

# CACCIATORI DI MATERIA OSCURA


**Stefano Giagu**

**Sapienza Università di Roma e INFN Roma**

*Cosa c'è nel nostro universo?*



# Tavola Periodica

Ricerca di elementi 

<ul style="list-style-type: none"> <li><span style="display: inline-block; width: 10px; height: 10px; background-color: #FFD700; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> Alcalini</li> <li><span style="display: inline-block; width: 10px; height: 10px; background-color: #FFA500; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> Alcalino Terrosi</li> <li><span style="display: inline-block; width: 10px; height: 10px; background-color: #FF69B4; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> Transizione</li> <li><span style="display: inline-block; width: 10px; height: 10px; background-color: #FF69B4; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> Lantanoidi</li> <li><span style="display: inline-block; width: 10px; height: 10px; background-color: #FF0000; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> Attinoidi</li> <li><span style="display: inline-block; width: 10px; height: 10px; background-color: #00CED1; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> Post-transizione</li> <li><span style="display: inline-block; width: 10px; height: 10px; background-color: #00CED1; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> Semimetalli</li> <li><span style="display: inline-block; width: 10px; height: 10px; background-color: #008000; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> Nonmetalli</li> <li><span style="display: inline-block; width: 10px; height: 10px; background-color: #90EE90; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> Alogeni</li> <li><span style="display: inline-block; width: 10px; height: 10px; background-color: #9370DB; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> Gas nobili</li> <li><span style="display: inline-block; width: 10px; height: 10px; background-color: #A9A9A9; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> Sconosciuto</li> </ul>																							
1 H Idrogeno																	2 He Elio						
3 Li Litio	4 Be Berillio																	5 B Boro	6 C Carbonio	7 N Azoto	8 O Ossigeno	9 F Fluoro	10 Ne Neon
11 Na Sodio	12 Mg Magnesio																	13 Al Alluminio	14 Si Silicio	15 P Fosforo	16 S Zolfo	17 Cl Cloro	18 Ar Argon
19 K Potassio	20 Ca Calcio	21 Sc Scandio	22 Ti Titanio	23 V Vanadio	24 Cr Cromo	25 Mn Manganese	26 Fe Ferro	27 Co Cobalto	28 Ni Nichel	29 Cu Rame	30 Zn Zinco	31 Ga Gallio	32 Ge Germanio	33 As Arsenico	34 Se Selenio	35 Br Bromo	36 Kr Kriptone						
37 Rb Rubidio	38 Sr Stronzio	39 Y Ittrio	40 Zr Zirconio	41 Nb Niobio	42 Mo Molibdeno	43 Tc Tecnicio	44 Ru Rutenio	45 Rh Rodio	46 Pd Palladio	47 Ag Argento	48 Cd Cadmio	49 In Indio	50 Sn Stagno	51 Sb Antimonio	52 Te Tellurio	53 I Iodio	54 Xe Xenone						
55 Cs Cesio	56 Ba Bario	* Lantanio	72 Hf Hafnio	73 Ta Tantalio	74 W Wolframio	75 Re Renio	76 Os Osmio	77 Ir Iridio	78 Pt Platino	79 Au Oro	80 Hg Mercurio	81 Tl Tallio	82 Pb Piombo	83 Bi Bismuto	84 Po Polonio	85 At Astatina	86 Rn Radone						
87 Fr Francio	88 Ra RADIO	** Attinio	104 Rf Rutherfordio	105 Db Dubnio	106 Sg Seaborgio	107 Bh Bohrio	108 Hs Hassium	109 Mt Meitnerio	110 Ds Darmstadtio	111 Rg Roentgenio	112 Cn Copernicio	113 Uut Ununtrio	114 Fl Flerovio	115 Uup Ununpentio	116 Lv Livermorio	117 Uus Ununseptio	118 Uuo Oganesson						
		* Lantanio	57 La Lantanio	58 Ce Cerio	59 Pr Praseodimio	60 Nd Neodimio	61 Pm Prometio	62 Sm Samario	63 Eu Eurio	64 Gd Gadolinio	65 Tb Terbio	66 Dy Dizimio	67 Ho Olio	68 Er Erbio	69 Tm Termio	70 Yb Itrio	71 Lu Lutetio						
		** Attinio	89 Ac Attinio	90 Th Torio	91 Pa Protattinio	92 U Uranio	93 Np Neptunio	94 Pu Plutonio	95 Am Americio	96 Cm Curcio	97 Bk Berkeleyo	98 Cf Californio	99 Es Einsteinio	100 Fm Fermio	101 Md Mendelevio	102 No Nobelio	103 Lr Lawrencio						

Optical

**Immagine Bellissima ... ma molto fuorviante ...**

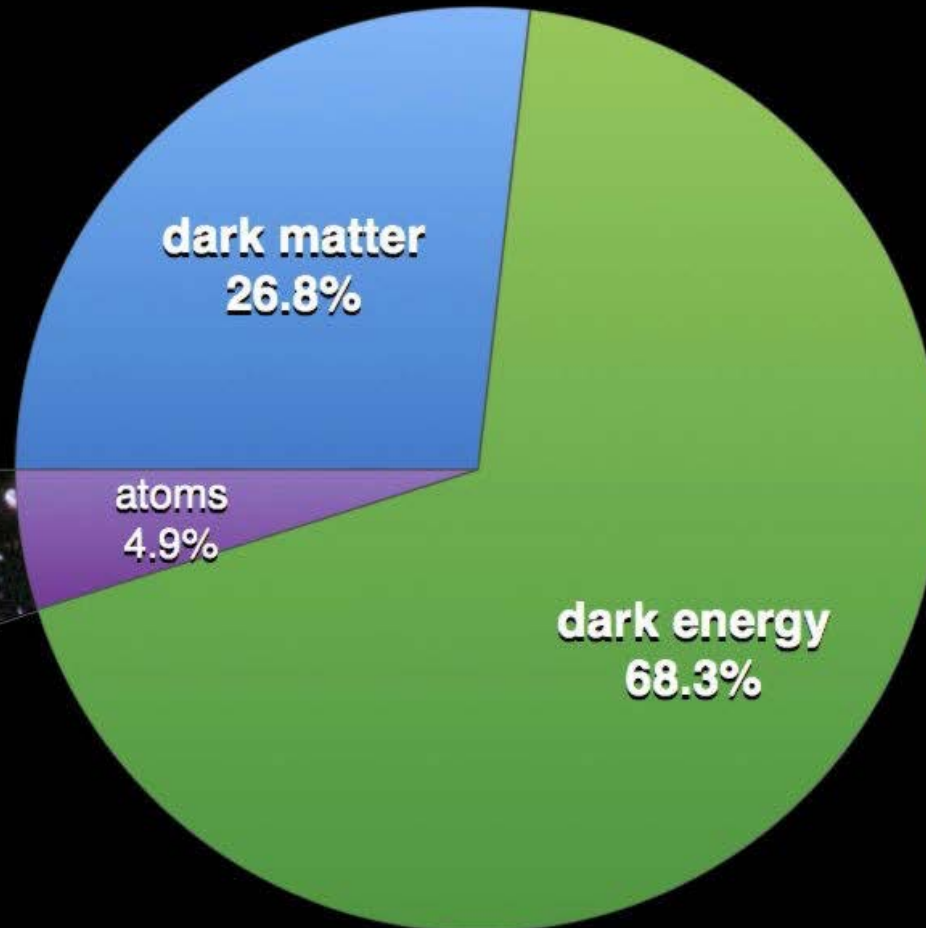
**mostra infatti solo lo 0.5% della densità di materia cosmica ...**

**Il restante 95.5% dell'universo è Invisibile!**

# Composizione dell'Universo

## Materia Oscura (Dark Matter):

- non emette radiazione elettromagnetica (“luce”)
- massiva, interagisce gravitazionalmente
- si pensa interagisca debolmente anche attraverso altre forze e che possa essere rilevata tramite le sue interazioni con le altre particelle che conosciamo (protoni, elettroni ...)



## Energia Oscura:

- non direttamente rilevabile
- diffusa nello spazio in modo omogeneo
- regola il modo in cui il nostro universo si espande
- possibile spiegazione: prezzo da pagare per avere “spazio”

Per dichiarare qualche cosa *invisibile*  
dobbiamo sapere che è lì

Ma se sappiamo che è lì allora non è  
veramente *invisibile*!

Dimostrare l'esistenza dell'invisibile è  
un tema comune nella ricerca  
scientifica, che contraddistingue la  
scienza da magia e superstizione ...

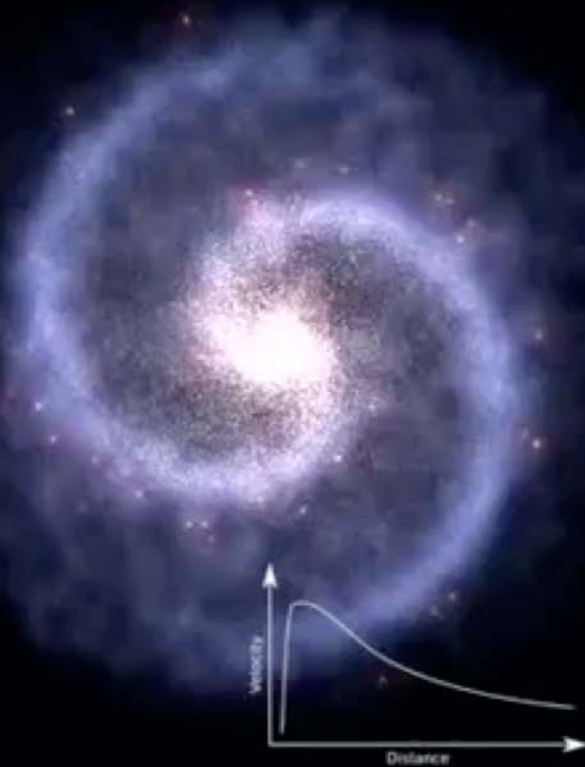
---

*Se non possiamo vedere la  
materia oscura ...*

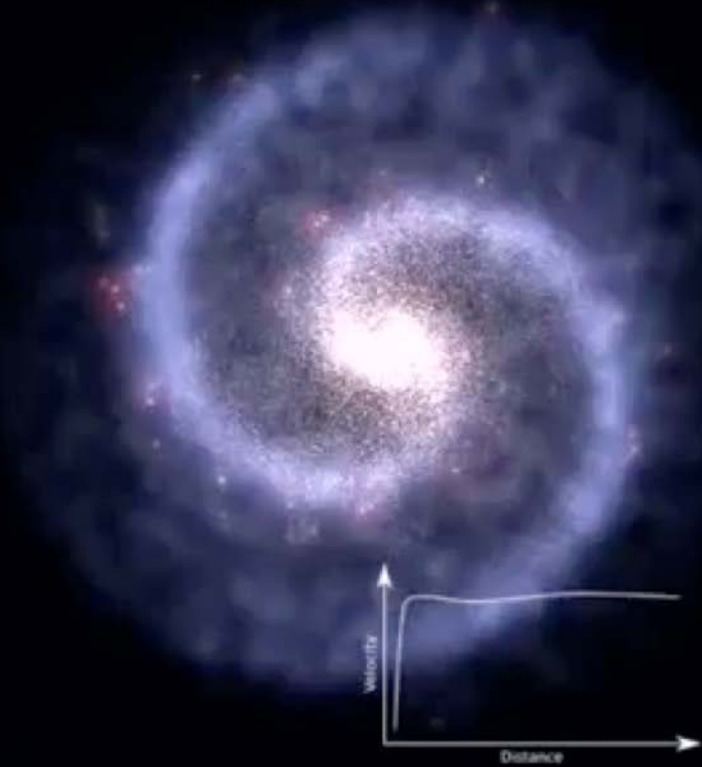
*... cosa ci fa credere quindi che  
esista?*



# Velocità rotazione galassie



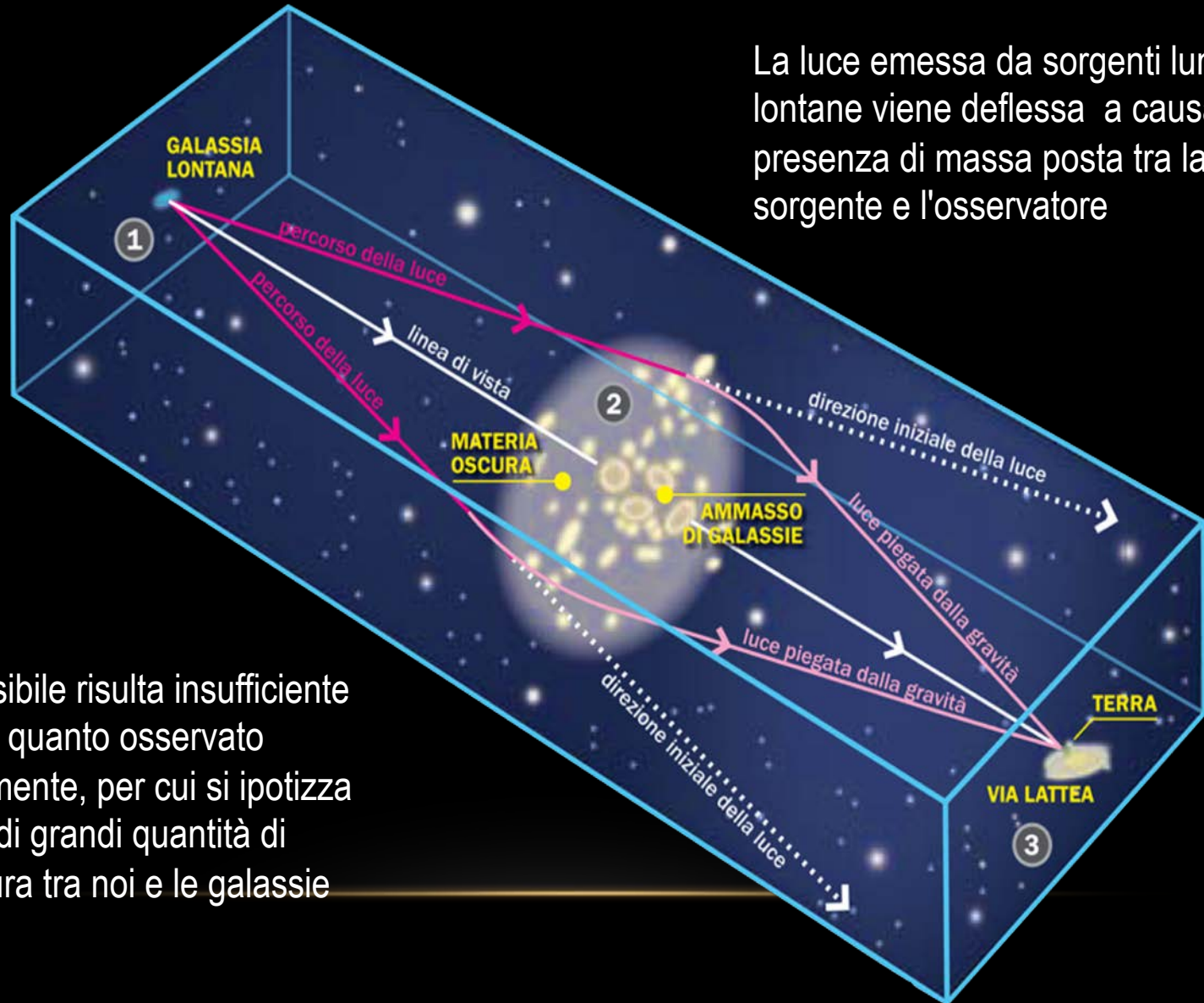
Galassie senza  
Materia Oscura



Galassie in presenza di  
Materia Oscura

# Lenti gravitazionali ...


La luce emessa da sorgenti luminose lontane viene deflessa a causa della presenza di massa posta tra la sorgente e l'osservatore



La massa visibile risulta insufficiente per spiegare quanto osservato sperimentalmente, per cui si ipotizza la presenza di grandi quantità di materia oscura tra noi e le galassie lontane ...

# Lenti gravitazionali ...



Gravitational Lens in Galaxy Cluster Abell 1689  HUBBLESITE.org

# Collisioni Galattiche...

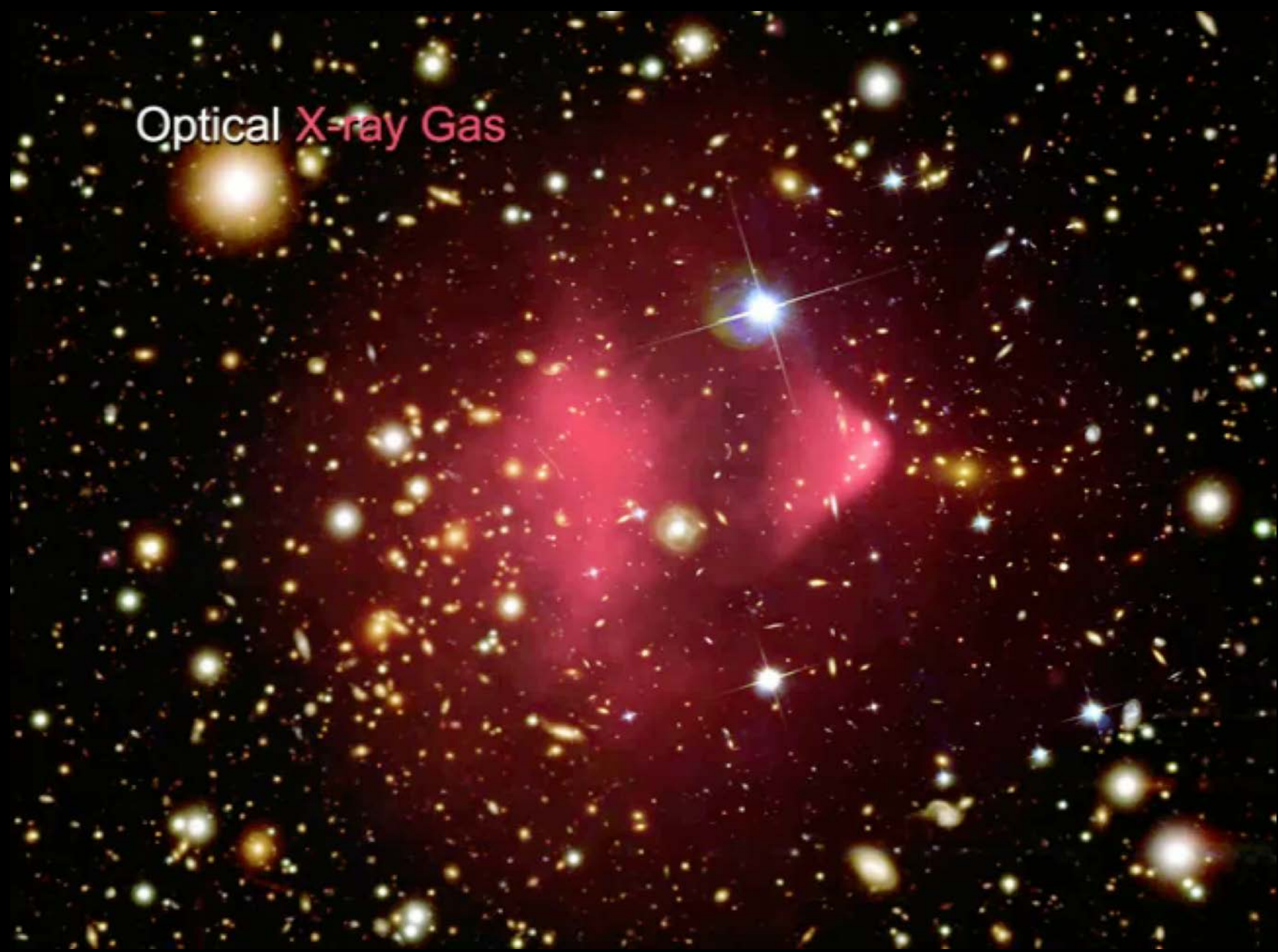
Optical Dark Matter X-ray Gas



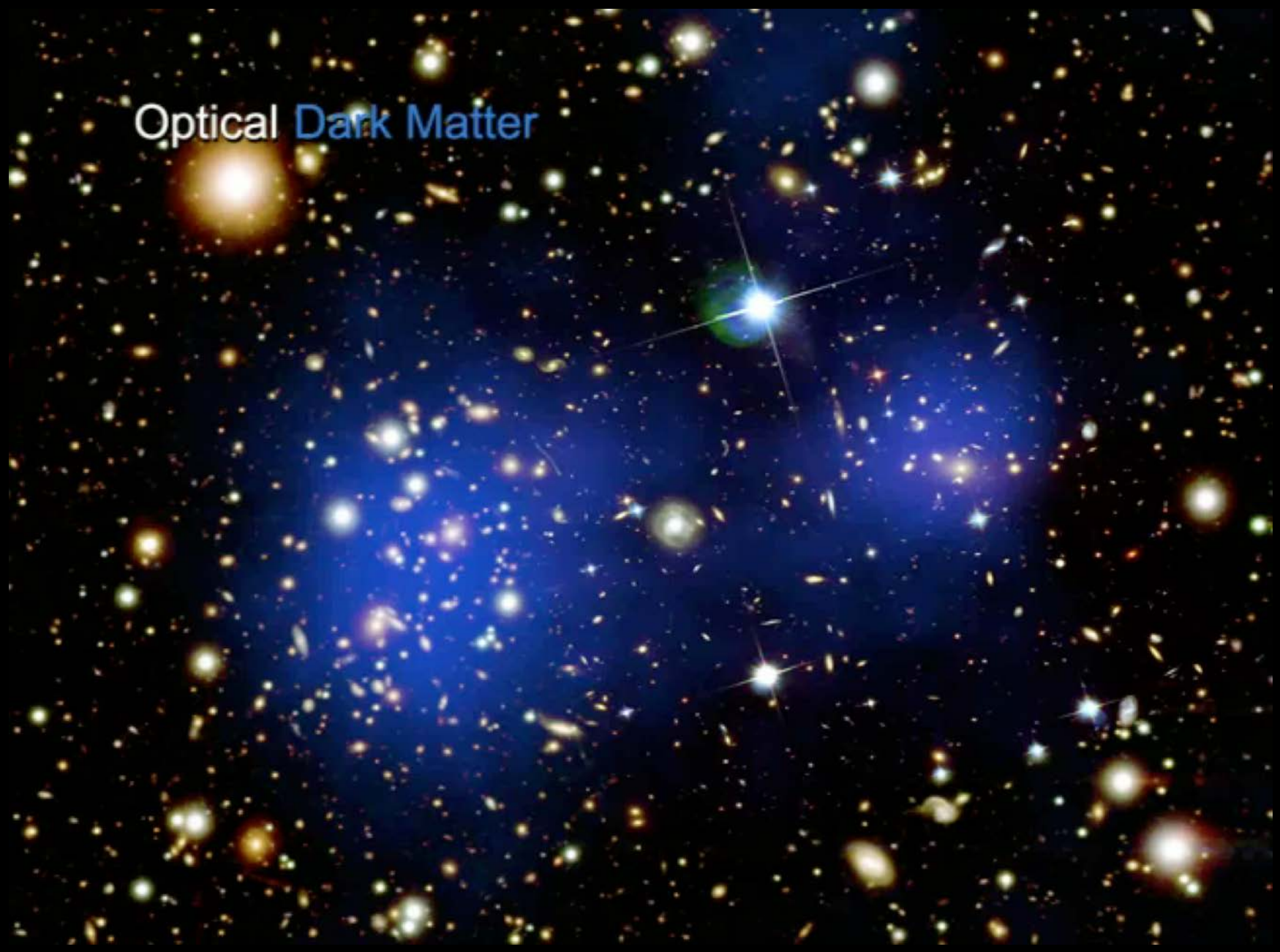
Optical



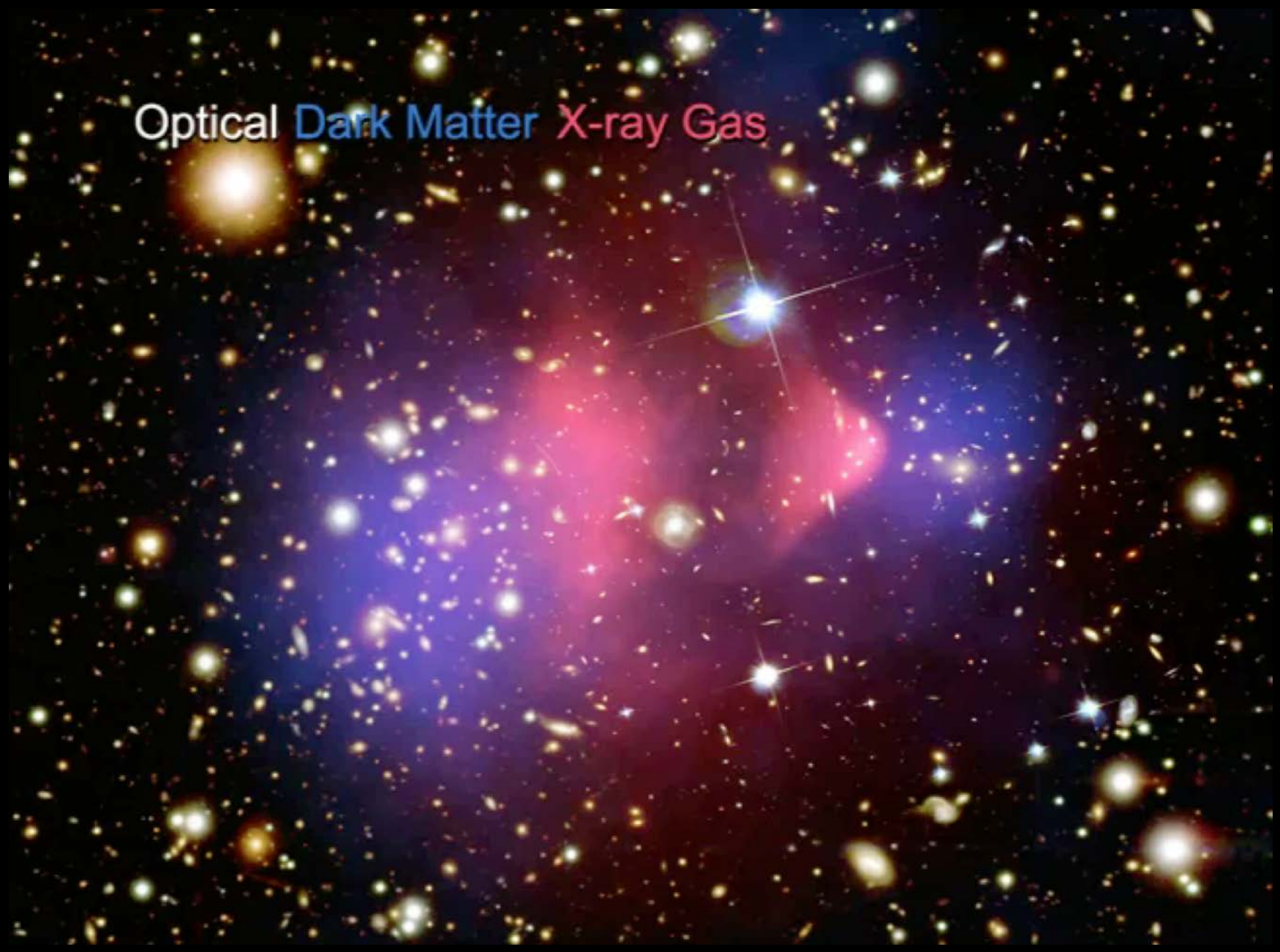
Optical X-ray Gas



Optical Dark Matter



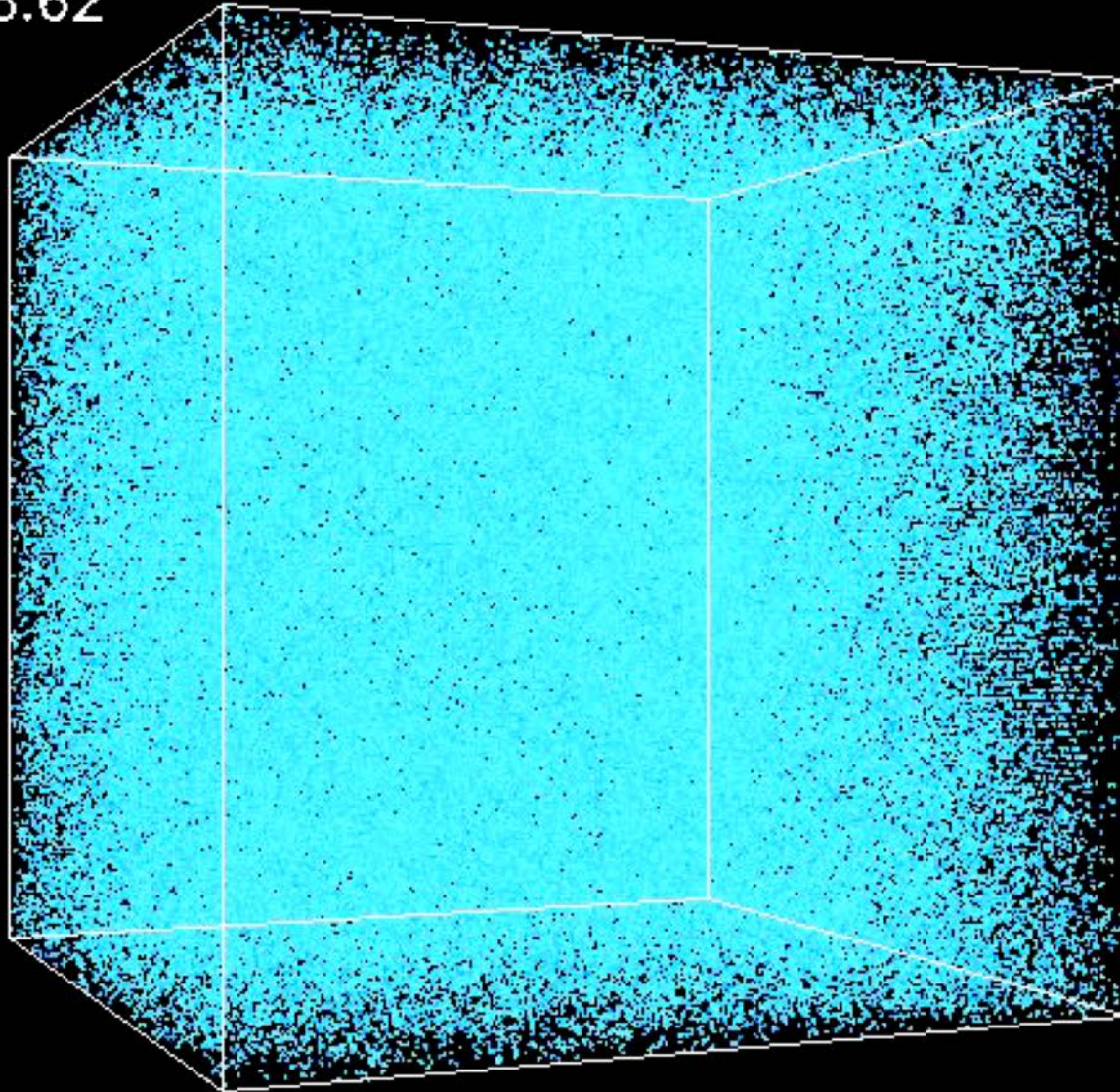
Optical Dark Matter X-ray Gas



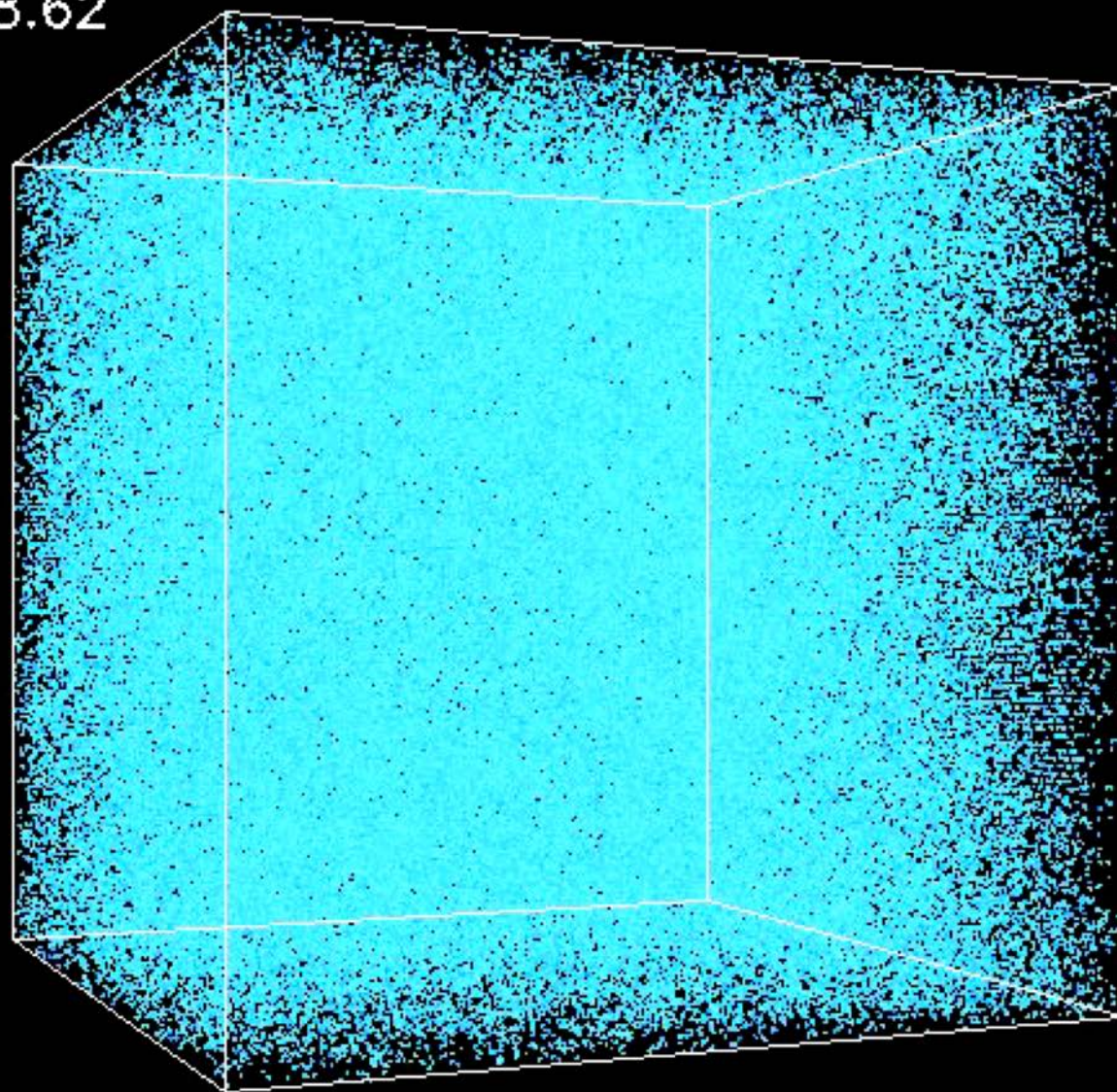


# Formazione strutture ...

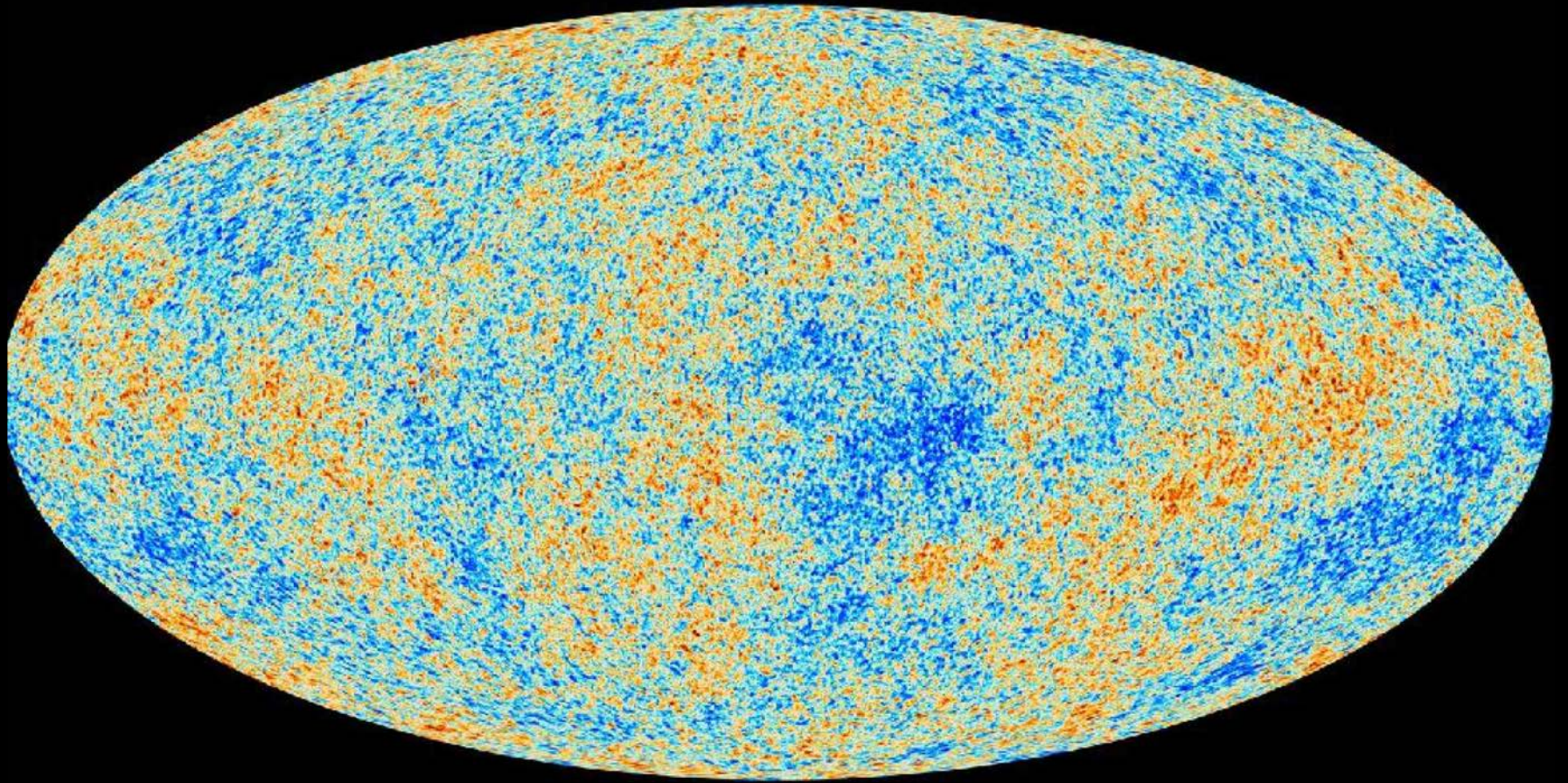
$Z=28.62$



$Z=28.62$



# Cosmic Microwave Background...

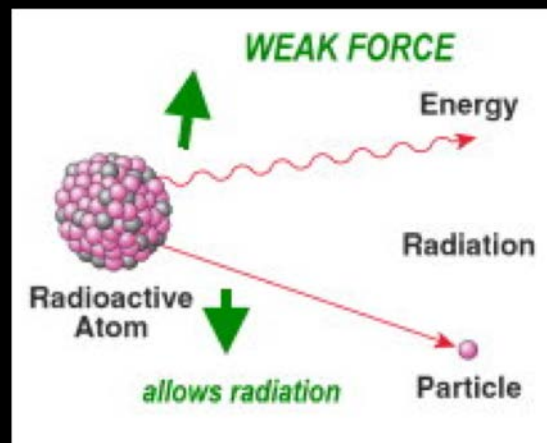
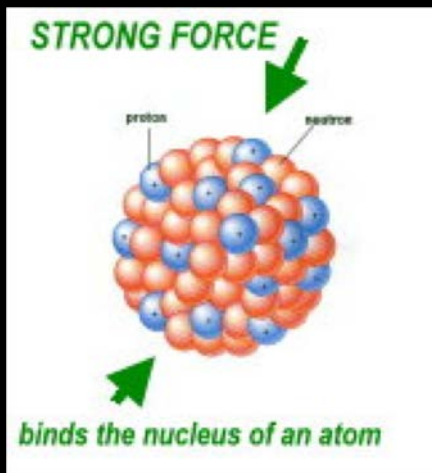
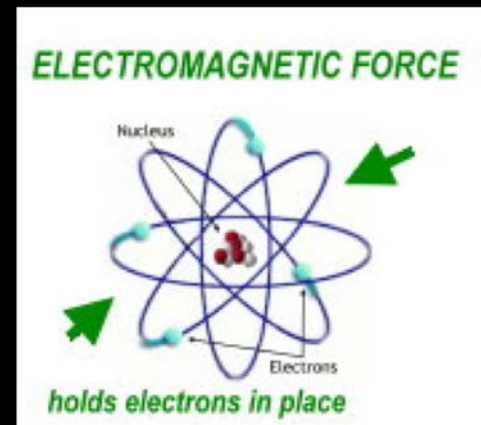
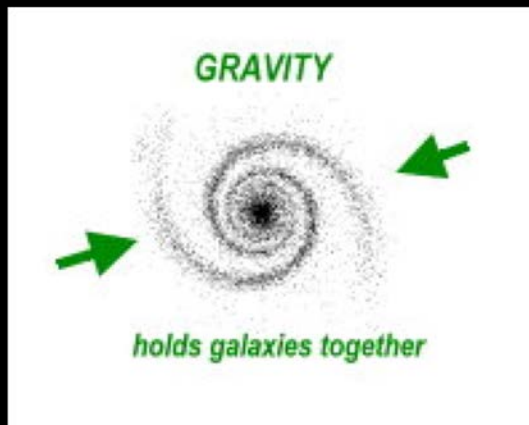


*Che cosa è la Materia Oscura?*

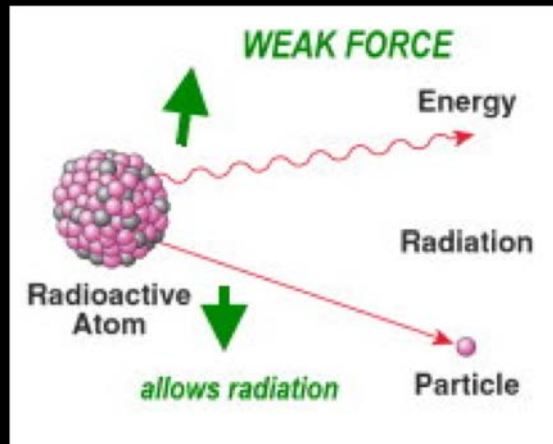
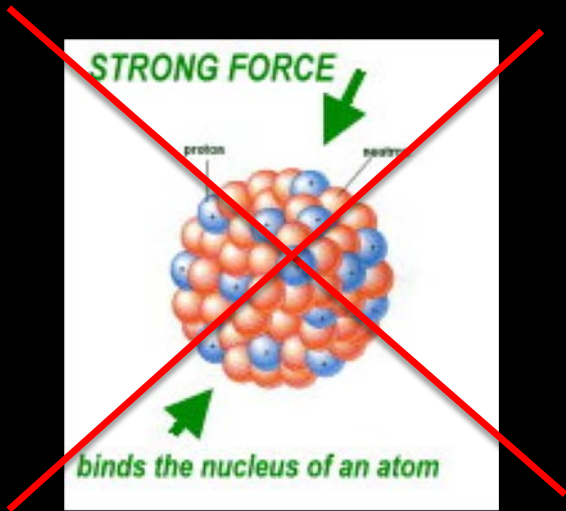
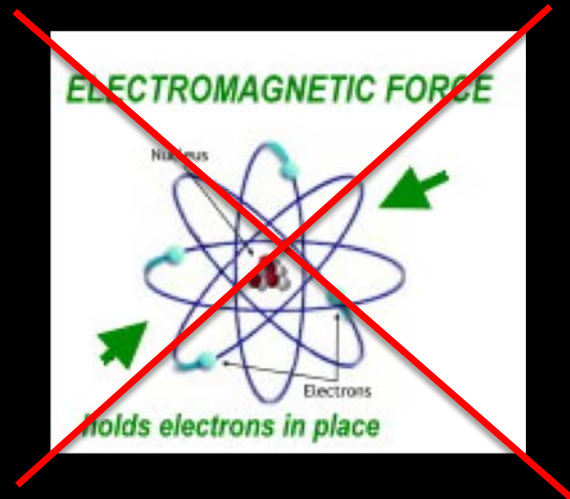
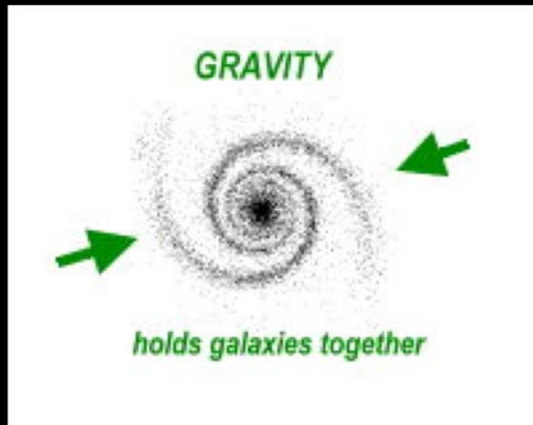
*Perché la materia oscura è così  
oscura?*

*... e perchè invece la materia  
ordinaria è così luminosa?*

# Le quattro forze della natura

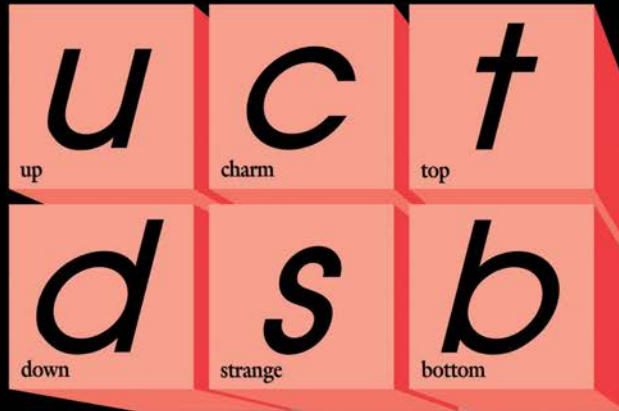


# Le quattro forze della natura

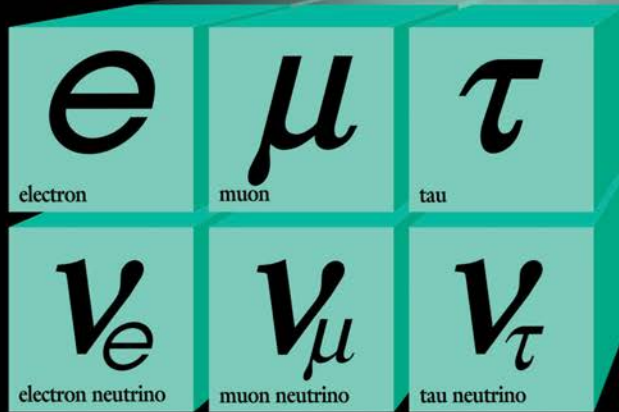
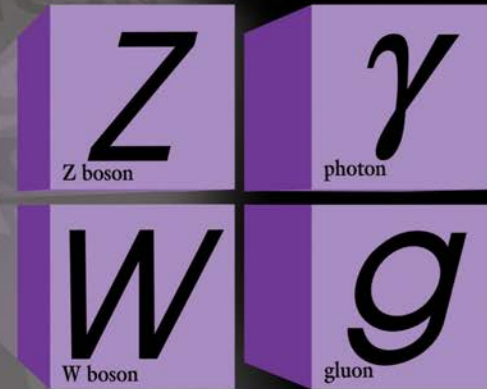




# Quarks

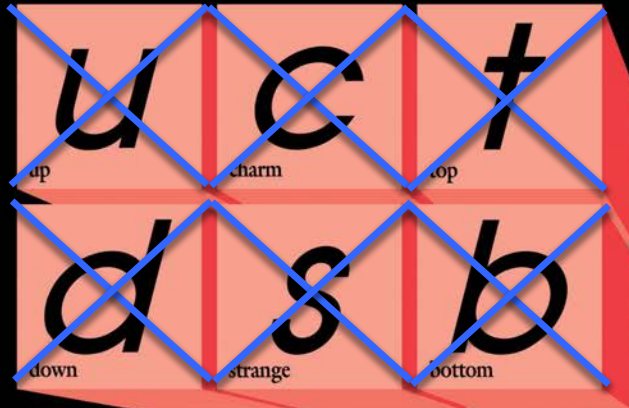


# Forces



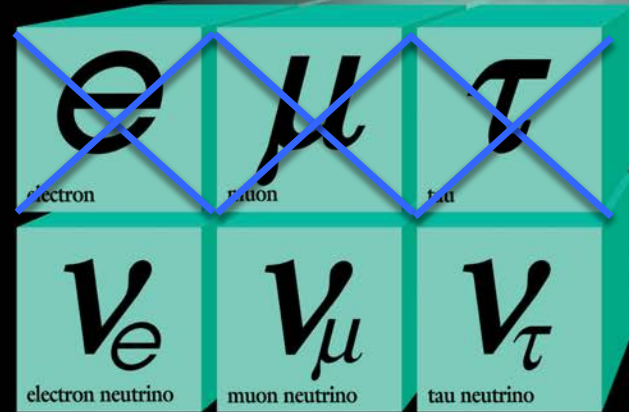
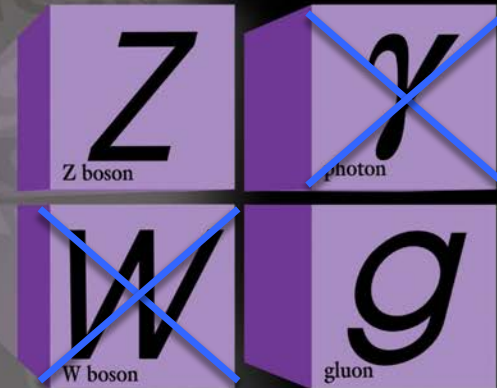
# Leptons

# Quarks



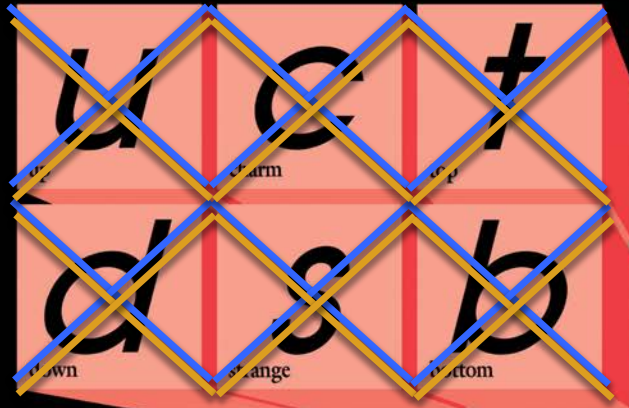
— Electromagnetic Force

# Forces



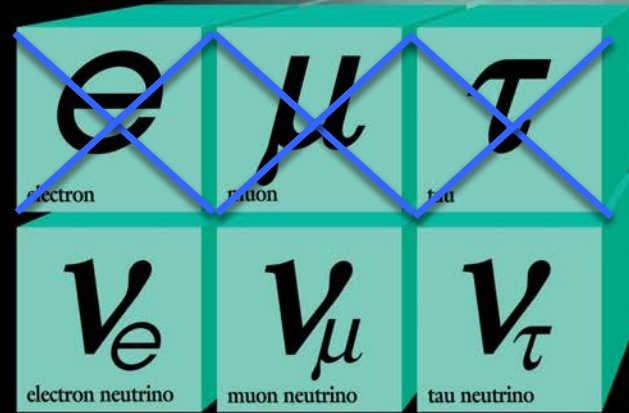
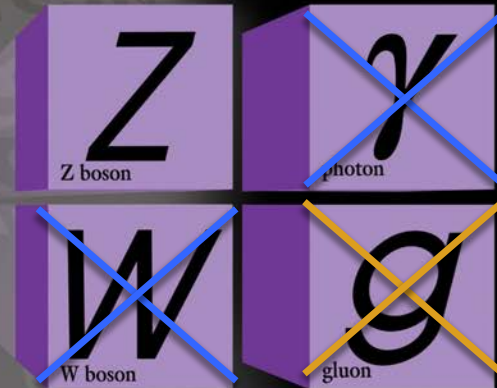
# Leptons

# Quarks



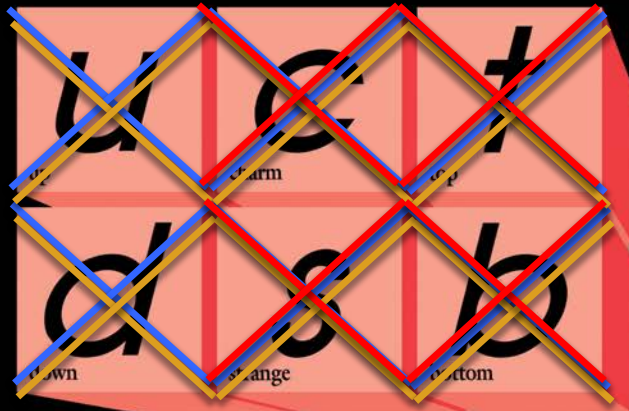
— Electromagnetic Force  
— Strong Force

# Forces



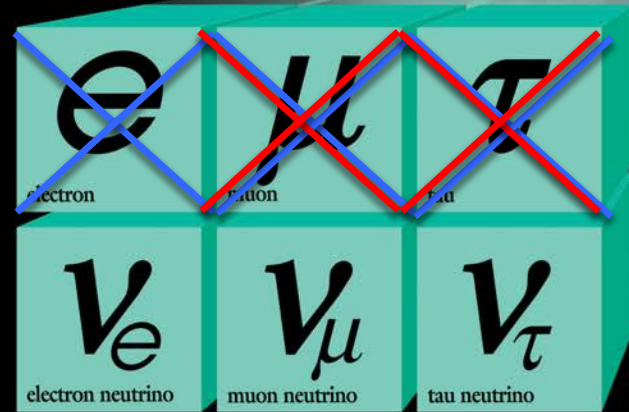
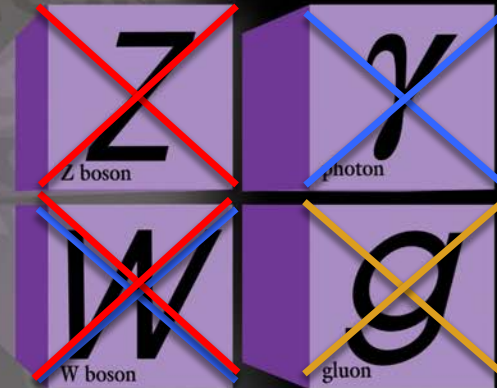
# Leptons

# Quarks



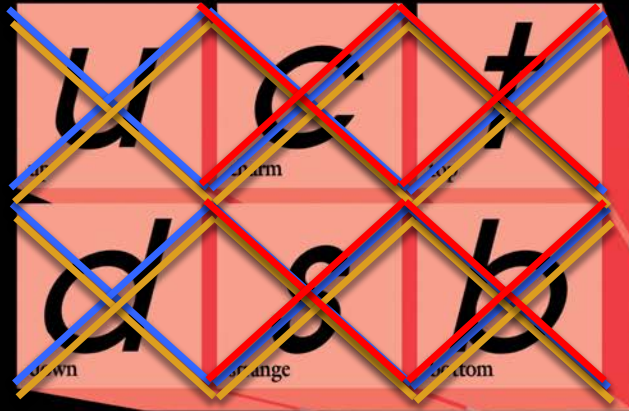
-  Electromagnetic Force
-  Strong Force
-  Unstable

# Forces



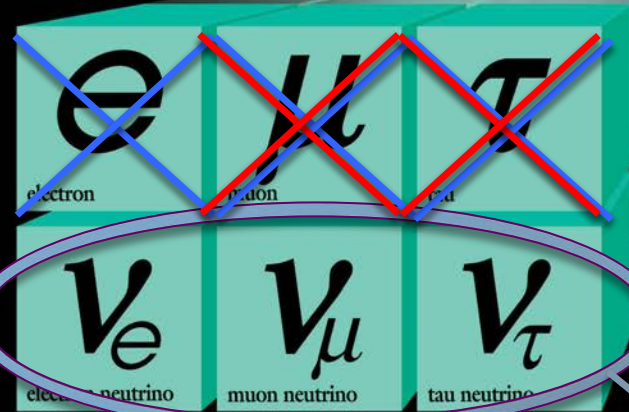
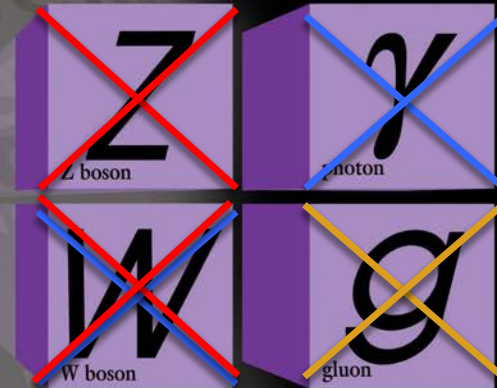
# Leptons

# Quarks



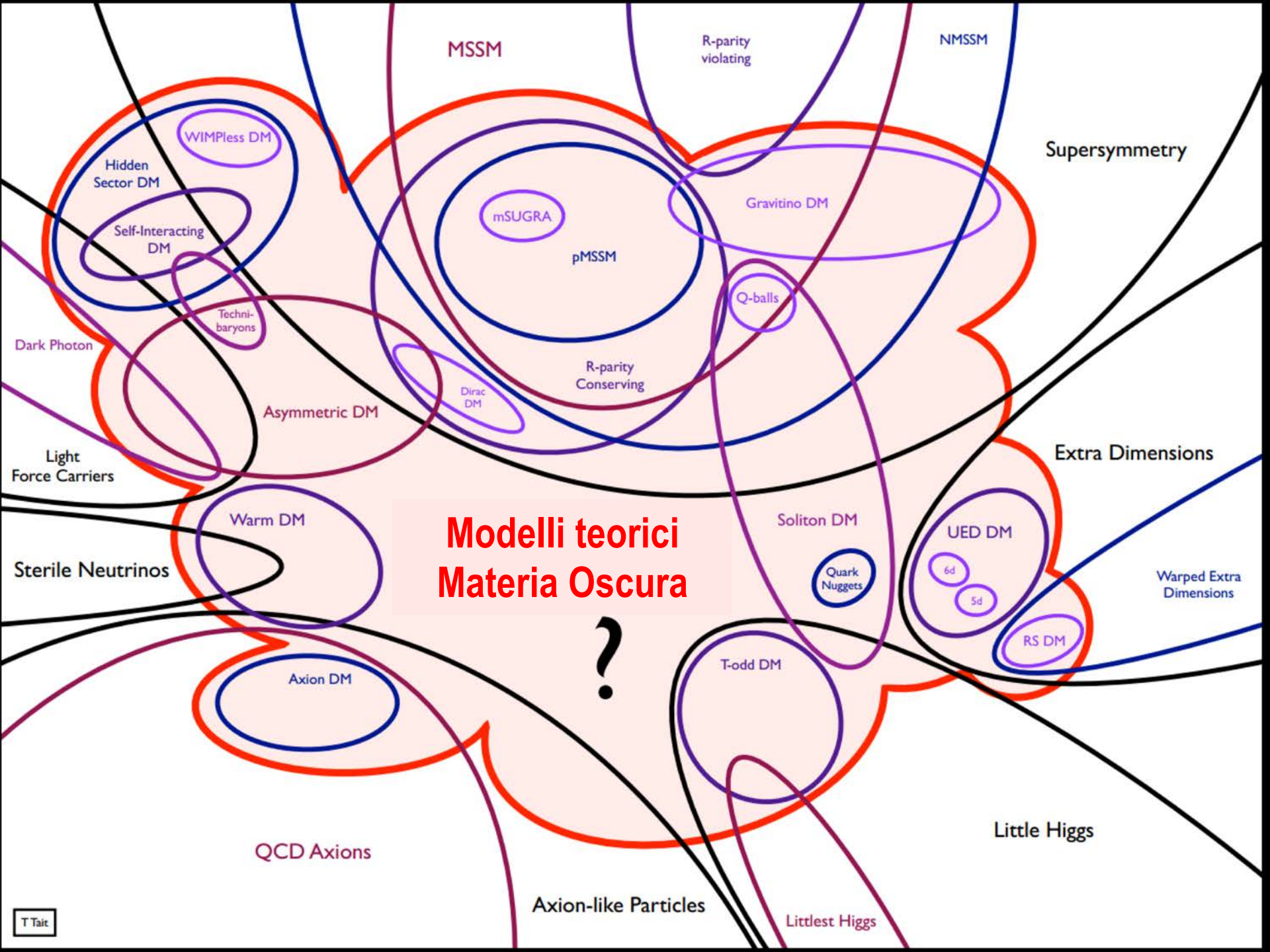
- Electromagnetic Force
- Strong Force
- Unstable

# Forces

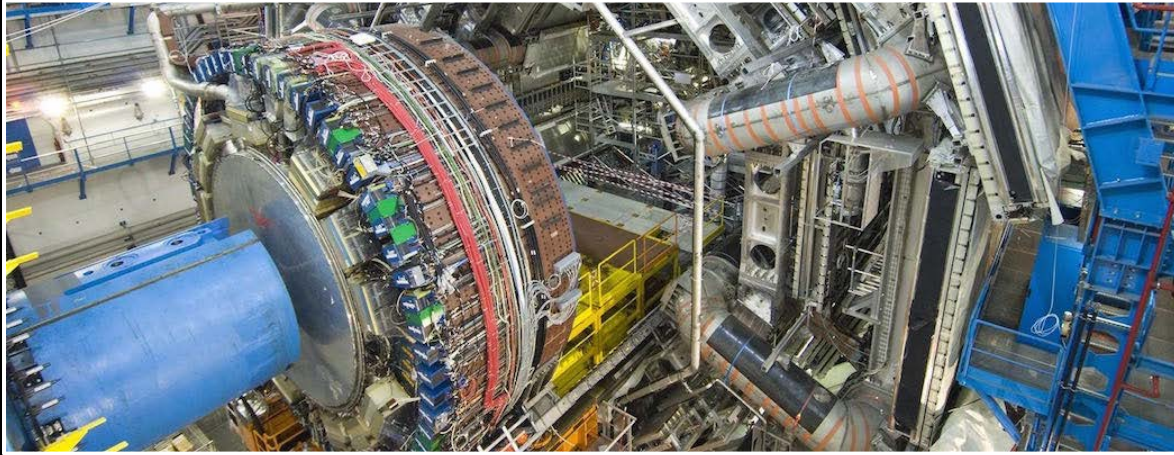


# Leptons

Troppo veloci ("hot") per essere buoni candidati come Materia Oscura



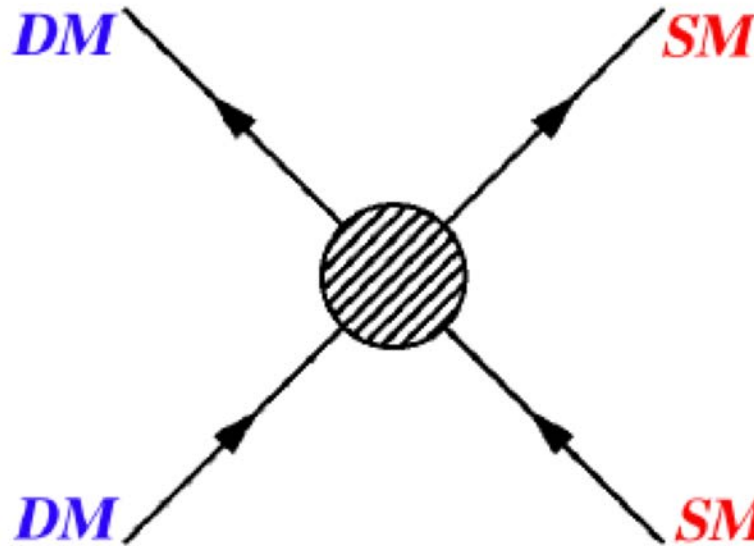
# *Ricerca di particelle di Materia Oscura*



RIVELAZIONE INDIRETTA



RIVELAZIONE DIRETTA

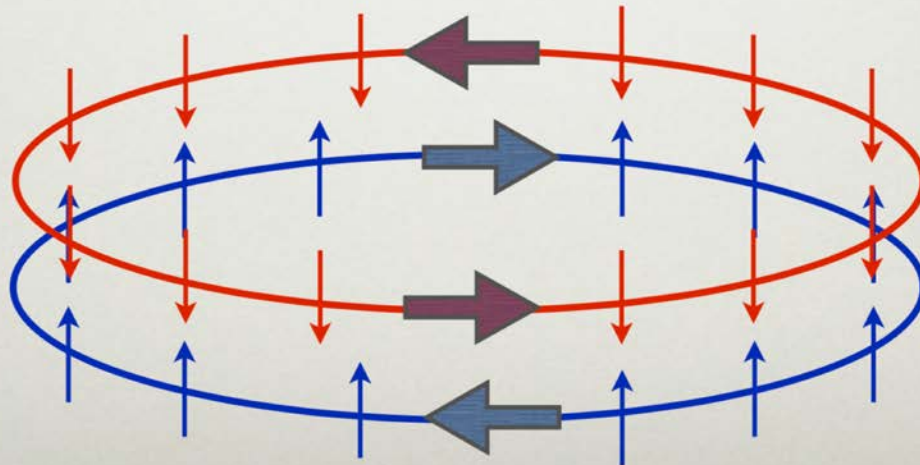
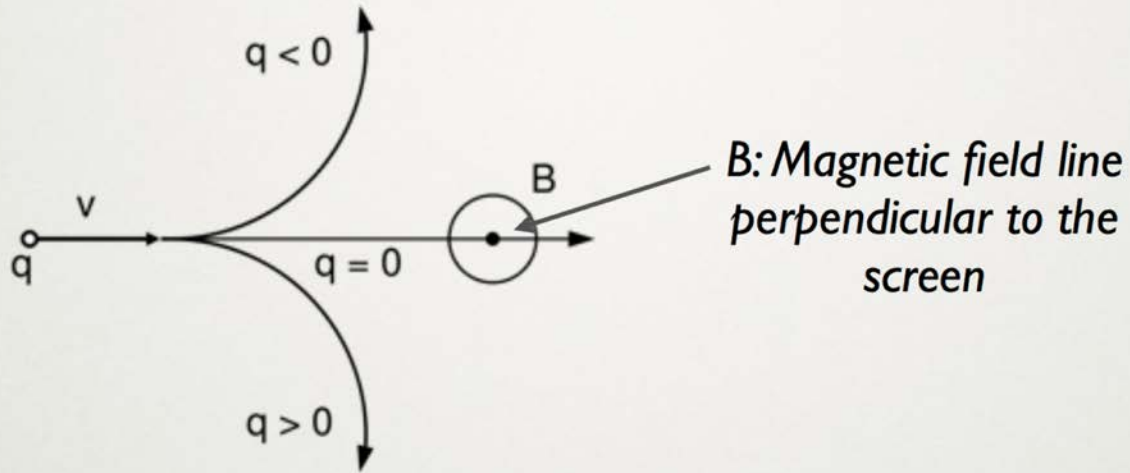


PRODUZIONE ARTIFICIALE



# LHC





magneti superconduttori mantengono i protoni energetici su traiettorie circolari

# LHC

- 1232 magneti dipolari
- lunghi 15m e pesanti 35 T ciascuno
- superconduttori a  $T = 1.9 \text{ K} = -271.25 \text{ C}$

$B = 83 \text{ kGauss} \sim 170000 \text{ B Terrestre}$



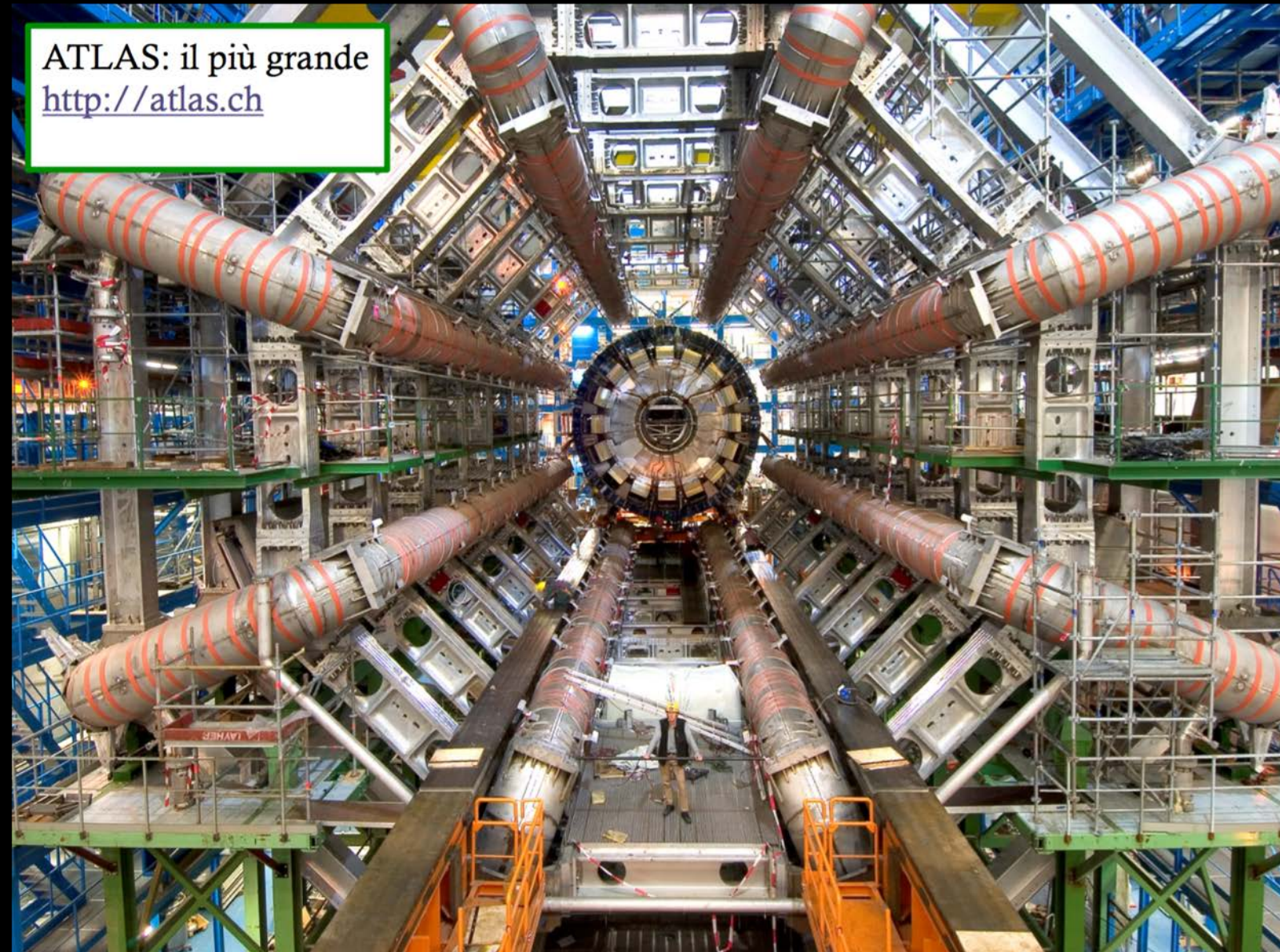
•  $E_{\text{beam}} = 7000 \text{ GeV} \sim 7 \times 10^{12} \text{ eV} \sim 5 \text{ trillions } 1.5\text{V batteries}$

~ 100 M km of batteries,  
about  $d[\text{Earth-Sun}]$



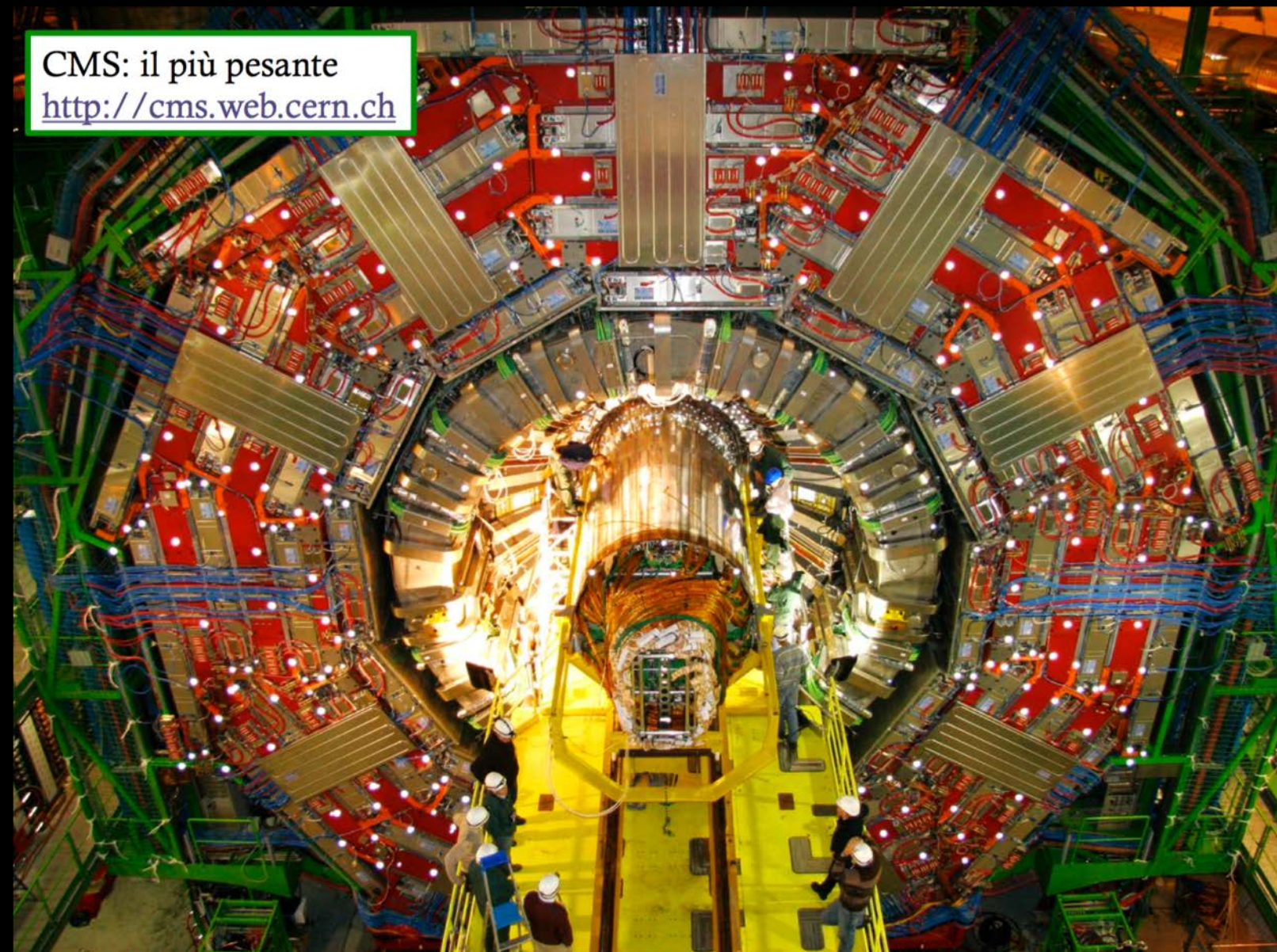
# LHC

ATLAS: il più grande  
<http://atlas.ch>



# LHC

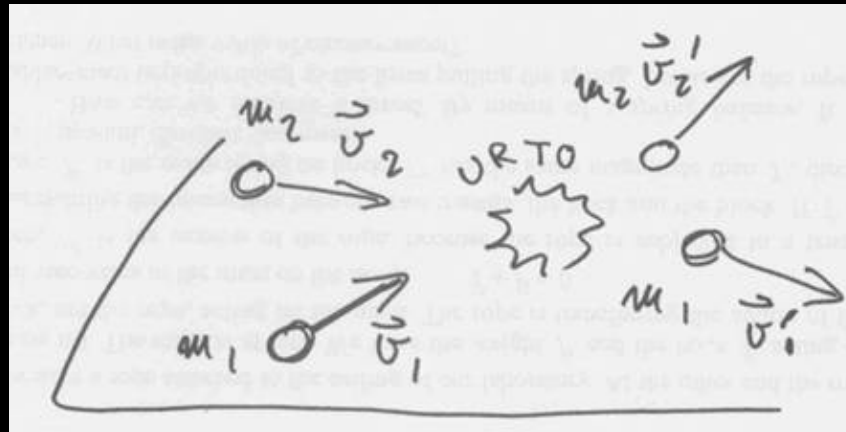
CMS: il più pesante  
<http://cms.web.cern.ch>



# Studio delle forze fondamentali a LHC

## Il metodo di far “scontrare” cose ...

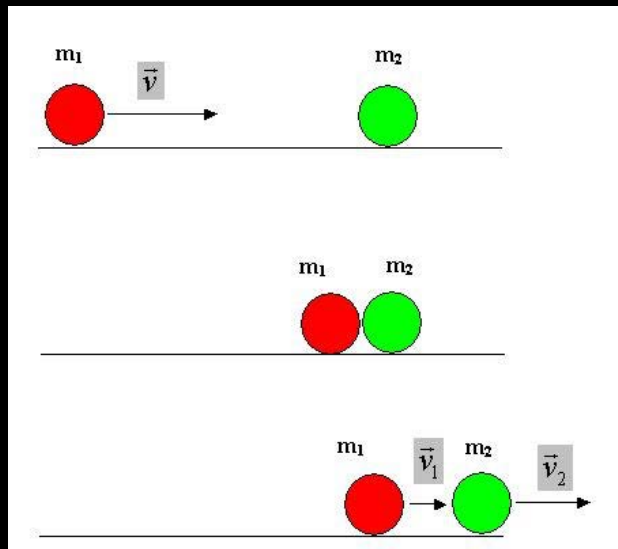
- Urti “Classici”



- scopo dell'esperimento: calcolare  $v'_1$  e  $v'_2$  note  $v_1$ ,  $v_2$ ,  $m_1$  e  $m_2$
- per risolvere il problema si sfruttano:
  - conservazione della massa:  $m_i = m'_i$
  - conservazione della quantità di moto
  - conservazione dell'energia cinetica (se l'urto è elastico)

$$m_1 v_1 + m_2 v_2 = m_1 v'_1 + m_2 v'_2$$
$$\frac{1}{2} m_1 v_1^2 + \frac{1}{2} m_2 v_2^2 = \frac{1}{2} m_1 v'^2_1 + \frac{1}{2} m_2 v'^2_2$$

# Esempio: urto elastico unidimensionale



$$m_1 v_1 = m_1 v_1' + m_2 v_2' \quad \rightarrow \quad v_1' = v_1 \frac{m_1 - m_2}{m_1 + m_2}$$
$$\frac{1}{2} m v_1^2 = \frac{1}{2} m v_1'^2 + \frac{1}{2} m_2 v_2'^2 \quad \rightarrow \quad v_2' = v_1 \frac{2m_1}{m_1 + m_2}$$



- PUNTI FONDAMENTALI:
  - Massa ed energia cinetica si conservano “separatamente”
  - Il risultato è univocamente determinato
- Nella fisica moderna entrambi questi aspetti cessano di valere!
  - La teoria della relatività ristretta di Einstein fa cadere il primo punto
  - La meccanica quantistica fa cadere il secondo punto

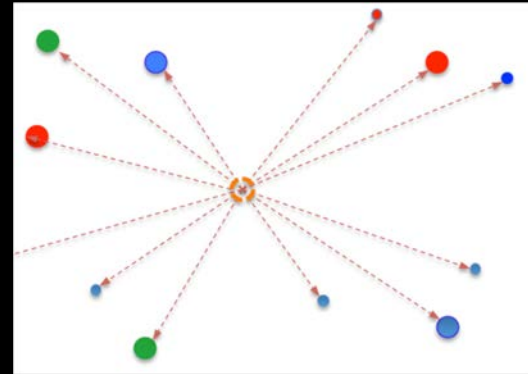
# Urti a LHC ...

In una reazione NON si conserva la massa !

- *annichilazione*  $e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma$   
massa(finale)  $\ll$  massa(iniziale),  $M(\gamma) = 0$
- *annichilazione*  $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$   
massa(finale)  $\gg$  massa(iniziale),  $M(\mu) = 200 \times M(e)$

$E=mc^2$  al lavoro: da massa ad energia e/o da energia a massa

Inoltre da un urto di due  
particelle può scaturirne un  
numero  $\gg 2!$



Se conosco masse ed energie cinetiche delle due particelle iniziali posso prevedere esattamente quale sarà il risultato dell'urto?

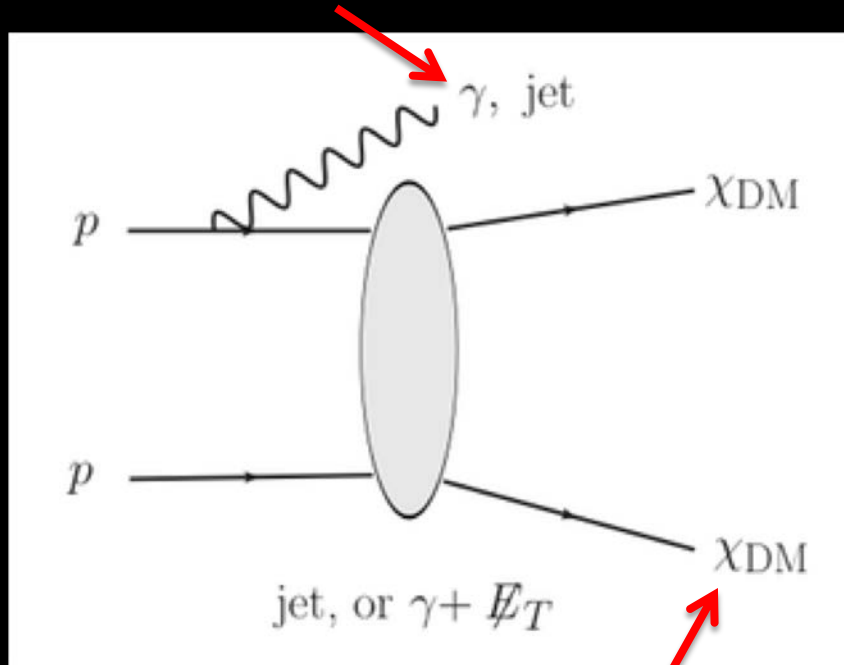
NO: posso solo calcolare la probabilità di ottenere un dato risultato ...

Dobbiamo quindi ripetere più volte la misura di un dato processo in modo da misurarne la frequenza e da questa la probabilità che esso avvenga e confrontare questa con le predizioni della teoria ...



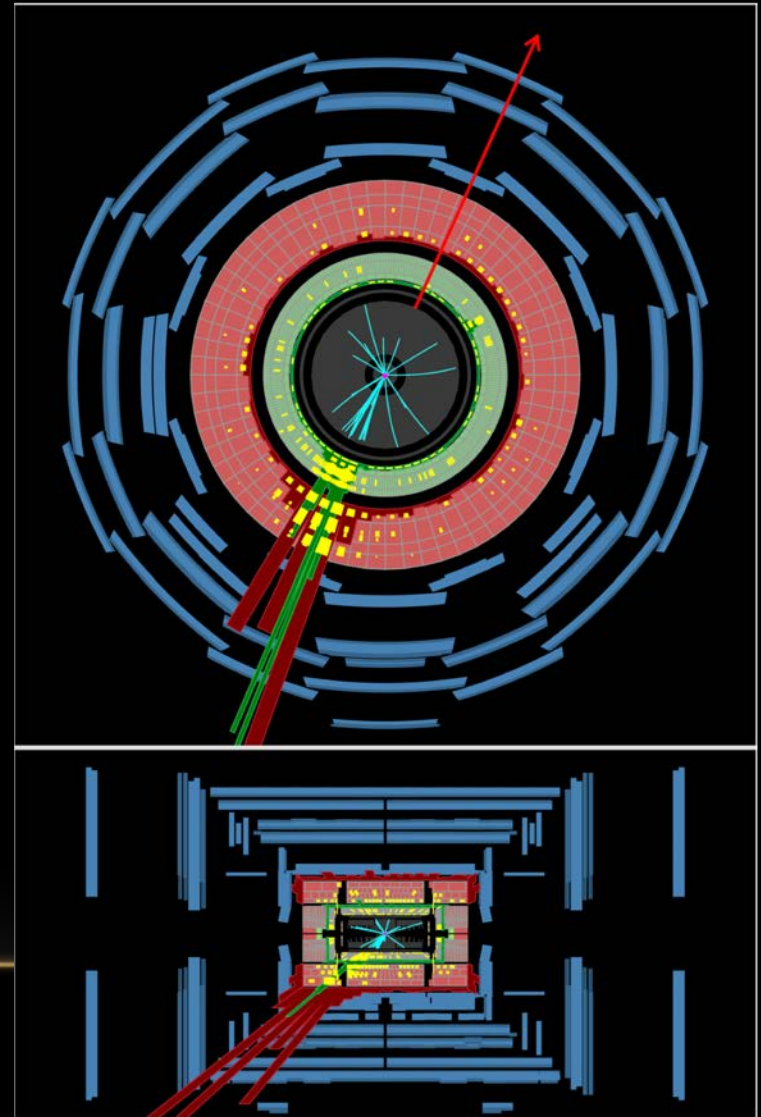
# Ricerca di Materia Oscura a LHC

Particella Normale: VISIBILI



Particelle di Materia Oscura: INVISIBILI

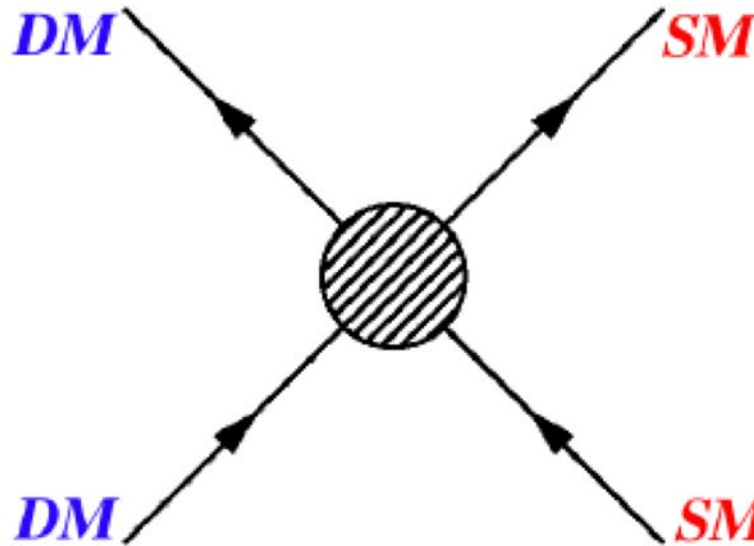
Evento MONO-JET in ATLAS



RIVELAZIONE INDIRETTA

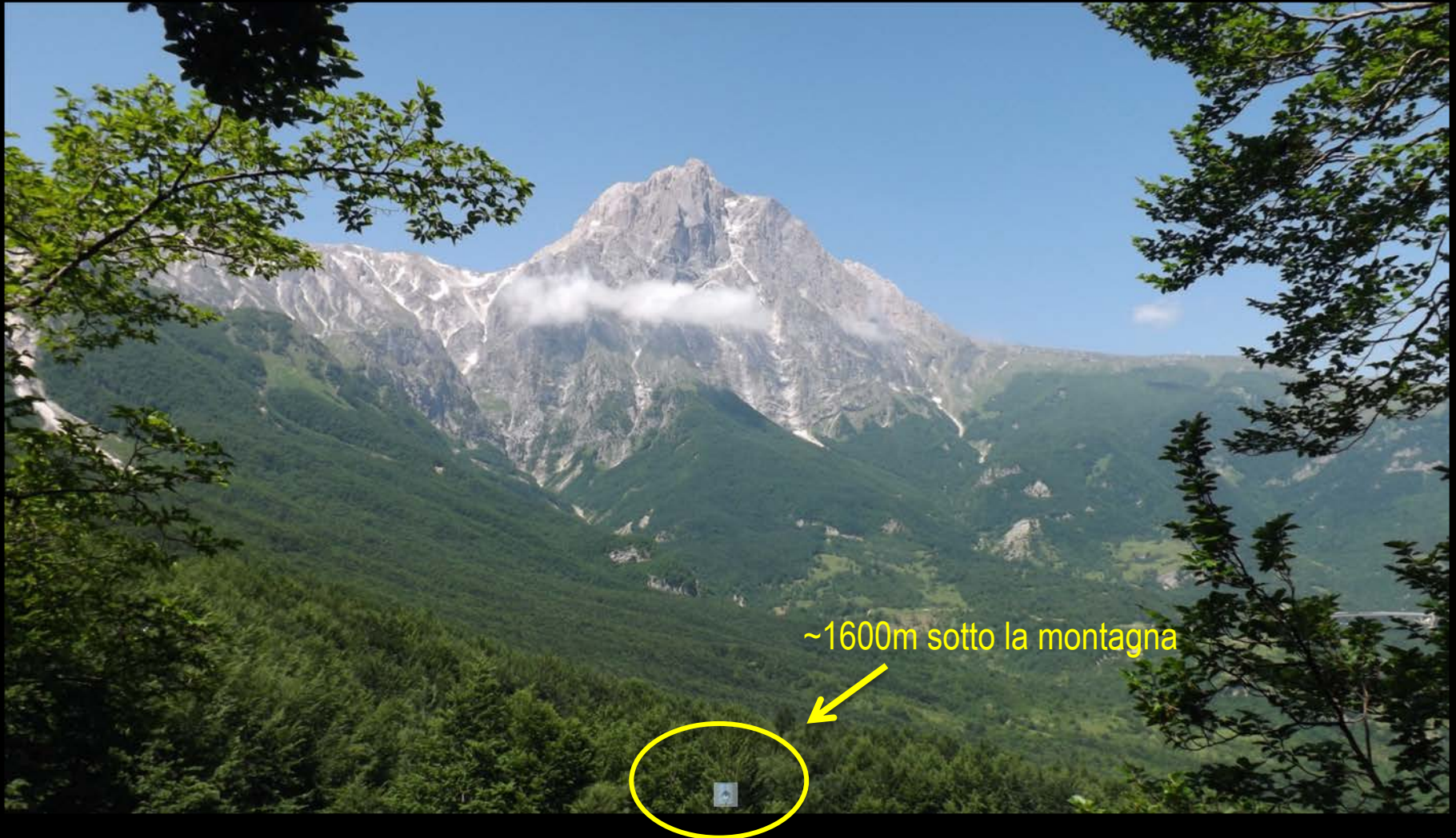


RIVELAZIONE DIRETTA



PRODUZIONE ARTIFICIALE

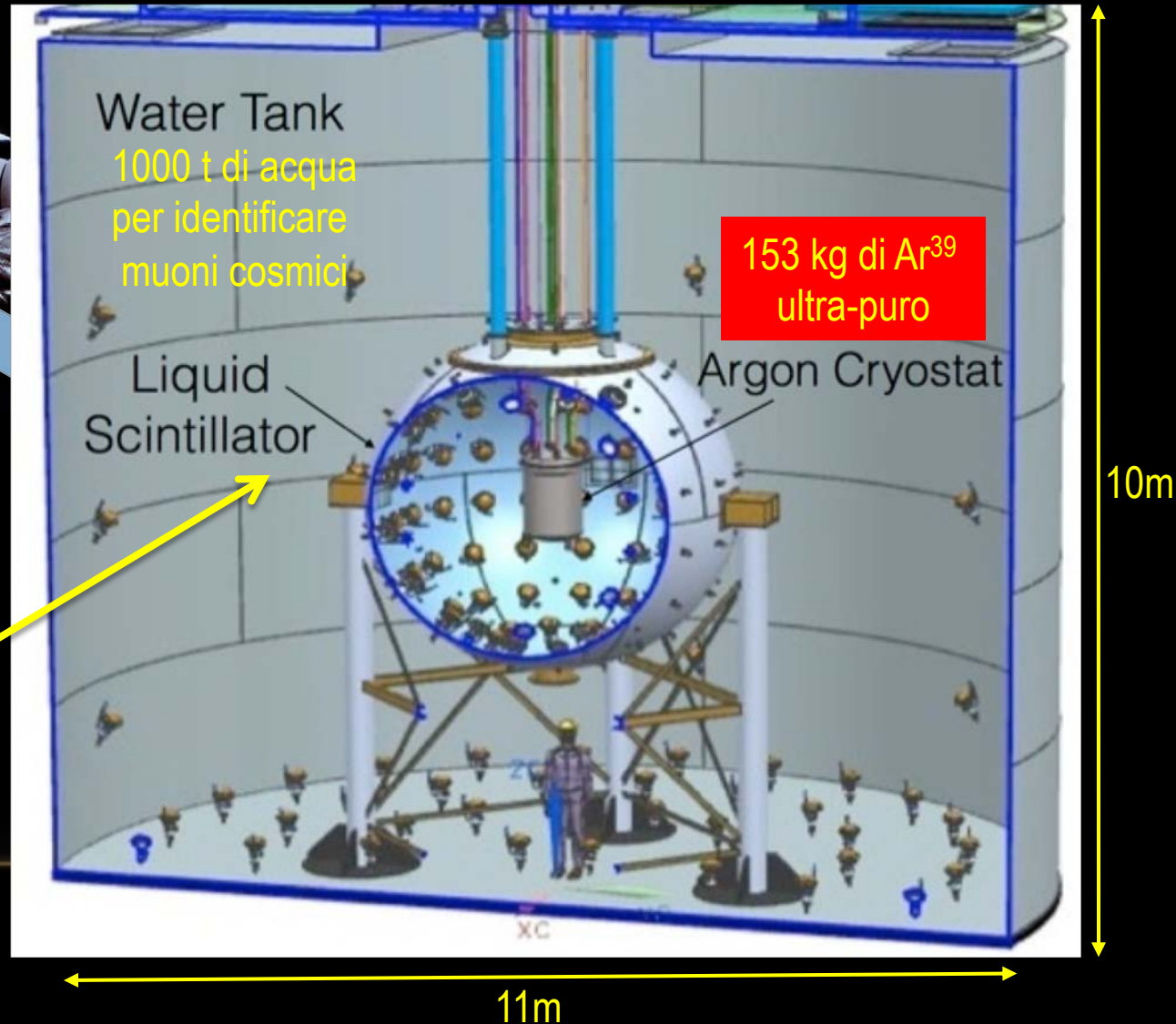
# DarkSide-50 nei Laboratori Nazionali INFN del Gran Sasso



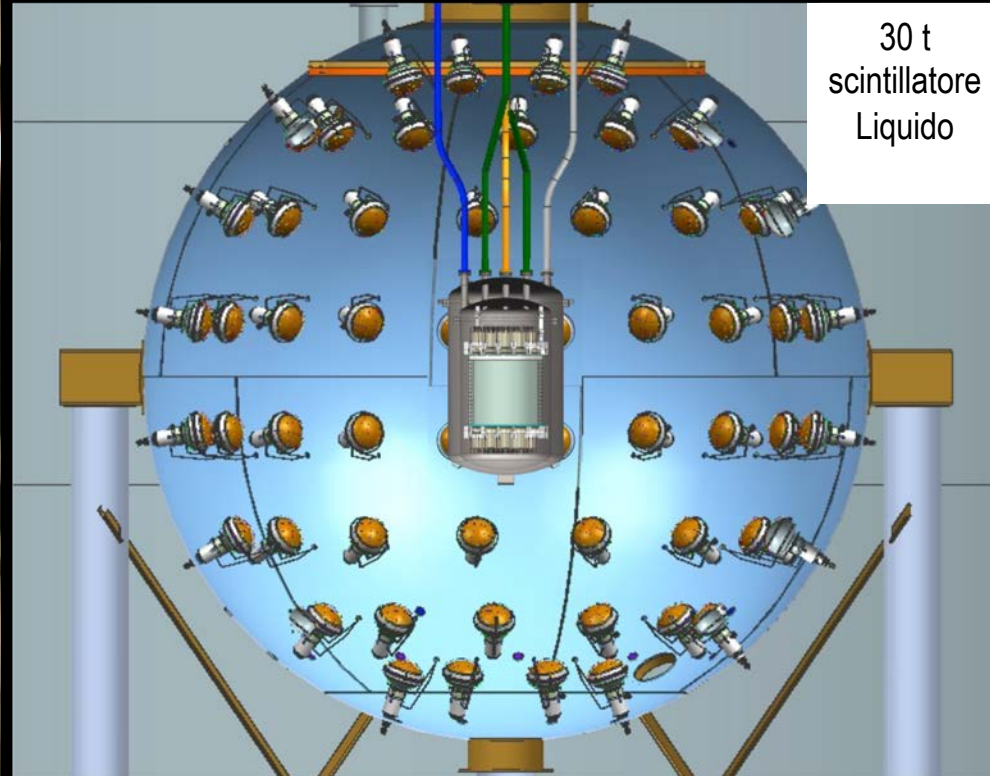
# DarkSide-50



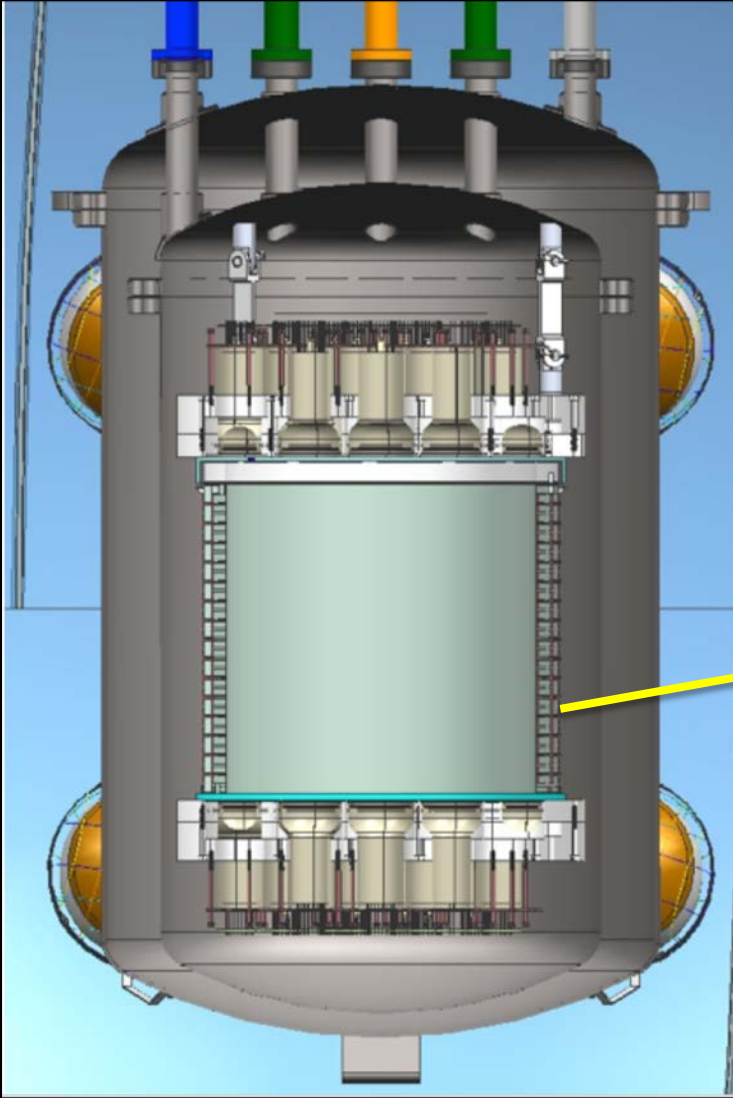
30 t di liquido scintillatore per identificare neutroni (4m di diametro)



# DarkSide-50



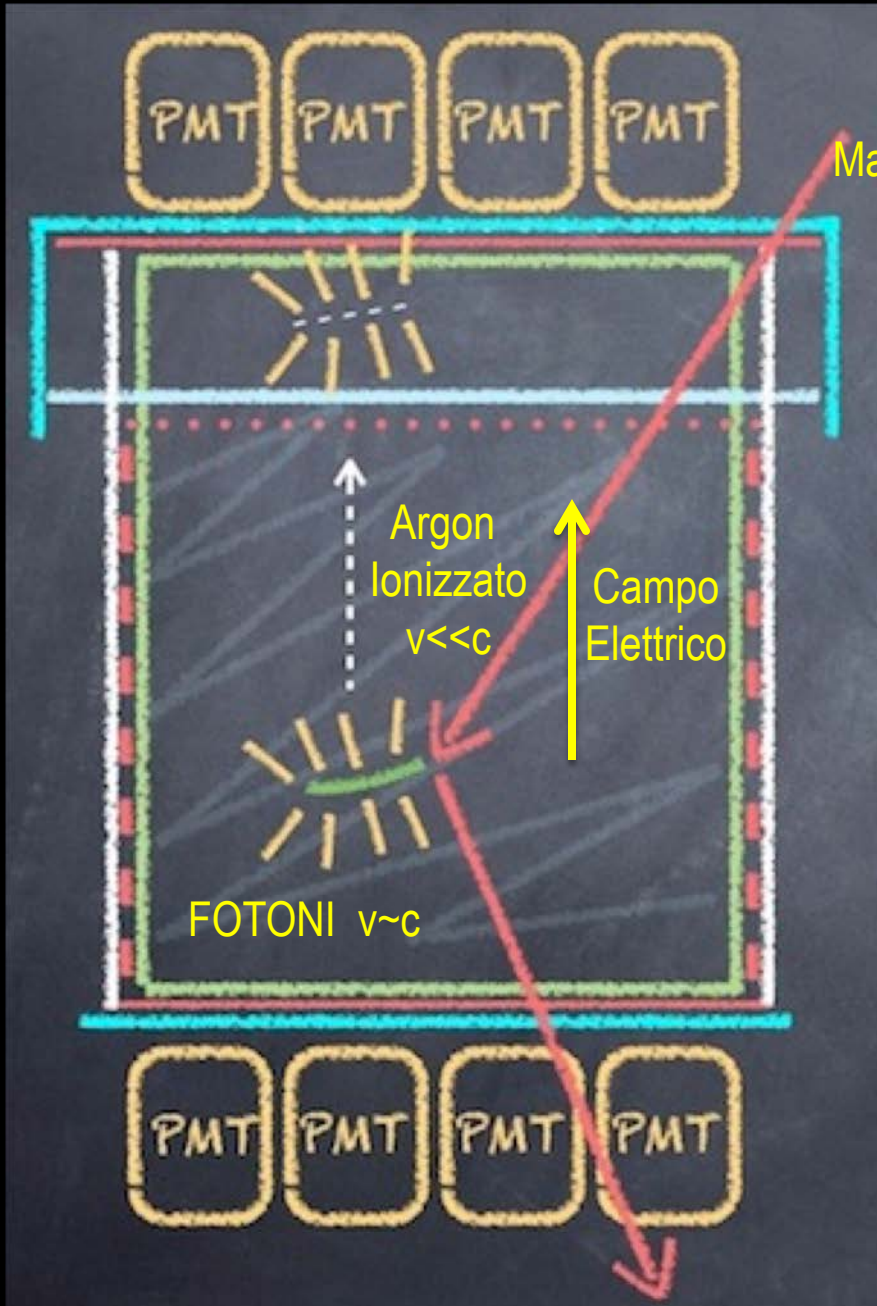
# DarkSide-50



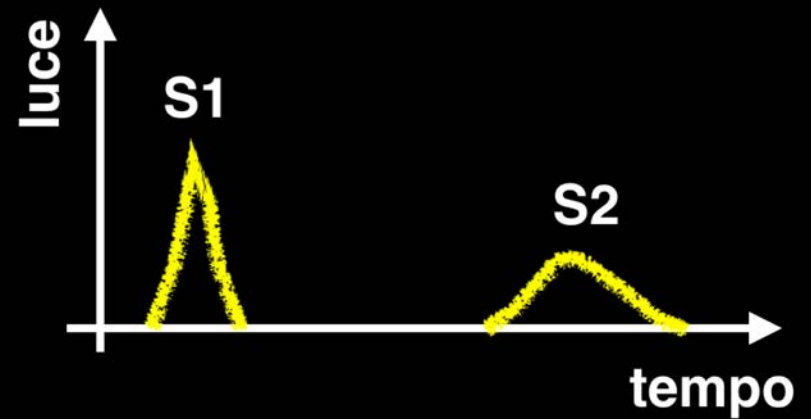
153 kg di  $\text{Ar}^{39}$   
purificato



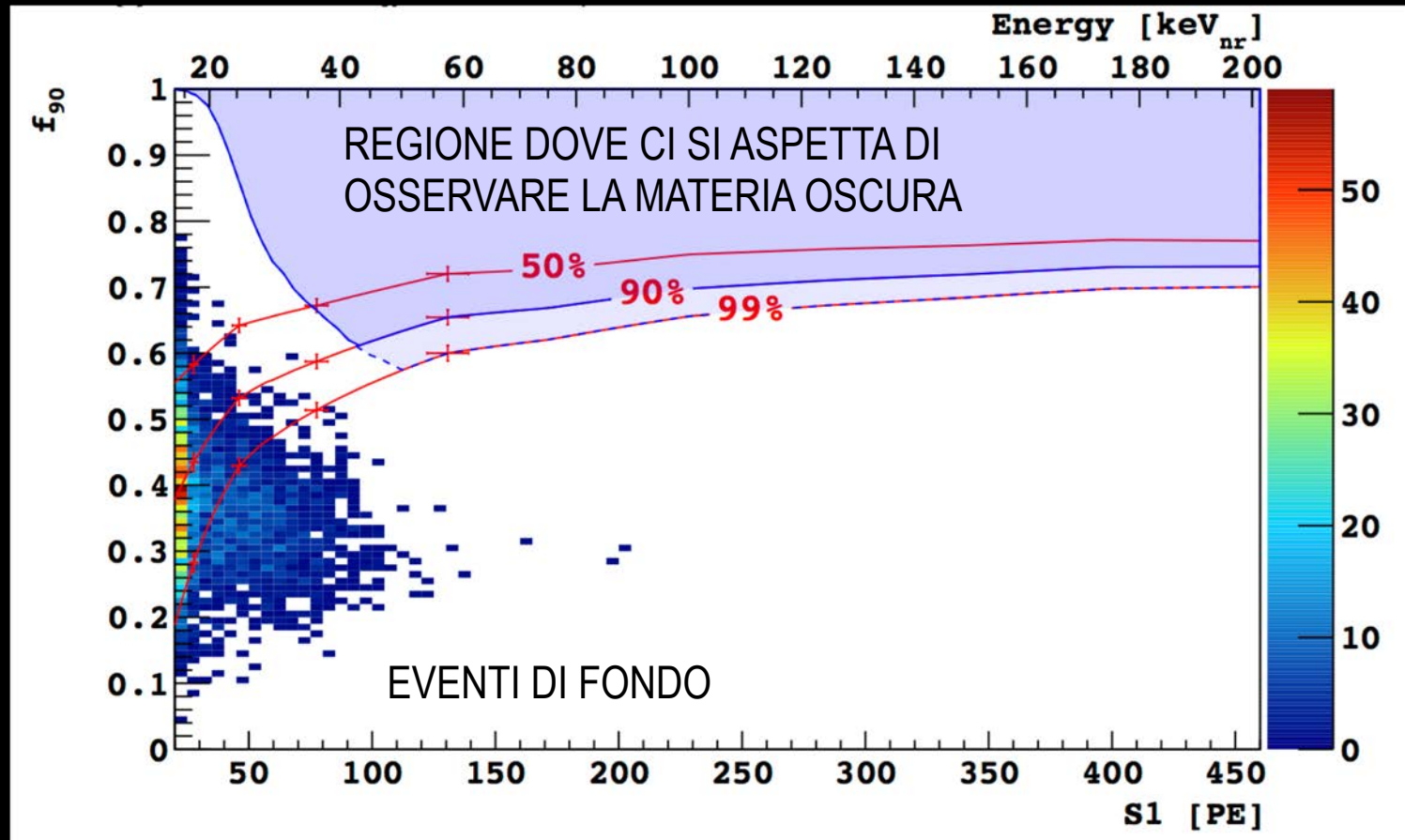
# DarkSide-50



particella  
Di  
Materia Oscura



# DarkSide-50



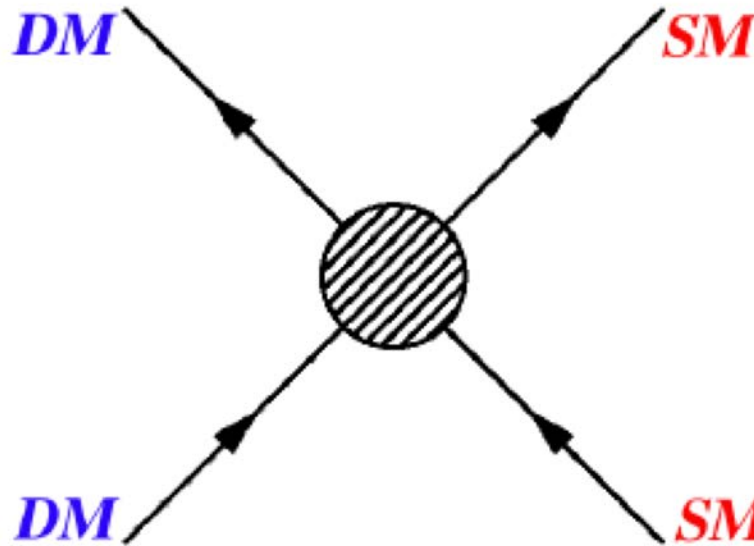
per aumentare il potenziale di del rivelatore si stà costruendo un nuovo rivelatore gigante:  
50kg → 20t di Argon liquido ultra-puro



RIVELAZIONE INDIRETTA

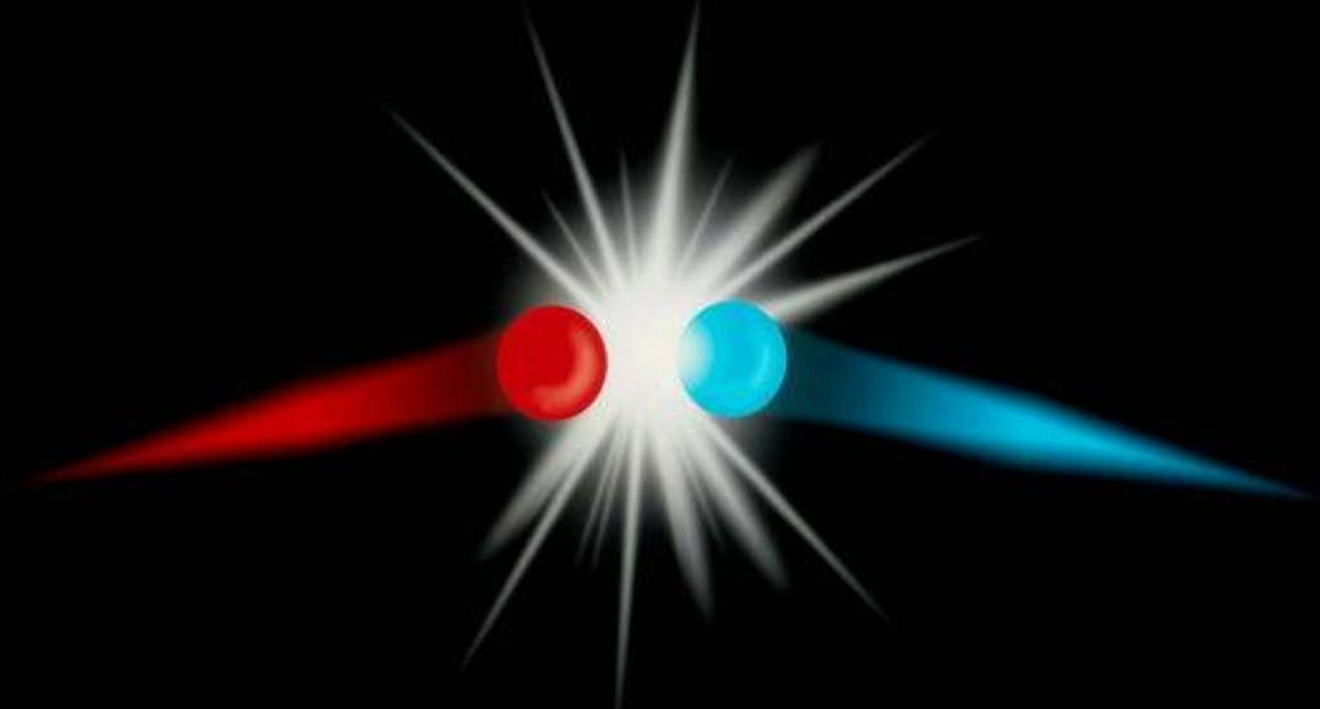
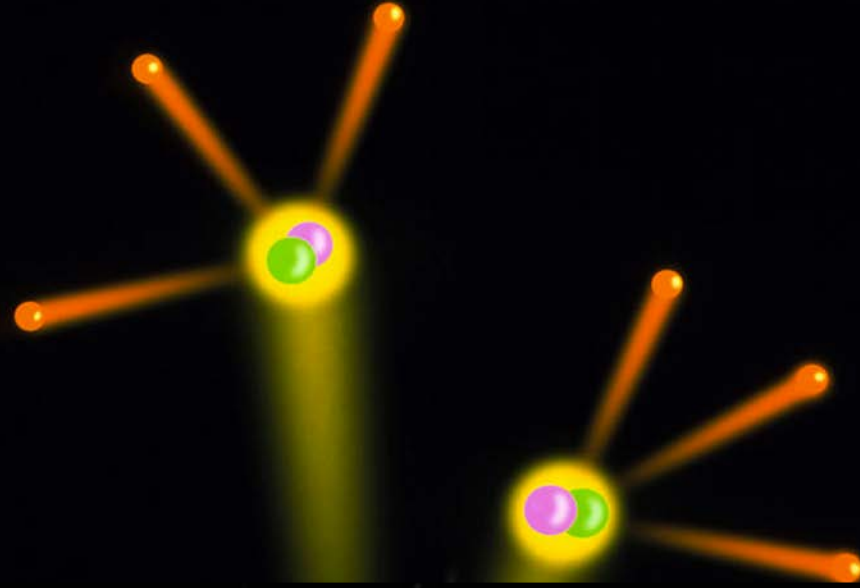


RIVELAZIONE DIRETTA



PRODUZIONE ARTIFICIALE

# Ricerca Indiretta



# Tomografia PET

## Principi di funzionamento della PET

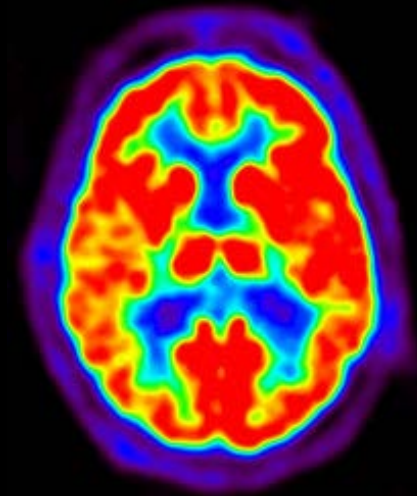
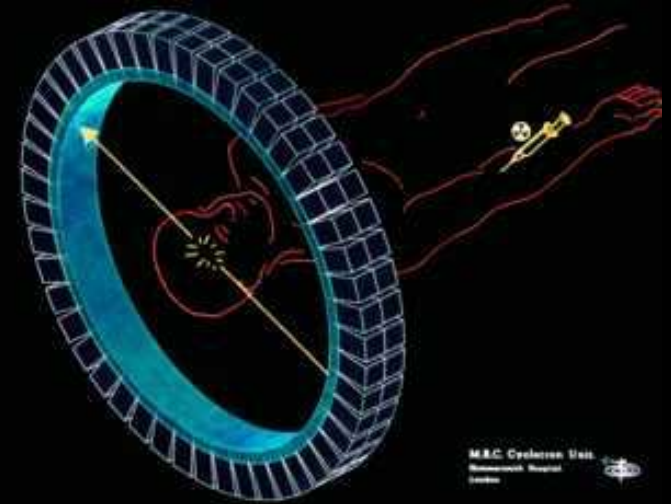
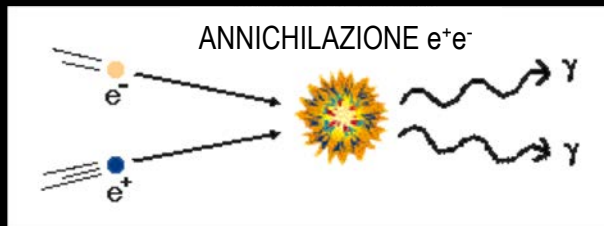
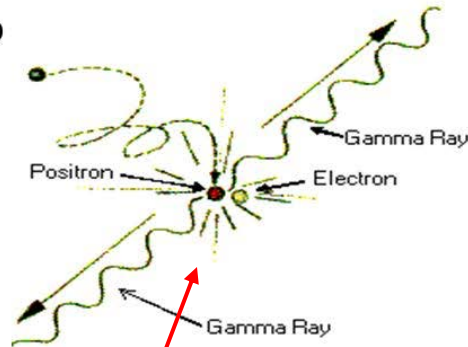
Iniezione o inalazione di un radiofarmaco

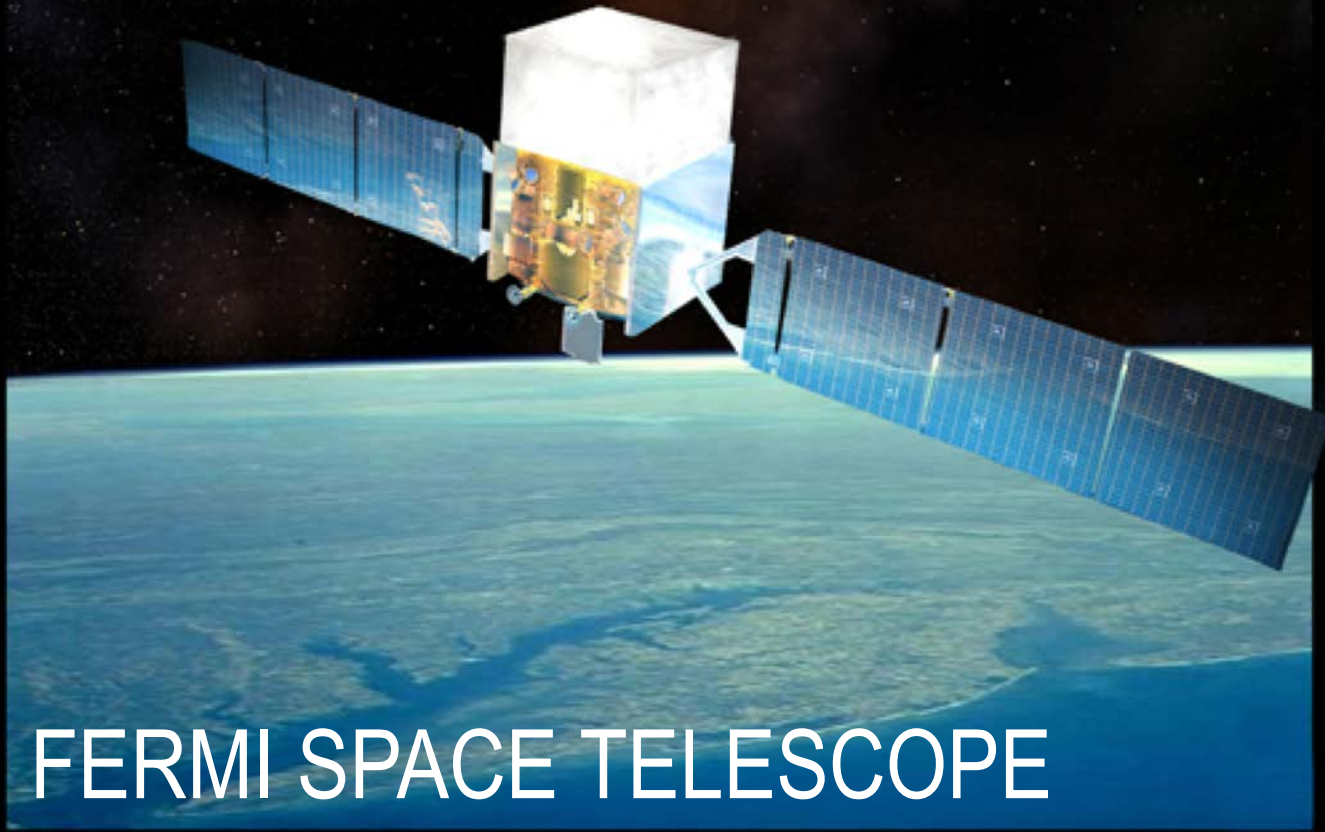
Decadimento del radioisotopo

Emissione di un positrone

Annichilimento del positrone con un elettrone

Emissione di due fotoni ad alta energia (511 KeV) che si propagano in direzioni opposte





# FERMI SPACE TELESCOPE



PSR J1836

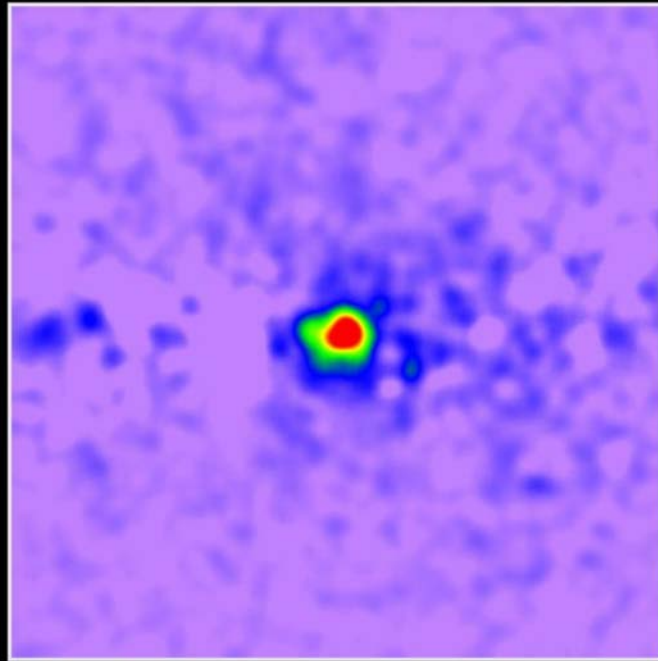
VELA

CTA 102 (QUASAR)

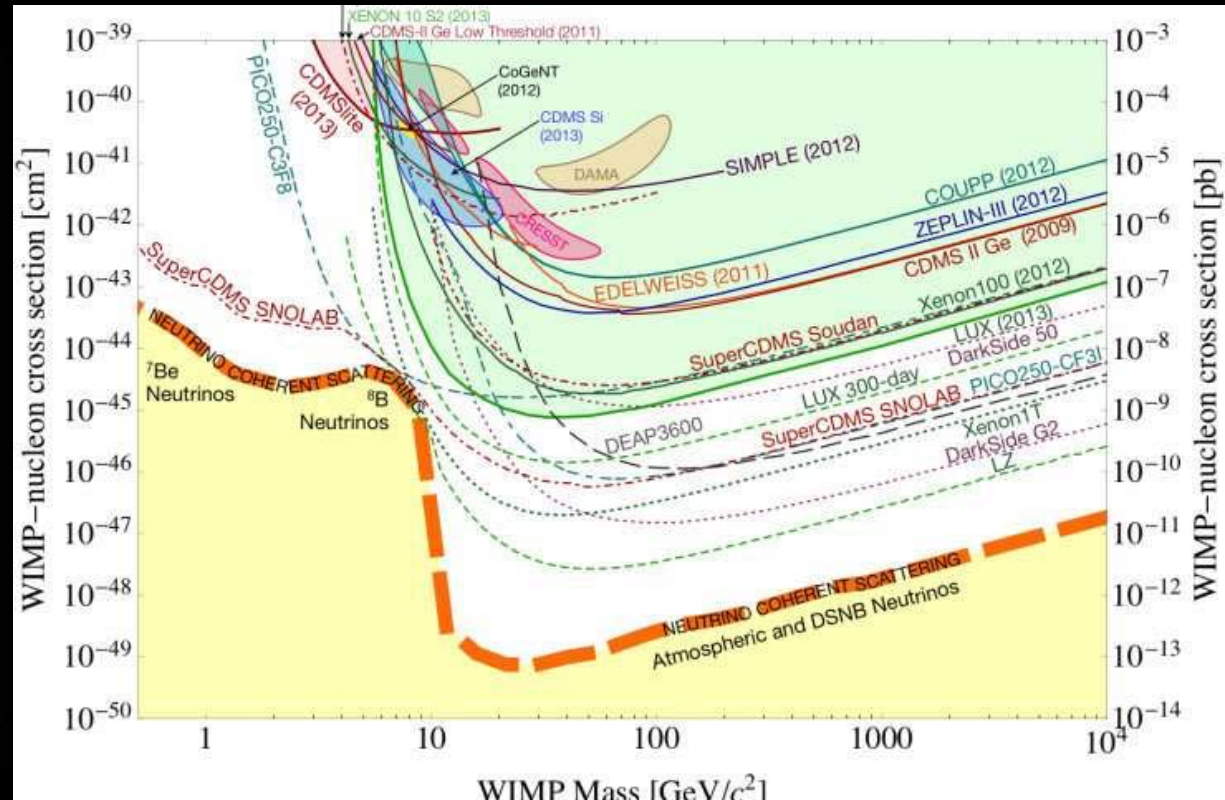


Credit: NASA/DOE/Fermi LAT Collaboration

# Lo stato attuale delle ricerche ...



Known sources removed



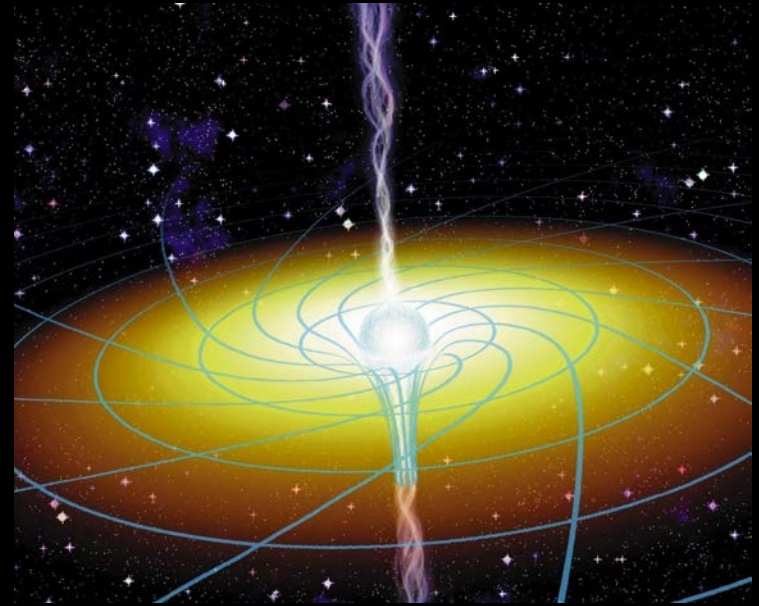
indicazioni di “anomale” osservate in alcuni esperimenti specifici, non sufficienti per dire di aver osservato direttamente la Materia Oscura

Una nuova generazione di esperimenti (HL-LHC, DS-20k, Nuovi Telescopi) permetterà di verificare tali anomalie e estendere in modo sostanziale lo spazio esplorabile ...

# Usare i Buchi Neri come acceleratori di particelle

- per quanto potente LHC non possiede un potere di esplorazione illimitato
    - materia oscura è troppo pesante per essere prodotta a LHC
    - materia oscura che interagisce solo gravitazionalmente
  - Due soluzioni complementari:
    - costruisco un acceleratore più potente e esperimenti più sensibili: HL-LHC e FCC
    - usare i buchi neri e gli interferometri per onde gravitazionali come produttori/acceleratori naturali di particelle e rivelatori di materia oscura
-

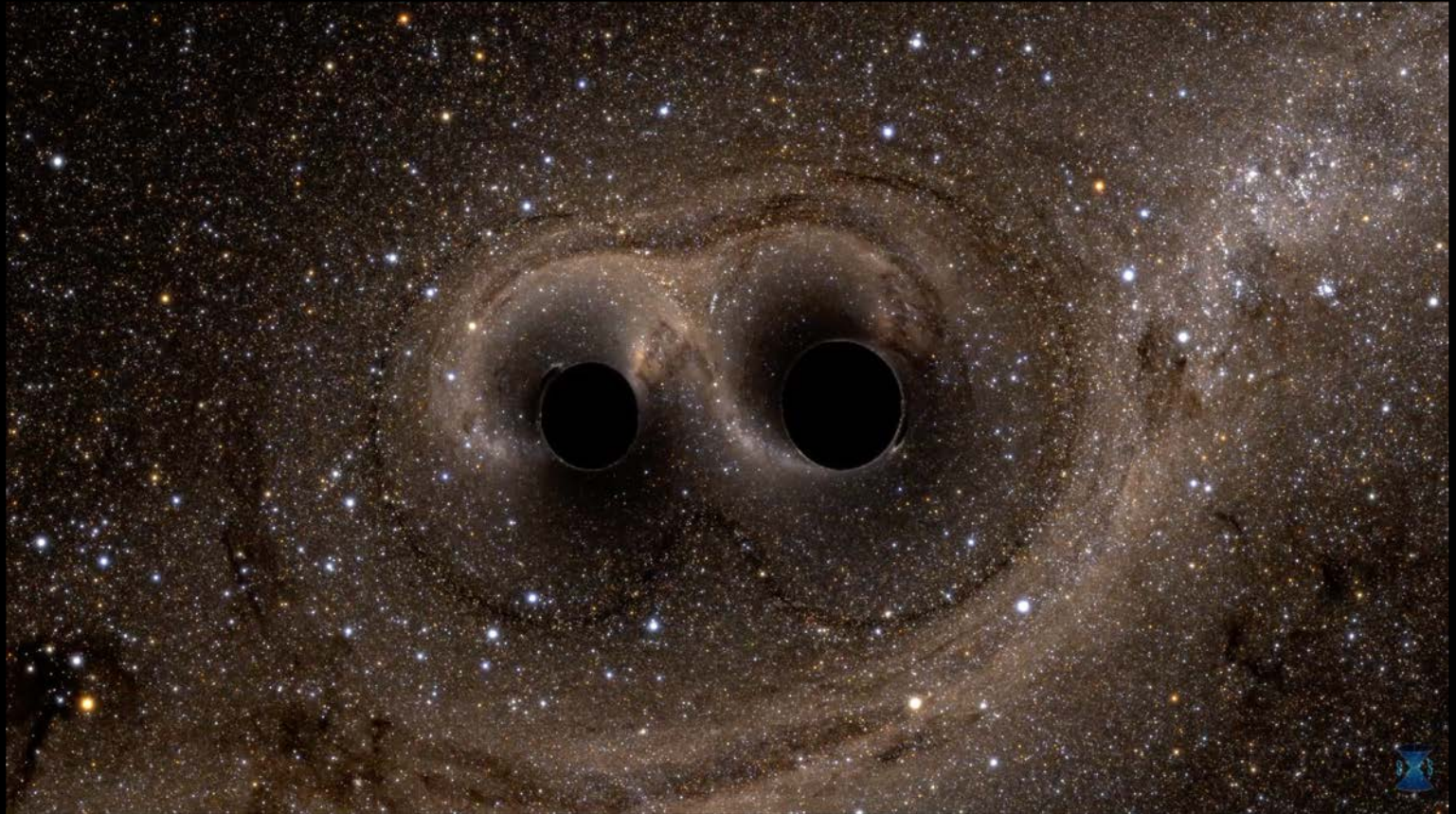
- i buchi neri in rotazione tendono a trasferire energia alla materia che lo circonda attraverso un effetto che viene chiamato “Frame Dragging”
- effetto piccolissimo, servono due buchi neri super-massivi che collassano uno sull’altro per vederne gli effetti
- enorme trasferimento di energia alla materia circostante in grado di creare un fascio di particelle molto più potente di qualunque acceleratore di particelle sulla terra



- non siamo in grado di osservare direttamente tali particelle, ma possiamo studiare l’effetto di queste sulle onde gravitazionali emesse durante l’unione dei due buchi neri
- un tale tipo di acceleratore di particelle non sarebbe preciso come LHC, ma fornirebbe informazioni cruciali su come costruire gli LHC del futuro!

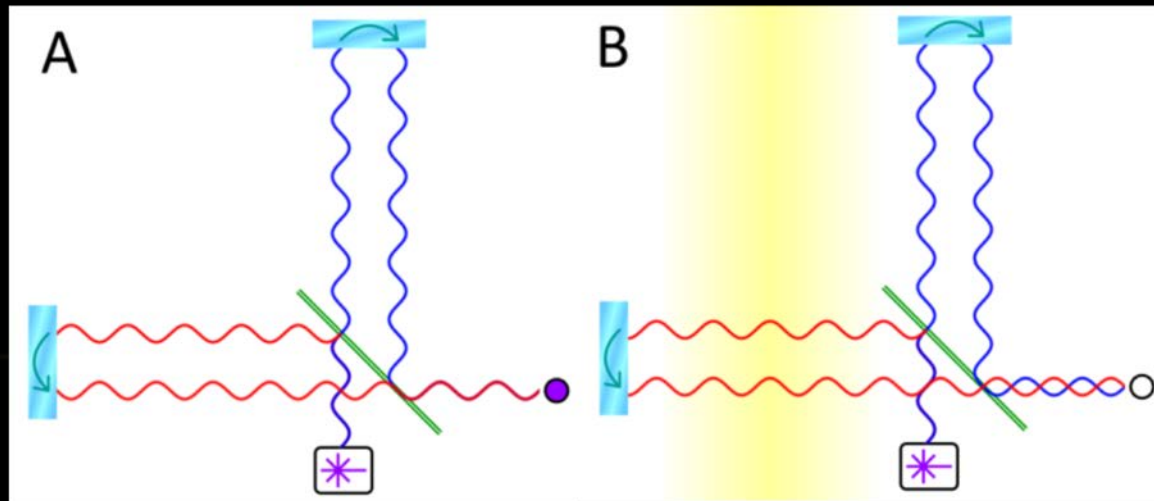
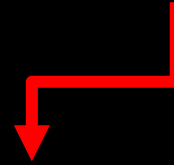
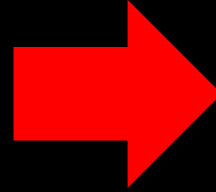
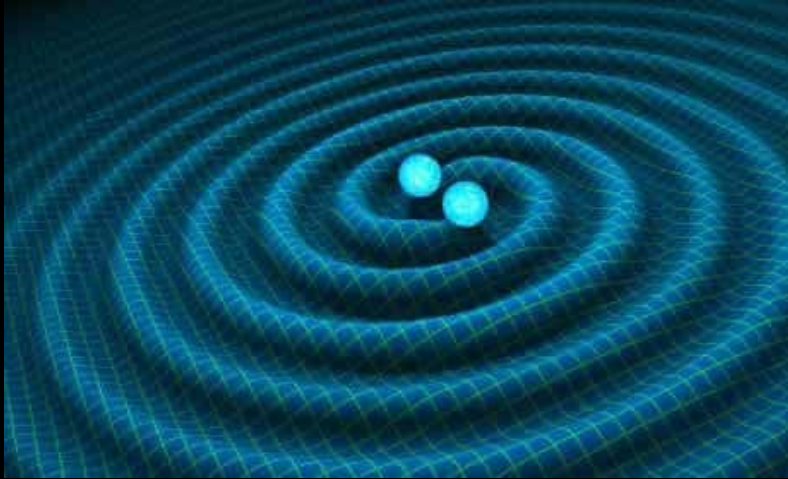


# Due Buchi Neri che si uniscono

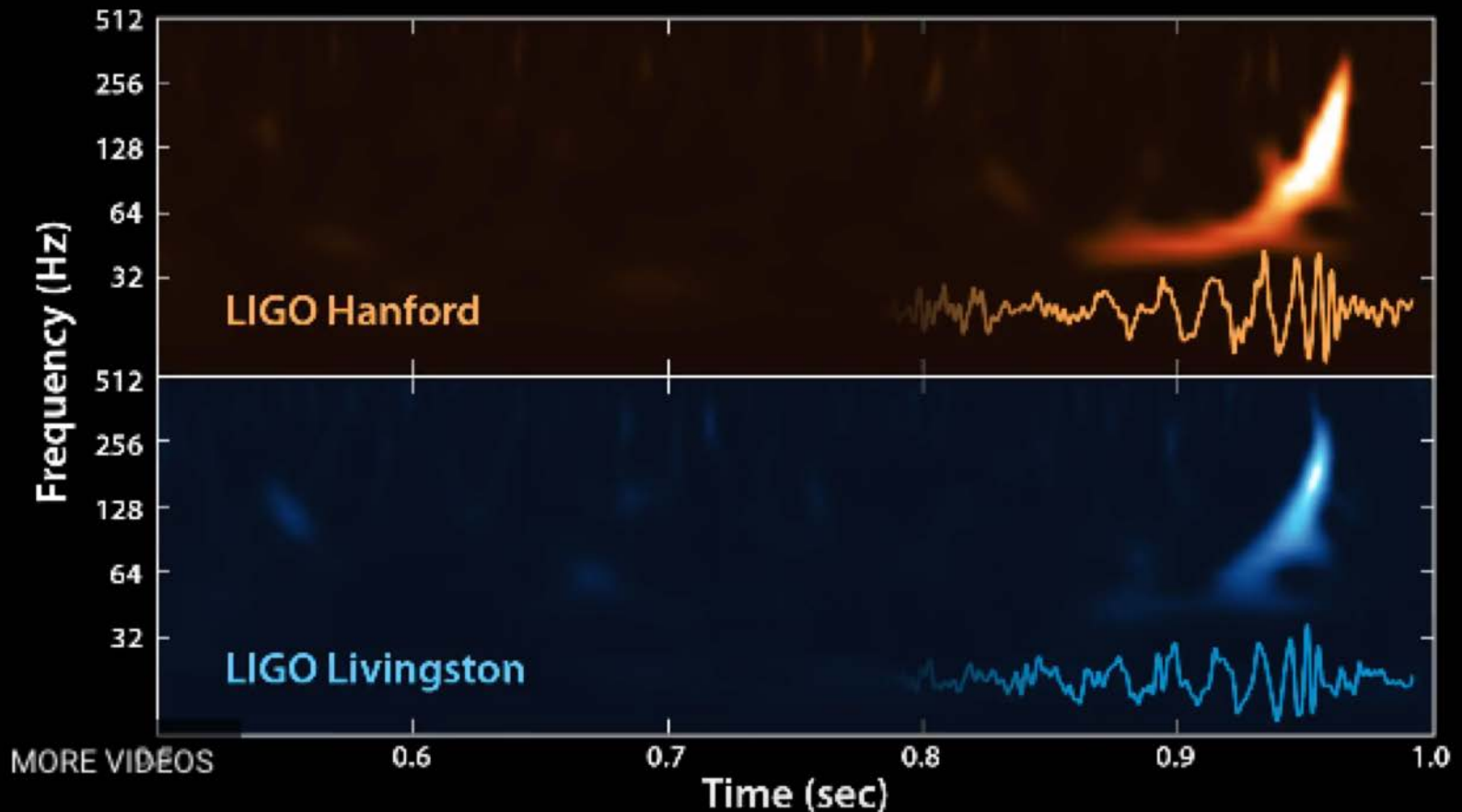


# ... e rivelazione di GW

Interferometro VIRGO



# ... il "rumore" di una GW



*Ma a cosa serve cercare ed eventualmente scoprire la Materia Oscura?*

*Ottima domanda!*

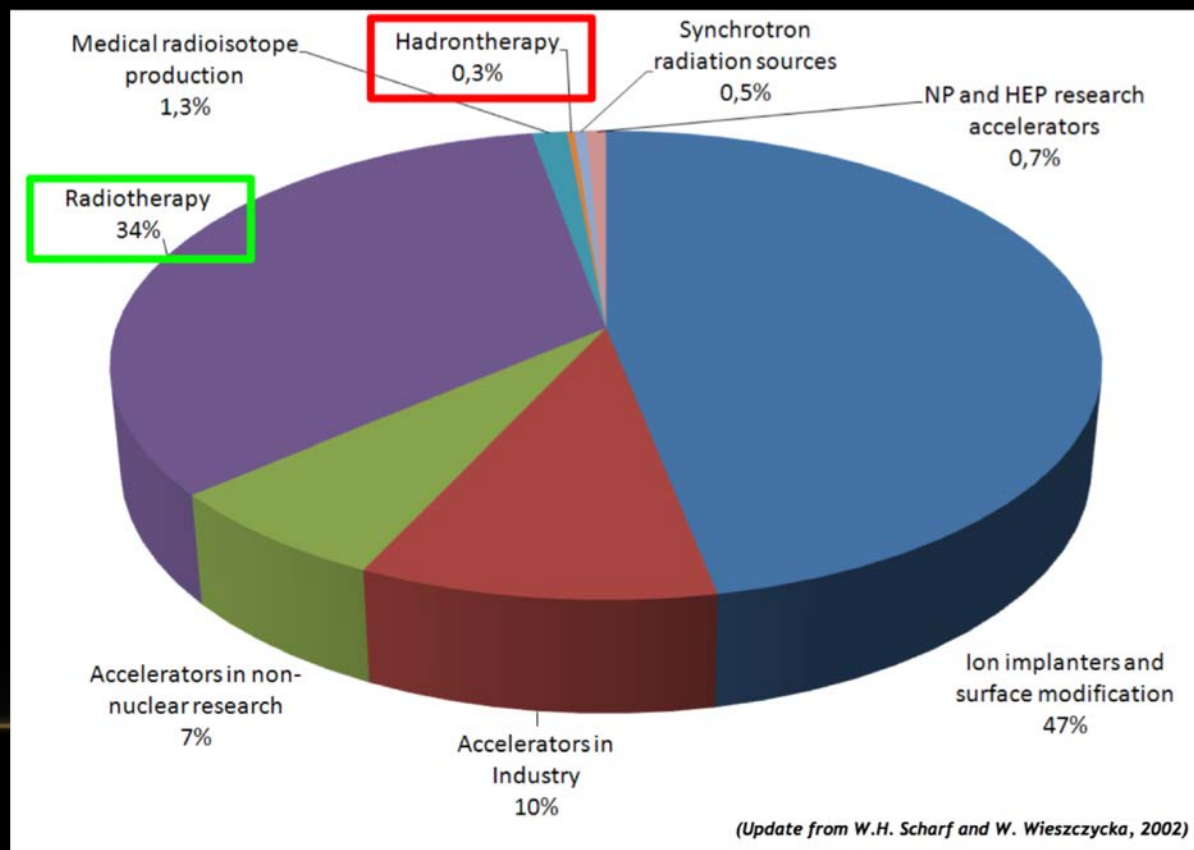
*E' possibile rispondere su diversi livelli ...*

---

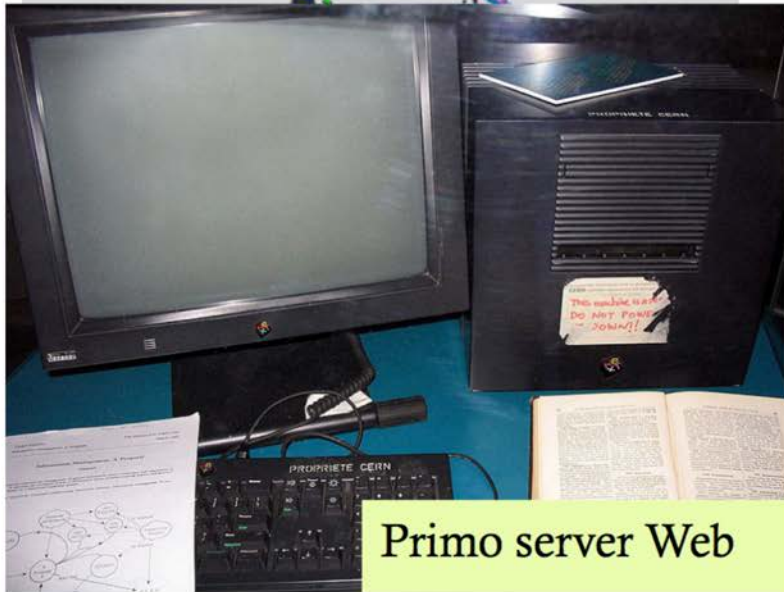
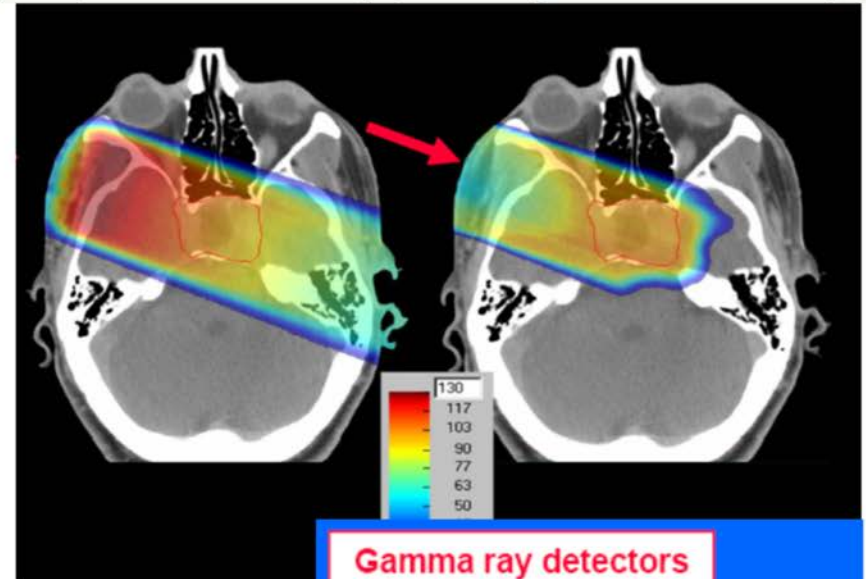
*forse il meno importante:*

*la ricerca fondamentale ha molteplici ricadute tecnologiche con forte impatto positivo sulla società ...*

Esempio:  
tecnologia  
degli  
acceleratori di  
particelle

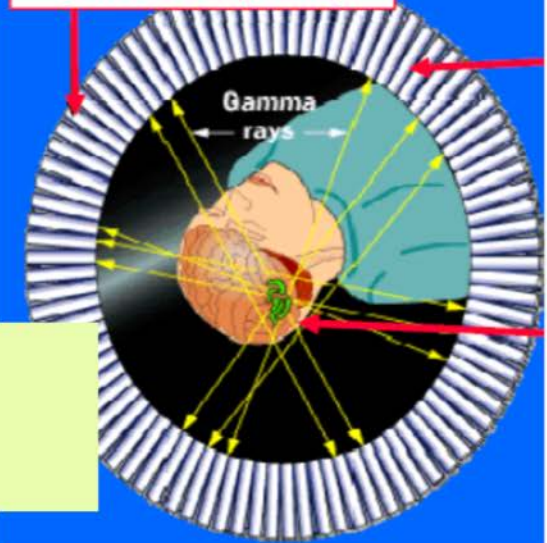


# Centro Nazionale di Adroterapia Oncologica (CNAO-Pavia) (~2000 pazienti /anno)



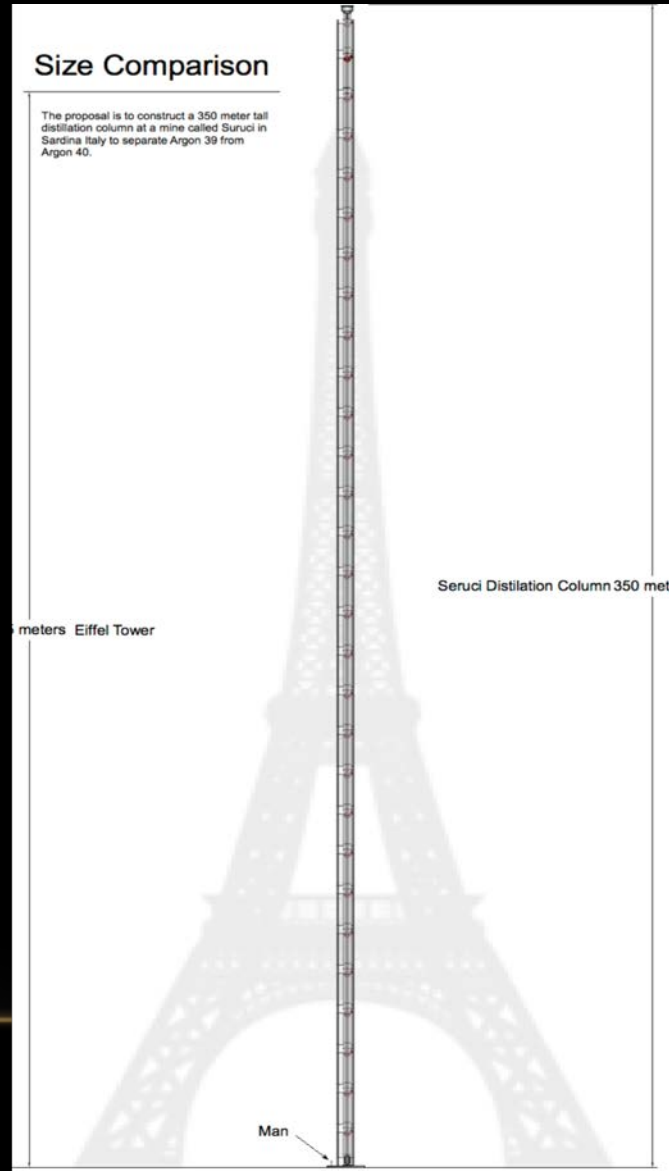
Primo server Web

Gamma ray detectors  
(Ex. BGO crystals)



PET: positron  
emission  
technology

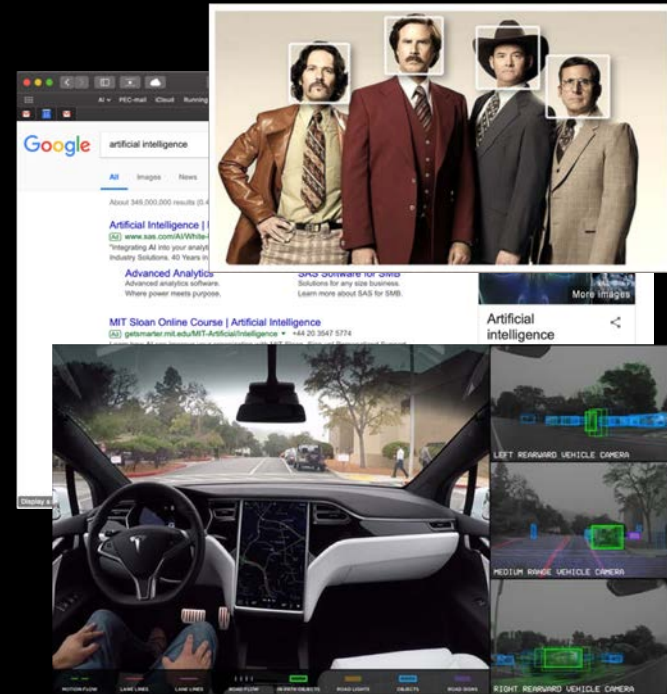
# Altro esempio: progetto ARIA nel Carbosulcis



Distillazione isotopi Argon ultra-puro per esperimenti Materia Oscura  
Distillazione isotopi Ossigeno fondamentali nelle moderne tecniche  
di diagnostica medica avanzata

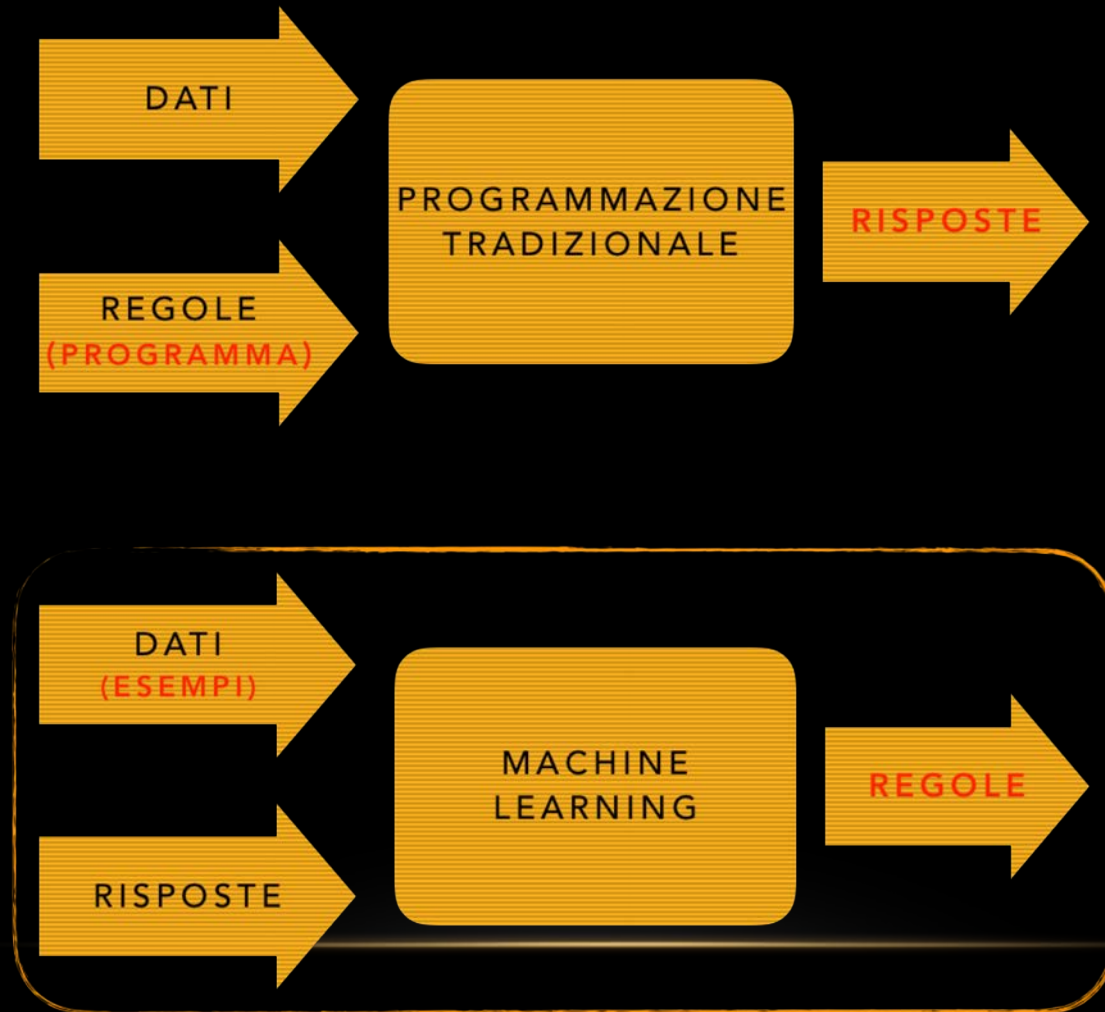
# Ancora un esempio: Intelligenza Artificiale

- Il concetto di AI esiste dalla metà degli anni '50 ma è solo recentemente che applicazioni di AI si stanno diffondendo esponenzialmente nella vita sociale al di fuori dell'ambito della ricerca e sviluppo
- accelerazione dovuta a tre sviluppi paralleli:
  - migliori algoritmi (Machine e Deep Learning)
  - disponibilità di maggiore potenza di calcolo (GPUs/TPUs/...)
  - abilità del settore tecnologico industriale di registrare e mantenere enormi quantità di dati

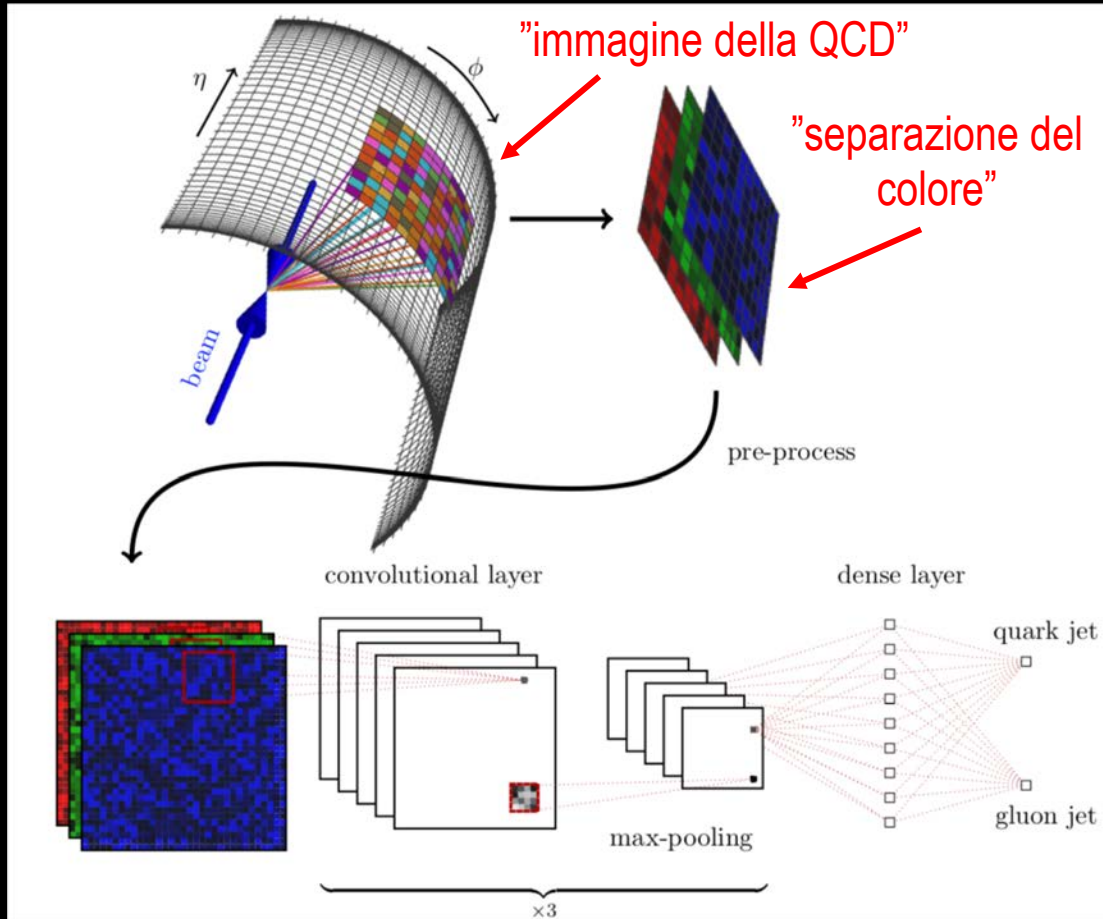




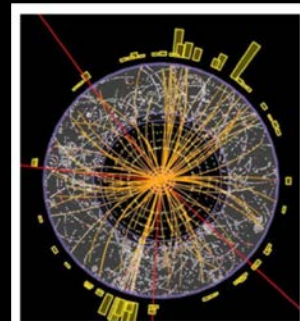
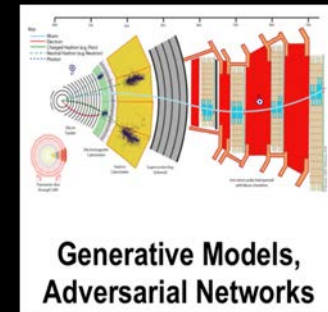
# Machine Learning



# Machine Learning e Ricerca di Materia Oscura a LHC ...



dal riconoscimento di immagini  
alla ricostruzione di particelle

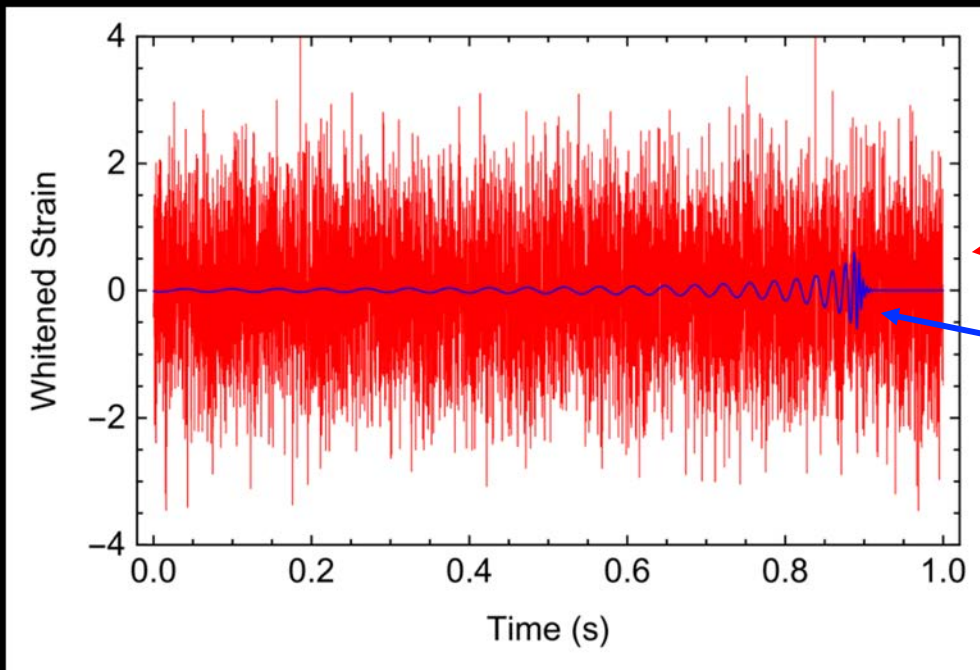


**Deep Kalman  
RNNs**



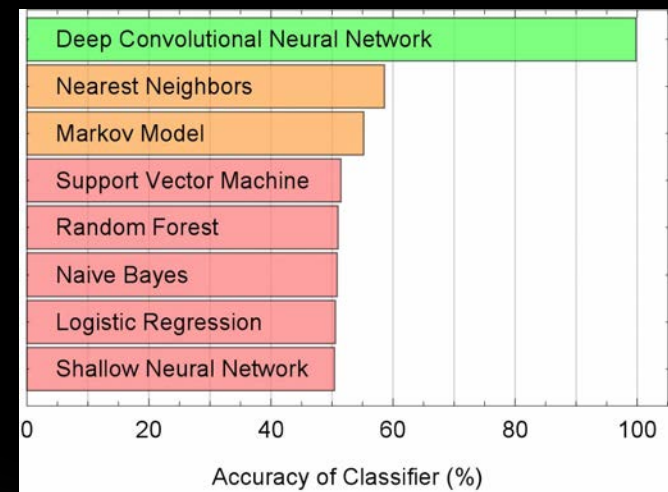
**Deep ML +FPGA**

# Machine Learning e Onde Gravitazionali ...



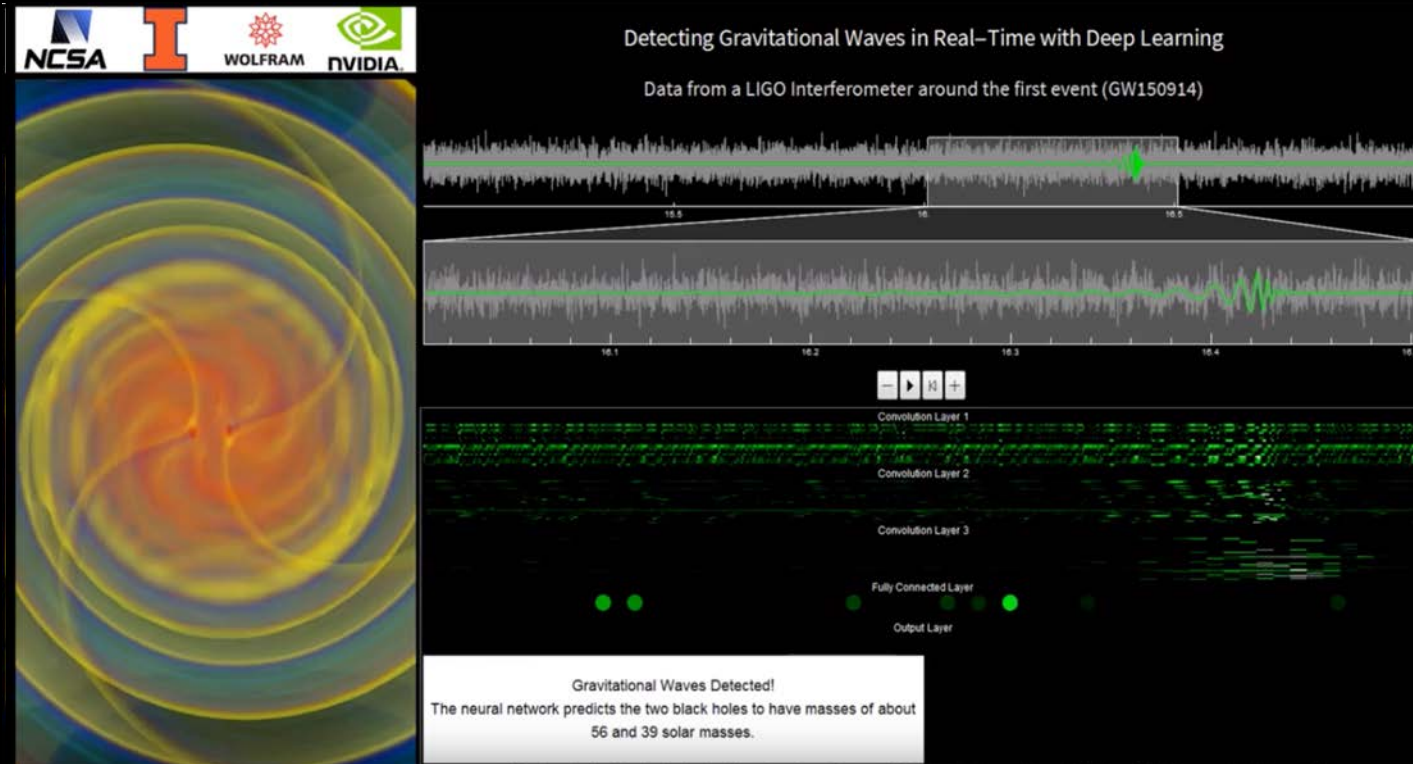
rumore

segnale onda  
gravitazionale



# Machine Learning e Onde Gravitazionali ...

Real-time Deep Filtering



Deep learning for real-time gravitational wave detection and parameter estimation results with advanced LIGO data - Daniel George and Christy Farr (2017)

*Una motivazione più importante ...*

*La storia della scienza insegna che quello che deriva da una scoperta è difficilmente predicibile dagli scopritori. Lo si scopre anni dopo in contesti diversi...*

Esempi:

- Elettricità (Faraday,...)
- Radioattività naturale (Becquerel, Curie,...)
- Rallentamento dei neutroni (Fermi,...)
- Antimateria (Dirac, Anderson,...)

magari un giorno avremo nuove tecnologie basate sulla Materia Oscura ...  
non possiamo saperlo oggi, ma sicuramente vale la pena comunque!



Urbis et Orbis