

Il programma di fisica al Large Hadron Collider

(raccontato da uno sperimentale)

Sommario

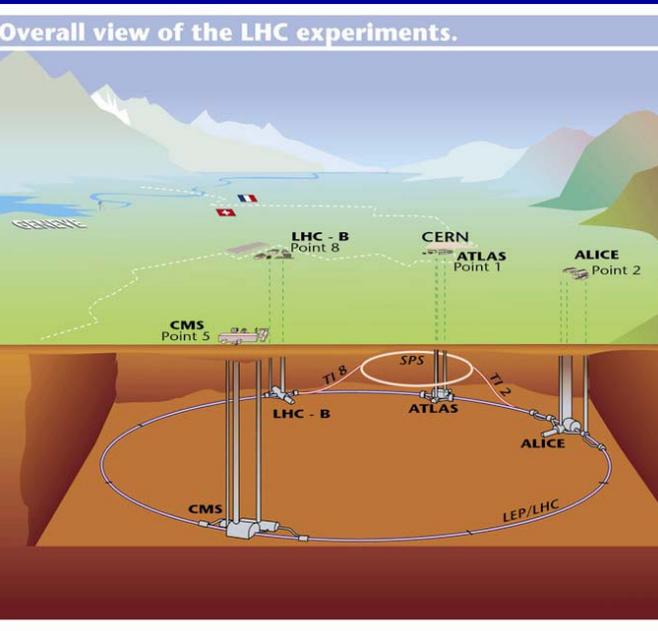
Il Large Hadron Collider

Gli esperimenti ed i problemi sperimentali

Il programma di fisica. Argomenti scelti su:

- Fisica dello SM
- Fisica del top
- SUSY
- Fisica del b
- Higgs

I parametri del LHC



$$L_{\text{nom}} = 1 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{sec}^{-1}$$

$$E = 2 \times 7 \text{ TeV}$$

$$L = \frac{N_b^2 n_b f_{\text{rev}}}{4\pi\sigma_x\sigma_y} F$$

$$F = 1 / \sqrt{1 + \left(\frac{\theta_c \sigma_z}{2\sigma^*}\right)^2}$$

N_b	n° protoni/bunch	1.15×10^{11}
n_b	n° bunches	2.808
f_{rev}	frequenza di rivoluzione	11,245 kHz
$\sigma_{x,y}$	dimensioni dei fasci	$15,9 \mu\text{m}$
$F < 1$	dipende da θ_c	$300 \mu\text{rad}$

$$\text{Eventrate / Cross} = \frac{L \sigma_{\text{TOT}}}{k_b f} \approx 25$$

$$\Delta\tau = 25 \text{ ns}$$

$$\Rightarrow \text{Event rate} \approx 10^9 \text{ Hz}$$

Lo stato del progetto



1.232 dipoli (14.3 m) $8.3\text{ T @ }1,9\text{ K @ }12,84\text{ kA}$

376 quadrupoli, 688 sestupoli,

A Febbraio 06

~ 1000 dipoli consegnati

> 300 dipoli installati

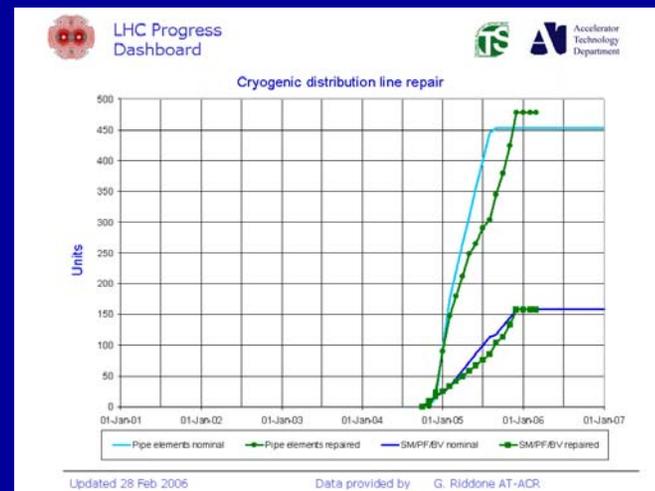
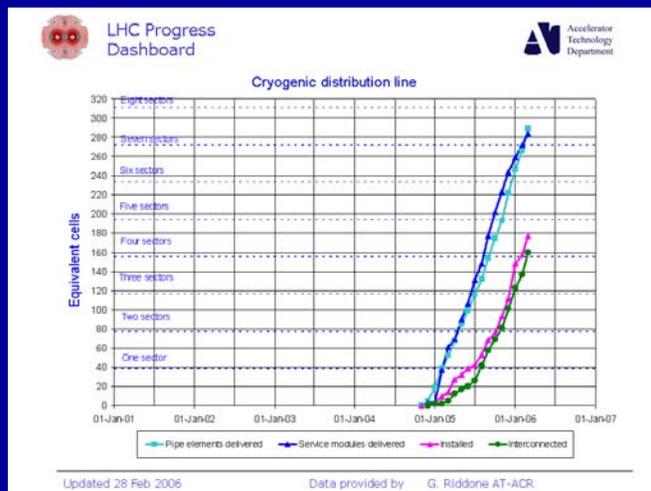
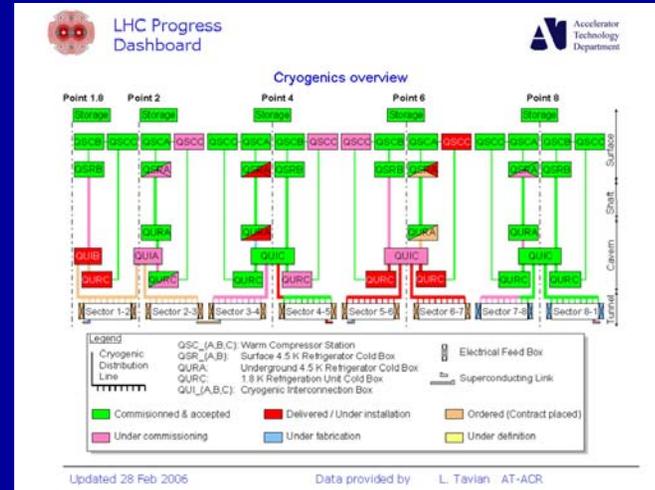
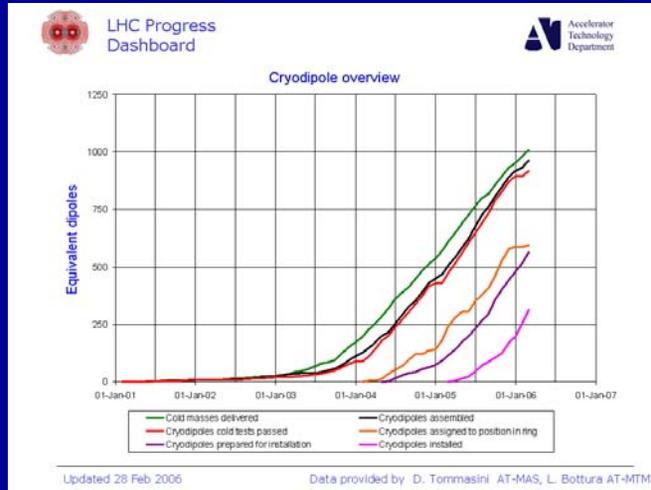
20 → 25 dipoli/settimana



7/3/05 primo dipolo nel tunnel

Lo stato del progetto

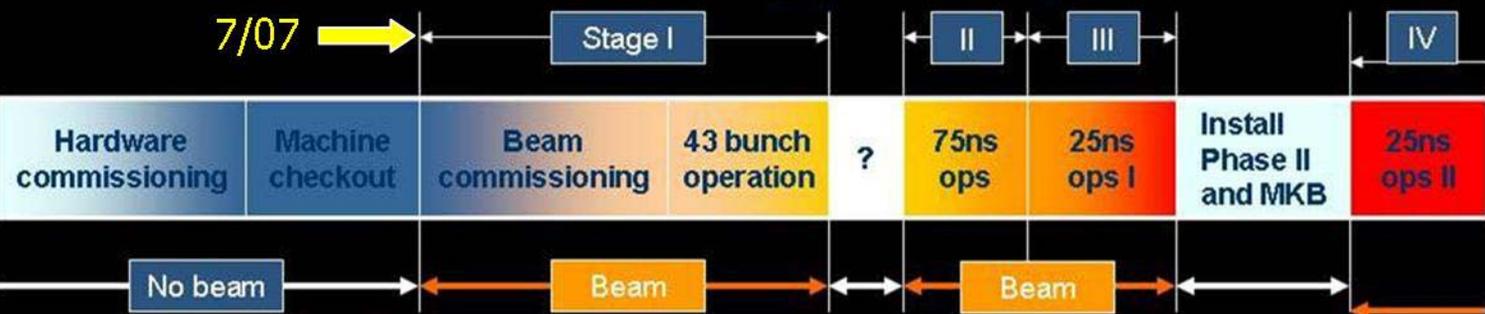
E' possibile visualizzare lo stato del progetto sull' LHC Progress Dashboard sul sito Web del LHC



Lo scenario allo startup e .. dopo

Staged commissioning plan for protons

7/07 →



I. Pilot physics run

- First collisions
- 43 bunches, no crossing angle, no squeeze, moderate intensities
- Push performance (156 bunches, partial squeeze in 1 and 5, push intensity)
- Performance limit $10^{32} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (event pileup)

II. 75ns operation

- Establish multi-bunch operation, moderate intensities
- Relaxed machine parameters (squeeze and crossing angle)
- Push squeeze and crossing angle
- Performance limit $10^{33} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (event pileup)

III. 25ns operation I

- Nominal crossing angle
- Push squeeze
- Increase intensity to 50% nominal
- Performance limit $2 \cdot 10^{33} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

IV. 25ns operation II

- Push towards nominal performance

Primo anno

$$\int L dt = 1 \text{ fb}^{-1}$$



3 anni @ 10^{33}

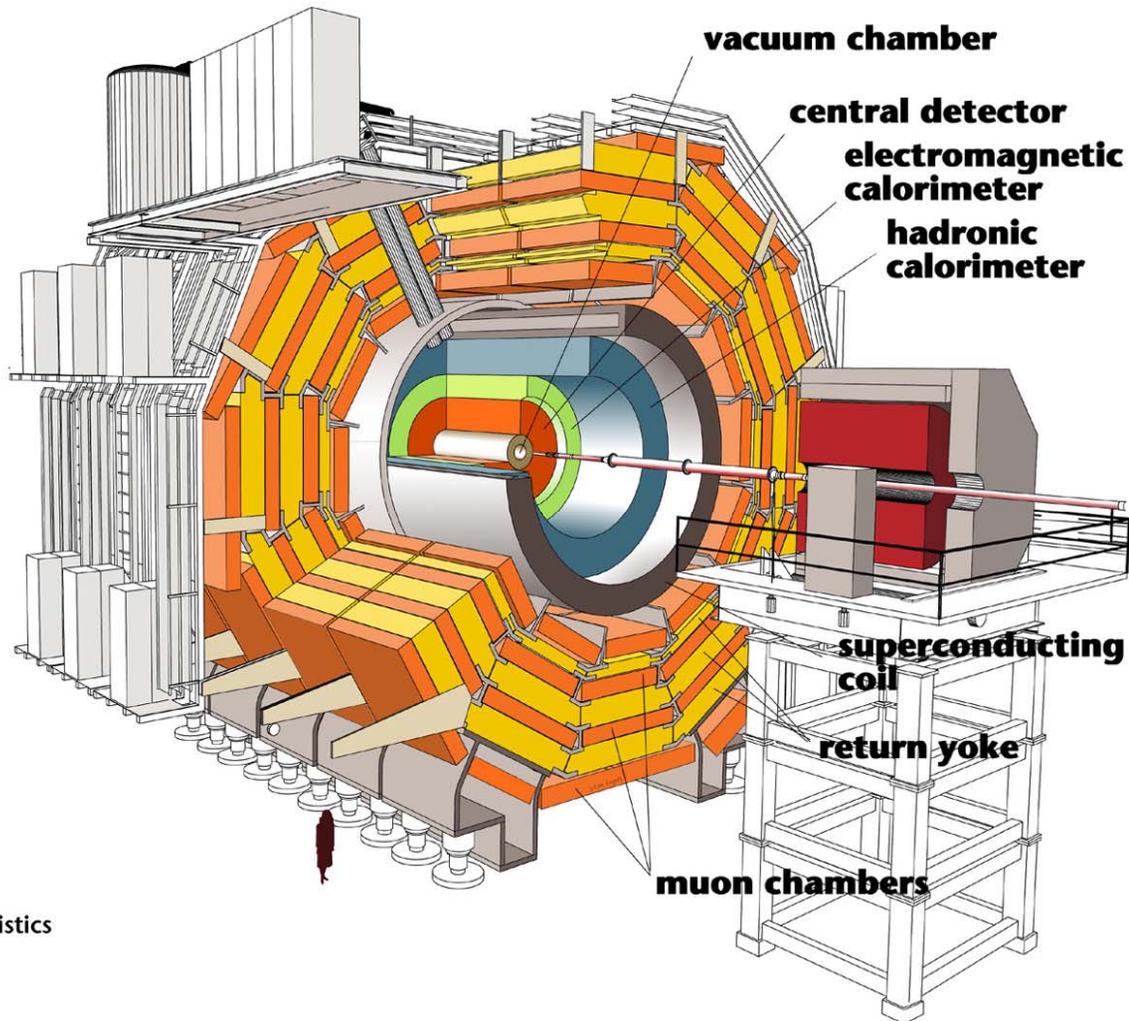
$$\int_{\text{anno}} L dt = 10 \text{ fb}^{-1}$$



n anni @ 10^{34}

$$\int_{\text{anno}} L dt = 100 \text{ fb}^{-1}$$

Gli esperimenti - CMS



Detector characteristics

Width: 22m
Diameter: 15m
Weight: 14'500t

Gli esperimenti - Atlas

Lunghezza totale del rivelatore

46 m

Diametro

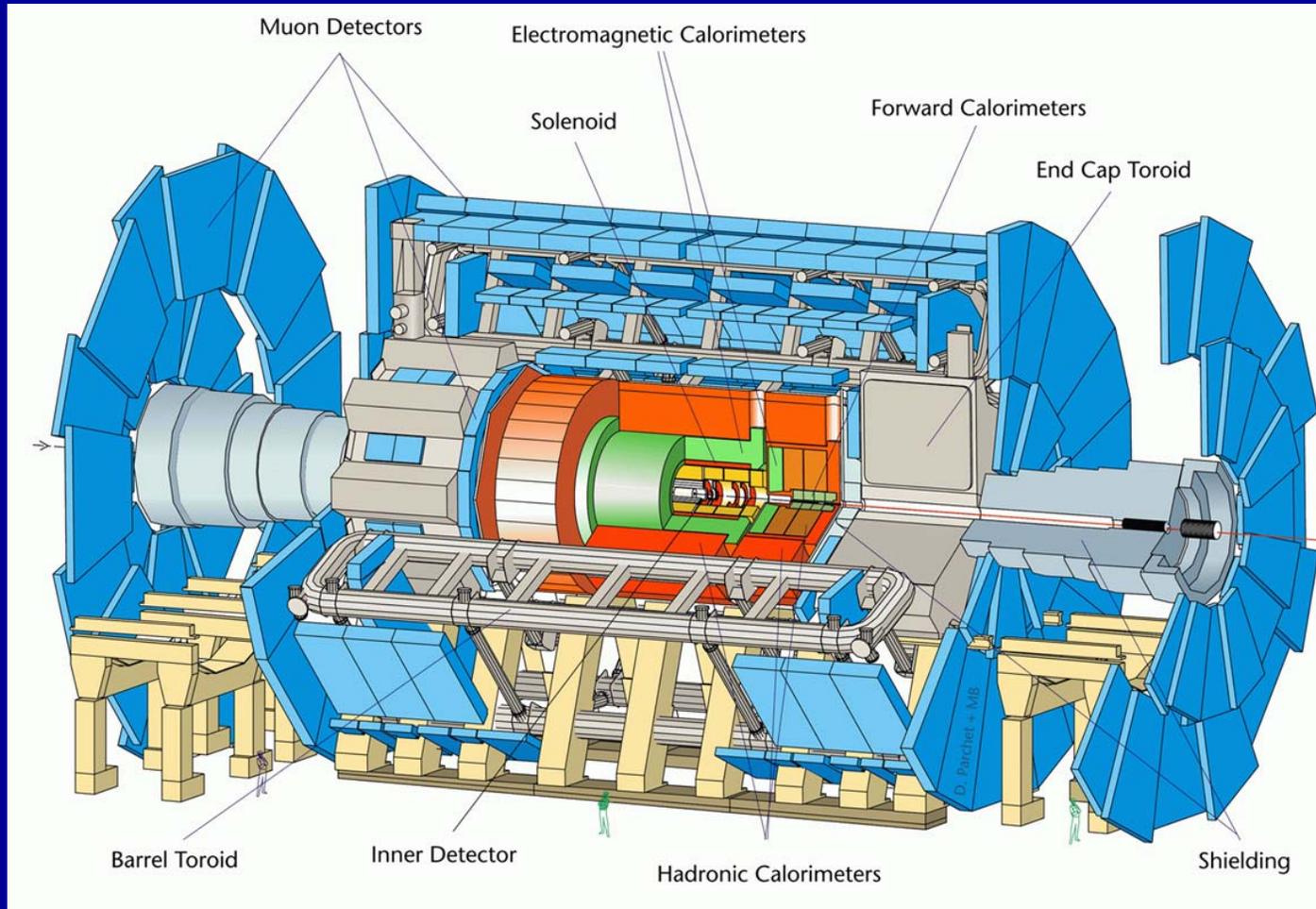
25 m

Peso totale

7000 Tons

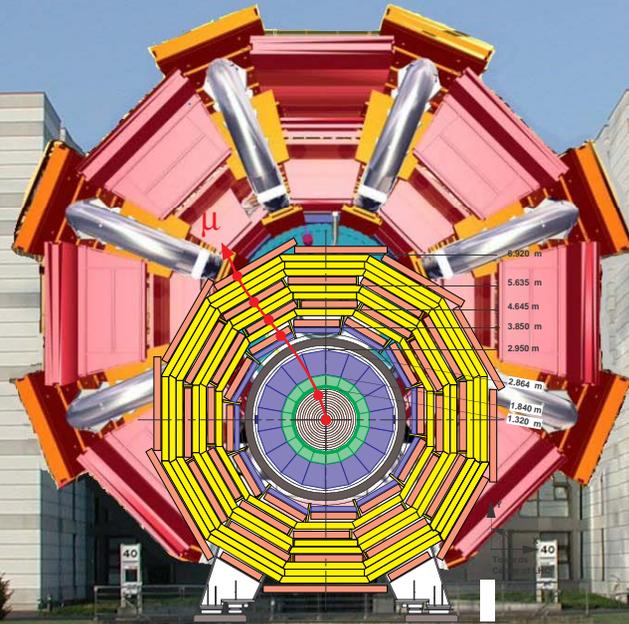
Lunghezza toroide barrel

26 m



Magnete toroidale $\langle B \rangle \sim 0.6$ T

Solenioide da 2T per il tracciatore interno



Transverse View

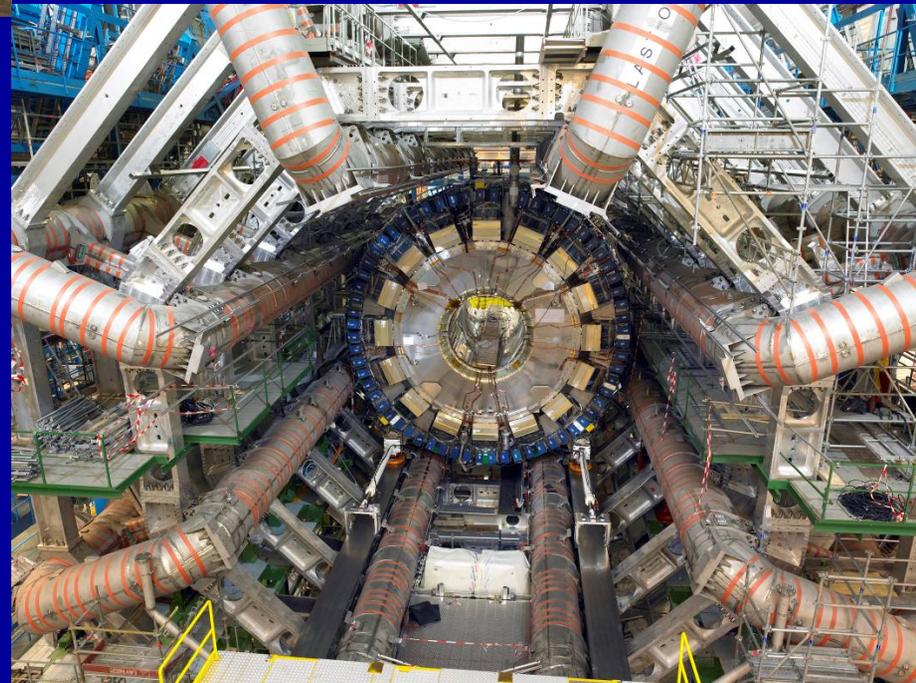
CMB-TG-0000

Atlas oggi



In superficie

In caverna



La collaborazione ATLAS

ATLAS Collaboration

(As of the October 2005 RRB)

34 Countries

153 Institutions

1650 Scientific Authors total

(1330 with a PhD, for M&O share)

New applications for CB decision:

UN La Plata, U Buenos Aires (Argentina)

TU Dresden, U Giessen (Germany)

U Oregon, U Oklahoma (US)

New application for CB announcement:

DESY, Humboldt U Berlin (Germany)

SLAC, New York U (US)

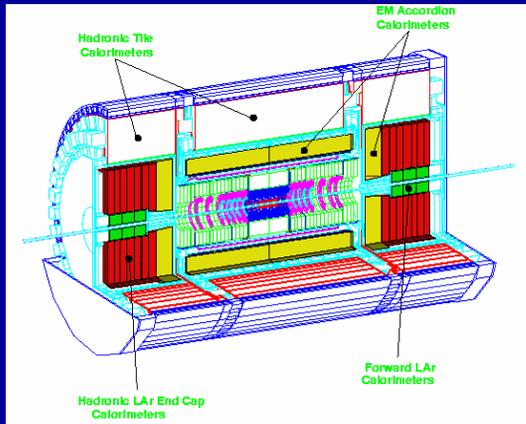


Albany, Alberta, NIKHEF Amsterdam, Ankara, LAPP Ancey, Argonne NL, Arizona, UT Arlington, Athens, NTU Athens, Baku, IFAE Barcelona, Belgrade, Bergen, Berkeley LBL and UC, Bern, Birmingham, Bologna, Bonn, Boston, Brandeis, Bratislava/SAS Kosice, Brookhaven NL, Bucharest, Cambridge, Carleton, Casablanca/Rabat, CERN, Chinese Cluster, Chicago, Clermont-Ferrand, Columbia, NBI Copenhagen, Cosenza, INP Cracow, FPNT Cracow, Dortmund, JINR Dubna, Duke, Frascati, Freiburg, Geneva, Genoa, Glasgow, LPSC Grenoble, Technion Haifa, Hampton, Harvard, Heidelberg, Hiroshima, Hiroshima IT, Indiana, Innsbruck, Iowa SU, Irvine UC, Istanbul Bogazici, KEK, Kobe, Kyoto, Kyoto UE, Lancaster, Lecce, Lisbon LIP, Liverpool, Ljubljana, QMW London, RHBNC London, UC London, Lund, UA Madrid, Mainz, Manchester, Mannheim, CPPM Marseille, Massachusetts, MIT, Melbourne, Michigan, Michigan SU, Milano, Minsk NAS, Minsk NCPHEP, Montreal, McGill Montreal, FIAN Moscow, ITEP Moscow, MEPH Moscow, MSU Moscow, Munich LMU, MPI Munich, Nagasaki IAS, Naples, Naruto UE, New Mexico, Nijmegen, BINP Novosibirsk, Ohio SU, Okayama, Oklahoma, LAL Orsay, Osaka, Oslo, Oxford, Paris VI and VII, Pavia, Pennsylvania, Pisa, Pittsburgh, CAS Prague, CU Prague, TU Prague, IHEP Protvino, Ritsumeikan, UFRJ Rio de Janeiro, Rochester, Rome I, Rome II, Rome III, Rutherford Appleton Laboratory, DAPNIA Saclay, Santa Cruz UC, Sheffield, Shinshu, Siegen, Simon Fraser Burnaby, Southern Methodist Dallas, NPI Petersburg, Stockholm, KTH Stockholm, Stony Brook, Sydney, AS Taipei, Tbilisi, Tel Aviv, Thessaloniki, Tokyo ICEPP, Tokyo MU, Toronto, TRIUMF, Tsukuba, Tufts, Udine, Uppsala, Urbana UI, Valencia, UBC Vancouver, Victoria, Washington, Weizmann Rehovot, Wisconsin, Wuppertal, Yale, Yerevan

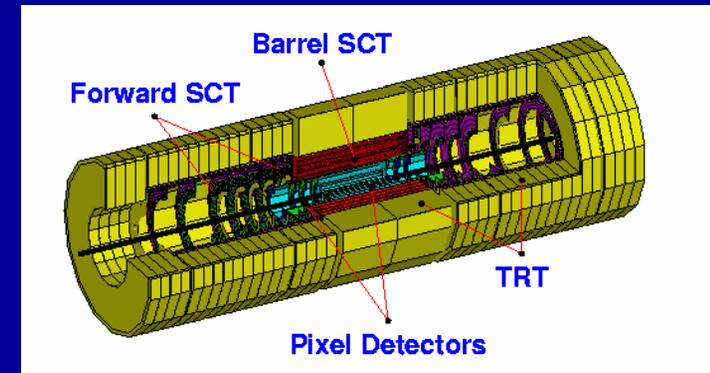
Le caratteristiche degli esperimenti

La struttura dei due apparati sperimentali utilizzati è simile ma ATLAS e CMS utilizzano rivelatori di tipo diverso:

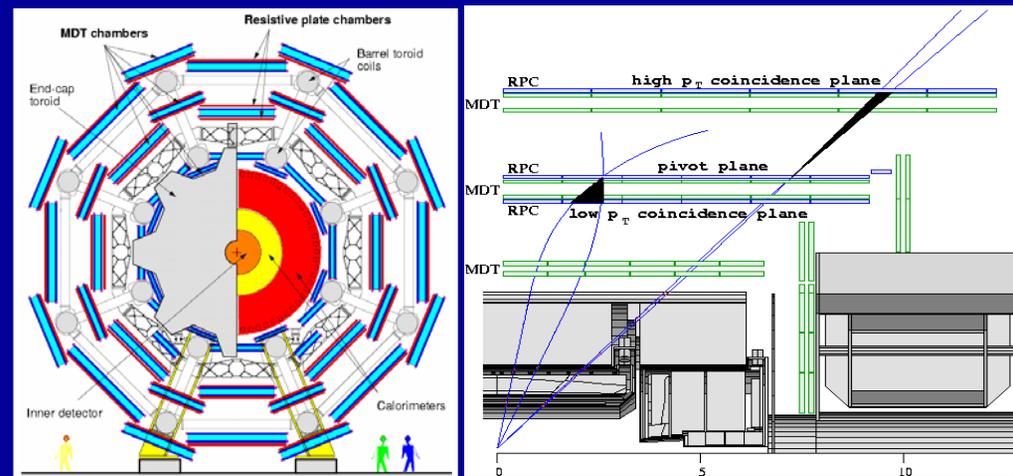
Sistema di tracciamento: ricostruzione di tacche cariche in campo magnetico. Separazione e/π (in Atlas). Fondamentale per l'identificazione dei vertici di decadimento dei mesoni B (**b – tagging**).



Spettrometro per muoni: identificazione e misura di μ . Contiene anche rivelatori "ad hoc" per la generazione del trigger di 1° livello.



Calorimetria elettromagnetica ed adronica: identificazione e misura di e , γ e jet. Utilizzata anche per la generazione del trigger di 1° livello.



Il contributo italiano

I gruppi italiani hanno dato contributi importanti su tutti i rivelatori costruiti per ATLAS e CMS.

ATLAS

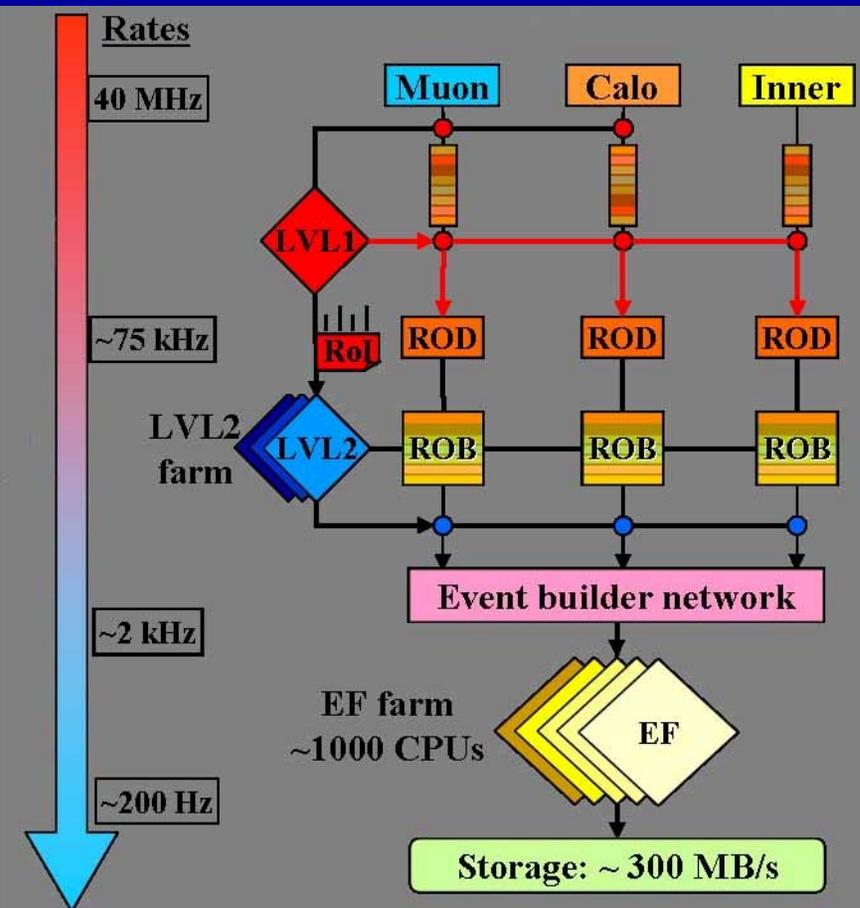
Rivelatore a pixel del tracciatore
Calorimetro elettromagnetico a LAr
Calorimetro adronico Tile
Rivelatori di precisione per μ (MDT)
Rivelatori di trigger per μ (RPC)
Trigger per μ di 1° livello
DAQ: Trigger di 2° livello
Event Filter

CMS

Rivelatori a microstrisce del tracciatore
Calorimetro elettromagnetico a cristalli
Rivelatori di precisione per μ (DC)
Rivelatori di trigger per μ (RPC)
DAQ

Il sistema di TDAQ di Atlas

Il problema più serio per gli esperimenti: 10^9 eventi/s \rightarrow 200 eventi/s su disco

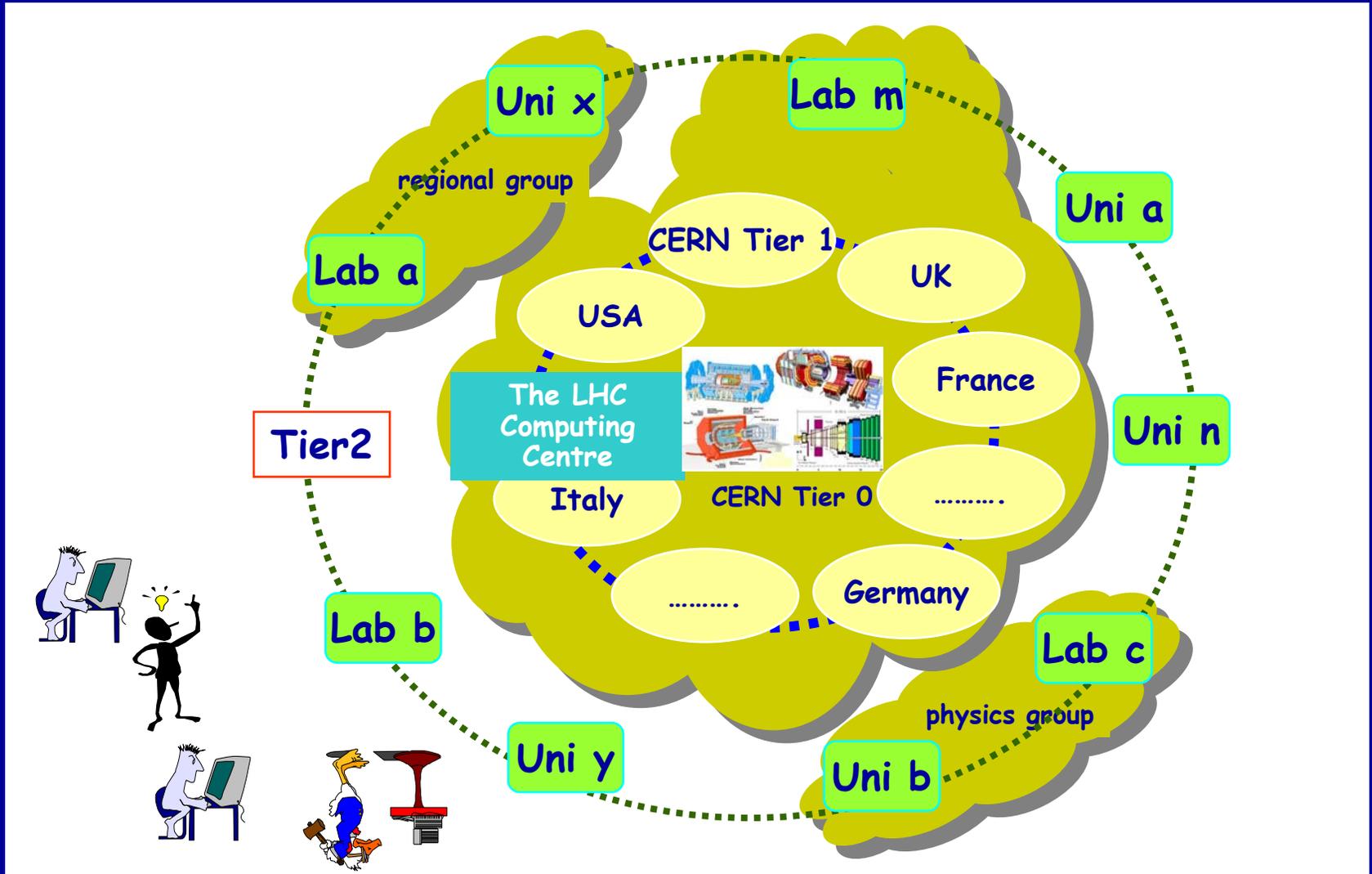


Level 1: hardware based
 input da calorimetri e spettrometro μ
 high- p_T electrons e γ
 jets, $\tau \rightarrow$ hadrons
 E_T^{miss}
 high- p_T μ
 genera RoI
 2 μ s/evento (pipeline)

Level 2: software based
 uso del rivelatore di tracce
 selezione basata sul 2% dei dati usando le RoI
 farm di processori su Gigabit Ethernet
 \approx 10 ms/evento

Event Filter: selezione basata su tutti i dati dell'evento
 ricostruzione simile all'off-line
 classificazione degli eventi
 \approx 1000 CPU
 \approx 1 s/evento

Computing off-line



Fisica a LHC

Nel seguito saranno presentati **alcuni esempi** che (a mio giudizio) mostrano il potenziale di scoperta o di miglioramento delle misure già esistenti nell'ambito del Modello Standard.

Per la complessità dell'ambiente di misura e degli apparati sperimentali, ciascuno degli argomenti presentati richiederebbe una presentazione **molto più articolata in termini di studio dei fondi e ipotesi teoriche (dipendenti o indipendenti dai modelli usati)**. A dimostrazione di ciò basta considerare il numero (**per nulla trascurabile**) di fisici che negli anni della costruzione degli esperimenti si sono dedicati allo studio della simulazione dei processi di fisica.

Le simulazioni Monte Carlo (prima Geant 3 ed ora su Geant 4) degli apparati sperimentali giocano ovviamente un ruolo fondamentale così come i **generatori di eventi** utilizzati per la simulazione della risposta dei vari rivelatori

PYTHIA

Per i processi dello SM e per l'Higgs

HERWIG

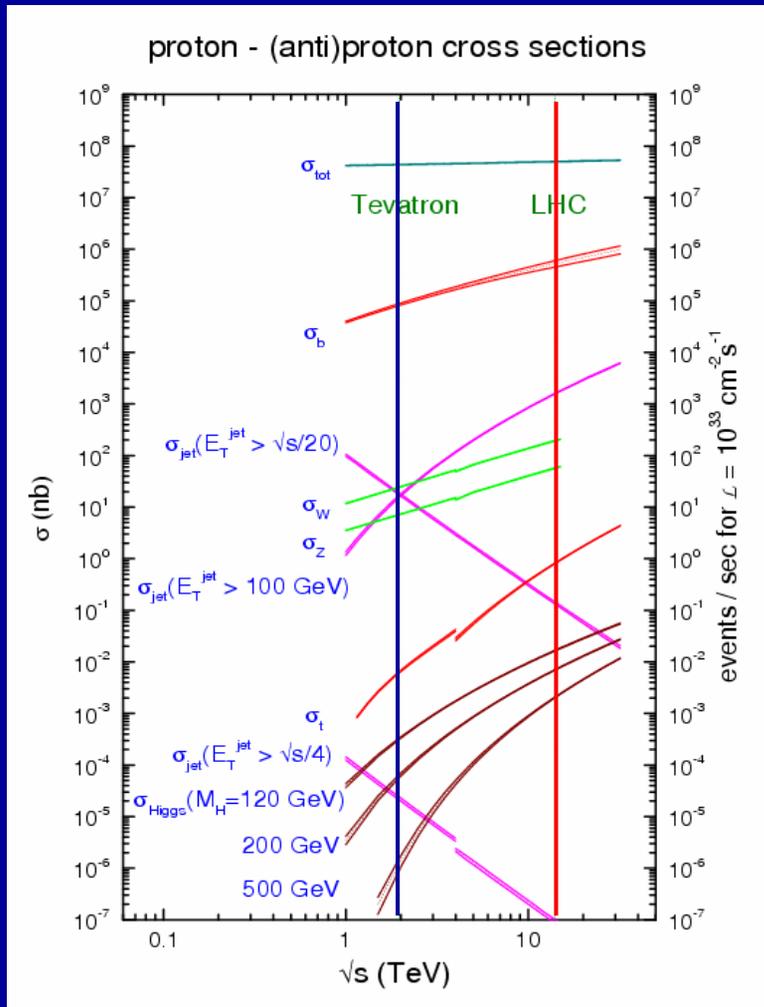
Per i processi di QCD e SUSY

ISAJET

Per i processi di SUSY

Gli studi presentati sono quelli fatti nell'ambito **di ATLAS**.

Lo scenario a $10^{33} \text{ cm}^2\text{s}^{-1}$



	σ	eventi/sec @ 10^{33}
totale	100 mb	10^8
b	1 mb	10^6
jet	1 μb	10^3
Z - W	100 nb	10^2
top	1 nb	1
Higgs	1-10 pb	$10^{-2} - 10^{-3}$

Fisica dello SM (1)

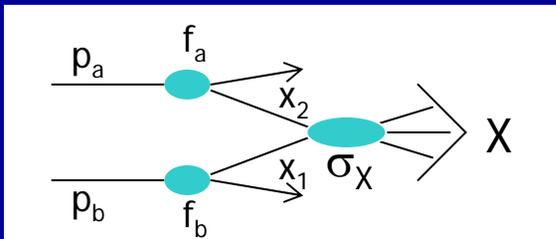
Process	σ (nb)	Ns ⁻¹	Events/year ($\mathcal{L} = 10 \text{ fb}^{-1}$)
Minimum Bias	10 ⁸	10 ⁷	$\sim 10^{15}$
Inclusive jets $p_T > 200 \text{ GeV}$	100	100	$\sim 10^9$
$W \rightarrow e\nu$	15	15	$\sim 10^8$
$Z \rightarrow e^+ e^-$	1.5	1.5	$\sim 10^7$
dibosons	0.2	10 ⁻³	$\sim 10^4$

L'enorme quantità di eventi prodotti al LHC attraverso processi dello SM è di enorme importanza per gli esperimenti per due motivi:

E' possibile migliorare i risultati già straordinari ottenuti da LEP sullo SM

Fisica EW: misura di M_W (Δ_{M_W} 20 MeV con 10 fb^{-1} - oggi World Average 34 MeV) e studio dei vertici γWW , WWZ (Triple Gauge Couplings)

OCD: $\alpha_s(Q^2)$ e PDF (Parton Distribution Functions). Ad esempio la misura di $d\sigma/d\eta$ per i decadimenti $W^\pm \rightarrow e^\pm \nu$ permetteranno di ottenere migliori constraints sulla distribuzione dei gluoni. Una migliore conoscenza delle PDF è fondamentale per un calcolo più accurato di tutte le sezioni d'urto di produzione



$$\sigma_X = \sum_{a,b} \int_0^1 dx_1 dx_2 f_a(x_1, \mu_F^2) f_b(x_2, \mu_F^2) \times \hat{\sigma}_{ab \rightarrow X}(x_1, x_2, \{P_i^\mu\}; \alpha_S(\mu_R^2), \alpha(\mu_R^2), \frac{Q^2}{\mu_R^2}, \frac{Q^2}{\mu_F^2})$$

Fisica dello SM (2)

Il secondo motivo è che i canali di fisica dello SM sono fondamentali per comprendere e calibrare i rivelatori soprattutto nella fase iniziale di presa dati

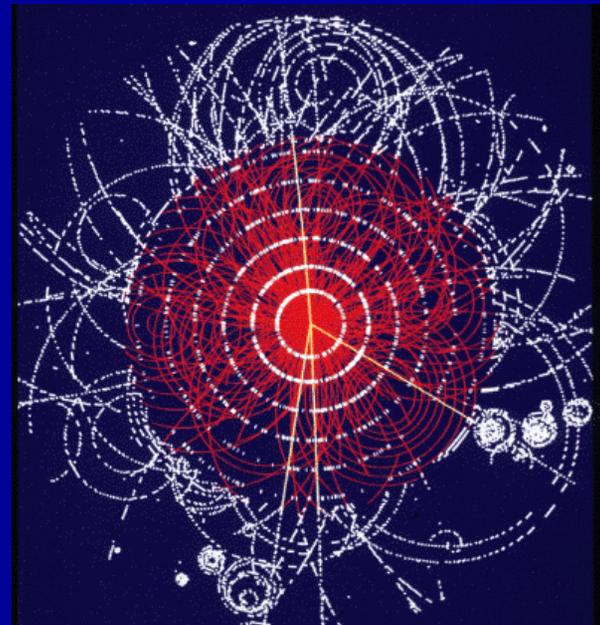
Calibrazione della scala di energia dei leptoni dal decadimento delle Z

Calibrazione della scala di energia dei jet

Misura della luminosità "reale" dal rate di W e Z

Tuning dei Monte Carlo

Infine non va dimenticato che gli eventi dello SM sono il **fondo** per le nuove scoperte!



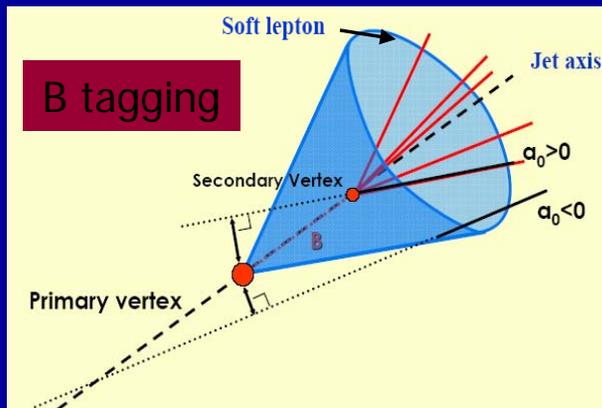
Fisica del b

Al LHC verranno prodotti 10^6 quark b al secondo. Per sfruttare questo enorme potenziale di studio è stato progettato un esperimento "ad hoc" (LHC) ma è evidente che anche gli esperimenti "general purpose" hanno una grossa potenzialità per l'analisi di questi eventi.

L'obiettivo principale è quello delle misure di precisione nell'ambito dello SM per determinare gli elementi della matrice CKM con precisione sufficiente a mettere in luce, eventualmente, segnali di nuova fisica.

Per la fisica del b sono di particolare importanza due aspetti sperimentali:

Trigger di primo livello basato sulla selezione di eventi con un μ con $p_T > 6$ GeV
Identificazione dei jet prodotti dal decadimento dei mesoni B (b-tagging)



L'identificazione di un jet adronico dovuto ad un quark b è basato sulla misura di due parametri delle tracce ricostruite:

Parametro di impatto a_0
Distanza del vertice di decadimento secondario (legato a τ)

Utilizzando vari algoritmi basati su questi parametri (ma anche sul leptone) si punta a selezionare campioni di b con una efficienza > 70 % ed una selezione di jet prodotti da quark leggeri o gluoni > 100 .

Stato della matrice CKM

Matrice CKM

$$\begin{pmatrix} d' \\ s' \\ b' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} d \\ s \\ b \end{pmatrix}$$

Rappresentazione di Wolfenstein

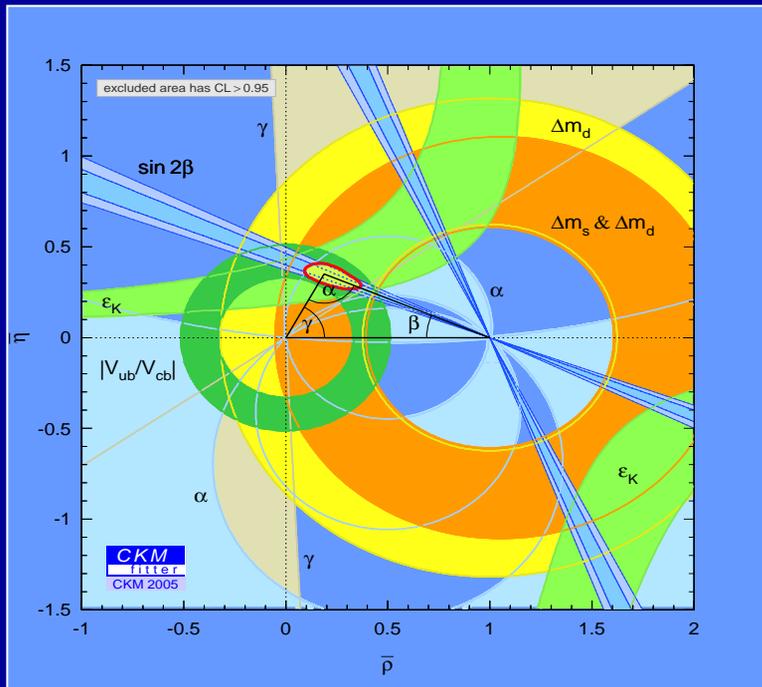
$$V_{KM} = \begin{pmatrix} 1 - (\lambda^2/2) & \lambda & A\lambda^3(\rho - i\eta) \\ -\lambda & 1 - (\lambda^2/2) & A\lambda^2 \\ A\lambda^3(1 - \rho - i\eta) & -A\lambda^2 & 1 \end{pmatrix}$$

3 parametri reali: λ , A , ρ
1 fase complessa: η

Triangolo di unitarietà

$$V_{ud}V_{ub}^* + V_{cd}V_{cb}^* + V_{td}V_{tb}^* = 0$$

Stato del fit al Triangolo di unitarietà



- ➡ **SM confronts B-factories measurements of CKM angles**
 $\sin 2\beta = 0.725 \pm 0.037$
 $\alpha = [101 + 16 - 9]^\circ$
 $\gamma = [63 + 15 - 13]^\circ$
- ➡ **Direct measurements of angles agree with SM CKM fit within errors varying between 6%-22%**
- ➡ **Unconstrained sum of angles = 187° consistent with unitarity sum within the errors**

Present fits however do not provide a bound on the New Physics parameters space.

Fisica del b – Violazione di CP

Ad LHC lo studio della asimmetria di decadimento dei sistemi $B^0 - \bar{B}^0$ in specifici autostati di CP permetterà di ottenere dei vincoli più stringenti sui parametri del Triangolo di unitarietà con la possibilità di evidenziare deviazione dallo SM.

Misura di $\sin 2\beta$ dai decadimenti $B^0_d - \bar{B}^0_d \rightarrow J/\Psi K^0_s$. E' il canale "d'oro" per la misura di $\sin 2\beta$ e la previsione per δ ($\sin 2\beta$) è ~ 0.012 con 30 fb^{-1} .

Misura di $\sin 2\alpha$ dai decadimenti $B^0_d - \bar{B}^0_d \rightarrow \pi^+\pi^-$. Il valore di α potrebbe essere misurato con una precisione di 2° .

La misura di γ , possibile dallo studio dei sei decadimenti $B^0_d - \bar{B}^0_d \rightarrow D^0 K^{*0}$, non è alla portata degli apparati sperimentali a causa dei bassi BR di decadimento.

Nei decadimenti $B^0_s - \bar{B}^0_s \rightarrow J/\Psi \phi$ il MS prevede una asimmetria di CP molto piccola nei decadimenti (marginale per gli apparati sperimentali) ed un risultato diverso da zero sarebbe un segnale di nuova fisica.

Fisica del b – Oscillazioni del B_s^0

Di particolare interesse ad LHC sarà lo studio delle oscillazioni del sistema $B_s^0 - \bar{B}_s^0$ che, al contrario delle oscillazioni $B_d^0 - \bar{B}_d^0$ ad oggi non sono state osservate sperimentalmente.

B_s^0 and \bar{B}_s^0 are superpositions of two mass eigenstates B_H, B_L .
Transitions between B_s^0 and \bar{B}_s^0 states occur due to flavour non-conservation in charged weak-current interactions.
(frequency $\propto \Delta m_s \equiv m_H - m_L$)

Contributo del top dominante nel calcolo delle ampiezze

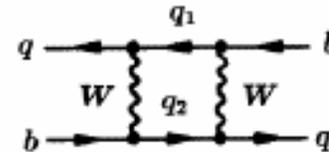
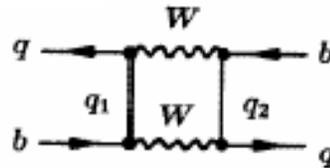


Experimental status

$$\Delta m_d = 0.502 \pm 0.007 \text{ ps}^{-1}$$

$$\Delta m_s > 14.4 \text{ ps}^{-1} \text{ (@ 95\% C.L.)}$$

$B_s^0 - \bar{B}_s^0$ oscillations in the SM: via box diagrams



$$q \equiv d, s$$

$$q_1, q_2 \equiv u, c, t$$

$$\Delta m_d \propto |V_{td}|^2$$



$$\frac{\Delta m_s}{\Delta m_d} \propto \left| \frac{V_{ts}}{V_{td}} \right|^2 \Rightarrow |V_{td}|^2$$

$$\Delta m_s \propto |V_{ts}|^2$$

Limiti sull'elemento della matrice CKM
Conosciuto con minore precisione

Limits from fits to Standard Model:

$$\Delta m_s < 20.5 \text{ ps}^{-1} \text{ (@ 95\% C.L.)}$$

SUSY models:

$$\Delta m_s > 25 \text{ ps}^{-1}$$

Measurement limits for integrated luminosity 30 fb^{-1}

$$21.5 \text{ ps}^{-1} \quad 5\sigma \text{ measurement limit}$$

$$29.5 \text{ ps}^{-1} \quad 95\% \text{ C.L. sensitivity}$$

Fisica del top

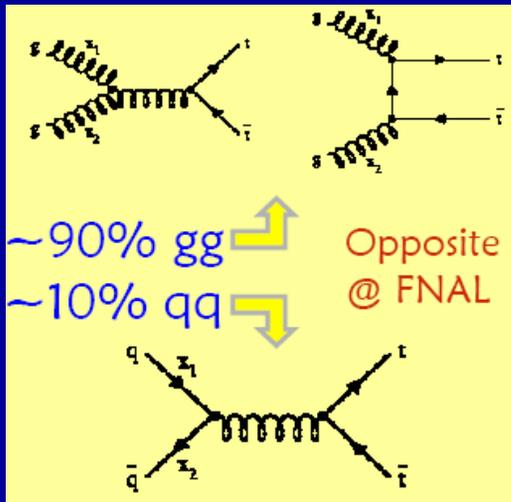
L'abbondante rate di produzione di top ($\sigma_{tt} = 834 \pm 100 \text{ pb @ NLO}$) permetterà anche alla luminosità di $10^{33} \text{ cm}^2\text{s}^{-1}$ (1 Hz) agli esperimenti:

- una calibrazione degli apparati (in particolare del b-tagging)
- una misura di precisione della massa $\delta(m_t < 1 \text{ GeV})$

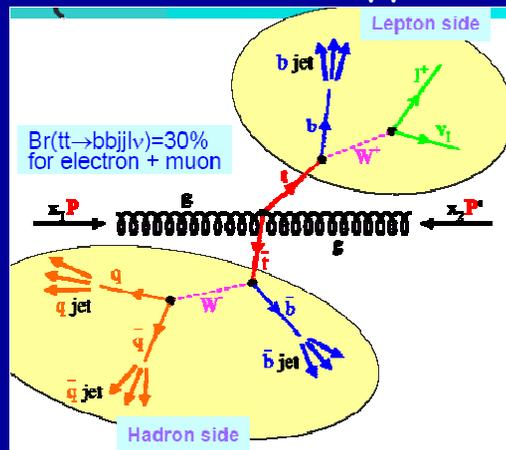
e successivamente:

- una misura diretta di V_{tb}
- ricerca di decadimenti rari

Sezione d'urto di produzione
~ 100 x FNAL



Decadimenti $t \bar{t} \rightarrow b \bar{b} j j l \nu$ (29,6%) sono quelli con il miglior rapporto S/B (~ 65) nella selezione



Leptoni isolati con $p_T > 20 \text{ GeV}$ e $|\eta| < 2.5$

$E_T^{\text{miss}} > 20 \text{ GeV}$

≥ 4 jets con $E_T > 40 \text{ GeV}$ e $|\eta| < 2.5$

≥ 2 jets taggati come b-jets

Fisica del top - Massa

Nello SM m_t insieme a m_W pone constraints su m_H

Misura della massa - oggi

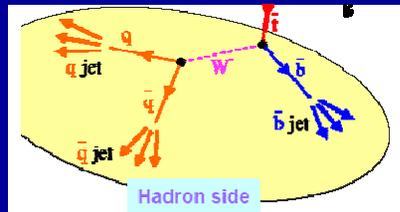
$$m_t = 172.7 \pm 1.7 \pm 2.4 \text{ GeV}$$

Misura m_t a LHC

Per gli eventi selezionati si usa il "ramo adronico" $t \rightarrow jjb$

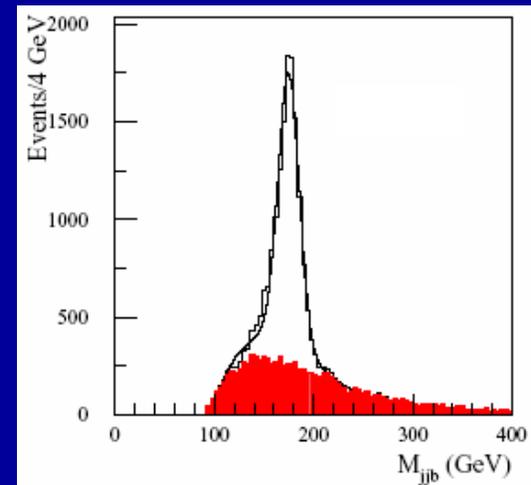
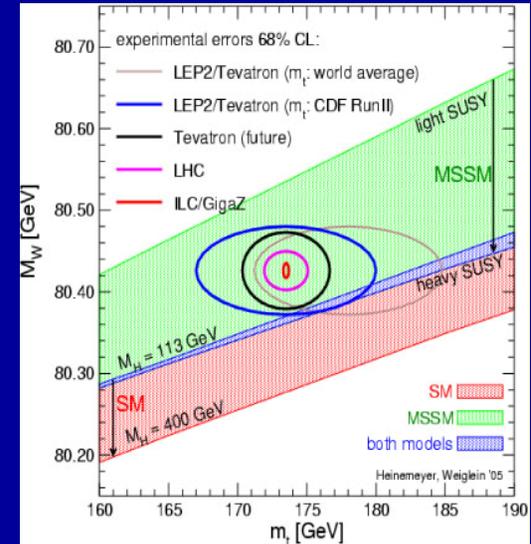
Massa invariante del $W \rightarrow jj$

Massa invariante del $t \rightarrow jjb$



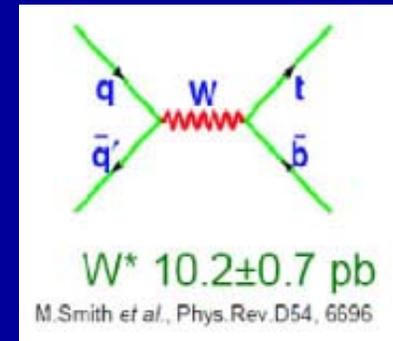
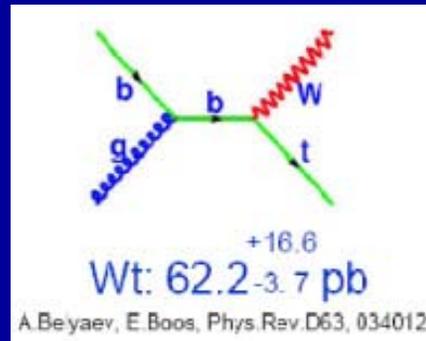
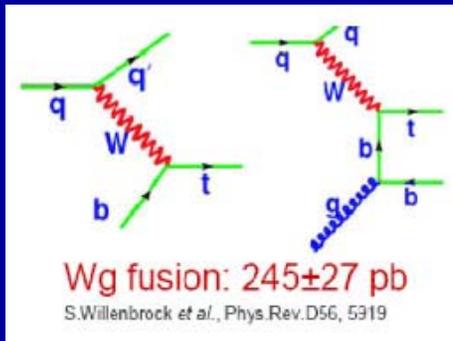
$$\delta m_t (\text{stat}) = 0.1 \text{ GeV @ } 10 \text{ fb}^{-1}$$

$$\delta m_t (\text{sys}) = 0.7 \text{ GeV}$$



Produzione di top singolo (V_{tb})

Oltre alla produzione adronica di coppie di quark top, la misura della produzione di top singoli permetterà di studiare il vertice W - t - b e di avere una misura diretta di V_{tb} . La produzione EW di top singolo può avvenire mediante i seguenti 3 diagrammi



Le sezioni d'urto di produzione al LHC sono molto maggiori di quelle al Tevatron e sarà possibile misurare separatamente tutti e tre i canali.

L'errore statistico con il quale sarà possibile misurare V_{tb} sarà inferiore al 3% per il canale con sezione d'urto minore mentre quello sistematico sarà dominato dalle previsioni teoriche (PDF, scala di massa e δm).

L'alto grado di polarizzazione del top nel processo di Wg fusion e di polarizzazione della W nel decadimento del top permetteranno una misura delle polarizzazioni dalle distribuzioni angolari dei loro prodotti di decadimento.

Decadimenti del top

Lo SM prevede : $Br(t \rightarrow Wb) \approx 99.9\%$, $Br(t \rightarrow Ws) \approx 0.1\%$, $Br(t \rightarrow Wd) \approx 0.01\%$

Utilizzando un campione pulito di coppie $t\bar{t}$, la misura del rapporto tra il rate di eventi con due b nello stato finale e un solo b nello stato finale fornisce una misura di $|V_{tb}|$ nell'ambito di un MS con tre generazioni di quark

$$R_{2b/1b} = Br(t \rightarrow Wb)/Br(t \rightarrow Wq) = \frac{|V_{tb}|^2}{|V_{td}|^2 + |V_{ts}|^2 + |V_{tb}|^2} = |V_{tb}|^2$$

La precisione statistica raggiungibile in questa misura è dell'ordine dello 0,2 %. L'errore sistematico non è stato ancora valutato.

La misura del rapporto tra il rate di eventi con due leptoni nello stato finale e un solo leptone nello stato finale permette di sondare la presenza di eventuali decadimenti non previsti dallo SM. Si ha infatti

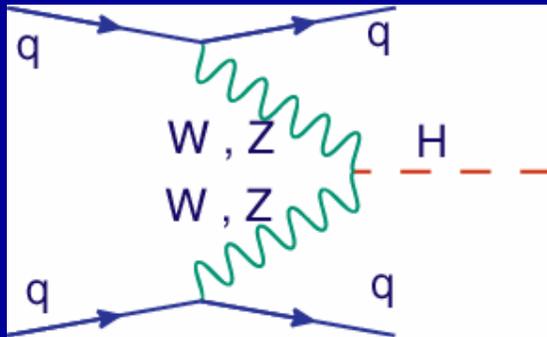
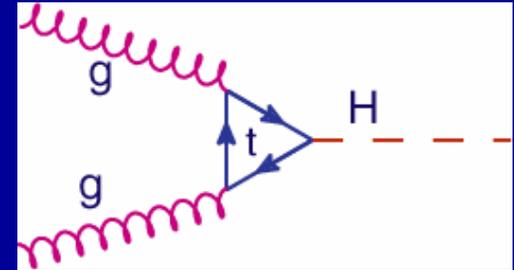
$$R_{2l/1l} = Br(t \rightarrow WX) * Br(W \rightarrow l\nu) \approx 2/9 \quad (\text{Se } Br(t \rightarrow WX) = 100 \%)$$

Deviazioni da questa previsione potrebbero essere indicazione di nuova fisica.

Sarà inoltre possibile porre limiti ai decadimenti FCNC ($t \rightarrow Zq, \gamma q, gq$ $q = u, c$). I limiti attesi sono $\sim 10^{-3} - 10^{-4}$ con Br attesi nello SM di $10^{-10} - 10^{-12}$.

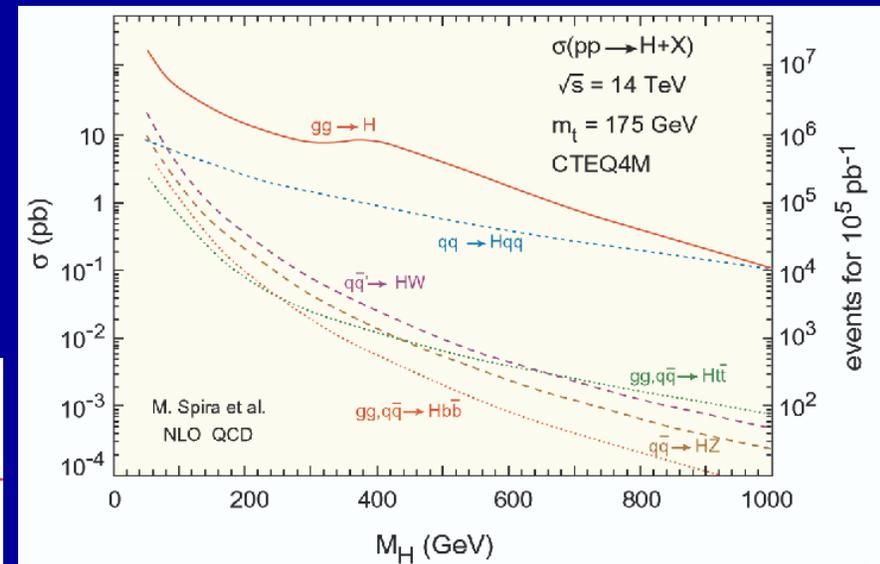
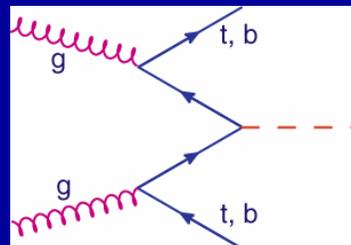
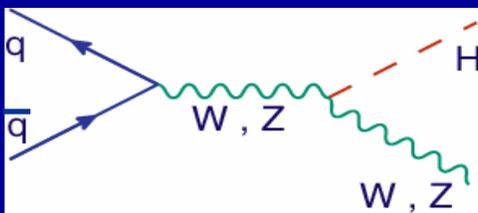
Ricerca dell' Higgs - Produzione

Il meccanismo dominante per la produzione diretta dell'Higgs al LHC è la "gluon-gluon fusion".



L'altro meccanismo possibile è la "VBF" (Vector Boson Fusion). Tuttavia per l'intervallo di masse più interessante la sezione d'urto è più bassa ed inoltre in questo processo l'Higgs è accompagnato da due jet adronici. La ricostruzione dell'evento risulta più complessa.

E' possibile avere anche una produzione "associata" in cui l'Higgs viene prodotto insieme ad una W, uno Z o una coppia di t o b. Le sezioni d'urto sono molto più basse ma il decadimento leptonic di uno dei prodotti associati può essere utilizzato per ridurre il fondo.



Ricerca dell' Higgs - Decadimenti

Le misure di $\sin^2 \theta_{\text{eff}}$, m_W , m_t favoriscono un Higgs leggero

I Branching Ratios di decadimento dell'Higgs dipendono fortemente dalla sua massa.

Nella regione di massa più favorita dalle misure attuali dello SM i canali di decadimento più favoriti sono

$$H \rightarrow b\bar{b} \quad e \quad H \rightarrow \tau\bar{\tau}$$

Ma il segnale in questi canali è molto difficile da isolare a causa dei fondi troppo elevati.

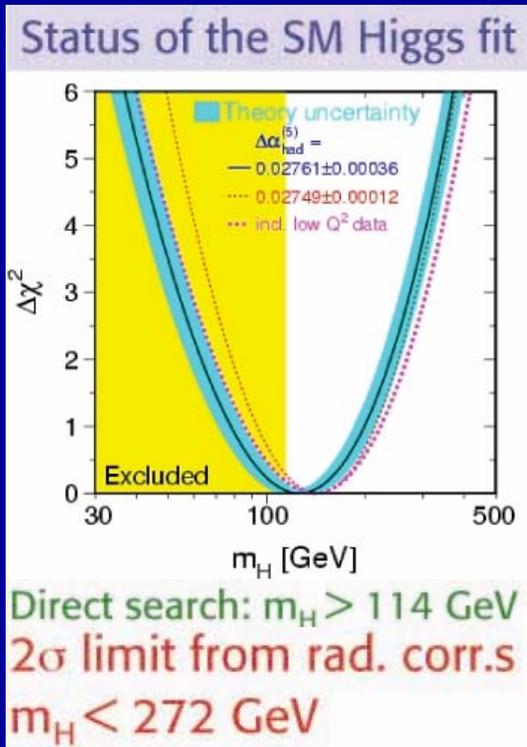
In questa regione di massa il canale più promettente, ma con BR molto basso è

$$H \rightarrow \gamma\gamma$$

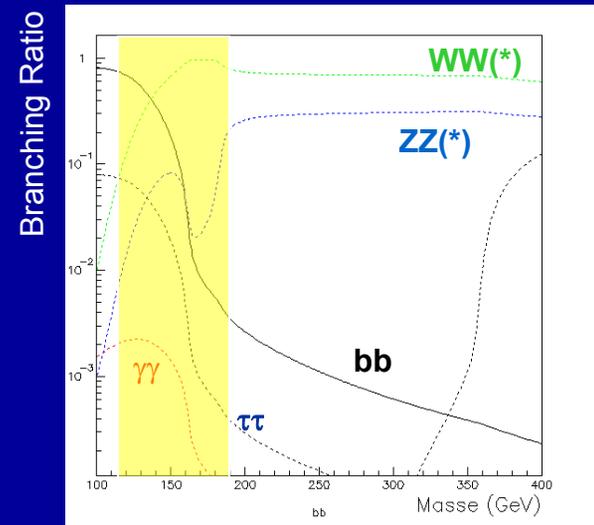
Per masse più elevate si aprono canali di decadimento relativamente più semplici da studiare quali

$$H \rightarrow W W (*)$$

$$H \rightarrow Z Z (*)$$



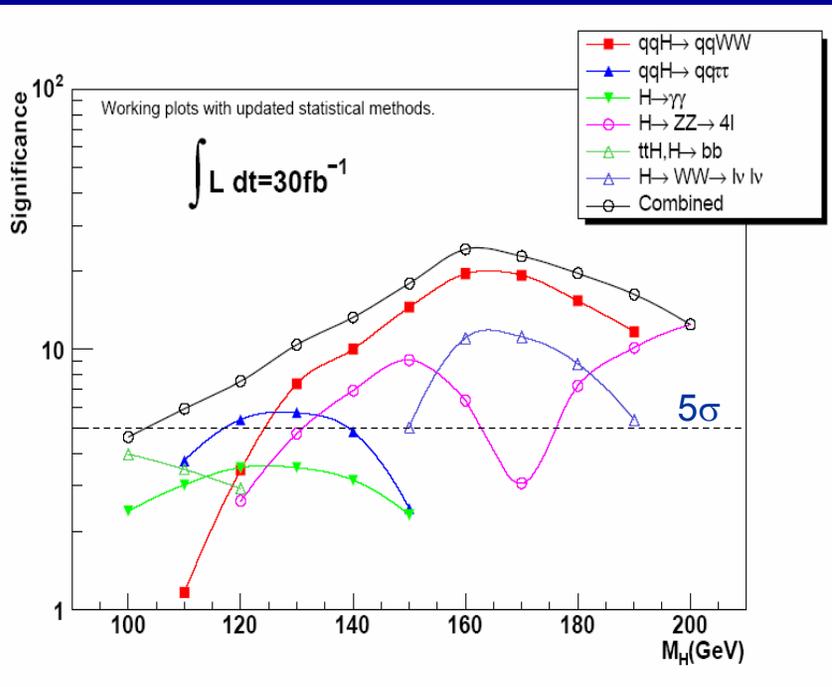
Decadimenti



H Mass (GeV)

Ricerca dell' Higgs - Scoperta

In questo scenario gli esperimenti devono essere capaci di misurare tutti i canali di decadimento e la loro possibilità di scoperta dell'Higgs viene rappresentata da un grafico di sensibilità che mostra la significanza statistica (S/\sqrt{B}) ottenibile in funzione della massa dell'Higgs.



Il grafico mostra come ATLAS, con una luminosità integrata di 30 fb^{-1} , potrebbe scoprire l'Higgs con una significanza superiore a 5σ in almeno due diversi canali di decadimento nell'intervallo di massa fino a 200 GeV.

I canali più importanti in questo intervallo di masse sono quelli per i quali è possibile una ricostruzione del picco di massa e cioè

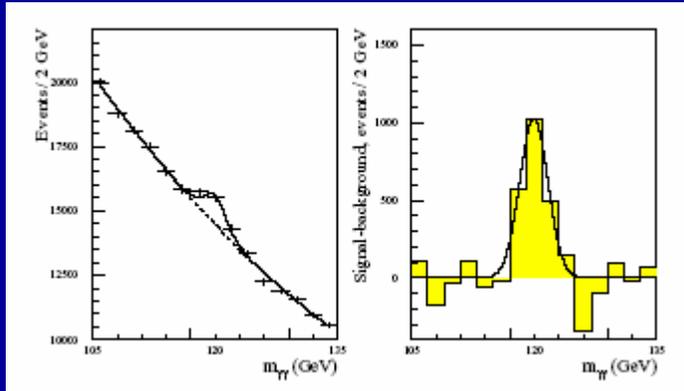
$H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4l$

$H \rightarrow \gamma\gamma$

Un picco di massa può essere ricostruito anche nel canale di produzione associata con l'Higgs che decade in 2τ e $2b$.

Negli altri canali la scoperta del bosone di Higgs sarebbe segnalata da un eccesso di eventi rispetto alle previsioni teoriche nelle distribuzioni.

$$H \rightarrow \gamma \gamma$$



Il decadimento $H \rightarrow \gamma \gamma$ è un decadimento raro che richiede una eccellente risoluzione sia nella misura di energia che nella misura di direzione dei γ nel calorimetro elettromagnetico per rendere il picco di massa dell'Higgs visibile sul fondo continuo irriducibile di coppie di γ ($qq \rightarrow \gamma\gamma$, $gg \rightarrow \gamma\gamma$, $qg \rightarrow q\gamma \rightarrow q\gamma\gamma$).

La figura mostra il picco di massa ottenibile con 100 fb^{-1}

Alcuni criteri/problemi nella ricostruzione della massa invariante dei 2 γ

Si selezionano solo γ con alto impulso trasverso $p_T^1 > 40 \text{ GeV}$ e $p_T^2 > 25$

Si selezionano solo γ a grande angolo per limitare la probabilità di conversione prima dell'ingresso nel calorimetro e. m. dovuta al materiale interposto.

Eventi con sezioni d'urto di produzione molto più elevata rappresentano un fondo non trascurabile:

Eventi di tipo jet-jet o γ -jet quando uno o entrambi i jet sono scambiati per γ

Per masse dell'Higgs vicine a quella dello Z i decadimenti $Z \rightarrow e^+ e^-$ quando entrambi gli e sono scambiati per γ

$H \rightarrow Z Z^* \rightarrow 4 \ell$

Il decadimento $H \rightarrow Z Z^* \rightarrow 4 \ell$ rappresenta un segnale abbastanza pulito per l'Higgs nell'intervallo di massa tra 120 e 180 GeV. Al di sopra di 180 GeV entrambe le Z sono reali e questo canale prende il nome di "golden channel". Comprende i seguenti canali di decadimento

$$H \rightarrow 4 \mu \quad H \rightarrow 2 \mu 2 e \quad H \rightarrow 4 e$$

I fondi principali sono dovuti alla produzione diretta di $Z Z^*$, $Z \gamma^*$, $t \bar{t}$ e $Z b \bar{b}$.

Nella selezione degli eventi candidati si richiede:

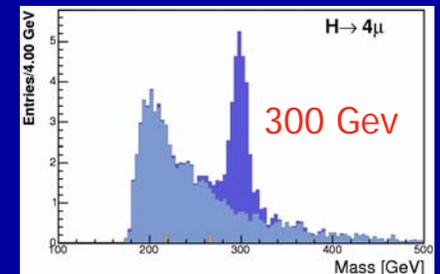
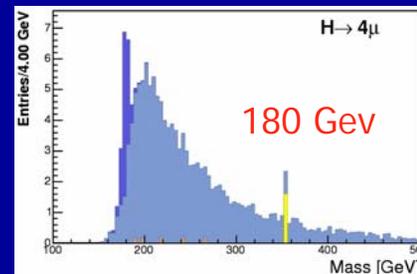
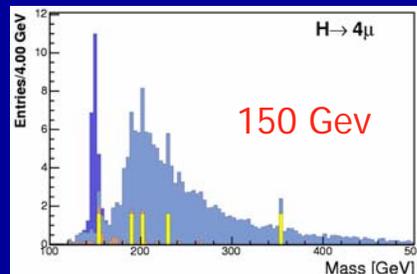
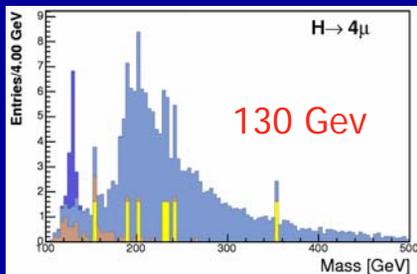
Almeno due leptoni di alto impulso trasverso $p_T^{1,2} > 25$ GeV e altri due con $p_T^{3,4} > 7$ GeV tutti a grande angolo

Che due leptoni di segno opposto abbiano una massa invariante $M_{12} = M_Z \pm \Delta M_Z$

Che gli altri due leptoni abbiano una massa invariante superiore ad un certo limite $M_{34} > M_0$

Si costruisce poi la massa invariante dell'Higgs a partire da M_{12} e M_{34} .

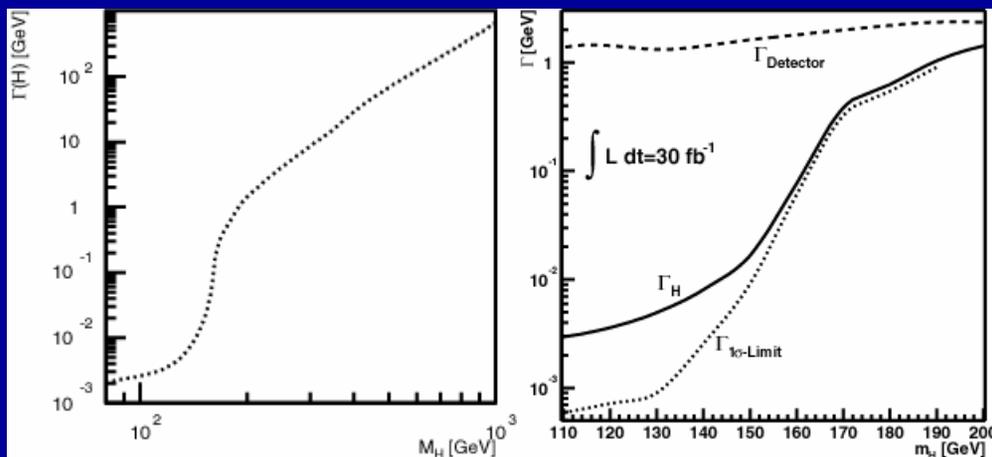
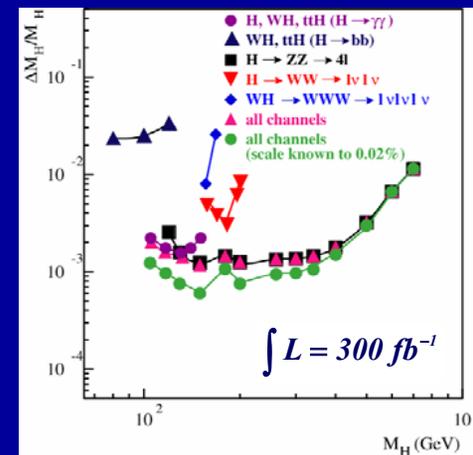
I tagli applicati sono ottimizzati in funzione dell'intervallo di massa dell'Higgs che si vuole indagare.



Higgs – Parametri (1)

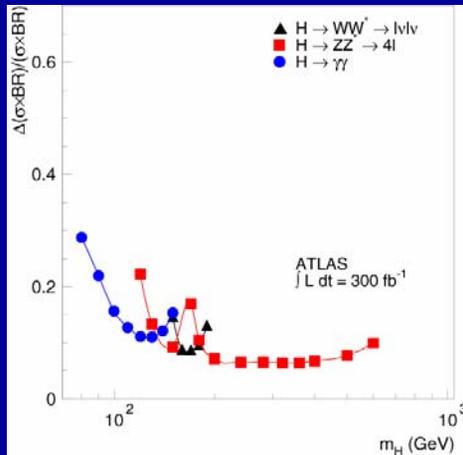
Dopo la scoperta del bosone di Higgs sarà fondamentale misurarne i parametri fondamentali: massa, larghezza, rates di produzione, accoppiamenti e spin.

La misura della massa è diretta nei canali $H \rightarrow \gamma\gamma$, $b\bar{b}$ e 4ℓ . E' invece indiretta in tutti gli altri canali. Le simulazioni mostrano che dopo 3 anni di running @ 10^{34} cm^2s^{-1} sarà possibile, mettendo insieme tutti i canali di decadimento, raggiungere una precisione inferiore all' 1%.

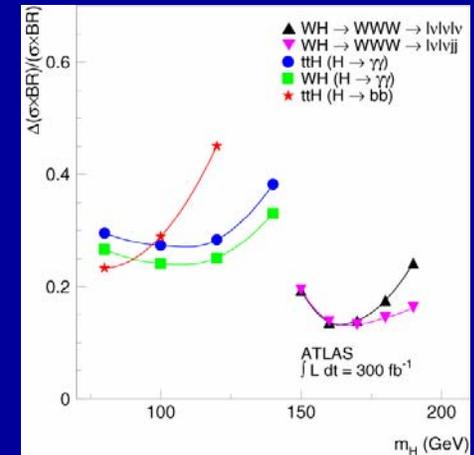


La larghezza Γ_{tot} dell'Higgs può essere misurata direttamente solo per $M_H > 200$ GeV cioè quando è maggiore della risoluzione nella misura di massa intrinseca dei rivelatori. Al di sotto di questo limite si potranno usare metodi indiretti che forniranno precisioni tra il 10% ed il 30%.

Higgs – Parametri (2)



La misura dei rates di produzione dell'Higgs nei vari canali di decadimento fornirà una misura del prodotto della sezione d'urto di produzione per il relativo branching ratio di decadimento ($\sigma \times BR$). Questa misura può essere utile per distinguere un Higgs dello SM da un del MSSM. Le precisioni raggiungibili in questa misura sono comprese tra il 10% ed il 50%.



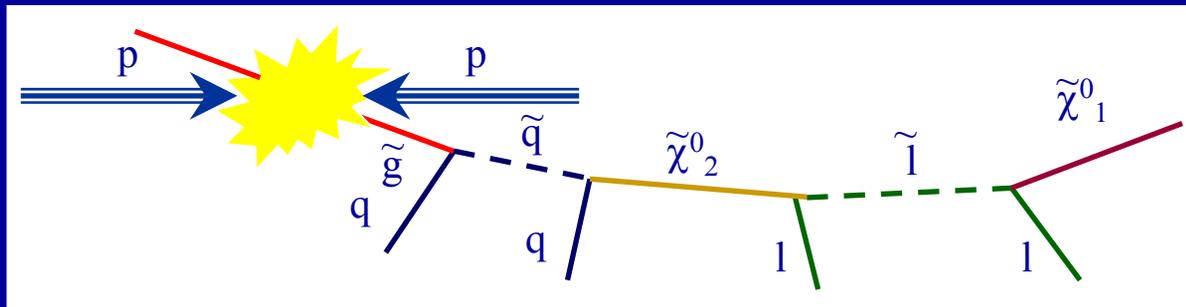
In assenza di predizioni accurate della sezione d'urto dalle misure di rates non sarà possibile misurare i BR di decadimento ma solo rapporti tra i rates che forniranno rapporti tra BR ($\Gamma_Z/\Gamma_W, \Gamma_V/\Gamma_W \dots$). Da queste misure sarà possibile estrarre vincoli sugli accoppiamenti dell'Higgs ai fermioni ed ai bosoni utili per testare la teoria.

SUSY

Se la SUSY esiste alla scala debole (1 TeV) la sua scoperta ad LHC dovrebbe essere relativamente semplice.

La produzione di particelle supersimmetriche è dominata da squarks e gluini (strong interacting) con sezioni d'urto paragonabili a quelle dello SM allo stesso Q^2 .

Squarks e gluini decadono a catena fino alla particella supersimmetrica con interazione debole più leggera (LSP, il neutralino) che risulta stabile (se la R - parità è conservata)



La catena di decadimenti dà origine ad una varietà di **segnature sperimentali dipendenti dai parametri del modello** (multi - jets, leptoni, quark pesanti, W e Z) ma tutte accompagnate da **energia mancante associata alla non rivelazione del neutralino**. E' quindi fondamentale che nel rivelatore siano sotto controllo:

- I processi del MS in cui c'è energia mancante da ν (tt , $W + \text{jets}$, $Z + \text{jets}$)
- L' ermeticità del rivelatore (E_T^{miss})
- La misura di E_{jets}

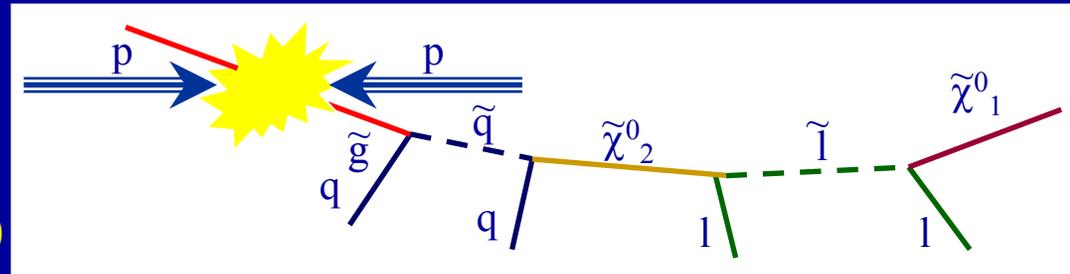
SUSY – La scoperta

La sfida principale non è quindi la scoperta della SUSY, bensì la separazione dei vari processi e la misura delle masse delle particelle supersimmetriche che dipendono dai parametri del modello. Il fondo per gli eventi di SUSY sono gli eventi di SUSY stessi!

Segnatura degli eventi:

High p_T -jets (da squarks e gluinos)

Elevata E_T^{miss} (dal neutralino più leggero)



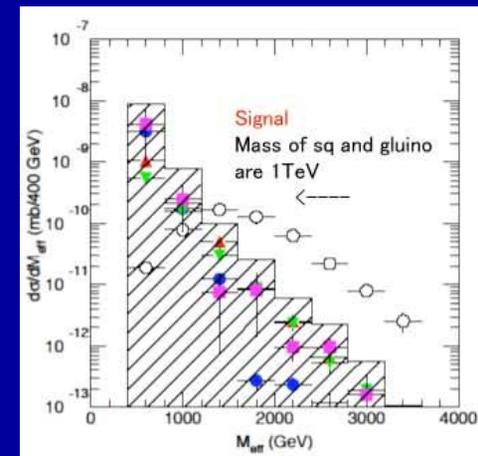
Leptoni ad alto p_T , b-jets, τ -jets (a seconda dei parametri del modello e dello spettro di masse)

Se R parità è violata: più high p_T -jets e meno E_T^{miss} (dal neutralino)

La variabile utilizzata per evidenziare un segnale di SUSY è

$$M_{\text{eff}} = \sum |\mathbf{p}_T^i| + E_T^{\text{miss}} \text{ (GeV)}$$

Questa variabile per i processi dello SM è calcolabile e la misura di una distribuzione diversa rispetto alle previsioni è una evidenza della scoperta di SUSY.



SUSY – La scala di massa

Il modello minimale di supergravità (SUGRA) è descritto da 5 parametri:

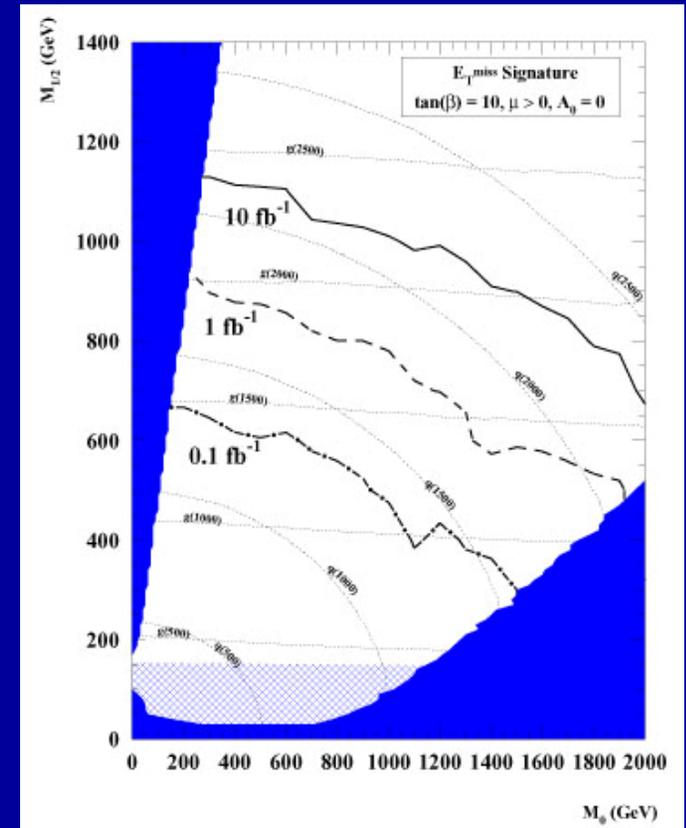
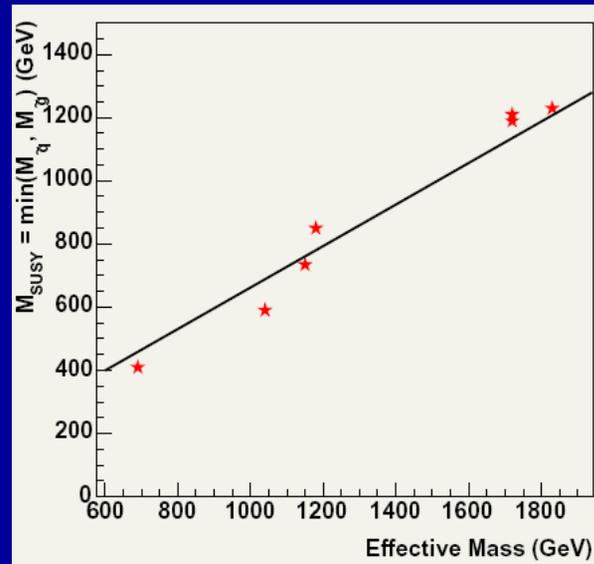
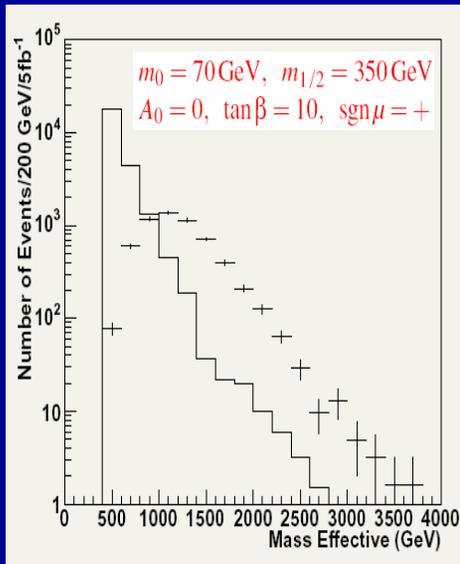
$$m_0 \quad m_{1/2} \quad A_0 \quad \tan \beta \quad \text{sgn } \mu = \pm 1$$

che determinano lo spettro di massa e gli accoppiamenti (e quindi i decadimenti) delle particelle supersimmetriche. Il valore del picco di M_{eff} dipende quindi dai valori dei parametri e la scala di massa della supersimmetria

$$M_{\text{SUSY}} = \min(m_g, m_{\tilde{q}})$$

è ad esso correlato.

Per gli studi ad LHC sono stati presi in considerazione 6 diversi punti nello spazio dei parametri del modello SUGRA



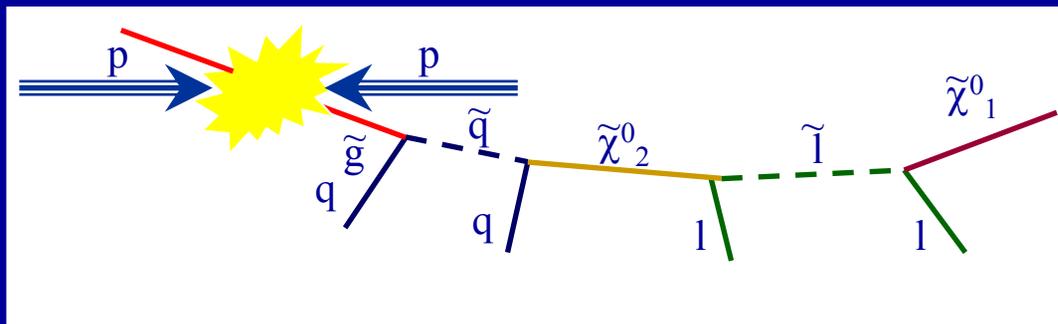
SUSY – Le masse

Il passo successivo alla scoperta della supersimmetria e della scala di massa sarà quello di **misurare la massa** delle particelle supersimmetriche.

Poiché lo spettro di massa (ed i branching ratio di decadimento) dipendono dai parametri del modello **lo studio della misura di massa è fortemente dipendente dal punto scelto nello spazio dei parametri.**

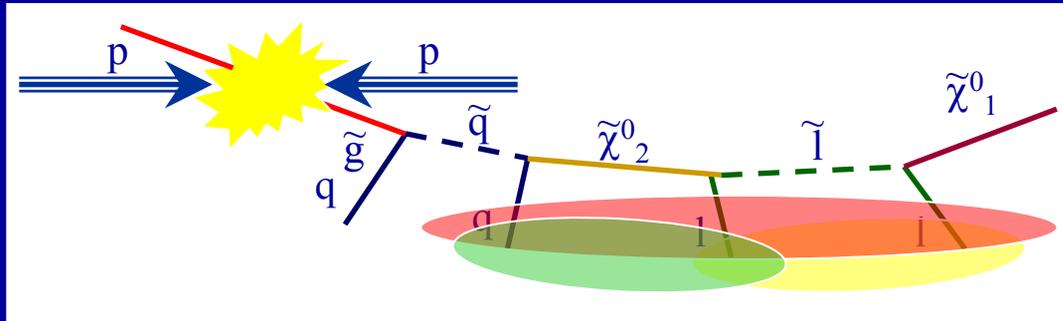
Come esempio consideriamo un punto nello spazio dei parametri (bulk region) per il quale lo spettro di massa rende possibile il decadimento a catena in cui sono presenti **due leptoni** nello stato finale

$$\tilde{q} \rightarrow q \tilde{\chi}_2^0 \rightarrow q \tilde{l}_R^\pm l^\mp \rightarrow q l^+ l^- \tilde{\chi}_1^0$$

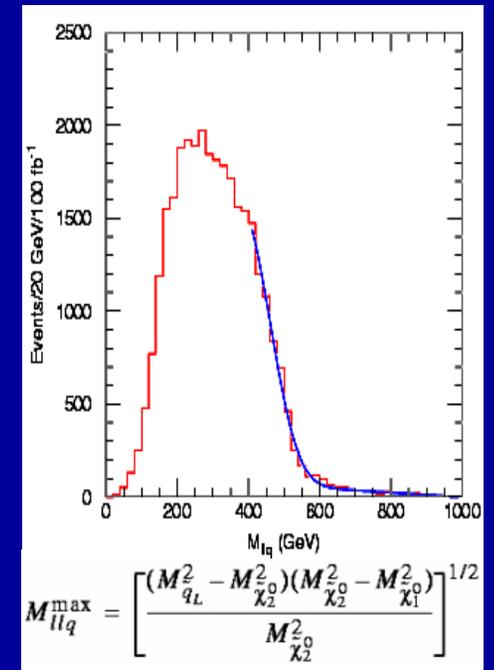
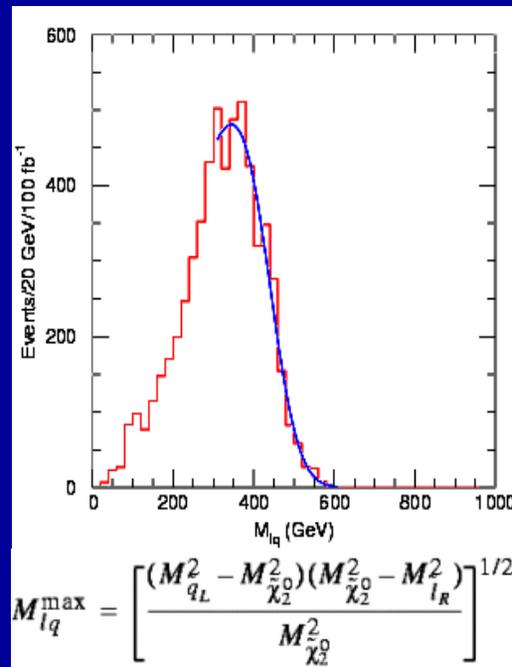
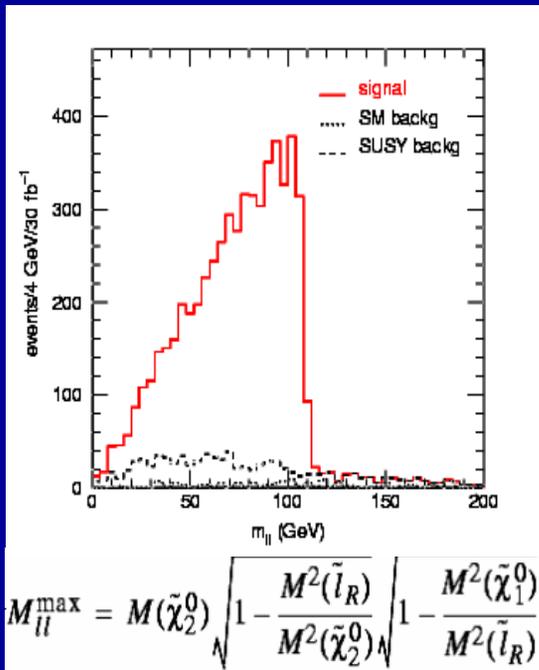


La tecnica per la misura delle masse consiste nella ricostruzione delle masse invarianti delle varie combinazioni dei prodotti di decadimento.

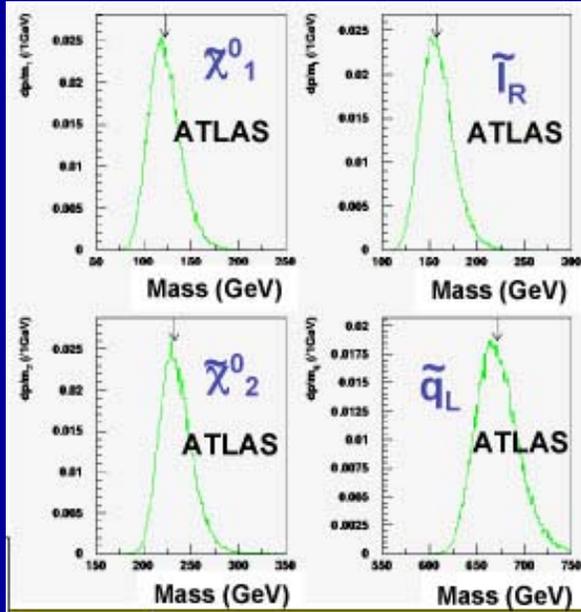
SUSY – Le masse



Gli **end-points** e le **soglie** degli spettri di M_{inv} delle varie combinazioni dei prodotti di decadimento pongono dei **vincoli** sulle masse di $\tilde{\chi}_2^0, \tilde{\chi}_1^0, \tilde{q}, \tilde{l}$.



SUSY – Le masse



L'opportuna combinazione delle misure di soglie ed end-points permette di ricavare le masse delle particelle supersimmetriche **indipendenti dal modello**.

Sparticle	Expected precision (100 fb ⁻¹)
\tilde{q}_L	± 3%
$\tilde{\chi}^0_2$	± 6%
$\tilde{\tau}_R$	± 9%
$\tilde{\chi}^0_1$	± 12%

Alternativamente le misure di soglie ed end-points possono essere usate in un **fit globale** per estrarre **i parametri del modello**.

Altri punti dello spazio dei parametri favoriscono **decadimenti in τ , b o t** e la ricostruzione precisa delle masse risulta più complessa a causa dei fondi elevati. Gli studi di simulazione sono ancora in corso.

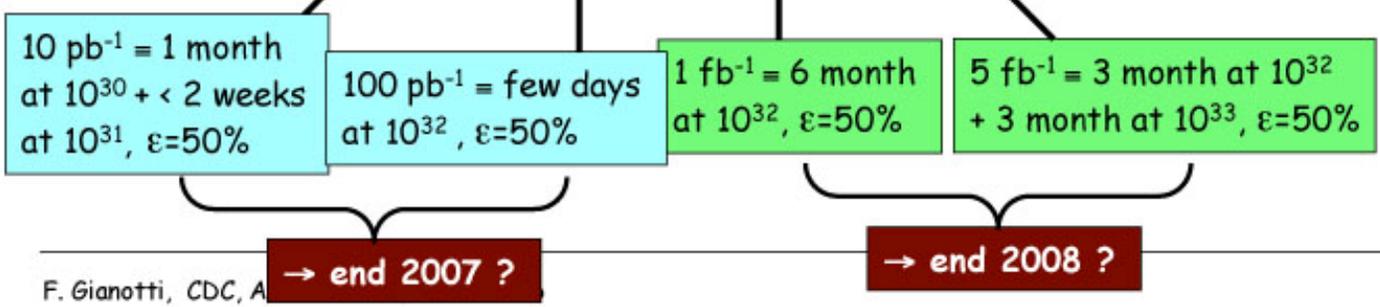
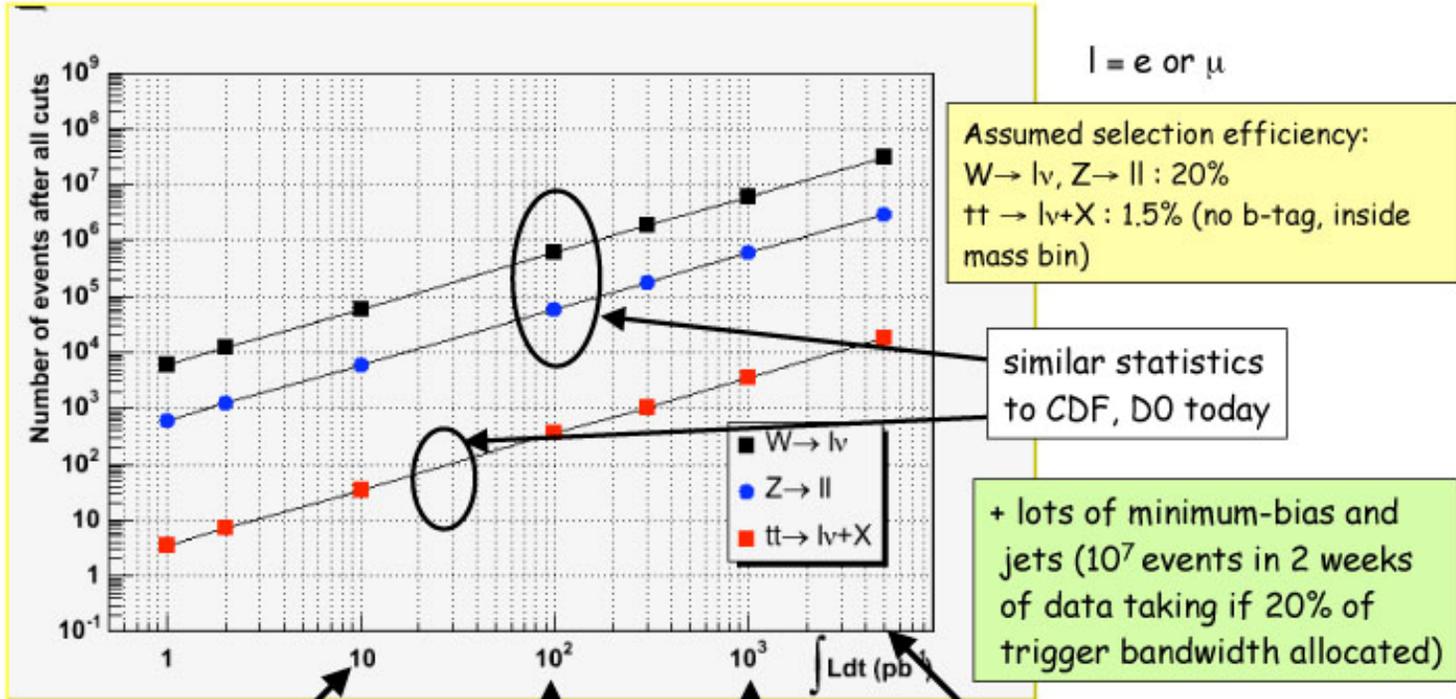
Modelli di SUSY diversi da SUGRA daranno eventi con diversa segnatura sperimentale:

GMBS (Gauge Mediated Breaking Susy): **la LSP è il gravitino** e gli eventi sono caratterizzati da produzione di **γ diretti di alta energia** ($\tilde{\chi}^0_1 \rightarrow \tilde{G} \gamma$) e **sleptoni a lunga vita media** ($\tilde{l} \rightarrow \tilde{G} l$) a seconda che la NLSP è un neutralino uno sleptone.

Previsioni realistiche: ATLAS 2007-08

How many events in ATLAS at the beginning ?

And when ?



Conclusioni

- LHC: prime interazioni p-p a $\sqrt{s} = 14$ TeV nell'estate 2007
- ATLAS e CMS saranno pronti a rivelare le prime interazioni
- I primi mesi saranno dedicati:
 - All'ottimizzazione dei parametri della macchina
 - Alla calibrazione dei rivelatori su processi di fisica conosciuti
- Il potenziale di scoperta di Higgs e SUSY è molto elevato ma la comprensione completa dei rivelatori richiede tempo.
- Per la fine del 2007 gli esperimenti dovrebbero avere su nastro una statistica di eventi uguale a quella raccolta sino ad ora da CDF e D0.....

..... e non è poco !!!!