

LHC アップグレード

徳宿克夫 (KEK)

- CERN
(なぜ日本はCERNに加盟しないのか?)
- LHC upgrade

CERN

- HEPで唯一の国際機関
 - メンバー国は、ヨーロッパの国に限っていないと
いうことを2009年に改めて確認。(ただし、機関
の目的としては、ヨーロッパの素粒子原子核物理
の発展のためというのはついている)
 - 現在20のメンバー国(すべてヨーロッパ)。新規加
盟国(ルーマニア(決定)、セルビア、トルコ、スロ
ベニア、キプロス、イスラエル(審議中))

CERN

- 参加形態 (2009年以降)
 - メンバー国 (NNI(～GDP)に応じた経費分担)
 - アソシエート国 (メンバー国の場合の分担の10%)
 - オブザーバー国 は、徐々になくしていく。
(現在日本、米国は Observers with special rights)

2009年9月に non-member 国に対して、CERNとの取組方に関して意見を聞いた。

日本(文科省、KEK)は、member, associate どちらにも興味がないことを表明。(米国も同様)

CERN

- non-member, non-associate 国とどうやって協力するか？

→ Project 毎の Governance boardを組織（実験グループの組織に類似）

LHCの加速器アップグレードはこのような組織を作って対応。つまり、HL-LHC(建設)に参加する国も含んだGovernance boardを設置することを想定している

日本や米国はそれに入るので、その時点でObserver国を実質消滅できると考えている模様。

Critical Time: 2017年: 米国とCERNのLHCに関するMOUの期限切れ。米国とは、遅くともこの年までに新しい枠組みを作らないといけない。

面倒なことをいわないで、CERNに加盟したらどうなるか？

国籍別職員数（2009年末現在）

国名	正規職員	フェロー	協力研究者	学生等	合計		ユーザー	
					人数	割合	人数	割合
フランス	1,033	38	20	16	1,107	33.67%	769	8.10%
イタリア	225	85	51	26	387	11.77%	1,612	16.98%
ドイツ	171	37	13	44	265	8.06%	1,069	11.26%
イギリス	211	21	7	3	242	7.36%	568	5.98%
スイス	183	7	9	26	225	6.84%	193	2.03%
スペイン	95	9	33	18	185	5.63%	304	3.20%
ベルギー	108	5	2	3	118	3.56%	97	1.02%
ポーランド	46	28	14	15	103	3.13%	212	2.23%
オーストリア	43	11	12	1	77	2.33%	10	0.10%
オランダ	71	5	1	1	78	2.38%	10	0.10%
ポルトガル	34	14	1	1	50	1.52%	10	0.10%
ギリシャ	18	8	8	1	35	1.06%	10	0.10%
フィンランド	24	5	1	1	31	0.94%	10	0.10%
スウェーデン	29	4	2	2	37	1.13%	10	0.10%
ノルウェー	14	8	1	1	24	0.73%	10	0.10%
ハンガリー	12	7	3	3	25	0.76%	10	0.10%
デンマーク	19	3	0	0	22	0.67%	10	0.10%
スロヴァキア	14	4	0	0	18	0.55%	10	0.10%
ブルガリア	9	1	3	1	14	0.43%	10	0.10%
チェコ	5	5	1	3	14	0.43%	179	1.89%
非加盟国	14	36	87	9	146	4.44%	3,474	36.59%
合計	2,378	371	291	248	3,288		9,495	

メンバー国なら
200人規模の雇用は可能。

アソシエート国はパーマネントな
職員にはなれない。

2011/9/10

資料：<https://hr-info.web.cern.ch/hr-info/stats/persstats/CERNPersonnelStatistics2009.pdf>

加盟国からの分担金一覧（2010年度）

	国名	拠出率	拠出額 (MCHF)	円換算額(億円：100円/CHF)
1	ドイツ	20.30%	225.767	225.767
2	フランス	15.63%	173.7	173.786
3	イギリス	14.64%	162.8	162.831
4	イタリア	11.64%	129.	129.420
5	スペイン	8.89%	98	98.908
6	オランダ	4.55%		
7	ベルギー	2.82%		
8	ノルウェー	2.76%		
9	ポーランド	2.66%		
10	スイス	2.41%		
11	スウェーデン	2.40%		

日本はドイツ程度(以上)のNNIであることを考えると、年間200億以上の分担金が必要

アソシエートになら年間20億円

cf.

KEKの年間予算300億円

13.114	13.114
12.055	12.055
7.611	7.611
6.700	6.700
3.556	3.556
1,112.153	1,112.153

日本国内のプロジェクトを持ってそれを発展させることは必須。CERNのメンバー国加盟との両立は非現実的。

アソシエートになっても、LHCのアップグレード等でExtraなcontributionを求められるのは確実。アソシエートのメリットはほとんどない。

→ それなら、CERNとは一線を隔して、大型プロジェクト毎に協力していくのが一番。

2011/9/10

資料：<http://dg-rpc.web.cern.ch/dg-rpc/Scale/Scale10.html>

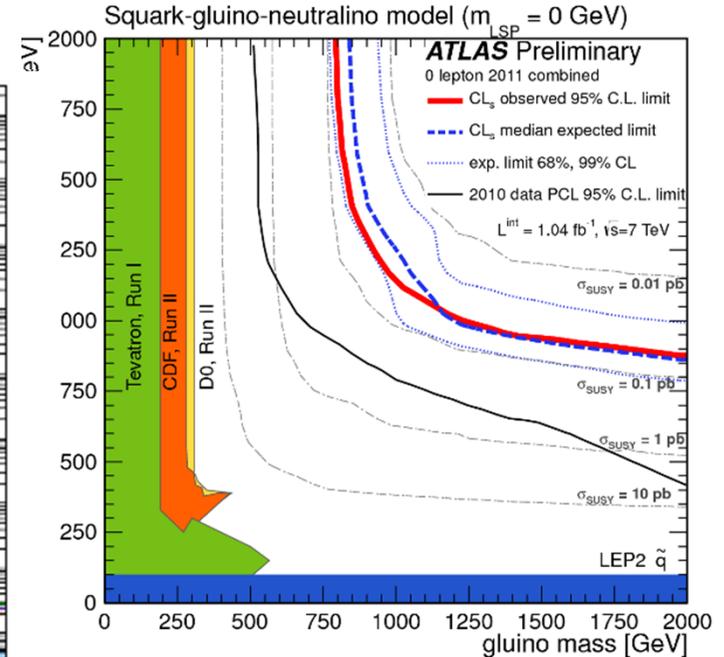
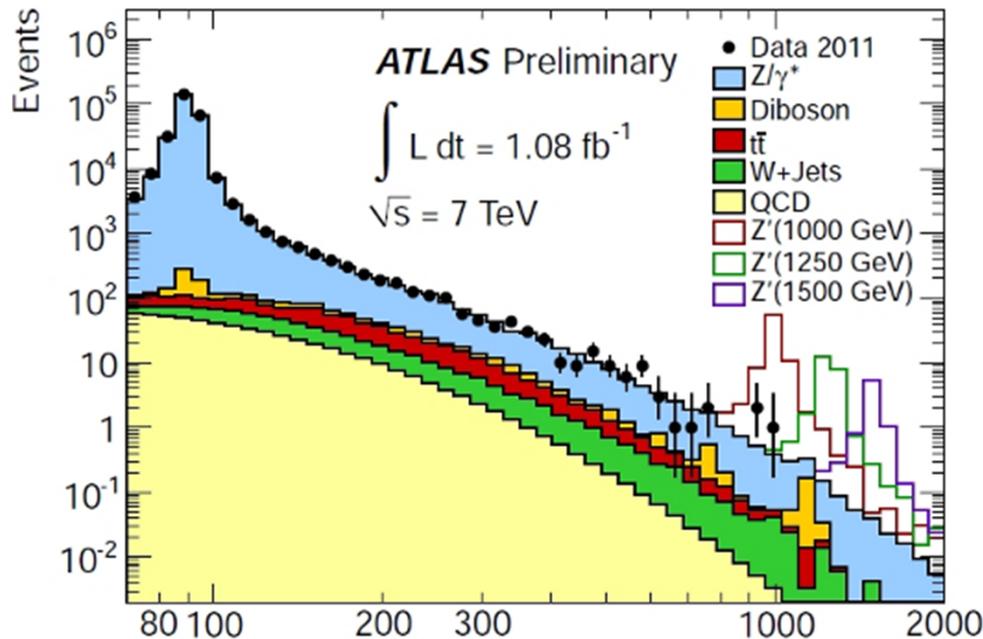
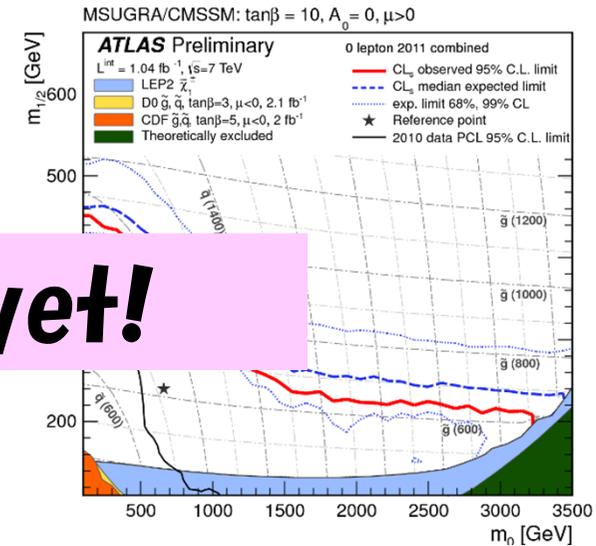
2010-12年までのデータで どこまでSUSYを探せるか？

CMエネルギーと、ルミノシティ
でのSUSY質量探索範囲 (GeV) 5σ

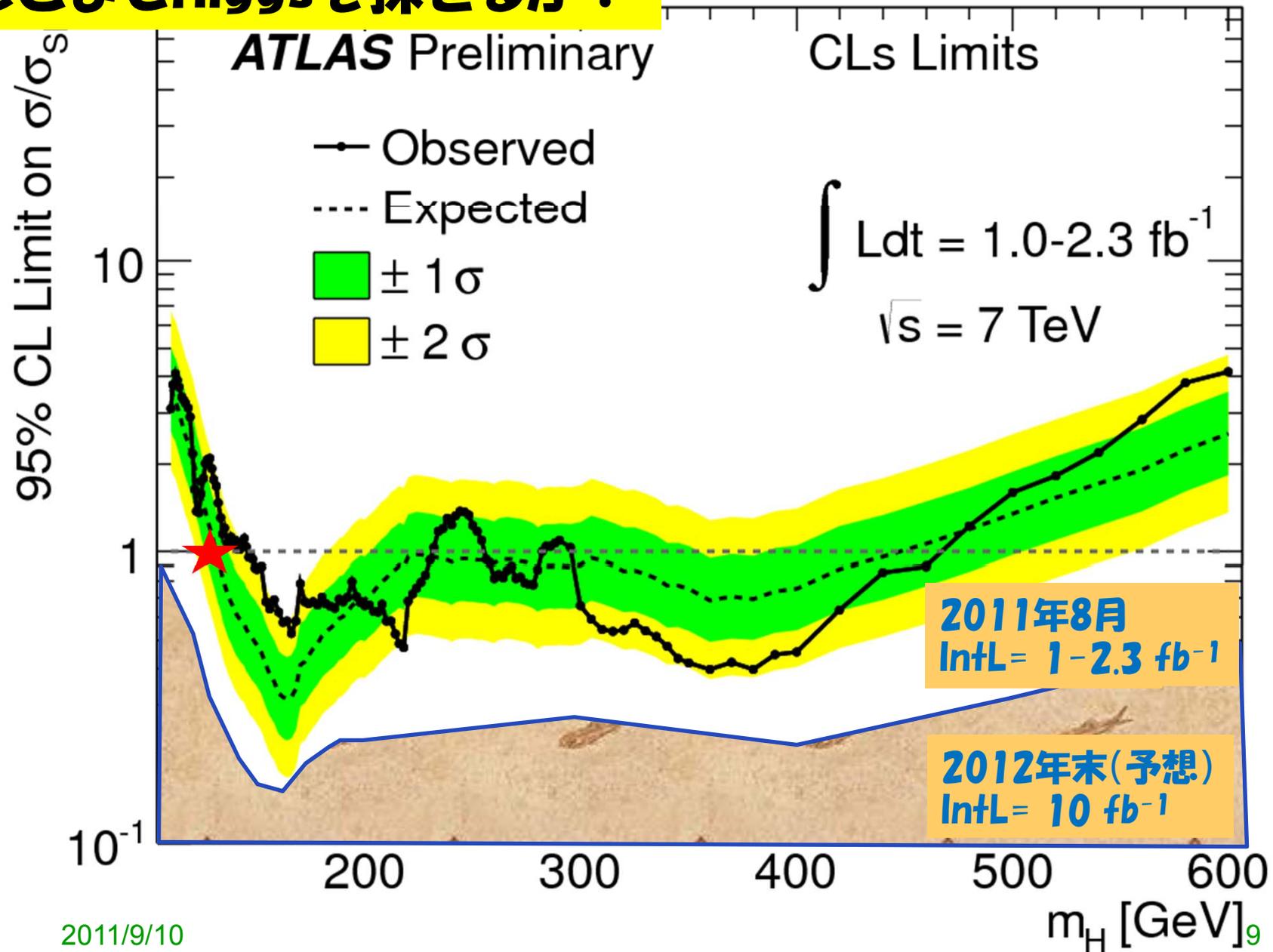
\sqrt{s}	$\mathcal{L} \text{ (fb}^{-1}\text{)}$	0.7	0.8	1.0	1.2
7	1.04	0.7	0.8	1.0	1.2
8	1.04	0.8	1.0	1.2	1.4
9	1.04	0.9	1.1	1.3	1.6

No New Physics, yet!

2010年のデータの結果: **95% CL**
(0-lepton mode)



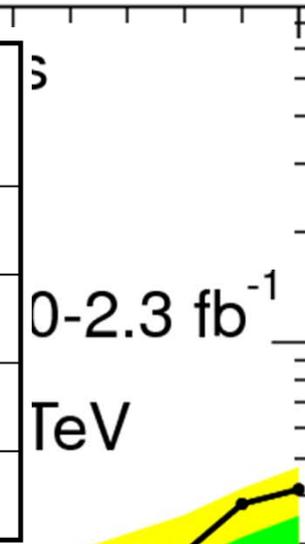
2010-12年までのデータで どこまでHiggsを探せるか？



2011/9/10

2010-12年までのデータで どこまでHiggsを探せるか？

ATLAS + CMS ≈ 2 x CMS	95% CL exclusion	3σ sensitivity	5σ sensitivity
1 fb ⁻¹	120 - 530	135 - 475	152 - 175
2 fb ⁻¹	114 - 585	120 - 545	140 - 200
5 fb ⁻¹	114 - 600	114 - 600	128 - 482
10 fb ⁻¹	114 - 600	114 - 600	117 - 535

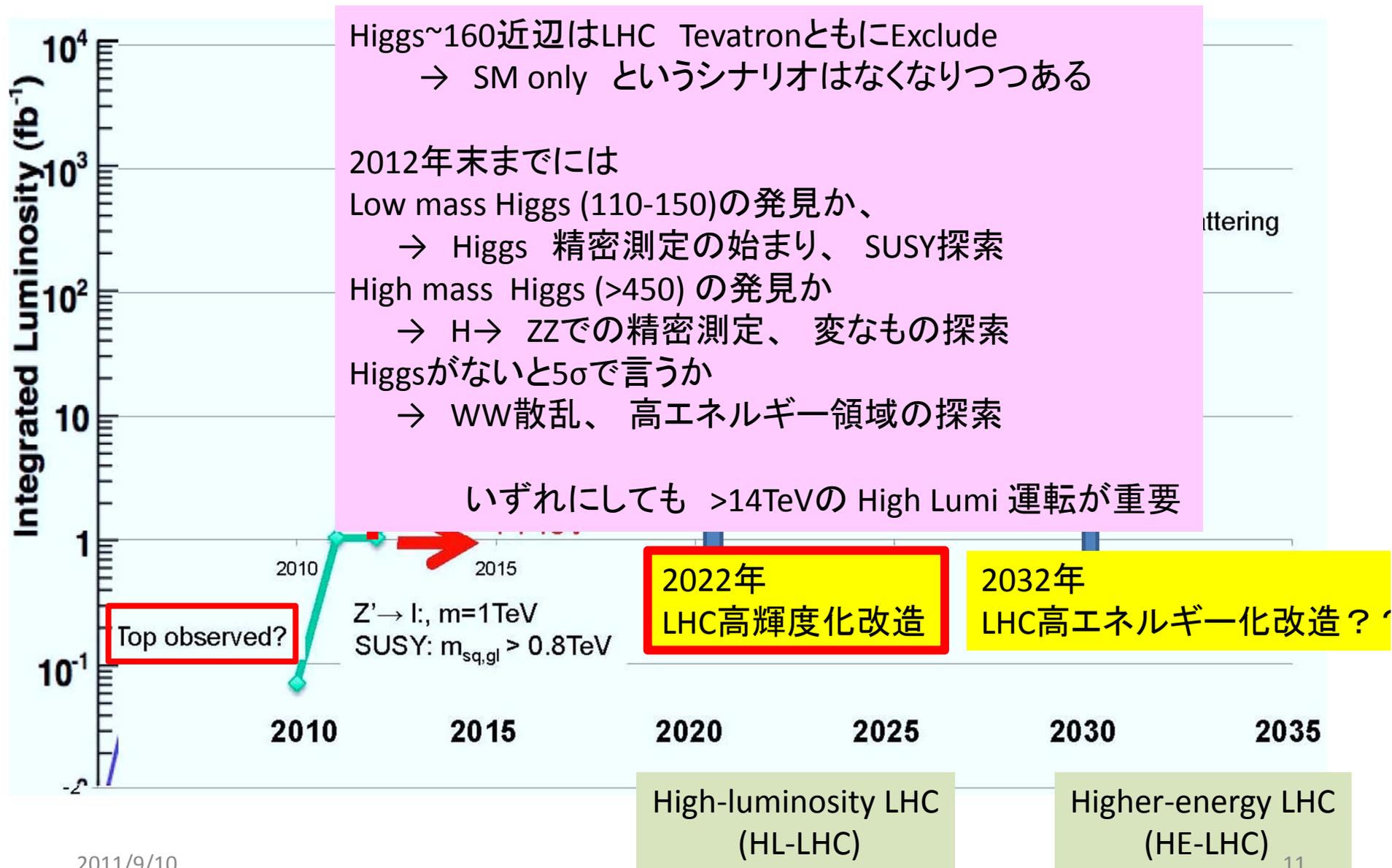


05/07

ヒッグス粒子探索のまとめ

- 8月までのデータで、質量領域146-466GeVには、ヒッグス粒子がないことが分かった。
(厳密には 146-232, 256-282, 296-466GeV: 95%CL)
- 2012年末までのデータからは、すべての質量領域での探索が終了し、3σ (99.9%)の発見ができる。(< 120GeV以外では5σ (99.9999%)) → この後は発見されたヒッグス粒子の性質を精密に調べる研究が急務(14TeV LHC, ILC)
- 逆に、2012年末までにヒッグスが発見されなかった場合は、標準理論の見直しが必要。→ 実験的には高いエネルギーでW, Z粒子がどうふるまうかを見る。(14TeV LHC)

LHCの長期計画の始まり

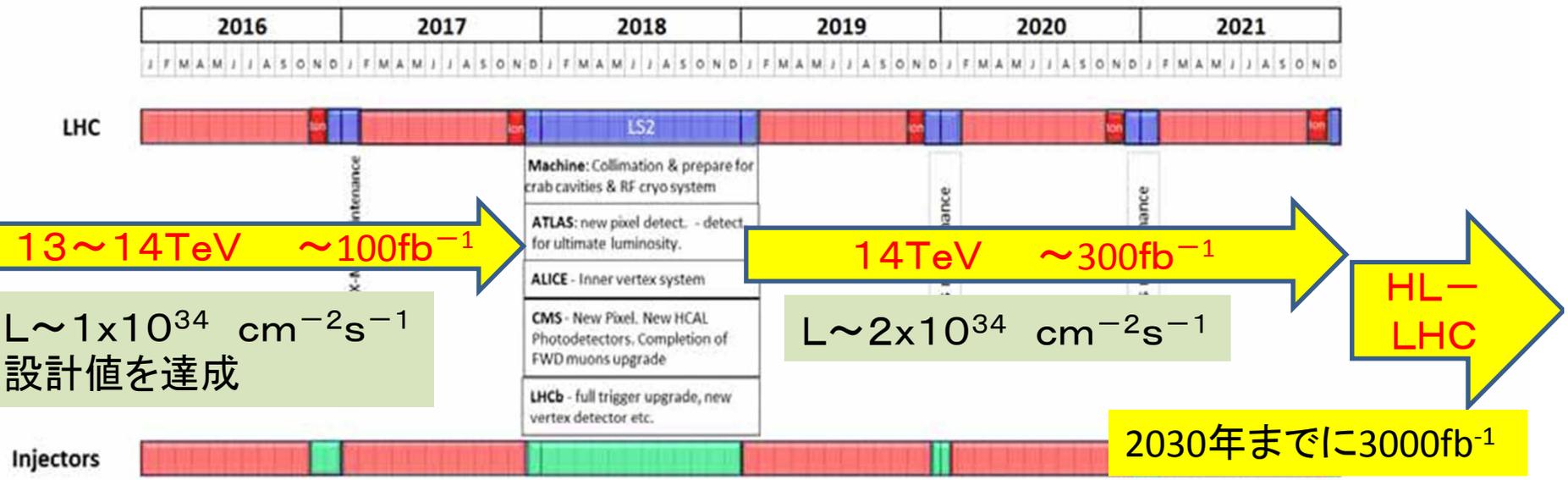
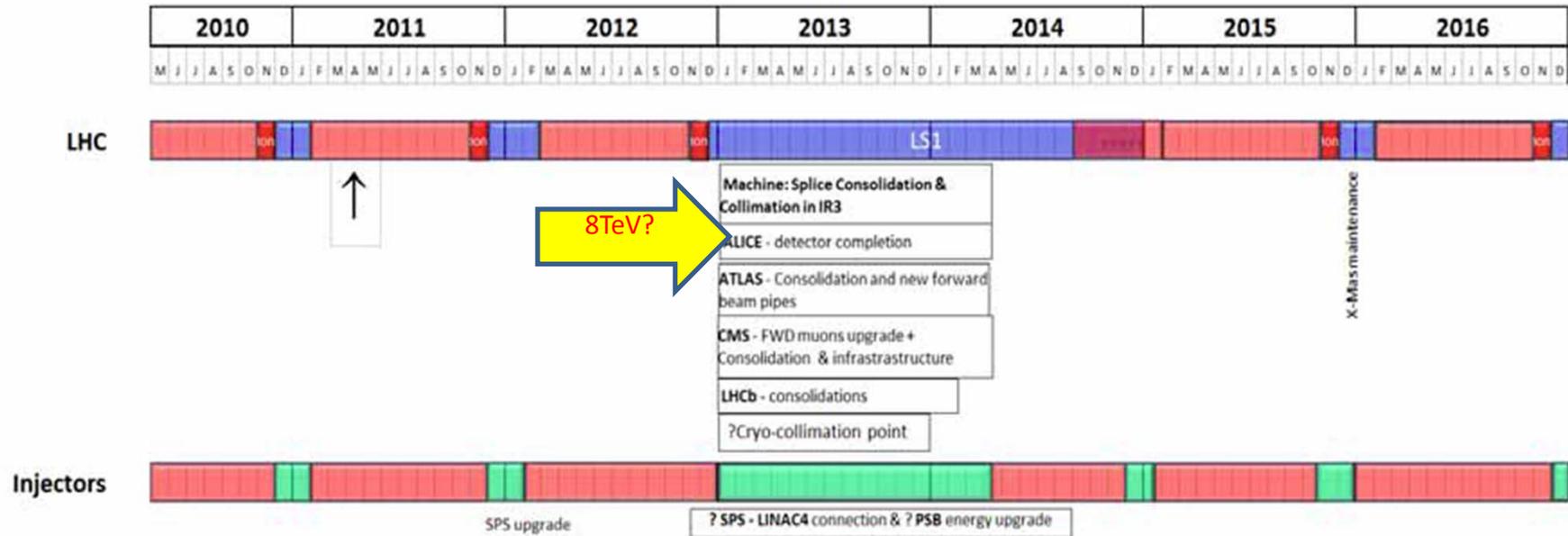


2011/9/10

11

New rough draft 10 year plan

まだ正式なものではない



LHCスケジュール: まとめ

2012年までに $E_{cm}=7\text{TeV}$ でやれることはほぼ達成する。

- ヒッグス：ほとんどの質量領域で 5σ 以上
- SUSY： $\sim 1\text{TeV}$ までの領域
- 欧州ロードマップの見直し（2012年9月）や、次回の学術会議マスタープランに重大なインプットとなる。

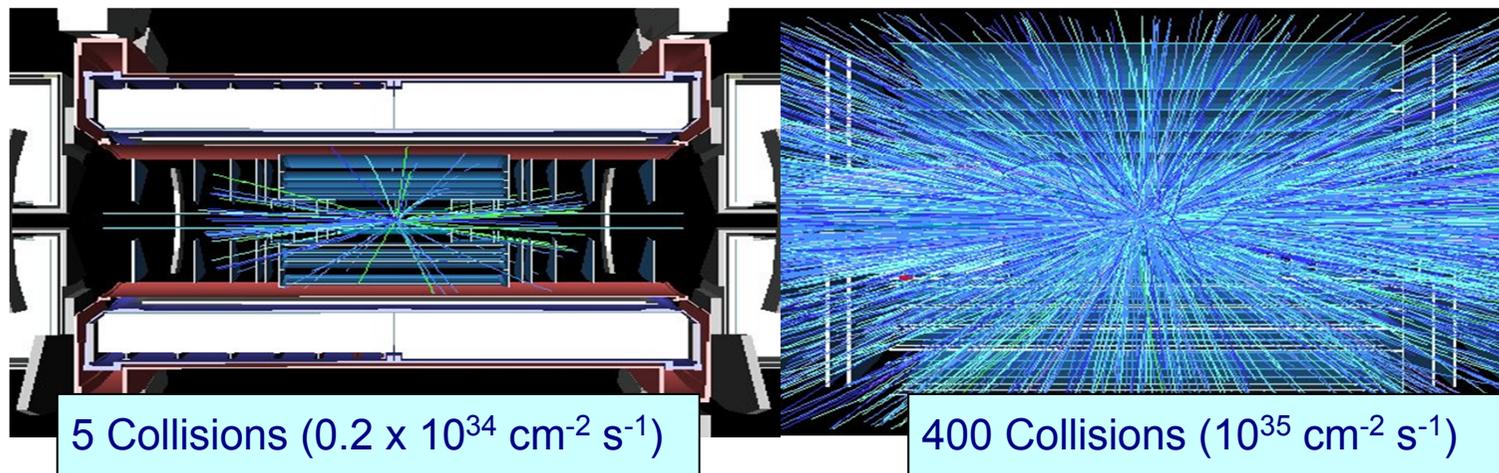
HL-LHCに向けてルミノシティはどんどん上がっていく。

- 2022年からHL-LHCであるが、その前にもかなり高いルミノシティを達成できるかもしれない。（設計よりLHCの加速器はよくできている！）
- 2012年までの物理成果によって話が変わってくる可能性もある。

HL-Luminosity で何ができるか？ 3000 fb^{-1} の物理

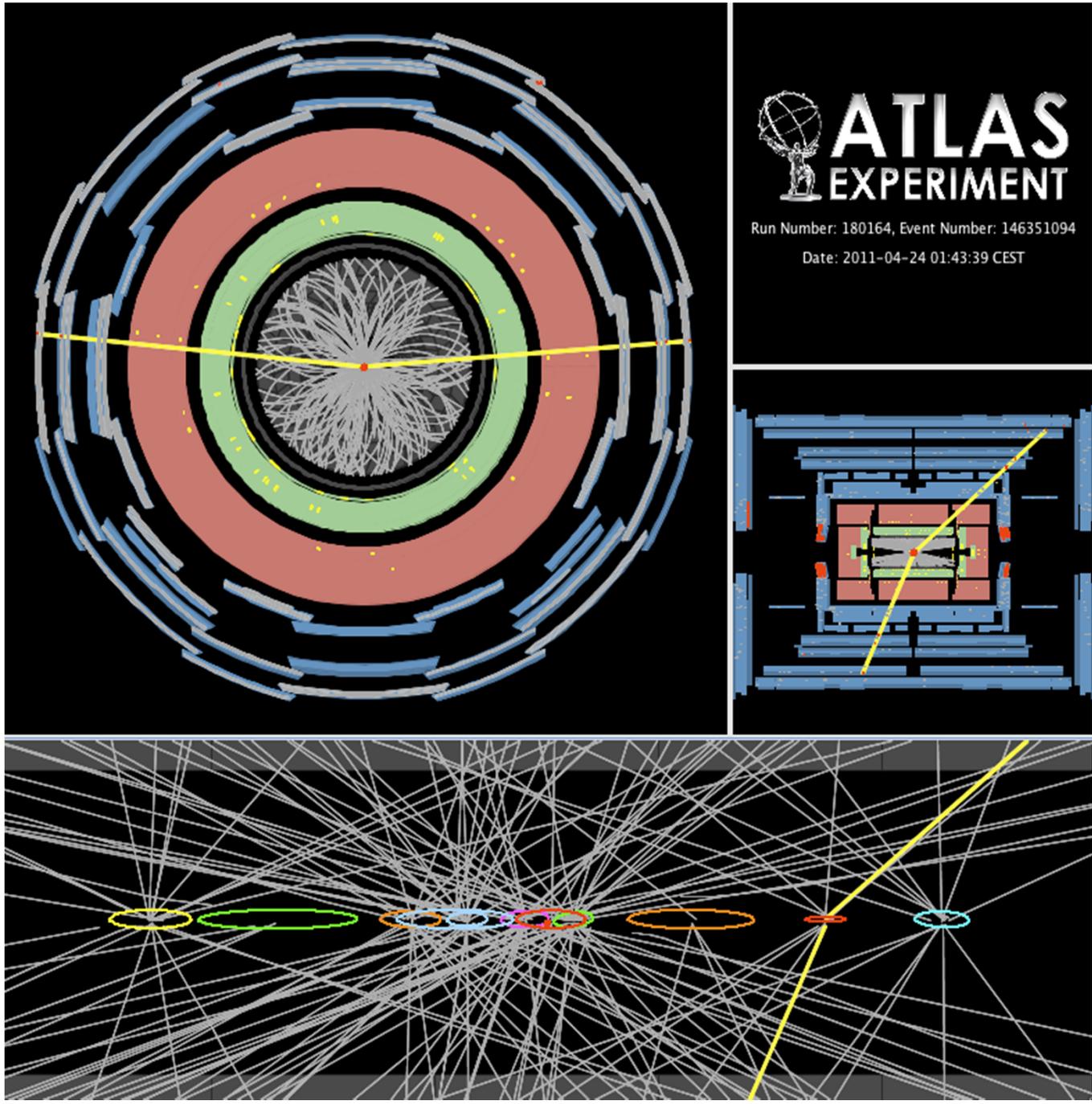
初期の LHC の結果によって大きく変わる。

- High statistics → High precision, rare events ?



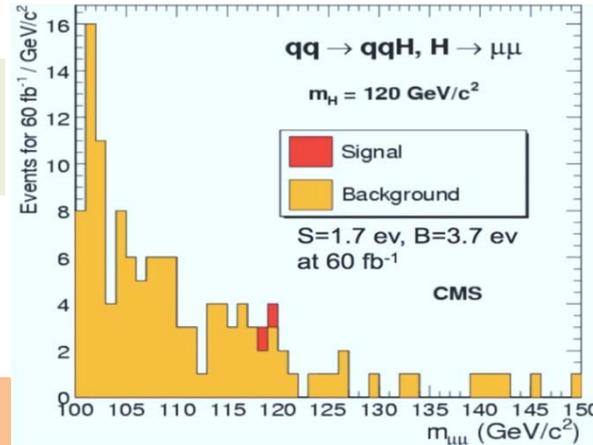
多数の衝突が重なった状態での作業
際立った特徴の崩壊過程なら可能

($H \rightarrow \mu\mu$, $H \rightarrow Z\gamma$, $WW \rightarrow WW$ 等)



$H \rightarrow \mu\mu$

$Br \sim 10^{-4}$
初期LHCでは厳しい→

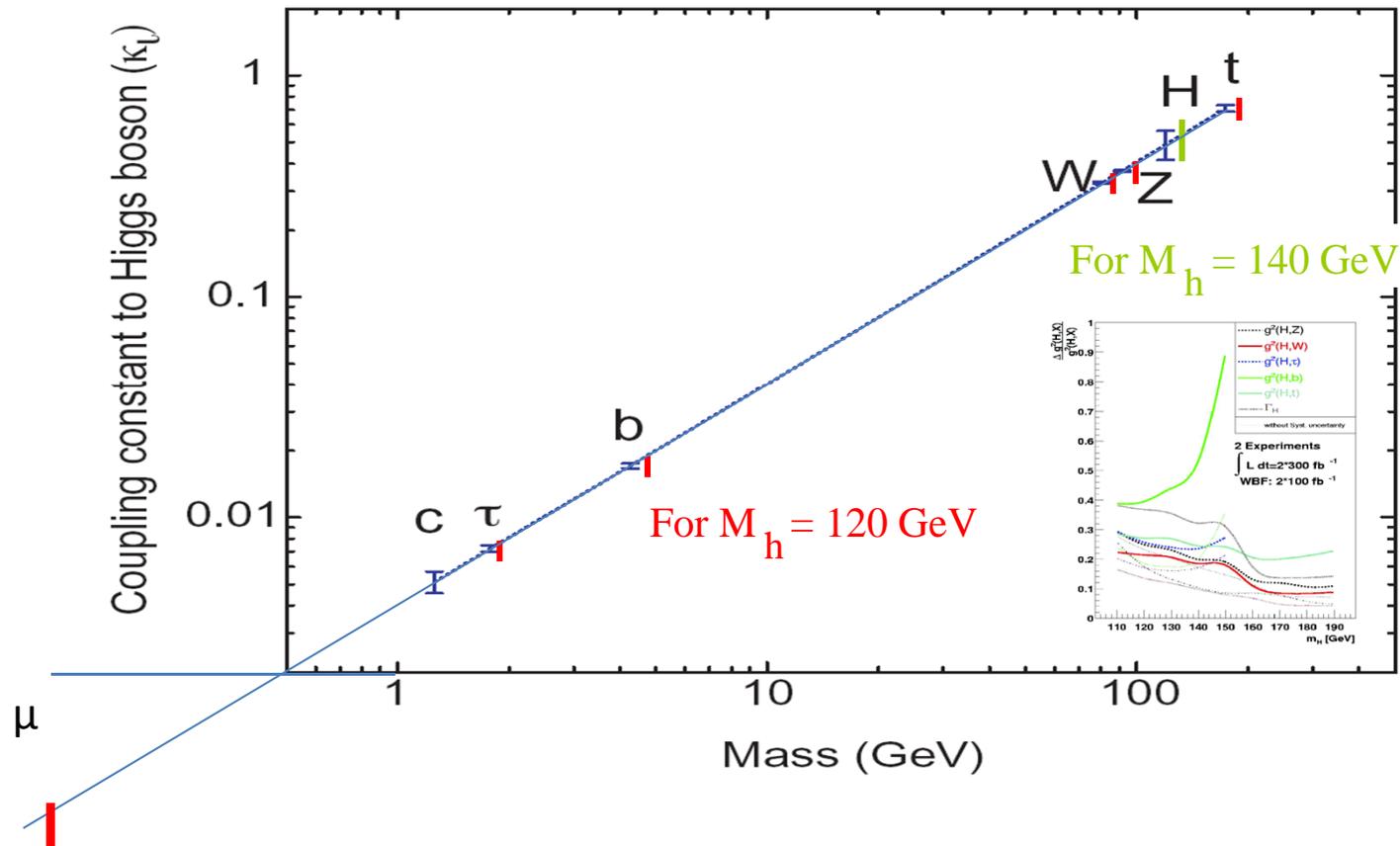


$600\text{fb}^{-1} \rightarrow 3.5\sigma$
 $6000\text{fb}^{-1} \rightarrow 9.5\sigma$

Higgs 発見後のHiggs 精密測定:

Higgs と他の粒子との結合係数測定 → 本当に質量に比例するか?

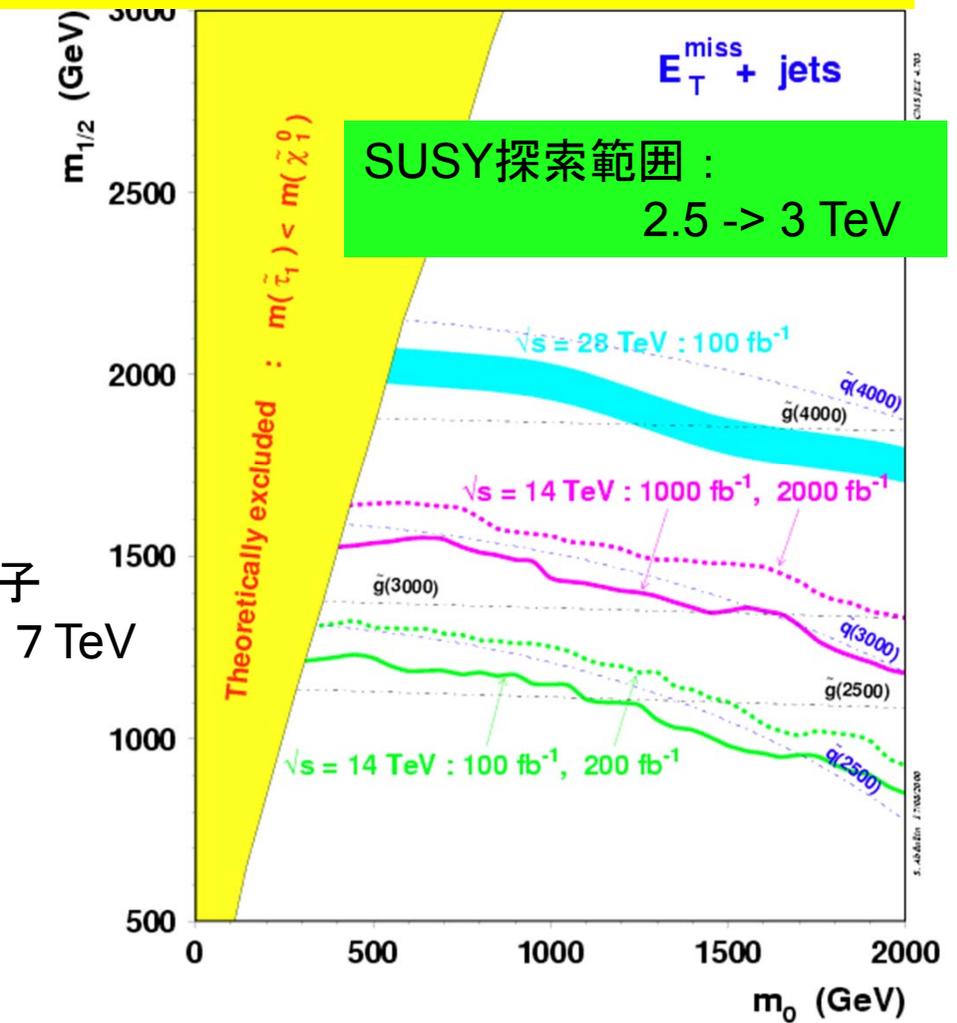
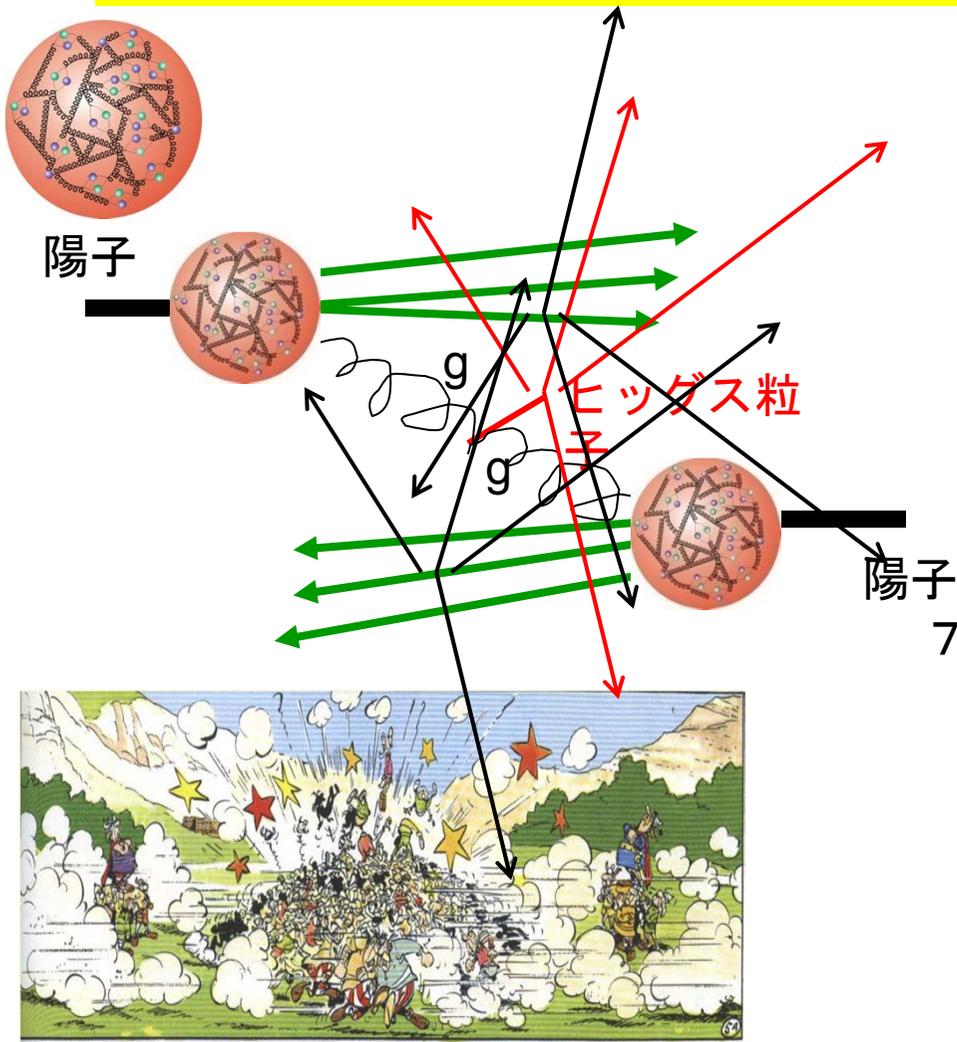
LC (黒ポイント)の精度にはかなわないが、10~20%の精度で探索可能



• High statistics → High Energy

高輝度化により、実質的に、高いエネルギーのクォークやグルーオンを増やせる：

→ より高いエネルギーで探索が可能になる。



3000 / fbの物理

さらに高いエネルギーでの探索(直接測定は、(HL-)LHCが唯一の手段)

Higgsの性質の精密測定(Higgsの質量によってこの物理の重要度が大きく変わる。ILCができればそちらが最適)

LHCで新現象(SUSYなど)が発見された場合の精密測定(ILC, SuperKEKBなどとの間接測定との相補性)

Process	LHC 14 TeV 100 fb ⁻¹	SLHC 14 TeV 1000 fb ⁻¹	DLHC 28 TeV 100 fb ⁻¹	LC 0.8 TeV 500 fb ⁻¹	CLIC 5 TeV 1000 fb ⁻¹
Squarks (TeV)	2.5	3	4	0.4	2.5
$W_L W_L (\sigma)$	2	4	4.5	6	90
Z' (TeV)	5	6	8	8 [±]	30 [±]
Extra-dimens. scale (TeV)	9	12	15	5-8.5 [±]	30-55 [±]
q^* (TeV)	6.5	7.5	9.5	0.8	5
Compositeness scale (TeV)	30	40	40	100	400
TGC, λ_γ (95%CL)	0.0014	0.0006	0.0008	0.0004	0.00008

HL-LHC の位置付け

ILCが実現するまでは、LHCが世界唯一のエネルギーフロンティアマシン。

最大限に活用し、高輝度化によって高いエネルギー領域の探索を続ける。

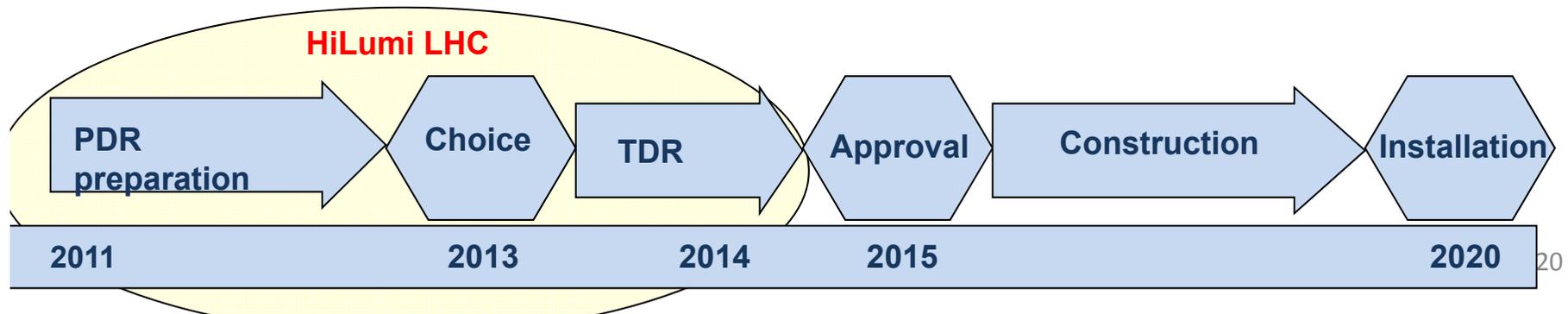
ILCの的を絞った精密測定とLHCでの広いエネルギー領域での探索は相補的

HL-LHCのための技術開発は、さらに高エネルギーのハドロンコライダーへの道につながる。このR&Dの基盤を日本に保つ。

なぜ今動くのか？

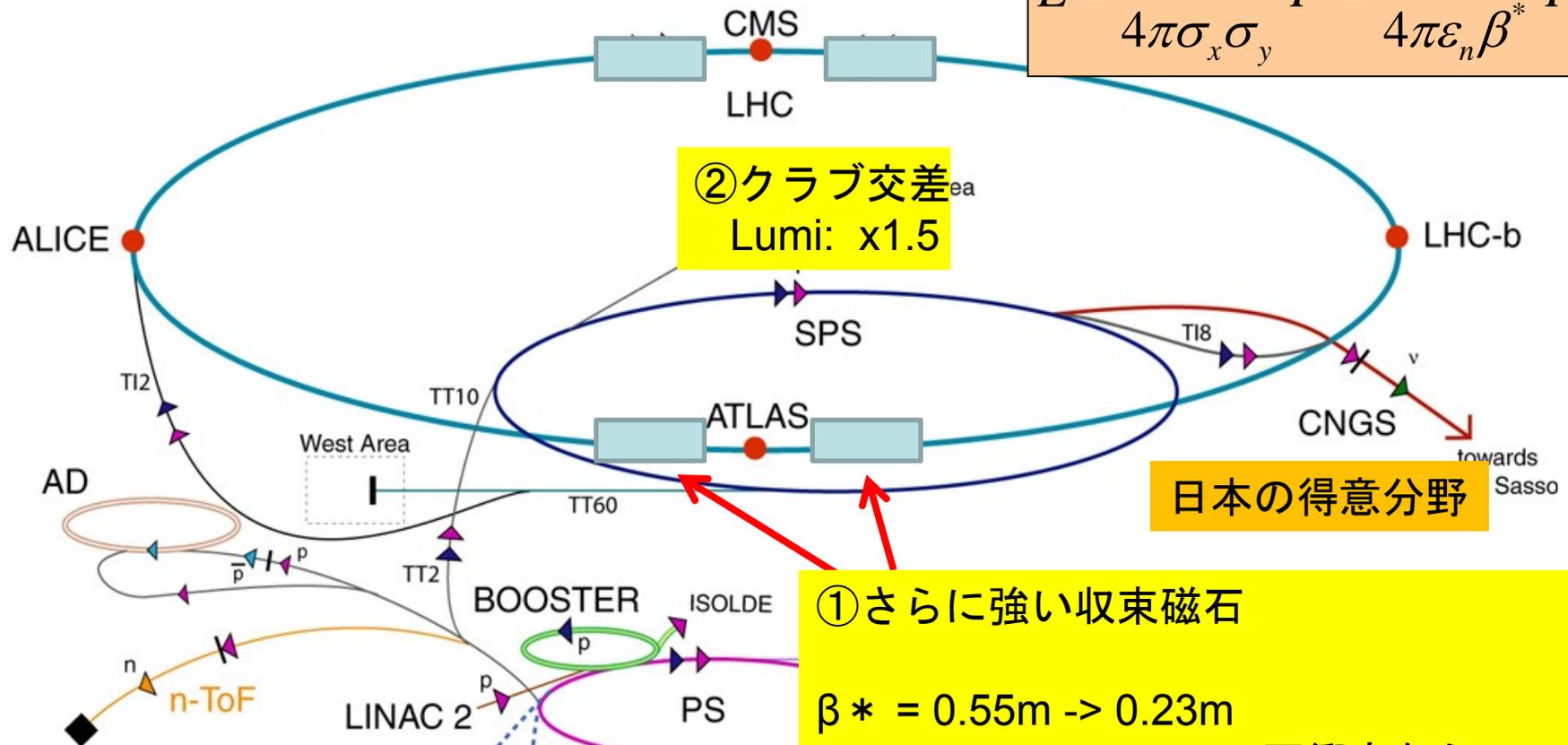
- 加速器の高輝度化のカギを握るのは、高磁場磁石とクラブ空洞、大強度injector: **日本の得意分野:**
- 欧米日の加速器の設計チームが発足: 2014-15年ぐらいまでに設計が固まる。
 - **いまR&Dを進めて日本の貢献をすることが重要:**
- 欧HL-LHCの開発技術は、さらに高エネルギーの陽子・陽子加速器への道にもつながる (HE-LHC 2030~)

→ **エネルギーフロンティアにも日本が関与していく**



いかにしてHigh-Luminosityを達成するか

$$L = \frac{N^2 k_b f}{4\pi\sigma_x\sigma_y} F = \frac{N^2 k_b f \gamma}{4\pi\varepsilon_n \beta^*} F$$



② クラブ交差
Lumi: x1.5

日本の得意分野

① さらに強い収束磁石
 $\beta^* = 0.55\text{m} \rightarrow 0.23\text{m}$
Lumi: x1.6 (正面衝突ならx2.5)

③ よりたくさん
のビーム
を入射: Injector upgrade
N: $1.15 \times 10^{11} \rightarrow 1.5-1.7 \times 10^{11}$
Lumi: x2-3

④ コリメータのアップグレード

neutrons neutrinors SPS Super Proton Synchrotron

LHC Large Hadron Collider
n-ToF Neutron Time-of-Flight
CNGS CERN Neutrino

LHC upgradeのための技術開発

$$L = \frac{N^2 k_b f \gamma}{4\pi \epsilon_n \beta^*} F$$

- High Gradient/Large Aperture の磁石の開発 (B_{peak} 13-15 T)が 必要:
 - 今のLHCの線材 (NbTi) では無理
 - 米国LARP (LHC Accelerator Research Program) で Nb_3Sn の開発が進む
 - KEK-CERNで Nb_3Al の開発

Technology Choice ~2014頃

現行のLHC inner triplet



- Nb_3Sn is becoming a reality (first LQ long -3.6 m – quad 90 mm)

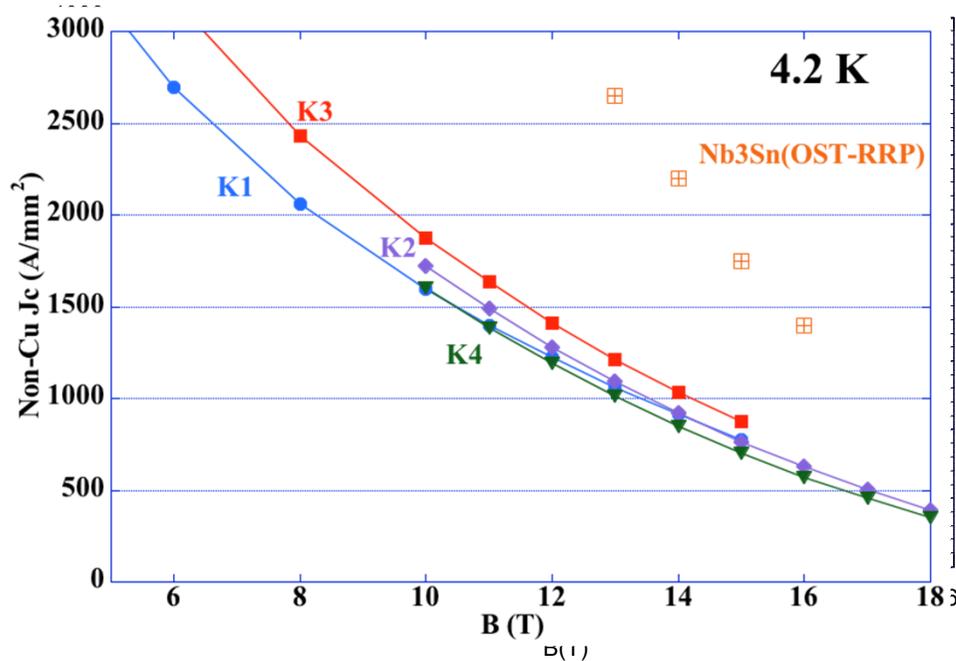
L.Rossi



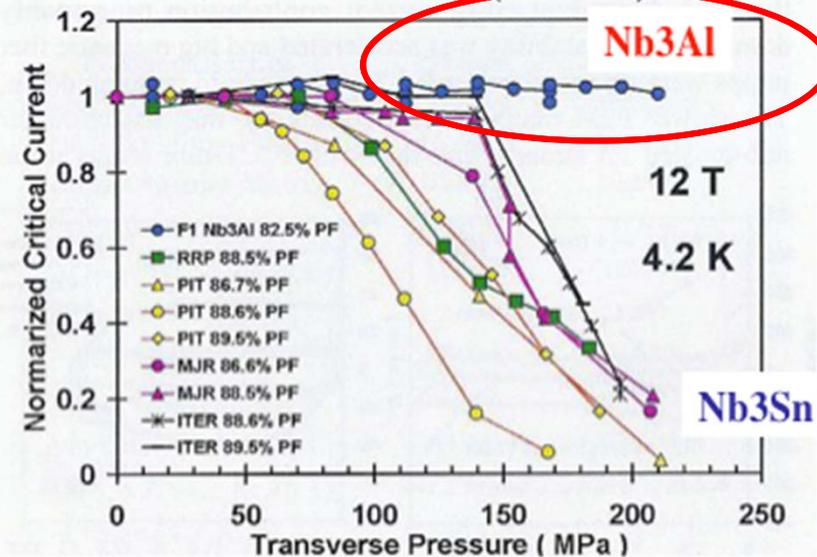
Potential of Nb₃Al

中本

J_c vs. B



J_c vs. Stress (Cable)



Presented at MT-20
By A. Kikuchi et al.

Nb₃Al has,

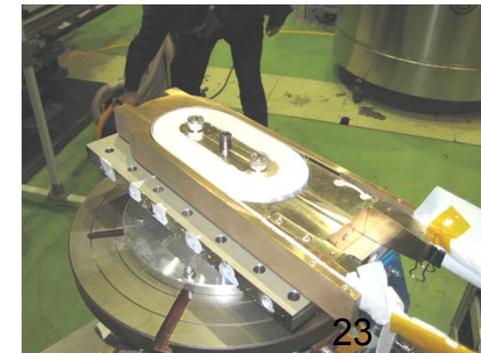
- Lower critical current density (J_c) than Nb₃Sn.
- But, **less-sensitivity to strain, stress.**

>> Candidate for HFM w/ large aperture, like **D1**.

>> Possibility of "**React-Wind**" technology

◆ Similar to current, matured "NbTi" coils.

◆ No heat reaction or impregnation after coil winding.



2011/9/10

23

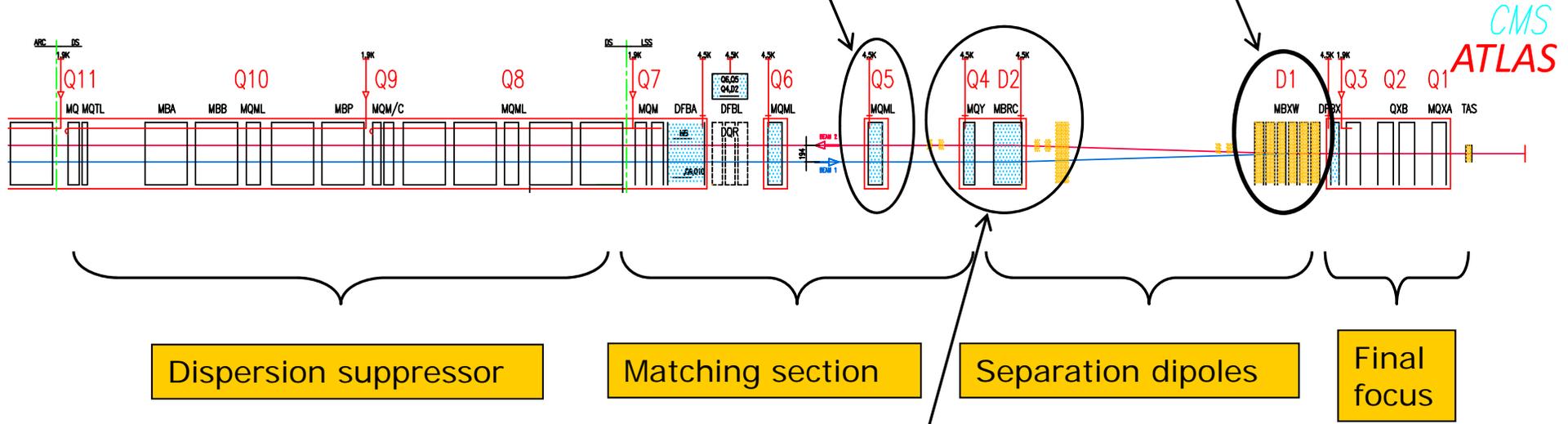
衝突点近くのデザイン素案 (L. Rossi)

HL-LHC change in layout

Today: Two-in-One $\varnothing = 56$ mm; 4.2 K
HL-LHC: Two-in-One $\varnothing 70$ mm; 1.9 K

Discussion since 6 months, serious option is envisaging 5 new D1s as possible KEK contribution to HL-LHC

Today: 6 x 3 m x 1.5 T, h=80 mm
HL-LHC: 1 x 4 m x 7 T; $\varnothing=150$ mm

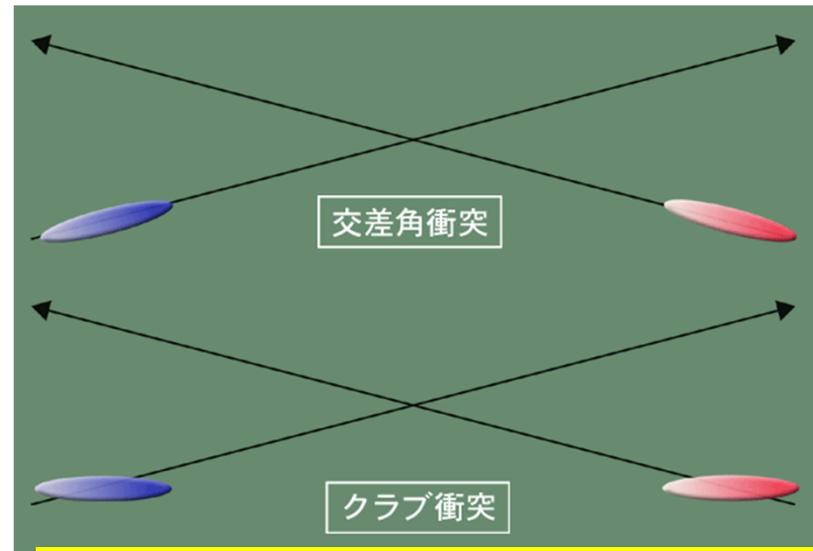
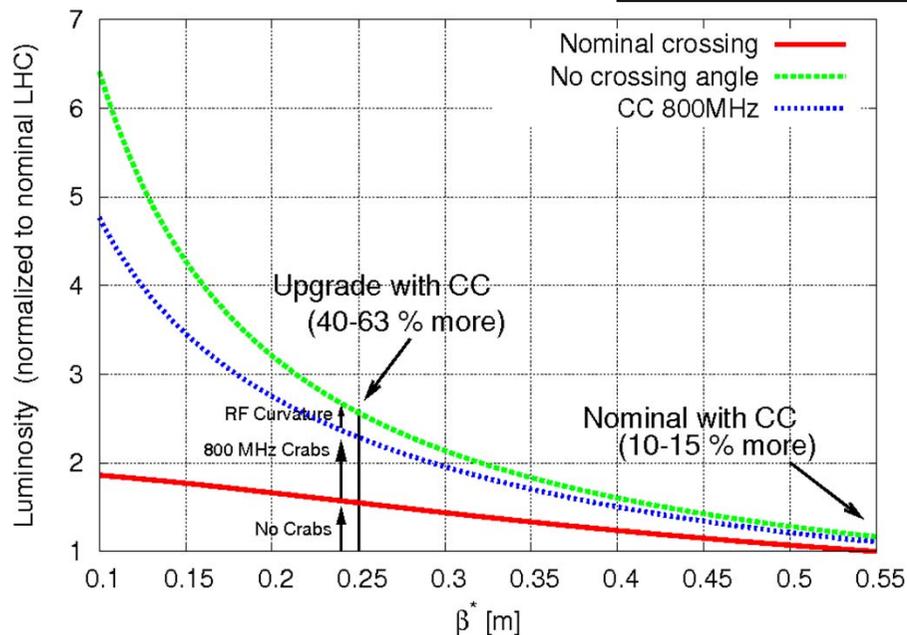


Today: Q4 Two-in-One $\varnothing=70$ mm, 4.2 K; D2 $\uparrow\uparrow$ 9 m x 3.5 T, 4.2 K
HL-LHC: Q4 Two-in-One $\varnothing=90$ mm, 1.9 K; CRAB CAVITY; D2 $\uparrow\uparrow$ 9 m x 5 T; 1.9 K

Nb₃AlかNb₃Snかという2者択一でなく、将来を見据えたR&Dの場ともとらえられる。Nb₃Alの物性の基本研究(J-PARCで、中性子回折)や、耐放射線レジンの開発など

クラブ空洞

$$L = \frac{N^2 k_b f \gamma}{4\pi \epsilon_n \beta^*} F$$

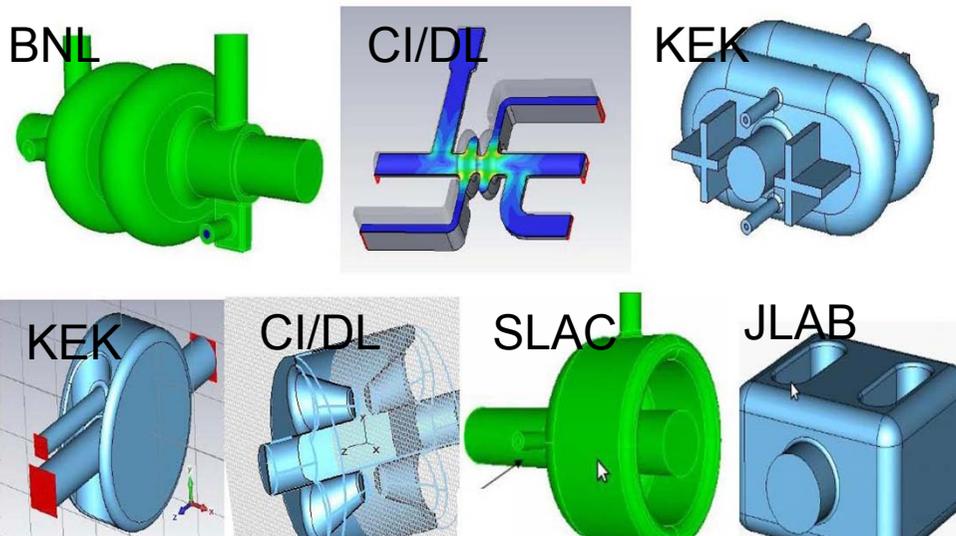


衝突点付近でバンチの向きを変えることで輝度を上げる。

KEK-Bが唯一の実用例

Crab Cavities: this is the best candidate for exploiting small β^* (for β^* around nominal only +15%). However it should be underlined that today Crab Cavities are not validated for LHC, not even conceptually: **the issue of machine protection should be addressed with priority.**

SPSでの予備実験を検討。KEK-Bのクラブ空洞を使う可能性も検討²⁵



世界中の研究所で設計競争がはじまっている。

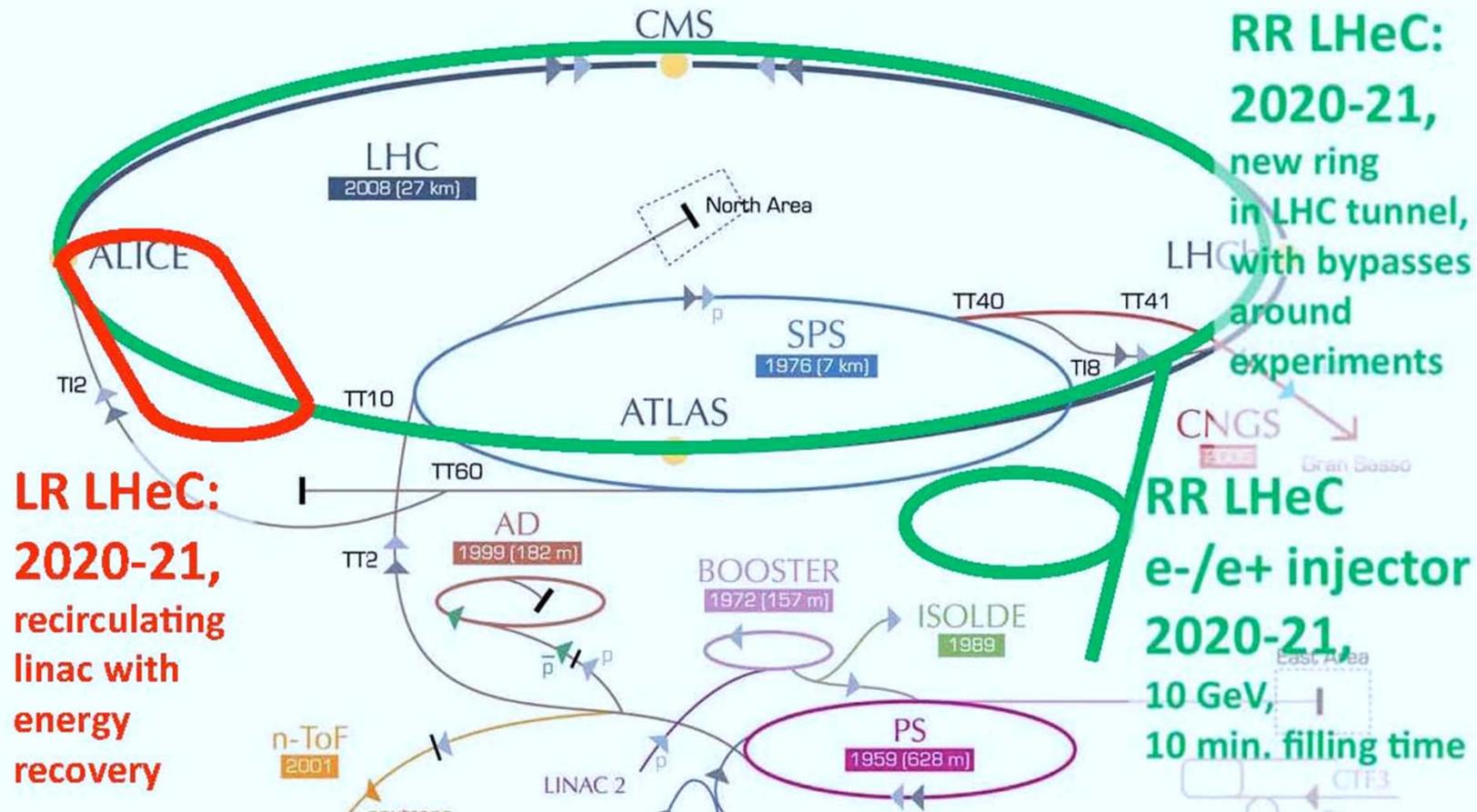


ただし、最近PSBのアップグレードよりRCSを新設した方がいいというような話も出てきている。(今年の夏までにプロポーザが出る予定だった。→来週 (Council Week)何かニュースがあるかもしれない。

LHCアップグレードで新しい加速器はLinac4のみ (建設中)
 PS-boosterのenergy-up で対処(1.4→2 GeV)
 SPSにも手を入れないといけない。(space-charge, e-cloud RF)

もう一つの可能性

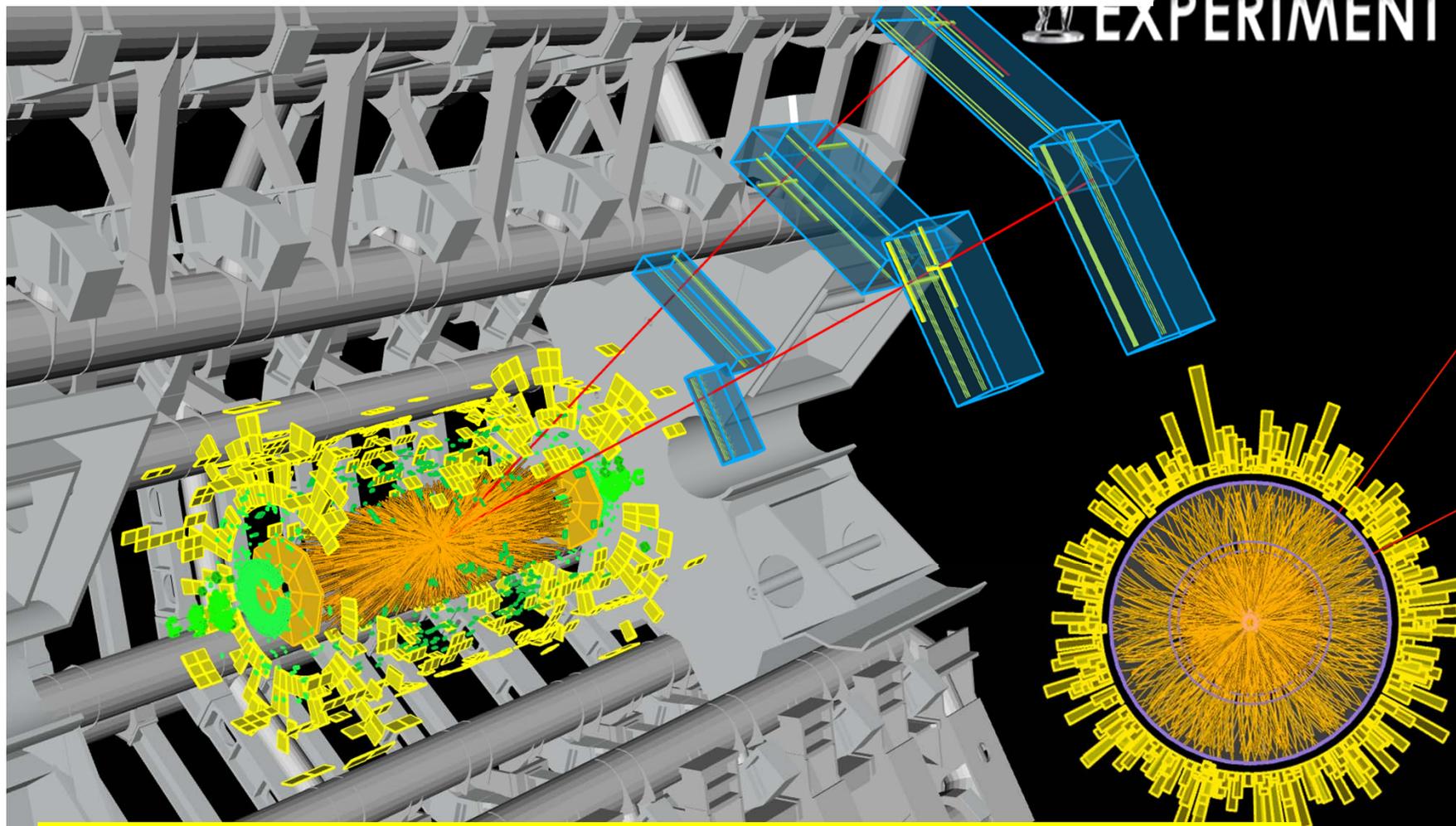
Large Hadron electron Collider



電子加速器を2022年までに作れば、HL-LHCと共存して走れる。場所：ALICEの後

測定器アップグレード

ATLAS
EXPERIMENT



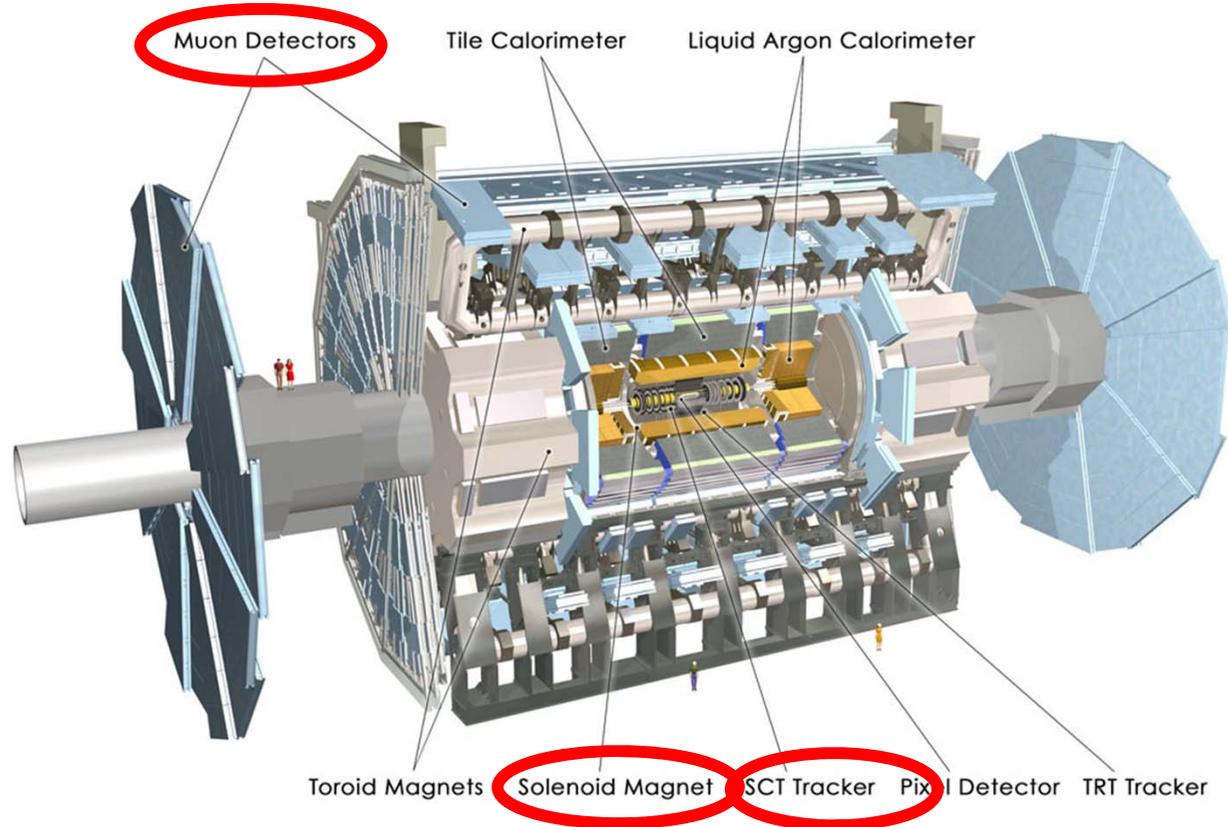
去年の重イオン衝突事象:

Pixel/Strip 測定器は優れた性能を示している。

MCでの記述も良好

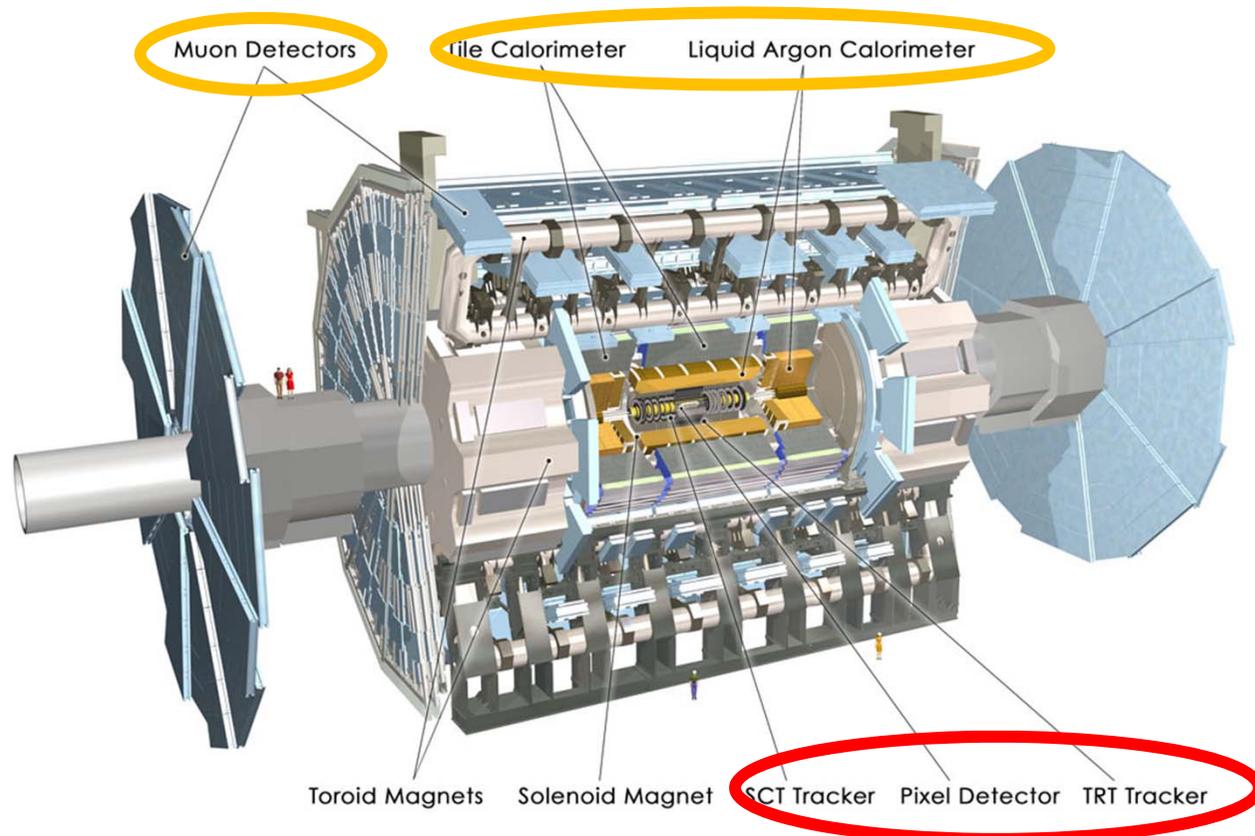
HL-LHC のスタディを信頼度高く進める準備ができつつある。

ATLAS Detector: 日本グループの寄与



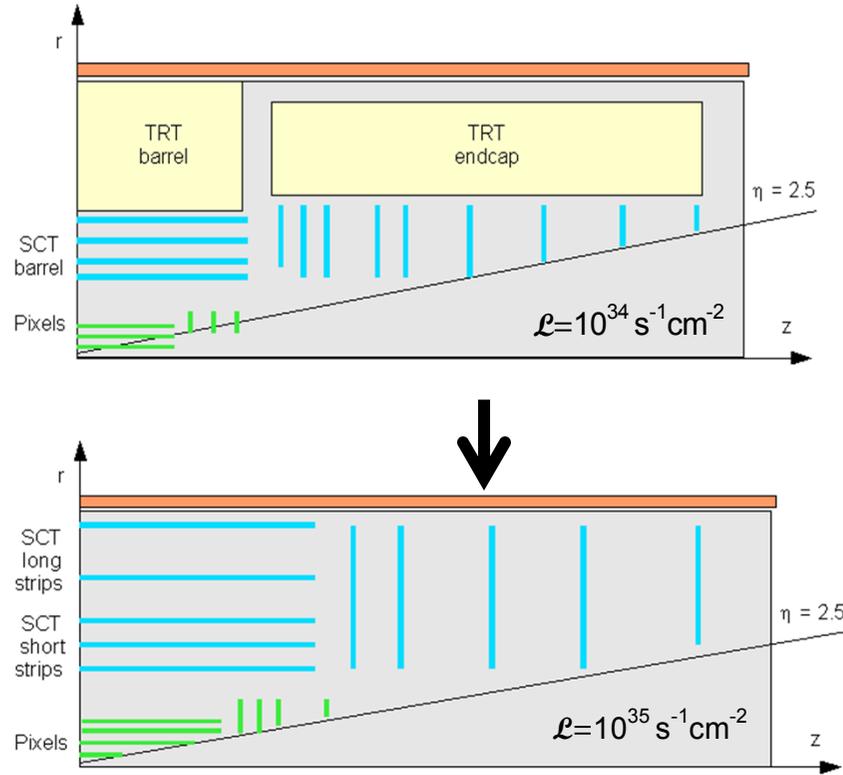
- Superconducting Central Solenoid (Japanese contribution:100%)
- Time-to-digital conversion chips for muon drift tubes (100%)
- End-cap muon triggering system (TGC) (~50%)
- Silicon microstrip tracking system (SCT) (~20%)

ATLAS Detector upgrade Plan



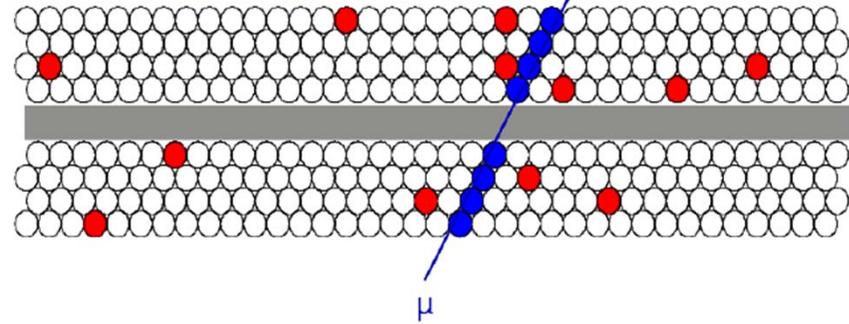
- Magnet System には変更なし。
- Inner Tracker は全部新しくする (All Silicon, Pixel/Short-Stripの多用)
- Calorimeterは LVL1 Trigger を完全に入替える
- Muon はシートの高いところだけの変更

Inner Tracker のレイアウトの変更

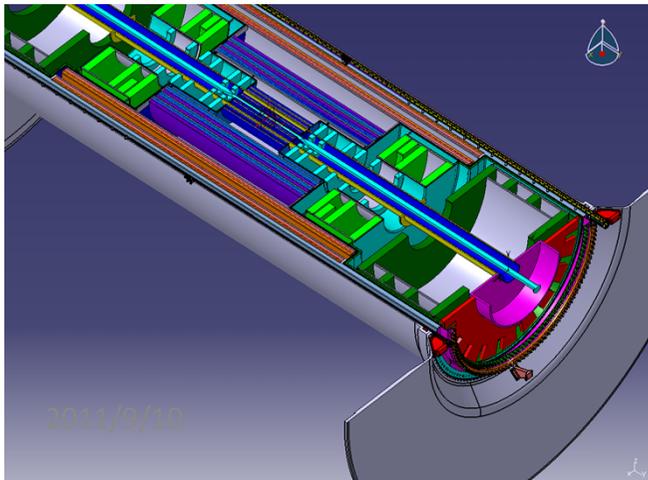
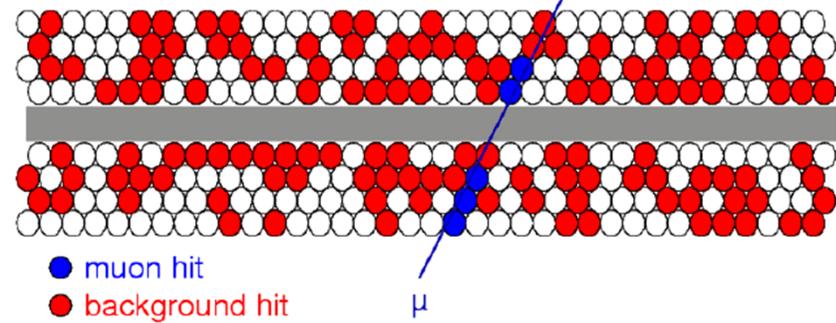


Muon のバックグラウンド

Nominal occupancy: 4%



10x nominal occupancy: 40%



現在、ピクセルとストリップの層数の最適化、バレルとエンドキャップの区分けなどの最適化の議論
inner tracker subcommittee : 徳宿 chair

ミュオントリガーをどう改良するかも検討中
inner muon chamber: 川本 PL

LHCアップグレード (日本グループの取り組み)

- 粒子密度の増加
 - バンク当たり約10,000個の発生粒子

日本でもストリップ・ピクセル検出器の開発を開始 : (KEK・筑波・東工・大阪…)

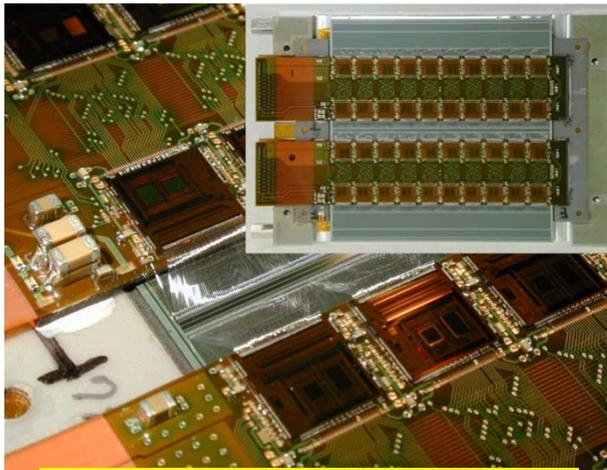
ピクセル・センサー自体の開発 (n-in-pセンサーの技術の適用)
ASIC、ハイブリッドと一体化したモジュールの開発
(バンズボンディング、クーリング等サービスの確立)

Pixelでも、3D等のオプションが提案されている。今R&Dをきちんとやらないと、主導権を握れない。

- トリガーレートの増加
 - 本物のミュオンの増加とともにFakeヒットの増加
最内層のミュオンチェンバーの入替え
トラックトリガーの開発

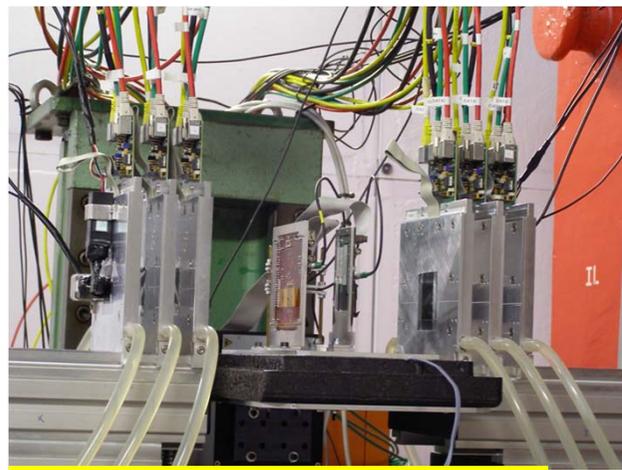
**日本もExpression of Interest を出し
Muon/Triggerのスタディを進めている** : (KEK・東京・名古屋・神戸・京都…)

新しいMuon Trigger Chamber をトリガーに使えるか？

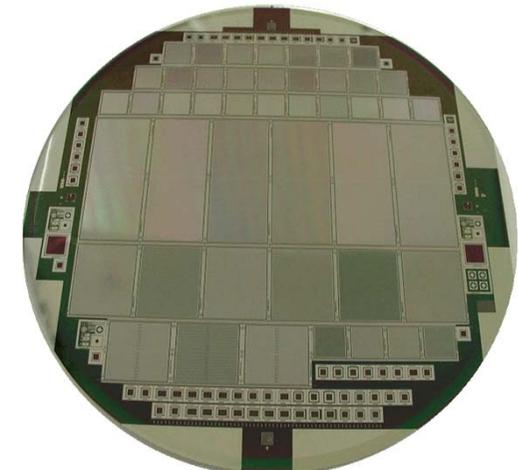


Short Strip module

2011/9/10



Pixel test at DESY



Hamamatsuのピクセル
Thinning 320→150 μm

まとめ

・LHCのアップグレード(High luminosity LHC: HL-LHC)はLHCの性能を最大に引き出すプロジェクト

- ・ルミ/シティーを $5 \times 10^{34} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ に長い期間保つ運転を行う(Luminosity leveling)

- ・2030年までに 実験あたり 3000fb^{-1} の積分ルミ/シティー。

- ・High Luminosity \rightarrow High Energy reach (SUSY 2.5TeV \rightarrow 3TeV) \rightarrow

ATLAS日本もHL-LHCでの実験へ向けての準備に取り掛かっている。

・HL-LHCはLHC本体とInjectorの両方のプロジェクト

- ・LHCに関しては、衝突点近傍の(収束磁石、クラブ空洞)の入れ替え

- ・入射器のアップグレードはLinac4と、PSBのエネルギー増加

・HL-LHCのデザインは2014年(?)頃までに、デザインを決める。

- ・高磁場磁石、クラブ空洞と、日本の得意な分野が含まれるプロジェクト。

- ・設計段階の寄与は非常に有意義。設計、R&Dへの関与が始まっている。

・2030年から $E_{\text{cm}} = 33 \text{TeV}$ の Higher-Energy LHC (HE-LHC) を作る可能性を、今年になってCERNが表明している。

- ・カギを握るのは高磁場磁石である。つまり、HL-LHCの収束磁石のR&Dがどれだけ進むかが、HE-LHCが実現するかどうかを決める。

\rightarrow HL-LHCへの協力は日本がEnergy Frontier実験を続けるうえで重要な選択肢(電子加速器と陽子加速器の両方で攻める)