

Large Hadron Collider-LHC

Nicola Semprini Cesari

- Radiazione di sincrotrone, energia, luminosità
 - Parametri
 - Magneti
-

Radiazione di sincrotrone

Un acceleratore circolare determina un moto accelerato delle cariche e quindi irraggia necessariamente energia elettromagnetica.

La formula di riferimento è quella di Larmor $P = \frac{1}{6\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{c^3} a^2$ che alle alte energie viola la relatività.

Possiamo inserire la relatività a mano. Osserviamo che in relatività sono ammessi solo quadrivettori

$$R = (ct, \vec{r})$$

$$V = \frac{dR}{d\tau} = \frac{d}{d\tau}(ct, \vec{r}) = \gamma \frac{d}{dt}(ct, \vec{r}) = \gamma(c, \frac{d\vec{r}}{dt}) = \gamma(c, \vec{v})$$

$$A = \frac{dV}{d\tau} = \gamma \frac{d}{dt} \gamma(c, \vec{v}) = \gamma(c\dot{\gamma}, \dot{\gamma}\vec{v} + \gamma\dot{\vec{v}}) = (c\gamma^4 \beta\dot{\beta}, \gamma^4 \beta\dot{\beta}\vec{v} + \gamma^2\dot{\vec{v}})$$

correzioni β^2 alle formule classiche

Moto circolare $\dot{\beta} = 0 \rightarrow A = (0, \gamma^2\dot{\vec{v}}) \rightarrow \vec{a} = \gamma^2\dot{\vec{v}}$

$$P = \frac{1}{6\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{c^3} a^2 \gamma^4$$

Radiazione di sincrotrone

La formula può essere riarrangiata per una macchina circolare di alta energia nel modo seguente

$$T = \frac{2\pi\rho}{v} \quad a = \frac{v^2}{\rho}$$

$$W_{giro} = PT = \frac{1}{6\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{c^3} \frac{v^4}{\rho^2} \gamma^4 \frac{2\pi\rho}{v} = \frac{e^2}{3\epsilon_0} \frac{\beta^3 \gamma^4}{\rho} = \frac{e^2}{3\epsilon_0} \frac{\beta^3}{\rho} \left(\frac{E}{mc^2} \right)^4 \approx \frac{e^2}{3\epsilon_0} \frac{1}{\rho} \left(\frac{E}{mc^2} \right)^4$$

$$P = \frac{1}{6\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{c^3} \frac{v^4}{\rho^2} \gamma^4 = \frac{e^2 c}{6\pi\epsilon_0} \frac{\beta^4 \gamma^4}{\rho^2} \approx \frac{e^2 c}{6\pi\epsilon_0} \frac{1}{\rho^2} \left(\frac{E}{m} \right)^4$$

$$W_{giro} \approx 9,6 \times 10^{-28} \frac{1}{\rho} \left(\frac{E}{m} \right)^4 \text{ Watt / giro / particella}$$

$$P \approx 4,6 \times 10^{-20} \frac{1}{\rho^2} \left(\frac{E}{m} \right)^4 \text{ Watt / particella}$$

$\rho \rightarrow m$

$E/m \rightarrow \text{adim}$

particelle leggere irradiano disastrosamente!

Lep

$$P_{\text{elettrone}} \approx 4.6 \times 10^{-20} \frac{1}{\rho^2} \left(\frac{E}{m} \right)^4 = 4.6 \times 10^{-20} \frac{1}{(4243)^2} \left(\frac{10^5}{0.51} \right)^4 \approx 3.8 \times 10^{-6} \text{ Watt / elettrone}$$

$$P_{\text{Tot}} \approx N P_{\text{elettrone}} = [4 \text{ treni} \times 1 \text{ bunch} \times 2 \text{ specie} \times 60 \times 10^{10} \text{ particelle}] \times 3.8 \times 10^{-6} \approx 18 \text{ MW}$$

(grosso ripetitore ~ 10 ÷ 50 KW; italia consuma 35 GW; centrale 150 MW)

$$\nu = \frac{2\pi\nu}{c} \approx 9,7 \times 10^3 \text{ Hz}$$

In questi conti ipotizziamo una curvatura costante. Nella realtà in un collider ci sono tratti rettilinei e curvilinei per cui un calcolo rigoroso dipende da dettagli geometrici che qui vogliamo ignorare.

A questa potenza dissipata per radiazione va aggiunta la potenza dissipata nei magneti e l'energia contenuta nell'acceleratore per cui la potenza d'esercizio è ancora maggiore.

Un incremento dell'energia di Lep tecnicamente possibile poiché i vecchi magneti di 0.135 T potrebbero facilmente salire di un fattore 50 non è praticamente possibile a causa della radiazione di sincrotrone (si noti che il raddoppio di energia comporterebbe un aumento di un fattore 16 nella energia dissipata). Dunque un incremento di energia col tunnel di Lep è possibile solo passando a particelle più pesanti (E/m).

Energia di Lhc

Utilizzando **protoni/antiprotoni** la stessa energia dissipata per radiazione di sincrotrone corrisponde a

$$\frac{E_{LHC}}{m_{LHC}} = \frac{E_{LEP}}{m_{LEP}}$$

$$E_{LHC} = E_{LEP} \frac{m_{LHC}}{m_{LEP}} = 10^2 \frac{938}{0.51} \approx 184 TeV$$

che può essere assunto come limite energetico teorico di LHC. Tale energia però richiederebbe magneti di potenza eccessiva

$$B = \frac{W(Gev)}{0.3 Q(un.e) \rho(m)} \approx \frac{184 \times 10^3}{0.3 \times 4243} \approx 145 T$$

mentre industrialmente si producono magneti superconduttori dell'ordine di 10T per cui tale energia deve essere ridotta del fattore 145/10 ovvero a 13 Tev. Tenendo conto che **non** tutta la circonferenza può essere ricoperta da magneti si scende a circa **10 Tev** con le attuali tecnologie sui magneti.

Energia di Lhc

In questo caso la radiazione di sincrotrone per particella vale 2.4×10^{-11} Watt/particella (Lep 2.8×10^{-6} Watt/particella) ovvero circa 116.000 volte inferiore a quella di Lep per cui si può elevare tranquillamente la popolazione dei bunch al massimo livello tecnicamente permesso.

Luminosità di LHC

Lep ha svolto il suo programma di fisica con luminosità superiori a $10^{30} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Dato che le sezioni d'urto per particelle puntiformi (che sono quelle che contengono la fisica rilevante) sono del tipo di Rutherford e scalano con $1/E^2$, per mantenere lo stessa capacità di studio LHC dovrà avere una luminosità superiore a

$$L_{LHC} = L_{LEP} \left(\frac{E_{LHC}}{E_{LEP}} \right)^2 = 10^{30} \left(\frac{10^4}{10^2} \right)^2 > 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$$

L'esplorazione di processi rari richiederà luminosità ancora superiori !

Tecnicamente sarebbe più facile fare collidere protoni ed antiprotoni dato che si potrebbe utilizzare lo stesso anello di accelerazione. Tuttavia un antiprotone costa 300.000 protoni cui un collider protone antiprotone richiederebbe una lunga accumulazione di antiprotoni e quindi un abbattimento della luminosità integrata. **Si è forzati a collidere protoni con protoni** superando il problema tecnico del doppio anello di accelerazione.

Limiti alla luminosità di LHC

Naturalmente la precedente stima stabilisce solo un limite inferiore alla luminosità, il limite superiore è stabilito fattori di ordine tecnico

- 1) numero di particelle per bunch: limitato dalla interazione beam-beam. Quando i bunch transitano uno accanto all'altro sono soggetti ad una azione elettromagnetica trasversale che altera il tune dell'acceleratore. Empiricamente i macchinisti sanno che l'effetto non deve superare una certa soglia affinché non si originino instabilità e degradazione del fascio (N circa 10^{11}).
- 2) Numero di bunch: limitato dalla sovrapposizione di bunches nello stesso apparato. E' necessario che un solo bunch alla volta occupi la zona sperimentale per non complicare eccessivamente l'acquisizione

$$N_{bunches} \approx 26659/10 \approx 2700$$

Limiti alla luminosità di LHC

3) radiazione di sincrotrone:

$$P_{tot} = N_{bunches} N_{particelle} P_{sincro} = 2700 \times 10^{11} \times 2.4 \times 10^{-11} = 6,5 \text{ KW}$$

molto inferiore ai 14 GW di Lep! Tuttavia tale potenza deve essere assorbita nel sistema di raffreddamento di LHC ovvero a pochi gradi Kelvin. Problema: si ritiene che un innalzamento della luminosità di LHC avrà costi energetici enormi per il sistema di raffreddamento!

4) energia fascio:

$$W_{fascio} = N_{bunches} N_{particelle} W_{cinetica} = 2700 \times 10^{11} \times 10^4 \text{ GeV} = 430 \text{ MJ}$$

energia elevata ma non è un problema dissiparla velocemente alla fine del run o in caso di malfunzionamenti su di un tradizionale beam-dump.

Parametri di LHC

Numero bunches	2808
Intervallo tra bunches	25 ns, 7.5 m
Lunghezza bunch	7.7 cm
Larghezza bunch (Atlas)	16.7 μm
Particelle per bunch	1.15×10^{11}
Corrente media	0.584 A
Luminosità	$10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$

Collisore	protone-protone
Energia	7 Tev per fascio
Spread dE/E	1.1×10^{-4}

$[\sigma = (\beta^* \epsilon)^{1/2} \quad \beta^* = 0.55 \text{ m}, \quad \epsilon = 10^{-9} \text{ rad m}]$

Circonferenza (Raggio)	26659 (4243) m
Punti di collisione	4
Angolo di crossing Atlas	9.2×10^{-3} gradi

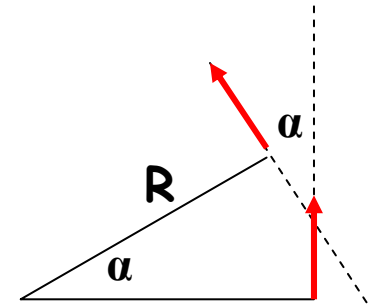
Energia irradiata	$1.84 \times 10^{-11} \text{ W/protone}$
Energia irradiata	3.6 KW/fascio

Sez. d'urto tot pp (7 TeV)	100 mb
Sez. d'urto inel. pp (7 TeV)	60 mb
Numero reazioni/bunch	25

$\Delta N = L \sigma \Delta t =$ ←
 $= (10^{34}) \times (10^2 \times 10^{-3} \times 10^{-24}) \times (25 \times 10^{-9}) =$
 $= 25 \text{ reaz / bunch}$

Magneti di LHC

In un acceleratore oltre ai dipoli sono presenti in numero molto inferiore quadrupoli, sestupoli etc. etc. Inoltre devono esserci tratti rettilinei per l'accelerazione delle particelle ovvero per le cavità a radiofrequenza. Dunque solo una parte della circonferenza contribuisce alla curvatura della traiettoria. La valutazione del campo magnetico dei dipoli deve essere fatta tenendo conto di questo fatto.



$$qvB = m \frac{v^2}{R} \quad qRB = p \quad q\alpha RB = \alpha p \quad qLB \approx \frac{2\pi E}{N c} \quad BNL = \frac{2\pi E}{q c}$$

Dunque per rendere massima l'energia raggiungibile dal collider è necessario rendere massimo il campo B del singolo dipolo e la parte di circonferenza NL occupata dal loro campo. I progettisti hanno ritenuto possibile realizzare 1232 dipoli con campi magnetici da 8.3T su di una lunghezza di 14.3 m (66% della circonferenza). In questo modo si raggiunge l'energia per fascio di

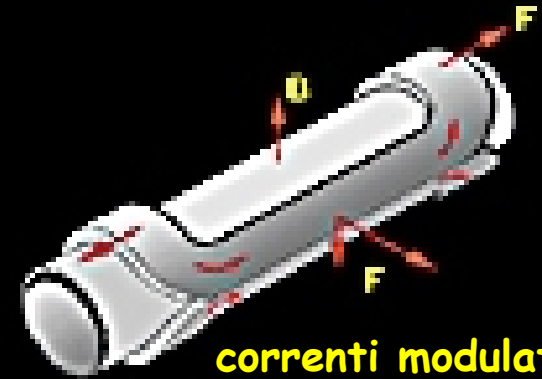
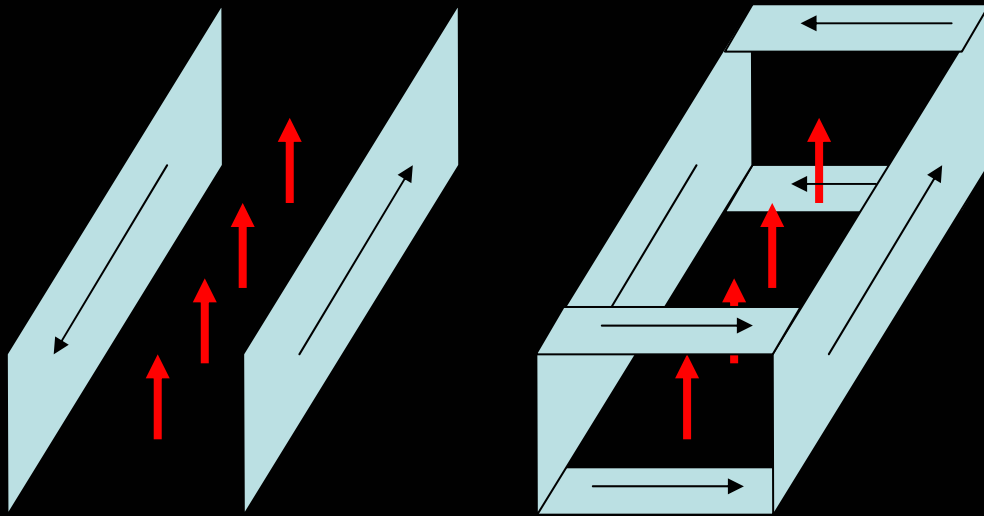
$$E \approx \frac{q c BNL}{2\pi} = \frac{1.6 \times 10^{-19} \times 3 \times 10^8 \times 8.3 \times 1232 \times 14.3}{2\pi} \approx 7 \text{ TeV}$$

IMPRESA !

	Anno	N.M.	B(T)	L(m)
Tevatron	1987	216	4T	6.12
Hera	1992	280	6T	8.82
SSC	†	?	?	?
RHIC	2000	192	3.5	9.5
LHC	2007	1232	8.3	14.3

Magneti dipolari

Lunghezze di campo di 14.3 m non si possono realizzare con bobine di Helmholtz e simili (diametro di 14.3 m, non entra nel tunnel di LHC !). E' necessario escogitare una appropriata geometria delle correnti elettriche.

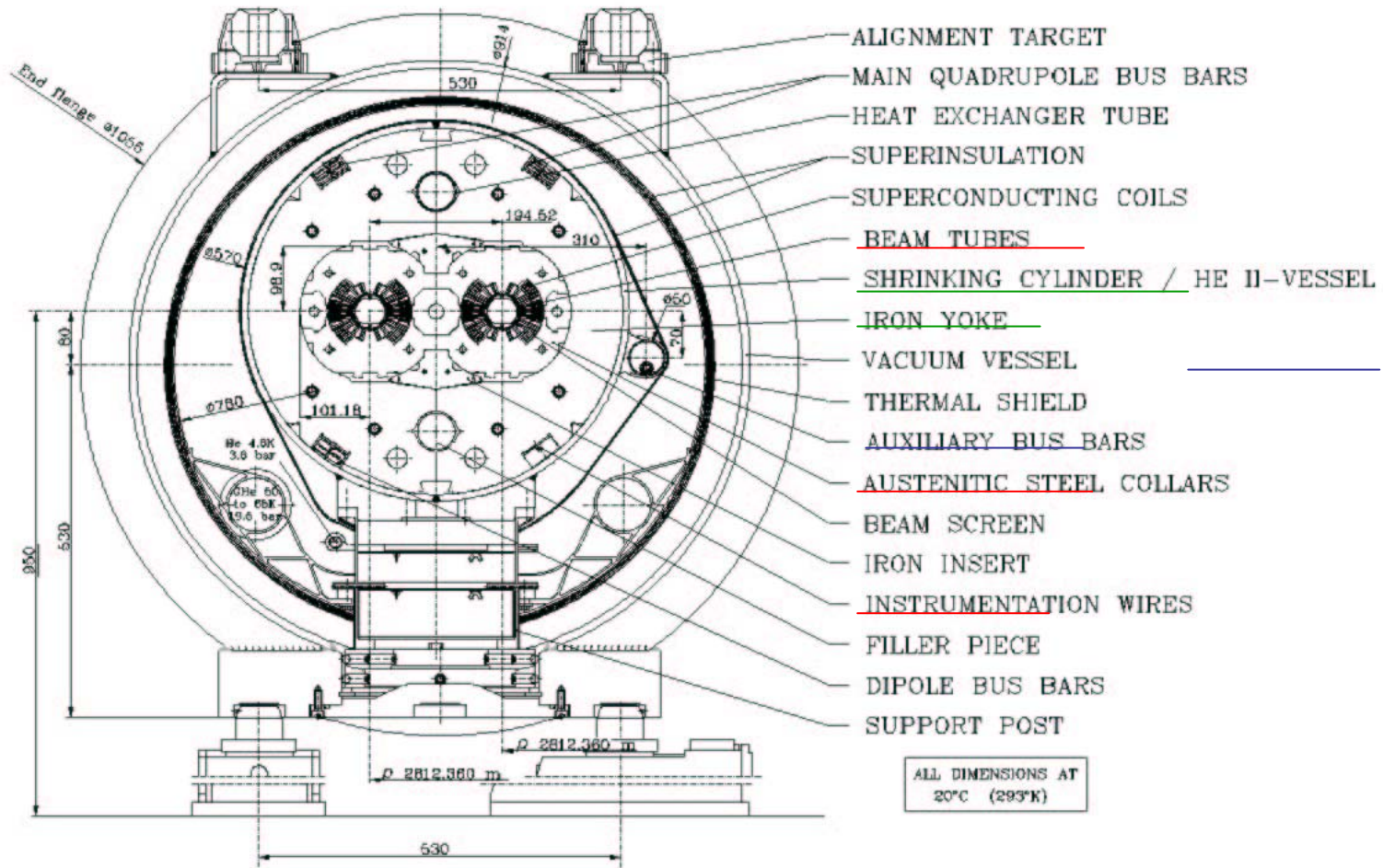


correnti modulate
azimutalmente per
ottenere un B
uniforme nel volume

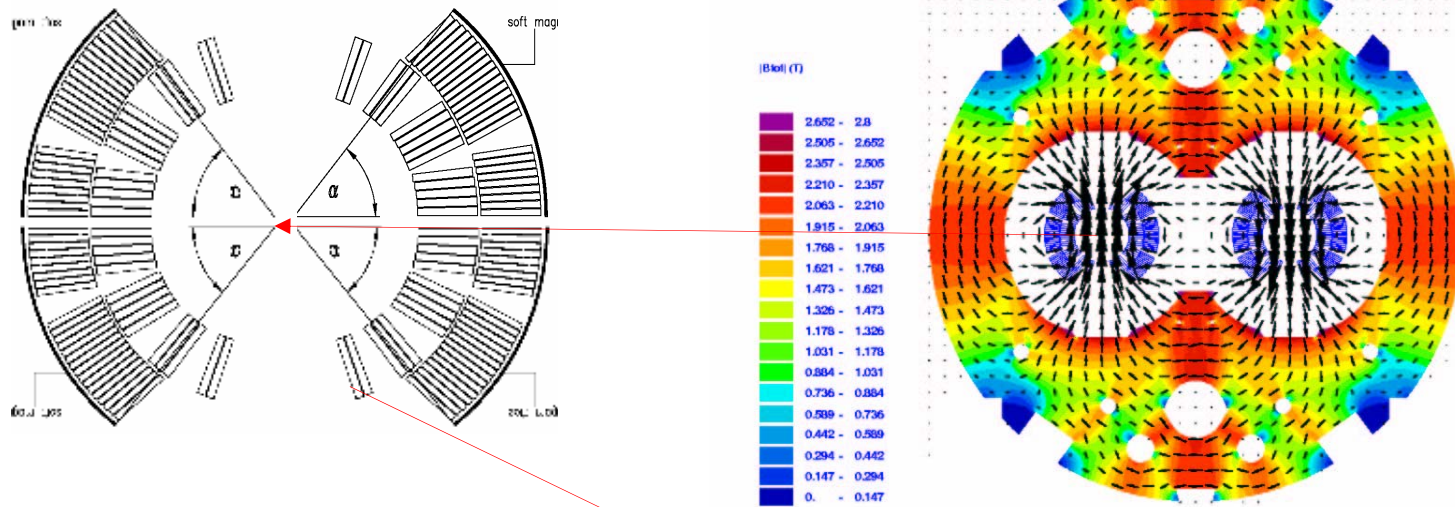
$$B = \frac{\mu_0 i}{L} \quad i = \frac{BL}{\mu_0} \approx \frac{8.3 \times 0.1}{4\pi \times 10^{-7}} = 700.000 \text{ A}$$

dell'ordine di 100 cavi da 7000 A : cavi superconduttori (seguirà accenno alla superconduzione!)

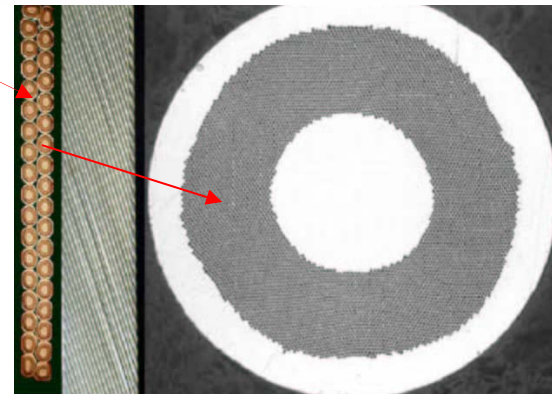
Sezione magnete dipolare



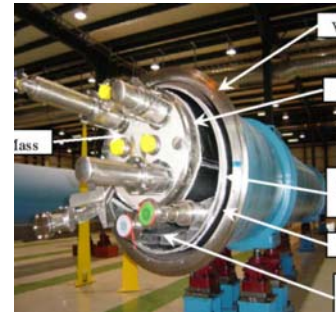
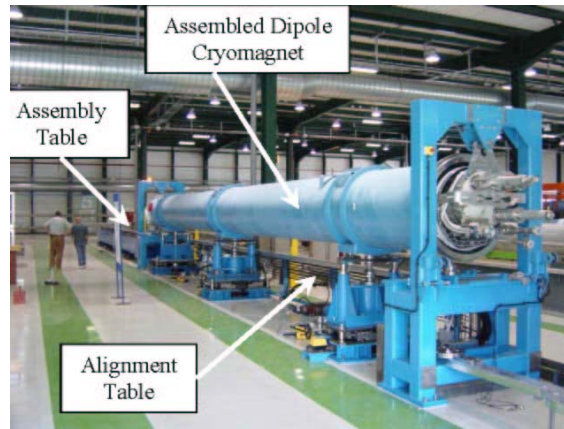
Correnti magnete dipolare



**28-56 cavi superconduttori di
circa 1 mm di sezione**



Magnete dipolare



Fine

