



Finanziato  
dall'Unione europea  
NextGenerationEU



Ministero  
dell'Università  
e della Ricerca



Italiadomani

PIANO NAZIONALE  
DI RIPRESA E RESILIENZA



Centro Nazionale di Ricerca in HPC,  
Big Data and Quantum Computing



Centro Nazionale di Ricerca in HPC,  
Big Data and Quantum Computing

## Analisi quasi-interattiva per *big data* con alto *throughput* per la Fisica delle Alte Energie

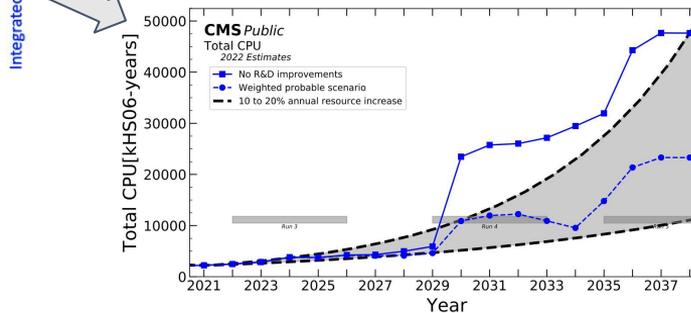
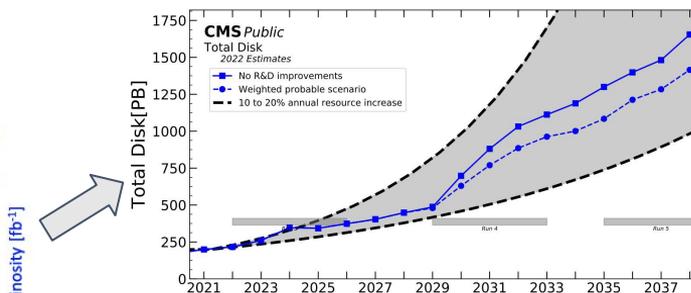
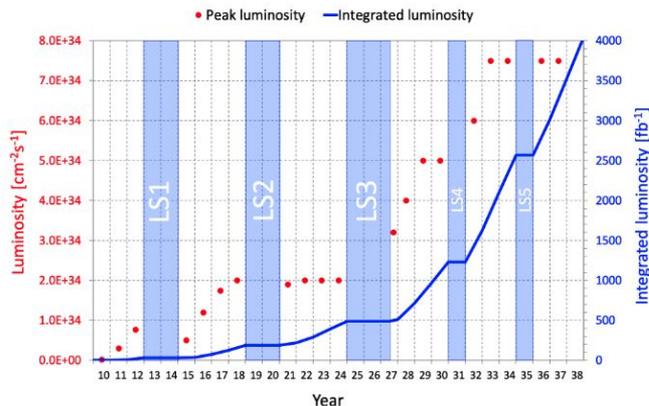
**Matteo Bartolini** (INFN e Università di Firenze) a nome dei membri dell'attività di Spoke 2 ICSC

IFAE 2024, Firenze, 3-5 Aprile 2024



# Motivazioni

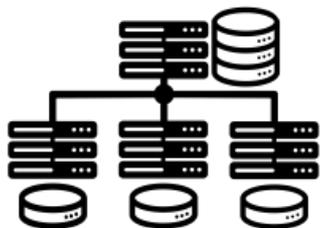
La fase di alta luminosità del Large Hadron Collider (LHC), l'acquisizione e l'analisi dei dati richiederà risorse di calcolo sempre maggiori (CPU, disco).



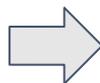
La crescente quantità e complessità dei dati porta la comunità HEP a:

- Ottimizzare l'utilizzo delle risorse esistenti
- Utilizzare data format migliori
- **Sviluppare nuovi modelli e strategie per l'analisi dei dati**

## Nuovi paradigmi per l'analisi dei dati (High-rate declarative interactive or quasi-interactive data analysis approach)



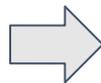
**Risorse eterogenee distribuite**



Sviluppo di soluzioni infrastrutturali efficienti e *user-friendly*



Nuovi software di analisi basati su approccio dichiarativo con workflow interattivi



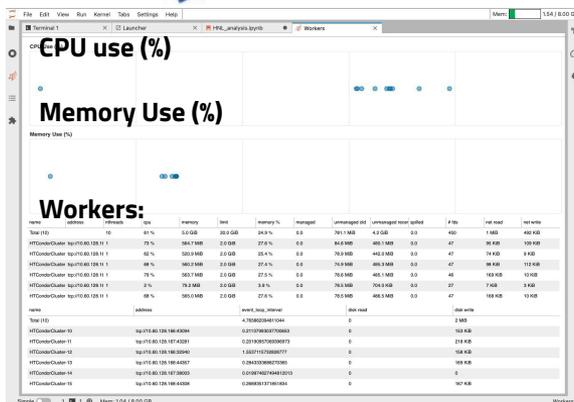
- Richiedono l'utilizzo di formati di dati ridotti
- Basati su strumenti di analisi dati all'avanguardia ([ROOT RDataFrame](#), [Coffea](#))
- Possibilità di scalarli ad alto throughput grazie a *backends* come [Dask](#)
- **Grande varietà di use-case!**

**In questo talk: sviluppo e valutazione delle performance di diverse analisi, per diversi esperimenti, con questo approccio innovativo nell'ambito di Spoke2 ICSC**

# Analisi dati HEP con ICSC



**ICSC**  
Centro Nazionale di Ricerca in HPC,  
Big Data and Quantum Computing



```

client = Client("localhost:25812")
client

~/usr/local/share/miniconda/lib/python3.10/site-packages/distributed/client.py:1389: VersionMismatchWarning: Mismatched versions found

```

Package	Client	Scheduler	Workers
lz4	4.0.8	None	4.0.8
msgpack	1.0.2	1.0.5	1.0.2
python	3.10.12	3.10.5	3.10.12
tblib	1.0.2	1.0.1	1.0.2

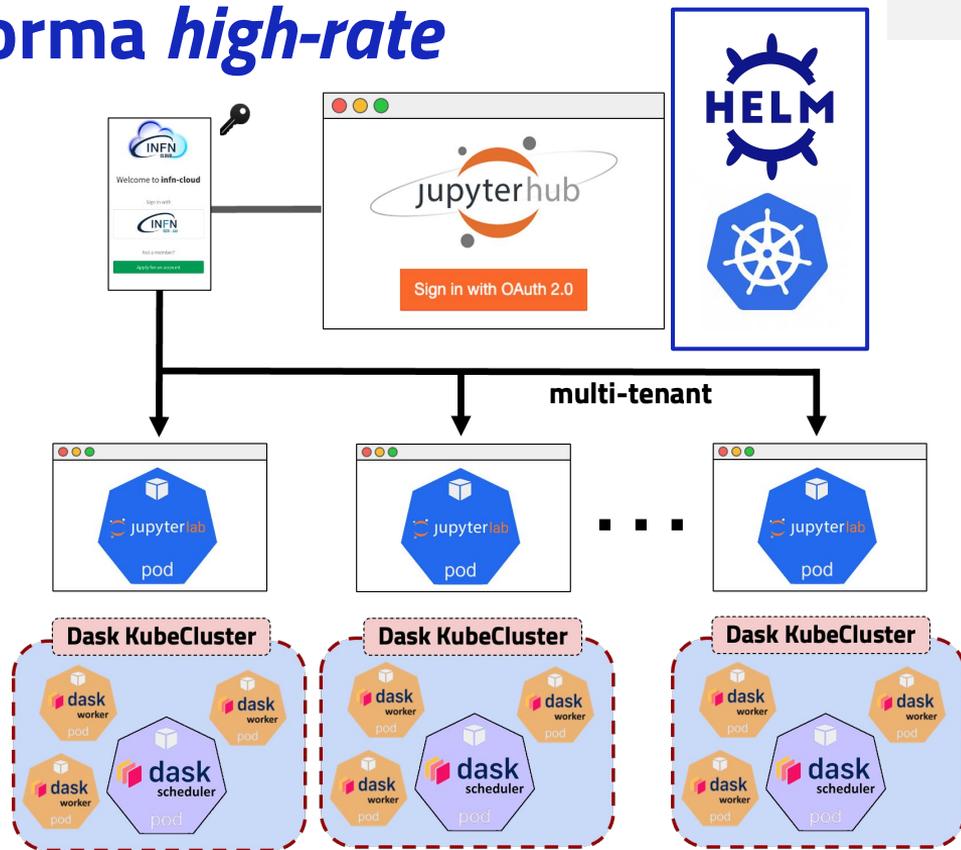
```

Client
Client-0f733808-e288-11ed-8168-7a393cc4282f
Connection method: Direct
Dashboard: http://localhost:3456/status
Scheduler Info
Scheduler

```

# La piattaforma *high-rate*

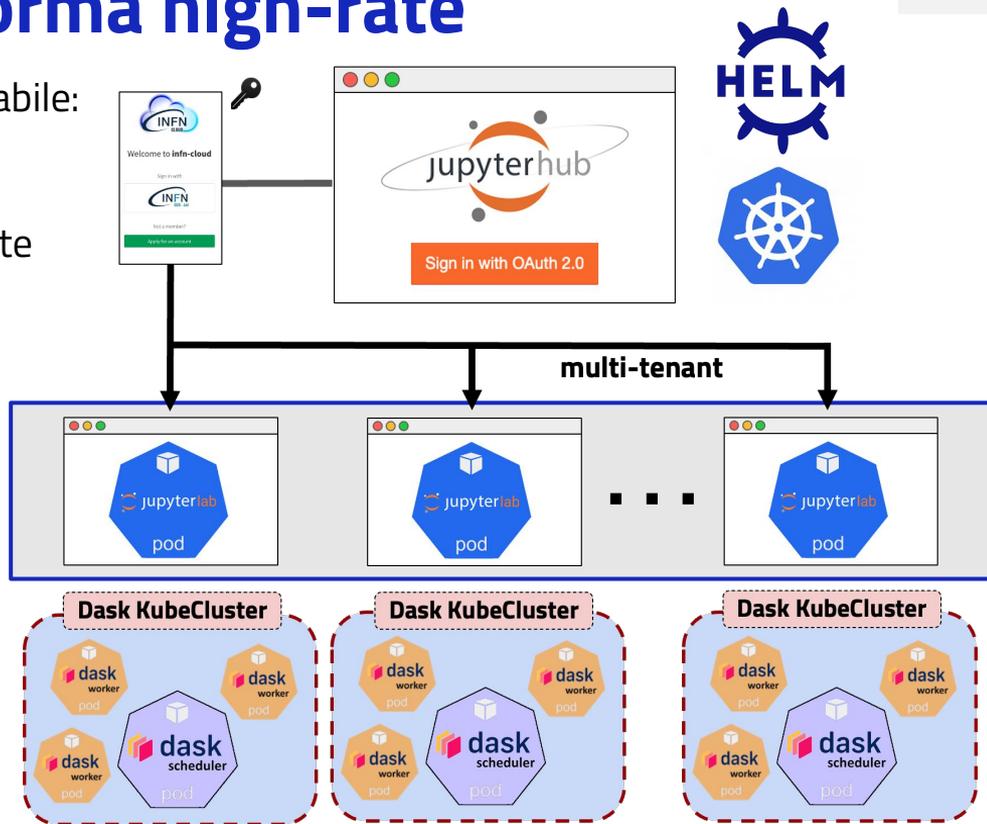
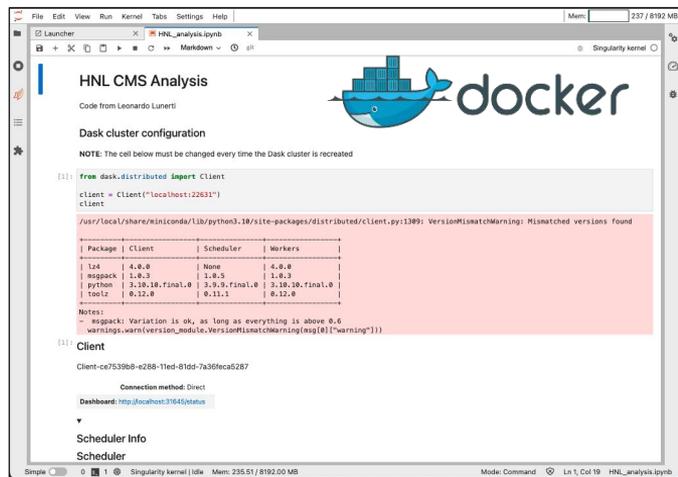
- Autenticazione con [INDIGO-IAM](#)
- Interfaccia [jupyterhub](#) con risorse allocate per l'utente
- L'utilizzo di Kubernetes per la orchestrazione e gestione di container - tramite il gestore di pacchetti [HELM](#) - permette un utilizzo delle risorse trasparente, flessibile e scalabile.



# La piattaforma high-rate

Interfaccia utente [Jupyterlab](#) flessibile e personalizzabile:

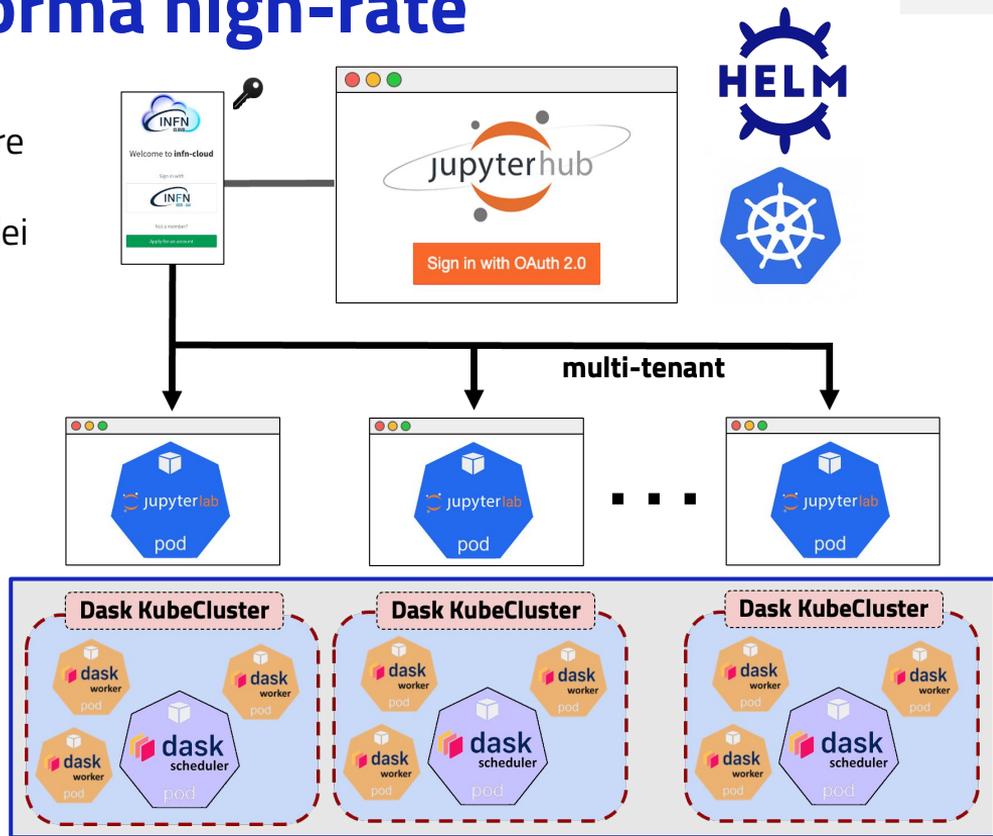
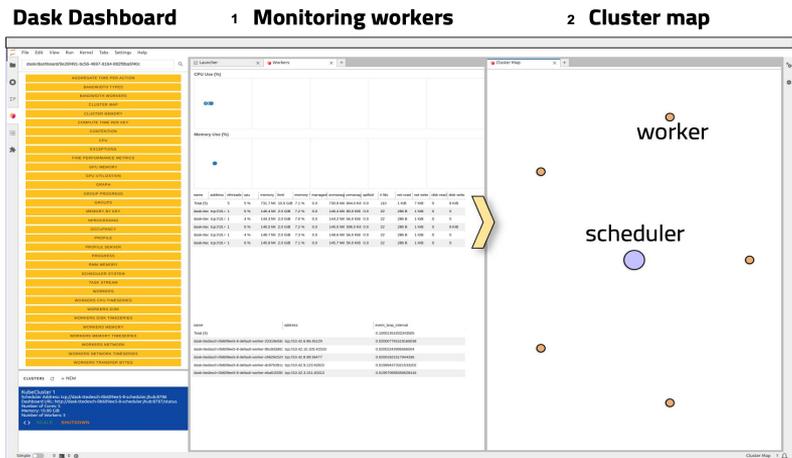
- Plugin aggiuntivi (es. [Dask](#))
- Contenitori [Docker](#) → ambiente di lavoro configurabile con librerie e software tipicamente specifici dei singoli esperimenti



# La piattaforma high-rate

Accesso alle risorse e monitoring:

- il plugin [Dask Labextension](#) permette di accedere ad una dashboard direttamente da Jupyterlab
- Possibilità di accedere alle metriche di utilizzo dei siti dove si fa offloading con [InfluxDB](#)



# Use-case di analisi dati HEP: Ricerca di un Leptone Pesante Neutro all'esperimento CMS

Ricerca di un leptone pesante neutro proveniente dal mesone D<sub>s</sub>, nello stato finale contenente un  $\mu$  e un  $\pi$ .

## Sfida:

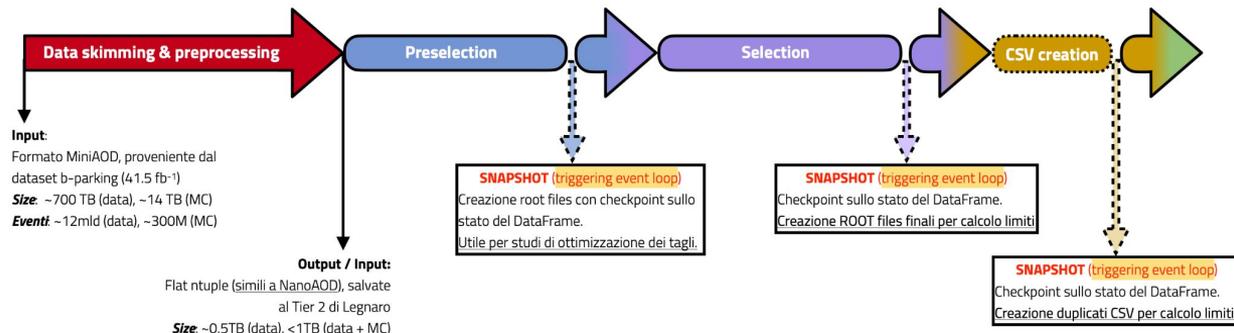
Analisi su grande mole di dati, proveniente dal b-parking dataset raccolto da CMS nel 2018.

Analisi implementata in [RDataFrame](#), che permette una parallelizzazione *multi-threaded*, e la possibilità di distribuire l'esecuzione con Dask;

Le varie operazioni (aggiungere colonne, filtrare, creare istogrammi), sono eseguite solo all'ultimo momento, attivando l'*event loop*.

Operazioni

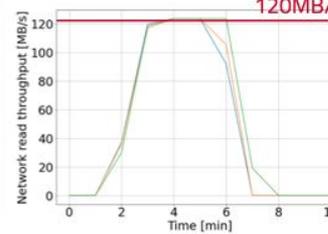
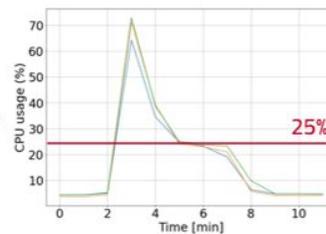
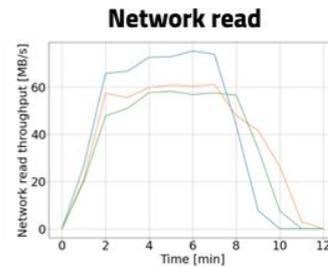
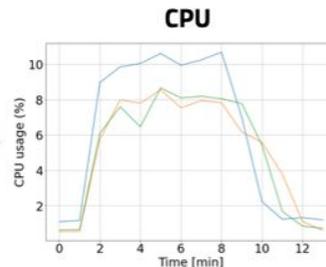
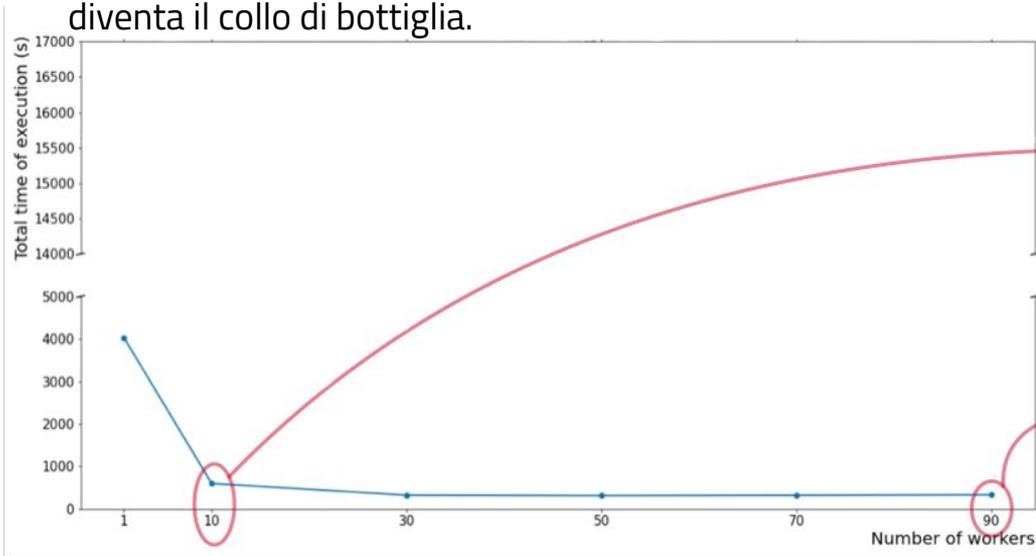
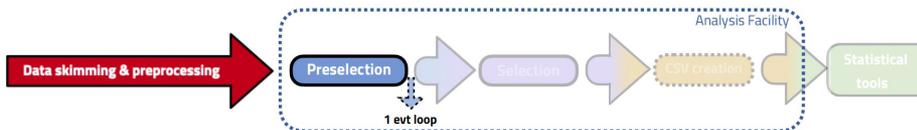
- Data reduction
- File format change
- Tagli di preselezione
- Applicazione pesi (MC, SF trigger, SF muon, PU)
- Selezione ottimizzata per categoria;
- Selezione migliori candidati HNL
- Ridefinizione pesi totali
- CSV temporaneo per incompatibilità con tool statistici (combine)



# Use-case di analisi dati HEP: Ricerca di Heavy Neutral Lepton all'esperimento CMS

**Test** su dataset parziale di b-parking (69 GB):

- un basso numero di workers porta alla saturazione della CPU assegnata;
- Aumentando il numero di workers, il tempo di IO diventa il collo di bottiglia.



120MB/s = 1Gb/s  
limite di banda dell'HW a disposizione

# Use-case di analisi dati HEP: simulazione di processi $Z \rightarrow e^+e^-$ al Future Circular Collider (FCCee)

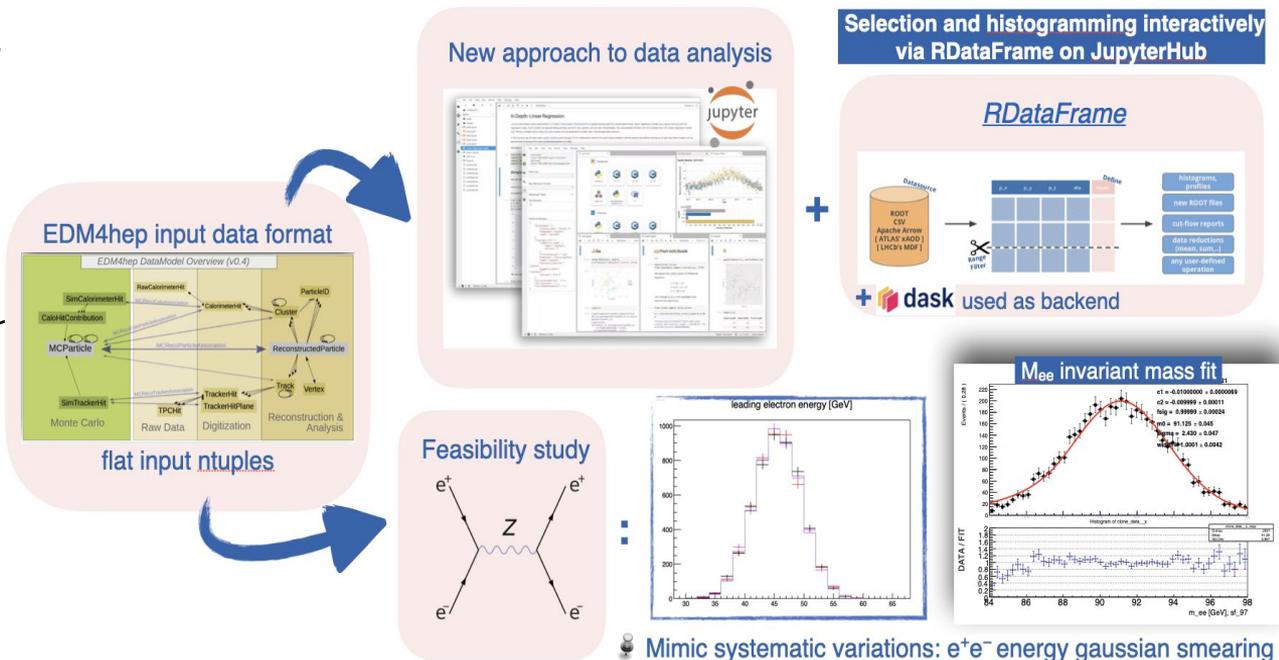
## Contesto:

- Studi per FCCee su canali di fisica di benchmark nel detector IDEA

## Strategia:

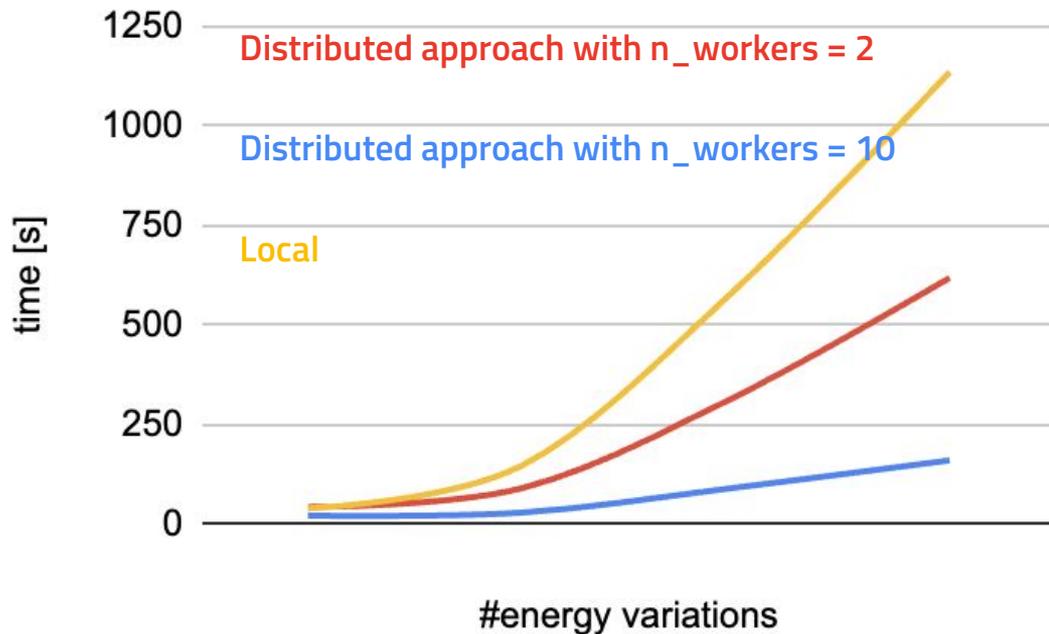
- Simulazione in EDM4HEP
- Smearing gaussiano applicato all'energia dell'elettrone per simulare la risposta del detector
- Fit sulla massa invariante  $m(ee)$  per la stima della risoluzione

Si confrontano le risorse richieste per eseguire l'analisi su 1M di eventi usando il nuovo approccio e quello "tradizionale"



# Simulazione di processi $Z \rightarrow e^+e^-$ al FCC: valutazione delle performance

11



L'approccio "distribuito" permette di dimezzare il tempo di esecuzione dell'analisi.

Inoltre, l'utilizzo di Dask+HTCondor dà un ulteriore miglioramento, che scala con il numero di workers.

# Use-case di analisi dati HEP: ricerca di vector-like quarks (VLQ) all'esperimento CMS

- ❑ Workflow composto da 2 step principali
  - a. Data preprocessing, calcolo di score attraverso modello ML. Utilizzando nanoAOD tools di CMS (pyROOT based)
  - b. Skimming e selezione tramite Interactive Analysis
    - i. Input N-tuple dal precedente step
    - ii. Selezione e calcolo delle variabili tramite RDataFrame
    - iii. Il processo viene distribuito tramite Dask
    - iv. Output disponibile in TH1D, o snapshot gestiti tramite storage remoto
- ❑ Framework ancora non completo, sono necessari altri processi da implementare che potrebbero rallentare il processo : sistematiche e, potenzialmente, ML application portata al secondo step
- ❑ Attualmente risultati molto promettenti, tempo ridotto da ~1d a ~3h in attesa delle performance del framework completo

## Continuous Integration pipeline triggering analysis execution

- L'idea è quella di sfruttare le funzionalità CI/CD Gitlab per avviare automaticamente l'analisi ogni volta che viene fatto un commit
- Se l'analisi ha un repository:
  - I runner di gitlab possono caricare l'immagine docker del framework sul quale viene girata l'analisi
- I runner di gitlab non possono essere usate per operazioni CPU-heavy , ma è possibile fare l'offloading a cluster esterni HTCondor
  - Primo test usando le risorse italiane di Tier-2
  - Facile metodo di autenticazione tramite token IAM

## Conclusioni

- L'era ad alta luminosità è una sfida senza precedenti che spinge gli esperimenti a ripensare i propri modelli di calcolo;
- L'approccio di analisi interattiva usando risorse distribuite appare molto promettente:
  - Beneficiando delle nuove risorse (in arrivo) da ICSC.
- Diversi use-case, provenienti dal mondo HEP, con nuovi paradigmi di analisi sono in fase di sviluppo:
  - Attività di *benchmark* in corso, per determinare potenziali benefici rispetto ad approcci tradizionali.

# Le attività di analisi HEP in ambito ICSC

15

Vector Boson Scattering ssWW analysis in hadronic tau and light lepton

Heavy Neutral Lepton search on heavy neutrinos in the  $D_s$  decays

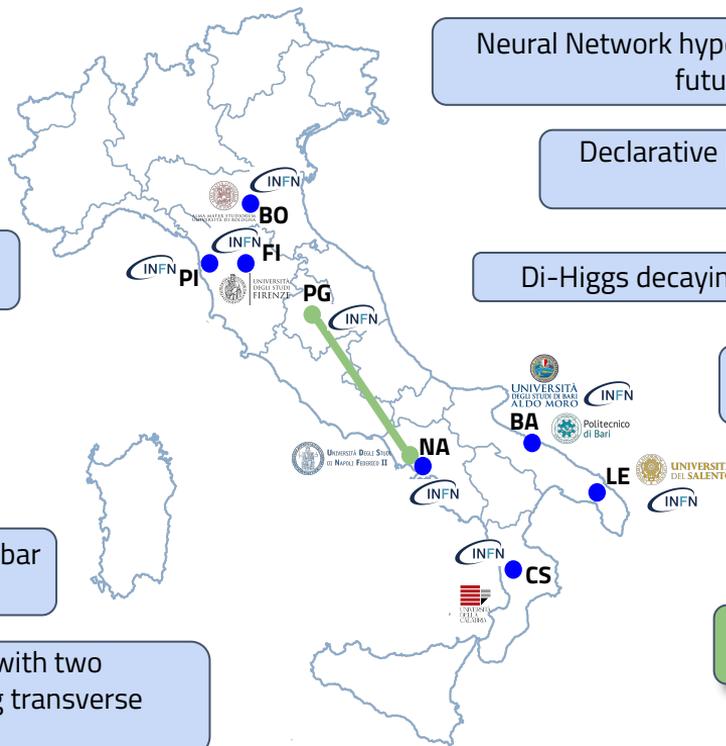
Continuous Integration pipeline, triggering analysis execution on AF

top quark+MET analysis

Search of rare events in tau to 3 muons decay

Differential cross section measurement for  $t\bar{t}$  inclusive production

Search for new phenomena in events with two opposite-charge leptons, jets and missing transverse momentum



Neural Network hyperparameter optimisation applied to future colliders (FCC-ee)

Declarative paradigms for analysis description and implementation

Di-Higgs decaying to two b quarks and two muons

Muon detector performance analysis

Benchmark interactive analysis for future colliders (FCC-ee)

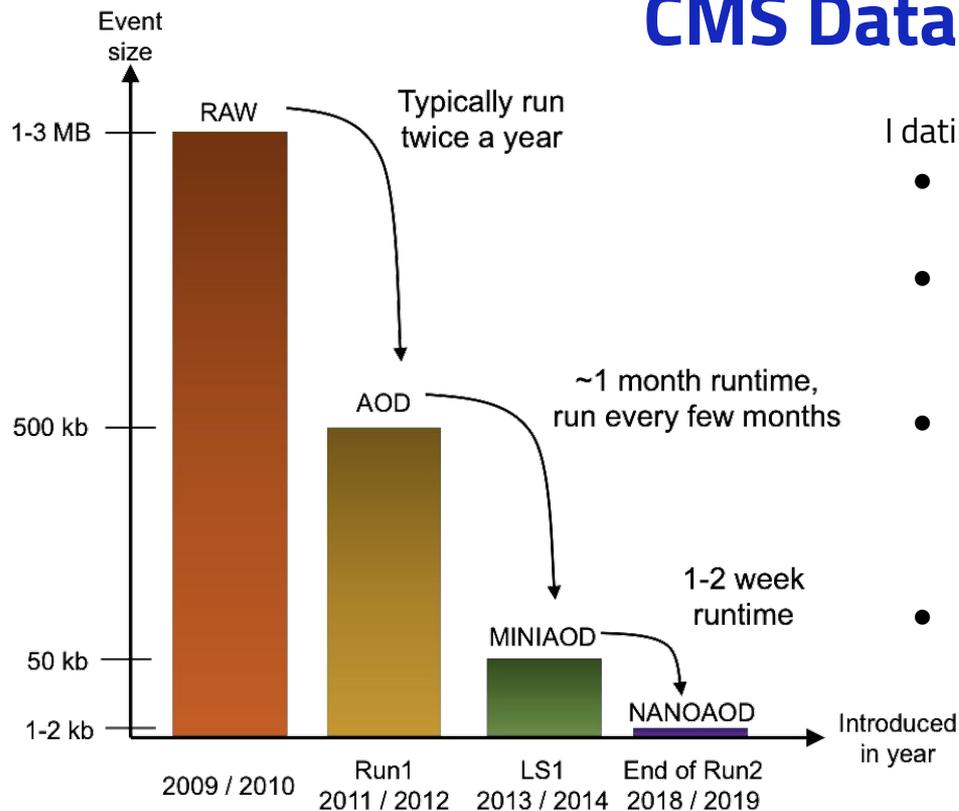
**Supporto infrastrutturale**

*e altre in futuro...*

The background of the slide is a deep blue color. On the left side, there is a vertical strip of abstract light trails and dots, creating a sense of depth and movement. The trails are composed of many thin, parallel lines that curve and converge towards the center. The dots are small, bright blue circles of varying sizes, scattered along the trails and in the background. The overall effect is a futuristic, digital aesthetic.

# Backup

# CMS Data formats



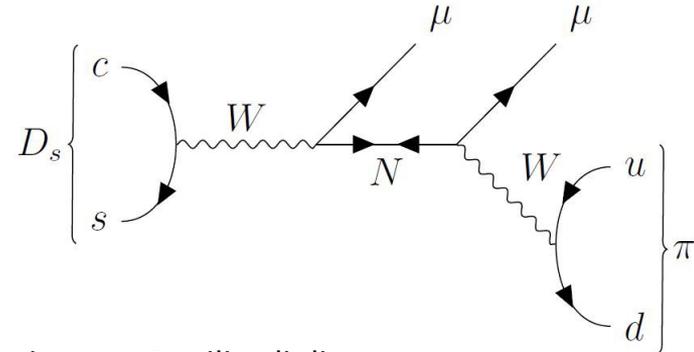
I dati CMS vengono salvati in ROOT file, in diversi formati:

- RAW: Una raccolta degli output dell'elettronica del detector. Dimensione di un evento: 1-3 MB
- AOD: Analysis Object Data. Trasformazione dei dati RAW in entità riconoscibili dai fisici come jet, muoni, elettroni, etc... Dimensione di un evento: 500kB
- MiniAOD: Riduzione della dimensione degli AOD, rendendoli più compatti al costo di perdere informazione (e.g. azzerando bit di numeri float). Dimensione di un evento: 50kB
- NanoAOD: Ulteriore riduzione dei MiniAOD, salvato su un ROOT file colonnare. Questo nuovo formato, utilizzando tipi fondamentali (int, float), esce dall'ecosistema CMS ed è utilizzabile praticamente da chiunque. Dimensione di un evento: 1-2 kB.

## Use-case di analisi dati HEP: ricerca di neutrini pesanti nei decadimenti del mesone $D_s$ all'esperimento CMS con il "B-Parking" dataset

Ricerca di un leptone pesante neutro  $N$  (*bump hunt*), proveniente dal mesone  $D_s$ , nello stato finale contenente un  $\mu$  e un  $\pi$ .

Nello stato finale viene inoltre considerato un  $\mu$  aggiuntivo, proveniente dal  $W$  iniziale. I due muoni possono avere sia stesso-segno che segno-opposto.



### Strategia:

- Analisi sul dataset intero MiniAOD **B-Parking** raccolto nel 2018. Contiene ~10 miliardi di decadimenti unbiased di adroni contenenti quark  $b$ , con una luminosità integrata pari a  $41.5 \pm 1.0 \text{ fb}^{-1}$
- Discriminazione segnale-fondo:
  - Campioni QCD  $\mu$ -enriched, per modellare la shape del fondo;
  - Campioni di segnale per  $m(\text{HNL})=1.0, 1.5 \text{ GeV}$  e  $\tau(\text{HNL})=10, 100, 1000 \text{ mm}$ .
- Stima del background data-driven, per ogni ipotesi di massa del neutrino.
- Stima del segnale rispetto ad un canale di normalizzazione:  $D_S \rightarrow \phi(\rightarrow \mu\mu)\pi$

# Use-case di analisi dati HEP: analisi VBS ssWW in tau adronico e leptone leggero all'esperimento CMS

19

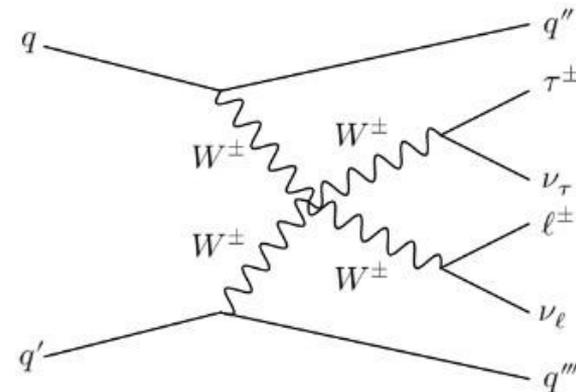
## Vector Boson Scattering (VBS) A LHC:

due quark ad alta energia emettono due bosoni vettori, che a loro volta interagiscono tra loro, decadendo infine nelle particelle rilevate dagli esperimenti

- processo "benchmark" per la fisica elettrodebole
- uno dei canali più puliti è lo scattering di due W dello stesso segno (ssWW)

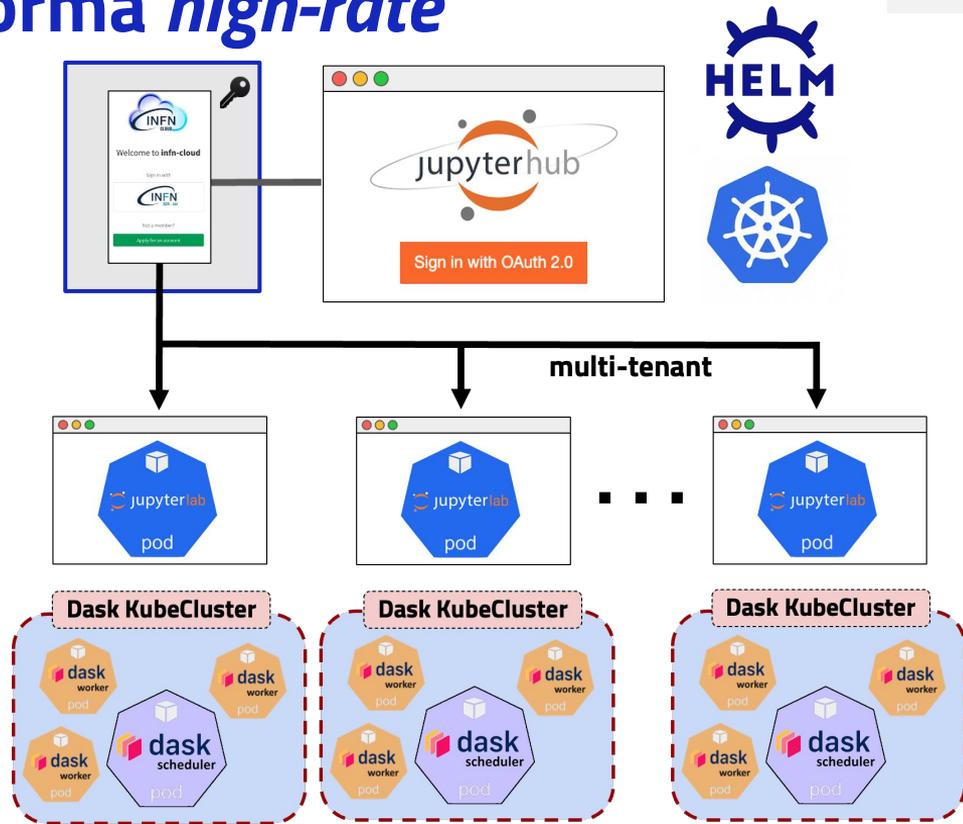
## Stato finale:

- due jet forward-backward di alta energia, alta  $m_{jj}$  e  $\Delta\eta_{jj}$
- Prodotti di decadimento dei due bosoni W
  - In questa analisi: e/mu + tau adronico

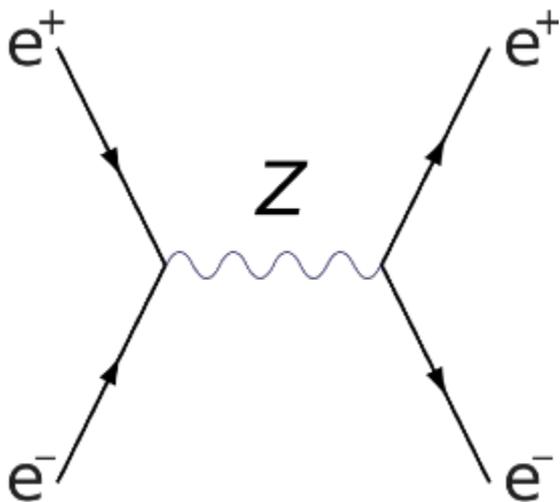


# La piattaforma *high-rate*

- Autenticazione con [INDIGO-IAM](#)
- Interfaccia [jupyterhub](#) con risorse allocate per l'utente



# Use-case di analisi dati HEP: simulazione di processi $Z \rightarrow e^+e^-$ al Future Circular Collider (FCC)



## Contesto:

- Studi per FCC su canali di fisica di benchmark

## Strategia:

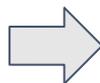
- Simulazione in EDM4HEP  $\rightarrow$  ntuple plane di ROOT
- Smearing gaussiano applicato all'energia dell'elettrone per simulare la risposta del detector
- Fit sulla massa invariante  $m(ee)$  per la stima della risoluzione

Utilizzando RDataFrame, si confrontano le risorse richieste per eseguire l'analisi su 1M di eventi usando il nuovo approccio e quello "tradizionale"

## Nuovi paradigmi per l'analisi dei dati (High-rate declarative interactive or quasi-interactive data analysis approach)



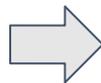
Risorse  
eterogenee  
distribuite



Sviluppo di soluzioni infrastrutturali  
efficienti e *user-friendly*



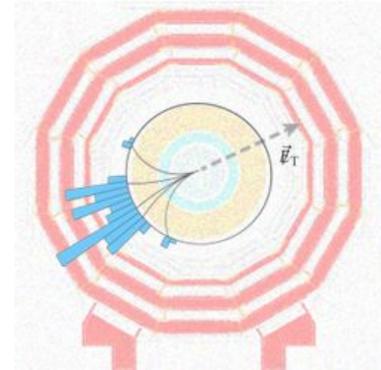
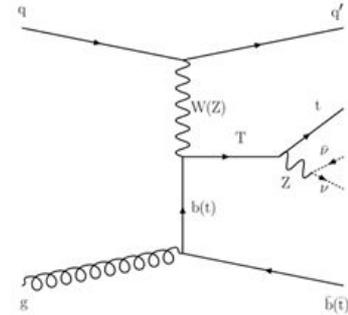
Nuovi software di  
analisi basati su  
approccio dichiarativo  
con workflow interattivi



- Richiedono l'utilizzo di formati di dati ridotti
- Basati su strumenti di analisi dati all'avanguardia ([ROOT RDataFrame](#), [Coffea](#))
- Possibilità di scalarli ad alto throughput grazie a *backends* come [Dask](#)
- Grande varietà di use-case!

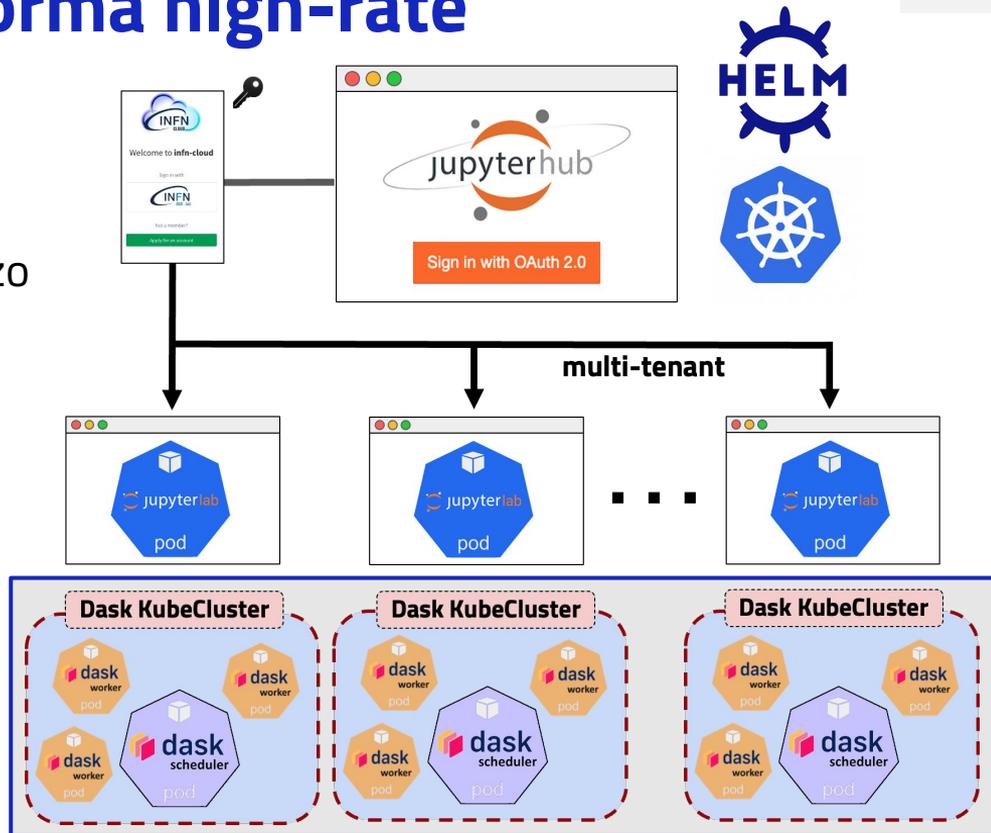
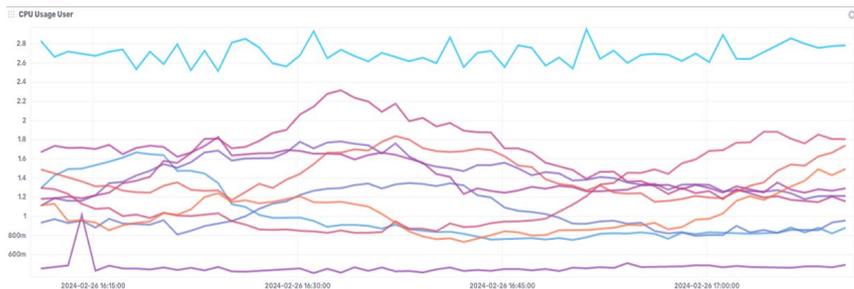
# Use-case di analisi dati HEP: ricerca di vector-like quarks (VLQ) all'esperimento CMS

- ❑ Early Run3 analisi (2022-2023 data taking)
- ❑ Vector-Like Quark T canale  $T \rightarrow tZ$
- ❑ Stato finale: Top quark in adroni and Z ( $\nu\nu$ )
- ❑ Sviluppo naturale dell'analisi di full run2 già pubblicata [JHEP05\(2022\)093](#), con un nuovo metodo di selezione e l'idea di estendere l'interpretazione finale a diversi modelli con stesso stato finale tra cui
  - ❑ Produzione di particelle di Dark Matter in associazione con un Top quark



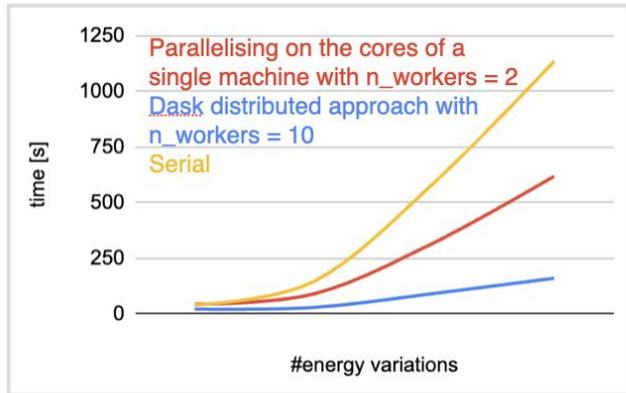
# La piattaforma high-rate

Possibilità di accedere alle metriche di utilizzo dei siti dove si fa offloading con [InfluxDB](#)



# Simulazione di processi $Z \rightarrow e+e-$ al FCC: valutazione delle performance

- Kubernetes infrastructure: 5+1 virtual machines (5 Kubernetes workers & 1 Kubernetes master) on *Open-stack*

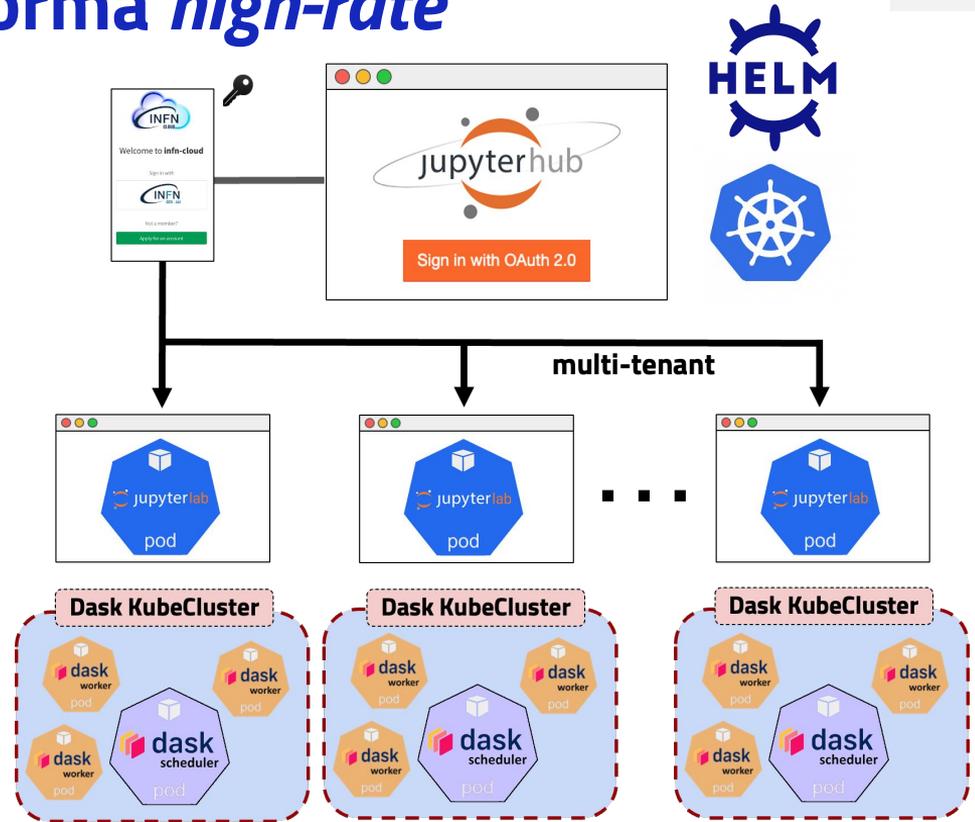


# iterations	Serial approach	Local client Dask	Distributed Dask
50	590 s	320 s	75 s
100	1135 s	618 s	138 s

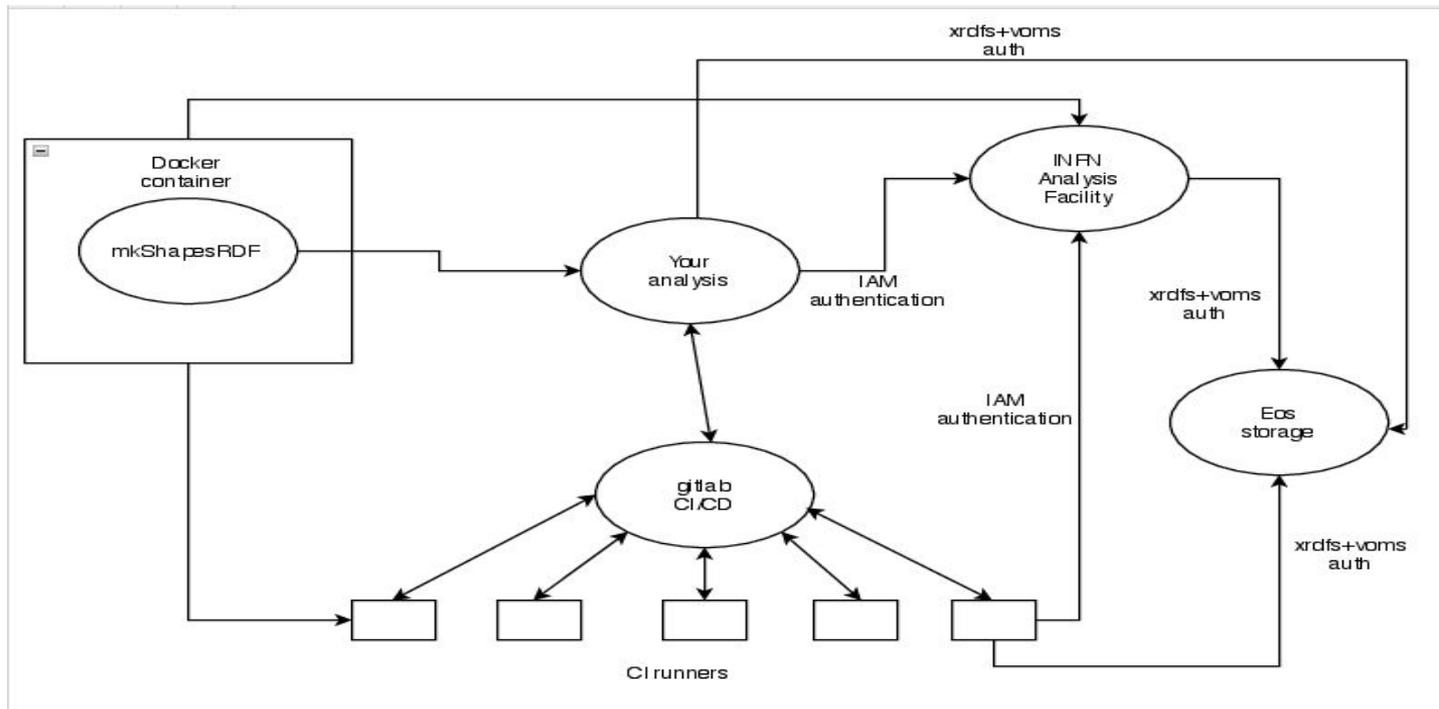
L'approccio "distribuito" permette di dimezzare il tempo di esecuzione dell'analisi.

Inoltre, si nota un ulteriore miglioramento, che scala con il numero di workers.

# La piattaforma *high-rate*



## Continuous Integration pipeline triggering analysis execution: summary scheme



# Submitting jobs to AF via gitlab CI

The screenshot shows the GitLab web interface for a repository named 'analysis\_code'. The page includes a search bar, project navigation tabs (Project, Pinned, Issues, Merge requests, Manage, Plan, Code, Build, Secure, Deploy, Operate, Monitor, Analyze, Settings, Help), and a commit history table. A red arrow points from the 'Code' button in the repository view to the terminal window on the right.

Name	Last commit	Last update
gitlab	Update init_infra_AF_token.sh	3 weeks ago
RPV	Fixed error in jdl_dict.py	1 month ago
gitattributes	Added .gitattributes	1 month ago
gitlab-ci.yml	Update gitlab-ci.yml	3 weeks ago
README.md	Update README.md	just now

```
63 $ mkdir root_output
64 $ mkShapesRDF -o 0 -f . -b 1
65 Submitting job(s).
66 .....
67 .....
68 .....
69 .....
70 .....
71 .....
72 .....
73 .....
74 .....
75 .....
76 .....
77 .....
78 .....
79 .....
80 411 job(s) submitted to cluster 138207.
```

```
1860 0 jobs are in state: Submission_err
1861 0 jobs are in state: Unknown
1862 138207
1863 0 jobs are in state: Unexpanded
1864 363 jobs are in state: Idle
1865 8 jobs are in state: Running
1866 0 jobs are in state: Removed
1867 40 jobs are in state: Completed
1868 0 jobs are in state: Held
1869 0 jobs are in state: Submission_err
1870 0 jobs are in state: Unknown
1871 138207
1872 0 jobs are in state: Unexpanded
1873 363 jobs are in state: Idle
1874 8 jobs are in state: Running
1875 0 jobs are in state: Removed
1876 40 jobs are in state: Completed
1877 0 jobs are in state: Held
1878 0 jobs are in state: Submission_err
1879 0 jobs are in state: Unknown
1880 138207
1881 0 jobs are in state: Unexpanded
1882 361 jobs are in state: Idle
1883 8 jobs are in state: Running
```