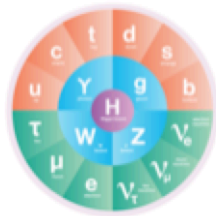
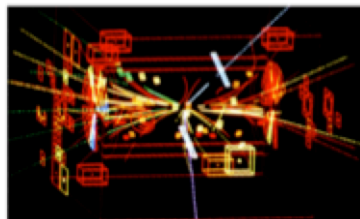




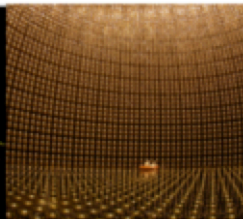
1954: breaking ground at CERN



1960s-70s: Theory of the Standard Model established



1983: Discovery of W and Z bosons



1998: Observation of neutrino oscillations



2001: Observation of CP violation in B mesons



2012: Announcement of Higgs boson discovery

What comes next?

ハドロンエネルギーフロンティア

2020年4月30日

高エネルギー将来計画委員会 第1回勉強会

中浜 優 (名古屋大学)

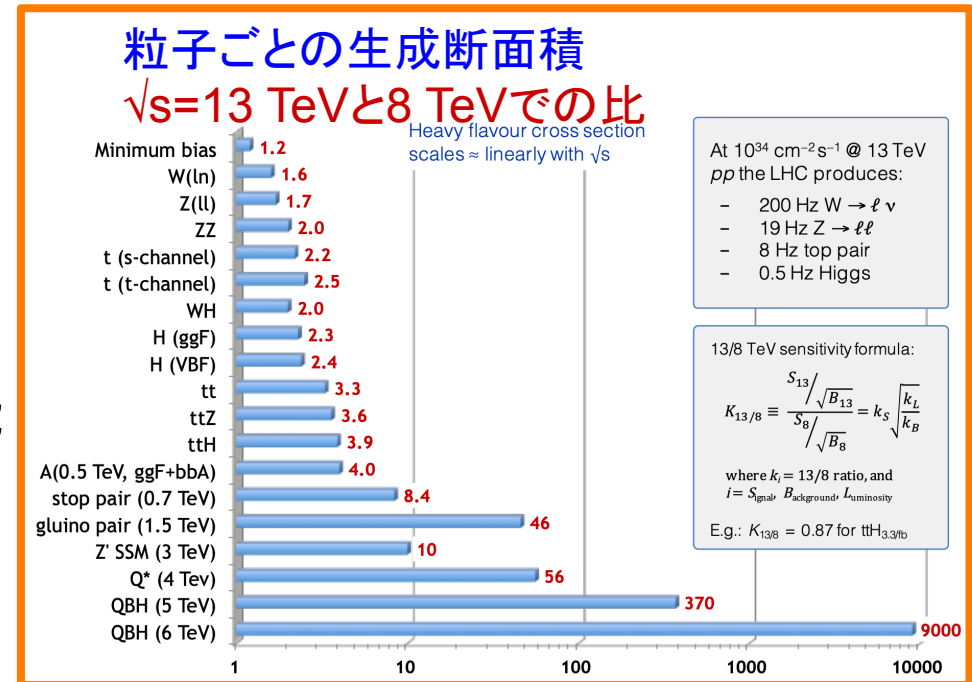


委員会のATLASメンバーの方々(奥村・南條・寄田氏)、
スライドへの事前コメントどうもありがとうございました

なぜ高エネルギー&高輝度が重要なのか？

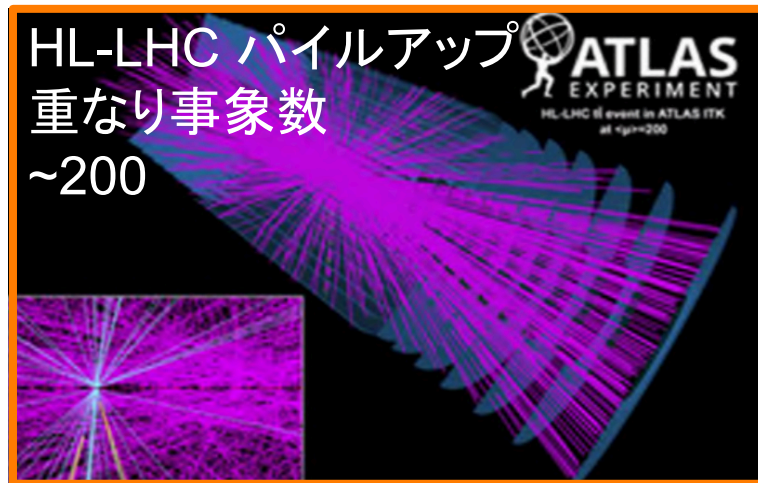
- 標準理論を超える物理を発見したい
 - エネルギースケールは、TeVが有望だが、実際は未知
- エネルギーフロンティアでの手段
 - EW Higgs機構の全容解明
 - 新粒子・新物理の直接探索

- 高エネルギー
 - 生成断面積が大きい
 - ~10TeVの重粒子まで到達可能
- 高輝度・高統計データ
 - (未発見の)稀な事象に到達可能
 - 物理量を精度良く測定し、未知のエネルギースケールにおける新物理効果の間接探索



プロジェクト

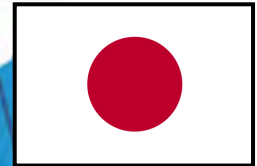
- 現行LHC (2008-2024, 350 fb^{-1})
- 高輝度HL-LHC (2027-, 3000 fb^{-1} at 14 TeV pp)
 - 2016年に、CERNで正式承認
 - **科学的意義: ヒッグス粒子の性質の詳細な解明や
更なる新粒子の発見 → 物質起源や宇宙創成の謎に迫る**
 - 技術的な挑戦: 高輝度化に伴い、検出器の微細化と放射線耐性の強化やコンピューティング刷新 → 開発・製造が進行中



2020年4月30日

エンドキャップμトリガー
新たなtrigger architecture
→ 電子回路交換

日本は重要な貢献

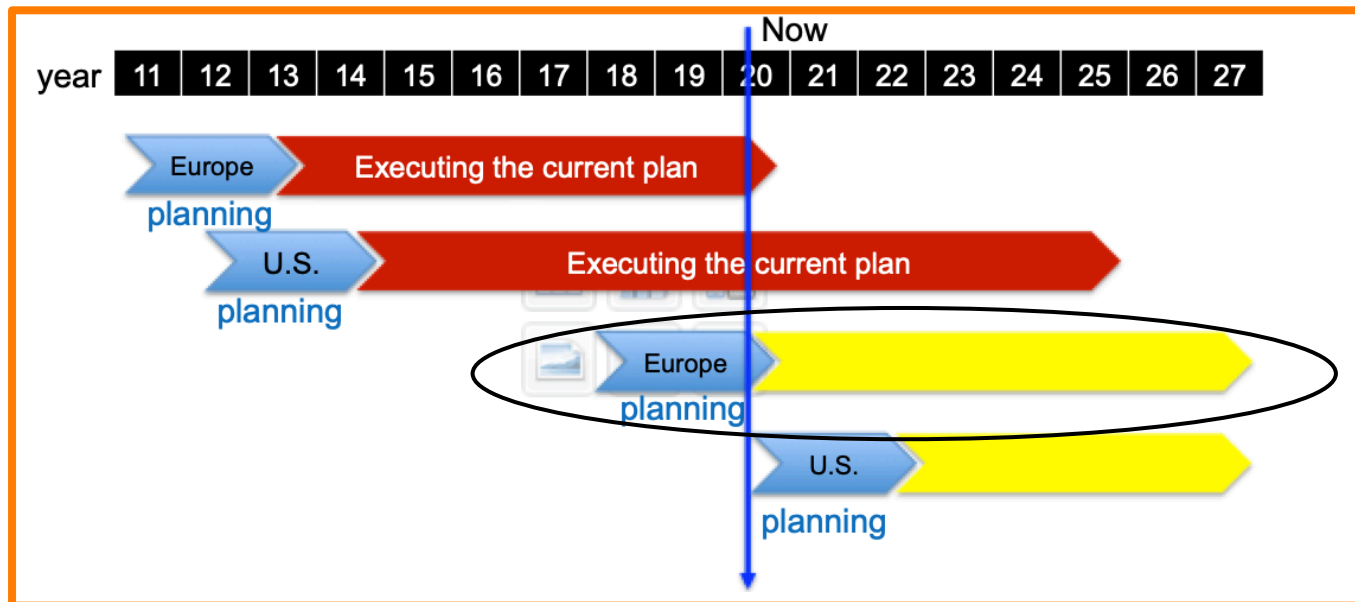


内部飛跡検出器
200m²に及ぶシリコン
センサー → 総取り替え

加速器: ビーム分離用
超伝導電磁石

世界の動向

- 大規模プロジェクトゆえに、研究戦略・優先度を組織的に議論・実装 e.g. European Strategy, US Snowmass



- 今回のEuropean Strategy update
 - 争点の一つが、「どの大型加速器がLHCの後継か？」
 - Recommendationは、来月CERN Councilで承認予定→延 (公表前に噂レベルでも漏れることないレベルで、厳密に取り扱われている)

膨大な準備研究と参考資料

- 本トークの話題をさらに深めたい場合、お好みの話題がスキップされた場合、以下をご参照ください。

– The 2020 European Strategy update:

- CERN Yellow Report “Physics of the HL-LHC, and perspectives at the HE-LHC”
(1418 pages as inputs from the experiments)

<http://dx.doi.org/10.23731/CYRM-2019-007>

- **Open symposium in Granada** (2019年5月, 600名参加):

現状で
最良の資料

<https://indico.cern.ch/event/808335/>

- **Physics Briefing book** (2019年10月, 254 pages):

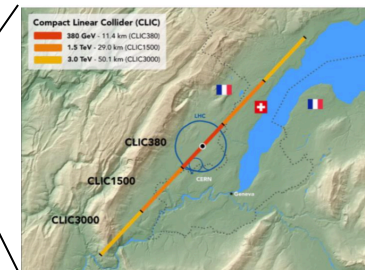
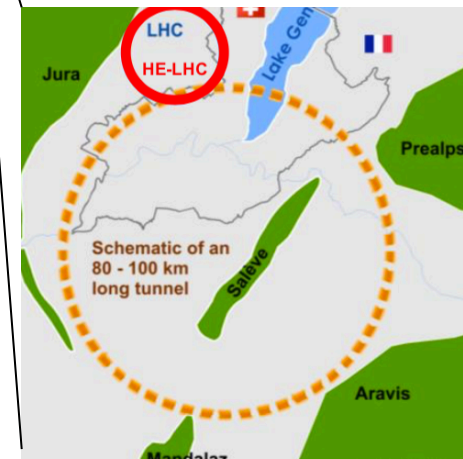
<https://cds.cern.ch/record/2691414>

– The 2021 US SnowMass process:

- Energy Frontier wiki page: <https://snowmass21.org/energy/start>

将来エネルギーフロンティア加速器のリスト

高エネルギー到達
ファクトリー

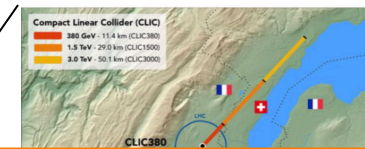
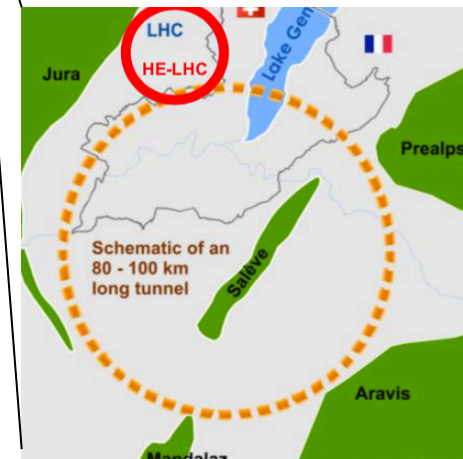


Collider	Type	\sqrt{s}	偏極 [%] [e^-/e^+]	検出器数	ピーク [$10^{34}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$]	積算L [ab^{-1}]	運転期間 [years]	
pp	HL-LHC	14 TeV	-	2	5	6.0	12	
	HE-LHC	27 TeV	-	2	16	15.0	20	
	FCC-hh	100 TeV	-	2	30	30.0	25	
ee	FCC-ee 円形	M_Z	0/0	2	100/200	150	4	
		$2M_W$	0/0	2	25	10	1-2	
		240 GeV	0/0	2	7	5	3	
		$2m_{top}$	0/0	2	0.8/1.4	1.5	5	
		(1y SD before $2m_{top}$ run)						(+1)
	ILC 線形 超伝導	ee	250 GeV	$\pm 80/\pm 30$	1	1.35/2.7	2.0	11.5
		350 GeV	$\pm 80/\pm 30$	1	1.6	0.2	1	
		500 GeV	$\pm 80/\pm 30$	1	1.8/3.6	4.0	8.5	
		(1y SD after 250 GeV run)						(+1)
	CEPC 円形	ee	M_Z	0/0	2	17/32	16	2
$2M_W$		0/0	2	10	2.6	1		
240 GeV		0/0	2	3	5.6	7		
CLIC 線形 常伝導	ee	380 GeV	$\pm 80/0$	1	1.5	1.0	8	
	1.5 TeV	$\pm 80/0$	1	3.7	2.5	7		
	3.0 TeV	$\pm 80/0$	1	6.0	5.0	8		
	(2y SDs between energy stages)						(+4)	
ep	LHeC	1.3 TeV	-	1	0.8	1.0	15	
	HE-LHeC	1.8 TeV	-	1	1.5	2.0	20	
	FCC-eh	3.5 TeV	-	1	1.5	2.0	25	

将来エネルギーフロンティア加速器のリスト

Collider	Type	\sqrt{s}	偏極 [%] [e^-/e^+]	検出器数	ピークL [$10^{34}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$]	積算L [ab^{-1}]	運転期間 [years]
pp	HL-LHC	14 TeV	-	2	5	6.0	12
	HE-LHC	27 TeV	-	2	16	15.0	20
	FCC-hh	100 TeV	-	2	30	30.0	25
ee	FCC-ee 円形	M_Z	0/0	2	100/200	150	4
		$2M_W$	0/0	2	25	10	1-2
		240 GeV	0/0	2	7	5	3
		$2m_{top}$ (1y SD before $2m_{top}$ run)	0/0	2	0.8/1.4	1.5	5 (+1)
	ILC 線形 超伝導	250 GeV	$\pm 80/\pm 30$	1	1.35/2.7	2.0	11.5
		350 GeV	$\pm 80/\pm 30$	1	1.6	0.2	1
		500 GeV	$\pm 80/\pm 30$	1	1.8/3.6	4.0	8.5
		(1y SD after 250 GeV run)					(+1)
	CEPC 円形	M_Z	0/0	2	17/32	16	2
		$2M_W$	0/0	2	10	2.6	1
240 GeV		0/0	2	3	5.6	7	
CLIC 線形 常伝導	380 GeV	$\pm 80/0$	1	1.5	1.0	8	
	1.5 TeV	$\pm 80/0$	1	3.7	2.5	7	
	3.0 TeV	$\pm 80/0$	1	6.0	5.0	8	

高エネルギー到達
ファクトリー



- ee: 全オプションとも技術的に成熟 → 5-10年以内に建設可能
- pp: トンネル巨大化はもちろん、強磁場電磁石の開発の不定性大きい
- さらに将来に向けて: R&D進行中
 - ミューオンコライダー (陽子ビーム冷却や e^+e^- 生成)
 - プラズマ加速

HE-LHC/FCC

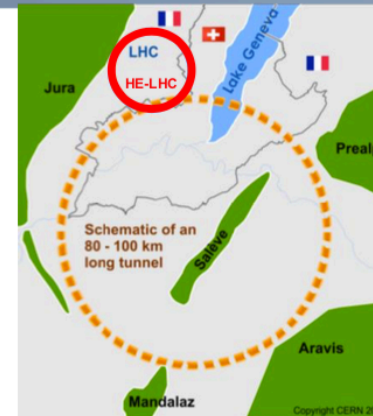
リニアコライダーは
末原さんのトーク参照



FCC: Future Circular Collider

CERN DGのスライド at グラナダ
シンポを内容を変えずに少し加工

	\sqrt{s}	L/IP (cm ² s ⁻¹)	Int. L/IP(ab ⁻¹)	Comments	
e⁺e⁻ FCC-ee	~90 GeV 160 240 ~365	Z WW H top	230 x 10 ³⁴ 28 8.5 1.5	75 ab ⁻¹ 5 2.5 0.8	2 experiments Total ~ 15 years of operation
pp FCC-hh	100 TeV		5 x 10 ³⁴ 30	2.5 ab ⁻¹ 15	2+2 experiments Total ~ 25 years of operation
pp HE-LHC	27 TeV		1.6 x 10 ³⁵	15	LHCトンネルに、 FCC-hh用の 16Tの磁石 20年運転



Parameter	Unit	FCC-ee	FCC-hh
Annual energy consumption CERN today: 1.2 TWh	TWh	1.9	4
Power consumption	MW	~300	550
Construction cost (tunnel included) トンネル込みの建設費	BCH	11.6 12760億円	17 if after FCC-ee; otherwise 24

FCC-ee後継の場合18700億円
FCC-hh直接の場合26400億円

Preliminary, purely technical schedule for integrated programme (FCC-ee followed by FCC-hh), assuming green light to preparation work in 2020.

8 years preparation	10 years tunnel and FCC-ee construction	15 years FCC-ee operation	11 years preparation for FCC-hh and installation	25 years FCC-hh operation pp/PbPb/eh
2020-2028		2038-2053		2064-2090

政治的・リソース的な要素が強く、European Strategy公開前に我々が答えられる
 範疇を超えています、...

前提

- ヒッグスファクトリーの物理的重要性が国際的認識として合意している
- HE-LHC 27 TeVは、ゲインが少ない (後で感度比較を見せます)
- FCCの段階的スケジュールは、グラナダシンポや今年1月 FCCシンポで紹介：
https://indico.cern.ch/event/838435/contributions/3635822/attachments/1967874/3272551/200113_FCC-Status.pdf

おそらく

→ HL-LHC後のCERNとしての自然な路線は、ee ヒッグスファクトリー

→ FCC-ee → FCC-hhであろう (LEP→LHCと同じ。日本のILC承認にも依る)

- Stage 1: FCC-ee (Z, WW, H, tt) 15年間 運転 (e.g. @Z pole 230e34)
- Stage 2: FCC-hh (100 TeV, 16 T磁石 Nb3Sn) 25年間 20/ab

Consumption	MW		
Construction cost (tunnel included)	BCH	11.6	17.11 after FCC-ee; otherwise 24
トンネル込みの建設費		12760億円	

FCC-ee後継の場合18700億円
 FCC-hh直接の場合26400億円

Preliminary, purely technical schedule for integrated programme (FCC-ee followed by FCC-hh), assuming green light to preparation work in 2020.

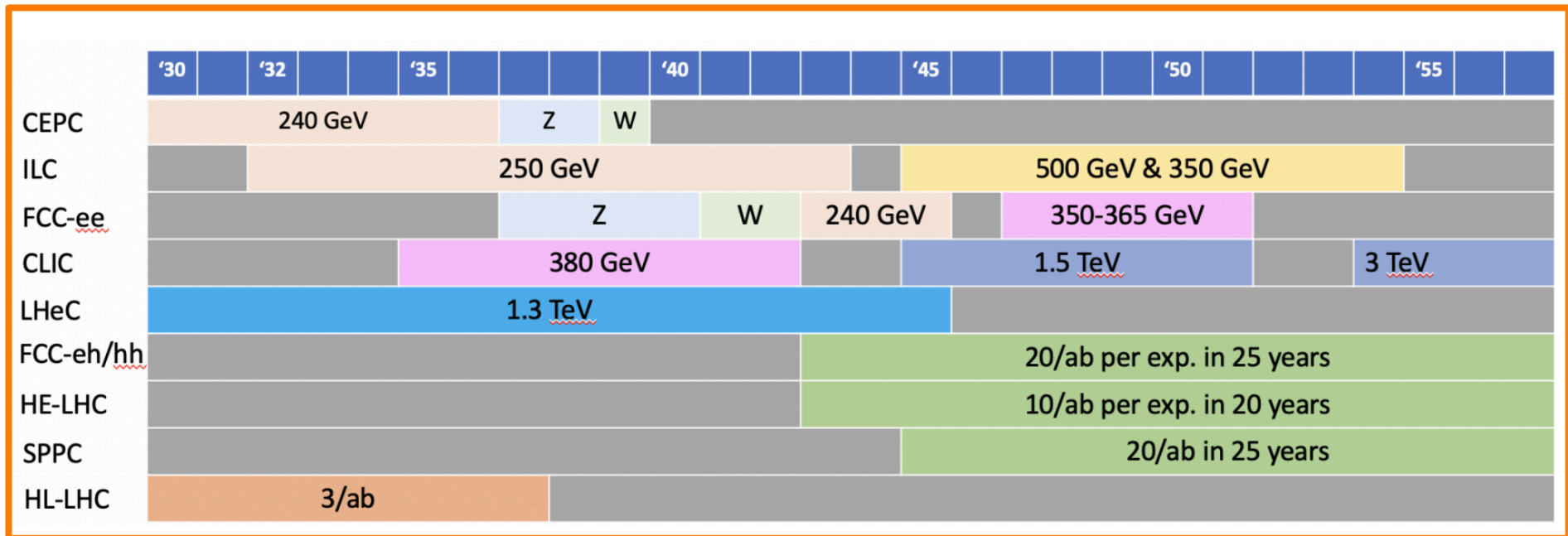
8 years preparation	10 years tunnel and FCC-ee construction	15 years FCC-ee operation	11 years preparation for FCC-hh and installation	25 years FCC-hh operation pp/PbPb/eh
2020-2028		2038-2053		2064-2090

将来加速器のスケジュール: 開始時点 T_0 から¹⁰

	T_0		+5		+10		+15		+20		...	+26
ILC	0.5/ab 250 GeV			1.5/ab 250 GeV			1.0/ab 500 GeV	0.2/ab $2m_{top}$	3/ab 500 GeV			
CEPC	5.6/ab 240 GeV			16/ab M_Z	2.6 /ab $2M_W$						SppC =>	
CLIC	1.0/ab 380 GeV				2.5/ab 1.5 TeV				5.0/ab => until +28 3.0 TeV			
FCC	150/ab ee, M_Z	10/ab ee, $2M_W$	5/ab ee, 240 GeV			1.7/ab ee, $2m_{top}$					hh,eh =>	
LHeC	0.06/ab			0.2/ab			0.72/ab					
HE-LHC	10/ab per experiment in 20y											
FCC eh/hh	20/ab per experiment in 25y											

NB: number of seconds/year differs: ILC 1.6×10^7 , FCC-ee & CLIC: 1.2×10^7 , CEPC: 1.3×10^7

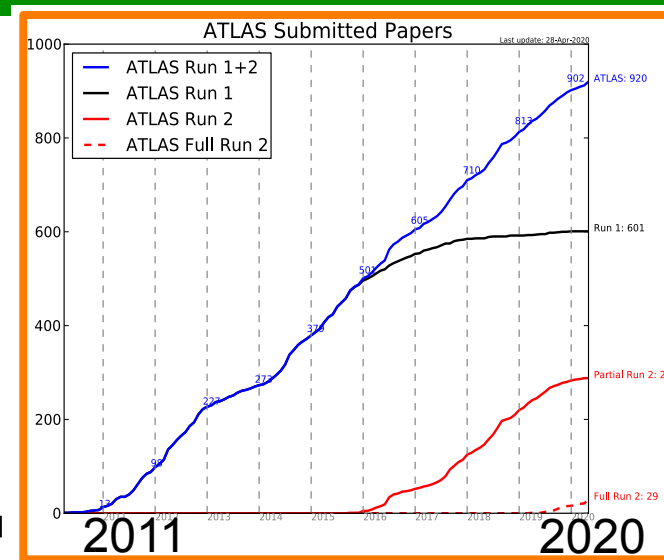
将来加速器のスケジュール:開始が最短の場合¹¹



ハドロンエネルギーフロンティアの物理:LHC

• 最高エネルギーを活かした研究展開

- データ収集: ATLASでは2000種類ものオンライン選別条件
- 多彩な物理を実現: SM, Higgs, SUSY, Exotics, top, B物理, HI, Di-bosons/Di-Higgs
- 論文10年間で920本, 国内PhD取得者~60名



• 高統計を活かした新手法の積極的導入

- 未知なるフェーズスペース・稀な事象に到達可能に
- CERNならではのMachine Learningの発展
- ...

• CERNでの国際交流

- 研究協力はもちろん
- 組織的な若手育成・キャリアサポート・技術継承、...



物理の話題に移ります

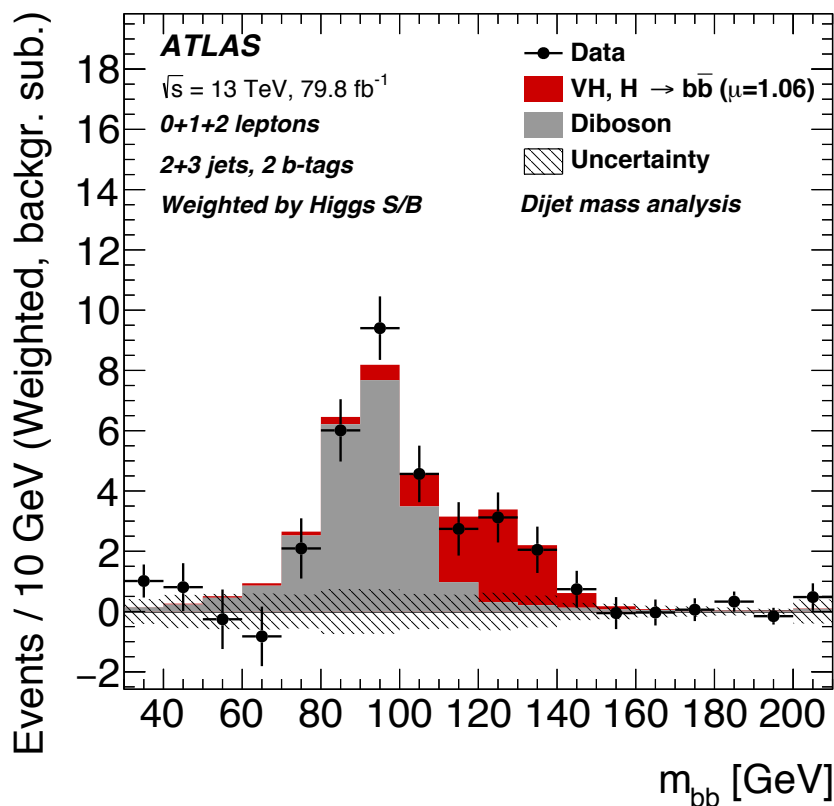
- 短い時間で到底全てをカバーしきれないので以下に焦点
 - *SM Electroweak physics*
 - *Beyond the Standard Model physics*

- *SM Electroweak physics at energy-frontier hadron colliders*
 - 1) Higgs結合: どの位の精度で測定可能か?
 - 2) EW超精密測定: 何がわかるか?
 - 3) Higgs場の構造: 解明する最善の方法は?

1) Higgs 結合定数: LHC, HL-LHC

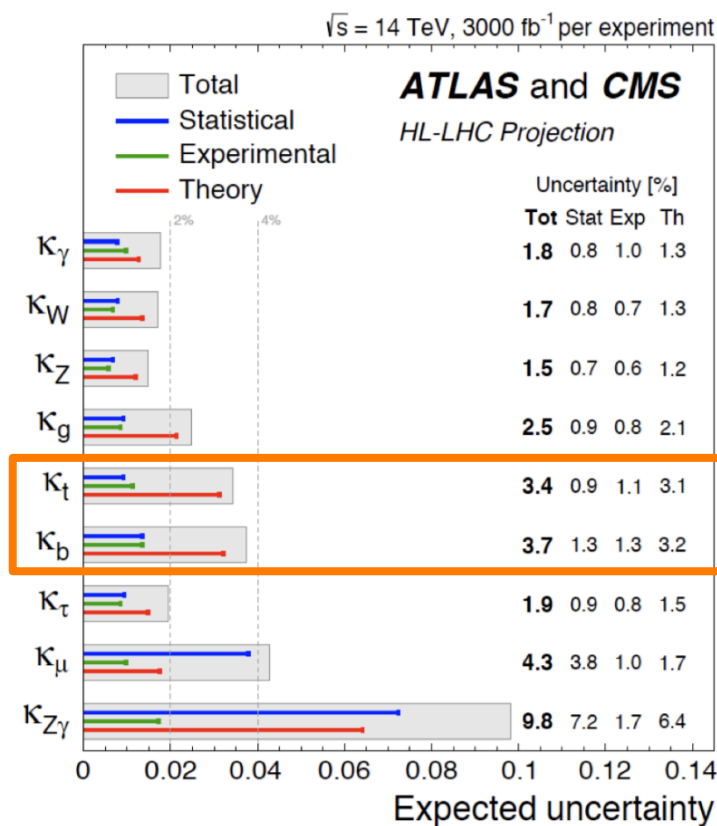
• 現状

- 発見後、結合測定が活発
- 現在までに、Higgsと第3世代 b/t-クォークや τ との結合を観測



• HL-LHCでの感度推定

- 主要な不定性は、多くの生成過程で、理論由来 (QCD corr.)
 - 現行の半分になると仮定



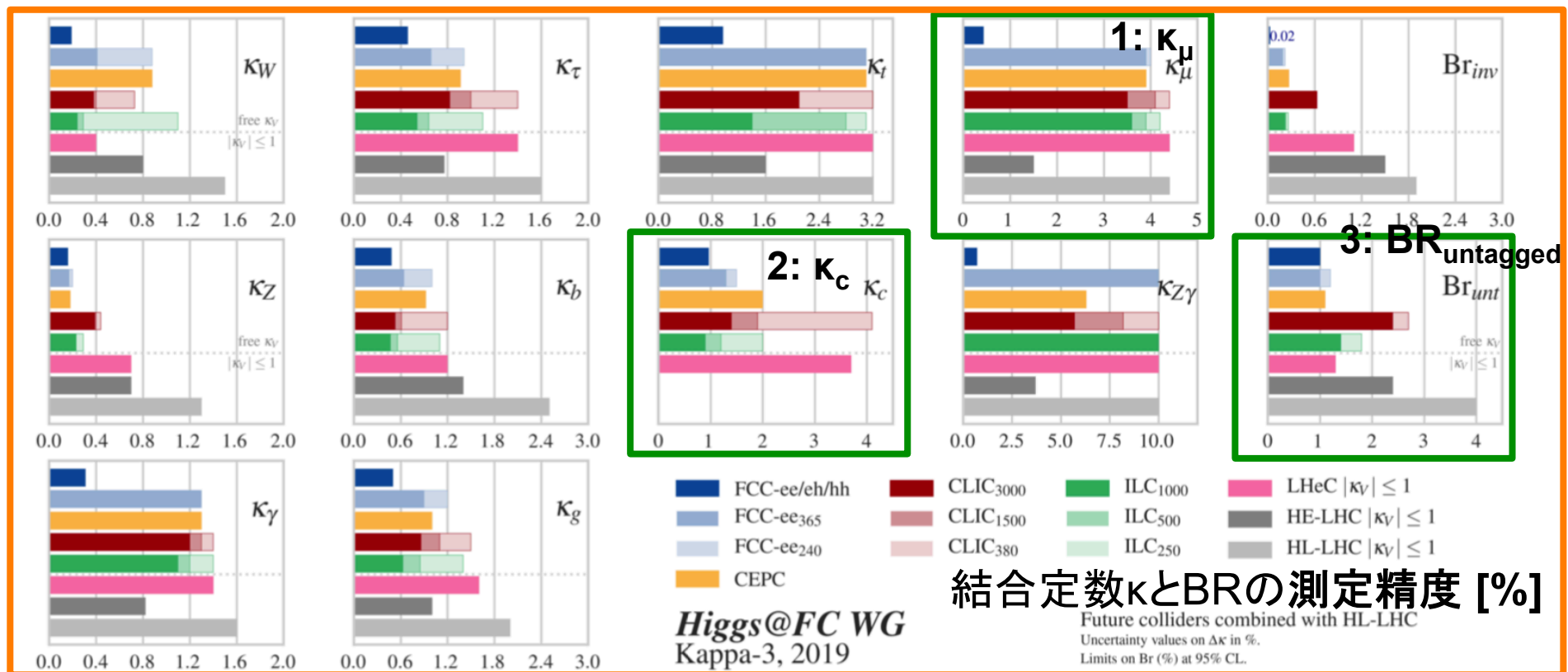
1) 結合定数 κ はどこまでわかるか?: 測定精度 ¹⁶

1: HL-LHC: 第3世代fermion・ゲージボソン1-3%。 $\mu \sim 4\% \rightarrow$ 世代理解

- ee colliders初期で、同等の精度。ee/ehで、2-10倍改善

2: κ_c : ee, ehでのみ可能

3: $BR_{\text{untagged}} \sigma(ZH)$: eeでモデルに依存せずに全崩壊幅を測定可能



2) EW超精密測定で何がわかるか？

- EW超精密測定量へのループ補正は、SMの強力な検証

- e.g. フェルミ定数 GF , Weinberg角 ($\sin 2\theta_W$), m_Z , m_W , m_H , m_{top} .
- 関係性は、SMで正確に記述
→ズレは新物理の寄与を示唆
- m_{top} , m_H は真空の安定性を検証

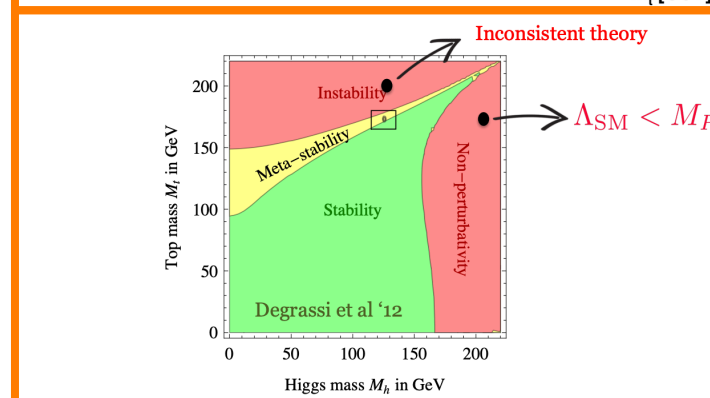
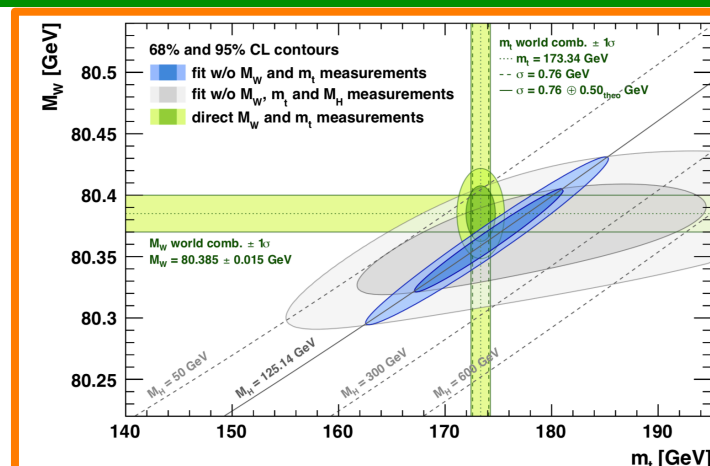
- Higgs物理のinputとしても重要

- HL-LHCでの感度

- W質量: goal is ~ 6 MeV (PDFの精度が重要)
- Top質量: 精度 0.2-1.2 GeV (pole質量への理論不定性が大)

- 将来加速器

- Z-pole (& Γ_Z)上で、Tera-Z プログラム at FCC-ee, Giga-Z at ILC (偏極も)



Method:	$t\bar{t}$ lepton+jets	t-channel single top	$m_{SV\ell}$	J/ψ	$\sigma_{t\bar{t}}$
Δm_{top} (GeV):	0.17	0.45	0.62	0.50	1.2

Standard \rightarrow ℓ +jets measurement Statistically dominated

Limited by theory uncertainty and luminosity measurement

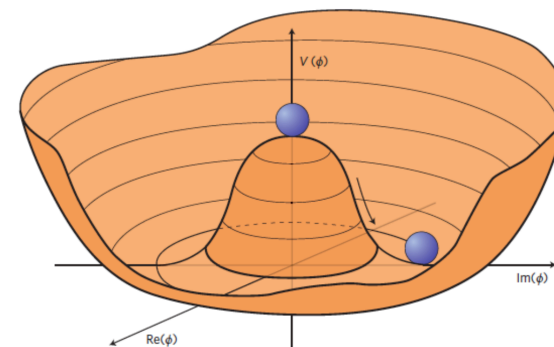
3) Higgs場の形状

- 電弱対称性の破れを直接的に証明できる

- 真空期待値付近でのHiggs場

$$V(h) = \frac{1}{2}m_H^2 h^2 + \lambda_3 v h^3 + \frac{1}{4}\lambda_4 h^4 \quad \text{with} \quad \lambda_3^{\text{SM}} = \lambda_4^{\text{SM}} = \frac{m_H^2}{2v^2},$$

- 真空期待値 $v = 1/\sqrt{\sqrt{2}G_F} \approx 246 \text{ GeV}$
- $m_H \approx 125 \text{ GeV}$



- BSMの効果で、 λ が変わりうる

$$\kappa_\lambda = \kappa_3 = \frac{\lambda_{\text{HHH}}}{\lambda_{\text{HHH}}^{\text{SM}}}$$

- 標準理論の脆弱部分である Higgs場構造を検証し、背後にある新物理に迫る

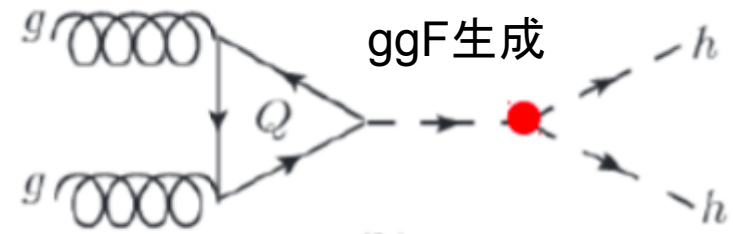
- 電弱バリオジェネシス・EW相転移を検証可能

- 宇宙空間干渉計 LISA (~2030), DECIGOによる、“初期宇宙からの重力波観測”でも可能

3) Higgs場を測定するには？ 自己結合の測定 ¹⁹

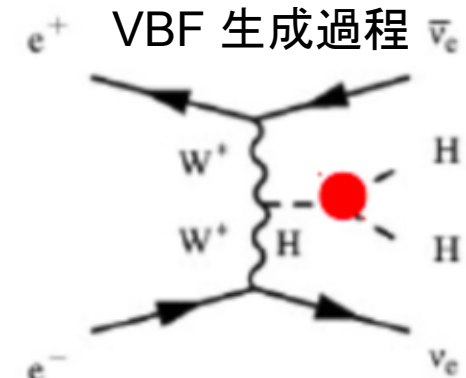
- Di-Higgs 生成
@ハドロンコライダー

- SMで稀崩壊 $\sigma(HH) \approx 0.01 \times \sigma(H)$
- 数々の直接測定が重要: $hh \rightarrow bbbb/bb\gamma\gamma/bb\tau\tau/\dots$
- HL-LHCのデザイン決定のベンチマーク



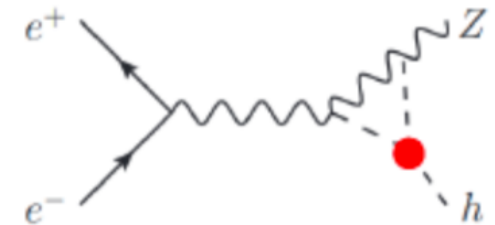
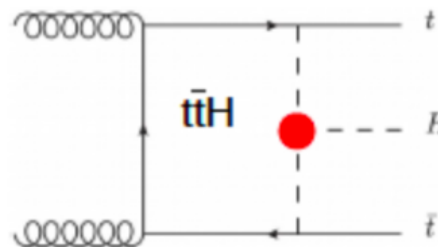
- Di-Higgs 生成
@レプトンコライダー

- 相補的な生成過程



- Single-Higgs 生成

- ループ効果で
間接的に感度



3) Higgs場を測定するには? κ_λ への感度

- **Di-Higgs 生成: HL-LHCで4 σ evidence. κ_λ 不定性50%**

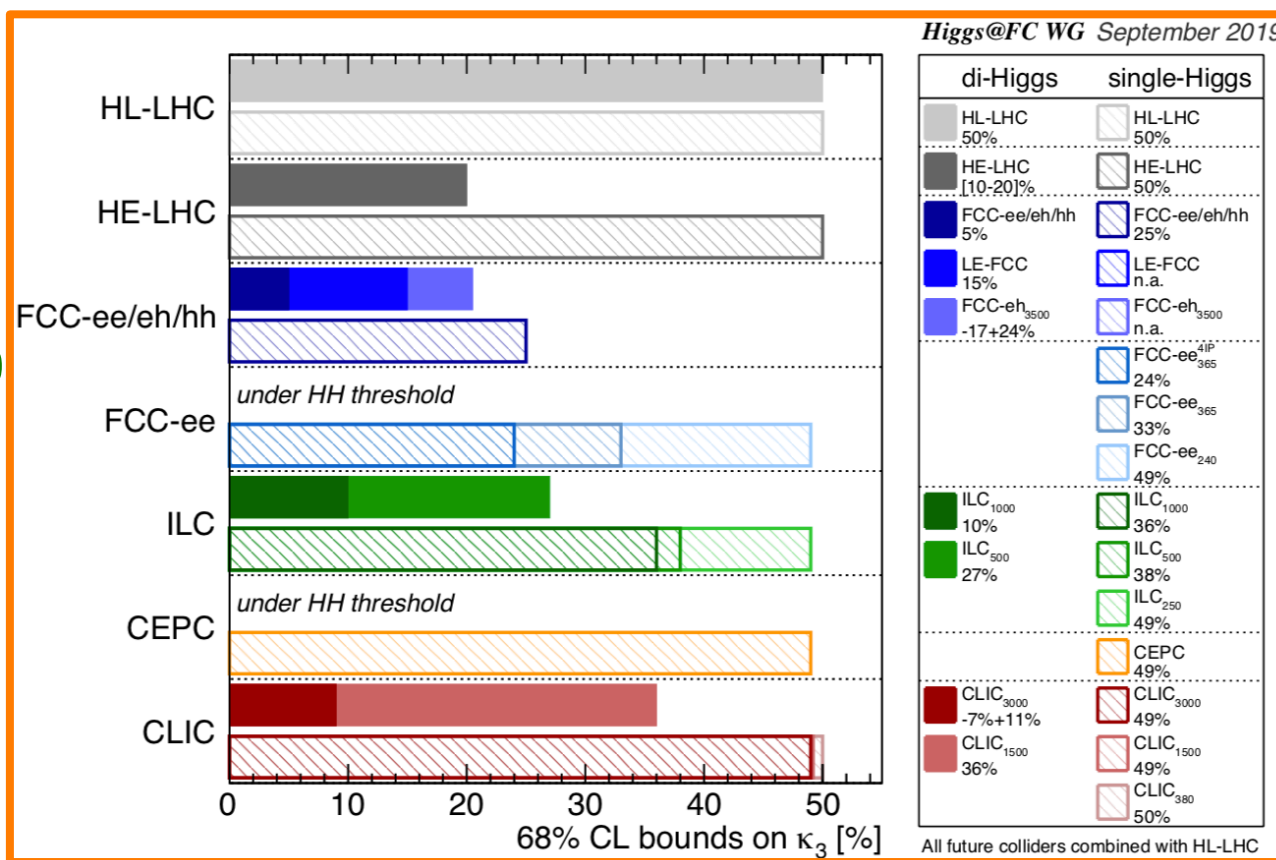
- 改善の見込み: HE-LHC (~15%), ILC500(~27%), CLIC1500 (~36%)
- 精密測定へ: CLIC3000 (~9%)、FCC-hh (~5%)

- **Single-Higgs:
HL-LHCで50%**

- 統合解析
(HL-LHCと):
FCC-ee365+ILC500
(~35%)
FCC-ee 検出器4つ
(~21%)

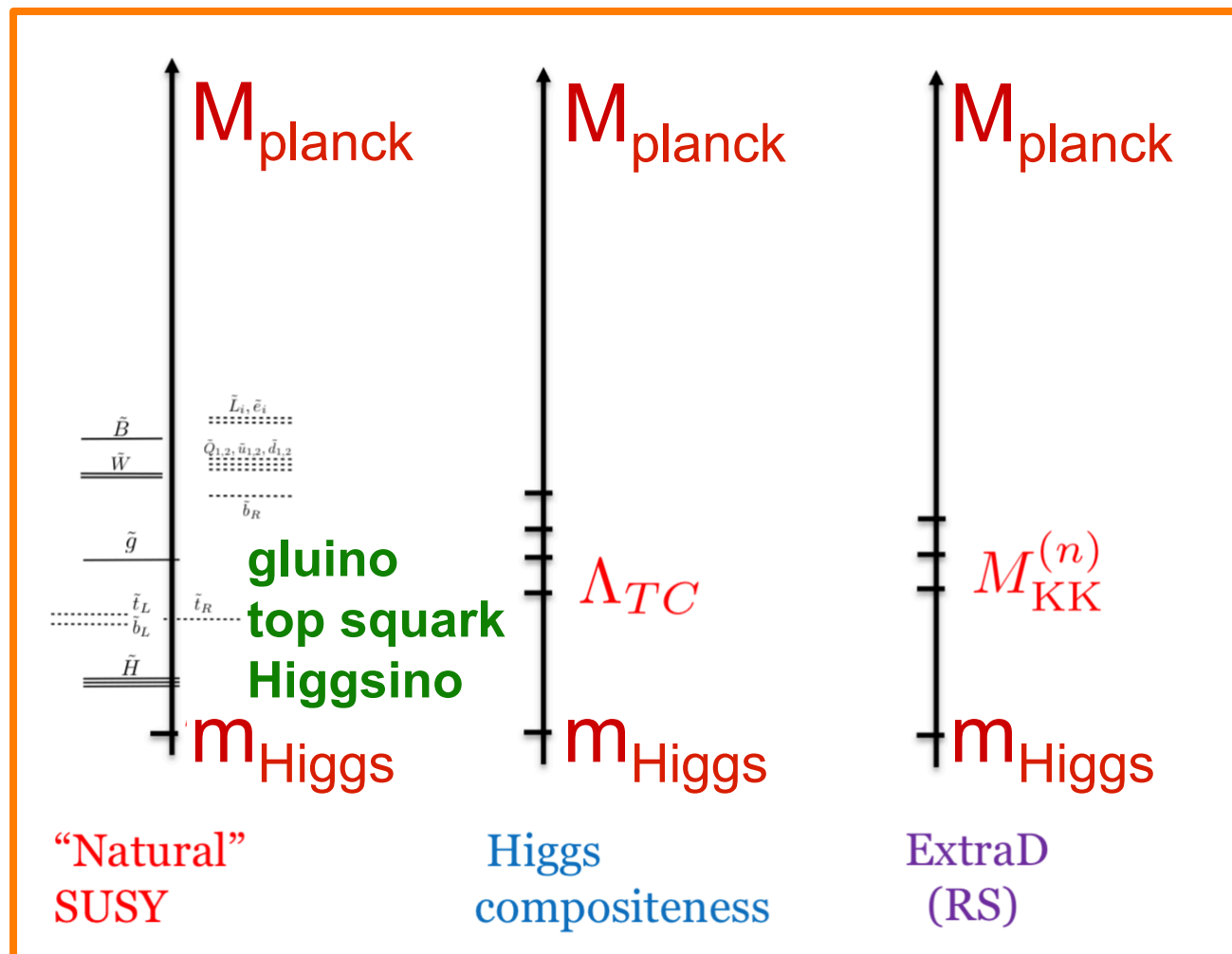
- 個別では高精度な
測定は難しい

→ 一次相転移のテスト
(精度 ~O(数10%))



-
- *Beyond the Standard Model physics at energy-frontier hadron colliders*

階層性問題を解決する候補



Canonical SUSY探索

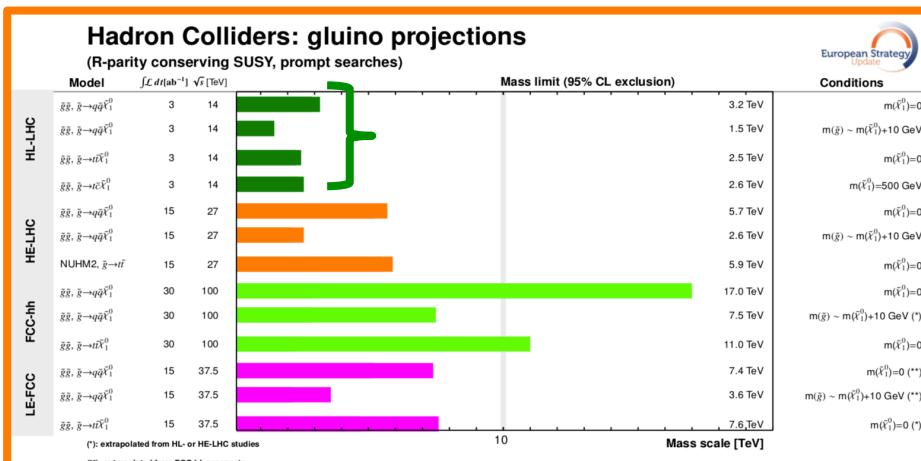
- 強い相互作用で生成されるSUSY: hhの守備範囲

Gluino:

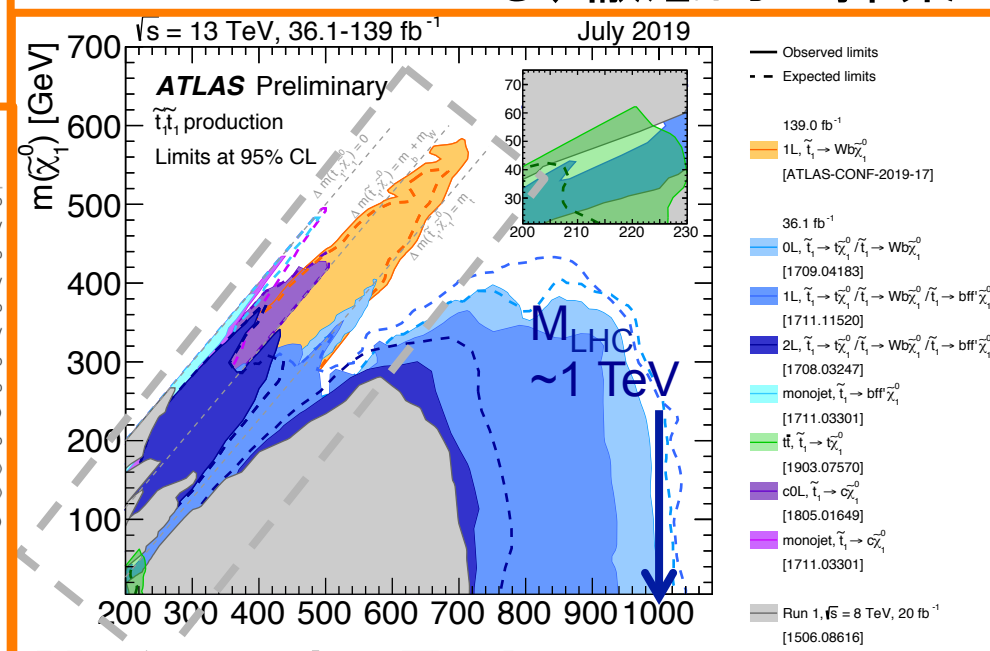
- LHC開始時から盛ん
- Run2: $M_{LHC} \sim 2.5$ TeVまで棄却 (jets+ E_T^{miss} 終状態)

Top squark:

- Higgs発見後から盛ん
- Run2: "holes"も、徹底的に探索



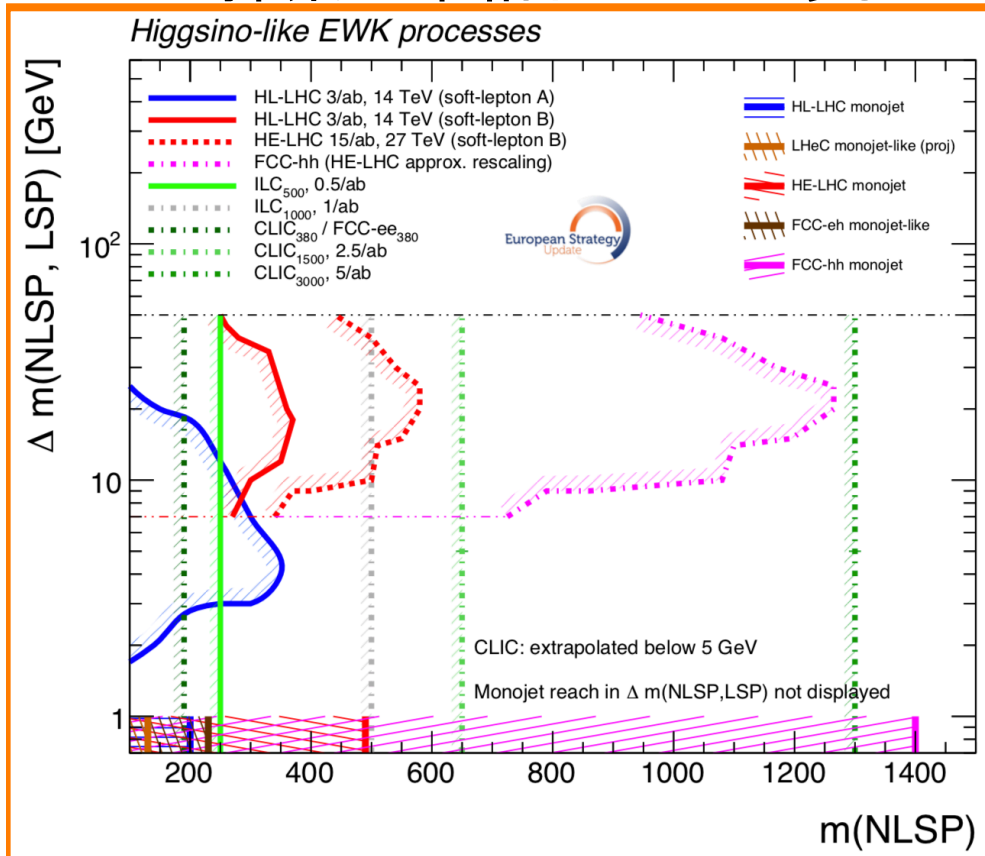
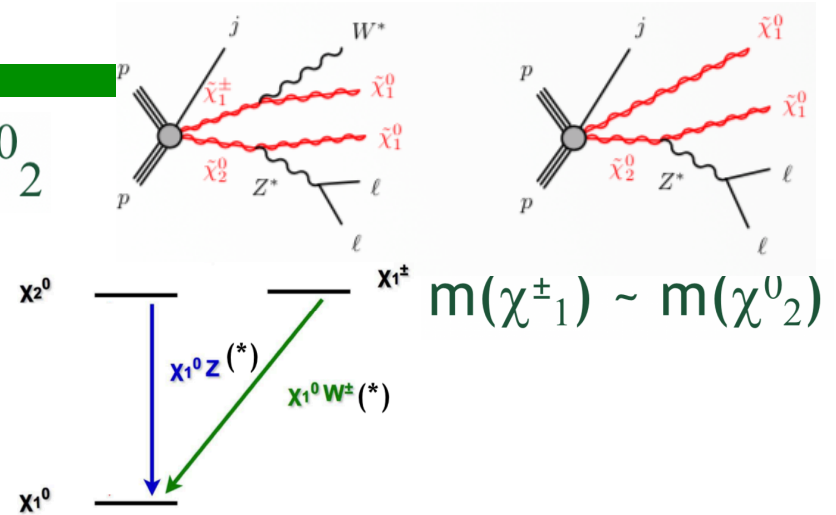
$M_{HL-LHC} \sim 3$ TeV
 HE-LHC: $\sim 2 \times M_{HL-LHC}$
 FCC-hh: $\sim 5 \times M_{HL-LHC}$



$M_{HL-LHC} \sim 1.7$ TeV
 HE-LHC: $\sim 2 \times M_{HL-LHC}$
 FCC-hh: $\sim 6 \times M_{HL-LHC}$

Higgsino EW SUSY探索

- 生成過程: $\chi^+_1\chi^-_1, \chi^\pm_1\chi^0_2, \chi^0_1\chi^0_2$
 - χ^\pm_1, χ^0_2 がNLSP
 - 生成断面積が小さく、探索が本格化しつつある



Higgsino-like LSP

- $\Delta M(\text{NLSP, LSP}) \sim O(\text{GeV})$
- 徹底的に探索

$M_{\text{HL-LHC}} \sim 350 \text{ GeV}$

$M_{\text{HE-LHC}} : \sim 1.5 \times M_{\text{HL-LHC}}$

$M_{\text{FCC-hh}} : \sim 1.3 \text{ TeV}$

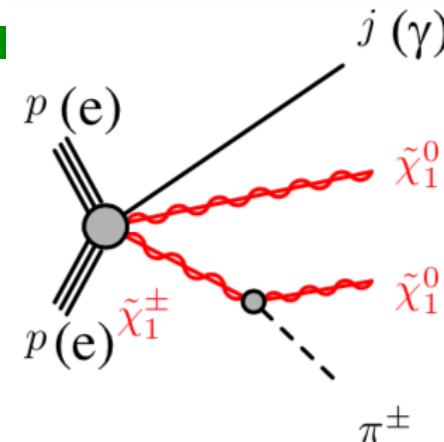
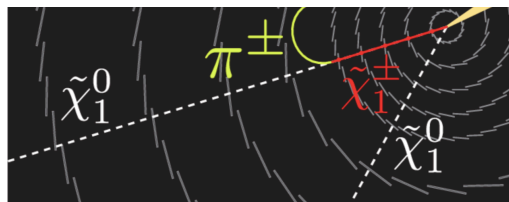
ILC: $\sqrt{s}/2$ までカバー

Mono-jet解析: ΔM 縮退をカバー

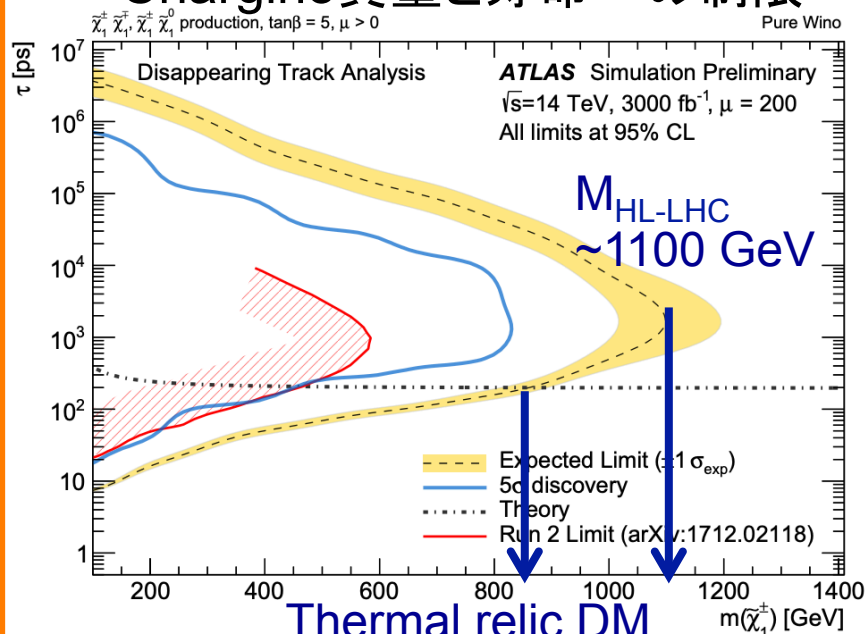
消失飛跡SUSY探索

Pure-Wino LSPシナリオ:

- $\Delta M(\text{NLSP}, \text{LSP})$ ほぼ縮退 $\sim 160 \text{ MeV}$
- **チャージーノ**が長寿命
 → **ソフト π^\pm** を伴い崩壊
 → 検出されず消失飛跡

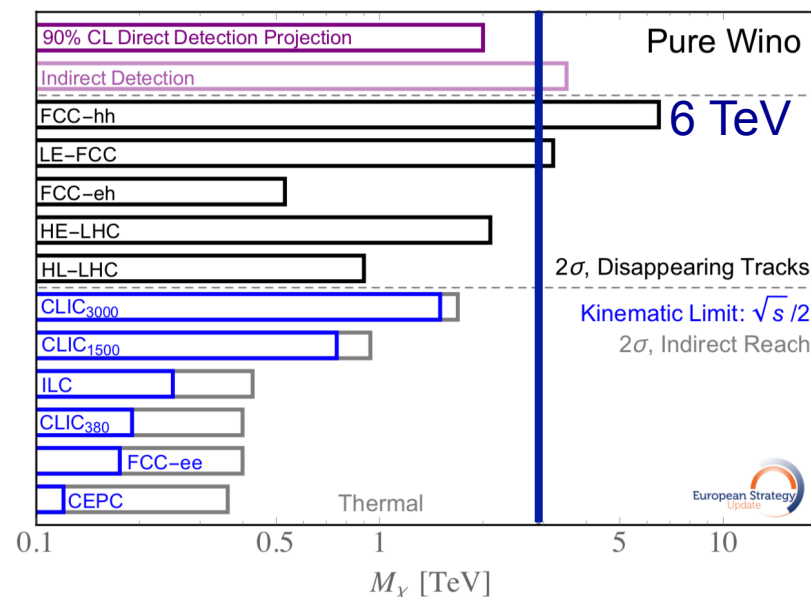


Chargino質量と寿命への制限



Thermal relic DM
 仮定: 830 GeV

Thermal relic DM仮定



WIMP + DM relic density の相性がよい点を、FCC-hh までで調べきる能力がある

Feebly-interacting particles 探索

- これまでの新物理探索の”主流“
 - (最高エネルギーを活かして) EWスケール以上のSM粒子・質量と結合する場合に焦点
- 新しい探索可能性 ”Hidden/Dark sector”
 - EWスケール以下でSM粒子とは相互作用が弱過ぎて検出されない場合。特に興味がある質量領域MeV and O(10) GeV

(Portal operatorsを通じて、SMに結合)

Portal	Coupling
Vector (Dark Photon, A_μ)	$-\frac{\epsilon}{2\cos\theta_w}F'_{\mu\nu}B^{\mu\nu}$
Scalar (Dark Higgs, S)	$(\mu S + \lambda_{HS}S^2)H^\dagger H$
Fermion (Sterile Neutrino, N)	$y_N LHN$
Pseudo-scalar (Axion, a)	$\frac{a}{f_a}F_{\mu\nu}\tilde{F}^{\mu\nu}, \frac{a}{f_a}G_{i,\mu\nu}\tilde{G}_i^{\mu\nu}, \frac{\partial_\mu a}{f_a}\bar{\psi}\gamma^\mu\gamma^5\psi$

- ATLAS/CMS実験内のみならず、CERNの“Physics Beyond Colliders”の枠組み(2016-)もあり、特化した実験(立案)が盛ん
 - Hidden sector with “beam dump”
 - Long-lived particles from LHC collisions “IP周り”

関連projects (beyond the LHC colliders)

• CERN内

Table 10.5: Projects considered in the PBC-BSM working group categorised in terms of their sensitivity to a set of benchmark models in a given mass range. The characteristics of the required beam lines, whenever applicable, are also displayed. Taken from the BSM report.

Proposal	Main Physics Cases	Beam Line	Beam Type	Beam Yield
sub-eV mass range:				
IAXO	Axions/ALPs (photon coupling)	axions from sun		–
JURA	Axions/ALPs (photon coupling)	laboratory	eV photons	–
CPEDM	p, d EDMs	EDM ring	p, d	–
LHC-FT	Axions/ALPs (gluon coupling) charmed hadrons EDMs	LHCb IP	p, d $7 \text{ TeV } p$	–
MeV-GeV mass range:				
SHiP	ALPs, Dark Photons, Dark Scalars LDM, HNLs, lepto-phobic DM, ...	BDF, SPS	$400 \text{ GeV } p$	$2 \times 10^{20}/5 \text{ yr}$
NA62++	ALPs, Dark Photons, Dark Scalars, HNLs	K12, SPS	$400 \text{ GeV } p$	up to $3 \times 10^{18}/\text{yr}$
NA64++	ALPs, Dark Photons, Dark Scalars, LDM $+ L_\mu - L_\tau$ $+ \text{CP, CPT, leptophobic DM}$	H4, SPS M2, SPS	$100 \text{ GeV } e^-$ $160 \text{ GeV } \mu$	$5 \times 10^{12} \text{ eot/yr}$ $10^{12}-10^{13} \text{ mot/yr}$
LDMX	Dark Photon, LDM, ALPs,...	H2-H8, T9	$40 \text{ GeV } \pi, K, p$	$5 \times 10^{12}/\text{yr}$
AWAKE++	Dark Photon	SLAC/eSPS	$8/16 \text{ GeV } e^-$	$10^{16}-10^{18} \text{ eot/yr}$
RedTop	Dark Photon, Dark scalar, ALPs	AWAKE	$30-50 \text{ GeV } e^-$	10^{16} eot/yr
MATHUSLA	Dark Photon, Dark scalar, ALPs	CERN PS	$1.8/3.5 \text{ GeV } p$	10^{17} pot
FASER	weak-scale LLPs, Dark Scalar, Dark Photon, ALPs, HNLs	ATLAS or CMS IP	$14 \text{ TeV } p$	3000 fb^{-1}
MilliQan	Dark Photon, Dark Scalar, ALPs, HNLs, B-L gauge bosons	ATLAS IP	$14 \text{ TeV } p$	3000 fb^{-1}
MilliQan	milli charge	CMS IP	$14 \text{ TeV } p$	$300-3000 \text{ fb}^{-1}$
CODEX-b	Dark Scalar, HNLs, ALPs, LDM, Higgs decays	LHCb IP	$14 \text{ TeV } p$	300 fb^{-1}
> TeV mass range:				
KLEVER	$K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$	P42/K12	$400 \text{ GeV } p$	$5 \times 10^{19} \text{ pot/5 yr}$
TauFV	LFV τ decays	BDF	$400 \text{ GeV } p$	$\mathcal{O}(2\%) \text{ of BDF } p$
CPEDM	p, d oEDMs	EDM ring	p, d	–
LHC-FT	Axions/ALPs (gluon coupling) charmed hadrons MDMs, EDMs	EDM ring LHCb IP	p, d $7 \text{ TeV } p$	–

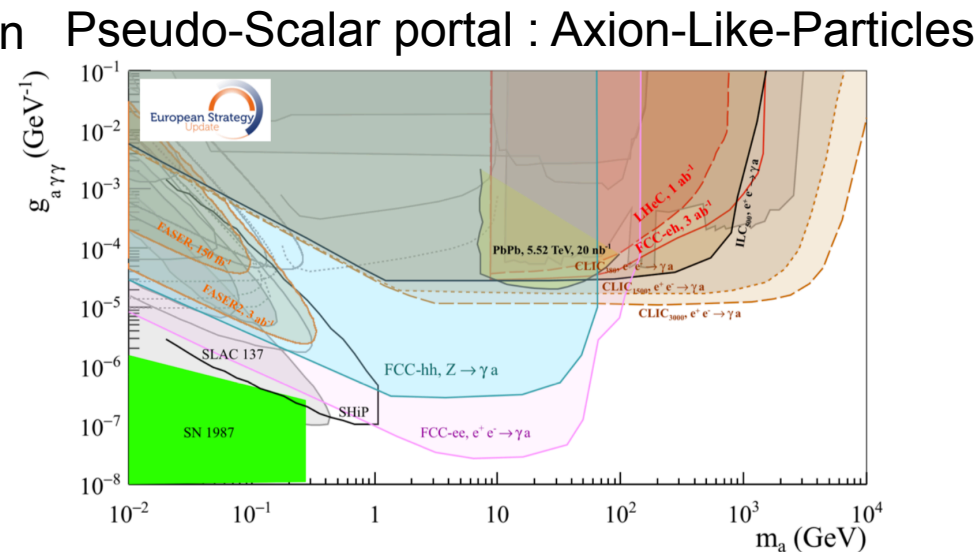
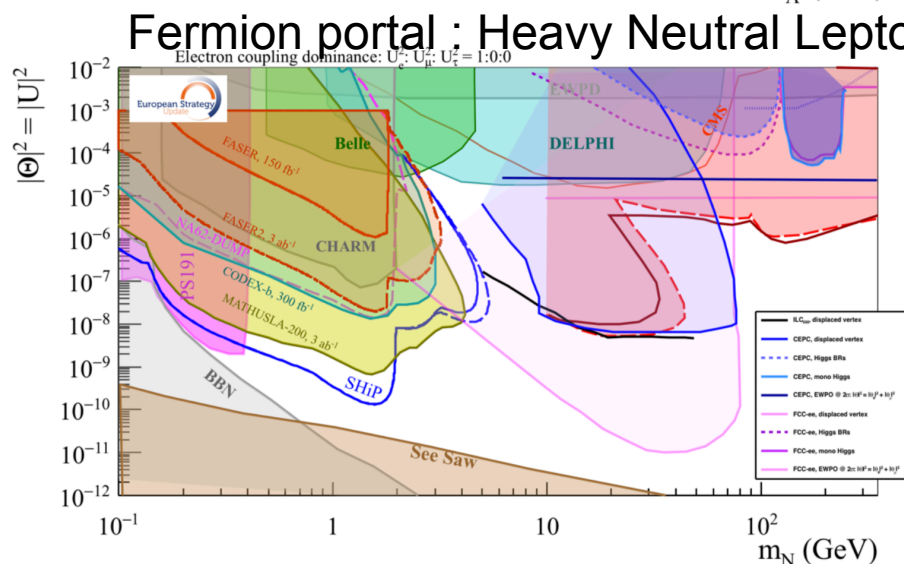
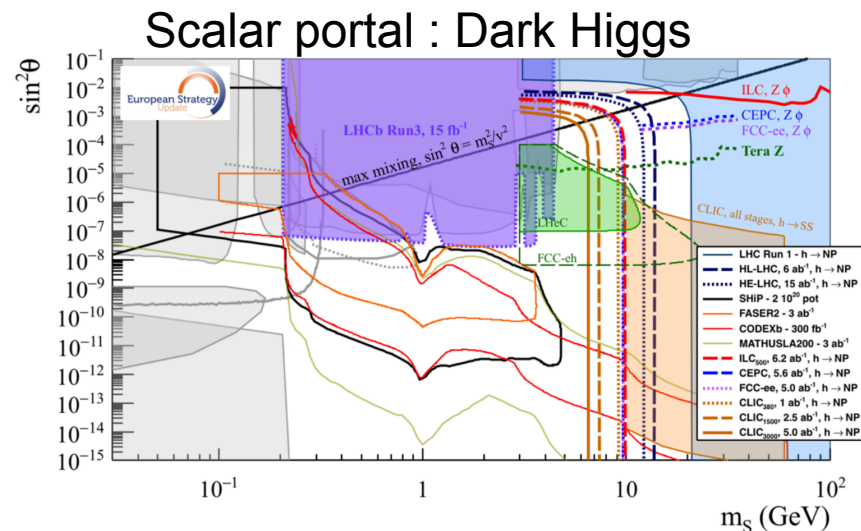
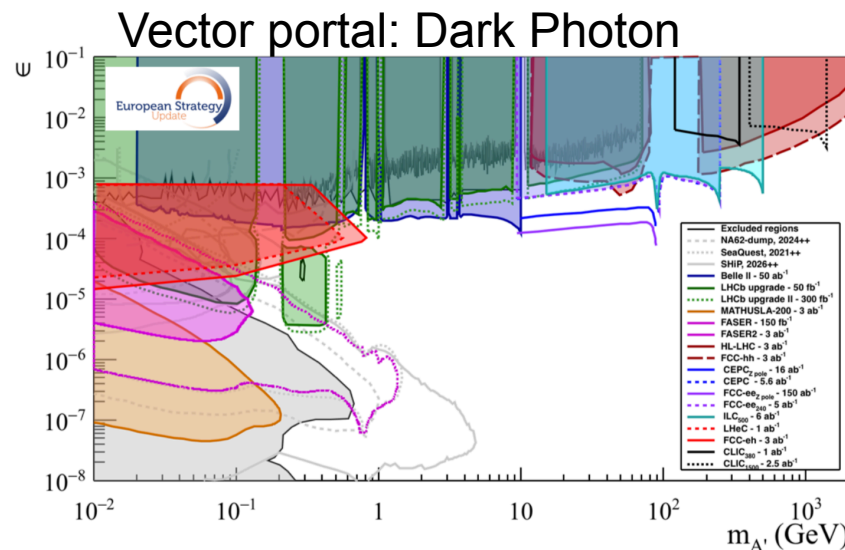
CERN外

Table 10.6: Selection of projects complementary to those considered by PBC-BSM working group. Note that the experiments are in different phases: proposals; construction; upgrades. (BD – beam dump; SX – slow extraction; DD – direct detection)

Proposal	Main Physics Cases	Beam Line	Beam Type	Beam Yield
sub-eV mass range:				
MADMAX	Axions	Lab: dielectric/ B field	cosmos	–
STAX	ALPs	LSW sub-THz photons	cosmos	–
MAGIS100→1K	Dark sector	Atom interferom. (FNAL)	cosmos	–
MeV-GeV mass range:				
DARKSIDE-20k →Argo	WIMP DD LAr	LNGS	cosmos	200 t.yr → 3000 t.yr
DARWIN	WIMP DD LXe	possibly LNGS	cosmos	200 t.yr
LUX-ZEPLIN	WIMP DD LXe	SURF	cosmos	15 t.yr
XENONnT	WIMP DD LXe	LNGS	cosmos	20 t.yr
CRESST-III Ph. 2	WIMP DD, A' CaWO_4	LNGS	cosmos	–
SuperCDMS	WIMP DD Ge	SNOLAB	cosmos	–
SEAQUEST BD	LDM	FNAL MI	$120 \text{ GeV } p \text{ SX}$	$1.44 \times 10^{18} \text{ pot/2 yr}$
MiniBooNE-DM	LDM	FNAL Booster	$8 \text{ GeV } p$	$1.9 \times 10^{20} \text{ pot}$
BDX	LDM, A'	JLAB	$11 \text{ GeV } e$	10^{22} eot
DarkLight	A'	JLAB	$100 \text{ MeV } e \text{ on } p$	5 mA
SENSEI	LDM	CCDs (FNAL/ SNOLAB)	cosmos	–
MAGIX	A'	MESA	$150 \text{ MeV } e$	$\sim 10^{35} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
MMAPS	$e^- e^+ \rightarrow \gamma A'$	Cornell synch.	$5.3 \text{ GeV } e^+ \text{ SX}$	$L_{\text{av}} = 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
BELLE-II	ALPS, A'	SuperKEKB	$e^- e^+ \sqrt{s} = 10.58 \text{ GeV}$	50 ab^{-1}
> TeV mass range:				
Mu3e I/II	CLFV $\mu^+ \rightarrow e^+ e^+ e^-$	PSI HiMB	μ	$2 \times 10^9 \text{ stopped } \mu/\text{s}$
MEG II	CLFV $\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$	PSI	μ	$\mathcal{O}(10^{10} \mu/\text{s}) \text{ to exp.}$
KOTO(+)	$K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$	J-PARC MR SX	$30 \text{ GeV } p$ $50 \rightarrow 100 \text{ kW}$	$\sim 10^8 \text{ K/spill}$ at 50 kW
Mu2e/Mu2e-II	CLFV $\mu^- N \rightarrow e^- N$	FNAL	$8/<4 \text{ GeV } p \rightarrow \mu$	$7.7 \text{ kW pot (Ph. I)}$ $6.7 \times 10^{17} \mu$
COMET I/II	CLFV $\mu^- N \rightarrow e^- N$	J-PARC MR	$8 \text{ GeV } p \rightarrow \mu$	$1.5 \times 10^{16} - 1.8 \times 10^{18} \text{ stopped } \mu$
Accelerator-driven ν experiments				
DUNE	ν	FNAL MR (PIP-II)	$60-120 \text{ GeV } p$	$1.1 \rightarrow 1.9 \times 10^{21} \text{ pot/yr}$
T2HK	ν	J-PARC MR	$30 \text{ GeV } p$	$\sim 10^{21} \text{ pot/yr}$

Feebly-interacting particles 探索の感度

- 系統的な調査が必要: hhコライダーでの感度・他実験とのシナジー

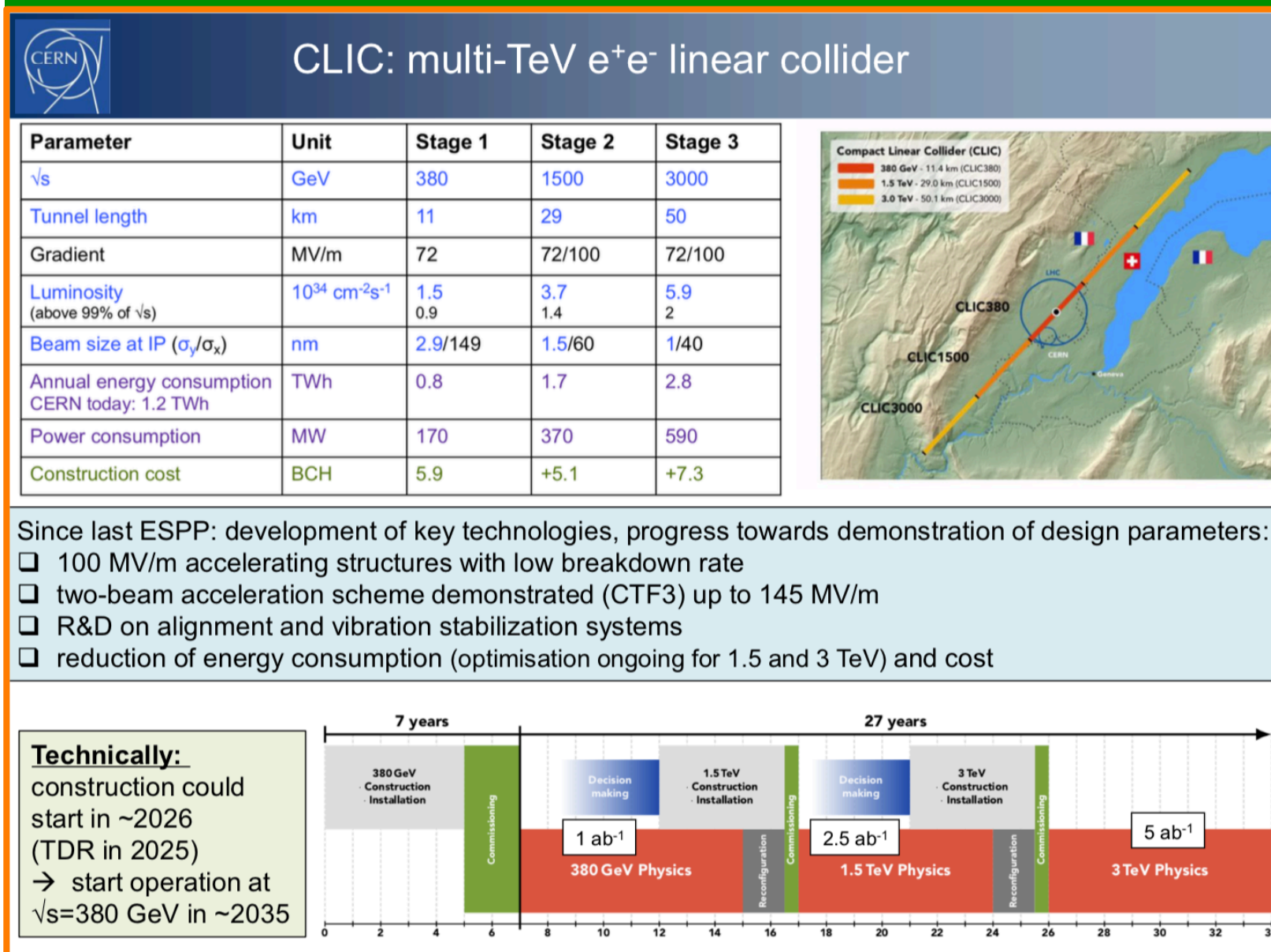


まとめ

- LHC継続中, HL-LHC建設中(2028-36), FCC-hh立案中
 - 最高エネルギーの汎用マシンで、TeVスケールの物理
- EW Higgs機構の全容解明で標準理論を超える物理探索
 - 1) Higgs結合測定: HL-LHC 第3世代fermion・ゲージボソン1-3%。
 $\mu \sim 4\%$ → 質量起源や世代の謎を解明
 - 2) EW超精密測定: ずれを観測 → 新物理の間接探索
 - 3) 自己結合: HL-LHC 精度50% → Higgs場構造・真空相転移を解明
→ e^+e^- ヒッグスファクトリーとのシナジーが重要
- 新粒子・新物理の直接探索
 - 1) SUSY 探索
 - 2) Feebly-interacting particles 探索
 - 3) Exotic 探索(複合Higgs, 新しいquarks, 新共鳴状態, Z'/W' , LFV, ...)
→ 他実験とのシナジーも一層重要

-
- *Backup slides*

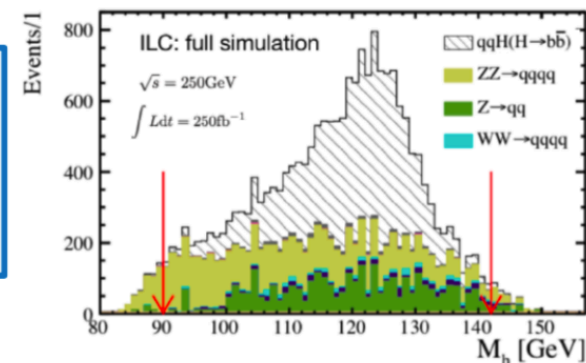
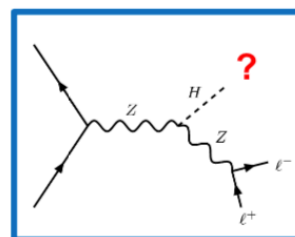
CLIC: preliminary/技術的スケジュール



Higgs width and/or untagged decays

Unique feature of lepton-lepton colliders:

- Detecting the Higgs boson without seeing decay: “recoil method”
- Measure ZH cross section with high precision without assumptions on decay
- Often interpreted as quasi-direct measurement of width



$$\frac{\sigma(e^+e^- \rightarrow ZH)}{\text{BR}(H \rightarrow ZZ^*)} = \frac{\sigma(e^+e^- \rightarrow ZH)}{\Gamma(H \rightarrow ZZ^*)/\Gamma_H} \simeq \left[\frac{\sigma(e^+e^- \rightarrow ZH)}{\Gamma(H \rightarrow ZZ^*)} \right]_{\text{SM}} \times \Gamma_H$$

$$\text{In kappa-framework: } \Gamma_H = \frac{\Gamma_H^{\text{SM}} \cdot \kappa_H^2}{1 - (\text{BR}_{inv} + \text{BR}_{unt})}$$

=> Will probe width with 1-2% precision

Collider	$\delta\Gamma_H$ (%) from Ref.	Extraction technique standalone result	$\delta\Gamma_H$ (%) kappa-3 fit
ILC ₂₅₀	2.4	EFT fit [3]	2.4
ILC ₅₀₀	1.6	EFT fit [3,11]	1.1
CLIC ₃₅₀	4.7	κ -framework [85]	2.6
CLIC ₁₅₀₀	2.6	κ -framework [85]	1.7
CLIC ₃₀₀₀	2.5	κ -framework [85]	1.6
CEPC	3.1	$\sigma(ZH, \nu\bar{\nu}H)$, $\text{BR}(H \rightarrow Z, b\bar{b}, WW)$ [90]	1.8
FCC-ee ₂₄₀	2.7	κ -framework [1]	1.9
FCC-ee ₃₆₅	1.3	κ -framework [1]	1.2

arXiv:1905.03764