

I nuovi acceleratori per la fisica del futuro

Fabio Bossi

INFN Laboratori Nazionali di Frascati

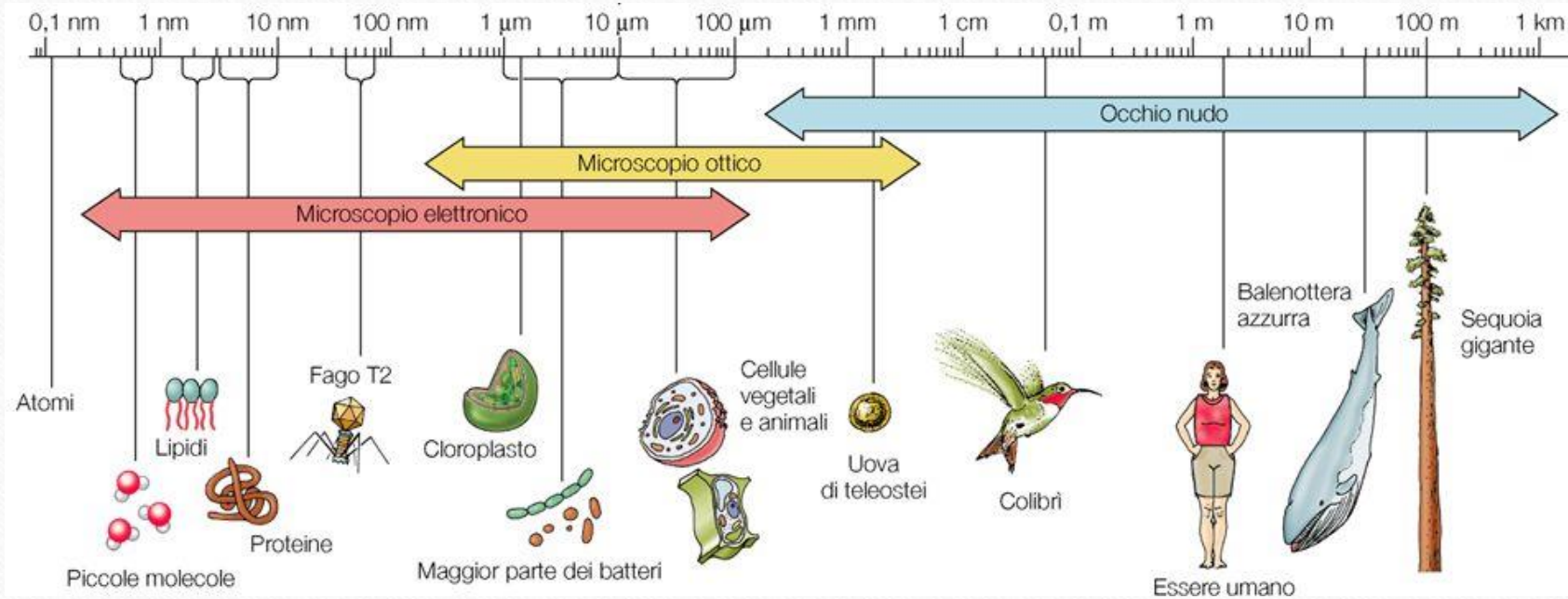
Cosenza, 19 Aprile 2023

Due questioni fondamentali (ed apparentemente scorrelate)

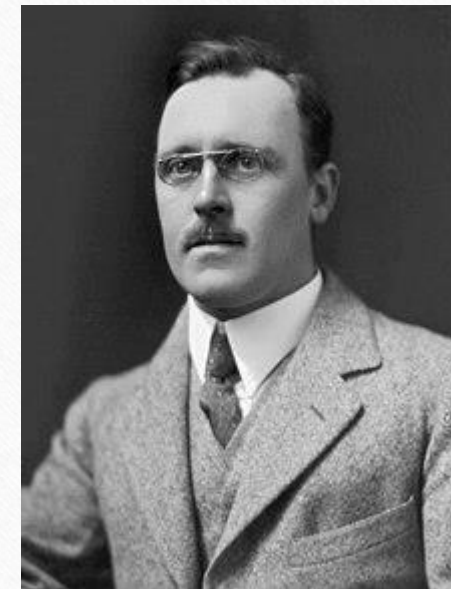
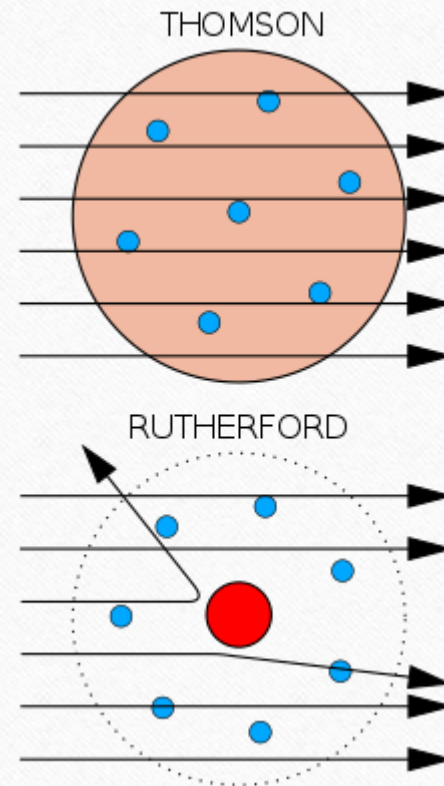
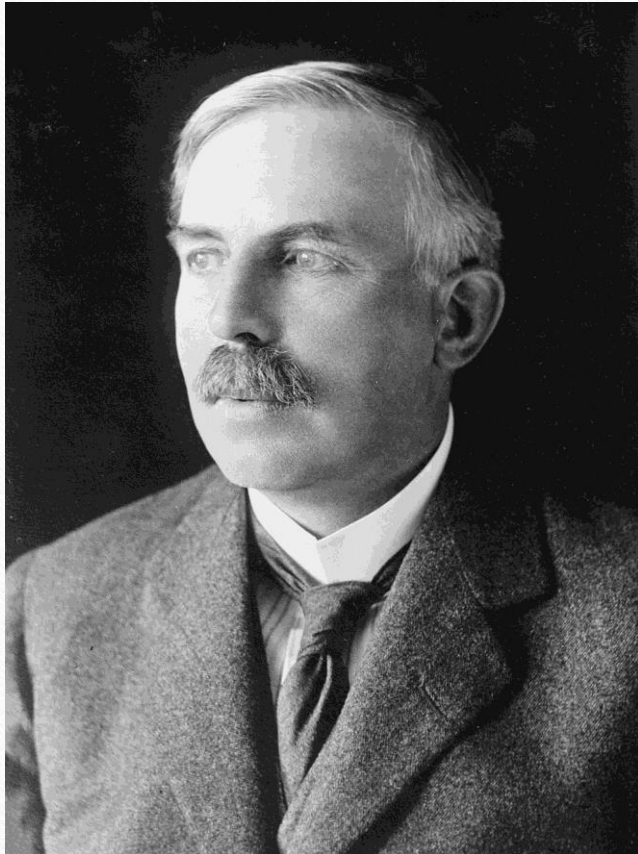
Esistono dei costituenti fondamentali del mondo? E se sì, quali sono, e quali sono le leggi a cui essi obbediscono?

L'Universo è finito od infinito nel tempo e nello spazio? E' sempre stato identico a ciò che noi oggi osserviamo?

Quanto è piccolo l'infinitamente piccolo?



La madre di tutti gli esperimenti



Due equazioni fondamentali

$$p = \frac{h}{\lambda}$$

Dualismo onda-particella



- Collisioni elastiche
- Studio della struttura della materia

$$E = mc^2$$

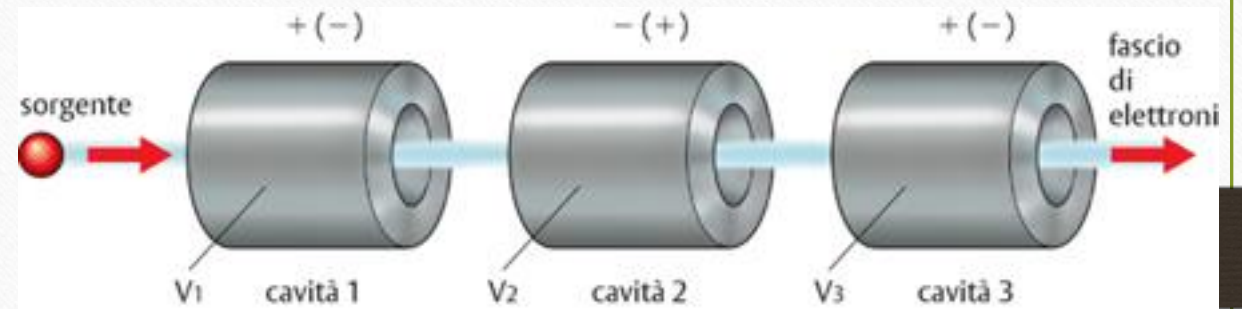
Equivalenza massa-energia



- Collisioni anelastiche
- Produzione di nuove particelle materiali

Sia che si vogliano ottenere collisioni elastiche che anelastiche lo strumento fondamentale usato dai fisici è un acceleratore di particelle

Attraverso l'uso di potenti **campi elettrici** un acceleratore «spinge» fasci di particelle cariche elettricamente ad energie sempre più elevate per farle collidere con un bersaglio fisso o contro un altro fascio di particelle che si muove in direzione opposta



Per curvare i fasci di particelle e far loro seguire un percorso predeterminato si fa uso di opportuni **campi magnetici**

L'energia raggiunta dalle particelle di un acceleratore si misura in multipli di elettronvolt (eV). 1 eV è l'energia posseduta da un elettrone quando è sottoposto ad una tensione di 1 Volt (cioè ~ alla tensione di una normale pila stilo)

Per «sondare» i nuclei atomici occorrono energie di milioni di eV (MeV). Per produrre nuove particelle sono necessarie energie di miliardi di eV (GeV) o più

Queste energie si ottengono grazie ad opportune «**cavità risonanti**» che allo stato dell'arte raggiungono gradienti dell'ordine dei **10-50 MeV/m**

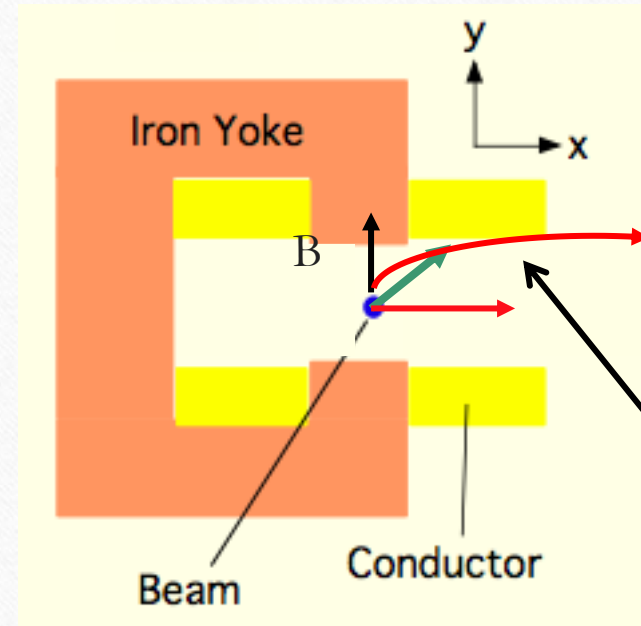
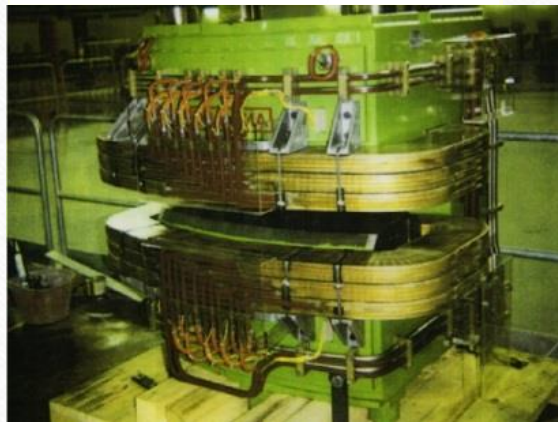
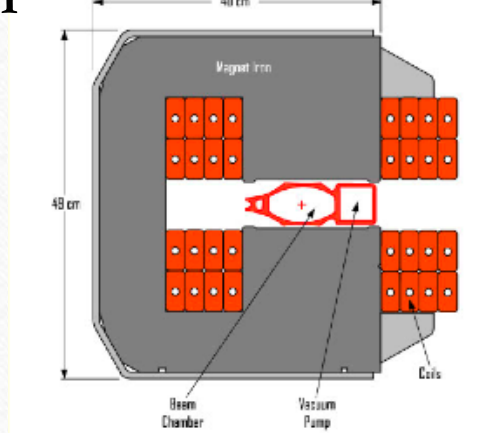




Typical breakdown and pulse heating
damage is standing-wave structure cell



I **dipoli** consentono di curvare la traiettoria delle particelle. Possono essere realizzati con magneti permanenti o elettromagneti

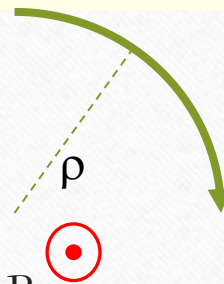


Traiettoria circolare

Raggio di curvatura

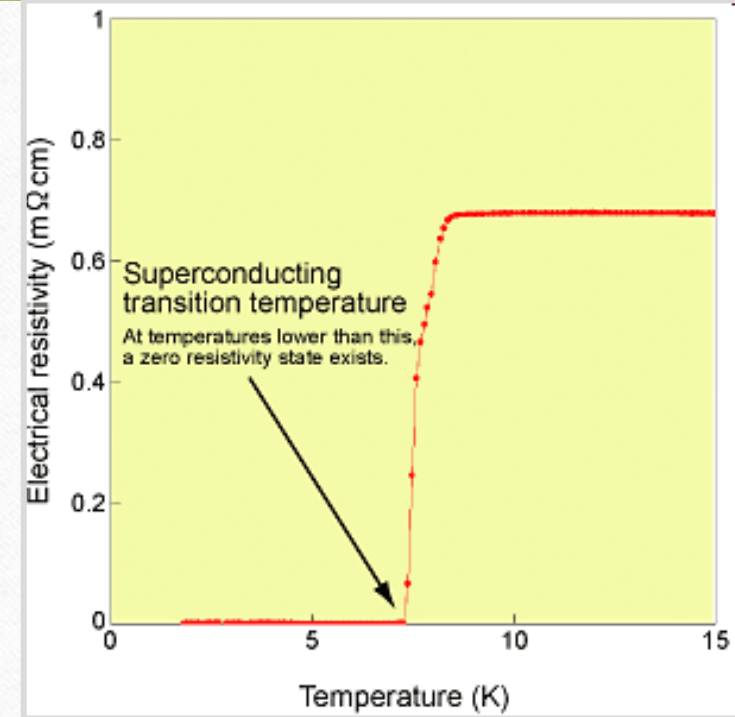
$$\rho[m] = \frac{p}{Bq} \approx \frac{W}{cqB}$$

Per particelle
ultra-relativistiche

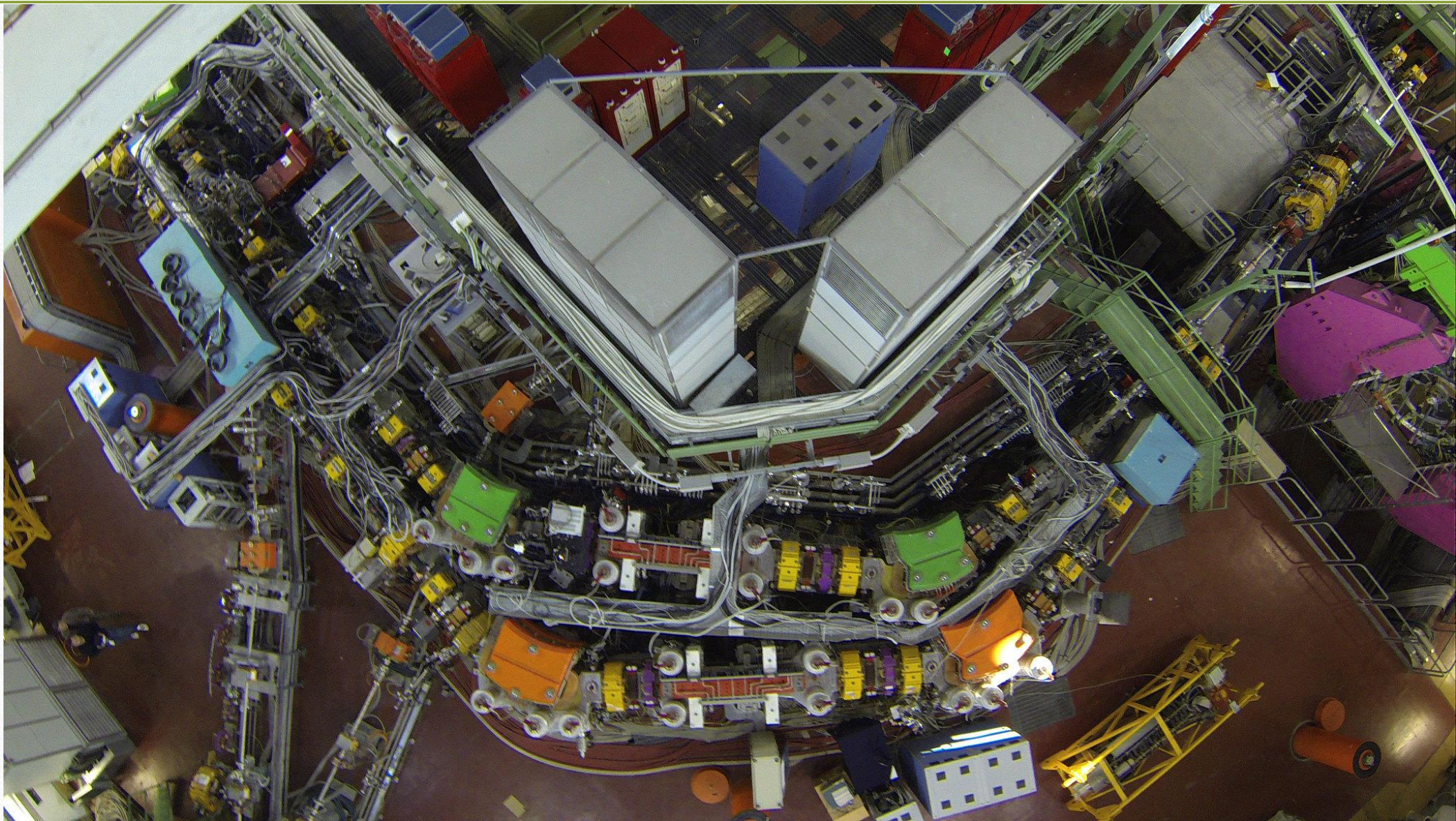


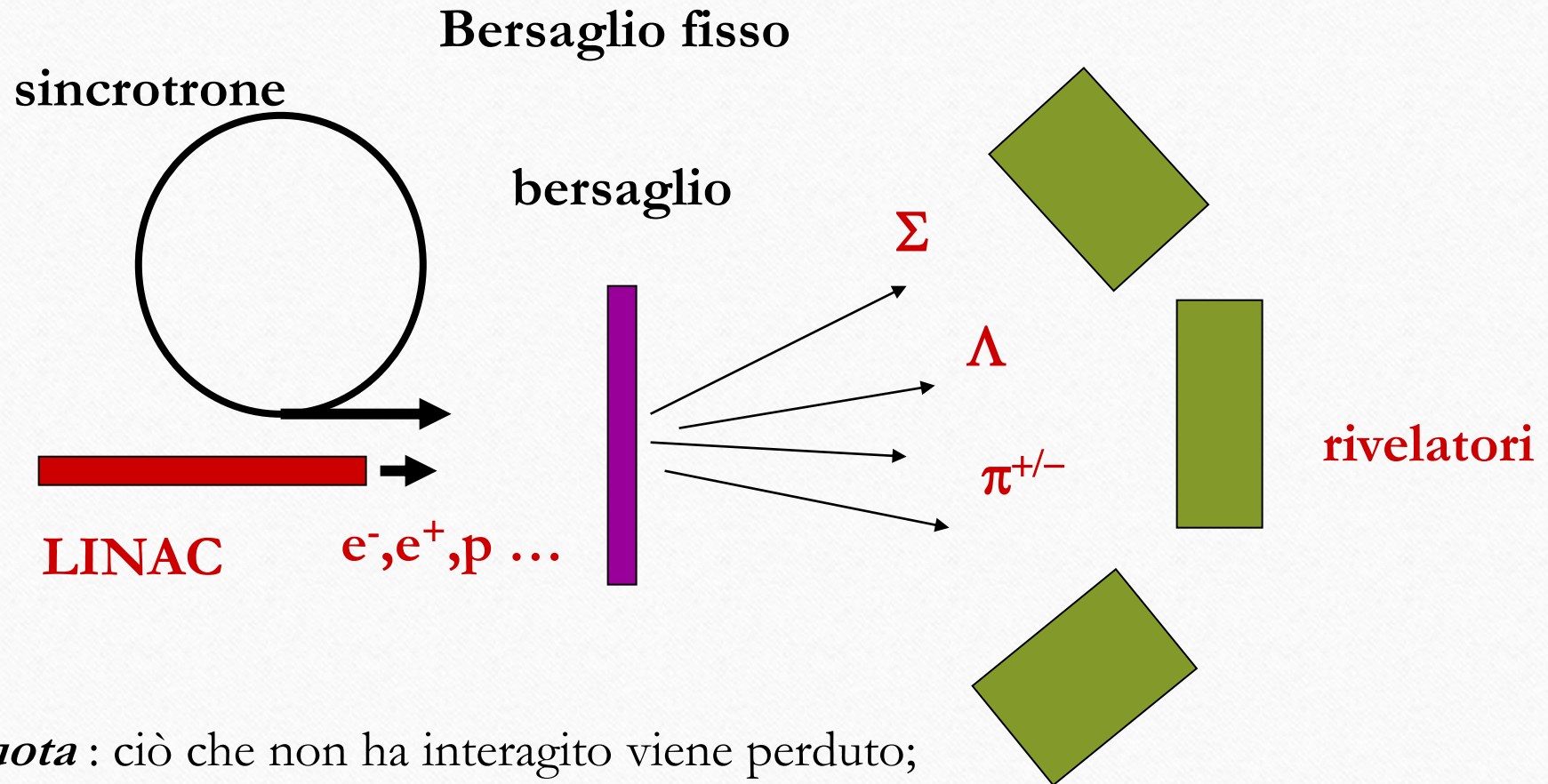
I dipoli elettromagnetici vengono usati per produrre B non oltre **1-2 T**.
Per campi magnetici più intensi si ricorre a **magneti superconduttori**

I **materiali superconduttori** al di sotto di una certa temperatura (dell'ordine di qualche Kelvin) offrono una **resistenza trascurabile** al passaggio della corrente. Possono essere usati per costruire cavità o magneti con generare B fino a **10 T**



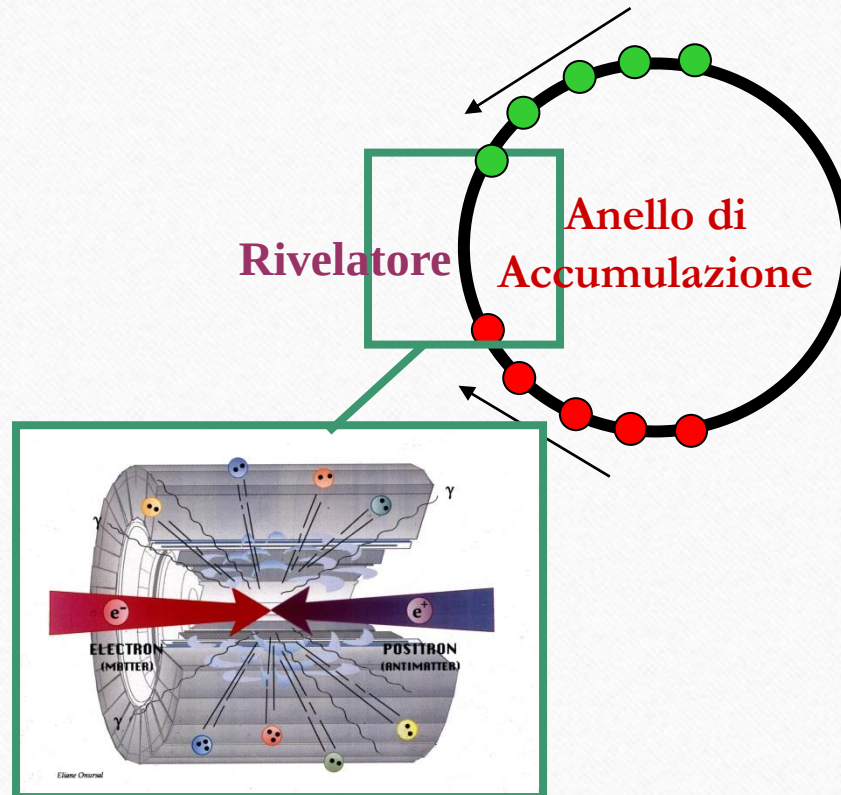
Basse temperature: 2 Kelvin = -271°C
Tali temperature sono ottenute
raffreddando i conduttori con un
dispositivo frigorifero che usa **He**
superfluido: il criostato





- 1) La materia è ***vuota*** : ciò che non ha interagito viene perduto;
- 2) Il bersaglio è ***complesso***: molte delle particelle prodotte disturbano l'esperimento;
- 3) Parte dell'energia del fascio di particelle ***non viene "sfruttata"*** nell'interazione in quanto posseduta dal Centro di Massa del sistema in movimento;

Bruno Touschek, Frascati 1961, costruisce il primo **collisore** della storia: Ada.

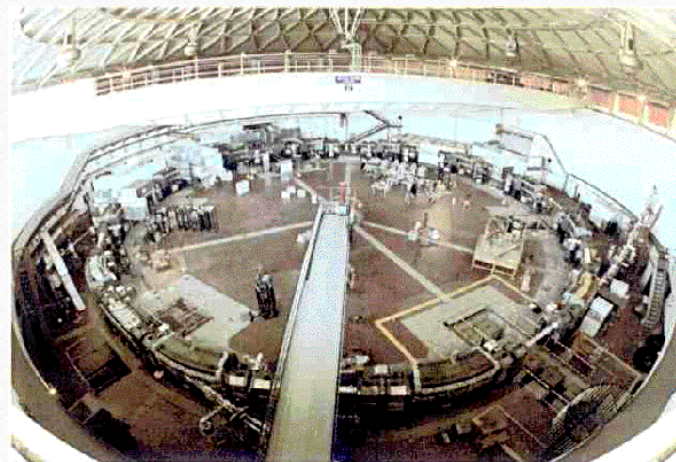


Fixed Target	 Beam (450 GeV) Target (at rest)	Available Energy 29 GeV
Colliding Beams	 Beam (450 GeV) Beam (450 GeV)	900 GeV



ADONE (IT), anni 70 →

SPEAR (USA), anni 70
↓



↑
BEVATRON (USA), anni 50

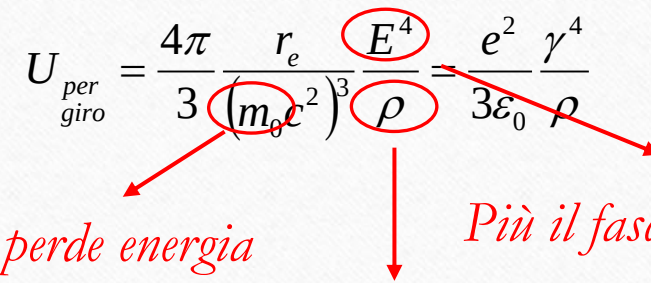


SpS (CH), anni 80 →



Un grave problema per tutti gli acceleratori circolari è quello della perdita di energia per emissione di **luce «di sincrotrone»**

Qualunque particella carica che viene fatta curvare emette energia sotto forma di luce. L'energia emessa per giro segue la legge:

$$U_{\text{per giro}} = \frac{4\pi}{3} \frac{r_e}{(m_0 c^2)^3} \frac{E^4}{\rho} = \frac{e^2}{3\epsilon_0} \frac{\gamma^4}{\rho}$$


Più la particella è pesante meno perde energia

Più il fascio è energetico più perde energia

Più il raggio della macchina è grande meno si perde energia

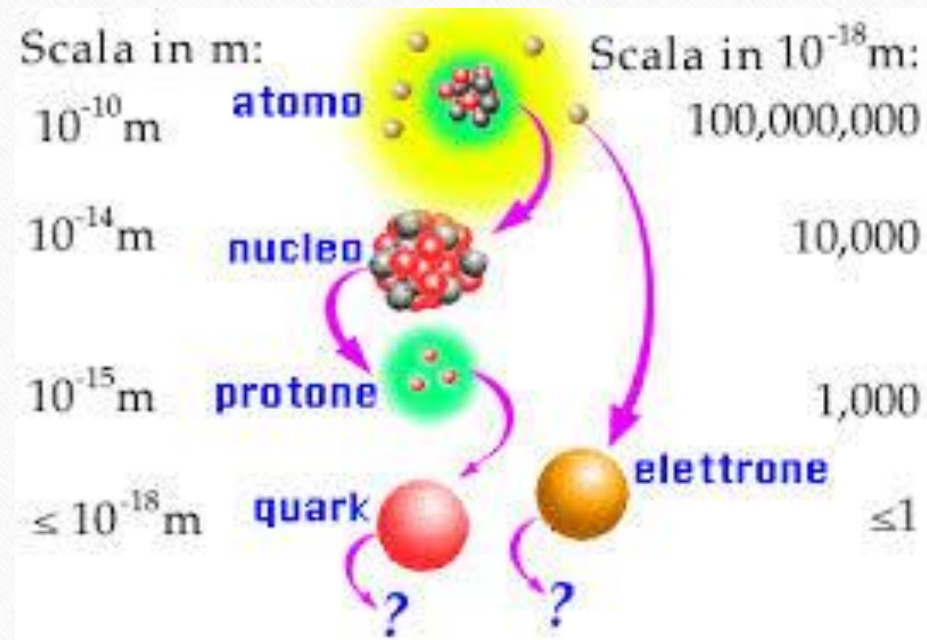
Per questo, per raggiungere altissime energie, si usano particelle pesanti (p.es. i protoni) e raggi di curvatura il più grandi possibile

Il più grande acceleratore esistente: **LHC** al CERN



I numeri (strabilianti) di LHC

Circonferenza	26659 m
Temperatura dei magneti	1.9 K (-271.3 C)
Numero dei magneti	9593
Numero di cavità risonanti	8 per fascio
Energia dei fasci	7 TeV (7000 GeV)
Numero di bunch per fascio	2808
Numero di protoni per bunch	1.2×10^{11}
Numero di giri al secondo	11245
Numero di collisioni al secondo	1 miliardo
Costo di costruzione	4 miliardi di CHF
Consumo energetico	700 GWh per anno

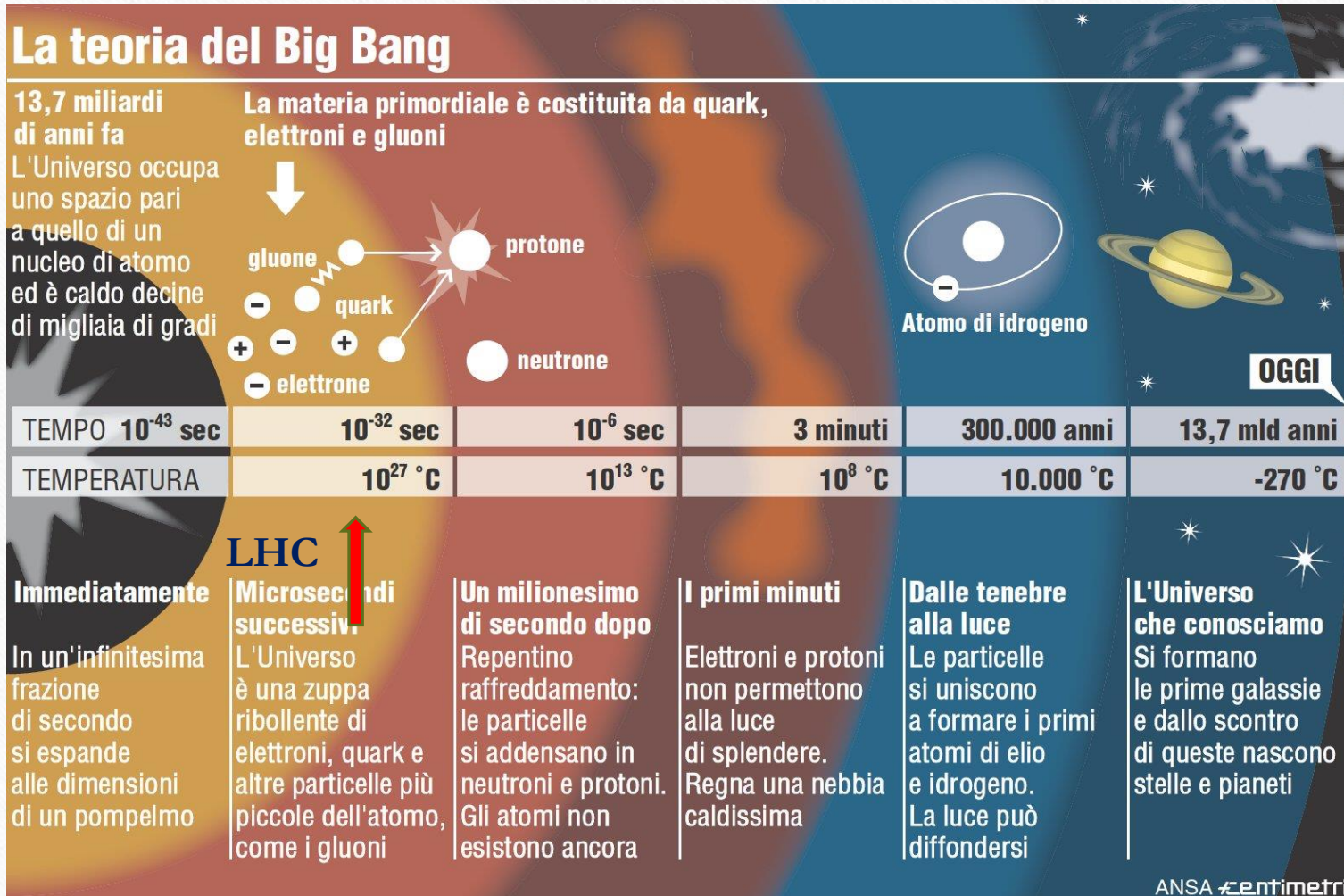


Due questioni fondamentali (ed apparentemente scorrelate)

Esistono dei costituenti fondamentali del mondo? E se sì, quali sono, e quali sono le leggi a cui essi obbediscono?

L'Universo è finito od infinito nel tempo e nello spazio? E' sempre stato identico a ciò che noi oggi osserviamo?

Gli acceleratori come macchine del tempo

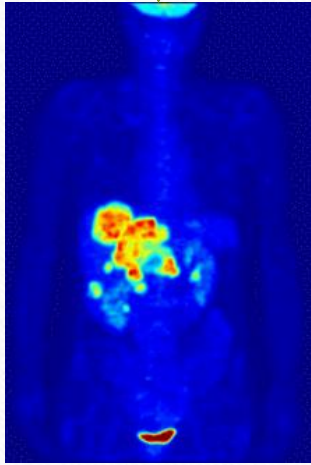


Una breve digressione

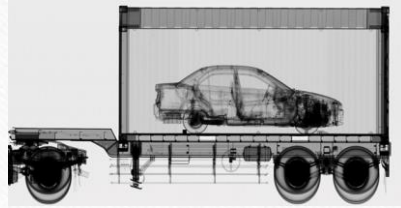
Sin dai tempi di Galileo, dalle ricerche su tematiche di scienza fondamentale sono gemmati molti utilizzi di tipo pratico, spesso sorprendenti e inaspettati

Le ricerche sulla elettricità, che nel 18esimo secolo erano pura curiosità, hanno radicalmente cambiato il mondo. La scoperta dell'antimateria, uno dei fondamenti della fisica delle particelle, ci ha condotti oggi alla sua utilizzazione medica con la PET...

Anche gli acceleratori di particelle hanno al giorno d'oggi un ampio spettro di utilizzazioni in campo applicativo



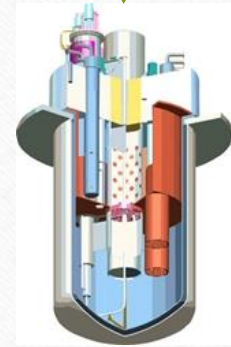
Produzione di radioisotopi



sicurezza



sterilizzazione



Reattori a fissione controllati



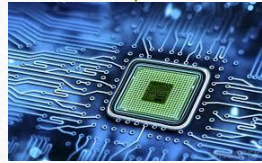
Produzione di raggi X e γ per fisica della materia



Sorgenti di neutroni



Radioterapia e Adroterapia



Impiantazione ionica



Trattamento materiali



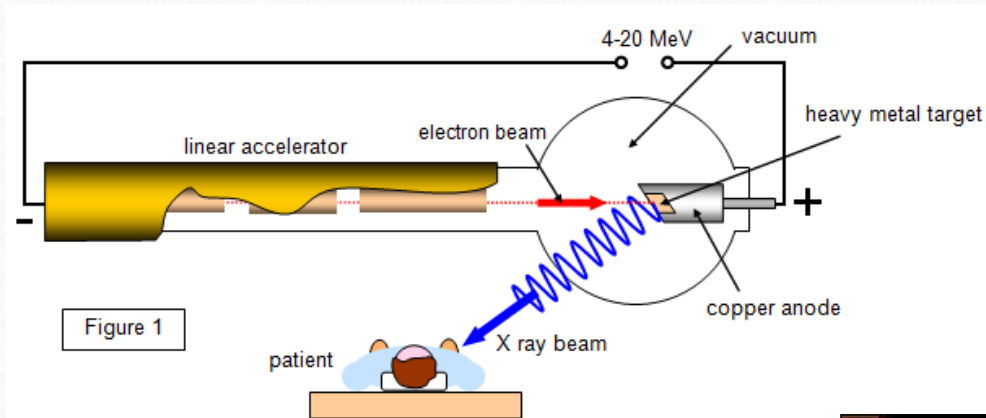
Studi di materiali per fusione nucleare



Fisica delle alte energie

Radioterapia

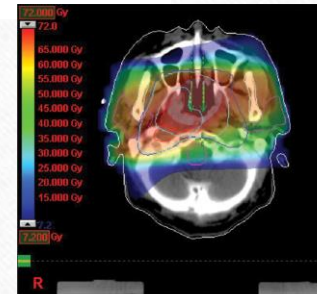
Si irradiano le masse tumorali con fasci di **raggi X** o **elettroni**



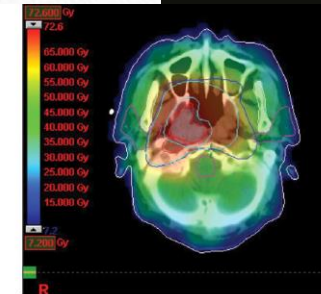
Foglio metallico per la produzione di raggi x

LINAC

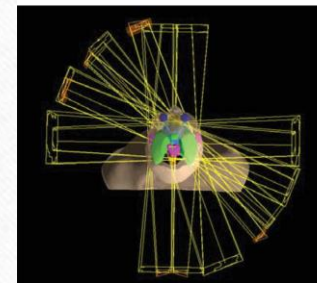
Sistema di collimazione



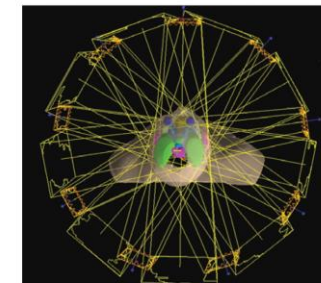
(a)



(b)



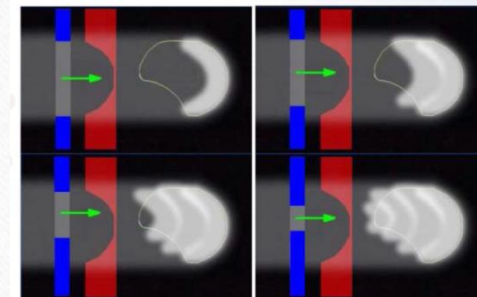
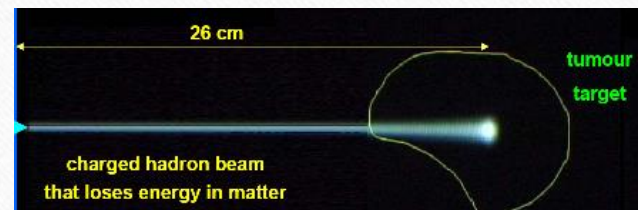
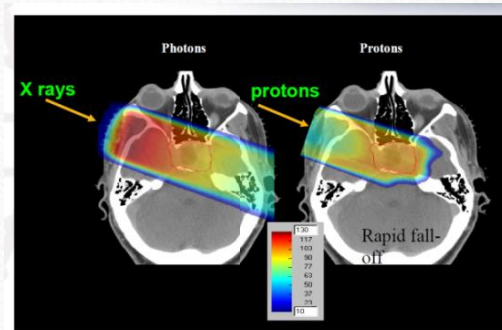
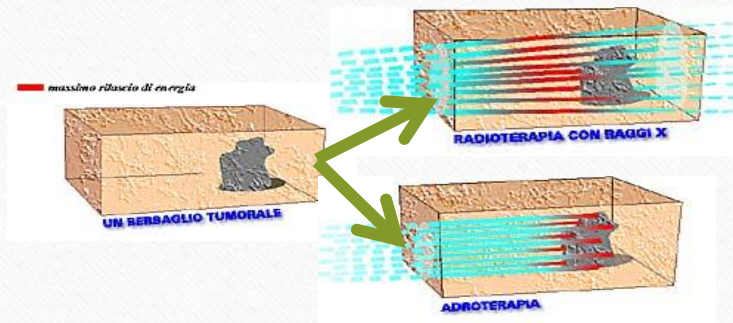
(c)



(d)

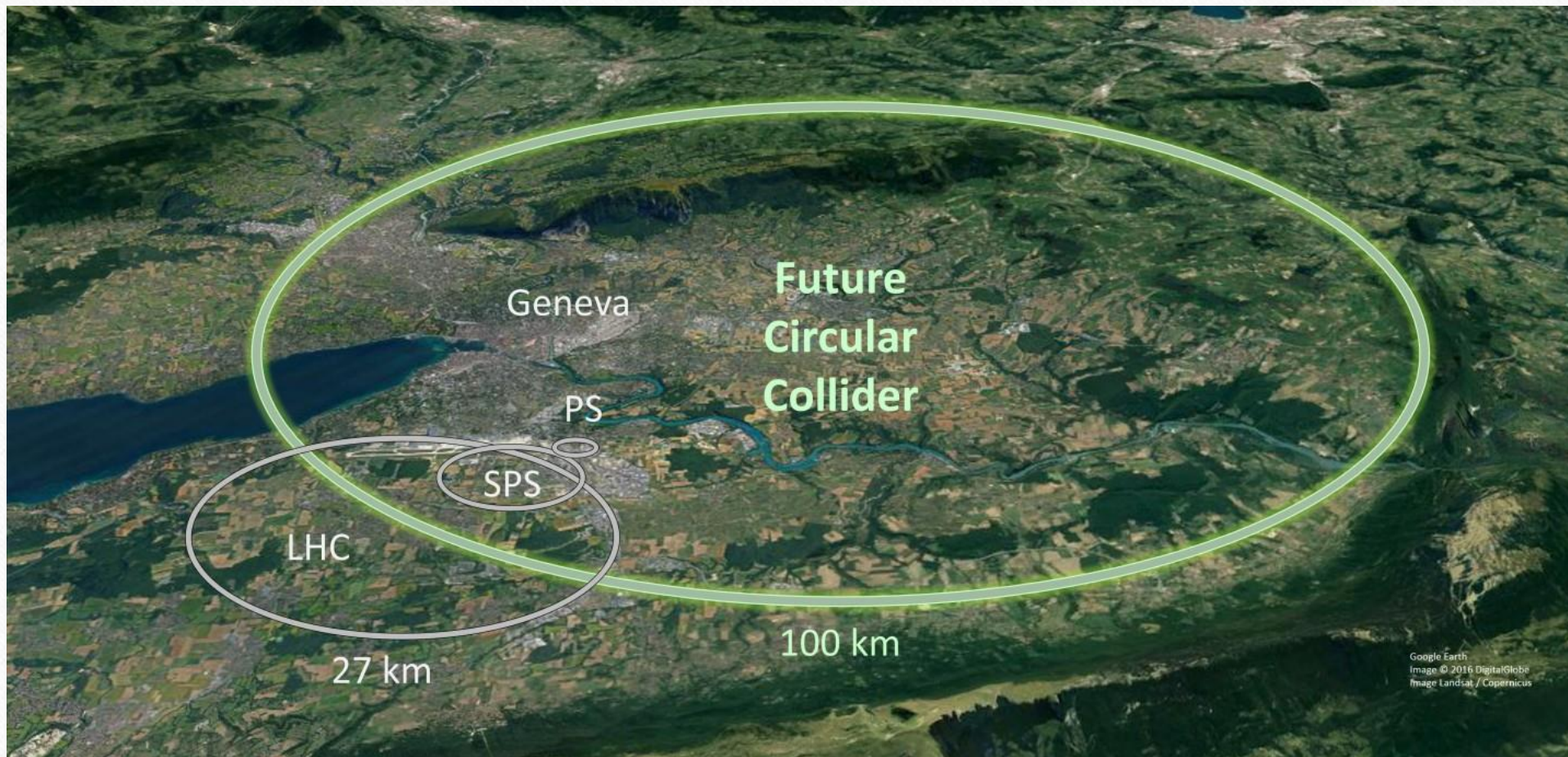
Adroterapia

Terapia antitumorale basata sull'irraggiamento con protoni e ioni pesanti (C).
E' più efficace e più localizzata (**risonanza di Bragg**) rispetto a quella basata su elettroni o raggi X



Fine della digressione

Il Future Circular Collider, una sfida per il futuro



Una sfida tecnologica ma non solo

L'obiettivo di Fcc è quello di produrre collisioni con una energia nel centro di massa di **100 TeV**, entro la seconda metà del secolo

Per raggiungere questo obiettivo bisognerà essere in grado di produrre magneti curvanti con una intensità di **16 T**, al giorno d'oggi ancora inesistenti

Sarà altresì importante sviluppare strutture acceleratrici con più alti gradienti ed a maggiore efficienza rispetto a quelle attualmente esistenti

Infine bisogna tenere in conto gli enormi costi di costruzione, di operazione e l'impatto ambientale di un'opera di queste dimensioni

Tutti i colliders attualmente in funzione od in fase di progettazione si basano sulla tecnica di accelerazione «standard» che utilizza campi elettrici generati da cavità a radiofrequenza

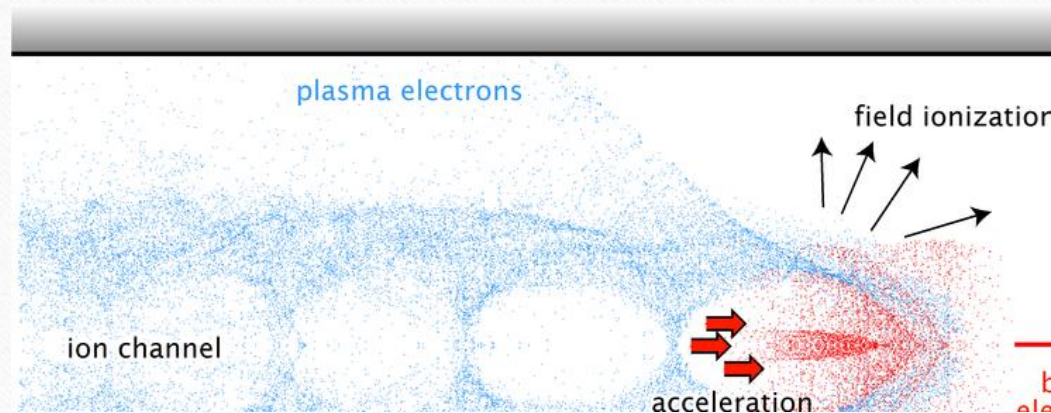
Abbiamo visto come i gradienti di accelerazione per questo tipo di strumenti variano nel range **1-100 MeV/m**

Questo fa sì che qualunque macchina di altissima energia (Fcc o altro) debba, con queste tecniche, raggiungere dimensioni di parecchie decine di chilometri, con ovvie conseguenze finanziarie ed infrastrutturali

Riuscire a sviluppare una tecnica di accelerazione diversa, con gradienti molto più elevati, è dunque estremamente importante per il futuro della Fisica

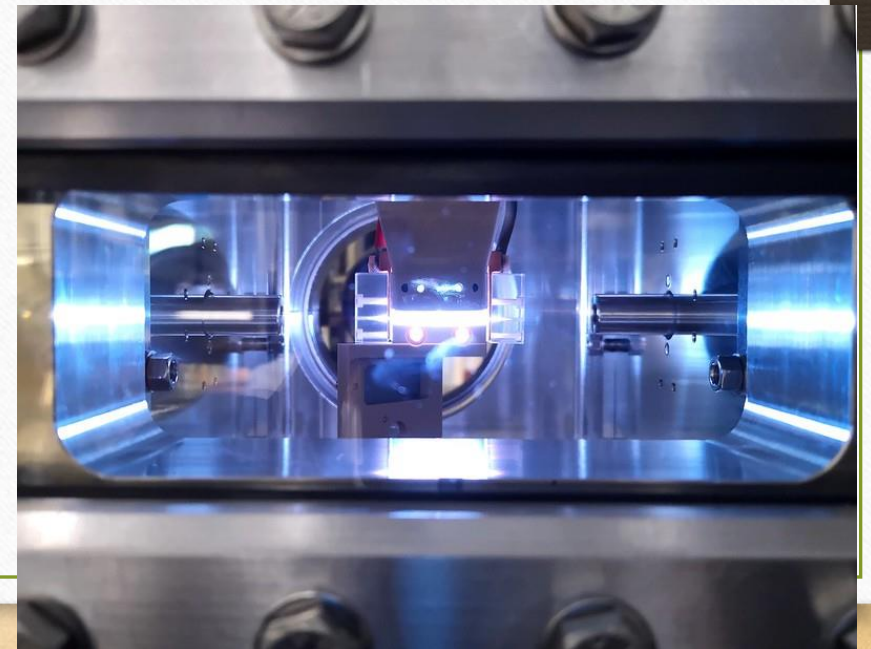
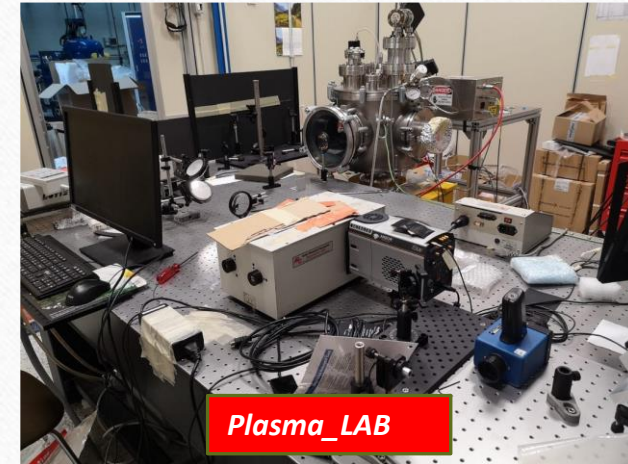
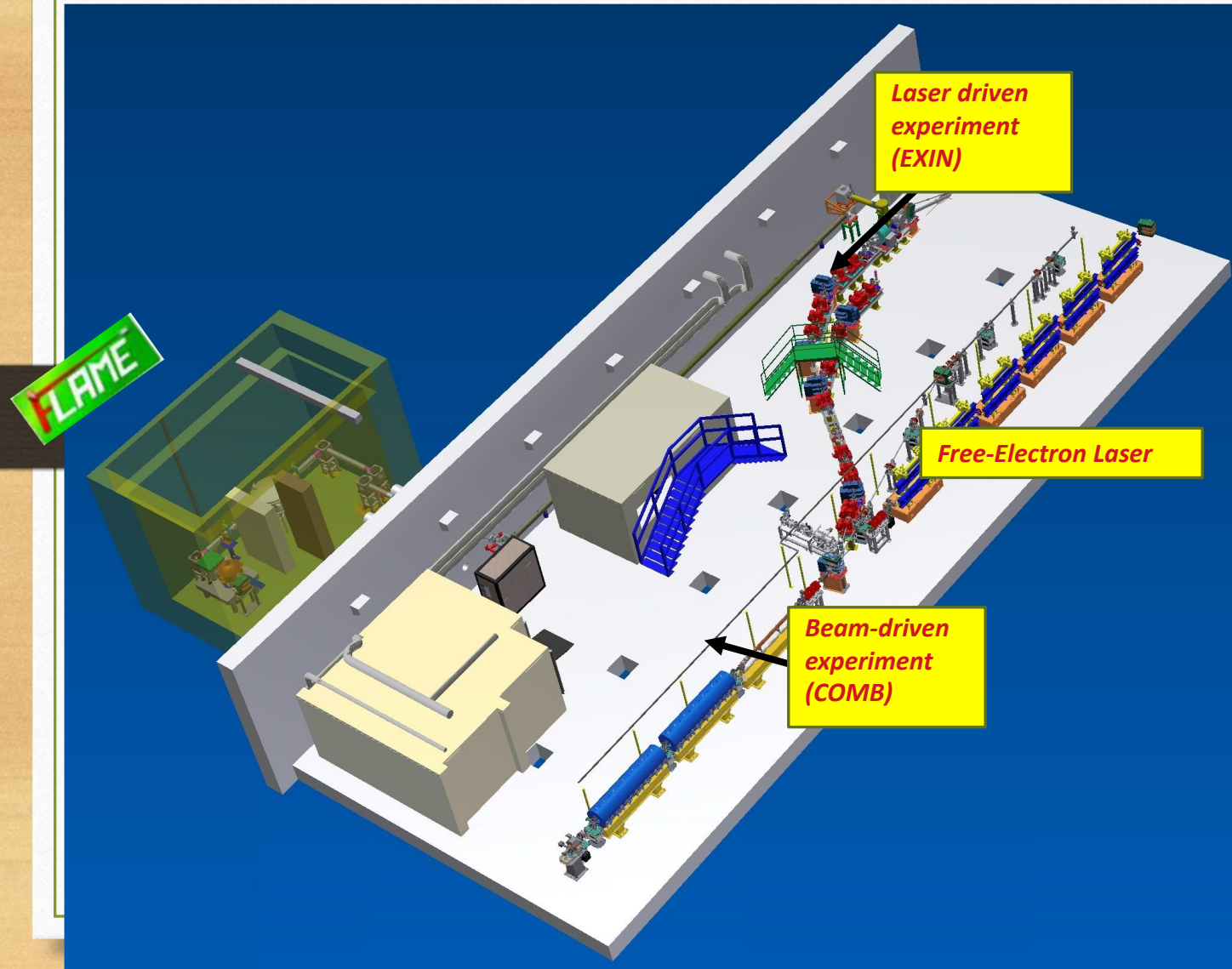
Si noti che questo problema si pone anche in macchine di tipo «applicativo» per cui la compattezza e la maneggiabilità sono parametri di grande importanza

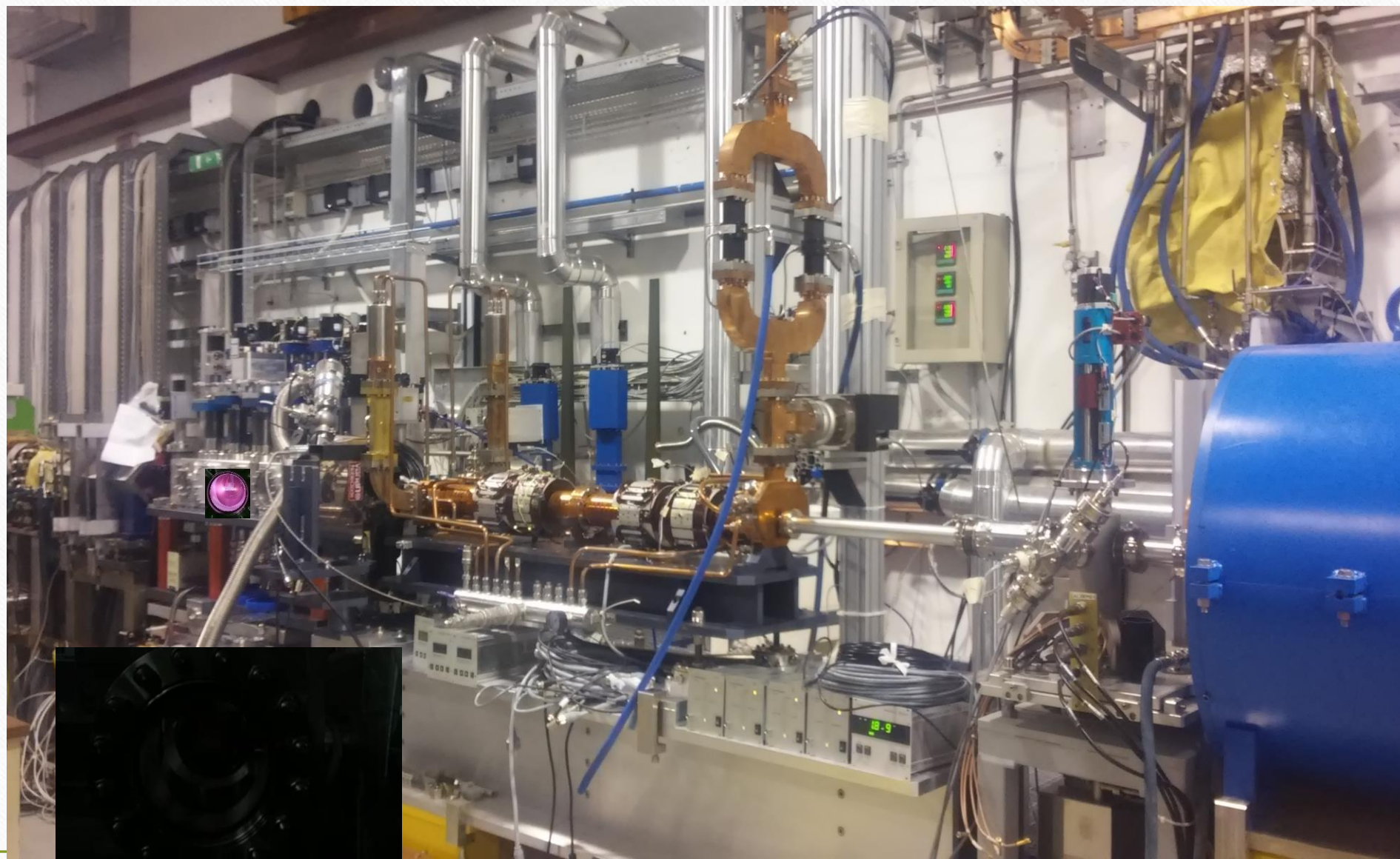
Si è dimostrato che si possono accelerare particelle mediante onde di plasma indotte da un laser di potenza o da un fascio di particelle ultrarelativistiche, con gradienti di accelerazione di **10 GeV/m** o più



Questa tecnica aprirebbe la porta alla costruzione di acceleratori ultracompati ed ultraenergetici. Allo stato attuale però non si è riusciti a produrre fasci con caratteristiche di stabilità, compattezza sufficienti per poter essere utilizzati praticamente

SPARC_LAB facility





La sfida da affrontare in questo campo consiste nel riuscire a produrre fasci di particelle così accelerati che abbiano caratteristiche utilizzabili per scopi di ricerca e/o di altre applicazioni pratiche

In particolare bisogna riuscire a tenere sotto controllo la **dispersione energetica** del fascio e la sua **collimazione**

Da questo punto di vista i risultati ottenuti recentemente allo SPARC_LAB sono stati fondamentali. Il fascio accelerato al plasma era di qualità così buona da poter essere utilizzato per la produzione di luce laser dura in un successivo stadio della macchina (FEL)



EUROPEAN
PLASMA RESEARCH
ACCELERATOR WITH
EXCELLENCE IN
APPLICATIONS

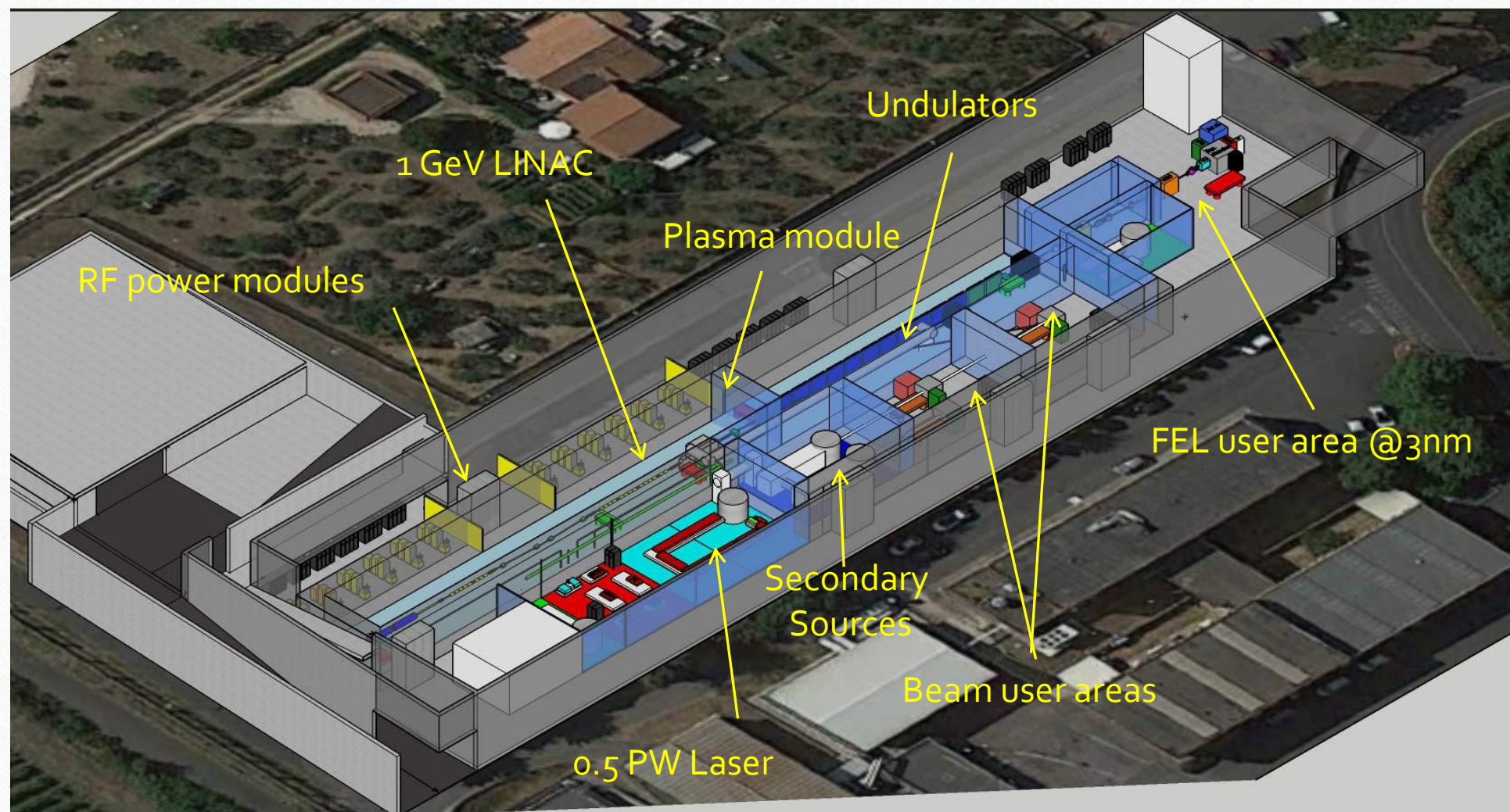


EuPRAXIA Design Study started on November 2015
Approved as HORIZON 2020 INFRADEV, 4 years, 3 M€
Coordinator: Ralph Assmann (DESY)



This project has received funding from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme under grant agreement No 652702.

<http://eupraxia-project.eu>

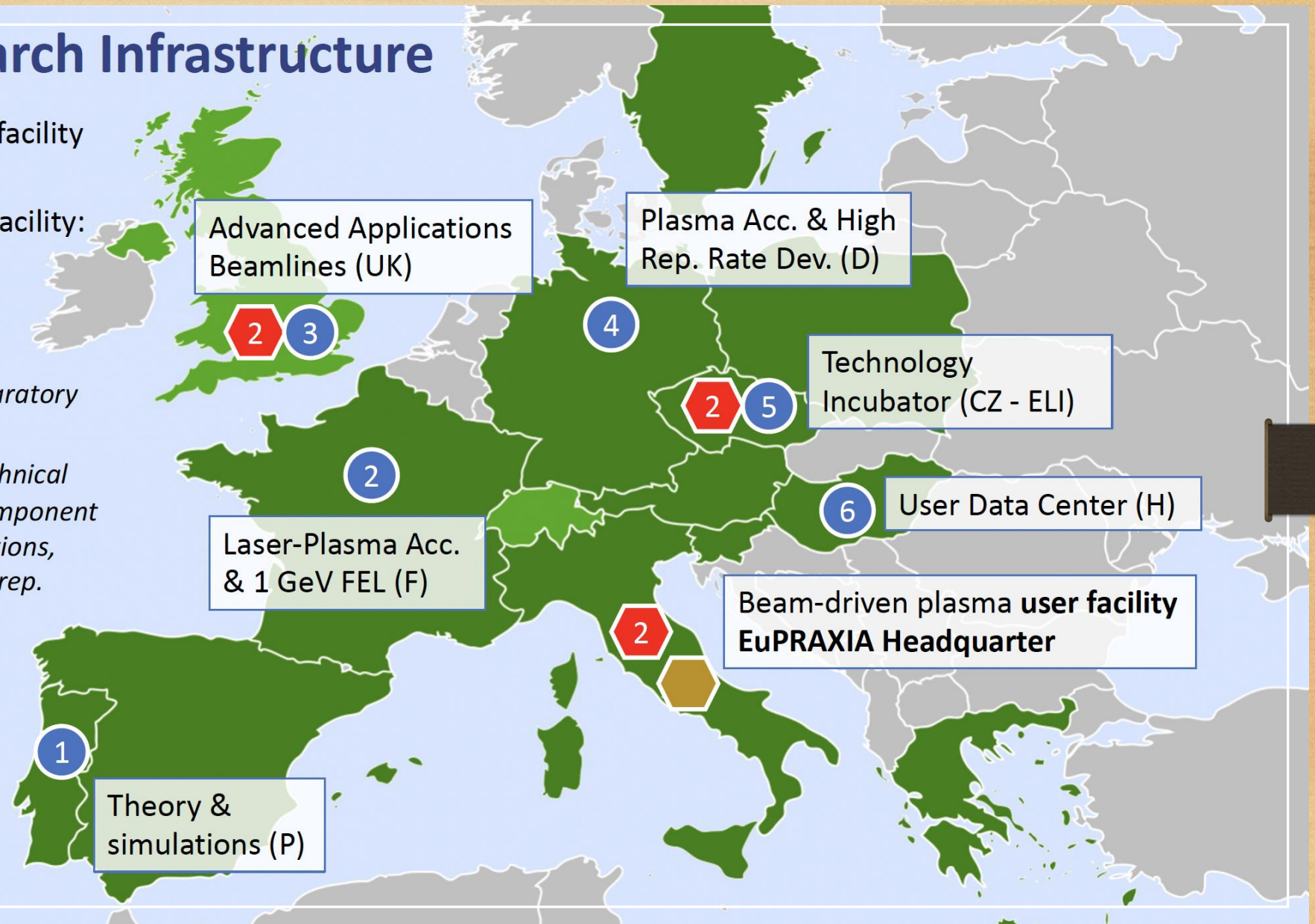


Distributed Research Infrastructure

-  Beam-driven plasma user facility
EuPRAXIA Headquarter
-  Laser-driven plasma user facility:
candidates
-  Excellence Center

Second site will be decided in Preparatory Phase project.

Excellence centers (EC) perform technical developments, prototyping and component construction. Number of EC's, locations, roles, responsibilities reviewed in Prep. Phase.



Tra le molte proprietà che caratterizzano la scienza moderna c'è sicuramente quello di essere un patrimonio comune e condiviso di una ampia comunità internazionale

Che sia al CERN, ad EuPRAXIA, ad ET (il futuro osservatorio gravitazionale), ad ITER (il progetto per lo studio della fusione nucleare)...migliaia di scienziati di ogni parte del mondo collaborano senza barriere di razza, di lingua, di religione

E questo, al giorno d'oggi, credo sia un valor aggiunto della ricerca molto importante