



Belle II Masterclass - Pisa, 26 Marzo 2024

Una (breve) introduzione alla Fisica delle Particelle

Stefano Bettarini

INFN e Università di Pisa

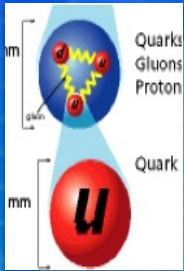
Stefano.Bettarini@pi.infn.it

per il Gruppo Belle II - Pisa

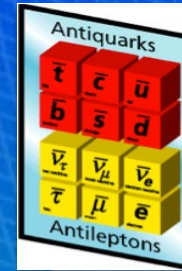


Perché ?

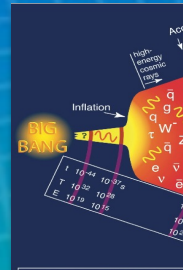
Perché si studia la fisica delle particelle ?



Di che cosa siamo fatti ?



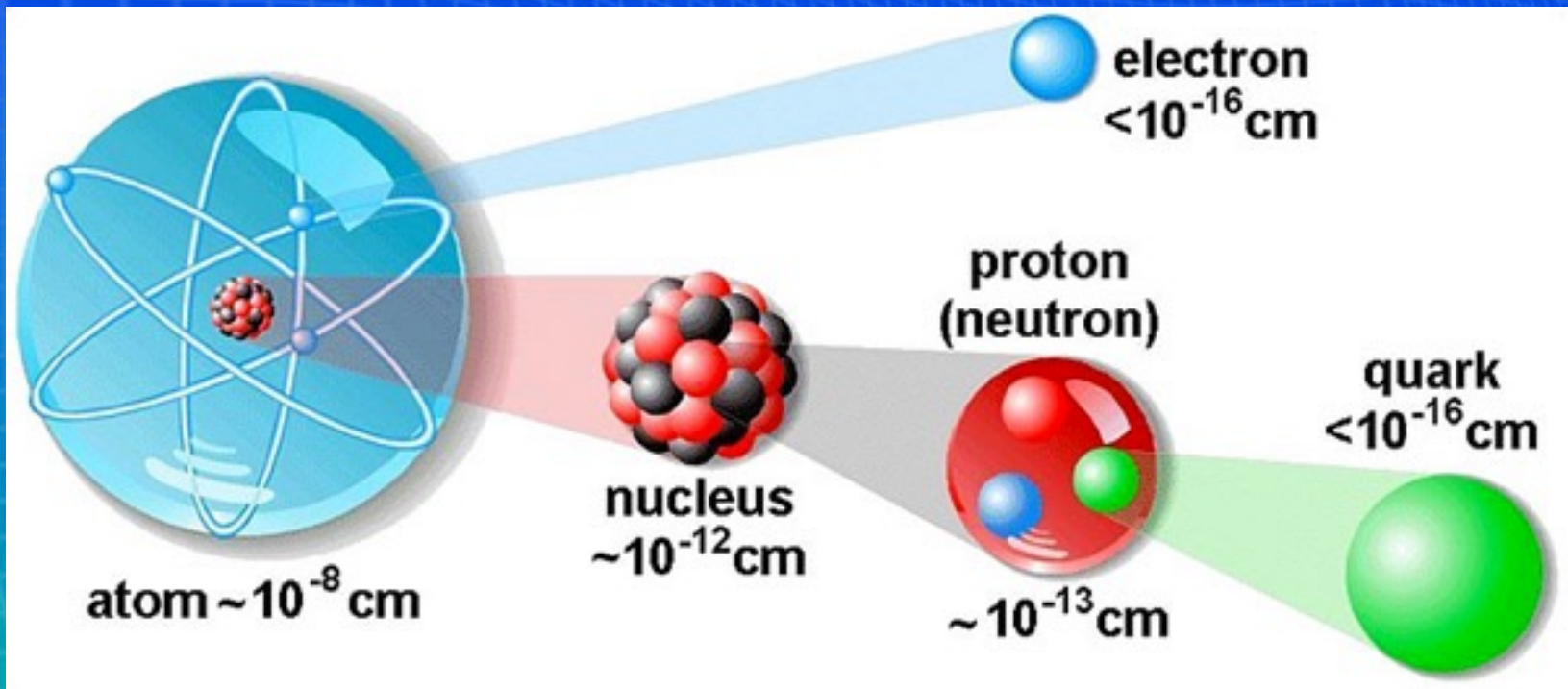
Materia e antimateria



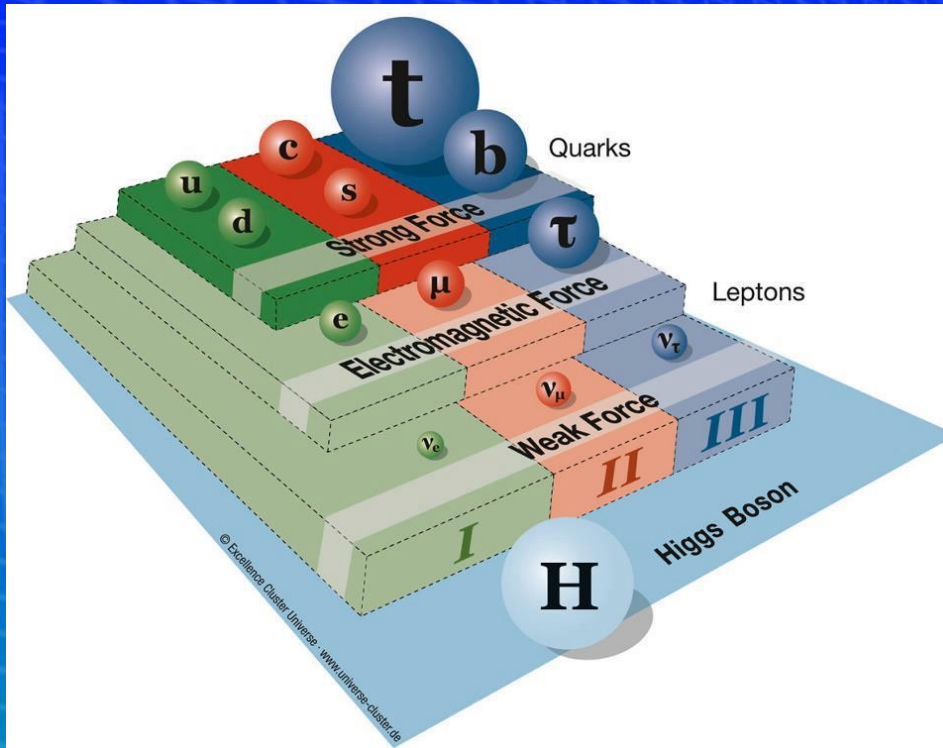
Storia dell'universo dal Big Bang

Di che cosa siamo fatti ?

L'eterna ricerca dei costituenti "fondamentali"



Modello Standard delle Interazioni Fondamentali



- Quark e leptoni
 - Tre generazioni
- Mediatori delle forze
 - Forza Forte → gluone
 - Forza Elettromagnetica → fotone
 - Forza Elettrodebole → Bosoni W e Z
- Bosone di Higgs
 - Necessario per fornire massa alle particelle
- Tutte particelle puntiformi con massa molto diversa tra loro
- Legandosi tra loro formano l'universo conosciuto

Leptoni (carica -1)	Neutrini (carica 0)
Elettrone	Neutrino elettronico
Muone	Neutrino muonico
Tauone	Neutrino tauonico

Quark tipo up (carica 2/3)	Quark tipo down (carica -1/3)
Up	Down
Charm	Strange
Top / (Truth)	Bottom / Beauty

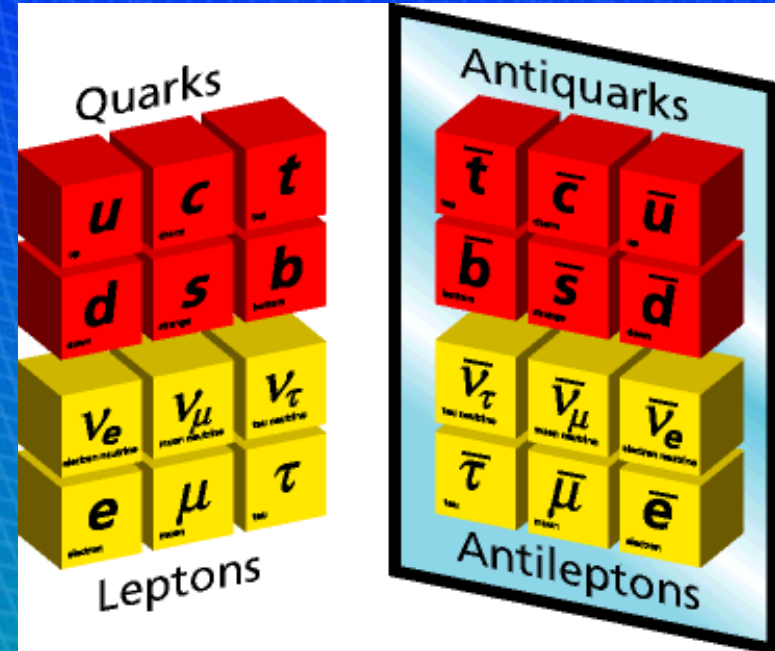
Di che cosa siamo fatti ?

L'eterna ricerca dei costituenti "fondamentali"

- 1800: atomi, tavola periodica
- 1897: elettrone (Thomson, Nobel 1906)
- 1919: protone (Rutherford, aveva già il Nobel 1909)
- 1932: neutrone (Chadwick, Nobel 1935)
- 1967: quark leggeri (Kendall, Friedman & Taylor, Nobel 1990)
- 1974: Charm quark (Richter & Ting, Nobel 1976)
- 1977: Beauty/Bottom quark (Ledermann, Premio Wolf 1982)
- 1995: **Top quark** (esperimenti CDF, D0): **il quark piu' pesante**
- **2012: Bosone di Higgs** (esperimenti ATLAS e CMS, Higgs&Englert Nobel 2013)
- Nota: nel 2015 sono state scoperte le onde gravitazionali, ma la corrispondente particella, il **gravitone**, non e' stata ancora scoperta.

Materia e antimateria

- Dirac predisse l'esistenza dell'anti-materia
 - A partire da un modello matematico
- 1932: Scoperto il positrone (=anti-elettrone)
 - Nei raggi cosmici
- 1955: scoperto l'anti-protone
 - Prodotto in un **acceleratore** a Berkeley.
- Ad ogni particella corrisponde una anti-particella
 - Stessa massa
 - Carica opposta



Una (quasi) perfetta simmetria tra materia ed antimateria

Leptoni & Quark



I leptoni (elettrone, muone, tauone ed i loro neutrini) si possono osservare direttamente

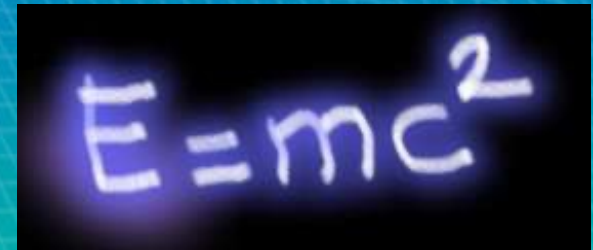
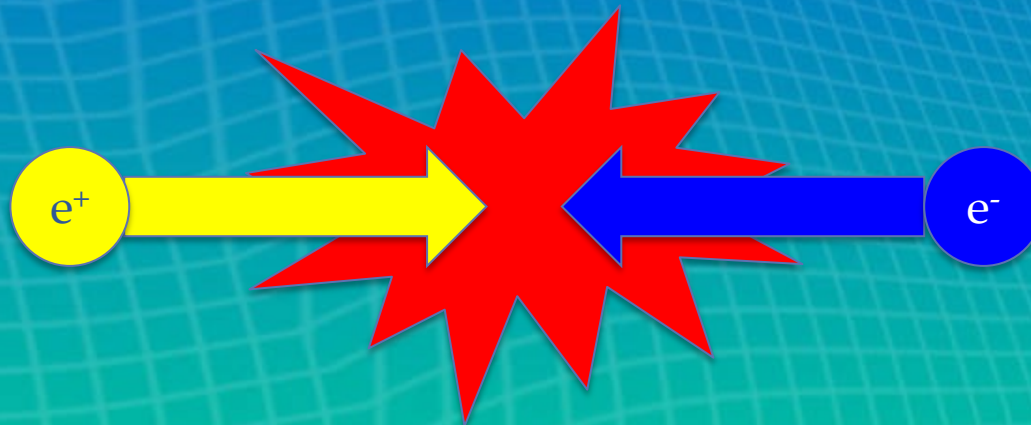
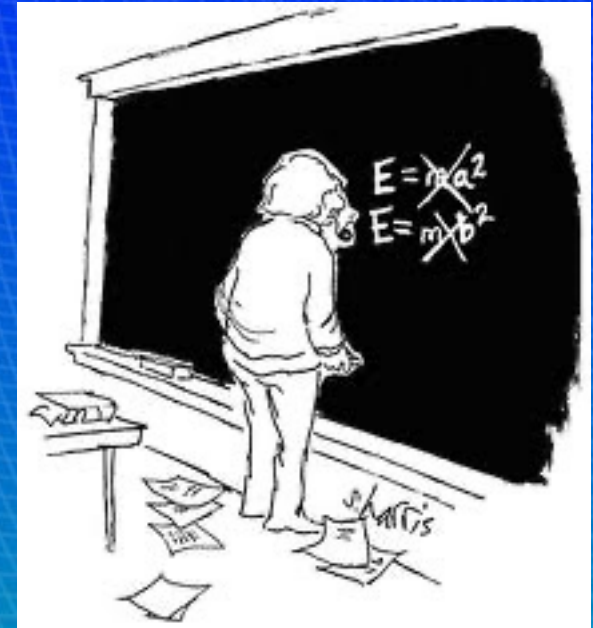
- I quark **non** si possono osservare direttamente, ma solo all'interno di particelle composite
 - Questo per le caratteristiche della interazione forte, che non permette ai quark di essere isolati
- Particelle composite (chiamate elementari)



NOME	MESONI	BARIONI	ANTI-BARIONI
Contenuto	1 quark e 1 anti-quark	3 quark	3 anti-quark
Carica	-1, 0, +1	-1, 0, +1, +2	-2, -1, 0, +1
Esempi	$\pi^+(u\bar{d}), K^+(u\bar{s}),$ $D^0(c\bar{u}), B^-(b\bar{u})$	$p(uud), n(udd),$ $\Delta^{++}(uuu), \Lambda^0(uds)$	Come barioni, ma tutti antiquark.

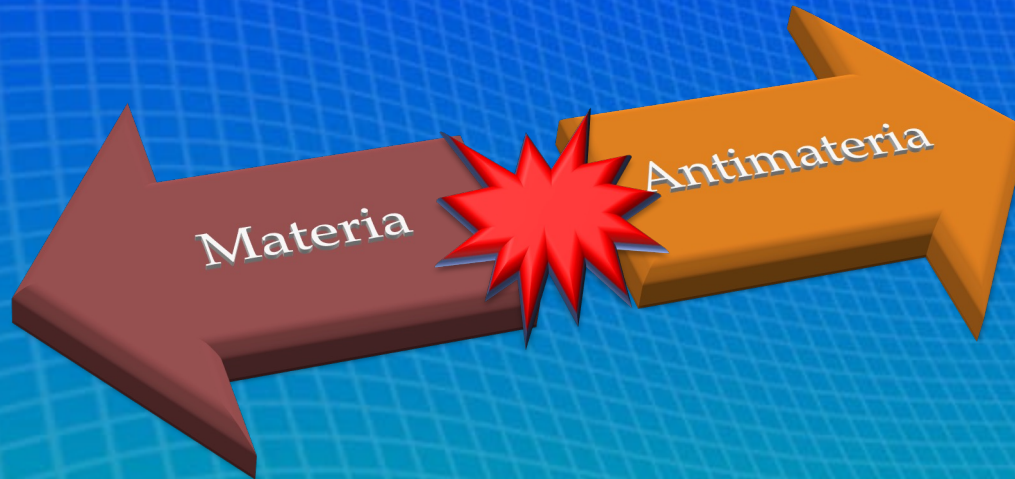
Materia ed energia

- Einstein aveva capito l'equivalenza tra materia ed energia.
- Le ordinarie particelle sono stabili e non si trasformano in energia
- Ma se materia ed anti-materia si incontrano.....



Ma dov'è finita l'antimateria ?

- Se al momento del Big Bang si sono create uguali quantità di materia ed antimateria,
- Perché nel nostro mondo c'è solo materia ?



- L'antimateria è altrove ? No, le osservazioni del cosmo lo escludono.
- Materia e antimateria non sono perfettamente simmetriche → Violazione della simmetria di "CP"

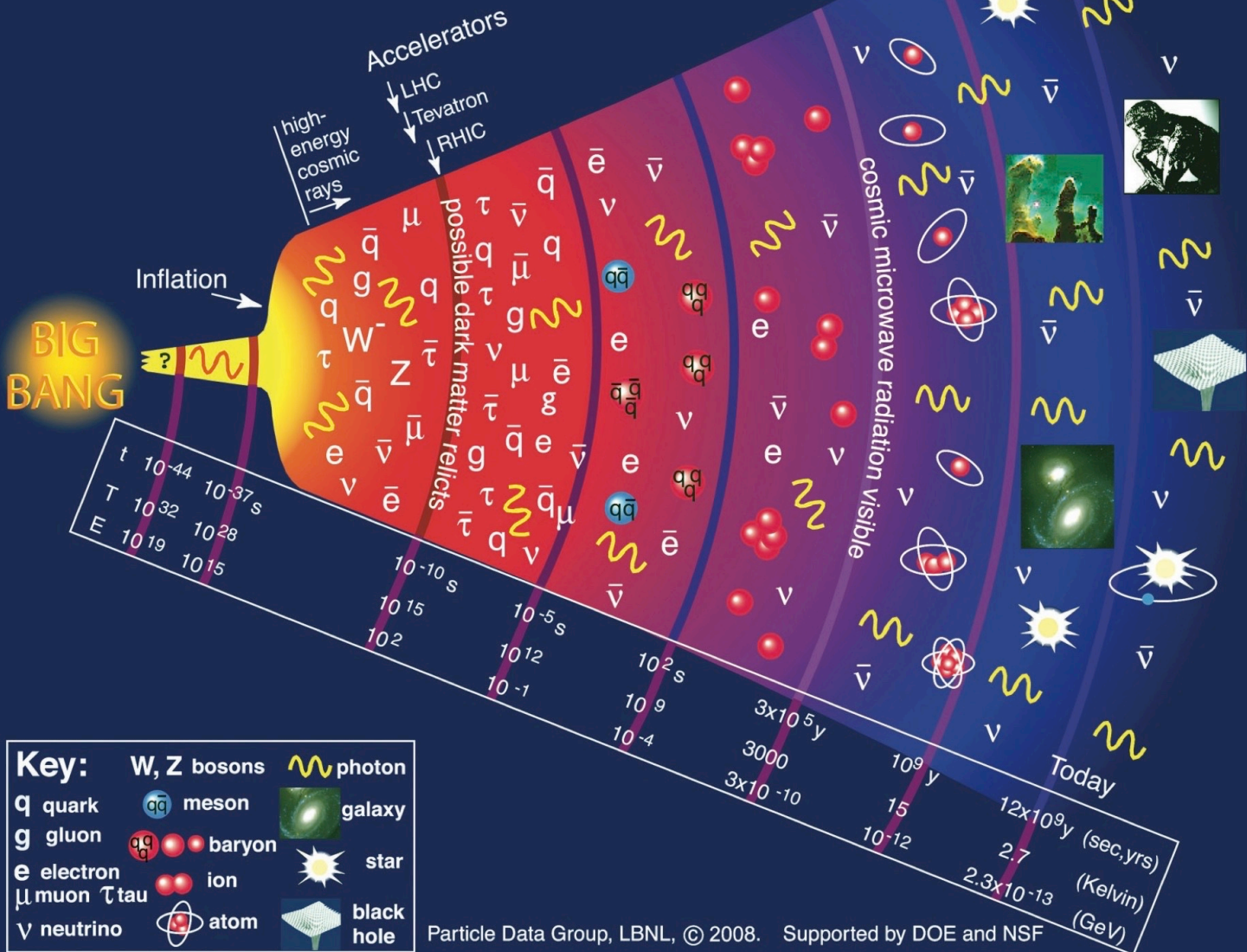
Simmetria di CP

- Per trasformare particelle in anti-particelle dobbiamo invertire la carica (C), ma anche fare una riflessione nello specchio (P) \rightarrow CP.
- Una violazione della simmetria di CP (cioè una differenza tra materia ed antimateria) è prevista nel modello standard
 - Scoperta da Cronin e Fitch nel 1964 per i mesoni K
 - Scoperta dagli esperimenti Babar e Belle nel 2001 per i mesoni B

Ma Sakharov nel 1967 dimostrò che quantitativamente la asimmetria di CP del modello standard **NON** è sufficiente a giustificare l'abbondanza di materia

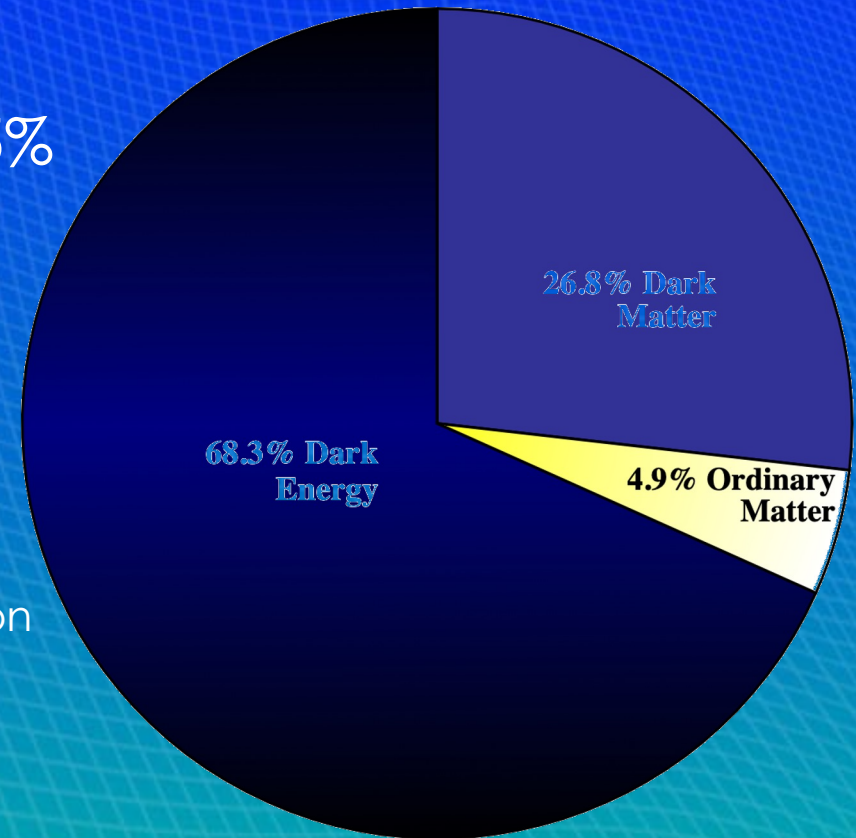


Storia dell'Universo



Molto altro

- La materia (o anti-materia) ordinaria costituisce solo il 5% dell'universo.
- Il resto è tutto da capire
- 26.8%: materia oscura
 - Materia che non vediamo e di cui non conosciamo l'origine
- 68.3%: energia oscura
 - responsabile dell'espansione dell'universo



Tante domande



- Perché ci sono tre generazioni di quark e leptoni ?
- Da cosa sono determinate le masse ?
- Qual è la sorgente di asimmetria materia – antimateria nell'universo ?
- Di cosa è fatta la materia oscura
- Che cos'è l'energia oscura dell'universo

**Deve esistere qualcosa oltre
il Modello Standard**

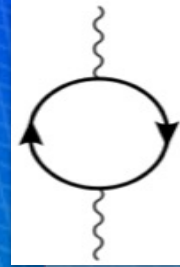
**NUOVA
Fisica**

Che cosa ?

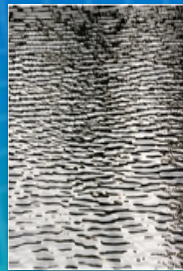
Che cosa si misura ?



Particelle pesanti



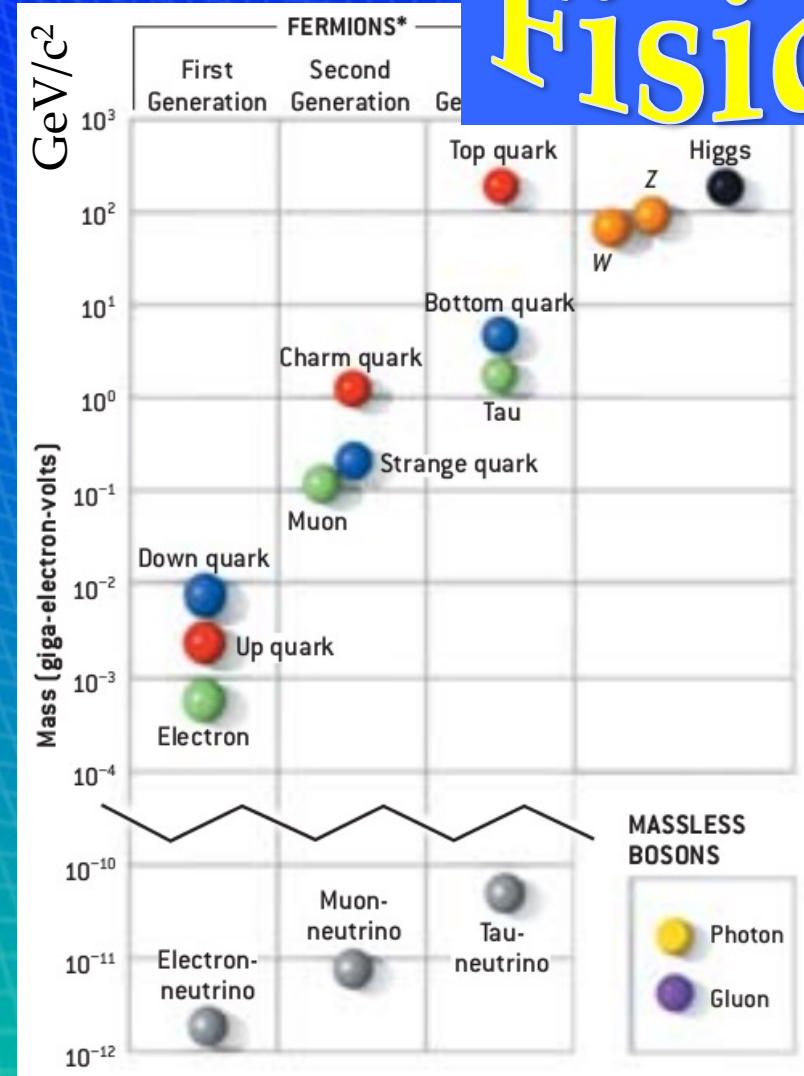
Particelle virtuali



Frontiere dell'energia
e dell'intensità.

Particelle pesanti

- Lo zoo delle particelle è stato esplorato in lungo e in largo.
- Forse la spiegazione alle tante domande si nasconde in particelle più pesanti che ancora non abbiamo scoperto.
- Come le possiamo produrre e misurare ?



Particelle virtuali

- Principio di indeterminazione di Heisenberg

- Non è possibile determinare contemporaneamente

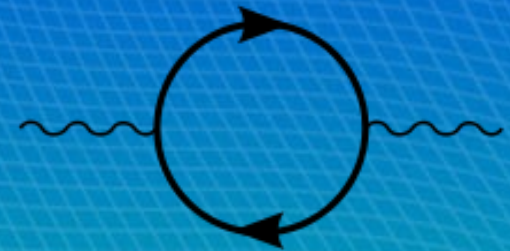
Posizione e
quantità di moto

$$\Delta x \Delta p \geq \frac{1}{2} \hbar$$

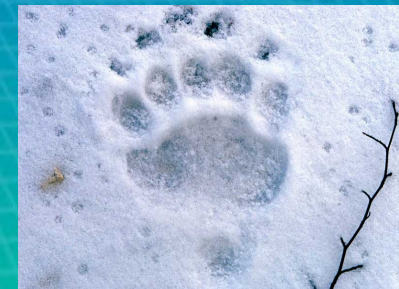
Energia (=massa)
e tempo

$$\Delta E \Delta t \geq \frac{1}{2} \hbar$$

- Per un intervallo di tempo infinitesimo si possono creare particelle pesanti dal nulla
 - Subito dopo vengono riassorbite e scompaiono



- Ma lasciano delle tracce, delle orme che possono essere misurate.



Due «approcci»

- Frontiera dell'energia

Aumentare l'energia degli acceleratori per produrre direttamente le nuove particelle



- Frontiera dell'intensità

Aumentare il numero di particelle "ordinarie" prodotte per studiarle così in dettaglio da vedere le tracce della nuova fisica



N.B.: molti altri esperimenti alla frontiera dell'intensità

Energia/Intensità

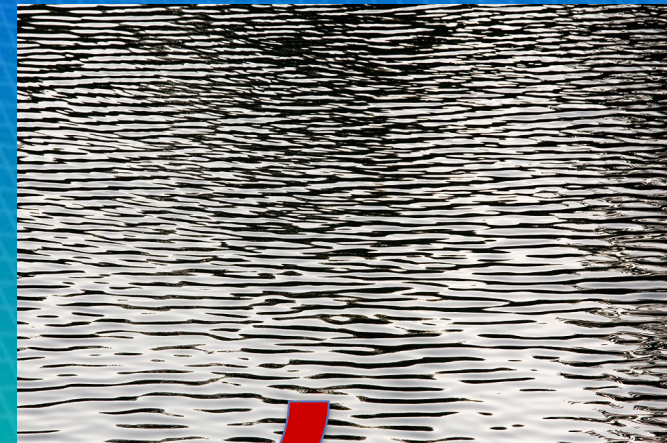
- Vogliamo osservare una grande nave che passa al largo. Possiamo:
 - cercare di vederla direttamente con cannocchiale potente.
 - misurare con grande precisione le onde che arrivano a riva.



LHC/Energia



BELLE-II/Intensità

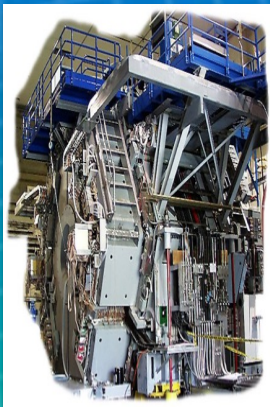


In che modo ?



Acceleratori

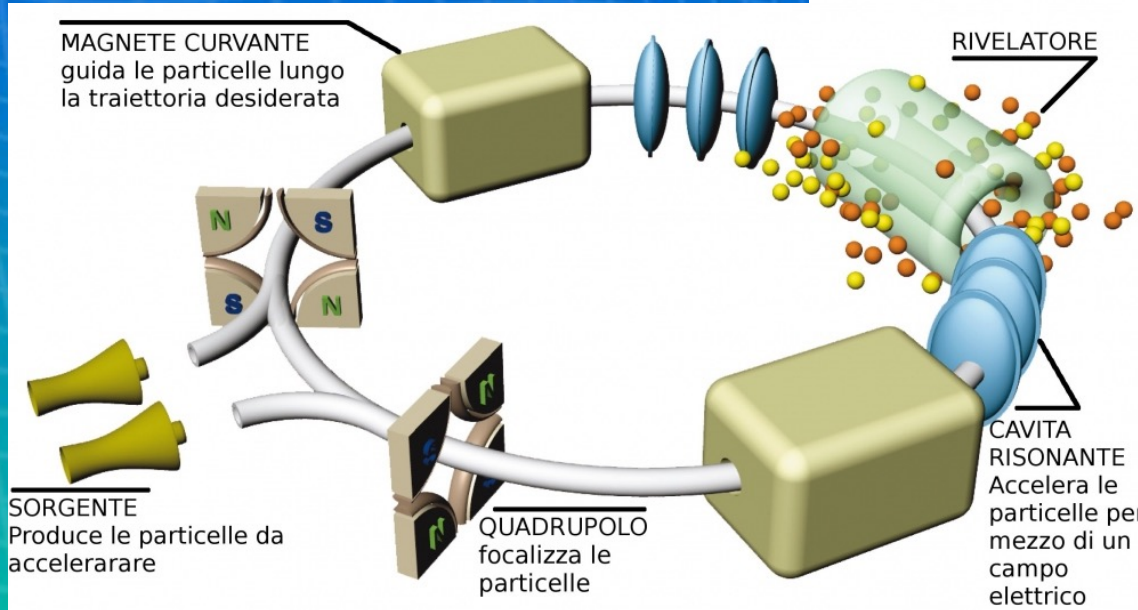
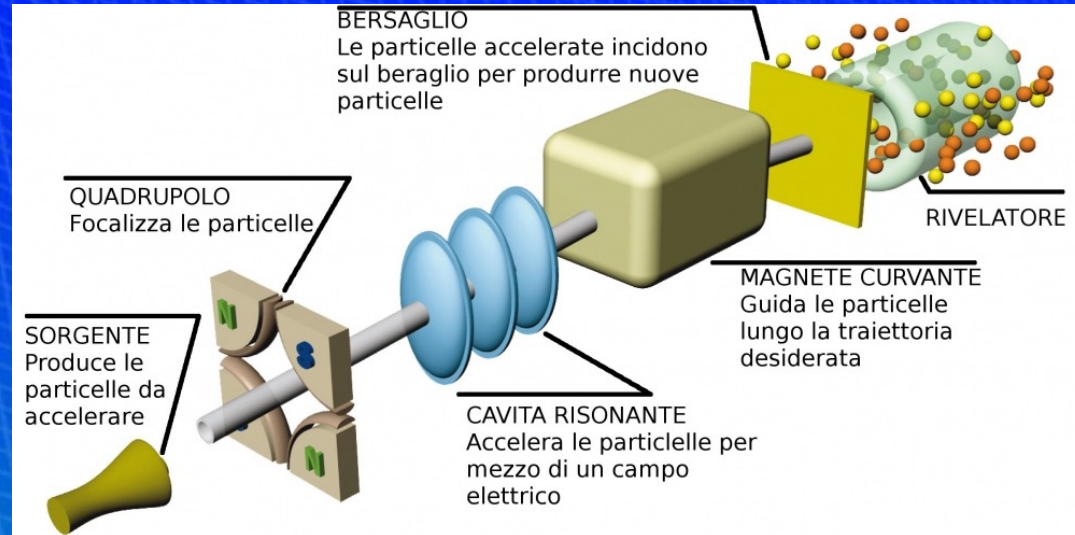
- Bersaglio fisso
- Collisori



I rivelatori

Acceleratori

A bersaglio fisso: si sparano particelle accelerate su di un bersaglio fermo.

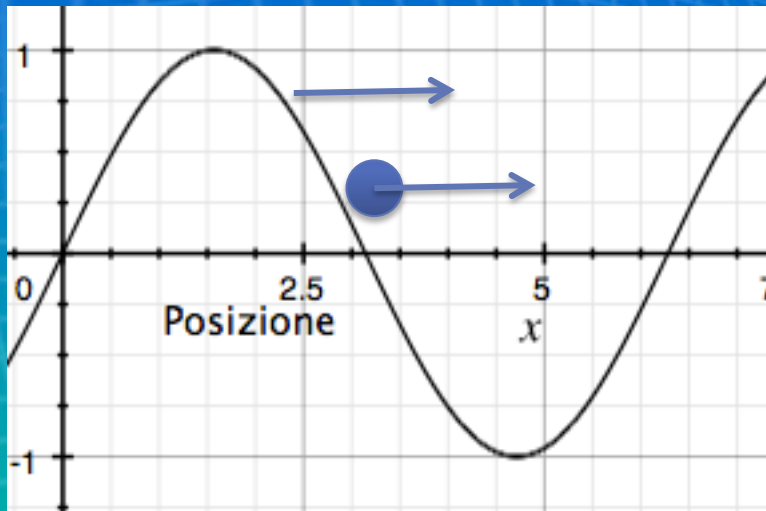


Collisori: si accelerano due fasci e si fanno collidere.

$$e^+ e^- ; pp ; p\bar{p}$$

Come si accelerano le particelle ?

- **Mediante un campo ELETTRICO.**
- **Il campo elettrico esercita un forza** sulle particelle cariche
- Un onda elettromagnetica a radiofrequenza che si propaga produce un campo elettrico che si muove con la particella
- Per arrivare ad alte energie il trucco è essere sempre sulla cresta dell'onda



Scala di energia

- Si usa l'elettron-volt: energia cinetica acquisita da un elettrone accelerato attraverso una differenza di potenziale di 1 V.
- $1\text{eV} = e\Delta V = 1,6 \times 10^{-19}\text{ J}$
- Fotone di luce rossa: 1 eV
- Massa elettrone $\times c^2 = 511\text{ keV} = 511.000\text{ eV}$
- Massa del pione $\times c^2 = 140\text{ MeV} = 140.000.000\text{ eV}$
- Atomo di idrogeno = 1 GeV = 1.000.000.000 eV
- Fabbriche di B = 10,58 GeV = 10.580.000.000 eV
- Energia a LHC: 13 TeV = 13.000.000.000.000 eV

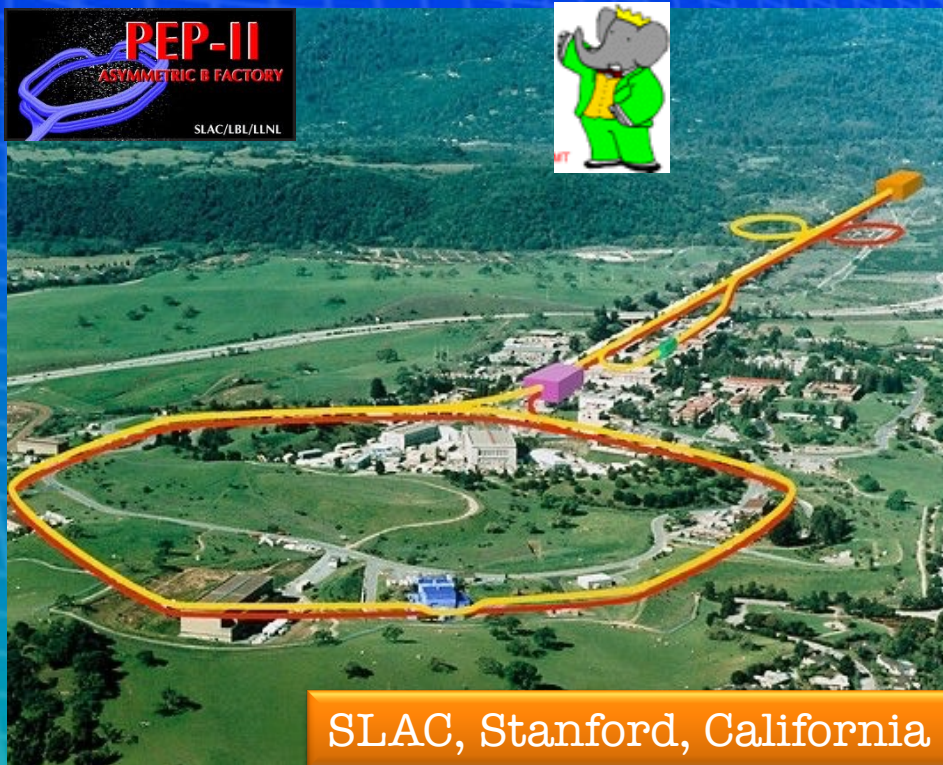
Le B Factories: le fabbriche di B

- I mesoni B permettono di fare molte misure di precisione
 - Decadimenti rari
 - Oscillazioni materia anti-materia
 - Violazione della simmetria CP
- Per produrne una coppia ci vuole 10.58GeV di energia
 - L'energia dei due fasci può essere diversa
- Due B-Factories sono state costruite in California e in Giappone
 - PEP-II con esperimento Babar (1999-2008) – raccolti circa 500M di B-antiB
 - KEKB con esperimento Belle (1999-2010) – raccolti circa 1000M di B-antiB
- Adesso è in funzione una nuova B-Factory
 - SuperKEKB con l'esperimento Belle II (2018 -)
 - Si pensa di raccogliere 50000 M di B-antiB

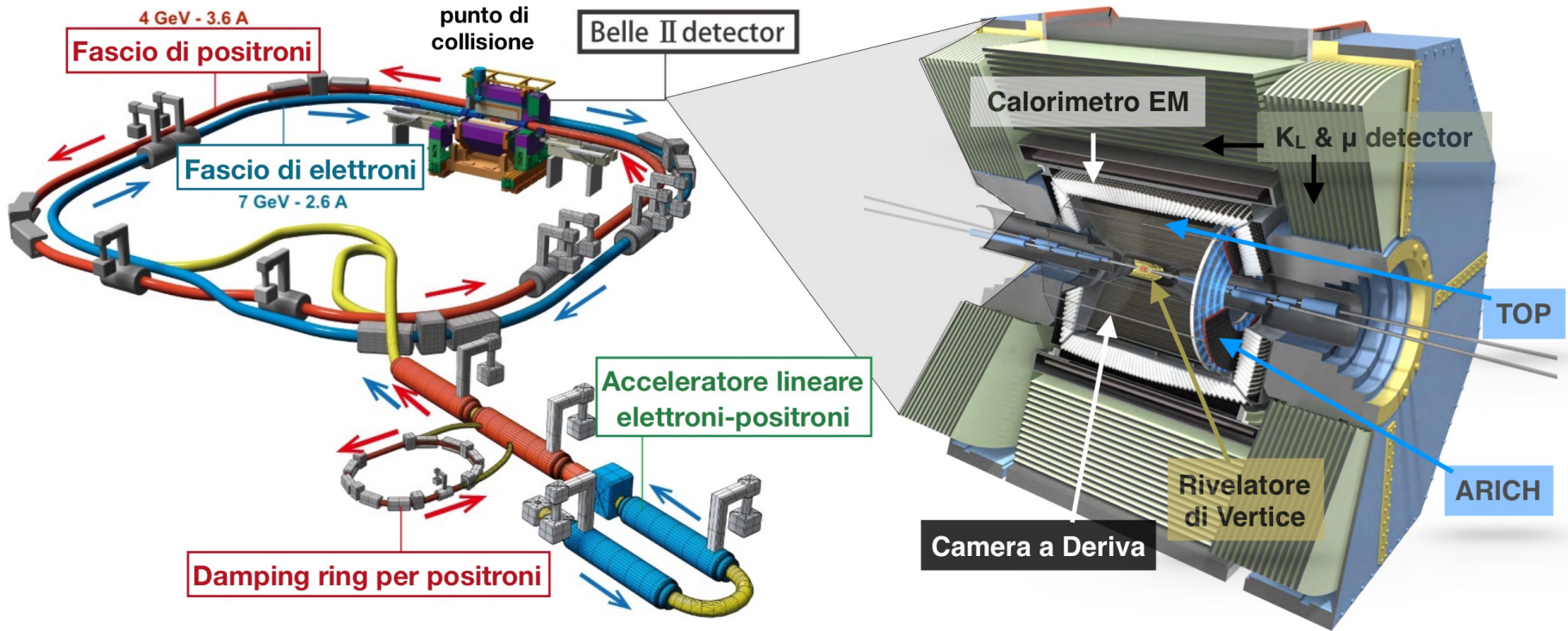
B Factories di prima generazione

BABAR @ PEP-II: 1999-2008

BELLE @ KEKB: 1999-2010



SuperKEKB e Belle II



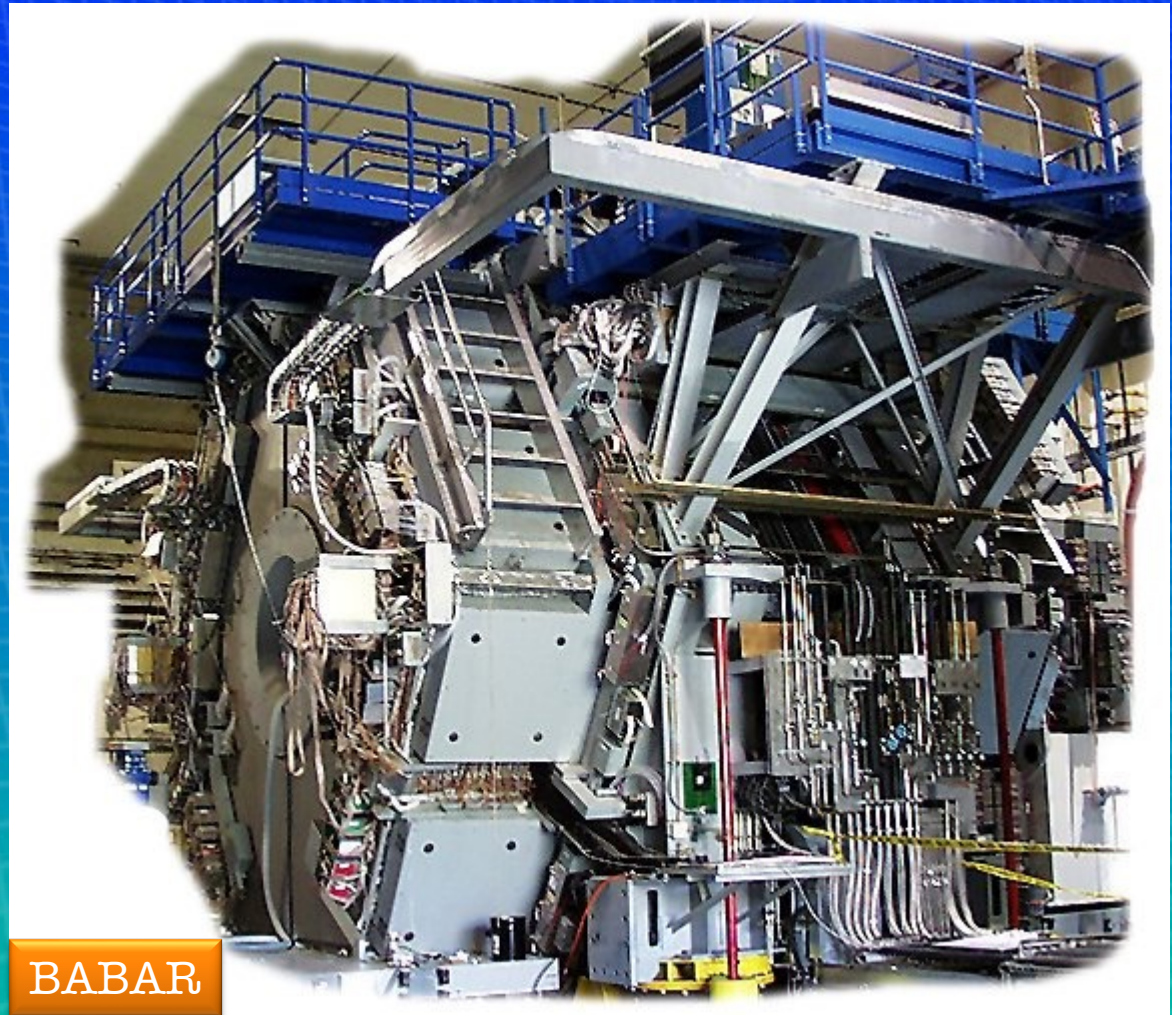
Elettroni e positroni compiono 100 000 giri al secondo!

La collaborazione Belle II



Rivelatori

- Apparatati molto complessi
- Tecnologie avanzate
- Grandi collaborazioni internazionali



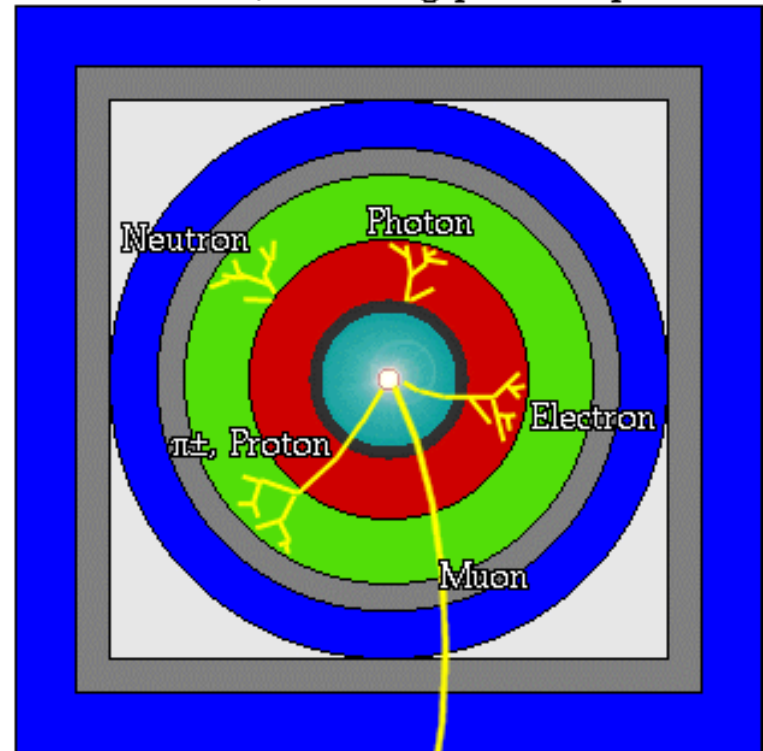
BABAR

Gigantesche «cipolle»

- I vari tipi di particelle danno segnali diversi nei vari strati di rivelatore
- Il rivelatore è il risultato di un difficile compromesso tra non disturbare le particelle e ottenere un segnale abbastanza intenso da essere rivelato

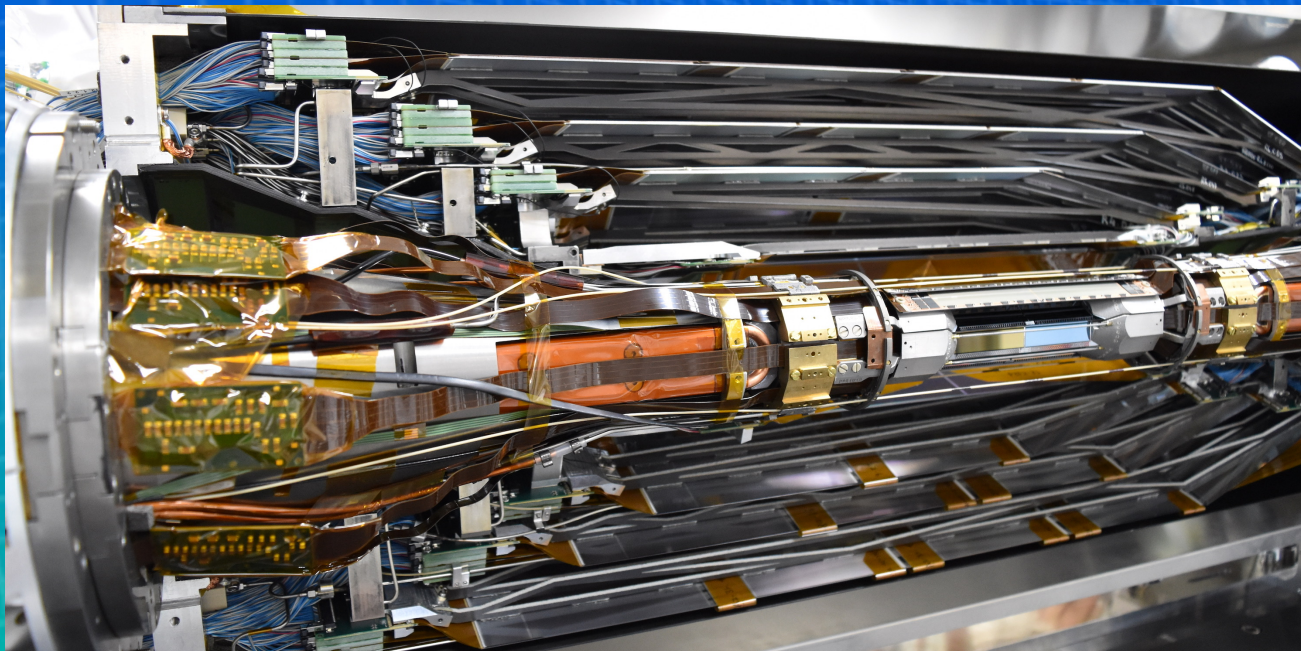
A detector cross-section, showing particle paths

- Beam Pipe (center)
- Tracking Chamber
- Magnet Coil
- E-M Calorimeter
- Hadron Calorimeter
- Magnetized Iron
- Muon Chambers



Strumenti sofisticati

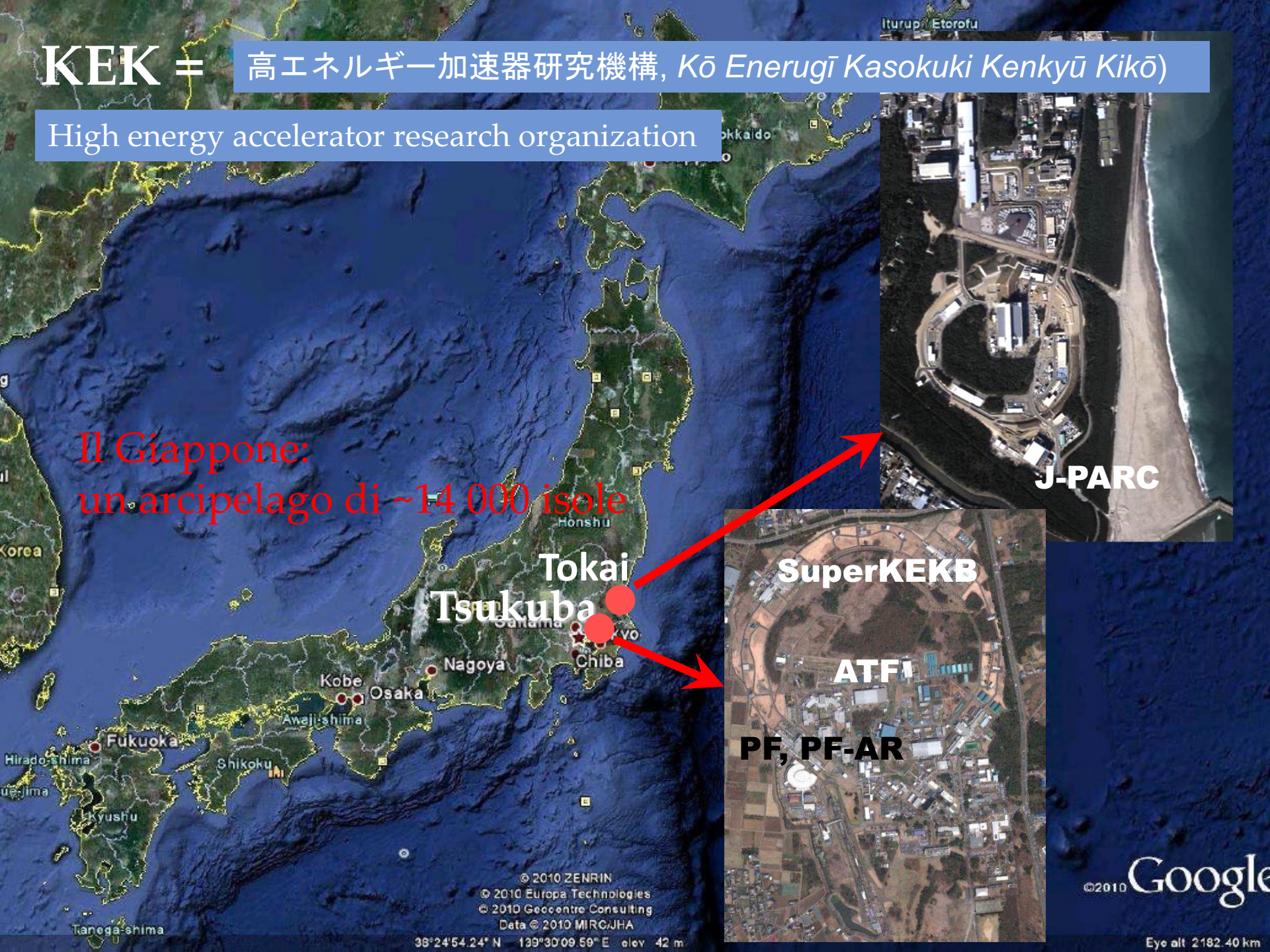
- I rivelatori di particelle fanno uso della tecnologia più sofisticata a disposizione, spesso sviluppando cose nuove
- Il cuore della cipolla è costituito dai tracciatori a silicio, che raggiungono precisioni nello spazio e nel tempo impressionanti: micron, nanosecondi



KEK = 高エネルギー加速器研究機構, *Kō Enerugī Kasokuki Kenkyū Kikō*)

High energy accelerator research organization

Il Giappone:
un arcipelago di ~14 000 isole



J-PARC

SuperKEKB

ATF1

PPF, PPF-AR

©2010 Google

© 2010 ZENRIN
© 2010 Europa Technologies
© 2010 Geocentre Consulting
Data © 2010 MIRC/JHA
38°24'54.24" N 139°30'09.59" E elev. 42 m.

Eye alt 2182.40 km

Giappone “misterioso”

- Giappone: “Nihon” o “Nippon”
- Qual e' la capitale del Giappone ?
 - Non c'e'
 - <https://www.jluggage.com/why-japan/tokyo-is-not-capital-of-japan.html>
 - Non esiste una legge che definisca Tokyo come capitale
- Come si contano gli anni in Giappone ?
 - Usando le ere, che cambiano quando cambia imperatore
 - L'Imperatore è il capo di stato del Giappone
 - https://en.wikipedia.org/wiki/Japanese_era_name
 - 1926 昭和 Shōwa Emperor Shōwa, 1926–1989.
 - 1989 平成 Heisei Akihito, 1989–2019.
 - 2019 令和 Reiwa Naruhito, 2019–present.
 - Reiwa significa “beautiful harmony”
- Con cosa si prende il cibo in Giappone ?
 - I bastoncini: Hashi



In pratica
...

Relatività

- **Energia e massa sono equivalenti**

- Per una particella **in quiete**, $E = mc^2$
- Per una particella con quantità di moto p , $E = \sqrt{(mc^2)^2 + (pc)^2}$
- Per cui $mc^2 = \sqrt{E^2 - (pc)^2}$
- La massa si misura di solito in unità di energia diviso c^2 . Ad es: GeV/c^2

- **Spazio e tempo sono relativi**

- Cioè dipendono dal sistema di riferimento, non esiste il tempo assoluto
- Vengono considerati insieme in un «quadrivettore»: $(ct, \vec{r}) = (ct, x, y, z)$
- Per energia e quantità di moto vale lo stesso: $(E, \vec{p}c) = (E, p_x c, p_y c, p_z c)$

- **Certe quantità (invarianti) sono indipendenti dal sistema di riferimento**

- Ad esempio la lunghezza di un quadrivettore è un invariante. Si calcola in modo particolare, facendo la differenza dei quadrati della parte tempo e della parte spazio, invece che la somma
- $(mc^2)^2 = E^2 - (pc)^2$ è un invariante, la massa della particella

Identikit di una particella

Ogni particella viene “battezzata” con un nome e un simbolo. In più di solito si indica la carica: +/- o 0:
Pioni: π^+ , π^- , π^0

- Massa
 - possiamo esprimerla in GeV/c^2
- Carica
 - positiva o negativa, in unità di carica dell'elettrone
- Vita media
 - quanto tempo vive prima di decadere, in media
 - quasi tutte le particelle decadono
- Le antiparticelle hanno stessa massa e vita media delle particelle, ma carica opposta
 - Ad esempio il positrone e^+ e' l'antiparticella dell'elettrone (e^-)
- Altri «numeri quantici»
 - Spin, Tipo di quark, Tipo di leptone
 - Non ce ne occupiamo oggi

Esempi di particelle e decadimenti

- Elettrone (e^-), Protone (p), Fotone (γ) sono stabili
- Il neutrone (n) decade:
 - $n \rightarrow pe^- \bar{\nu}_e$ (vita media 14 min)
 - ma diventa stabile all'interno dei nuclei (per fortuna....)
- Esempi di decadimenti
 - $\mu^{+/-} \rightarrow e^{+/-} \nu_e \bar{\nu}_\mu$
 - $\pi^{+/-} \rightarrow \mu^{+/-} \nu$
 - $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$
- Spesso ci sono catene di decadimento

Particle	Process
π^0	$\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$
K_s	$K_s \rightarrow \pi^+ \pi^-$
ϕ	$\phi \rightarrow K^+ K^-$
J/ψ	$J/\psi \rightarrow e^+ e^-$
	$J/\psi \rightarrow \mu^+ \mu^-$
D^0	$D^0 \rightarrow K^+ \pi^-$
	$D^0 \rightarrow K^- \pi^+$
D^{*+}	$D^{*+} \rightarrow D^0 \pi^+$
D^{*-}	$D^{*-} \rightarrow D^0 \pi^-$
B^+	$B^+ \rightarrow J/\psi K^+$
B^-	$B^- \rightarrow J/\psi K^-$
Λ	$\Lambda \rightarrow p \pi^-$
Σ^+	$\Sigma^+ \rightarrow p \pi^0$

Conservazione

- Nei decadimenti NON si conserva la massa:
 - Se $M \rightarrow m_1 m_2$, in generale $M \geq m_1 + m_2$
 - L'uguaglianza è vera solo se tre particelle sono in quiete (o quando le loro velocità sono molto inferiori a quelle della luce).
- Cosa si conserva ?
 - Carica: la somma delle cariche delle particelle figlie = carica genitrice.
 - Energia-impulso (il quadrivettore di energia e quantità di moto):
- Esempio: $A \rightarrow B + C$
 - Carica: $Q(A) = Q(B) + Q(C)$
 - 4-impulso: $(E_A, \vec{p}_A c) = (E_B, \vec{p}_B c) + (E_C, \vec{p}_C c)$ cioè' $E_A = E_B + E_C$ e $\vec{p}_A = \vec{p}_B + \vec{p}_C$
 - Quindi dalla misura di energia ed impulso su B e C si può calcolare la massa di A:
 - $m_A c^2 = \sqrt{E_A^2 - (p_A c)^2} = \sqrt{(E_B + E_C)^2 - (p_B c + p_C c)^2}$: massa invariante

Particelle (quasi) stabili

- Solo le particelle che vivono abbastanza a lungo possono lasciare un segnale nel rivelatore
- A causa della dilatazione relativistica dei tempi, anche particelle con vita media piccola possono percorrere molti metri, se sono energetiche.
 - $L = \frac{pc}{mc^2} c\tau$
- Sono misurabili nel rivelatore le seguenti quantità:

	γ	p	n	e^\pm	μ^\pm	π^\pm	K^\pm	$K^0(K_S/K_L)$
m (MeV/c ²)	0	938	939	0.511	105	140	494	498
τ_0 (ns)	∞	∞	14 min	∞	2200	26	12	0.089/51
$l_{\text{track@1GeV}}$ (m)	∞	∞	0.3×10^{12}	∞	6100	5.5	6.4	0.05/27.5

RICERCA DI BASE

RICERCA FONDAMENTALE, SERVE ?

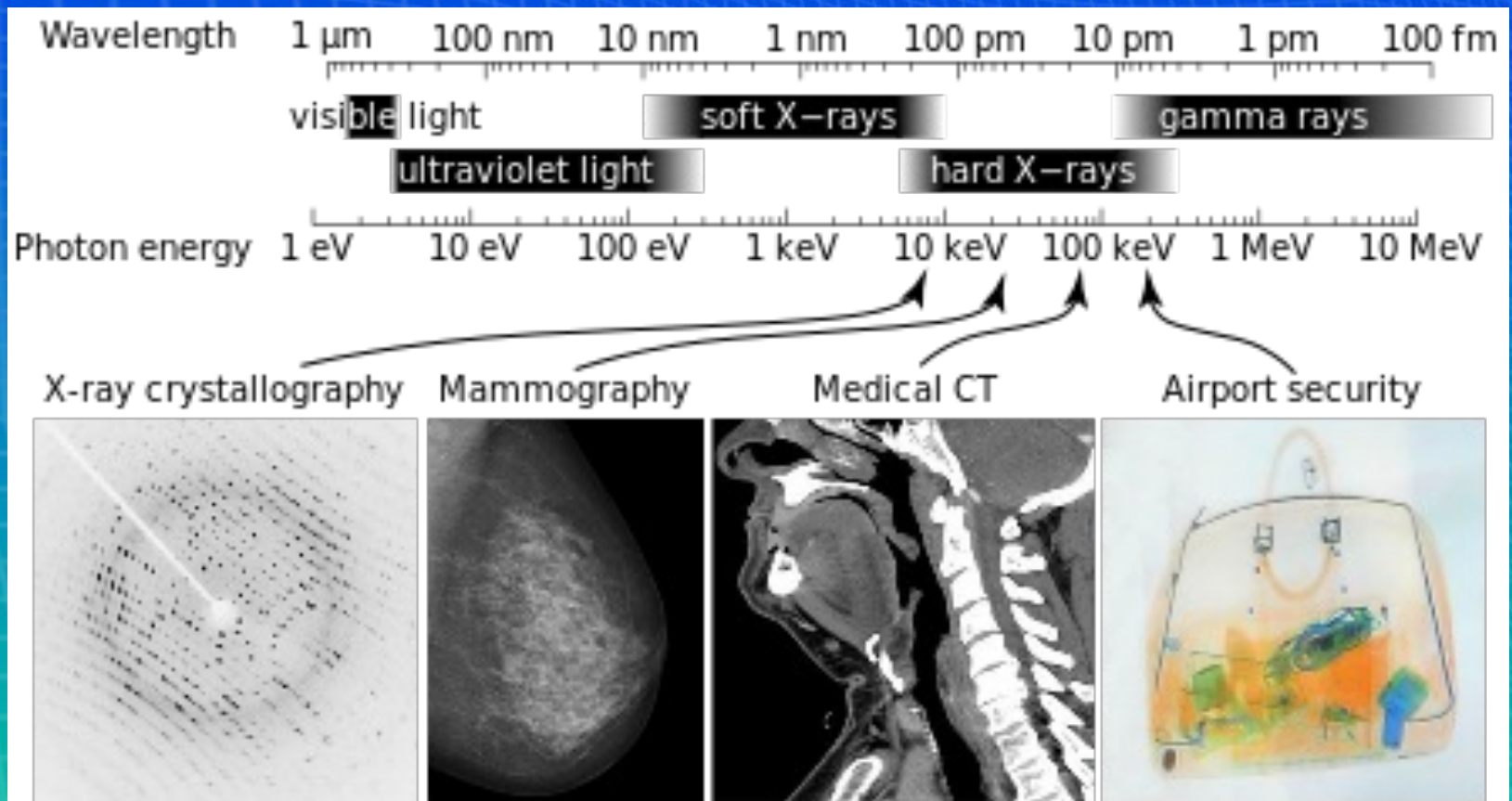
La ricerca di base risponde ad una esigenza di conoscenza

L'esplorazione delle frontiere della conoscenza non è solo affascinante, ma anche importantissimo per l'uomo e la società. Non si tratta di una curiosità accademica, ma del solo modo che esista per scoprire cose veramente nuove, inaspettate, e fornire all'umanità gli strumenti concettuali per la tecnologia del futuro.

Nel breve termine genera un'infinità di ricadute industriali e tecnologiche, avvicina le nazioni nella collaborazione a fini scientifici, e aiuta a formare e a far crescere le generazioni future.

Raggi X

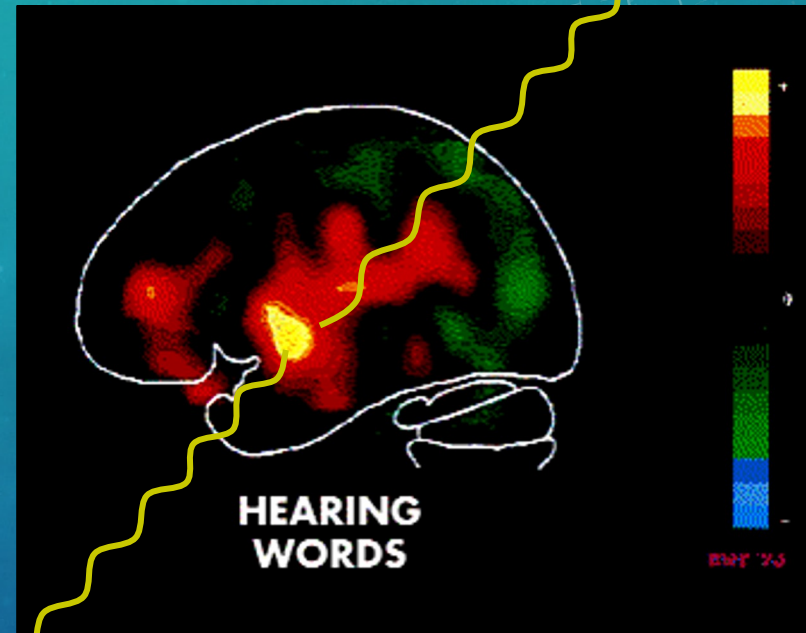
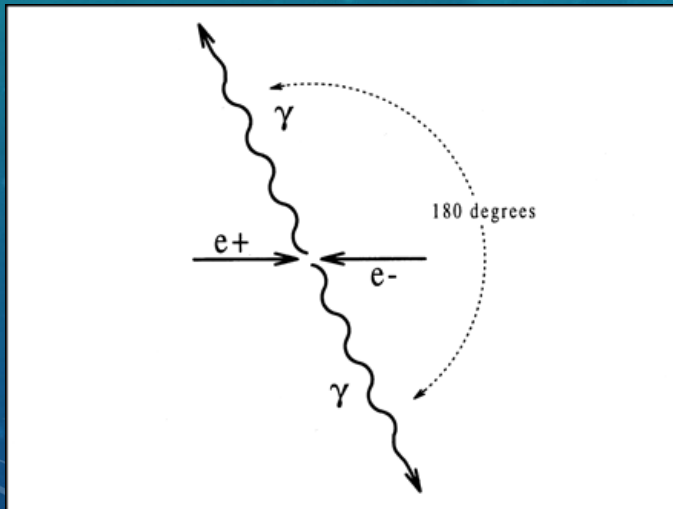
- Tantissime applicazioni dei raggi X nella nostra società



L' ANTI-MATERIA DI TUTTI I GIORNI

L'ANTI-MATERIA È USATA NELLA DIAGNOSTICA MEDICA

Ad esempio la PET:
Positron Emission
Tomography



photon
detector

photon
detector

Si inietta una sostanza
radioattiva che emette
positroni

Si misurano i fotoni che risultano dalla
annichilazione elettrone-positrone

L'immaginazione è più importante della conoscenza.

La conoscenza è limitata, l'immaginazione abbraccia il mondo, stimolando il progresso, facendo nascere l'evoluzione.

