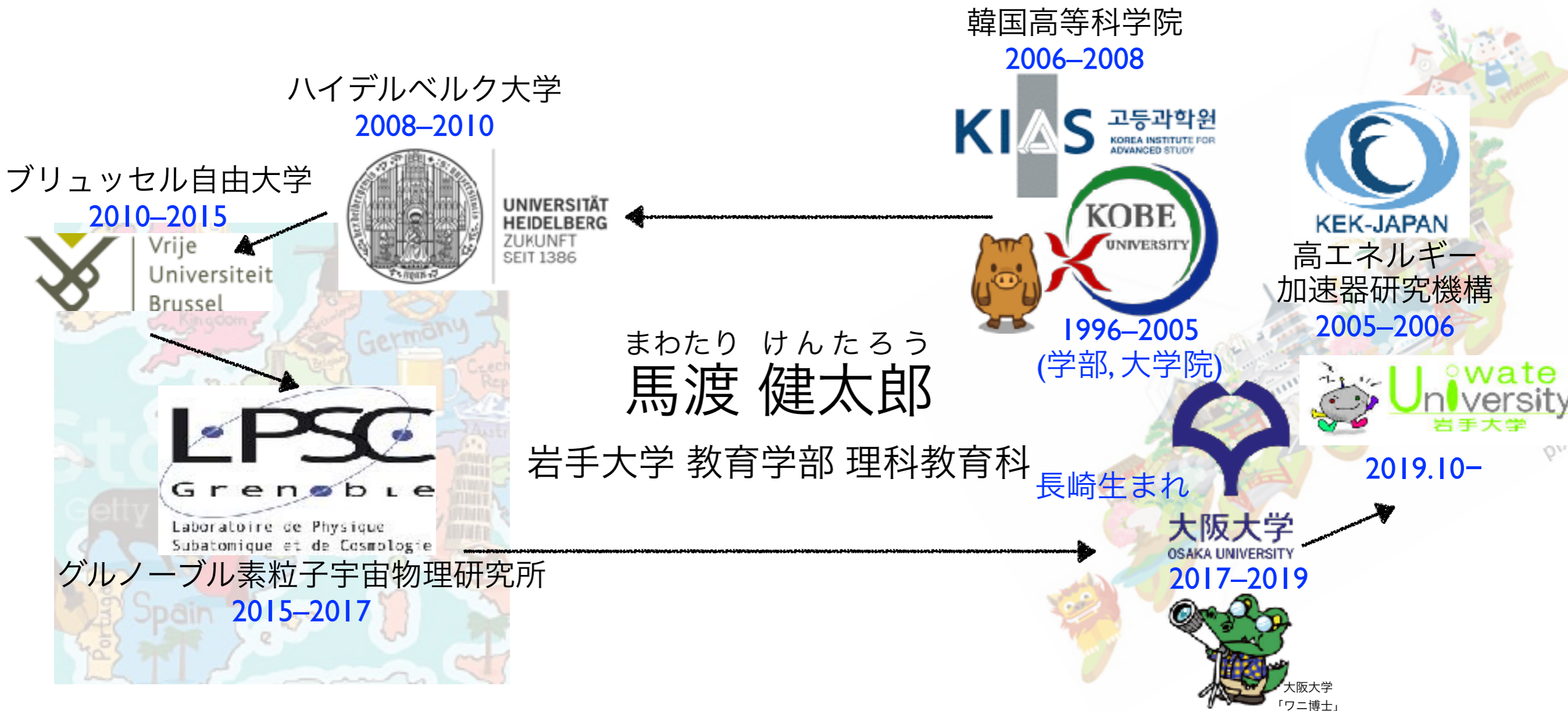
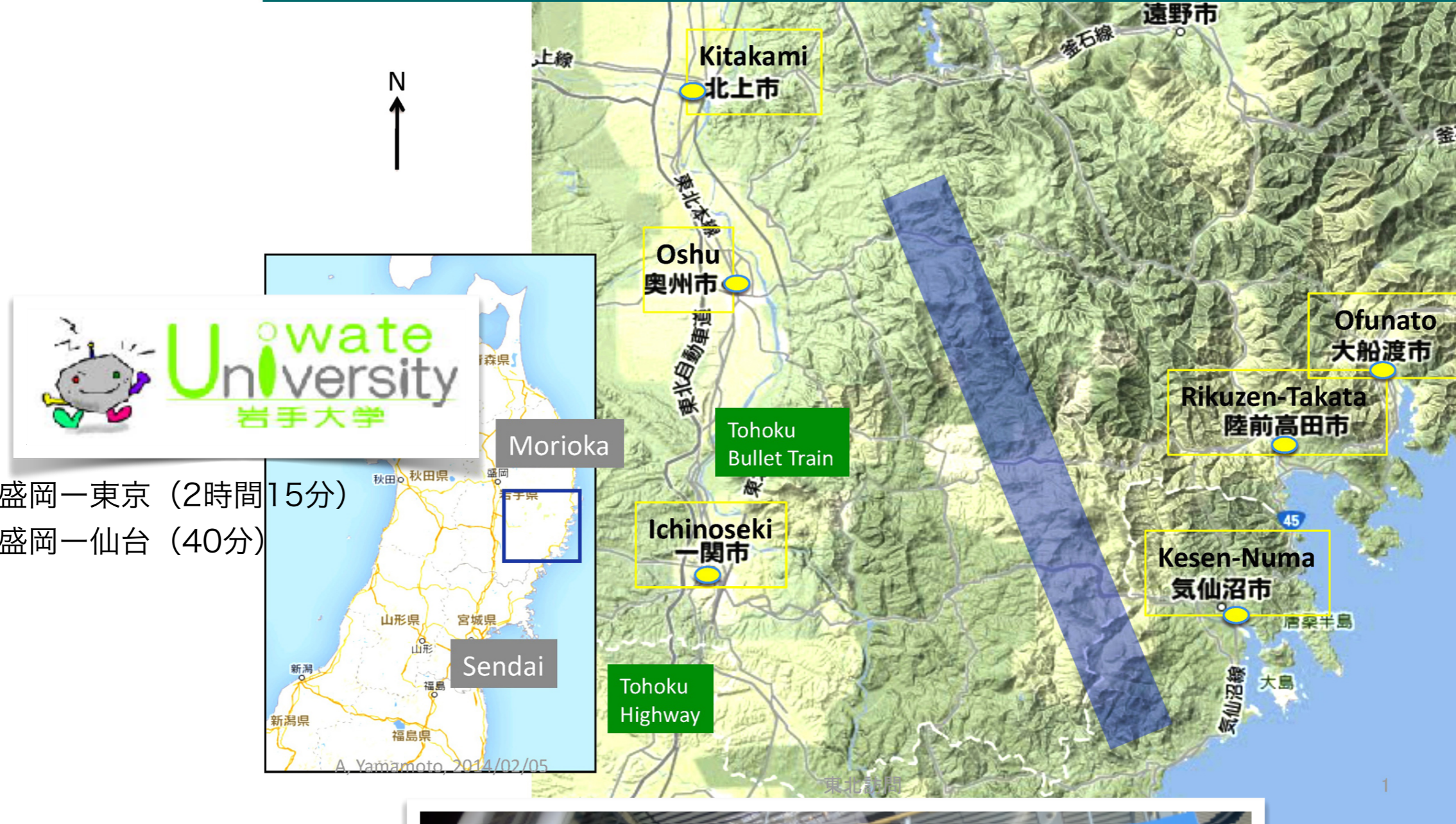


# 将来電子・陽電子コライダーの物理



# ILC Candidate site in Kitakami, Tohoku



盛岡一東京 (2時間15分)

盛岡一仙台 (40分)



@ アイーナ (盛岡駅横)

ILC (International Linear Collider)

=

Higgs factory (ヒッグス工場)

1964年

2012年 2013年

# ヒッグス粒子の予言、発見、ノーベル賞、そして...

岩手日報

2024年(令和6年)4月11日(木曜日)

総合 (4)

## 素粒子「最後のピース」予言

ピーター・ヒッグスさんが提唱したヒッグス粒子は、現代の素粒子物理学に欠かせない重要な素粒子だが、未発見の状態が続き、理論を完成させるパズルの「最後のピース」と例えられてきた。発見により、現在では粒子の詳細な性質を調べようと新たな研究段階に入っている。

【本記1面】

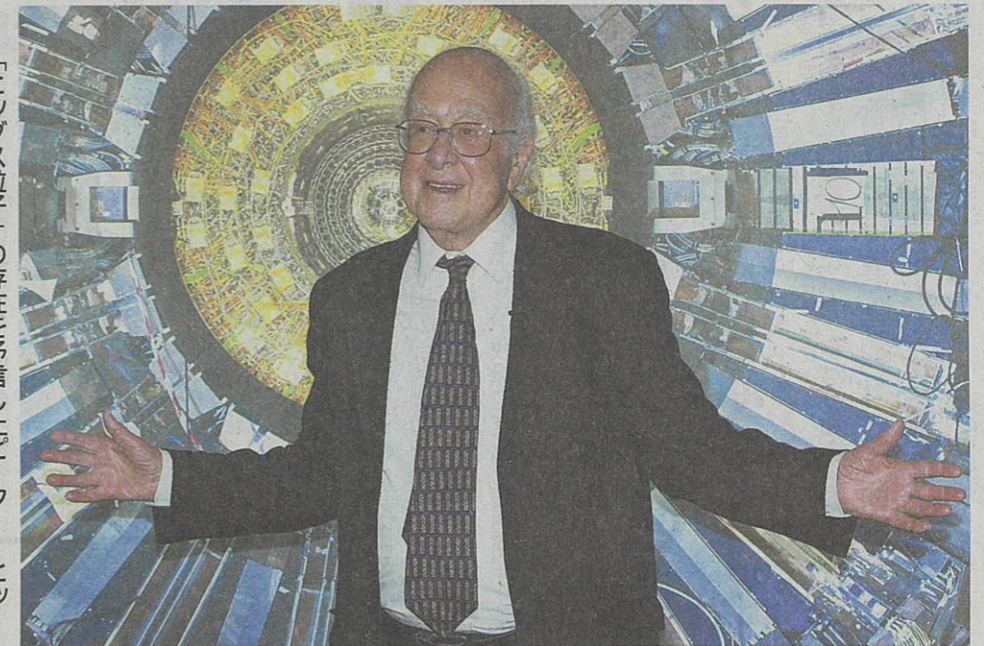
ヒッグス粒子は宇宙誕生から間もなくして生まれ、空間を海のように満たしたとされる。海の中では体の自由が利かないと同様、それまで光速で飛んでいた素粒子が動きづらくなり、この動きづらさが質量のもとと考えられている。

欧州合同原子核研究所(CERN)は巨大加速器で宇宙誕生直後の状態を模擬してその姿をたたく出そうと計画。素粒子物理学の最も基本的な理論で17種類あるとされ、未発見だった最後の素粒子を12年に発見した。

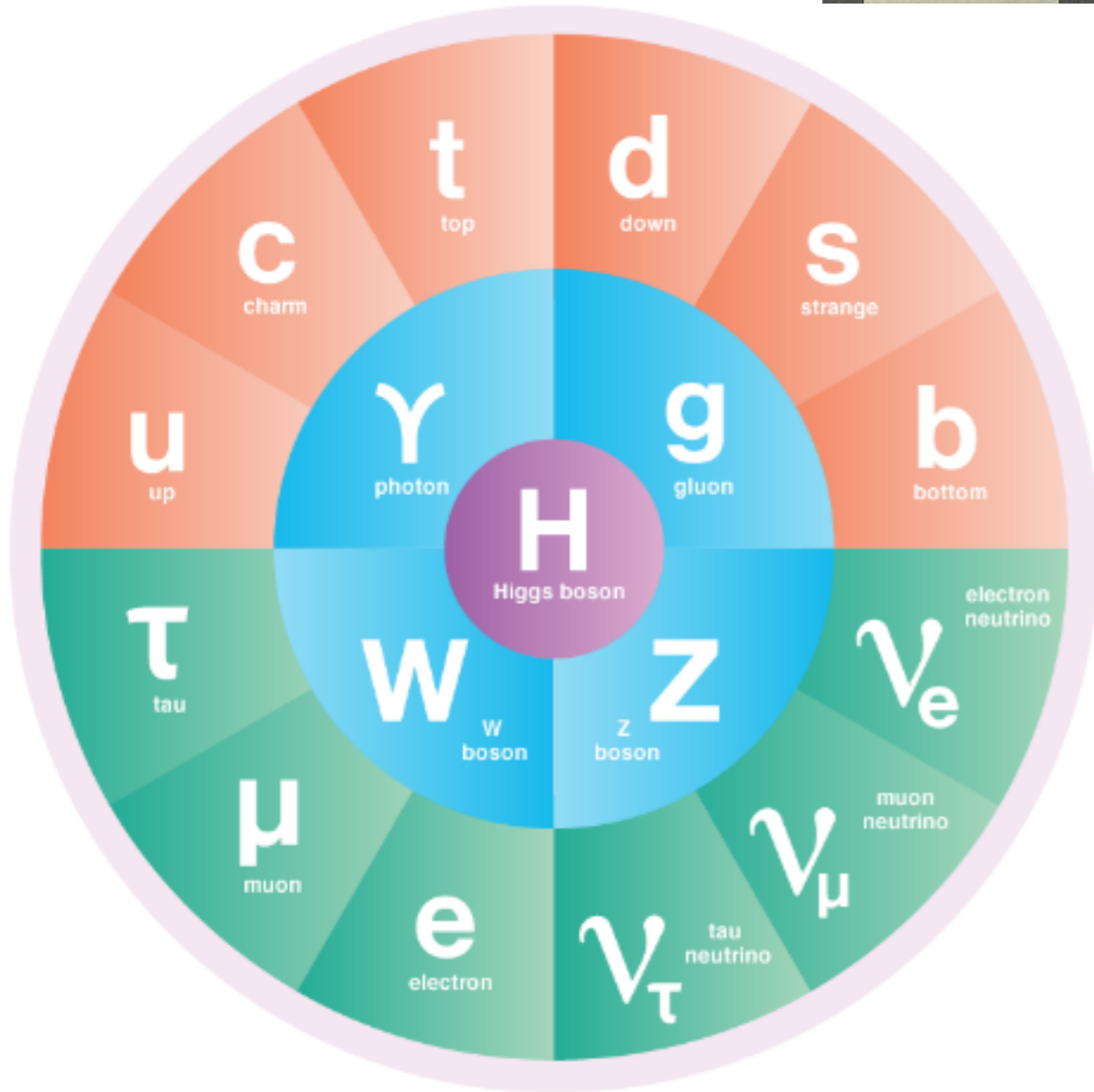
ヒッグス粒子の性質や種類など詳細を調べるのはこれからだ。宇宙には暗黒物質などこれまでの理論では正体が分からないものがあることが確実視されており、研究が進められている。

### P・ヒッグスさん死去

### 物理学 新たな研究段階に



「ヒッグス粒子」の存在を予言したピーター・ヒッグスさん。2013年12月、ロンドン(Sean Dempsey/英PA通信提供・AP共同)



● QUARKS ● LEPTONS ● BOSONS ● HIGGS BOSON

2013 NOBEL PRIZE IN PHYSICS

François Englert  
Peter W. Higgs



© The Nobel Foundation. Photo: Lovisa Engblom.

**BROKEN SYMMETRY AND THE MASS OF GAUGE VECTOR MESONS\***

F. Englert and R. Brout

Faculté des Sciences, Université Libre de Bruxelles, Bruxelles, Belgium

(Received 26 June 1964)

**BROKEN SYMMETRIES, MASSLESS PARTICLES AND GAUGE FIELDS**

P. W. HIGGS

Tait Institute of Mathematical Physics, University of Edinburgh, Scotland

Received 27 July 1964



"for the theoretical discovery of a mechanism that contributes to our understanding of the origin of mass of subatomic particles, and which recently was confirmed through the discovery of the predicted fundamental particle, by the ATLAS and CMS experiments at CERN's Large Hadron Collider" [<http://www.nobelprize.org>]

## ヒッグス粒子の発見、ノーベル賞、一方その頃私は...

### 「功績に報いるため」 ILC誘致実現誓う

#### 県内関係者、惜しむ声

「ヒッグス粒子」の存在を予言し、2013年のノーベル物理学賞を受賞した英エディンバラ大名誉教授のピーター・ヒッグスさんの訃報が伝わった10日、国際リニアコライダー（ILC）誘致に取り組む本県関係者から功績をたたえ、惜しむ声が上がった。

岩手大教育学部の馬渡健太郎教授(47)は、ヒッグス粒子が発見された12年当時、ヒッグスさんと同時期に粒子の存在を予言したフランソワ・アングレール氏と同じブリュッセル自由大

(ベルギー)に在籍し、13年に同氏のノーベル物理学賞が決まった場面にも立ち会った。

馬渡教授は「ヒッグス粒子が発見された時、素粒子物理学のすごさとロマンを感じた。自分の理論が将来的に証明される可能性もあるという希望を与えてくれた」と感謝する。

岩手、宮城両県にまたがる北上山地(北上高地)が候補地となるILCは、ヒッグス粒子を量産して研究するヒッグスファクトリーとして期待されている。

県ILC推進協議会長の谷村邦久・県商工会議所連合会長は「ヒッグス粒子の理論発表から発見まで48年かかった。われわれのILC誘致実現も手の届くところまでできた。ヒッグスさんのご功績に報いるためにも、活動を加速させ頑張る」と見据えた。

東北ILC事業推進センター代表の鈴木厚人県立大学長は「ご冥福をお祈り申し上げます。ヒッグス粒子の発見が宇宙研究の道を開いた。ILCを実現させ、ヒッグス粒子の研究を進めて宇宙の謎のさらなる解明に貢献したい」と話した。

# 講義の内容

## The International Linear Collider: Report to Snowmass 2021

THE ILC INTERNATIONAL DEVELOPMENT TEAM AND THE ILC COMMUNITY

### ABSTRACT

The International Linear Collider (ILC) is on the table now as a new global energy-frontier accelerator laboratory taking data in the 2030's. The ILC addresses key questions for our current understanding of particle physics. It is based on a proven accelerator technology. Its experiments will challenge the Standard Model of particle physics and will provide a new window to look beyond it. This document brings the story of the ILC up to date, emphasizing its strong physics motivation, its readiness for construction, and the opportunity it presents to the US and the global particle physics community.

|   |            |
|---|------------|
| <b>8 ILC Physics Measurements at 250 GeV</b>    | <b>165</b> |
| 1 Higgs – conventional decays . . . . .         | 165        |
| 8.1.1 Zh cross-section and Higgs mass . . . . . | 167        |
| 8.1.2 Hadronic decays . . . . .                 | 167        |
| 8.1.3 Leptonic decays . . . . .                 | 169        |
| 8.1.4 Electroweak boson decays . . . . .        | 169        |
| 8.1.5 CP properties . . . . .                   | 170        |
| 8.2 Higgs – exotic decays . . . . .             | 170        |
| 8.3 Triple gauge couplings . . . . .            | 174        |
| 8.4 Precision QCD . . . . .                     | 177        |

**16章、368ページのうち  
主に8.1章のみ**

arXiv:2203.07622v3 [physics.acc-ph] 16 Jan 2023

# 標準模型が答えてくれない "Big Physics Questions"

|   |            |
|---|------------|
| <b>13 Big Physics Questions Addressed by ILC</b>                      | <b>261</b> |
| 13.1 Can the Standard Model be exact to very high energies? . . . . . | 261        |
| 13.2 Why is there more matter than antimatter? . . . . .              | 264        |
| 13.3 What is the dark matter of the universe? . . . . .               | 265        |
| 13.4 What is the energy scale of new physics? . . . . .               | 267        |
| 13.5 Why is electroweak symmetry broken? . . . . .                    | 270        |
| <br>  |            |
| <b>14 ILC and Models of Physics Beyond the Standard Model</b>         | <b>273</b> |
| 14.1 ILC and dark matter . . . . .                                    | 273        |
| 14.2 ILC and supersymmetry . . . . .                                  | 275        |
| 14.2.1 Direct SUSY particle production . . . . .                      | 275        |
| 14.2.2 Observation of SUSY effects on the Higgs boson . . . . .       | 278        |
| 14.3 ILC and composite Higgs fields . . . . .                         | 278        |
| 14.4 ILC and flavor . . . . .   | 280        |
| 14.5 Mass Reach of Precision Higgs Measurements . . . . .             | 281        |
| 14.6 The Higgs Inverse Problem . . . . .                              | 283        |





Contents lists available at ScienceDirect

# Physics Letters B

www.elsevier.com/locate/physletb



## Determining spin through quantum azimuthal-angle correlations

Matthew R. Buckley<sup>a,b,c,d</sup>, Seong Youl Choi<sup>e,\*</sup>, Kentarou Mawatari<sup>f,g</sup>, Hitoshi Murayama<sup>a,b,c</sup>

<sup>a</sup> Department of Physics, University of California, Berkeley, CA 94720, USA

<sup>b</sup> Theoretical Physics Group, LBNL, Berkeley, CA 94720, USA

<sup>c</sup> IPMU, University of Tokyo, 5-1-5 Kashiwa-no-ha, Kashiwa, Chiba 277-8568, Japan

<sup>d</sup> California Institute of Technology, Pasadena, CA 91125, USA<sup>1</sup>

<sup>e</sup> Department of Physics and RIPC, Chonbuk National University, Jeonju 561-756, Republic of Korea

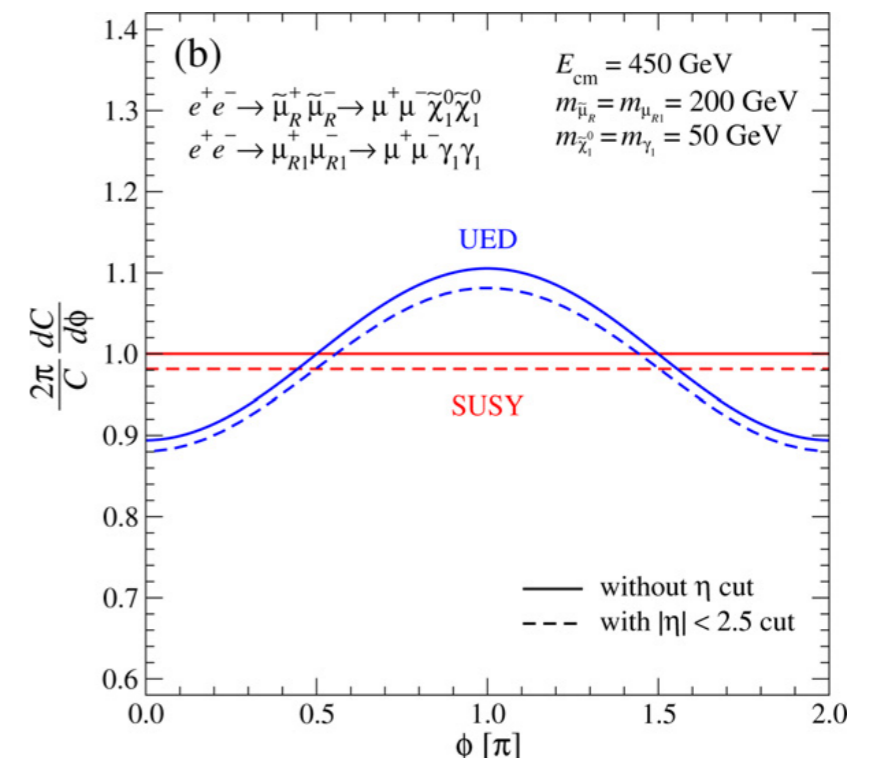
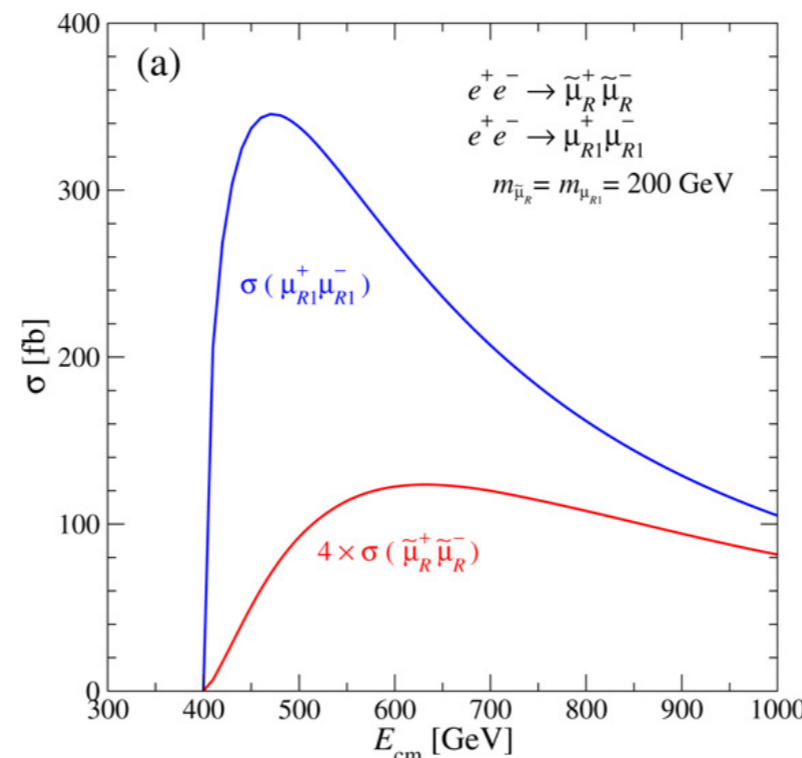
<sup>f</sup> School of Physics, Korea Institute for Advanced Study, Seoul 130-722, Republic of Korea

<sup>g</sup> Institut für Theoretische Physik, Universität Heidelberg, Philosophenweg 16, D-69120 Heidelberg, Germany<sup>2</sup>

UED (Universal Extra Dimension 余剰次元)

SUSY (SUperSYmmetry 超対称性)

LHC実験が始まる前は、  
新粒子発見の期待に胸を  
膨らませ、モデルを作  
成、断面積を計算・シ  
ミュレーションをしてモ  
デルの比較・選別をやっ  
てました…



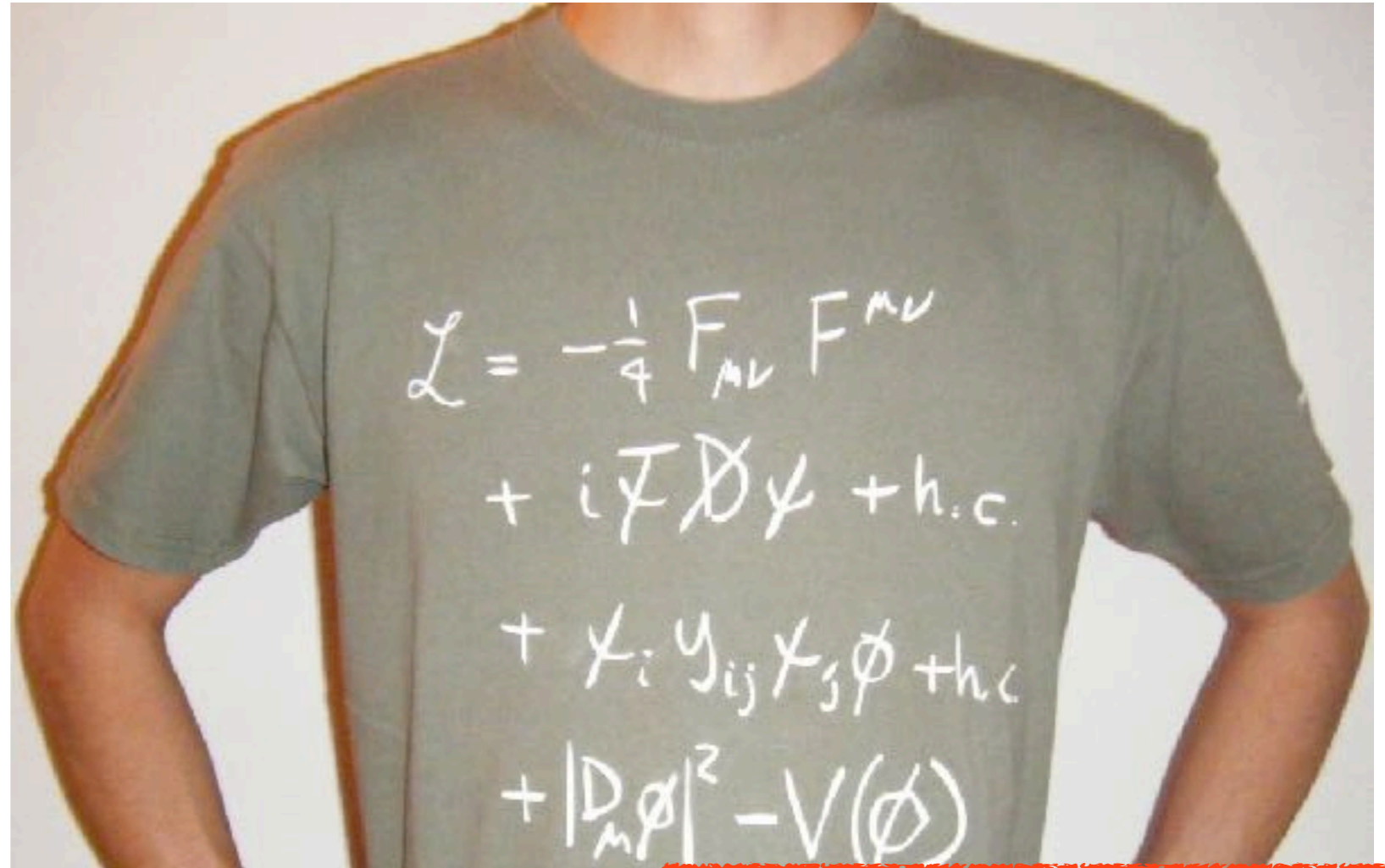
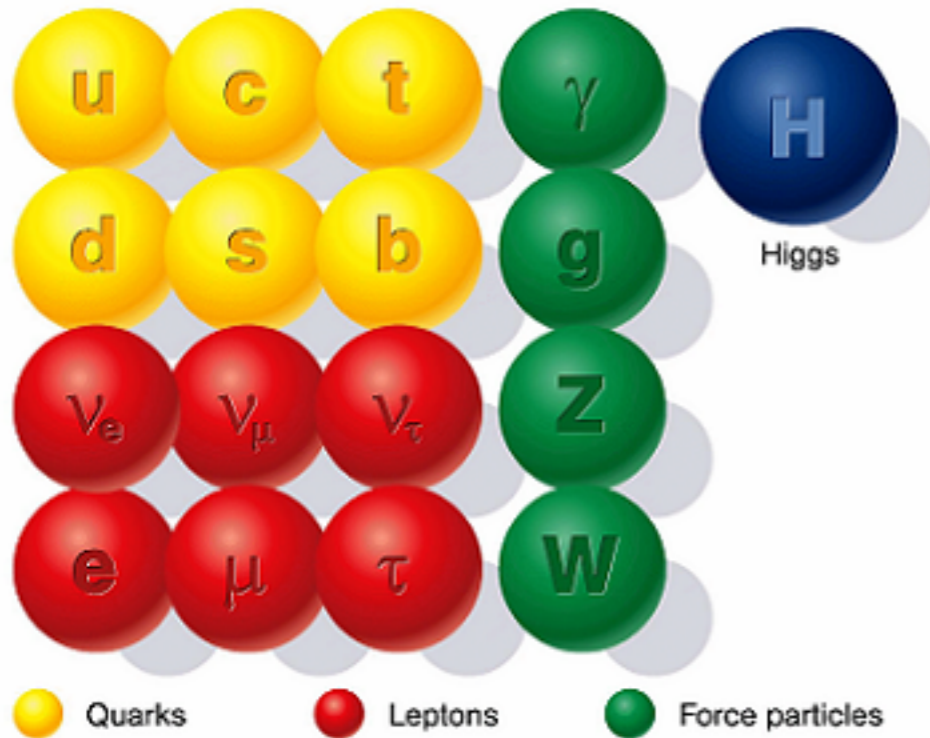
(素粒子標準模型において)

電子・陽電子衝突で何がどれくらい生成されるか？

特に、

ヒッグス粒子がどうやってどれくらい生成されるか？

# 標準模型 (Standard Model)



## 「コライダー物理」

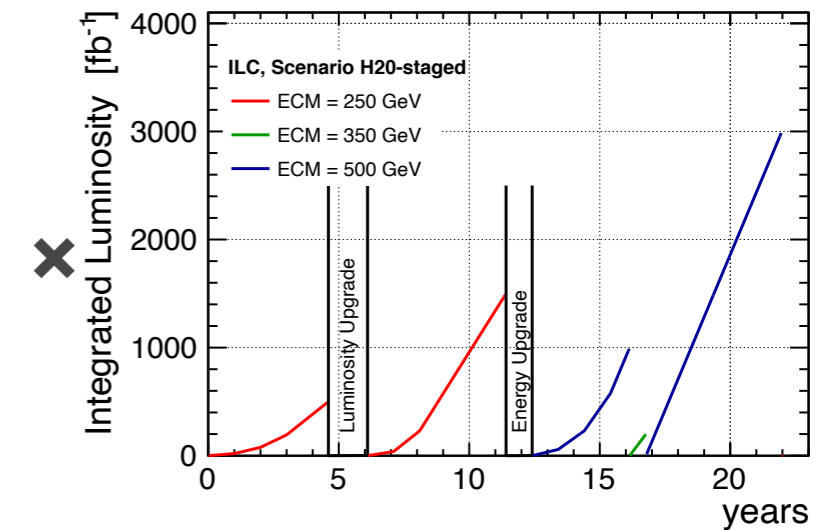
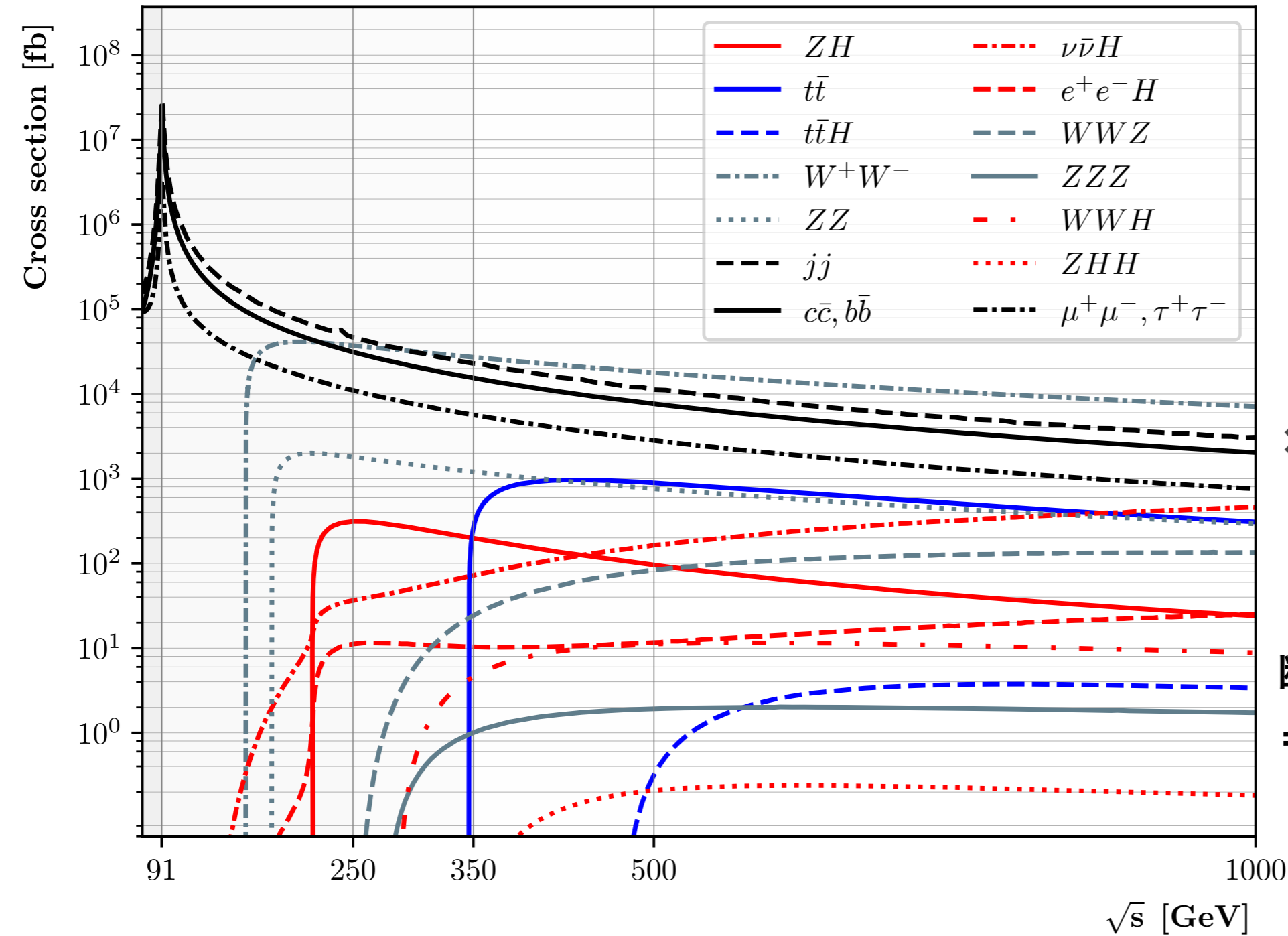
### 0. 量子場の理論を勉強する

1. ラグランジアンからファインマンルールを導く
2. 散乱過程のファインマン図を描く
3. ファインマン図に基づいて散乱振幅を計算、断面積を求める
4. シミュレーションをし、実験データと比較する

心配ご無用！  
(0以外...)  
シミュレーションツール  
がやってくれます！

# 電子・陽電子衝突で何がどれくらい生成されるか？

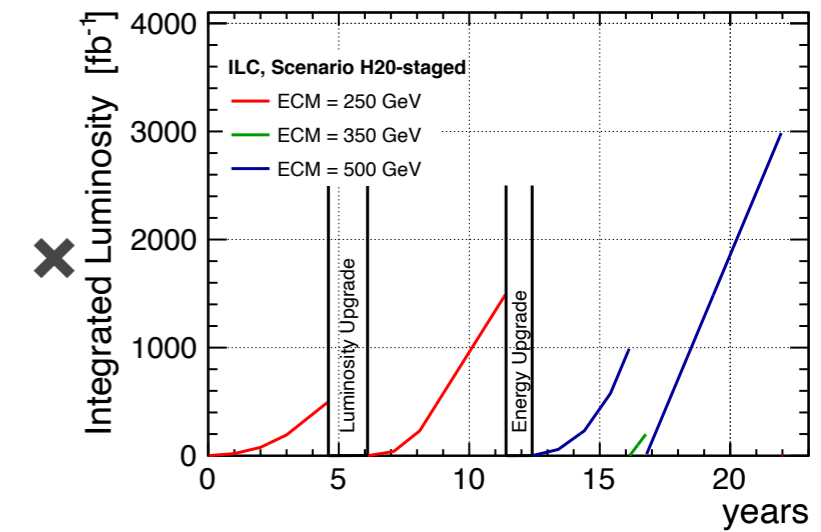
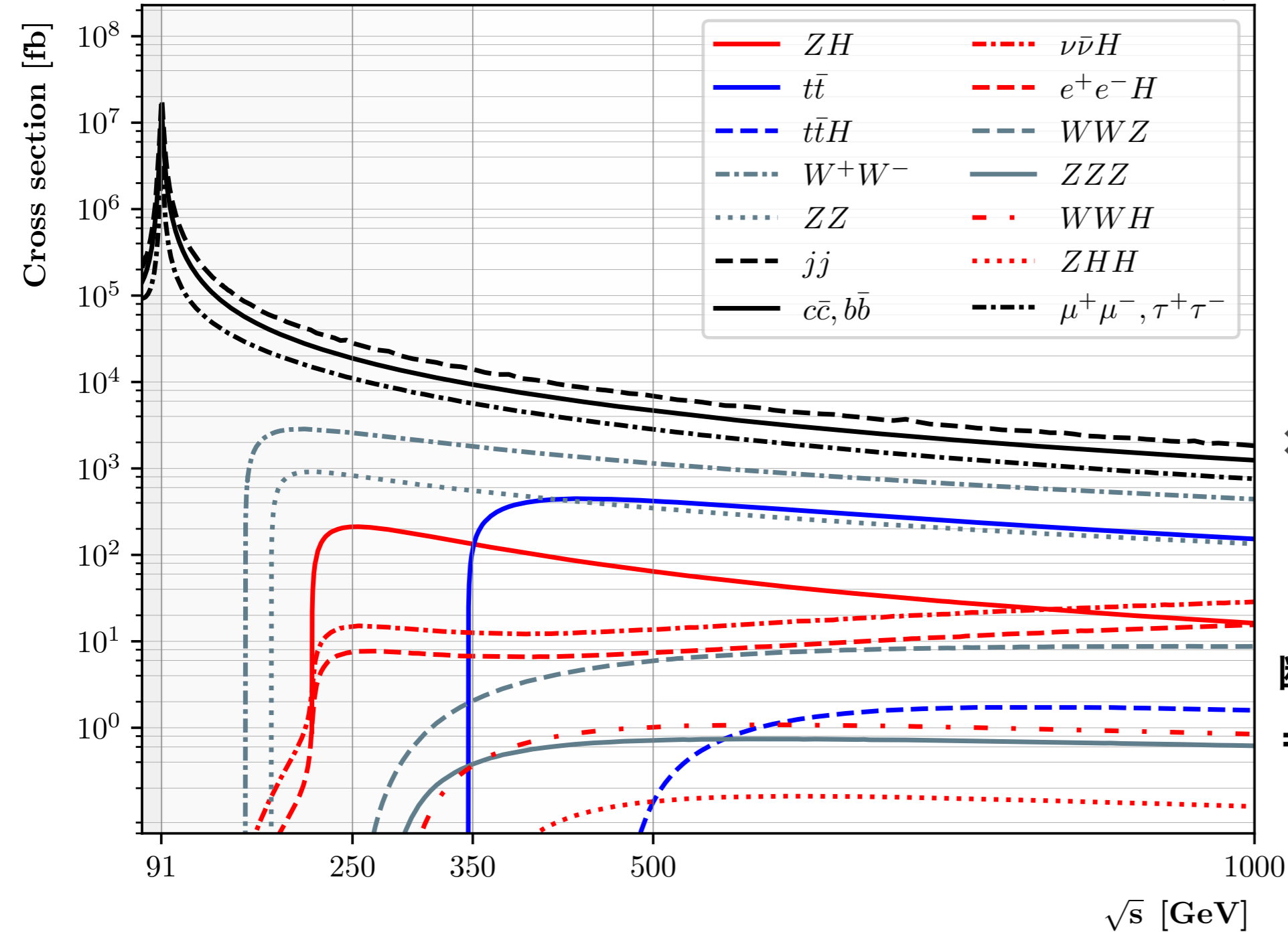
$e^+e^-$  Physics Processes at ILC,  $\mathcal{P} = (-80\%, +30\%) = (\text{電子}, \text{陽電子})$  ビーム偏極度



断面積 × 積分ルミノシティ  
= イベント数

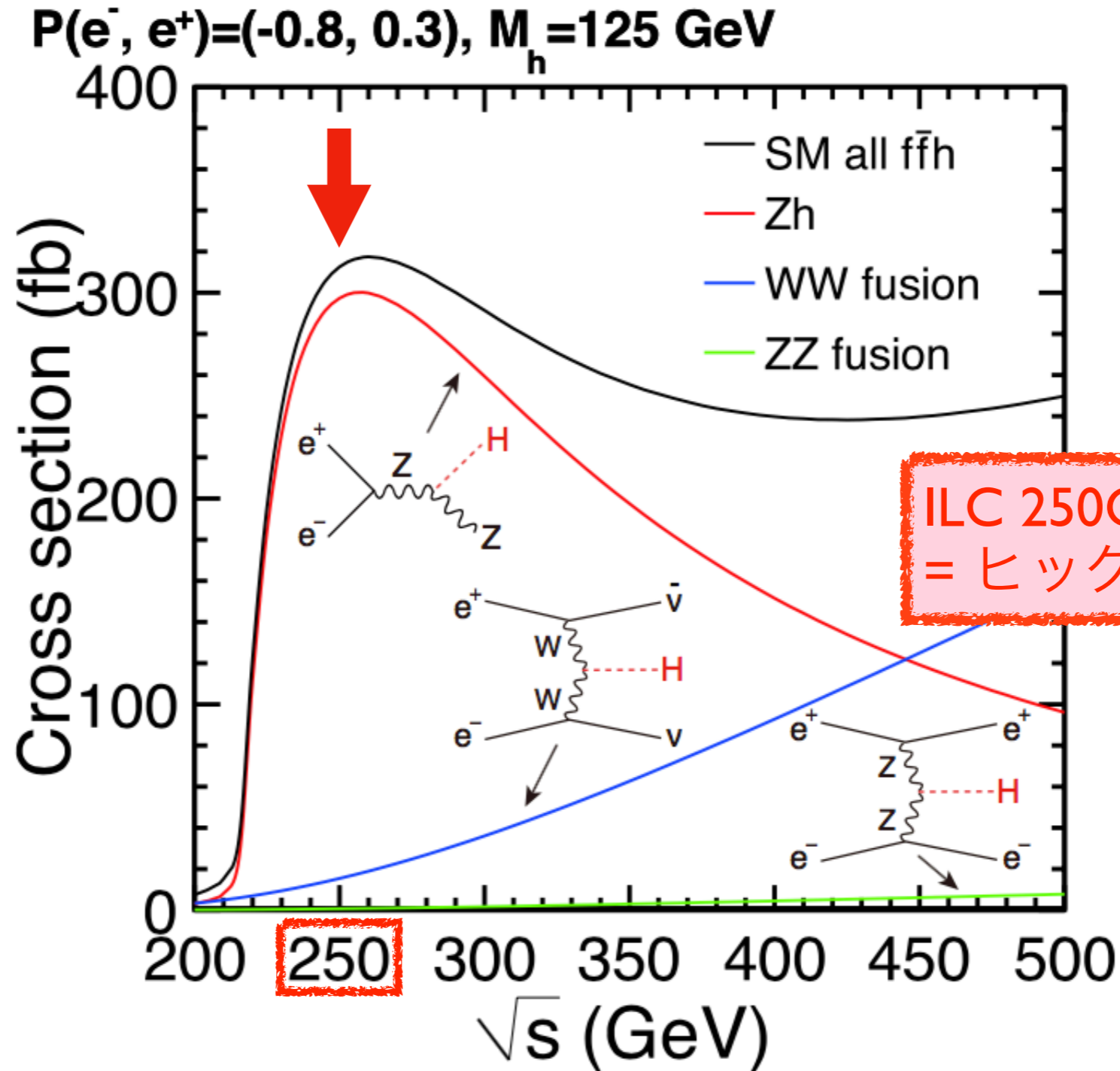
# 電子・陽電子衝突で何がどれくらい生成されるか？

$e^+e^-$  Physics Processes at ILC,  $\mathcal{P} = (+80\%, -30\%) = (\text{電子}, \text{陽電子})$  ビーム偏極度



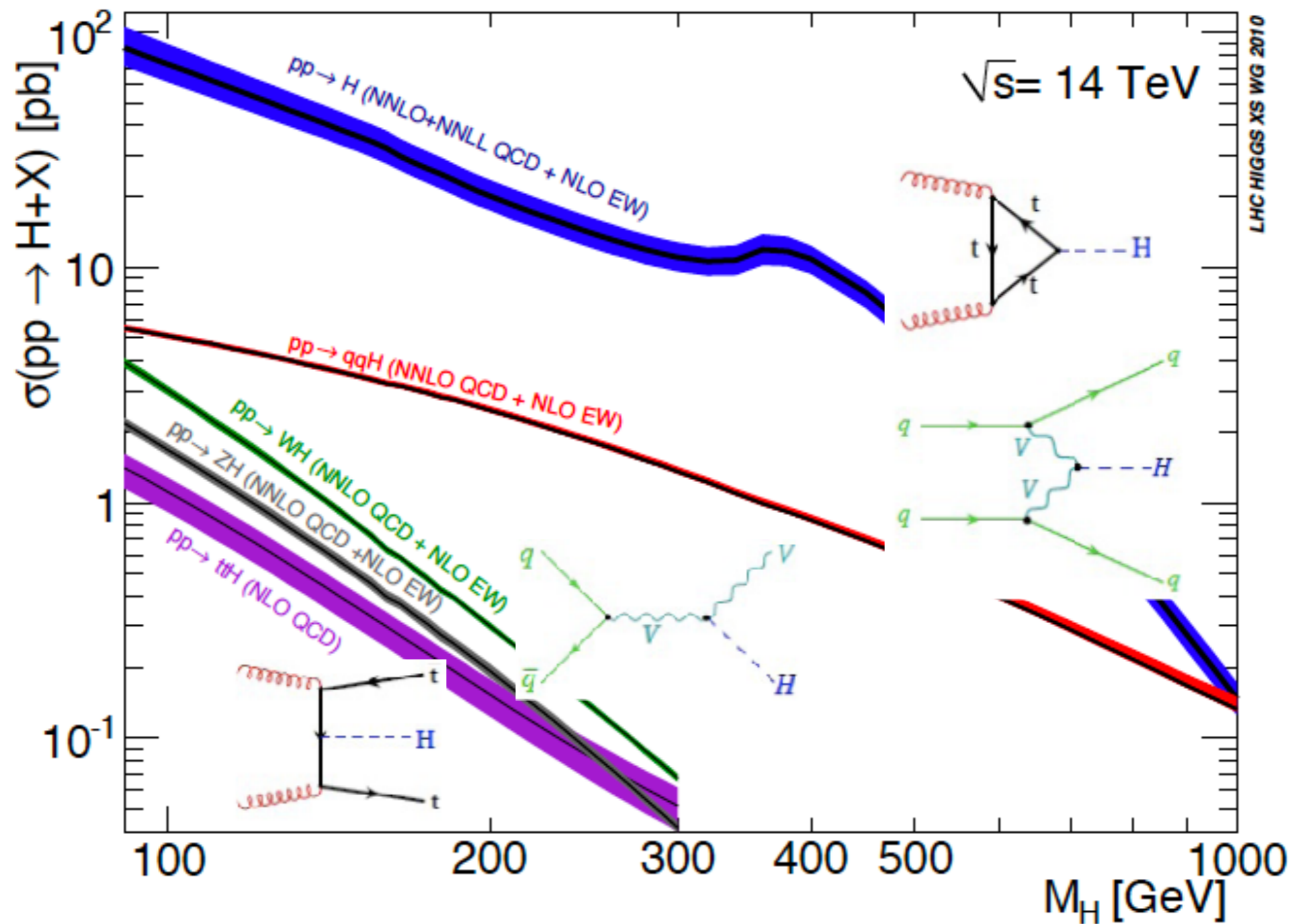
断面積 × 積分ルミノシティ  
= イベント数

# ヒッグス粒子生成 @ILC



(参考)

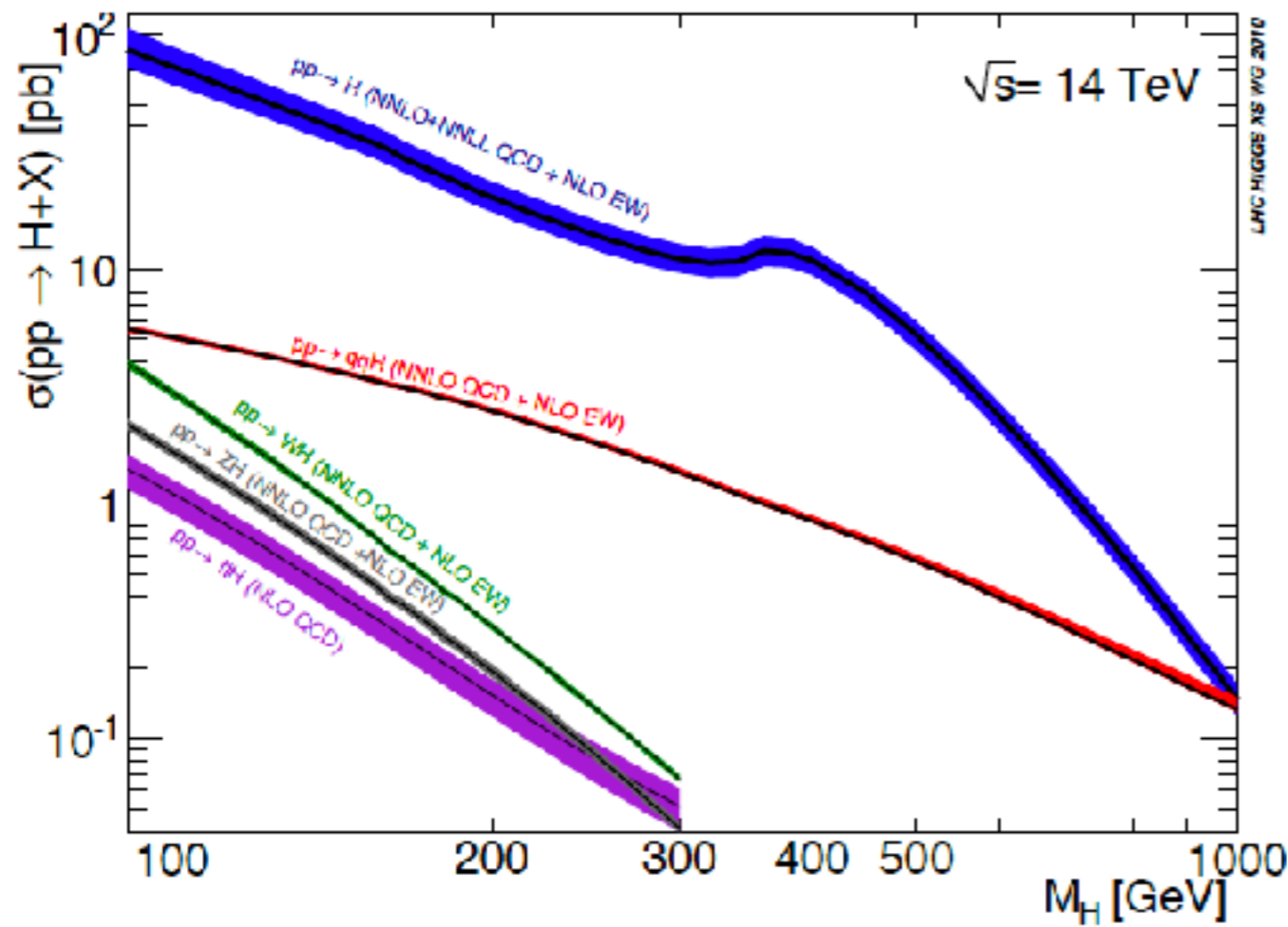
# ヒッグス粒子生成 @LHC



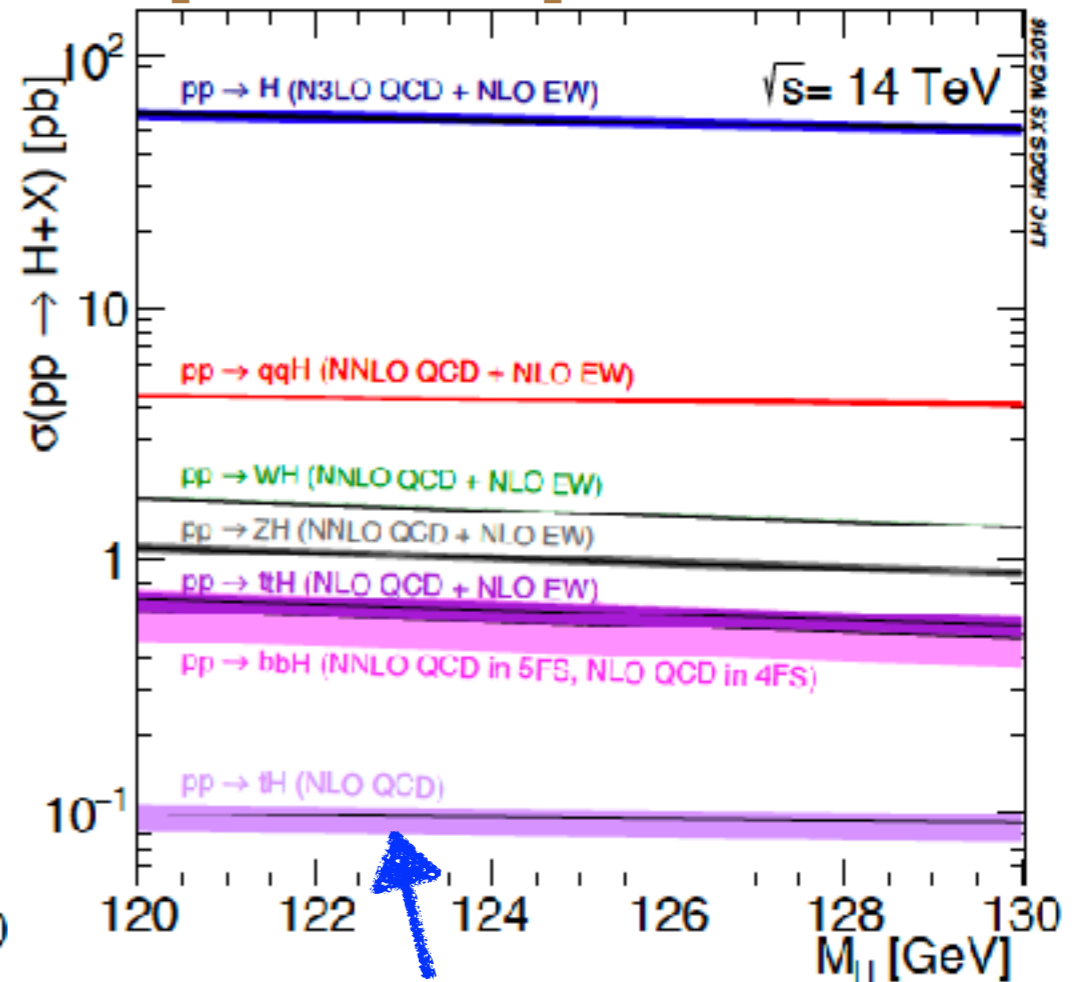
(参考)

# 125GeV ヒッグス粒子生成 @LHC

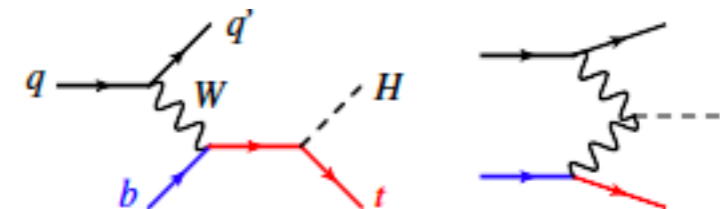
YR1 [1101.0593]



YR4 [1610.07922]

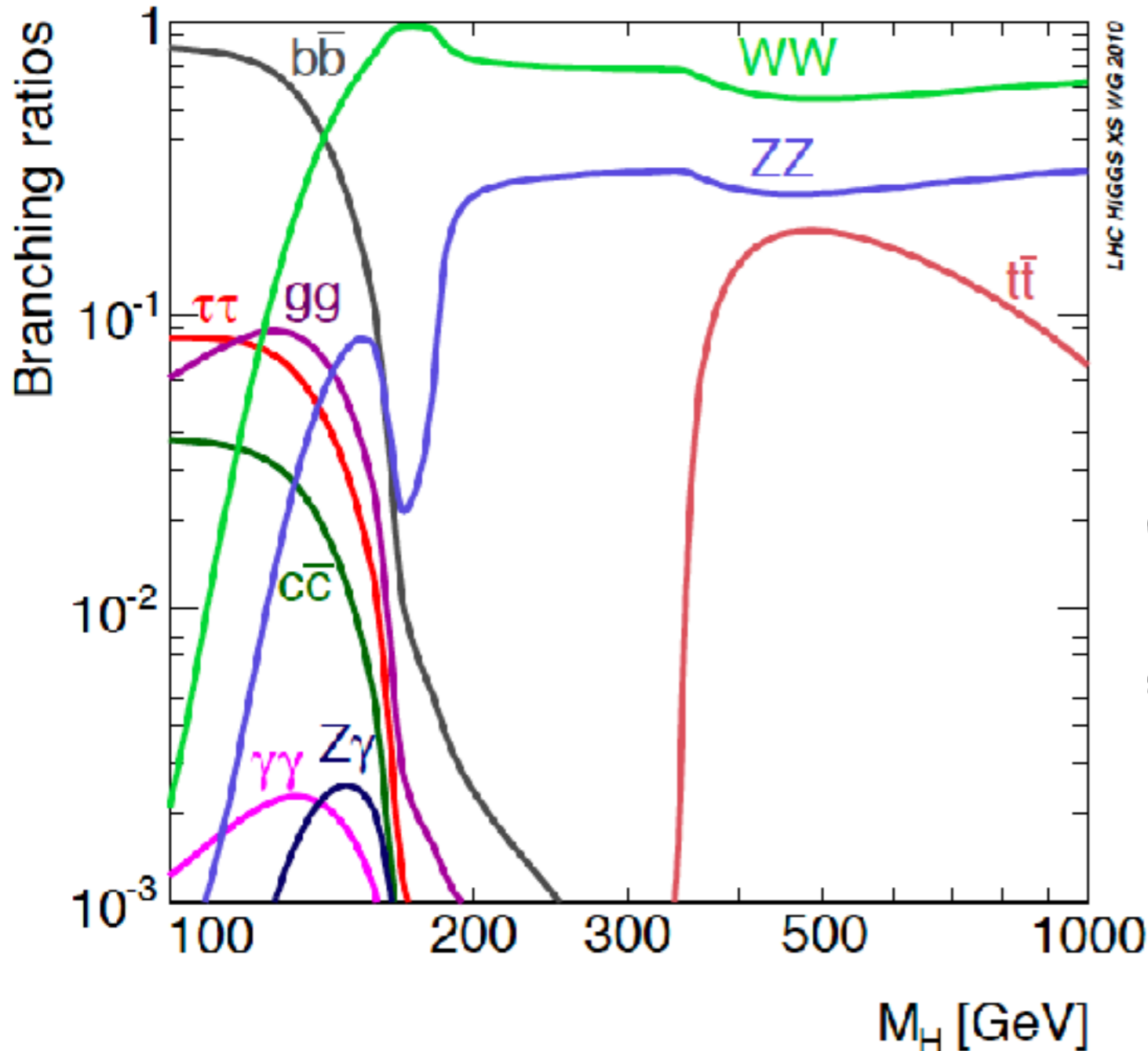


Demartin, Maltoni, Mawatari, Zaro [1504.00611 EPJC]





# ヒッグス粒子崩壊



## An Introduction to Quantum Field Theory

Michael E. Peskin  
Stanford Linear Accelerator Center

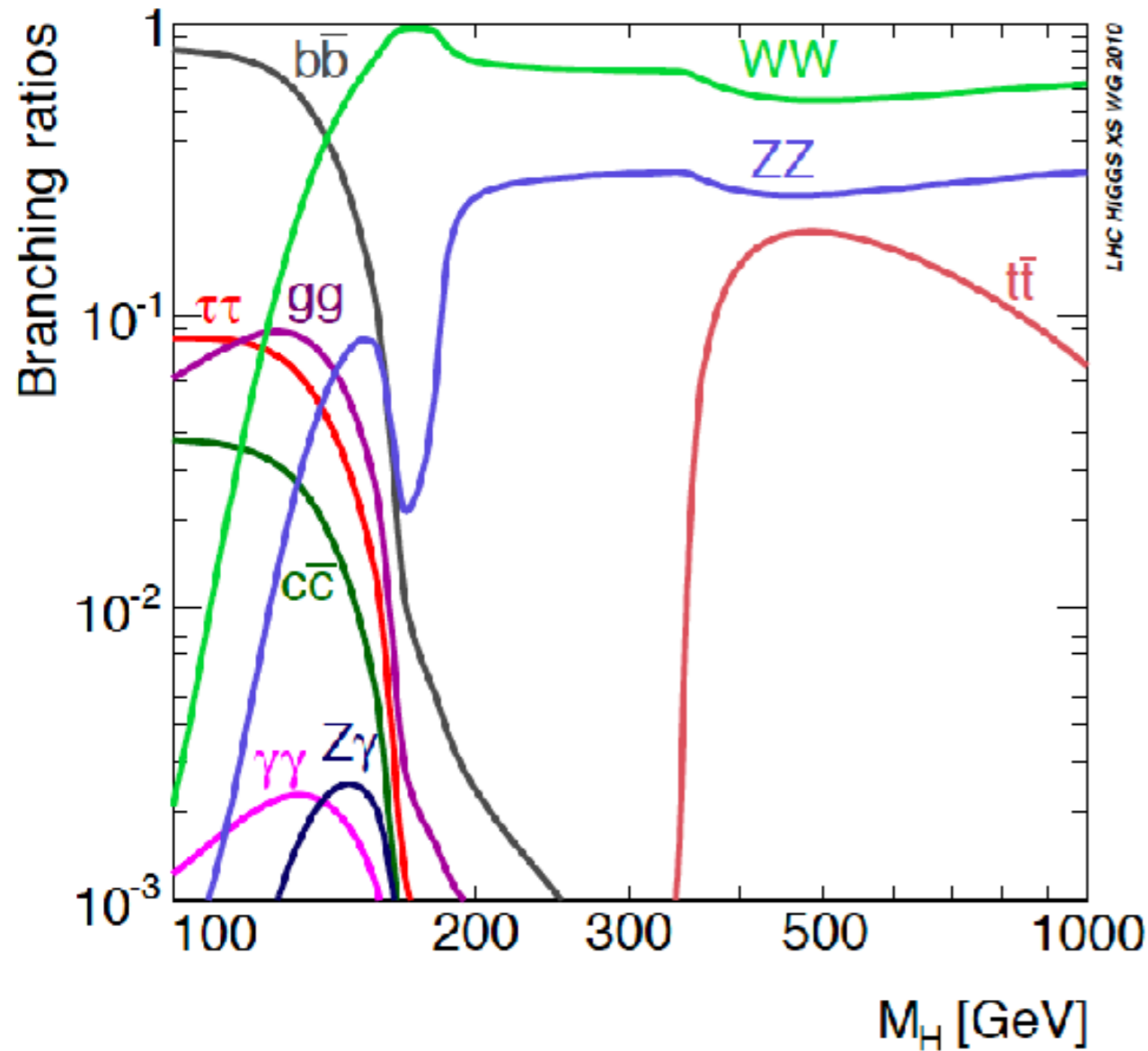
Daniel V. Schroeder  
Weber State University

κ Contents

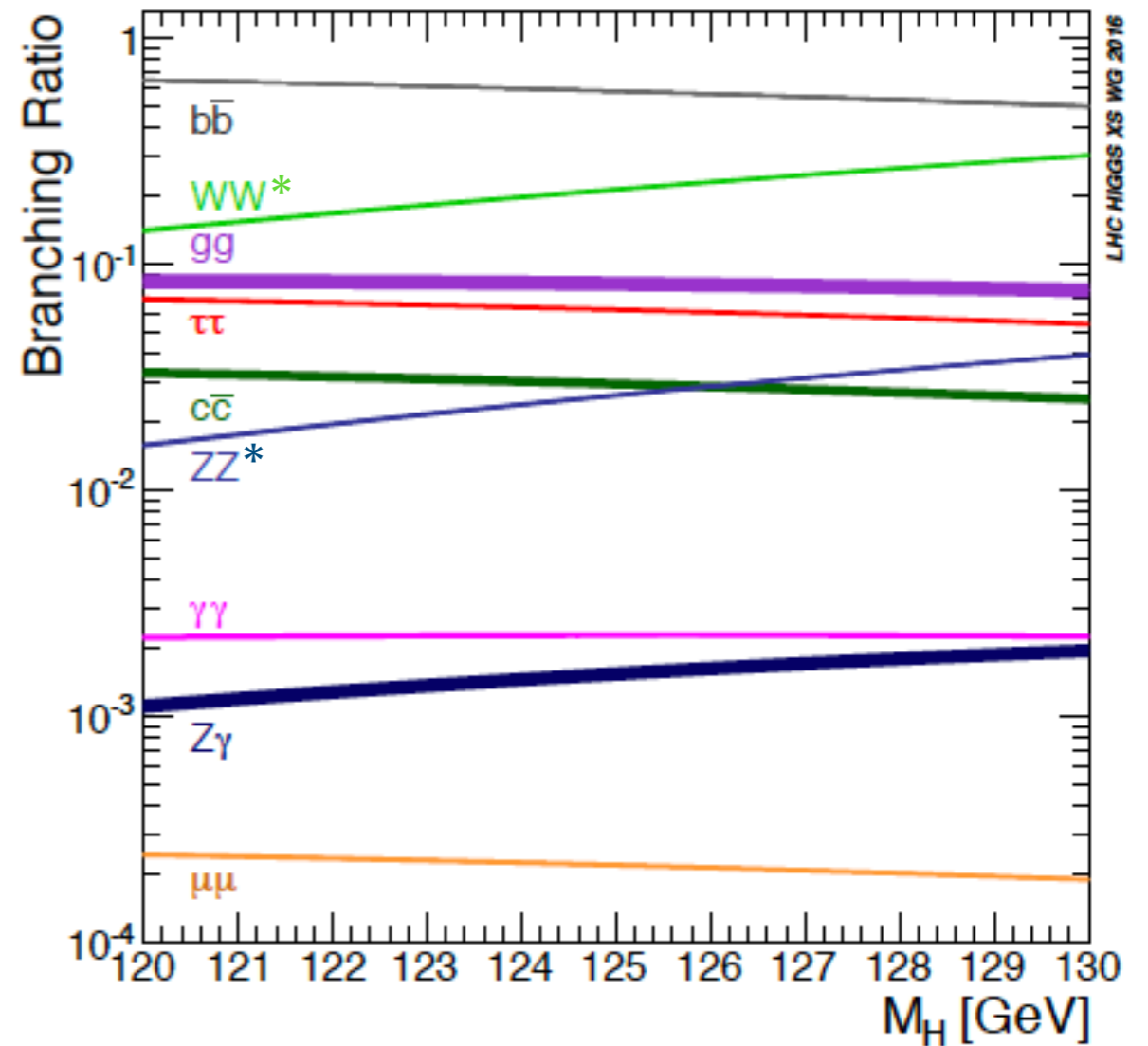
|           |   |            |
|-----------|---|------------|
| *20.3     | Symmetries of the Theory of Quarks and Leptons . . . . .  | 719        |
|           | Problems . . . . .  | 728        |
| <b>21</b> | <b>Quantization of Spontaneously Broken Gauge Theories</b>  | <b>731</b> |
| 21.1      | The $R_\xi$ Gauges . . . . .  | 732        |
|           | <i>An Abelian Example; <math>\xi</math> Dependence in Perturbation Theory; Non-Abelian Analysis</i>   |            |
| 21.2      | The Goldstone Boson Equivalence Theorem . . . . .   | 743        |
|           | <i>Formal Aspects of Goldstone Boson Equivalence; 1bp Quark Decay; <math>e^+e^- \rightarrow W^+W^-</math></i>   |            |
| *21.3     | One-Loop Corrections in Weak-Interaction Gauge Theory . . . . .   | 758        |
|           | <i>Theoretical Orientation, and a Specific Problem; Influence of Heavy Quark Corrections; Computation of Vacuum Polarization Amplitudes; The Effect of <math>m_t</math></i> |            |
|           | Problems . . . . .  | 773        |
|           | <u>Final Project: Decays of the Higgs Boson . . . . .</u>   | <u>775</u> |

# 125GeV ヒッグス粒子崩壊

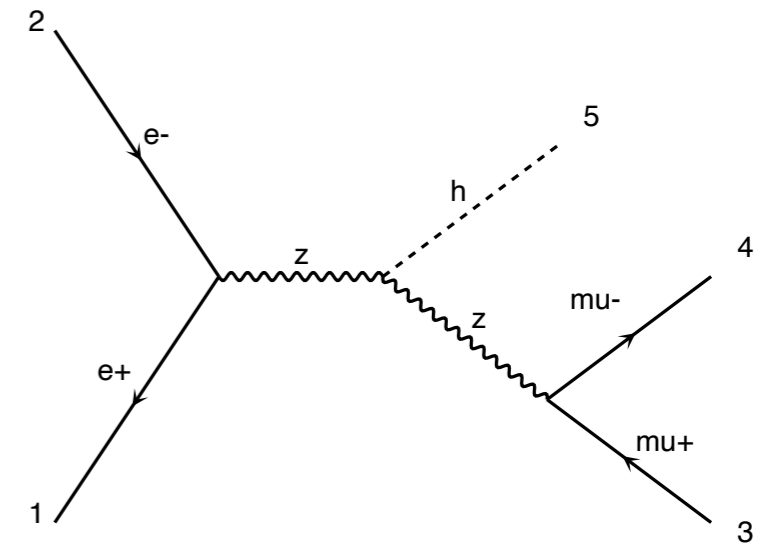
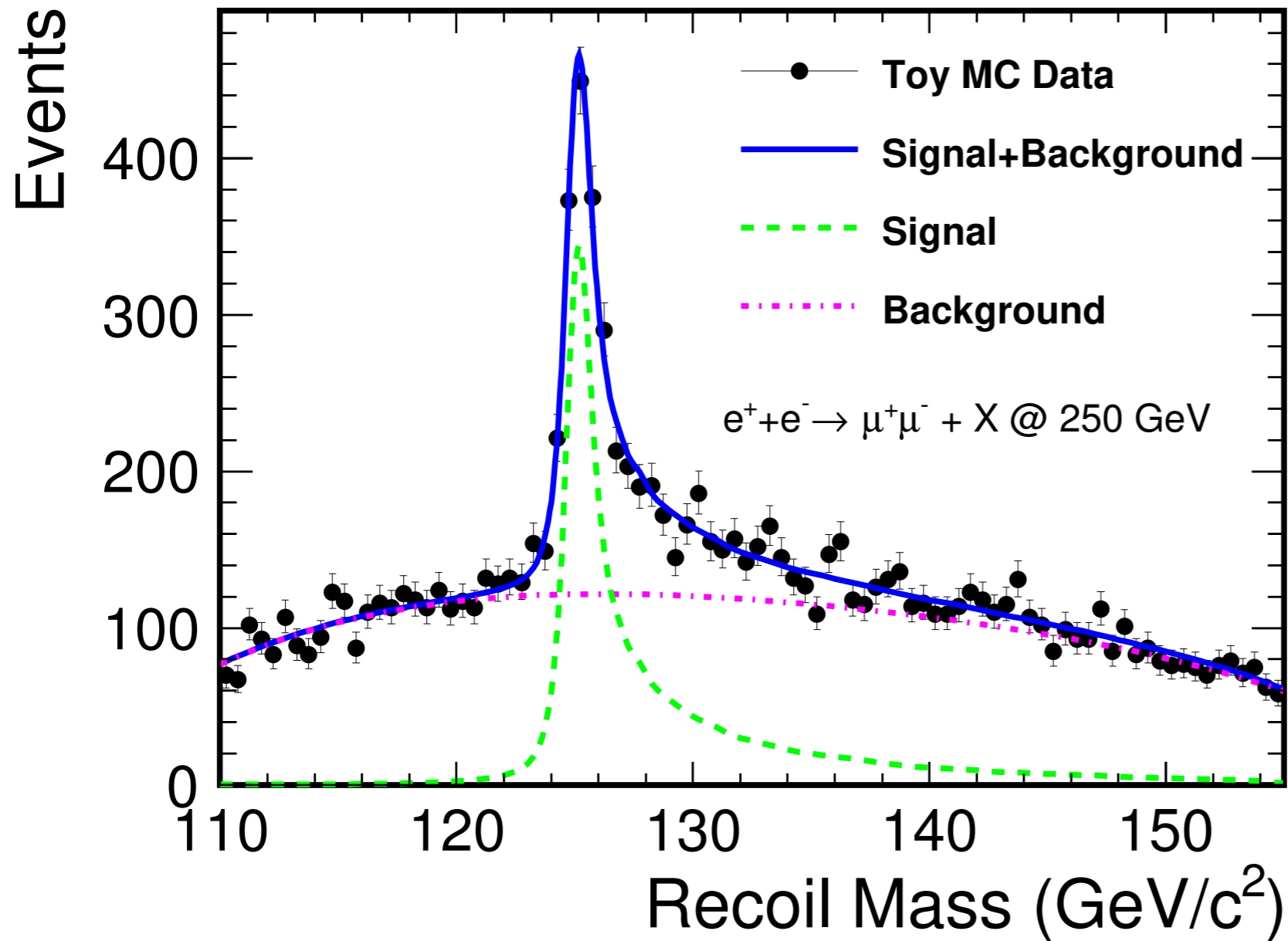
YR1 [1101.0593]



YR4 [1610.07922]



# ヒッグス粒子の捕え方 @ILC

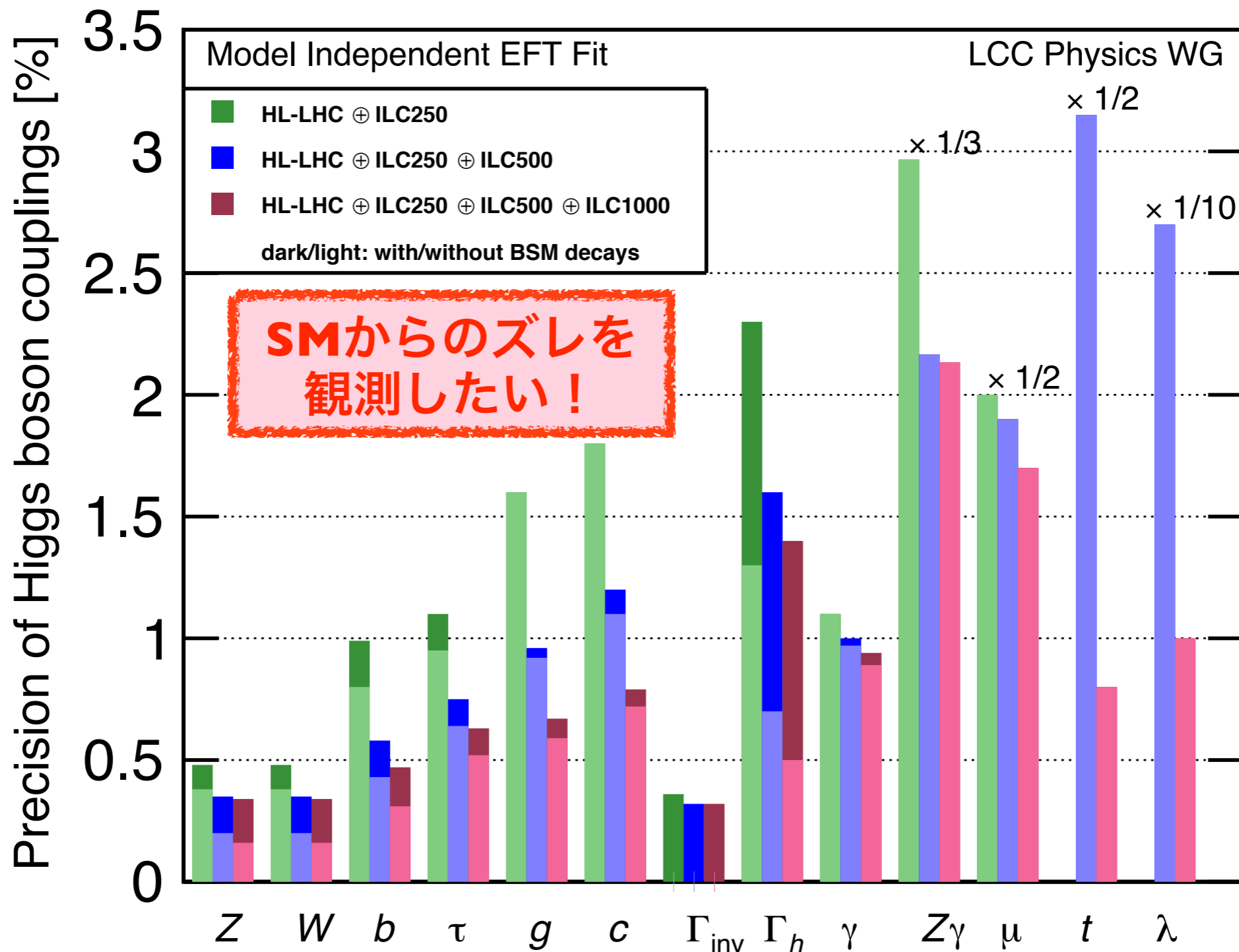


LHC (ハドロンコライダー)と違って、始状態の電子・陽電子の運動量が正確に分かっているため、ヒッグス粒子の崩壊を捕えることなくヒッグス粒子生成が確認できる。

$$M_{\text{rec}}^2 = (\sqrt{s} - E_{1+1'})^2 - |\vec{p}_{1+1'}|^2$$

= Higgs mass

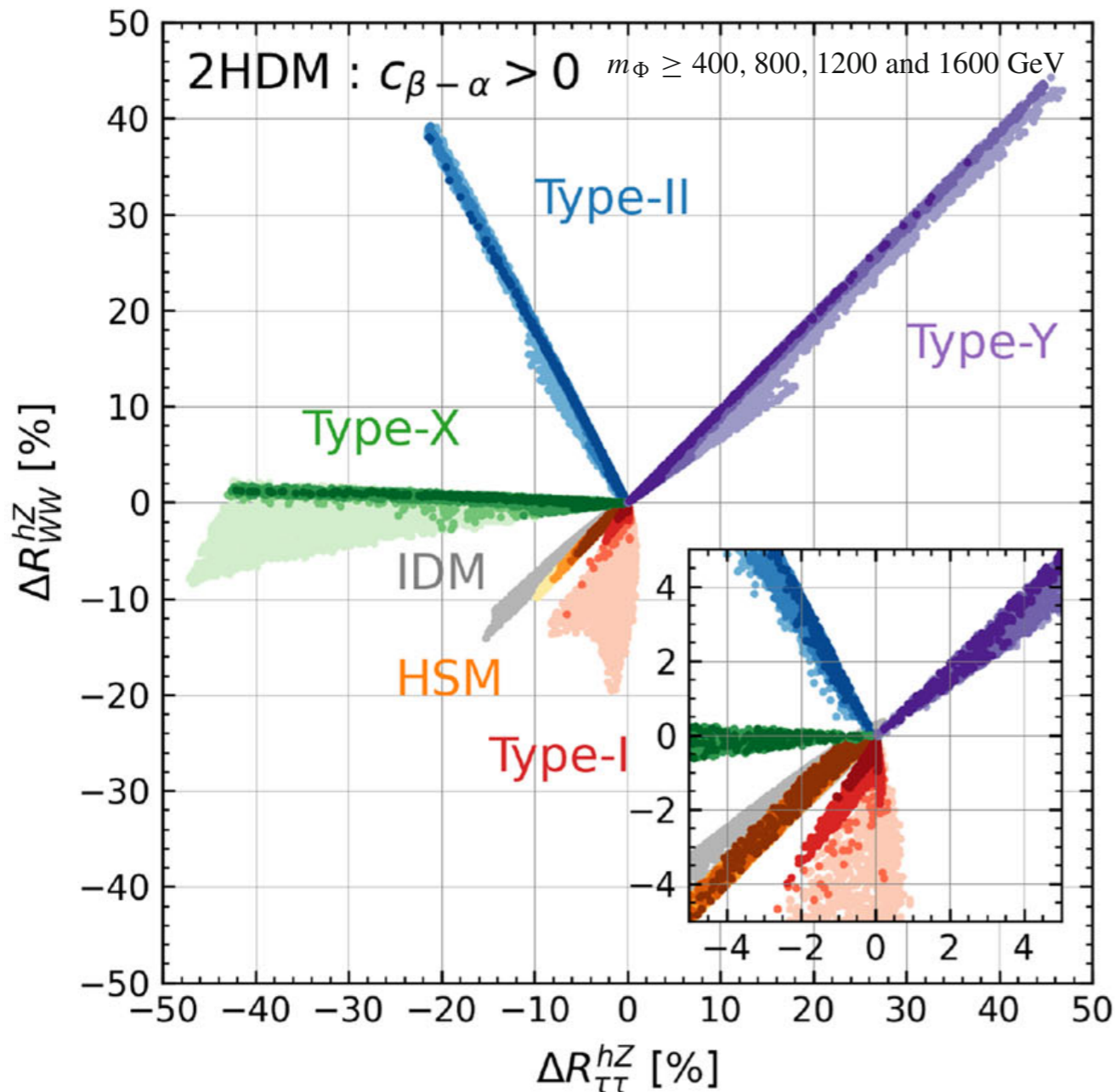
# ヒッグス結合の精密測定



# SMからのズレ = 新物理 (New Physics)!

Kanemura, Kikuchi, Mawatari, Sakurai, Yagyu  
 [1803.01456 PLB, 1906.10070 NPB, 1910.12769 CPC]  
 Aiko, Kanemura, Mawatari [2109.02884 EPJC]

$$\Delta R_{XY}^{hZ} = \frac{\sigma_{\text{NP}}(e^+e^- \rightarrow hZ)\text{BR}_{\text{NP}}(h \rightarrow XY)}{\sigma_{\text{SM}}(e^+e^- \rightarrow hZ)\text{BR}_{\text{SM}}(h \rightarrow XY)} - 1$$



## Higgs Singlet Model (HSM)

$$V_{\text{HSM}}(\Phi, S) = m_{\Phi}^2|\Phi|^2 + \lambda|\Phi|^4 + \mu_{\Phi S}|\Phi|^2 S + \lambda_{\Phi S}|\Phi|^2 S^2 + t_S S + m_S^2 S^2 + \mu_S S^3 + \lambda_S S^4, \quad (2.4)$$

## Two Higgs Doublet Model (2HDM)

$$V_{2\text{HDM}}(\Phi_1, \Phi_2) = m_1^2|\Phi_1|^2 + m_2^2|\Phi_2|^2 - m_3^2(\Phi_1^\dagger\Phi_2 + \text{h.c.}) + \frac{1}{2}\lambda_1|\Phi_1|^4 + \frac{1}{2}\lambda_2|\Phi_2|^4 + \lambda_3|\Phi_1|^2|\Phi_2|^2 + \lambda_4|\Phi_1^\dagger\Phi_2|^2 + \frac{1}{2}\lambda_5[(\Phi_1^\dagger\Phi_2)^2 + \text{h.c.}] \quad (2.17)$$

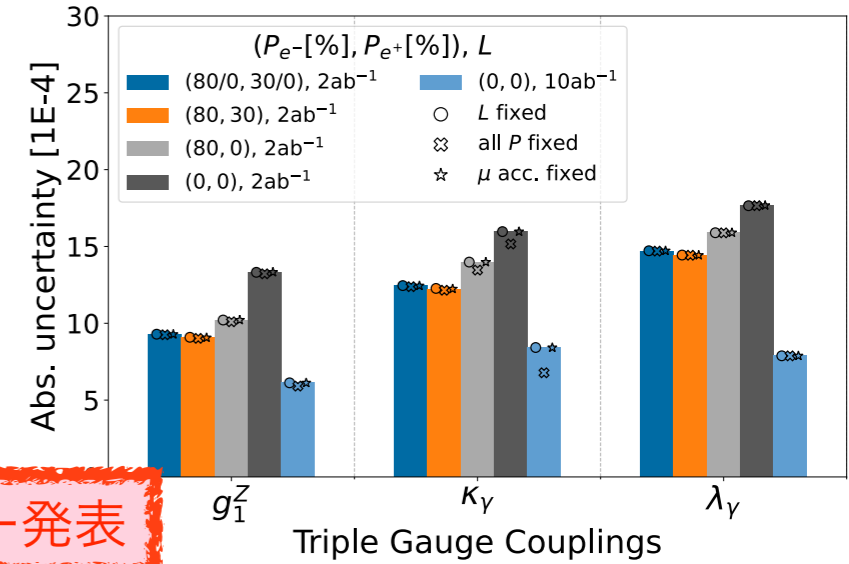
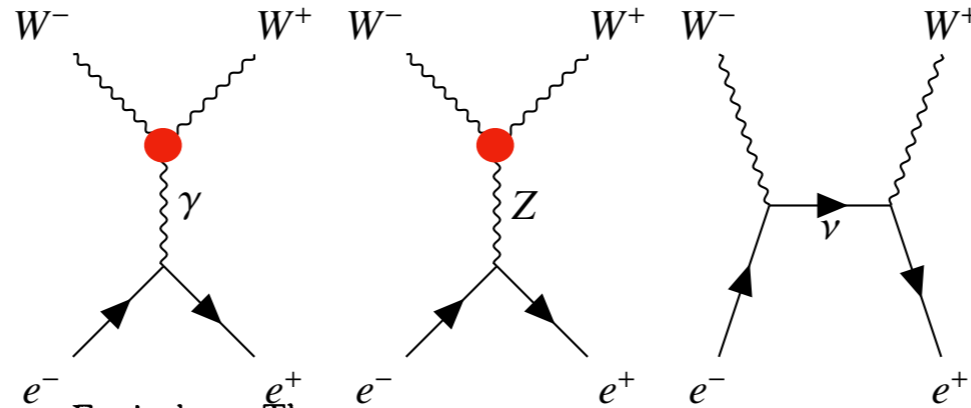
ズレのパターン

➔ NPモデルの選別

ズレの度合い (色の濃さ)

➔ NPのスケール

# Triple Gauge Couplings (TGCs)



Peskin & Schroeder 21.2 The Goldstone Boson Equivalence Theorem

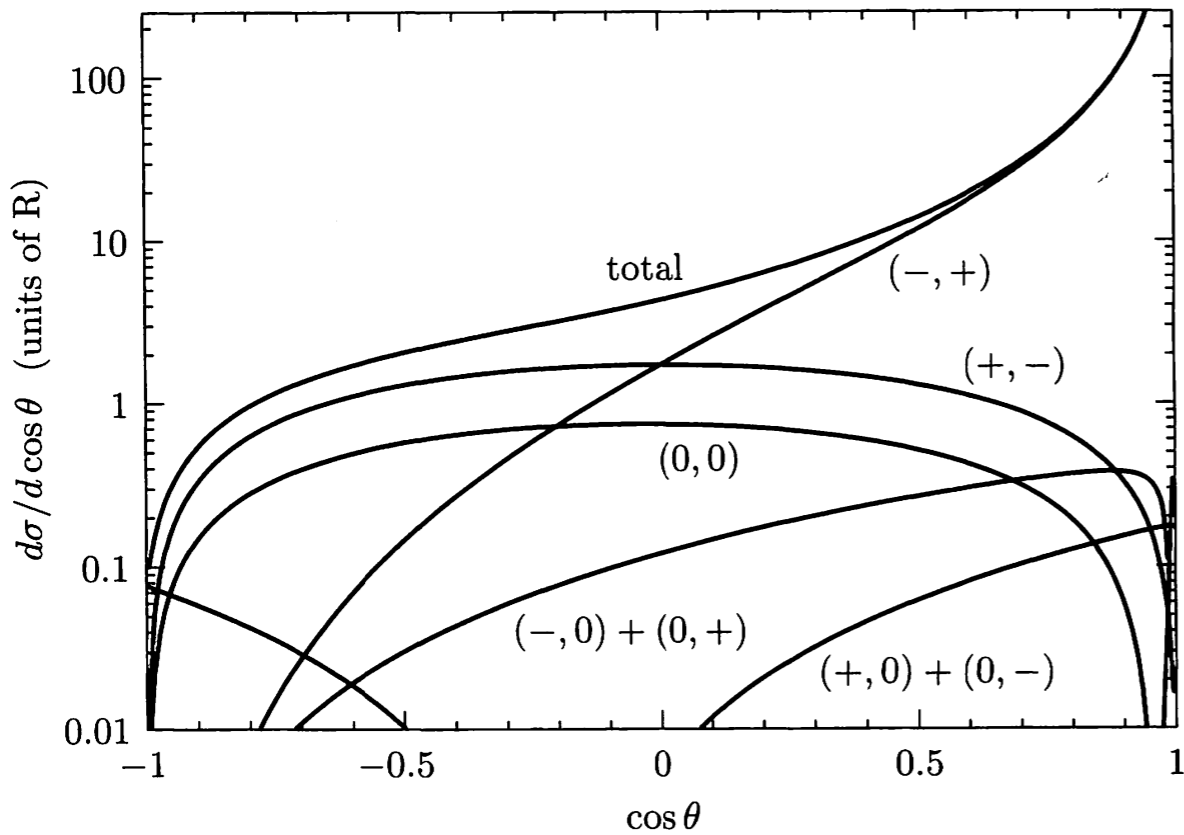


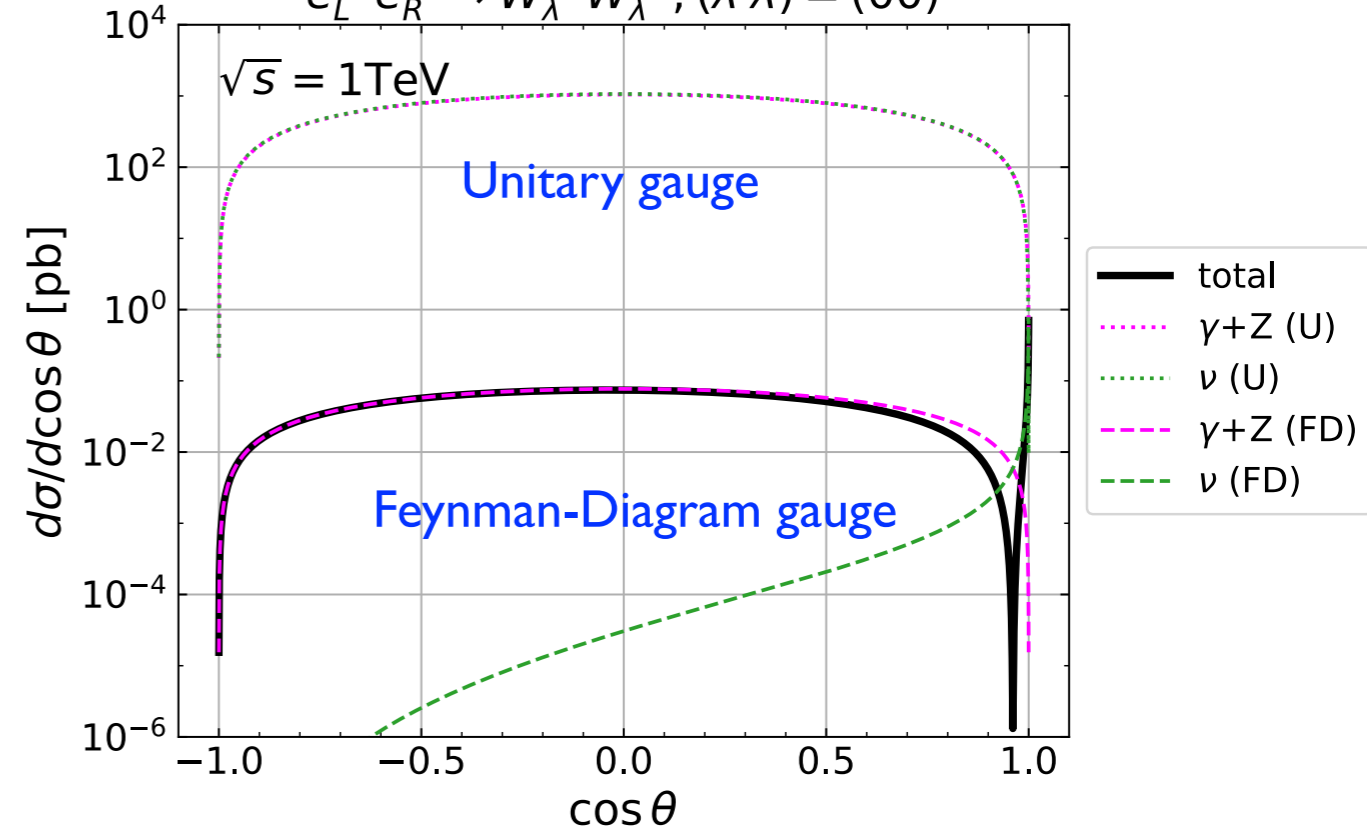
Figure 21.10. The differential cross section for  $e^- e^+ \rightarrow W^+ W^-$ , in units of R (Eq. (5.15)), at  $E_{cm} = 1000$  GeV. The various curves show the contri-



ポスター発表

Furusato, Mawatari, Suzuki, Zheng [2406.08869]

$e^-_L e^-_R \rightarrow W^-_\lambda W^-_{\lambda^+}; (\lambda \bar{\lambda}) = (00)$



# 4th Iwate Collider School (ICS2025) @安比高原

## KEK-IINAS Iwate Collider School 2022

21-26 MARCH, 2022  
Appi highland, Iwate, Japan (Hybrid)

**Registration fee**  
Registration expenses will be supported. (No support for travel fees.)

**Eligibility**  
Mainly for graduate students and postdoc fellows (Max. 25 participants in person / No limitation for online students)

**Overview**  
Students will learn a variety of topics in collider physics via lectures and tutorials. Long lunch break for skiing and discussions are planned.

**Lecturers:**  
Rikardt Frederix (Lund, Sweden)  
Benjamin Fuks (Paris, France)  
Hitoshi Murayama (Berkeley / Kavli IPMU)  
Olivier Mattelaer (Louvain, Belgium)  
Marco Zaro (Milan, Italy) etc.

**Organizers:**  
Kaoru Hagiwara (KEK)  
Daniel Jeans (KEK)  
Fabio Maltoni (UC Louvain / Bologna)  
Kentarou Mawatari (Chair, Iwate U.)  
Shinya Narita (Iwate U.)

**Website**  
<https://ics.indico.kek.jp/e/ics2022>

**Contact**  
ics2022@iwate-u.ac.jp

## Iwate Collider School 2023

27 FEBRUARY - 4 MARCH, 2023  
Appi highland, Iwate, Japan (Hybrid)

**Registration fee**  
FREE and local expenses will be supported. (No support for travel fees.)

**Eligibility**  
Mainly for graduate students and postdoc fellows (Max. 25 participants in person / No limitation for online students)

**Overview**  
Students will learn a variety of topics in collider physics via lectures and tutorials. Long lunch break for skiing and discussions are planned.

**Lecturers:**  
Rikardt Frederix (Lund, Sweden)  
Benjamin Fuks (Paris, France)  
Fabio Maltoni (Louvain, Belgium)  
Olivier Mattelaer (Louvain, Belgium)  
Davide Pagani (Bologna, Italy) etc.

**Organizers:**  
Kaoru Hagiwara (KEK)  
Daniel Jeans (KEK)  
Fabio Maltoni (UC Louvain / Bologna)  
Kentarou Mawatari (Chair, Iwate U.)  
Shinya Narita (Iwate U.)  
Yajuan Zheng (Iwate U.)

**Website**  
<https://ics.sgk.iwate-u.ac.jp/>

**Contact**  
ics2023@iwate-u.ac.jp

## Iwate Collider School 2024

26 FEBRUARY - 2 MARCH, 2024  
Appi highland, Iwate, Japan

**Registration fee**  
FREE and local expenses will be supported. (No support for travel fees.)

**Eligibility**  
Mainly for graduate students and postdoc fellows (Max. 25 participants in person)

**Overview**  
Students will learn a variety of topics in collider physics via lectures and tutorials. Long lunch break for skiing and discussions are planned.

**Lecturers:**  
Celine Degrande (Louvain, Belgium)  
Rikardt Frederix (Lund, Sweden)  
Fabio Maltoni (Louvain, Belgium)  
Olivier Mattelaer (Louvain, Belgium)  
Marco Zaro (Milan, Italy) etc.

**Organizers:**  
Kaoru Hagiwara (KEK)  
Daniel Jeans (KEK)  
Fabio Maltoni (UC Louvain / Bologna)  
Kentarou Mawatari (Chair, Iwate U.)  
Shinya Narita (Iwate U.)  
Yajuan Zheng (Iwate U.)

**Website**  
<https://ics.sgk.iwate-u.ac.jp/>

**Contact**  
ics2024@iwate-u.ac.jp

コライダー物理ぜひ一緒にやりましょう！

