mancanti al totale della somma sono state espulse sotto forma di energia con le onde gravitazionali: tre interi «Soli» vaporizzati in pochi istanti che hanno viaggiato milioni di anni nello spazio interstellare e sono arrivate fino a noi.



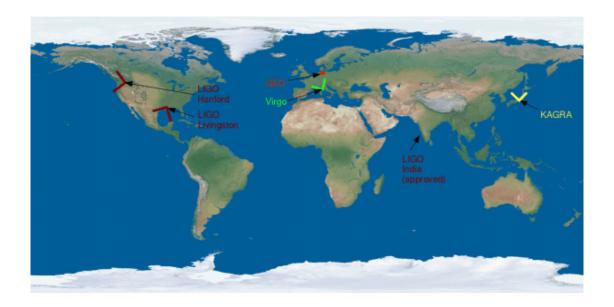
La figura illustra la sequenza del processo di merging di due buchi neri di 29 e 36 masse solari, situati a circa 1,3 miliardi di anni luce. Da sinistra a destra, si nota la fase di 'inspiral', cioè la danza stellare che vede i due oggetti orbitare l'uno attorno all'altro, il 'merger', cioè il momento in cui i due oggetti collidono, e la fase di 'ringdown', relativa alla formazione di un oggetto più massivo di 62 masse solari. Il quarto pannello mostra la fase dell'emissione delle onde gravitazionali che si dipartono dalla sorgente verso lo spazio e di cui l'interferometro LIGO ha catturato le flebili vibrazioni che hanno raggiunto la Terra lo scorso il 14 settembre 2015. Infine, l'ultimo pannello mostra le due forme d'onda, rivelate dai due interferometri LIGO, che tradotte in suono diventano simili a una sorta di 'cinguettio' (o chirp), che possiamo paragonare all'eco della collisione dei due buchi neri.

#### 2.1 Il problema del rumore

I segnali gravitazionali hanno un grande vantaggio: nel loro viaggio attraverso lo spaziotempo interagiscono molto debolmente con la materia e arrivano sulla Terra intatti e genuini così come vengono creati alla sorgente. Non vengono assorbiti e ci danno così accesso a fenomeni che sono avvenuti quando l'universo e le strutture cosmiche si stavano per formare, fino a spingerci ad epoche remote, appena 200 milioni di anni dopo il Big Bang. Il prezzo da pagare per riuscire ad ascoltare questi impercettibili "vagiti del cosmo" è l'assoluta difficoltà nella rilevazione che deve essere spaventosamente precisa ed è soggetta a tutta una serie di disturbi e rumori che si sovrappongono e alterano la misurazione corretta del segnale. Qualsiasi vibrazione terrestre (un motore su una lontana autostrada, un treno, le onde dell'oceano distante chilometri), produce effetti molto più rilevanti. Per dare un'idea di cosa produce un' onda gravitazionale possiamo dire che l'oscillazione conseguente al suo passaggio, cambierebbe la distanza tra due veicoli spaziali che volano a 5 milioni di chilometri di distanza di circa un picometro, una misura 100 milioni di volte inferiore alla larghezza di un capello umano. Isolare da ogni disturbo esterno i rivelatori è una sfida al limite del possibile. La sfida si può vincere solo combinando i risultati di rivelatori posti in luoghi molto lontani tra loro. Sono necessari almeno due rivelatori, distanti migliaia di km. Solo il segnale presente in entrambi merita di essere analizzato. Mentre i disturbi saranno diversi, un eventuale segnale reale verrà registrato da entrambi in una ordinata sequenza temporale. In effetti, vedendo qual è il rivelatore che registra prima il segnale, è possibile avere un'idea, grossolana ma sempre utile, sulla direzione di provenienza dell'onda. La comunità scientifica mondiale ha già incominciato a realizzare una "rete" di rivelatori di onde gravitazionali. Questa rete comprende i 2 rivelatori principali dell'esperimento LIGO, che hanno captato la prima onda gravitazionale, che si trovano negli Stati Uniti, il rivelatore VIRGO che si trova in Italia, nella campagna intorno a Pisa e una quarto interferometro, GEO600, che opera in Germania, nei pressi di Hannover. Per migliorare la precisione di rilevazione, nei prossimi anni la rete verrà ampliata e altri rivelatori sono attualmente in costruzione.

#### 2.1.1 L'orecchio globale

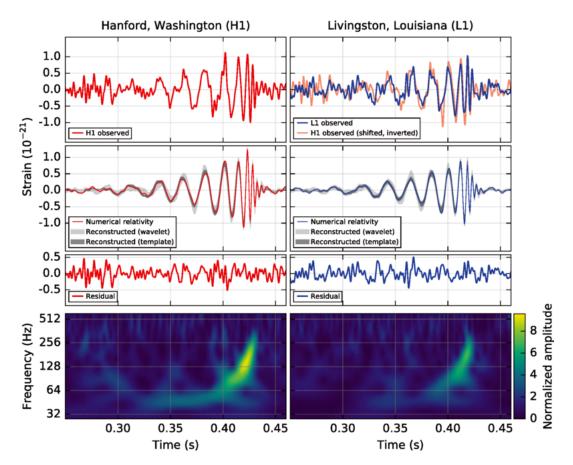
Un rivelatore di onde gravitazionali è una sorta di "orecchio-antenna" che ascolta segnali provenienti dallo spazio in tutte le direzioni. Per localizzare con precisione la direzione di provenienza di un'onda gravitazionale è necessario un processo di "triangolazione". C'è bisogno di almeno 3 antenne dislocate in 3 diverse posizioni del globo a grandi distanze tra loro che lavorino di concerto, minimizzando eventuali rumori e perturbazioni locali nei segnali e localizzando quanto più precisamente possibile la sorgente che ha prodotto l'onda gravitazionale. Come detto, nei prossimi anni, la rete di rilevazione verrà implementata ulteriormente, con la costruzione di due nuovi rivelatori. Il KAGRA (Kamioka Gravitational Wave Detector), in costruzione nella miniera Kamioka in Giappone, sarà pronto nel 2018. INDIGO sarà un terzo "gemello" di interferometri LIGO, sarà costruito in India e avvierà la presa dati nel 2019. L'Italia, con l'INAF (Istituto Nazionale Astrofisica), l'INFN e le università, è nella partita che, si spera, si chiuderà nei prossimi anni. «Il nostro paese ha una lunga tradizione in questo campo di ricerca, sin dai tempi di Edoardo Amaldi. Il gruppo diretto dal professor Amaldi costruì le prime antenne che, a quei tempi erano dei cilindri di alluminio di più di 2000 kg», spiega Valeria Ferrari, ricercatrice dell'INFN. «Negli anni 70 cominciò la costruzione dei rivelatori interferometrici che ha portato all'antenna Virgo di seconda generazione che sta per entrare in funzione. Fin dall'inizio l'INFN ha avuto un ruolo fondamentale, non solo perché ha cofinanziato i vari progetti, ma anche perché ha fornito strutture e personale che ha validamente affiancato il personale universitario. In tutti questi anni l'Italia è stata in prima linea, sia nella realizzazione di tecnologie avanzate (adottate anche dagli americani) che hanno permesso di raggiungere le attuali sensibilità dei rivelatori, sia nello studio teorico e fenomenologico delle sorgenti e dei segnali attesi».



#### LIGO



LIGO (Laser Interferometer Gravitational Wave Observatory) è il rivelatore che il 14 Settembre 2015, ha "sentito" per primo GW150914, la prima onda gravitazionale della storia. LIGO è un progetto che coinvolge gli scienziati del Caltech e del Massachusetts Institute of Technology (MIT) di Boston e solo la fase della sua costruzione (terminata nel 1999) è costata 365 milioni di dollari ed è il più grande e ambizioso progetto mai finanziato dalla National Science Fondation statunitense. Uno dei suoi ideatori è lo scienziato Kip Thorne che è famoso presso il grande pubblico per essere stato il consulente scientifico del regista Christopher Nolan durante la scrittura della sceneggiatura del film "Interstellar", del 2014. Il fisico era convinto dell'esistenza delle onde gravitazionali a tal punto da scommettere con Stephen Hawking sulla loro scoperta. LIGO si trova negli Stati Uniti e si compone di due interferometri gemelli ma separati, gestiti come un unico grande osservatorio che monitora e processa i dati di entrambi. Un impianto si trova a Livingston, in Louisiana, l'altro ad Hanford, nello stato di Washington, a oltre tremila chilometri di distanza. Ogni interferometro è lungo 4 chilometri ed è formato da due bracci disposti ad angolo retto (a forma di "L"), al cui interno corrono raggi laser riflessi centinaia di volte da un sistema di specchi. I laser viaggiano avanti e indietro all'interno di tubi a vuoto spinto (diametro 1,2 metri) che permettono di misurare con una precisione elevatissima la distanza degli eventi tra i due specchi di super precisione su cui si riflettono questi raggi. La tecnica utilizzata è quella dell'interferometria: lo specchio semitrasparente suddivide il fascio laser in due parti, poi inviate nei due bracci dell'interferometro fino a incontrare altri due specchi che rimbalzano il laser. E proprio questi specchi sono i veri sensori: passando attraverso i rilevatori, le onde gravitazionali disturbano, anche se di pochissimo, il viaggio dei fasci laser. LIGO era già in grado di rilevare una variazione di questa distanza fino alla soglia di un millesimo delle dimensioni di un protone. Oggi, con i nuovi aggiornamenti, si spinge addirittura fino a una sensibilità dieci volte superiore, arrivando a percepire contrazioni o allungamenti di un decimo di miliardesimo di miliardesimo di metro  $(10^{-19}m)!$ 



I due segnali captati dai due interferometri di LIGO a confronto

#### VIRGO

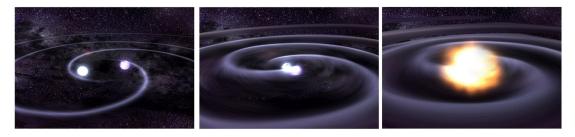


VIRGO è composto da due bracci di 3 km, perpendicolari l'uno all'altro. Un braccio si estende approssimativamente nella direzione sud-nord e l'altro in quella est-ovest.

VIRGO è un gigantesco interferometro laser che si trova su suolo italiano, presso Cascina, una cittadina vicino a Pisa, sul sito dell'Osservatorio Gravitazionale Europeo (EGO). VIRGO è stato progettato e costruito da una collaborazione fra il Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS) francese e dall'INFN italiano. È stato attivato dal 2007 fino al 2011 ma non avendo rilevato nessun onda gravitazionale è stato sottoposto a un profondo programma di aggiornamento. Questa lunga pausa migliorerà di 10 volte la sua sensibilità e si prevede che "Advanced Virgo" la sua versione "upgraded", inizierà a funzionare alla fine del 2016, entrando nella cosiddetta era degli interferometri gravitazionali di seconda generazione. La migliore sensibilità di Advanced Virgo consentirà di osservare sorgenti di onde gravitazionali dieci volte più distanti, cioè esplorare un volume di universo 1000 volte più grande di prima. In un così grande volume la probabilità di rivelare un segnale è enormemente più grande. Ci si potrebbe attendere di captare un segnale di onde gravitazionali ogni mese o addirittura ogni settimana. Sebbene attualmente non sia ancora in funzione, c'è un accordo tra gli scienziati di VIRGO e di LIGO per effettuare insieme l'analisi dei dati e ci sono protocolli severissimi di validazione e comunicazione dei risultati sottoscritti da entrambi. Quindi anche se i dati attualmente sono presi solo dall'esperimento americano, o in futuro potrebbe accadere l'opposto, questi vengono analizzati dalla collaborazione e sono patrimonio comune.

#### 2.2 La ricerca della controparte elettromagnetica

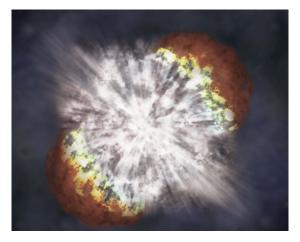
Un'onda gravitazionale è generata da eventi cosmici estremi, piuttosto rari e complessi, che coinvolgono attori diversi, e irradiano l'universo di materia ed energia.



La coalescenza di buchi neri o pulsar



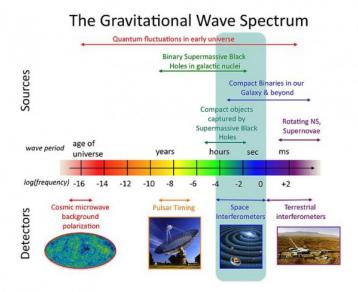
La rotazione di una stella di neutroni



L'esplosione di una supernova

Inoltre, anche subito dopo il big bang, negli istanti primordiali dell'universo, potrebbero essere state generate un buon numero di onde gravitazionali.

Nel cosmo potrebbero esistere tanti altri tipi di sorgenti ancora da scoprire. Bisogna sottolineare che un'onda gravitazionale non viene mai generata da sola ma è sempre accompagnata dall'emissione di una considerevole quantità di radiazione elettromagnetica: la cosiddetta controparte elettromagnetica. Questa controparte ha una variabilità molto ampia nello spettro elettromagnetico a seconda dell'evento-sorgente.



Ogni evento produce onde gravitazionali con una banda di frequenza caratteristica, che rappresenta l'impronta del tipo di evento stesso. Le onde gravitazionali hanno uno spettro di frequenze molto ampio, così come ampia è la variabilità di controparte elettromagnetica che le accompagna

Così diventa oggi centrale la collaborazione tra rivelatori e telescopi, scienziati e osservatòri installati in tutto il mondo e in orbita, per raccogliere in un' analisi incrociata i "messaggi" diversi che ci arrivano dal cosmo. Quando anche VIRGO tornerà in funzione, la rete di rivelatori sarà più affidabile e tramite la "triangolazione" dei segnali sarà possibile localizzare le sorgenti in una regione di cielo ragionevolmente limitata. Da lì si potranno poi puntare nella direzione giusta i telescopi terrestri e spaziali che analizzano la luce nelle varie porzioni del suo spettro (i telescopi radio, infrarossi, a microonde, ottici,  $\chi$  e  $\gamma$ ) registrando così le controparti elettromagnetiche. Per far questo sono stati già avviati importanti programmi osservativi e il progetto "INAF Gravitational Wave Astronomy" è uno di questi. Grazie a questa collaborazione siglata con LIGO E VIRGO, quando un possibile segnale gravitazionale viene rivelato, i ricercatori dell'INAF vengono allertati e hanno accesso ai dati sulla stima della posizione in cielo da cui proviene, potendo così orientare il puntamento dei telescopi.

Enzo Brocato, principal investigator dell' Osservatorio Astronomico INAF di Roma, precisa: «in caso di "alert" il nostro team INAF, che lavora H24 (ed è composto da ricercatori di Napoli, Roma, Pisa, Urbino, Bologna, Padova e Milano), è in grado di recepire l'informazione e attivare le osservazioni ai telescopi, primo fra tutti il VST, che è in grado di ottenere rapidamente immagini profonde e dettagliate su un campo di 1 grado quadrato. Nel caso in cui questo telescopio, o altri di gruppi con cui collaboriamo, individuino degli oggetti (non noti) che abbiano variato la loro luminosità in modo significativo nelle ultime ore/giorni, siamo pronti ad attivare i telescopi della classe 4/8 metri e ottenere gli spettri per caratterizzarne la natura ed eliminare i tanti falsi candidati che ci si aspetta di trovare in un'area di cielo cosi vasta. Nel caso venisse identificato un candidato importante, si seguirebbe la sua evoluzione in tutte le bande elettromagnetiche, per ricavare tutti i dati possibili per studiare la fisica dell'evento combinando le misure gravitazionali ed elettromagnetiche». Nel Maggio dello scorso anno lo European Gravitational Observatory a Cascina in provincia di Pisa ha ospitato un meeting internazionale dove oltre 20 gruppi indipendenti di fisici e astrofisici hanno discusso metodi ed esposto le loro strategie per individuare controparti elettromagnetiche. L'INAF è stato uno degli organizzatori di questo meeting collaborando all'organizzazione scientifica sia alla logistica. Le principali linee di ricerca comprendono: il VLT Survey Telescope in grado di coprire circa 100 gradi quadrati in una notte in 2 bande di radiazione  $(\gamma)$ radio), osservazioni multi-banda da terra e dallo spazio per coprire quasi tutto lo spettro elettromagnetico e la ricerca di sorgenti transienti (come Supernovae e Lampi  $\gamma$ ) e fotometria di precisione in campi stellari affollati; Da adesso quindi diventa cruciale raccogliere, analizzare e catalogare le osservazioni dei telescopi effettuate in ogni banda dello spettro elettromagnetico.

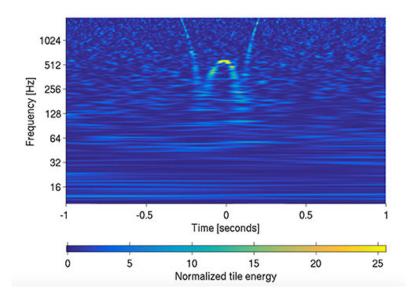
#### 2.3 Progetti di citizen science

#### 2.3.1 Einstein@home

Einstein@home è il progetto di calcolo distribuito dedicato all'analisi dei segnali gravitazionali. Come il "cugino" Lhc@home sfrutta la piattaforma software BOINC per attingere tramite la rete alle potenza di calcolo dei computer dei volontari che accettano di partecipare, Il computer, di ogni volontario, quando non è occupato a processare, diventa una parte della struttura di analisi dati dell'esperimento. In questo modo si crea un' enorme rete di calcolo globale simultaneo di grande potenza che è destinata a crescere sempre di più all'aumentare dei membri della community. A tutto dicembre 2015, più di 846.000 volontari di 214 nazioni hanno partecipato al progetto, facendolo diventare il terzo progetto BOINC più popolare. Circa 44.000 utenti attivi contribuiscono a fornire una potenza computazionale di 2.200 teraFLOPS, il che pone Einstein@Home tra le prime 20 posizioni nella lista dei TOP500 supercomputer. Einstein@home è progettato per raccogliere i dati provenienti dalla rete di rilevatori gravitazionali terrestre, spaziale(con l'entrata in funzione del rilevatore gravitazionale spaziale eLISA e di altri che nei prossimi anni verranno spediti in orbita), dei telescopi sparsi in tutto il mondo e dei satelliti. «Per noi che cerchiamo segnali gravitazionali continui, che sono debolissimi, poter contare sulla potenza di calcolo di Einstein@Home è assolutamente cruciale. Non potremmo raggiungere i livelli di sensibilità che raggiungiamo con le nostre ricerche senza i nostri volontari», spiega Maria Alessandra Papa, Research Group Leader del progetto presso il "Max Planck Institute for Gravitational Physics" di Hannover.

#### 2.3.2 Gravity Spy

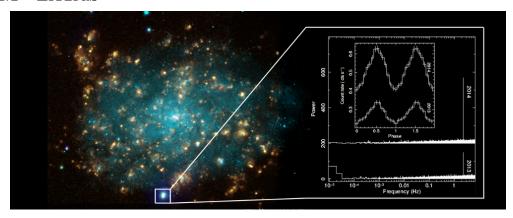
Il progetto Gravity Spy, cerca l'aiuto di volontari per analizzare il "rumore" che appare nei rivelatori di onde gravitazionali che abbiamo descritto nella sezione precedente. I segnali captati dai rivelatori vengono convertiti in "pittogrammi". I disturbi nei segnali producono sp Il progetto Gravity Spy, cerca l'aiuto di volontari per analizzare il "rumore" che appare nei rivelatori di onde gravitazionali che abbiamo descritto nella sezione precedente. I segnali captati dai rivelatori vengono convertiti in "pittogrammi". I disturbi nei segnali producono spesso dei "falsi positivi" nei pittogrammi (glitch), che devono essere riconosciuti e scartati. I software non sono ancora così "furbi" da riconoscere bene tutte le morfologie di micro-vibrazioni accidentali e disturbi interni. È proprio qui che entrano in gioco i citizen scientists, che devono distinguere e catalogare i vari tipi di glitch rilevati nei "pittogrammi". Inoltre, le informazioni vengono utilizzate per creare un ambiente di apprendimento per gli algoritmi informatici. Mano a mano che questa base di dati si sviluppa in dimensione, infatti, i computer imparano sempre meglio a classificare i glitch. Questo, chiaramente, aiuta gli scienziati a eliminare il rumore dai rivelatori in maniera totalmente automatica o, quanto meno, permette di valutare un glitch molto più rapidamente durante l'analisi manuale dei dati.esso dei "falsi positivi" nei pittogrammi (glitch), che devono essere riconosciuti e scartati. I software non sono ancora così "furbi" da riconoscere bene tutte le morfologie di micro-vibrazioni accidentali e disturbi interni. È proprio qui che entrano in gioco i citizen scientists, che devono distinguere e catalogare i vari tipi di glitch rilevati nei "pittogrammi". Inoltre, le informazioni vengono utilizzate per creare un ambiente di apprendimento per gli algoritmi informatici. Mano a mano che questa base di dati si sviluppa in dimensione, infatti, i computer imparano sempre meglio a classificare i glitch. Questo, chiaramente, aiuta gli scienziati a eliminare il rumore dai rivelatori in maniera totalmente automatica o, quanto meno, permette di valutare un glitch molto più rapidamente durante l'analisi manuale dei dati.



Secondo quando riporta il sito di Gravity Spy, più di 1400 volontari si sono registrati per la fase di validazione del software, realizzando oltre 45 mila classificazioni e scoprendo due nuovi tipi di glitch. Una volta a regime, gli appassionati potranno cimentarsi sulle nuove immagini create da LIGO quando, nei prossimi mesi, inizierà il secondo turno di presa dati a sensibilità aumentata.

#### 2.4 Progetti di school science

#### 2.4.1 EXTraS

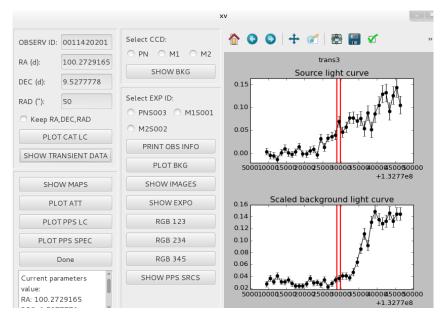


Il progetto EXTraS – Exploring the X-ray Transient and variable Sky - sarà la più sensibile e completa ricerca di segnali variabili mai effettuata del cielo nella banda di frequenza dei raggi X. Il telescopio EPIC ("European Photon Imaging Camera", rivelatore europeo di fotoni a immagini), installato a bordo della missione XMM-Newton dell'ESA, sta raccogliendo dati nella banda dei raggi X da oltre 14 anni e ha una combinazione unica di sensibilità, campo di vista, risoluzione angolare e temporale. Recentemente approvato e finanziato dall' Unione Europea con 2.5 milioni di euro nell'ambito del bando Spazio del Settimo Programma Quadro, EXTraS sfrutta l'archivio dei dati EPIC che è una vera miniera d'oro per la ricerca e lo studio di sorgenti e fenomeni variabili anche molto deboli o rari. Si svilupperà su 3 anni, durante i quali verrà analizzato l'intero archivio e tutti i risultati saranno resi pubblici, così come i nuovi strumenti software che verranno sviluppati per l'analisi dei dati. Come in una caccia al tesoro, EXTraS sonderà le informazioni tutt'ora inseplorate e sepolte in dati serendipiti raccolti.

"Crediamo che il nostro catalogo di sorgenti variabili possa diventare un importante punto di riferimento per il futuro, quando nuove grandi surveys multilunghezze d'onda diverranno disponibili", osserva Ruben Salvaterra (INAF/IASF Milano). "Raccogliamo e sfruttiamo una lunga esperienza legata allo sviluppo e alla gestione dello strumento EPIC, unita a notevoli competenze nell'analisi temporale di diverse classi di oggetti astrofisici, per fornire quello che riteniamo essere un importante servizio alla comunità astronomica".

EXTraS comprende anche il progetto "A caccia di Buchi Neri", un laboratorio in cui gli studenti delle scuole superiori si improvvisano ricercatori. I partecipanti potranno lavorare sui risultati preliminari di EXTraS e saranno introdotti alla ricerca scientifica e all'industria nel campo della tecnologia spaziale e delle sue applicazioni.

Il laboratorio nel suo complesso è simile a un gioco di ruolo, con un approccio molto pratico, preceduto da una breve formazione teorica. Contribuisce a un'attività di più ampio respiro: individuare e caratterizzare le sorgenti variabili scoperte da algoritmi automatizzati sviluppati dai ricercatori, confrontando i risultati forniti dagli studenti con quelli forniti dal gruppo di lavoro EXTraS dedicato alla classificazione delle sorgenti. Da questo punto di vista, l' attività didattica si presta anche come un interessante esperimento di scienza dei cittadini: coinvolgere persone non esperte (ma formate) in un compito complesso di classificazione di sorgenti astronomiche.



Una schermata del software per l'analisi delle sorgenti

#### 2.4.2 A caccia di buchi neri con SalsaJ

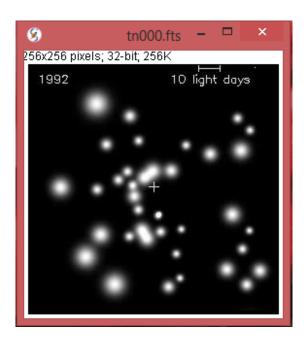
SalsaJ è un software gratuito e libero, scaricabile al sito http://www.euhou.net/index.php/salsaj-software-mainmenu-9.

Si tratta di un programma che permette di analizzare immagini astronomiche reali ottenute dai telescopi della rete globale europea di telescopi automatici che operano via internet o da strumenti didattici (Webcam, radiotelescopi) sviluppati "ad hoc". É stato sviluppato nell'ambito del progetto EU-HOU (Hands-On Universe, Europe), progetto che si allinea alla necessità generale di rinnovare l'insegnamento delle scienze. I destinatari principali sono quindi gli insegnanti, coinvolti attraverso uno schema di scuole pilota e azioni di ampia diffusione, ma anche i neofiti dell'astronomia possono scoprire pianeti, misurare crateri e vulcani, misurare la distanza di una galassia. senza grandi difficoltà.



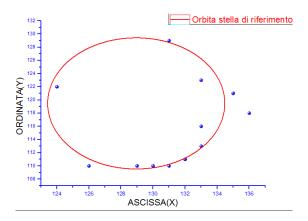
#### Stima della massa del buco nero al centro della Via Lattea

A titolo di esempio, un esercizio che si può fare con SalsaJ è la stima della massa del buco nero supermassivo che si trova al centro della nostra galassia, la Via Lattea. Si comincia scaricando qui il pacchetto che contiene un archivio di fotografie del centro della nostra galassia. Queste immagini sono foto nella banda infrarossa di stelle orbitanti attorno al centro galattico della Via Lattea, dove è nascosto il buco nero. Queste osservazioni sono state possibili solo recentemente grazie all' avvento di obiettivi ad alta risoluzione nella banda infrarossa perchè il centro della nostra galassia è sepolto sotto una coltre di pulviscolo e nubi che rendono "nebulosa" l'osservazione. Sono state scattate 12 foto che ritraggono il centro della Via Lattea osservato nell' arco di un periodo di tempo di quasi 11 anni. Aprendole tutte contemporaneamente con SalsaJ( $File \hookrightarrow Apri$ ), sono ben visibili diverse stelle che ruotano attorno al centro galattico. Le loro traiettorie sono influenzate dall'attrazione gravitazionale molto intensa del buco nero supermassivo che si trova proprio al centro ed è indicato da una croce al centro delle immagini. Attraverso lo studio del loro moto si può ricavare una stima della massa del "mostro" gravitazionale.



Osservando le immagini in sequenza, si noterà come ci sia una stella che esibisce almeno una rotazione completa attorno al buco nero. La chiameremo più tardi "stella di riferimento". Cliccando su "Converti immagini in una sovrapposizione" ( $Immagine \hookrightarrow$ Sovrapposizioni), SalsaJ sovrappone i fotogrammi creando un' animazione progressiva che riprende la rotazione di diverse stelle attorno al centro galattico. Osservando l'animazione più volte, individuiamo la nostra stella di riferimento e prendendo nota della sua posizione immagine per immagine potremo risalire alla sua traiettoria. Torniamo alle immagini individuali cliccando su "Converti sovrapposizioni in un' immagine" (Immagine → Sovrapposizioni) e clicchiamo poi su "Disponi in cascata" dal menù "Finestra". Immagine per immagine, identifichiamo il centro della stella di riferimento con il pixel in cui la luminosità è maggiore. Solo passando con il mouse sull'immagine, sotto la barra del menù di SalsaJ, in basso a sinistra, compaiono le coordinate del pixel attraversato dalla freccina del mouse, seguite dal valore corrispondente di luminosità. Prendiamo nota immagine per immagine delle coordinate scelte come centro per la stella di riferimento. Con un programma di analisi dati, (Excel può essere adatto al caso) si procede a "plottare" i punti acquisiti in un grafico, per ricavare una traiettoria ellittica, la più fedele possibile.

In questo caso, con l'aiuto del software Origin e si è ricavata un'ellisse che rappresenta la migliore approssimazione dell'orbita della nostra stella di riferimento attorno al buco nero supermassivo.



Da qui è facile risalire alla misura della lunghezza del semiasse maggiore dell'ellisse misurata in pixel. Nel nostro caso, come si vede dalla figura qui sotto: b= 9,94 pixel.

| E   |   | Summary <u>▼</u> |           |                |           |                |         |                |         |                |           |  |  |
|-----|---|------------------|-----------|----------------|-----------|----------------|---------|----------------|---------|----------------|-----------|--|--|
|     |   |                  | xc        |                | ус        |                | а       |                | b       |                | Area      |  |  |
| - [ | Т |                  | Value     | Standard Error | Value     | Standard Error | Value   | Standard Error | Value   | Standard Error |           |  |  |
|     |   | ASCISSA,ORDINATA | 128,95015 | 0,41602        | 119,48677 | 0,56542        | 5,53236 | 0,48808        | 9,94666 | 0,63533        | 172,87732 |  |  |

Adesso dobbiamo convertire i pixel in una distanza e per farlo dopo aver selezionato dal menù lo strumento "seleziona linea retta", apriamo un fotogramma a caso di quelle che stiamo esaminando e misuriamo con questo strumento l'unità di misura standard di lunghezza nel pixel più in alto a destra a quanti pixel corrisponde.

$$10ld = 22, 5px \longleftrightarrow 1px = \frac{10}{22, 5}ld$$

A questo punto convertiamo la lunghezza del semiasse maggiore prima in giorni luce (ld) e poi in metri, (ci servirà per il prossimo calcolo) sapendo che un giorno luce è la distanza che la luce percorre in un giorno (a una velocità di 300 mila km/s). Alla fine dei calcoli il nostro semiasse maggiore risulta:

$$b = 11070178 \cdot 10^7 m$$

Qui entrano in gioco le leggi di Keplero. Le leggi di Keplero sono 3 leggi sulle orbite dei pianeti. Sono state formulate dall'astronomo tedesco Giovanni Keplero dal 1608 al 1619, basandosi sulle osservazioni dell'astronomo danese Tycho Brahe. La legge che interessa a noi per ricavare la massa del buco nero supermassivo al centro della Via Lattea, è la terza: «I quadrati dei tempi che i pianeti impiegano a percorrere le loro orbite sono proporzionali al cubo delle loro distanze medie dal sole.» Questa legge è valida anche per i satelliti che orbitano intorno ai pianeti e può essere espressa in forma matematica nel modo seguente:

$$\frac{T^2}{b^3} = \frac{4\pi^2}{GM}$$

• G è la costante di gravitazione universale

$$G = 6,67 \cdot 10^{-11} N \cdot m^2 \cdot kg^{-2}$$

- M è la massa del sistema che nel nostro caso possiamo tranquillamente identificare con quella del buco nero
- T=14 anni ed è il periodo di rivoluzione della nostra stella di riferimento

Convertiamo il periodo di rivoluzione attorno al buco nero della nostra stella di riferimento in secondi:

$$T = 441504 \cdot 10^3 s$$

Ora "giriamo" la formula della terza legge di Keplero per ricavare la massa che ci interessa, ovvero quella del buco nero:

$$M_{BH} = \frac{4\pi^2 b^3}{GT^2}$$

Facendo i calcoli con i valori che abbiamo e arrotondando per difetto il risultato arriviamo al risultato:

$$M_{BH} \approx 4 \cdot 10^6 \cdot 10^{30} kg$$

D'altro canto, sappiamo che la massa del sole è stimata approssimativamente in:

$$M_S \approx 2 \cdot 10^{30} kg$$

e confrontando le due masse troviamo che la massa del nostro buco nero è di circa 2 milioni di masse solari

$$M_{BH} \approx 2 \cdot 10^6 M_S$$

Per stimare la bontà del nostro risultato è utile confrontarlo con il risultato di un vero studio scientifico qui, di cui riportiamo il riassunto qui sotto.

#### Stellar proper motions in the central 0.1 pc of the Galaxy

#### A. Eckart and R. Genzel

Max-Planck-Institut für Extraterrestrische Physik, Giessenbachstraße, D-8046, Garching bei München, Germany

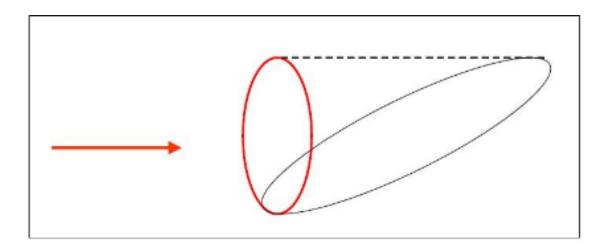
Accepted 1996 September 9. Received 1996 September 6; in original form 1996 August 6

#### ABSTRACT

We report the first results of a programme to measure proper motions of stars in the innermost core of the Galaxy. From high-resolution near-infrared imaging over the last four years we have determined proper motions for 39 stars between 0.03 and 0.3 pc from the compact radio source Sgr A\*. For 19 of these the derived motions are more significant than  $4\sigma$  in at least one coordinate. Proper motion and radial velocity dispersions are in very good agreement, indicating that the stellar velocity field on average is close to isotropic. Taking radial and proper motion data together the dynamic evidence is now strong that there is a  $2.45(\pm 0.4) \times 10^6$ -M<sub> $\odot$ </sub> central dark mass located within  $\leq 0.015$  pc of Sgr A\*. Its mass density is at least  $6.5 \times 10^9 \,\mathrm{M_\odot}$ pc<sup>-3</sup>, excluding the fact that the central mass concentration is in form of a compact white dwarf or neutron star cluster. In addition, we have detected significant changes in the structure of the innermost complex of stars in the immediate vicinity of Sgr A\*, implying in at least one case stellar motions of  $\geq 1500 \text{ km s}^{-1}$  within  $\sim 0.01$ pc of the compact radio source. Including this preliminary evidence, the inferred density of the central dark mass would then have to be in excess of 10<sup>12</sup> M<sub>o</sub> pc<sup>-</sup> implying that the central mass concentration is probably a single massive black hole.

Come si vede lo studio attesta la massa del buco nero circa pari a 2 milioni e mezzo di masse solari e confrontando i due risultati si vede come questo risultato non sia poi così lontano da quello "ortodosso", ottenuto con metodi matematici più raffinati e complessi. Questo fa capire le potenzialità di SalsaJ: nonostante sia un software di grande semplicità d'uso consente anche ai non esperti di astronomia di poter effettuare misurazioni delicate con un buon livello di precisione.

Vediamo che il nostro risultato è un po' sottostimato rispetto a quello reale ma questo è facilmente spiegabile. Infatti abbiamo bidimensionalizzato su un ellisse l'orbita di una stella che sta nello spazio e che quindi è tridimensionale. La nostra traiettoria soffre quindi di un effetto di proiezione, vale a dire, proiettare una sfera su un piano. La traiettoria è sottostimata e la massa del buco nero che è direttamente proporzionale risulta sottostimata anch'essa.



# Parte III PROSPETTIVE

La rilevazione delle onde gravitazionali e del bosone di Higgs sono conquiste storiche per la scienza. Sia per la fisica teorica, perchè hanno confermato decenni e decenni di modelli e speculazioni, ma anche e soprattutto per l'enorme impulso che queste scoperte hanno dato alla conoscenza tutta. Per arrivarci infatti, come abbiamo visto, l'umanità si è dovuta produrre e coordinare in uno sforzo immenso che ha portato alla realizzazione di strumentazioni grandiose come LIGO e LHC con un contenuto di tecnologia fino a poco tempo fa impensabile: gioielli di innovazione e ingegneria ottenuti costruendo e plasmando "ad hoc" nuovi materiali industriali con un grado di precisione mai raggiunto prima.

In futuro, con le onde gravitazionali potremo studiare, e scoprire, sorgenti molto lontane e mai viste prima e questo allargherà moltissimo il nostro orizzonte scientifico: la rete di rivelatori gravitazionali terrestri e spaziali in via di implementazione, aprirà una nuova finestra di osservazione sull'universo. Potremo servirci di questi nuovi oggetti anche per investigare con precisione i primi attimi di vita dell'universo.

Dalla terra invece, con LHC, potremo investigare la materia nell'infinitamente piccolo e forse capire di che cosa è composta la "materia oscura" o svelare il mistero sul comportamento strano dei neutrini.

«A mio avviso, se si riuscirà, in modo sistematico, a correlare in una visione unitaria le informazioni provenienti dai fenomeni elettromagnetici, dai neutrini e dalle onde gravitazionali (il cosiddetto "multi-messenger"), credo che potremo avere una visione nuova e dettagliata dell'Universo», commenta Salvatore Capozziello, Presidente della Società Italiana di Relatività Generale. «Per fare un paragone - continua Capozziello - penso a Galileo: quando inventò il telescopio aprì un "nuovo cielo", molto più ampio delle concezioni tolemaica o copernicana allora attuali. Credo che quello che sta accadendo ora sia simile. L'astronomia gravitazionale potrà aprire davvero l'accesso a nuovi mondi. Penso all'astrofisica che dovrà fare i conti con una nuova "radiazione"; penso alla fisica teorica che, per la prima volta, possiede un test diretto della gravitazione in campo forte e quindi sarà in grado di distinguere sperimentalmente tra le varie teorie; penso alla fisica di precisione, poiché la rivelazione delle onde gravitazionali pone sfide tecnologiche estremamente sofisticate. Da un punto di vista sociologico, questo dovrebbe insegnare molto a chi sostiene che la ricerca di base, con risultati applicativi non immediati, non serve a nulla».

Se l'orizzonte della conoscenza sta complicandosi progressivamente e con l'aumentare delle strumentazioni sempre più sofisticate che entreranno in funzione nei prossimi anni il flusso di dati da raccogliere e analizzare è destinato ad aumentare a dismisura, sull'altro versante, anche la società dell'informazione sta progredendo velocemente, di pari passo e la comunità scientifica si sta dotando di strumenti e infrastrutture sempre più potenti ed efficenti, in grado di approcciare e risolvere problemi sempre più complicati. La società dell'informazione grazie alla rete e alle tecnologie digitali sta rendendo la società civile sempre più società della conoscenza e in futuro le community di volontari di progetti di citizen science saranno sempre più numerose e renderanno le piattaforme di calcolo distribuito sempre più potenti ed estese. Ci aspettano dunque sicuramente interessanti, sfide sempre più complicate e multiformi ma anche nuove eccitanti scoperte.

# Bibliografia

- [1] A. Eckart e R. Genzel (1997), "Stellar proper motion in the central 0.1 pc of the Galaxy"
- [2] Greco, Pietro (2015), "La citizen science 2.0"
- [3] Magnani, Sara (2014), "La scienza di tutti, iniziative di citizen science nel mondo"
- [4] Samuelli, Andrea (2016), "La crisi del positivismo"
- [5] Meschia, Valentina (2016), "Citizen science, la scienza di tutti"

## Sitografia

#### Da media.inaf.it i seguenti articoli:

- "Onde gravitazionali: si stringe il cerchio" di Daniela Cipolloni
- "Una sfida da vincere al 150 per cento" di Luca Nobili
- "Relatività da polso" di Nicola Nosengo
- "Astri danzanti sull'orlo della gravità" di Marco Malaspina
- "Come ti trovo le sorgenti di onde gravitazionali" di Enzo Brocato
- "Albert sul surf" di Francesca Aloisio
- "LIGO: cosa c'è dietro la scoperta" di Eleonora Ferroni
- "Ecco le onde gravitazionali di Einstein" di Patrizia Caraveo
- "Cos'è che ha "sollevato l'onda"? Il ruolo dell'INAF" di redazione media Inaf
- "Epic ha fatto Extras" di redazione media Inaf
- "Aiuta la ricerca sulle onde gravitazionali" di Stefano Parisini

#### Da wikipedia, le seguenti voci:

- "Le onde gravitazionali"
- "Teoria della relatività"
- "Modello standard"
- "Lista di onde gravitazionali"
- "Teoria quantistica dei campi"
- "Gravitone"
- "Adrone"
- "Prima ossservazione di onde gravitazionali"
- "Bosone di Higgs"
- "Peter Higgs"
- "Etere luminifero"
- "Albert Einstein"
- "Esperimento di Michelson-Morley"
- "Large Hadron Collider"
- "Einstein@home"

euhou.net boincitaly.org virgo-gw.eu ligo.caltech.edu einsteinathome.org/it-it/about

<sup>&</sup>quot;Storia delle onde gravitazionali, lo spazio s'increspa come un lago", di Carlo Rovelli

<sup>&</sup>quot;Lezioni di scienze: il bosone di Higgs", da youtube

<sup>&</sup>quot;Kevin Schawinski: cyborgs in the Galaxy Zoo", da youtube