

Bファクトリーで探る標準模型を超える物理

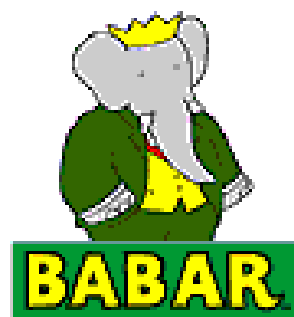
中尾幹彦 (KEK 素核研)

mikihiko.nakao@kek.jp

2020.2.16-19

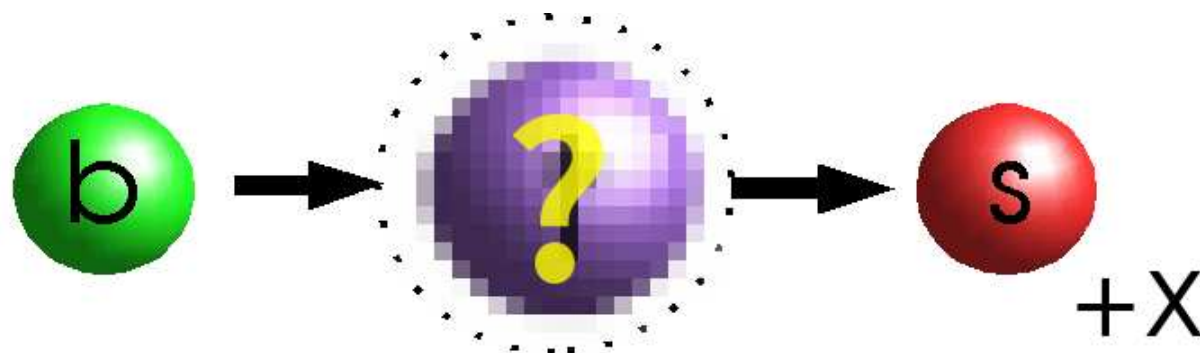
26th ICEPP Symposium

BファクトリーはB中間子のCP固有状態への崩壊過程の測定における**CP対称性の破れ**の存在を通して小林益川行列の持つ複素位相を実証するために1990年代に発案され、建設された



標準模型を越える物理を探る強力な道具でもあり、
現在ではスーパーBファクトリーに拡張されている

クォークやレプトンの種類をフレーバーと呼ぶので、クォーク間(レプトン間)遷移の事象から間接的に新物理の効果を探ることを**フレーバー物理**と呼んでいる。



標準模型の予言能力が高いので可能…でも、
低エネルギーハドロンの計算に困難が付きまとうので工夫が必要

これが今回の講義のメイントピックです

目次



● 議義 1

- B の物理の歴史
- B ファクトリーでの新物理の探し方
- SuperKEKB と Belle II

● 議義 2

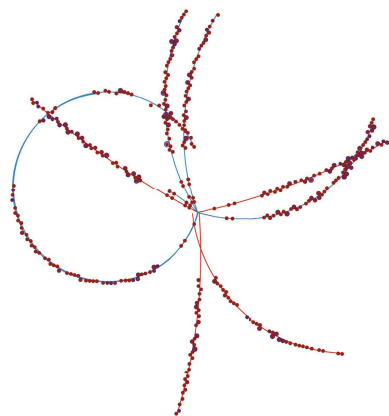
- 弱い相互作用と CKM 行列
- ツリーダイヤグラム
- B 物理の解析手法

● 議義 3

- ループダイヤグラム
- ユニタリティ三角形
- 現状と近未来

The Physics of the *B* Factories

Received: 29 July 2014 / Accepted: 29 July 2014 / Published online: 19 November 2014
© The Author(s) 2014. This article is published with open access at Springerlink.com



The Belle II Physics Book

E. Kou^{75,*§,†}, P. Urquijo^{145,‡,†}, W. Altmannshofer^{135,§}, F. Beaujean^{79,§}, G. Bell^{122,§}, M. Beneke^{14,§,†}, I. I. Bigi^{148,§}, F. Bishara^{150,16,§}, M. Blank^{49,51,§}, C. Bobeth^{11,31,14,§}, M. Bona^{152,§}, N. Brambilla^{114,§}, V. M. Braun^{59,§}, J. Brod^{112,135,§}, A. J. Buras^{115,§}, H. Y. Cheng^{43,§}, C. W. Chiang^{92,§}, M. Ciuchini^{59,§}, G. Colangelo^{28,§}, A. Crivellin^{102,§}, H. Czyz^{156,29,§}, A. Datta^{146,§}, F. De Fazio^{53,§}, T. Deppisch^{51,§}, M. J. Dolan^{145,§}, J. Evans^{35,§}, S. Fajfer^{109,141,§}, T. Feldmann^{122,§}, S. Godfrey^{7,§}, M. Gronau^{62,§}, Y. Grossman^{15,§}, F. K. Guo^{45,134,§}, U. Haisch^{150,11,§}, C. Hanhart^{21,§}, S. Hashimoto^{30,26,§}, S. Hirose^{39,§}, J. Hisano^{89,90,§}, L. Hofer^{127,§}, M. Hoferichter^{168,§}, W. S. Hou^{92,§}, T. Huber^{122,§}, T. Hurth^{63,§}, S. Jaeger^{59,§}, S. Jahn^{83,§}, M. Jamin^{126,§}, J. Jones^{104,§}, M. Jung^{113,§}, A. L. Kagan^{135,§}, F. Kahlhoefer^{1,§}, J. F. Kamenik^{109,141,§}, T. Kaneko^{30,26,§}, Y. Kiyo^{64,§}, A. Kokulu^{114,40,§}, N. Kosnik^{109,141,§}, A. S. Kronfeld^{20,§}, Z. Ligeti^{19,§}, H. Logan^{7,§}, C. D. Lu^{41,§}, V. Lubicz^{153,§}, F. Mahmoudi^{42,§}, K. Maltman^{173,§}, S. Mishima^{30,§}, M. Misiak^{166,§}, K. Moats^{7,§}, B. Moussallam^{74,§}, A. Nefediev^{39,88,77,§}, U. Nierste^{51,§}, D. Nomura^{30,§}, N. Offen^{50,§}, S. L. Olsen^{133,§}, E. Passemar^{37,118,§}, A. Paul^{16,31,§}, G. Paz^{170,§}, A. A. Petrov^{170,§}, A. Pich^{164,§}, A. D. Polosa^{58,§}, J. Pradler^{40,§}, S. Prelovsek^{109,141,50,§}, M. Procura^{123,§}, G. Ricciardi^{54,§}, D. J. Robinson^{132,19,§}, P. Roig^{9,§}, J. Rosiek^{166,§}, S. Schacht^{60,15,§}, K. Schmidt-Hoberg^{16,§}, J. Schwichtenberg^{51,§}, S. R. Sharpe^{67,§}, J. Shigemitsu^{117,§}, D. Shih^{105,§}, N. Shimizu^{162,§}, Y. Shimizu^{69,§}, L. Silvestrini^{58,§}, S. Simula^{59,§}, C. Smith^{76,§}, P. Stoffer^{31,§}, D. Straub^{113,§}, F. J. Tackmann^{16,§}, M. Tanaka^{98,§}, A. Tayduganov^{112,§}, G. Tetlalmatzi-Xolocotzi^{95,§}, T. Teubner^{40,§}, A. Vairo^{114,§}, D. van Dyk^{114,§}, J. Virto^{82,114,§}, Z. Was^{93,§}, R. Watanabe^{47,§}, I. Watson^{155,§}, S. Westhoff^{139,§}, J. Zupan^{35,§}, R. Zwicky^{136,§}, F. Abudine^{83,†}, I. Adachi^{20,26,†}, K. Adamczyk^{93,†}, P. Ahlberg^{129,†}, H. Aihara^{162,†}, A. Aloisio^{54,†}, L. Andricke^{84,†}, N. Anh Ky^{44,†}, M. Amdt^{129,†}, D. M. Asner^{5,†}, H. Atmacan^{158,†}, T. Au shev^{87,†}, Y. Au shev^{110,†}, R. Ayad^{161,†}, T. Aziz^{111,†}, S. Baehr^{48,†}, S. Bahinipati^{33,†}, P. Bambade^{54,†}, Y. Ban^{103,†}, M. Barrett^{170,†}, J. Baudot^{47,†}, P. Behara^{36,†}, K. Belous^{8,†}, M. Bender^{54,†}, J. Bennett^{8,†}, M. Berger^{40,†}, E. Bernier^{59,†}, F. U. Bernlochner^{48,†}, M. Bessner^{38,†}, D. Besson^{88,†}, S. Bettarini^{97,†}, V. Bhardwaj^{32,†}, B. Bhuyan^{34,†}, T. Bilka^{40,†}, S. Bilimic^{86,†}, S. Bilokin^{47,†}, G. Bonvicini^{170,†}, A. Bozek^{93,†}, M. Bračko^{144,109,†}, P. Branchini^{59,†}, N. Braun^{48,†}, R. A. Briere^{84,†}, T. E. Browder^{38,†}, L. Burmistrov^{75,†}, S. Bussino^{59,†}, L. Cao^{48,†}, G. Caria^{145,†}, G. Casaroli^{57,†}, C. Cecchi^{56,†}, D. Cervenkov^{104,†}, M.-C. Chang^{22,†}, P. Chang^{92,†}, R. Cheab^{146,†}, V. Chekelian^{83,†}, Y. Chen^{154,†}, B. G. Cheon^{28,†}, K. Chilikin^{77,†}, K. Cho^{70,†}, J. Choi^{14,†}, S.-K. Cho^{27,†}, S. Choudhury^{35,†}, D. Cinabro^{170,†}, L. M. Cremaldi^{146,†}, D. Cuesta^{47,†}, S. Cunliffe^{16,†}, N. Dash^{33,†}, E. de la Cruz Burelo^{9,†}, E. de Lucia^{52,†}, G. De Nardo^{54,†}, M. De Nuccio^{16,†}, G. De Pietro^{59,†}, A. De Yta Hernandez^{9,†}, B. Deschamps^{29,†}, M. Destefanis^{60,†}, S. Dey^{116,†}, F. Di Capua^{54,†}, S. Di Carlo^{75,†}, J. Dingfelder^{129,†}, Z. Doležal^{19,†}, I. Domínguez Jiménez^{125,†}, T. V. Dong^{30,26,†}, D. Dosselt^{45,†}, S. Duell^{129,†}, S. Eidelman^{69,67,74,†}

[†]Editor.

[‡]Belle II Collaborator.

[§]Theory or external contributing author.

© The Author(s) 2019. Published by Oxford University Press on behalf of the Physical Society of Japan.
This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.
Funded by SCOAP³.

「レガシーブック」 (全 928 ページ)
主に Belle と BaBar の成果

「B2TiP レポート」 (全 654 ページ)
主に Belle II での感度

Bの物理の歴史

小林益川前夜 — 標準模型の礎

- **1963年 クォーク模型** (Gell-mann Zweig)
 - 中間子・バリオンの動物園を3種類のクォークの組合せできれいに分類
- **1964年 K 中間子の CP の破れ発見** (Cronin Fitch)
 - **この時代の素粒子物理の最大の謎となる**
- **1964年 ヒッグス機構** (Higgs)
 - 粒子の質量の起源を説明
- **1967年 電弱相互作用統一理論** (Weinberg Salam)
 - ウィークボゾンの質量を説明、中性 Z ボゾン予言
- **1970年 GIM メカニズム** (Glashow Iliopoulos Maiani)
 - $K^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$ が発見されないことを説明、チャームクォークを予見

フレーバー物理的手法
による高いエネルギー
スケール開拓の時代

小林益川模型 — b クォークを予言

- K 中間子の CP の破れをエレガントに説明
- 1973 年にクォークが 6 種類あることを予言
 - 1974 年の J/ψ (チャームクォーク) 発見前で、3 種類しか知られていなかった
 - 6 種類 (3 世代) あれば、クォーク間遷移に複素位相が生じる

Progress of Theoretical Physics, Vol. 49, No. 2, February 1973

***CP*-Violation in the Renormalizable Theory of Weak Interaction**

Makoto KOBAYASHI and Toshihide MASKAWA

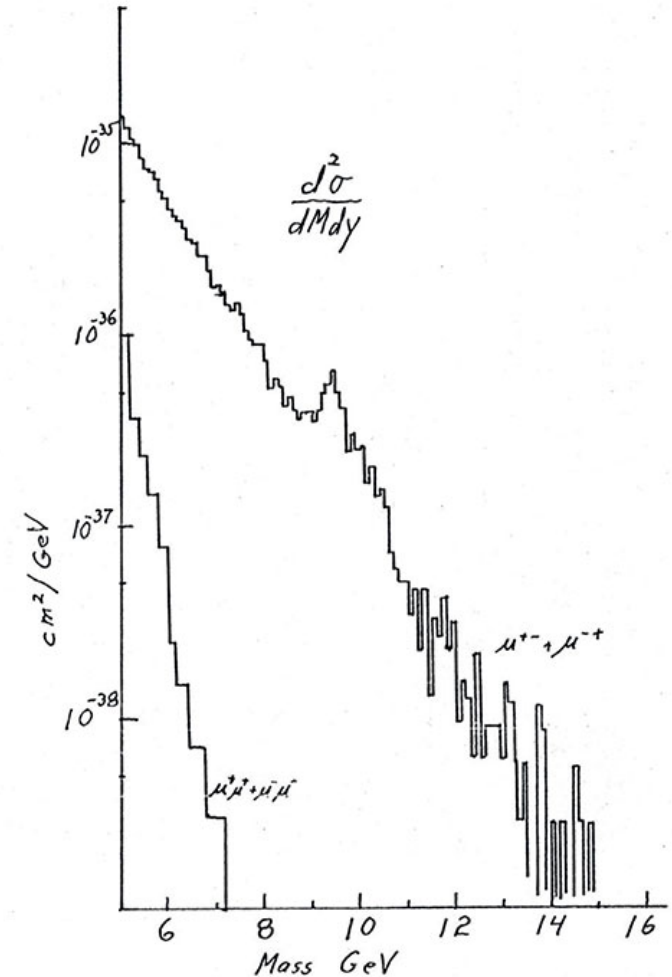
Department of Physics, Kyoto University, Kyoto

(Received September 1, 1972)

フレーバー物理による
高いエネルギースケール
の開拓

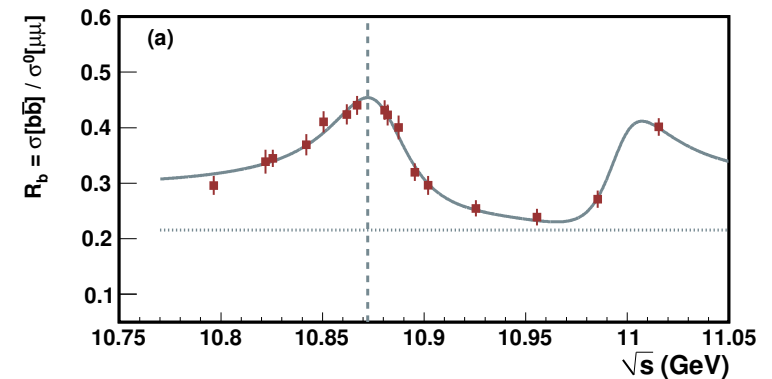
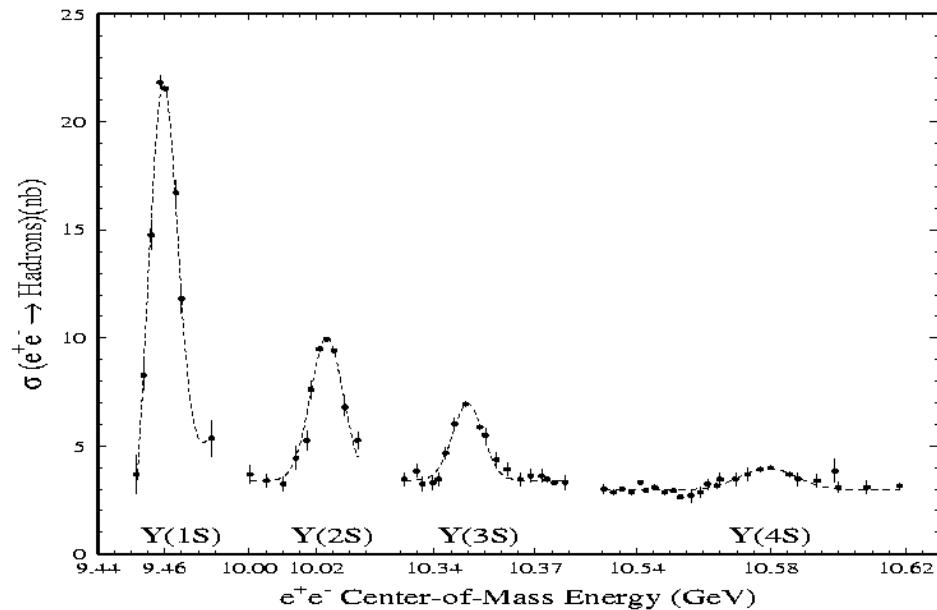
b クォーク発見 — Υ 共鳴状態

- **1977 年 8 月 Leon Ledermann**
Fermilab 288 400 GeV 陽子固定標的実験
 $\mu^+ \mu^-$ 9.5 GeV にピーク、 Υ と命名
- **5 番目のクォーク**
1974 年の J/ψ から始まる 4 番目のクォーク発見からわずか数年後
- **Hidden bottom**
この時点ではボトム量子数は隠れている
- **$e^+ e^-$ 実験での追認**
1977 年 10 月、DESY DORIS 実験
- **$L=0$ $J=1$ の基底状態 1^3S_1**
 $f\bar{f}$ 対消滅/生成時の仮想光子と同じスピン
 2^3S_1 状態 $\Upsilon(2S)$ も DORIS ですぐに発見



B 中間子発見 — $\Upsilon(4S)$

- $\Upsilon(1S)$ 、 $\Upsilon(2S)$ 、 $\Upsilon(3S)$ 、 $\Upsilon(4S)$ 、 $\Upsilon(5S)$ 、 $\Upsilon(6S)$ (?)、...
- $\Upsilon(4S)$ **10580 MeV は B 中間子対に崩壊**
 - b クォークの量子数が現れる最も軽い状態: B^0 ($\bar{b}d$), B^+ ($\bar{b}u$)
 - 質量 5279 MeV、寿命 1.5 ps、...
 - 1980 年、Cornell CUSB 実験 (evidence)、CLEO 実験 (observation)



B 中間子混合発見

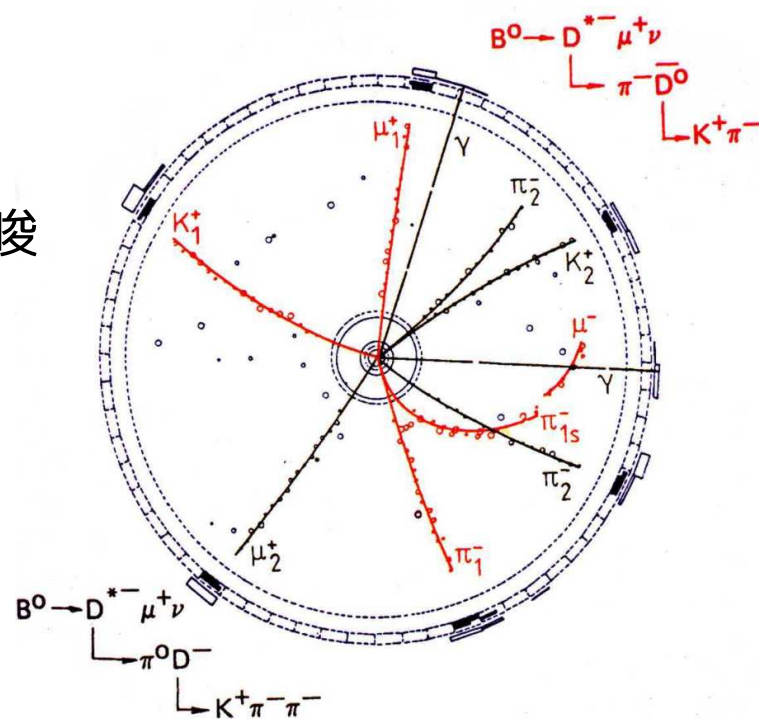
- 混合は中性中間子では普遍的な現象
 - K 中間子混合はよく知られていた
 - B 中間子混合は測れないくらい小さいと考えられていた

- 1987 年 ARGUS 実験

$\Upsilon(4S) \rightarrow B\bar{B} \rightarrow$ same sign lepton

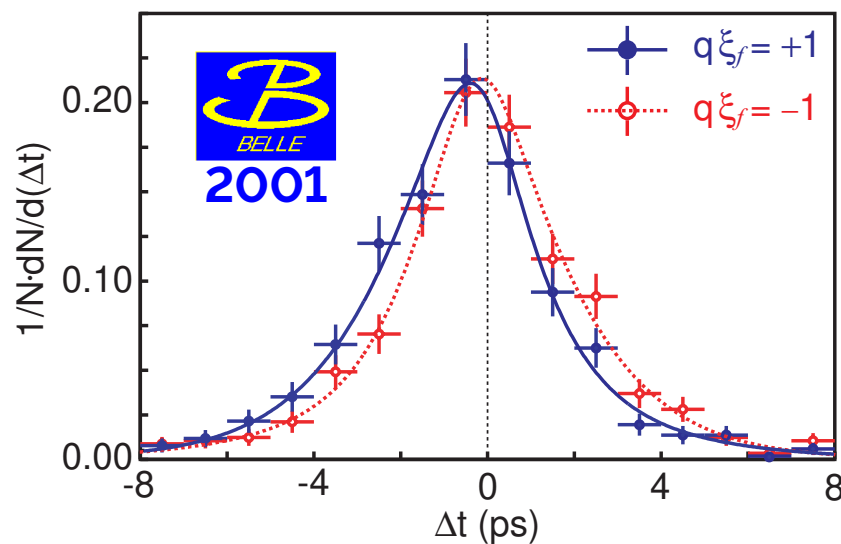
- 当時想定されていない高い混合レート
- トップクォークが非常に重たいことを示唆

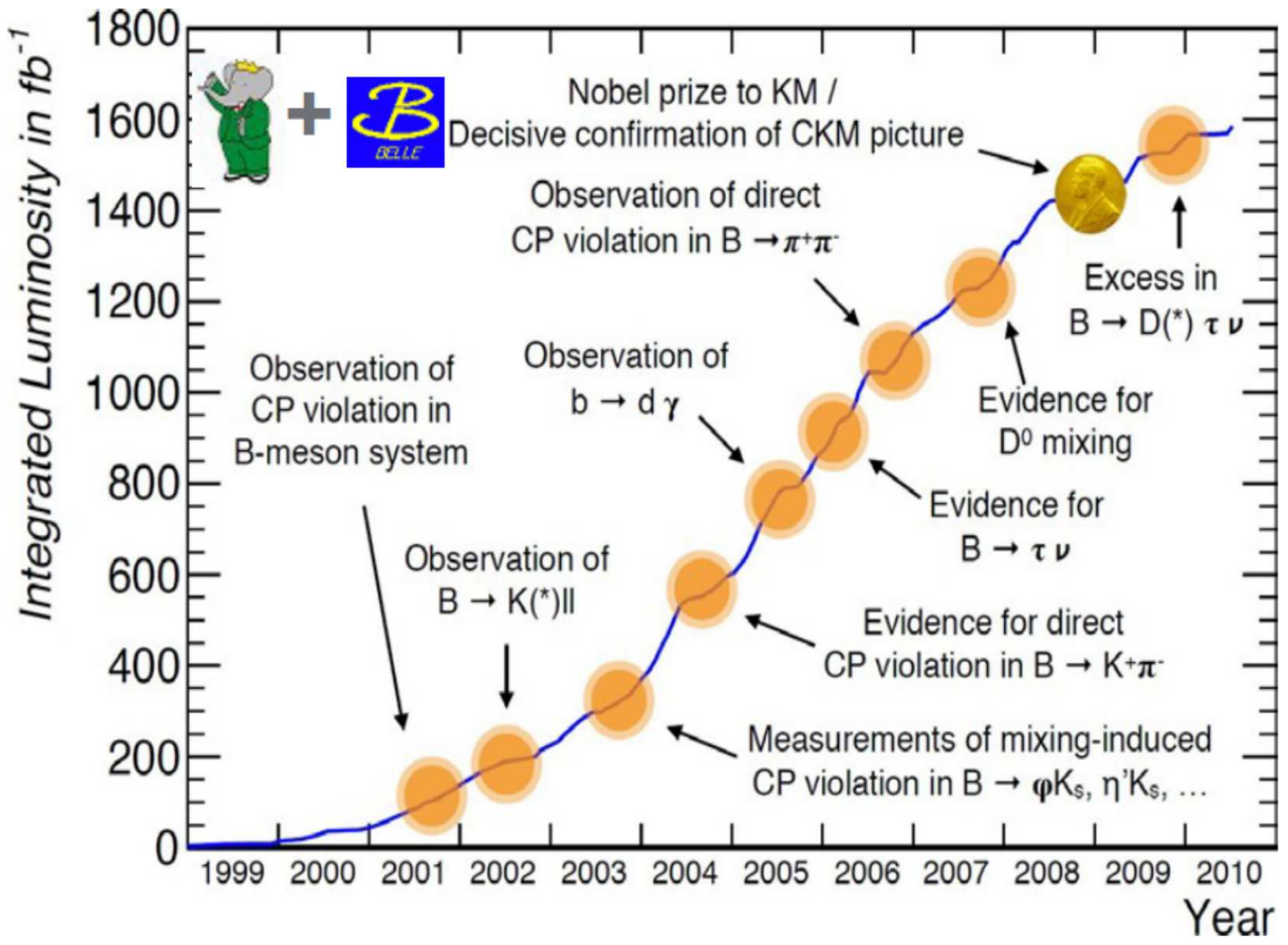
フレーバー物理による
高いエネルギースケール
の開拓



B 中間子の CP の破れ — 小林益川の検証

- 1981 年に三田らが B 中間子崩壊の CP の破れの測定を提言、ARGUS の大きな B 混合の後押しで各地で B ファクトリー構想
- KEK と SLAC で 1995 年ごろから建設開始、1999 年運転開始、**2001 年に B 中間子の CP の破れを発見**





1960s

1963年 クォーク模型 (Gell-mann, Zweig)

1964年 K中間子の CP 非保存の発見 (Fitch, Cronin)

1967年 宇宙創世における CP 非保存の役割 (Sakharov)

1970s

1973年 小林益川の 6 クォーク模型による CP の破れの説明

1974年 チャームクォークの発見 (Ting, Richter)

1979年 ボトムクォークの発見 (Lederman)

1980s

1981年 中性 B 中間子に大きな CP の破れの可能性 (三田, Bigi)

1987年 中性 B 中間子における (大きな) 混合の発見 (ARGUS)

1990s

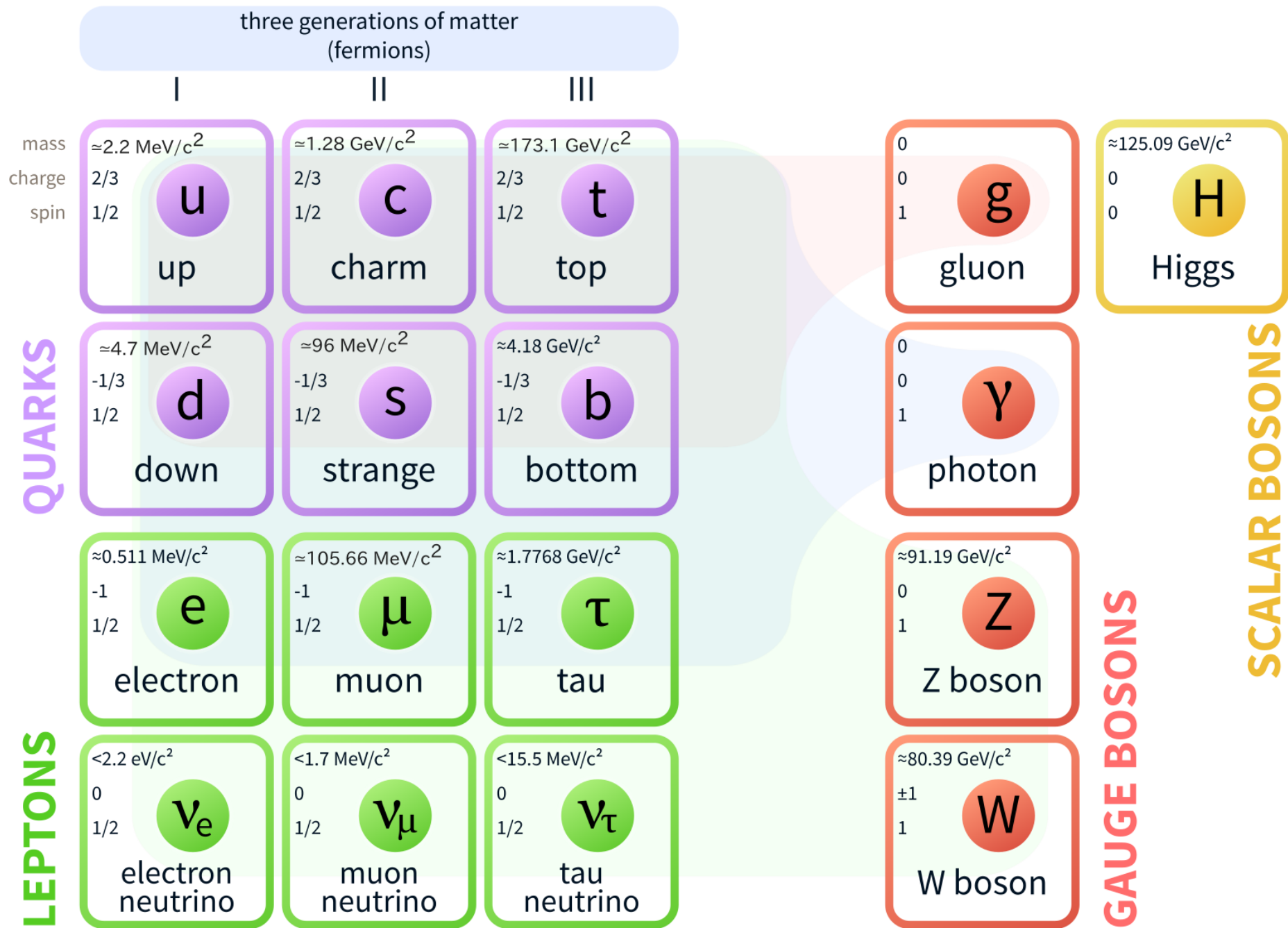
1995年 トップクォークの発見 (CDF, D0)

1999年 K中間子の直接的な CP 非保存の発見 (KTeV, NA48)

2000s

2001年 B 中間子の CP 非保存の発見 (Belle, BaBar)

2012年 ヒッグス粒子の発見



新物理の必要性

高エネ実験ではニュートリノ質量以外の SM の反証は見つかっていないが…

● 観測 (宇宙物理)

- 物質優勢宇宙 ⇒ SM 以外の CP の破れ、バリオン数非保存
- ダークマター ⇒ weakly interacting massive particle (WIMP)
- ダークエネルギー

● 理論的要請

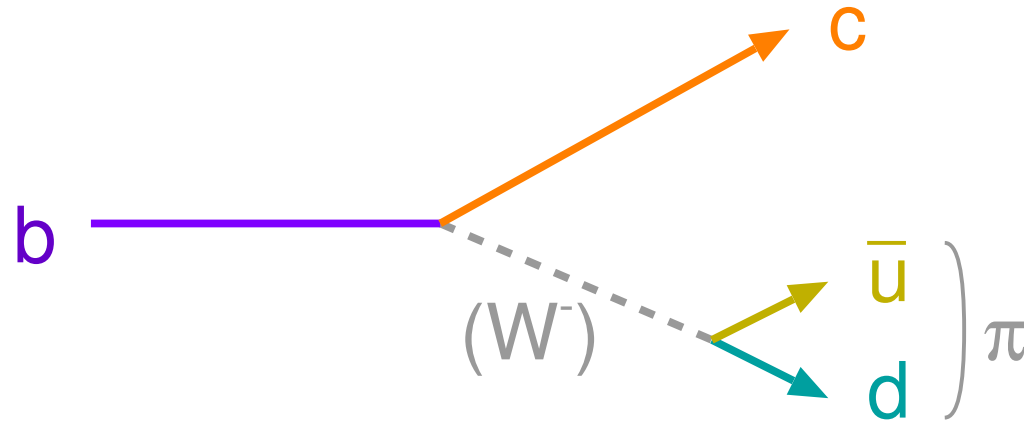
- 宇宙定数の起源
- 階層問題の解決策 ⇒ SUSY、extra dimension、...
- フレーバーの起源 ⇒ lepton flavor violation、...
- 強い CP 問題 ⇒ axion
- GUT への道

 エネルギー + インテンシティ・フレーバーフロンティアの課題

Bファクトリーでの新物理の探し方

b クォーク崩壊

- 電荷 $-1/3e$ 、スピン $1/2$ 、ボトム量子数、**質量約 4.2GeV**
- 弱い相互作用でより軽いクォーク (c, u) に遷移

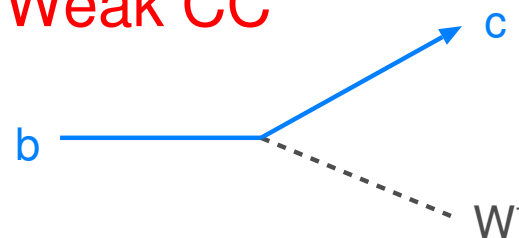


- 小林益川行列要素 $V_{cb} \sim \mathbf{0.04}$ でさらに抑制されている
- 重たい **W ボソン (80 GeV)** のエネルギースケールに感度がある
- 量子効果で **$b \rightarrow t$ (174 GeV)** の遷移も起きる

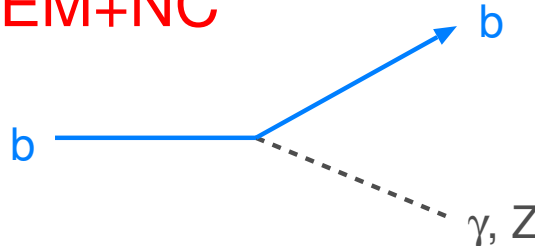
未発見のさらに高いエネルギースケールにも感度がある

標準模型、新物理

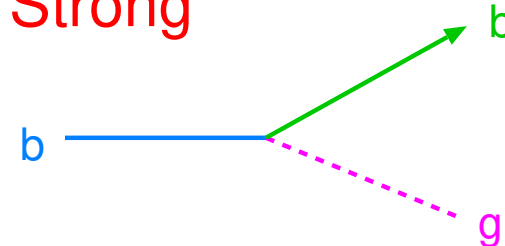
Weak CC



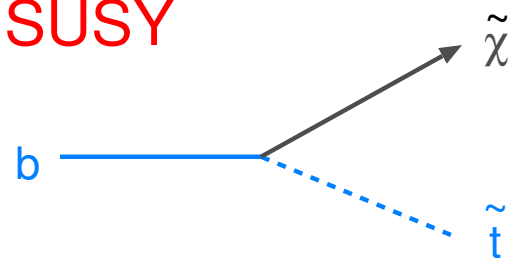
EM+NC



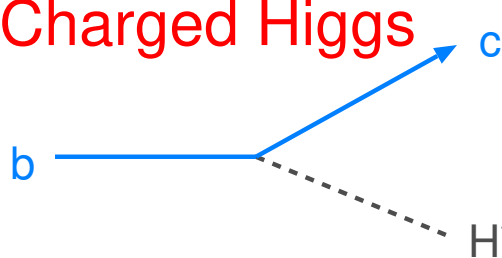
Strong



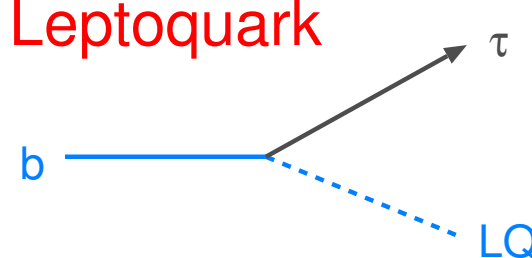
SUSY



Charged Higgs



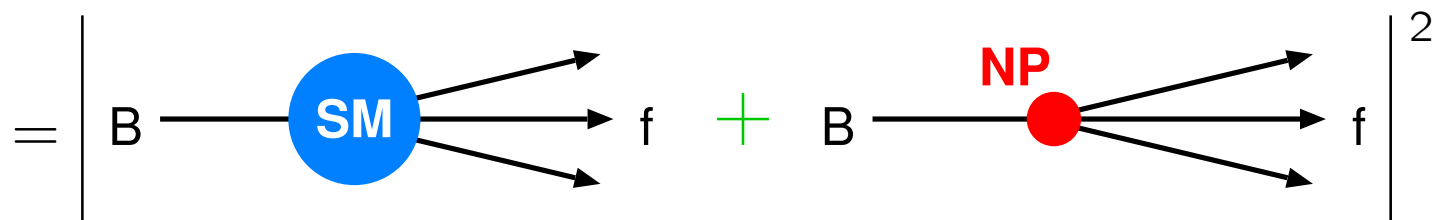
Leptoquark



- 標準模型でbクォークが遷移するのは弱い相互作用の荷電流だけ
- 強い相互作用はクォーク崩壊では必ずでてくる
- 高いエネルギーの**新物理**が存在して量子数が保存していれば**寄与**

始状態 B から終状態 f への崩壊幅

$$\Gamma(B \rightarrow f) = |A(B \rightarrow f)|^2 = |A_{SM}(B \rightarrow f) + A_{NP}(B \rightarrow f)|^2$$



- 同じ始状態 \rightarrow 終状態のダイアグラムはすべて寄与する
- 標準理論に比べて新物理の寄与の方がおそらくかなり小さい
- 振幅は複素数なので、必ずしも崩壊幅が大きくなるとは限らない

測定値と計算値 (標準模型) との差

$$\Delta\Gamma(B \rightarrow f) = \Gamma_{\text{meas}}(B \rightarrow f) - |A_{SM}(B \rightarrow f)|^2$$

エネルギースケールの議論

- たとえば標準模型で 1-loop で抑制されている B 中間子混合の場合

$$\mathcal{H}_{\text{SM}} = \frac{1}{4} \frac{C_0}{\Lambda_0^2} (V_{ti}^* V_{tj})^2 [\bar{d}_{Li} \gamma_\mu d_{Lj}]^2, \quad \text{ここで } \Lambda_0 = 4\pi m_W / g^2 = 2.5 \text{ TeV}$$

- 新物理がまったく同じ構造ならば (minimal flavor violation)

$$\mathcal{H}_{\text{NP}} = \frac{1}{4} \frac{C_{\text{NP}}}{\Lambda_{\text{NP}}^2} (V_{ti}^* V_{tj})^2 [\bar{d}_{Li} \gamma_\mu d_{Lj}]^2$$

$$\mathcal{H}_{\text{NP}} \sim \mathcal{H}_{\text{SM}} \text{ でも } \Lambda_{\text{NP}} = 4\pi m_{\text{NP}} / g^2 \sim 2.5 \text{ TeV}$$

- 新物理に $(V_{ti}^* V_{tj})$ のようなフレーバー構造がなければ

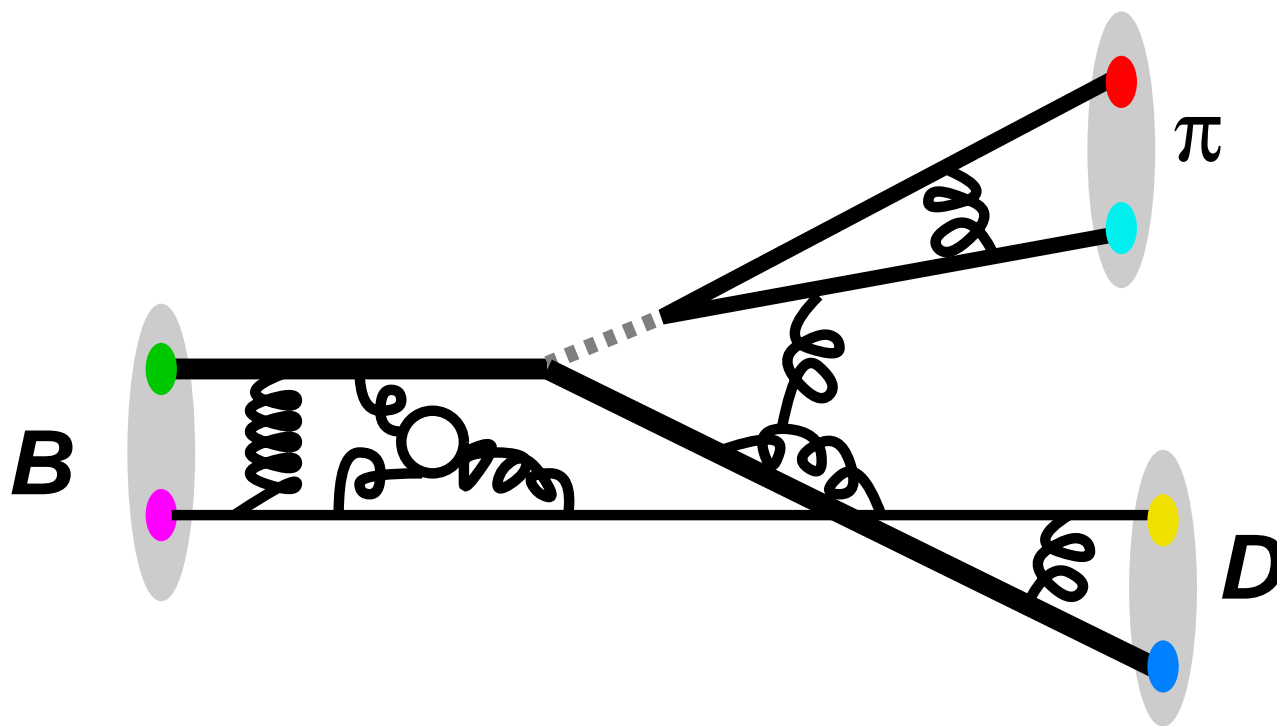
$$\mathcal{H}_{\text{NP}} = \frac{C_{\text{NP}}}{\Lambda_{\text{NP}}^2} [\bar{d}_{Li} \gamma_\mu d_{Lj}]^2, \quad \text{もし } \mathcal{H}_{\text{NP}} \sim \mathcal{H}_{\text{SM}} \text{ だと } \Lambda_{\text{NP}} \sim \mathbf{500 \text{ TeV}}$$

新物理の寄与?

標準模型はこれまでの実験結果を良く説明しているので…

- 標準模型で抑制されていない過程で新物理の影響を見るのは厳しい
 - 極小の寄与を見る超精密測定は B ファクトリー向きではない (統計が足りない)
- 標準模型で抑制されている過程での新物理の影響を探す
 - 標準模型 $O(100\text{GeV})$ の 10 倍程度 (以上) のスケール?
 - 数 % 程度の標準模型からのずれを探す (B ファクトリーの精密測定)
 - 実験だけでなく理論も精度が必要
- 標準模型での禁止/強く抑制されている過程での新物理を探す
 - 事象が見つかれば新物理のようなケース (レプトンフレーバーの破れ、など)
 - ハドロンの終状態だと本当に禁止されている状態を作るのは難しい

- クォーク遷移の弱い相互作用は高次効果も小さく摂動計算も可能
- でも始状態が B 中間子だとクォーク間の低エネルギーの強い相互作用の部分の摂動計算ができない
- クォークの遷移行列が正確に分かってても例えば崩壊の振幅 (の二乗の崩壊幅) が計算できない \Leftrightarrow 実験では崩壊幅 (崩壊分岐比) を測定
- 現象論的な手法で 20-30% 程度の精度では計算できる (不十分…)



対称性の破れ・普遍性の破れ

分岐比の測定だけでは、よほど大きく標準模型の予想からずれない限り新物理の兆候を得るのは難しいので、**比や差を測定することにより理論の不定性を減らす**

- CP 対称性 — $B^0 \Leftrightarrow \bar{B}^0, B^+ \Leftrightarrow B^-$
- アイソスピン対称性 — $B^0 \Leftrightarrow B^+$
- 崩壊角分布
- ユニタリティー三角形の整合性 — $(\phi_1, \phi_2, \phi_3) \Leftrightarrow (V_{cb}, V_{ub}, V_{td})$
- レプトンユニバーサルティー — $e \Leftrightarrow \mu \Leftrightarrow \tau$

終状態を選ぶ

- **インクルーシブ測定** — 終状態をすべて測定できればクォークレベルのダイアグラムとの対応づけができる
 - $B \rightarrow X_s \gamma, B \rightarrow X_c l \nu, B \rightarrow X_u l \nu$ など
 - すべての phase space をカバーすることは難しい
- **レプトニック崩壊** — レプトンのみで終状態のハドロン不定性がない
 - ヘリシティ抑制されていて分岐比が測れないくらい小さい
 - τ を含むものは終状態に複数のニュートリノが出てくるので難しい
- **セミレプトニック崩壊、輻射崩壊**
 - レプトンや光子を含むモードは終状態のハドロン不定性がやや少ない

とにかく探す

- τ の LFV — BSM の動かぬ証拠 ($\tau \rightarrow \mu\gamma, \dots$)
- ユニタリティ三角形の精密測定 ($B \rightarrow J/\psi K_S, B \rightarrow \rho\pi, \dots$)
- 荷電ヒッグスの寄与しそうなモード ($B \rightarrow D\tau\nu, \dots$)
- 右巻流の寄与しそうなモード ($B \rightarrow K^*\gamma, \dots$)
- ペンギン崩壊を含むモードの精密測定 ($B \rightarrow K^*\ell^+\ell^-, \dots$)
- もう少しで測れそうな崩壊モード ($B \rightarrow \pi\tau\nu, \dots$)
- 標準模型ではすぐに測れそうにないモード ($B^0 \rightarrow \tau^+\tau^-, \dots$)
- チャームの物理、特に CP の破れ ($D^+ \rightarrow \pi^+\pi^0, \dots$)
- τ の CP の破れ ($\tau \rightarrow K_S\pi, \dots$)
- 暗黒物質探索 ($Z' \rightarrow \text{invisible}, \dots$)
- ないもの探し、例えばレプトン数を破る ($B^+ \rightarrow D^-\ell^+\ell^+, \dots$)

格子 (Lattice)QCD

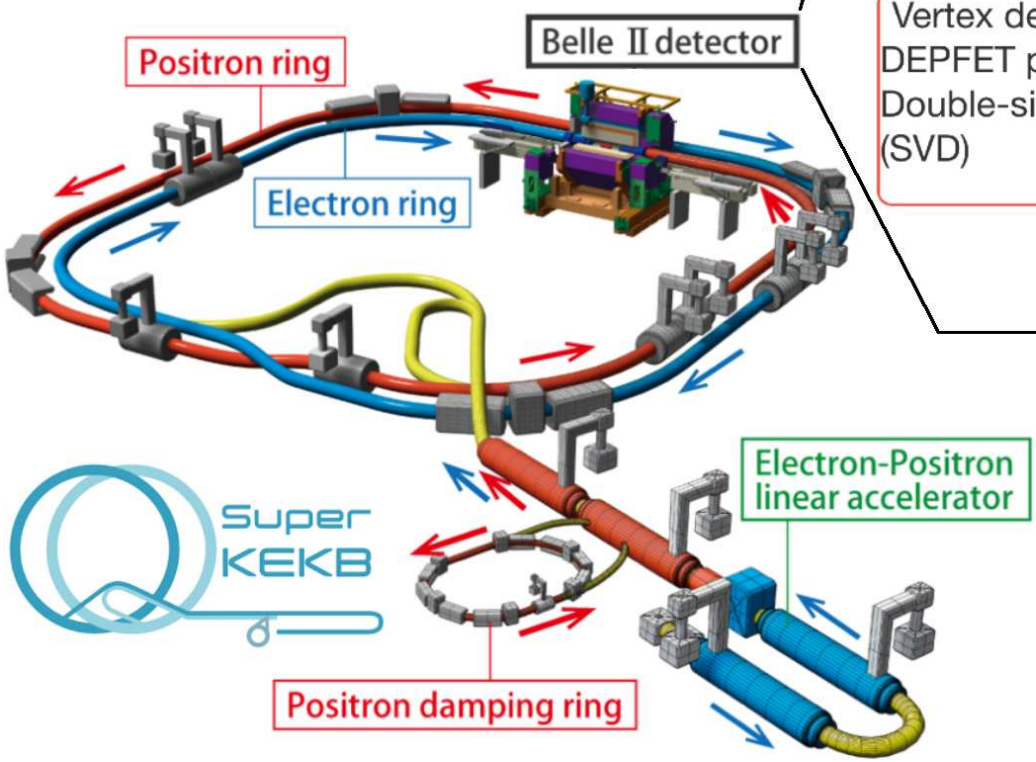
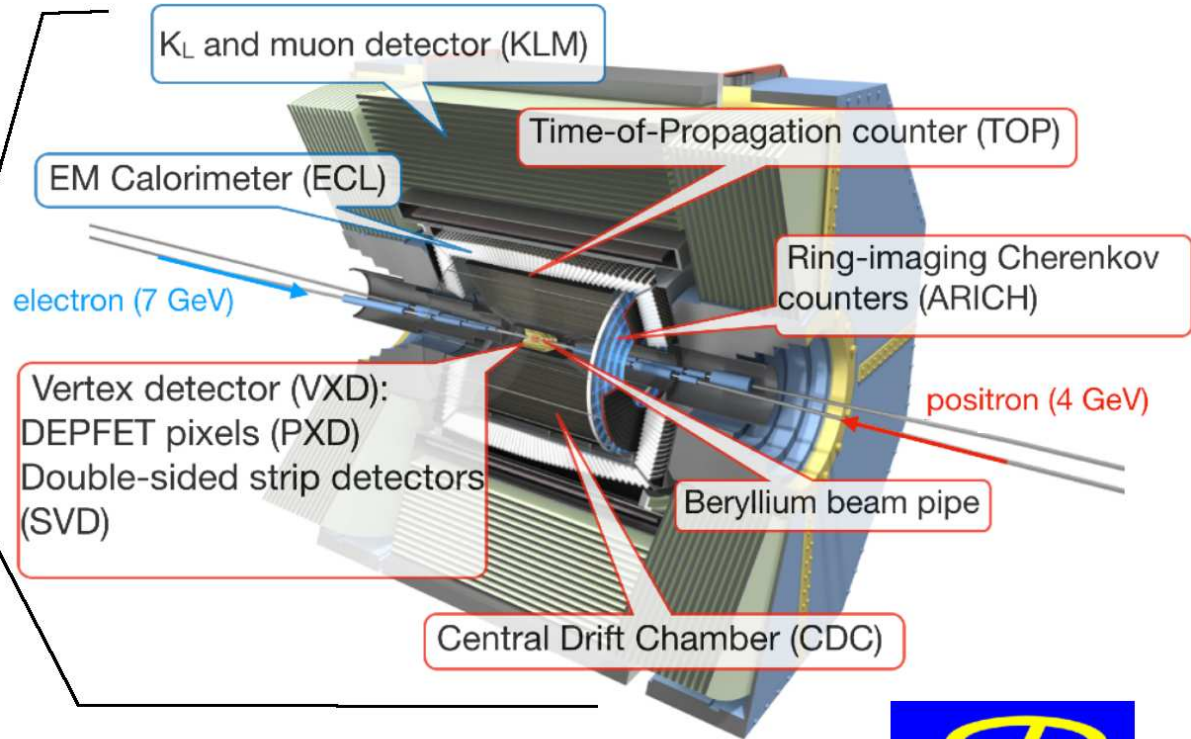
- QCD の摂動計算ができないのハドロン状態を計算する手法
- 格子空間上で経路積分をモンテカルロ法で数値計算
- 昔からあるが、**どんどんよくなってきている**
 - 計算機の性能向上、アルゴリズムの性能向上
 - クエンチ近似に頼る必要がなくなっている
 - 大きなクォーク質量を使用しなくてよくなってきている
- **使い道**
 - セミレプトニック崩壊
 - レプトニック崩壊
 - (K の崩壊 — B 以外からの制約)
 - (B のハドロニック崩壊や輻射崩壊にも使えるようになるとうれしい)

フレーバー物理の難しいところ — 何か新しいことを発見してもすぐに新物理と確定できる例はあまり多くなく、また標準模型からのずれが見つかった時にすぐに新物理の理論模型を同定できるわけではない…

フレーバー物理の魅力 — エネルギーフロンティアではアクセスできない高いエネルギースケールに手が届く

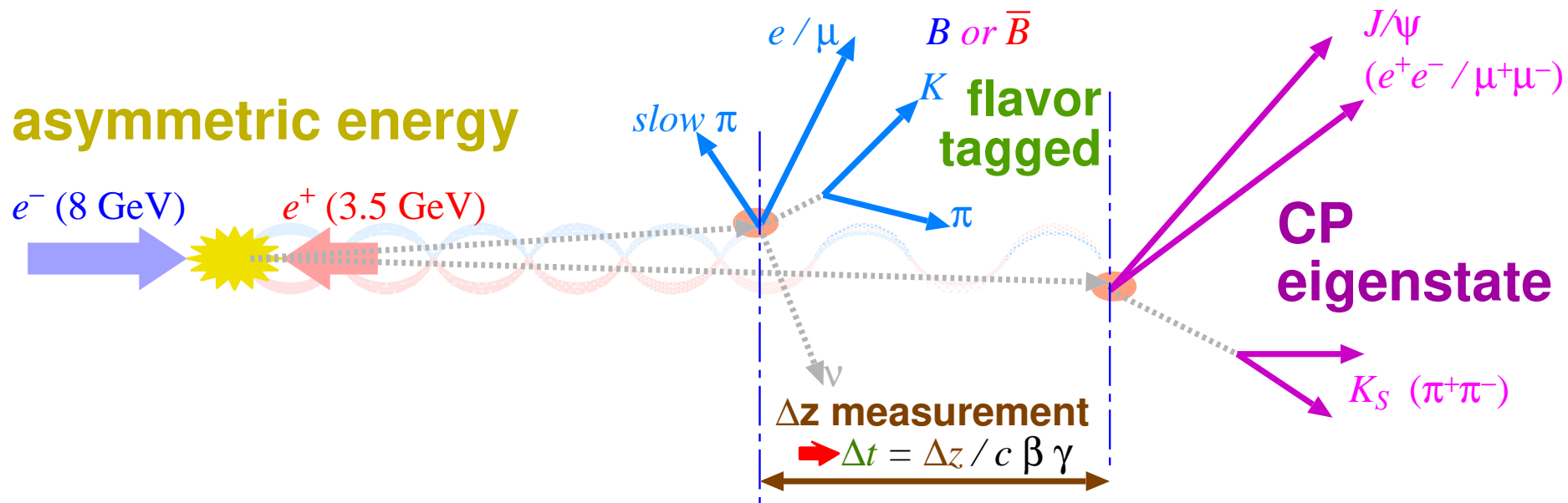
SuperKEKB と Belle II

HxWxD ~ 8m x 8m x 8m



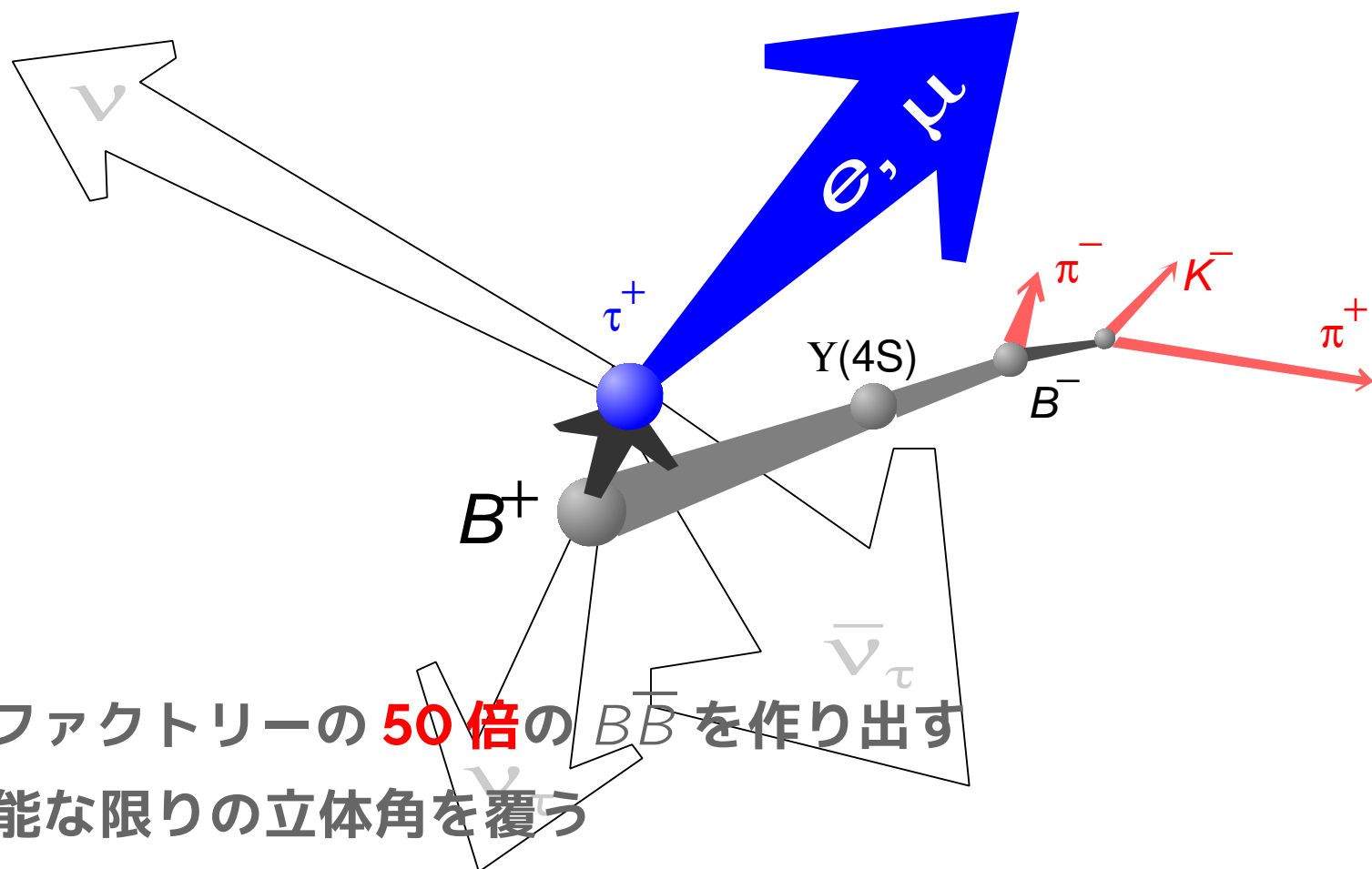
linac ~1km、ring 周長 ~3km

(最初の) Bファクトリーの設計



- 速度を持った $B^0 - \bar{B}^0$ 状態を 10^8 個以上作り出す
- CP 固有状態の検出
- (反対側の B の) フレーバー同定 (B^0 か \bar{B}^0 か)
- 崩壊点の差を測る

スーパーBファクトリーの設計



- Bファクトリーの**50倍**の $B\bar{B}$ を作り出す
- 可能な限りの立体角を覆う
- 技術の進歩に即した良い検出器にする
- 基本的設計はBファクトリーと同じ (崩壊点の差も測る)

ルミノシティを上げる

- 事象数は (生成断面積) × (ルミノシティ) × (分岐比)
- 事象数を増やすにはルミノシティを上げる

$$L = \frac{N^+ N^- f}{4\pi\sigma_x\sigma_y} = \frac{\gamma_{\pm}}{2e r_e} \left(1 + \frac{\sigma_y^*}{\sigma_x^*} \right) \frac{I_{\pm} \xi_{\pm y}}{\beta_y^*} \frac{R_L}{R_y}$$

N^{\pm} — (陽) 電子数

$\sigma_{x/y}$ — 衝突断面の幅/高さ

f — 衝突頻度

I_{\pm} — ビーム電流

$\xi_{\pm y}, \beta_y^*$ — 加速器パラメータ

- β_y^* を KEKB の 1/20 に小さくしてルミノシティを上げる
- ビーム電流も 2 倍に上げる
- エネルギー非対称性を少し小さくしてビーム寿命を改善
 - 重心系での立体角のロスも小さくなる、電気代もセーブ
 - 崩壊点の差は測定しにくくなるが、検出器性能向上でカバー

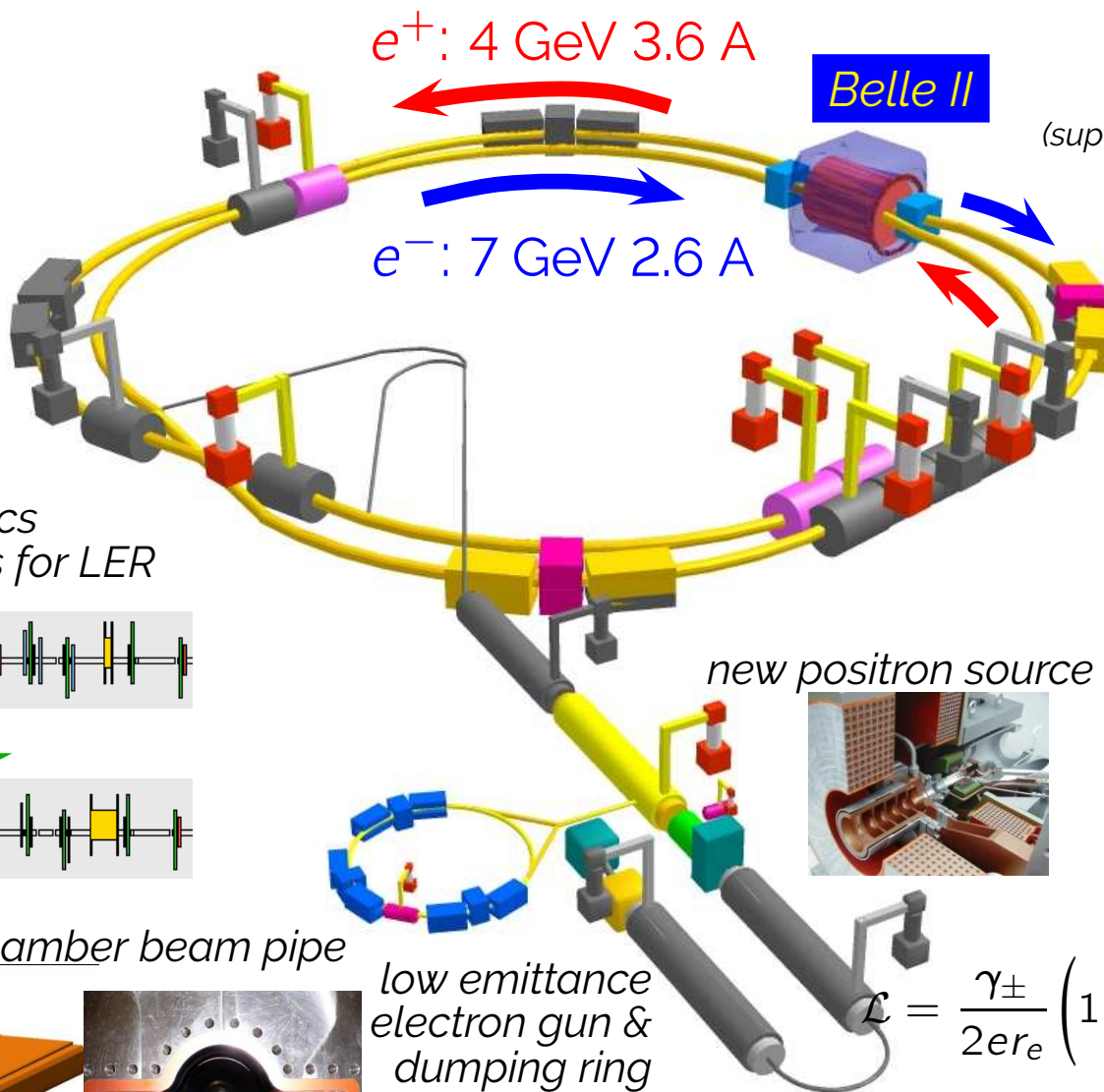
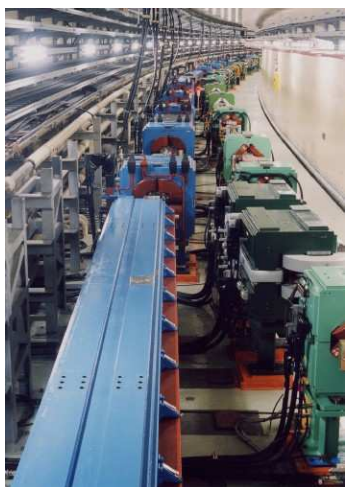
parameters	KEKB		SuperKEKB		units
	LER	HER	LER	HER	
beam energy	3.5	8	4	7	GeV
crossing angle	22		83		mrad
horiz. emittance	18	24	3.2	5.1	nm
emittance ratio	0.88	0.66	0.27	0.25	%
β_x/β_y at IP	1200/5.9		32/0.27	25/0.31	mm
beam size σ_z at IP	6.0		6.0	5.0	mm
beam size σ_x at IP	150		10	11	μm
beam size σ_y at IP	940		48	62	nm
beam currents	1.64	1.19	3.6	2.6	A
beam-beam ξ_y	0.129	0.090	0.0886	0.0830	
luminosity	2.1×10^{34}		8×10^{35}		$\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$

Belle II
TDR (2010)
Table 2.3

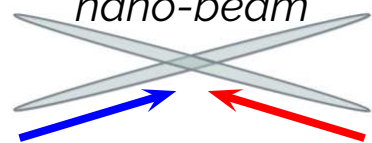
- ナノビーム: 極小ビームサイズ ($\sim 60 \text{ nm}$) $\Leftrightarrow \beta_y^* \sim \mathbf{0.3 \text{ mm}}$
- 大きな交差角: 衝突点近傍でビームを曲げない (バックグラウンド対策)
- エネルギー非対称性の緩和: LER 寿命延命策 (それでも ~ 10 分)

大規模改修

Reusing KEKB components (gray) + many new systems (color)



colliding bunches
"nano-beam"



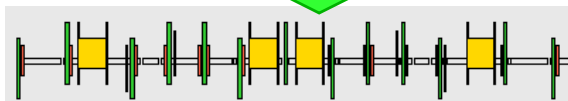
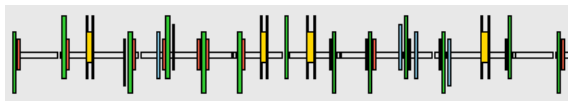
final focusing quad
(superconducting+permanent)



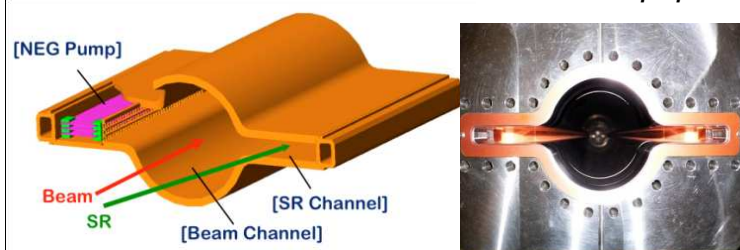
more RF systems



low emittance optics
with longer dipoles for LER



TiN-coated antechamber beam pipe



new positron source

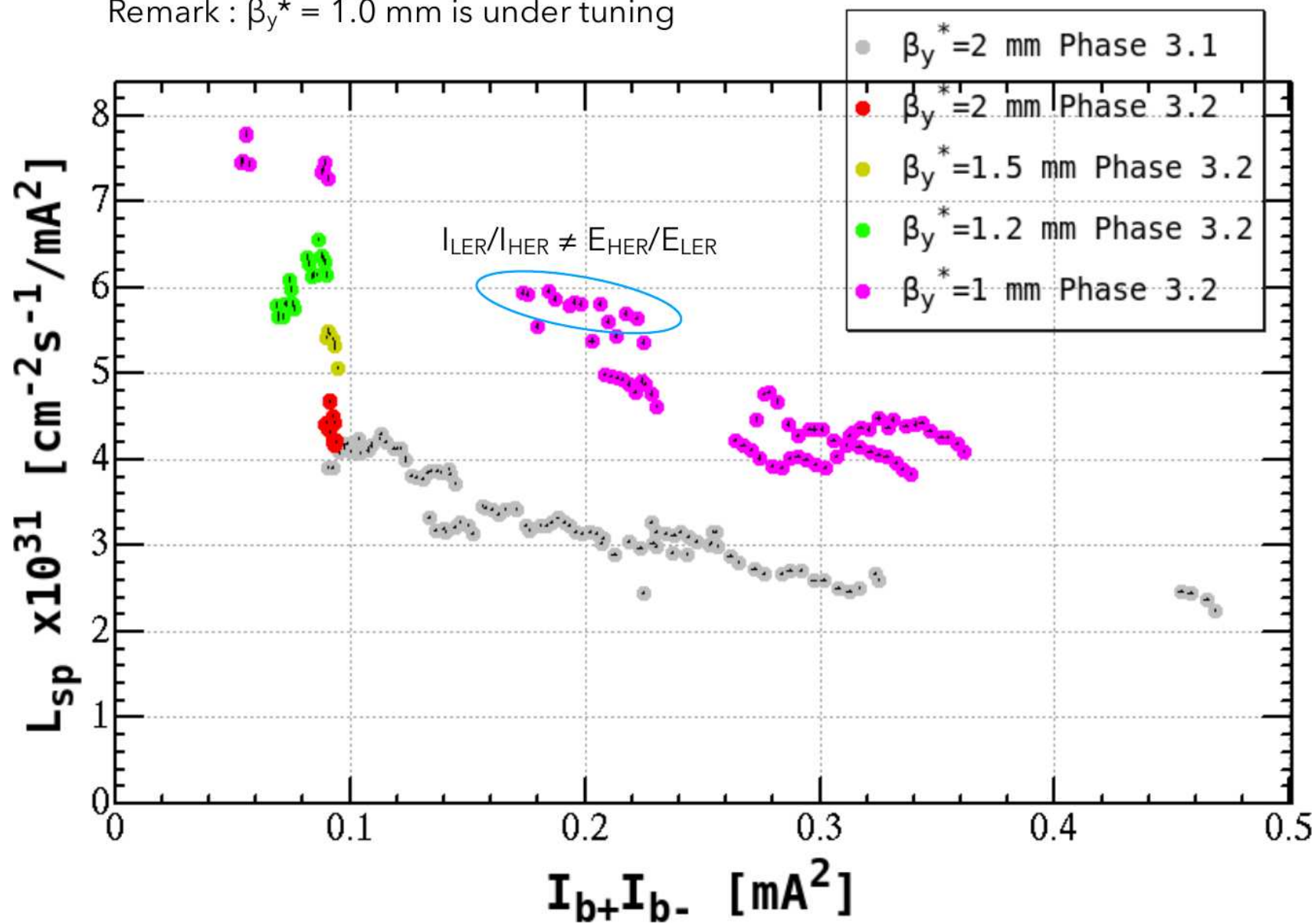


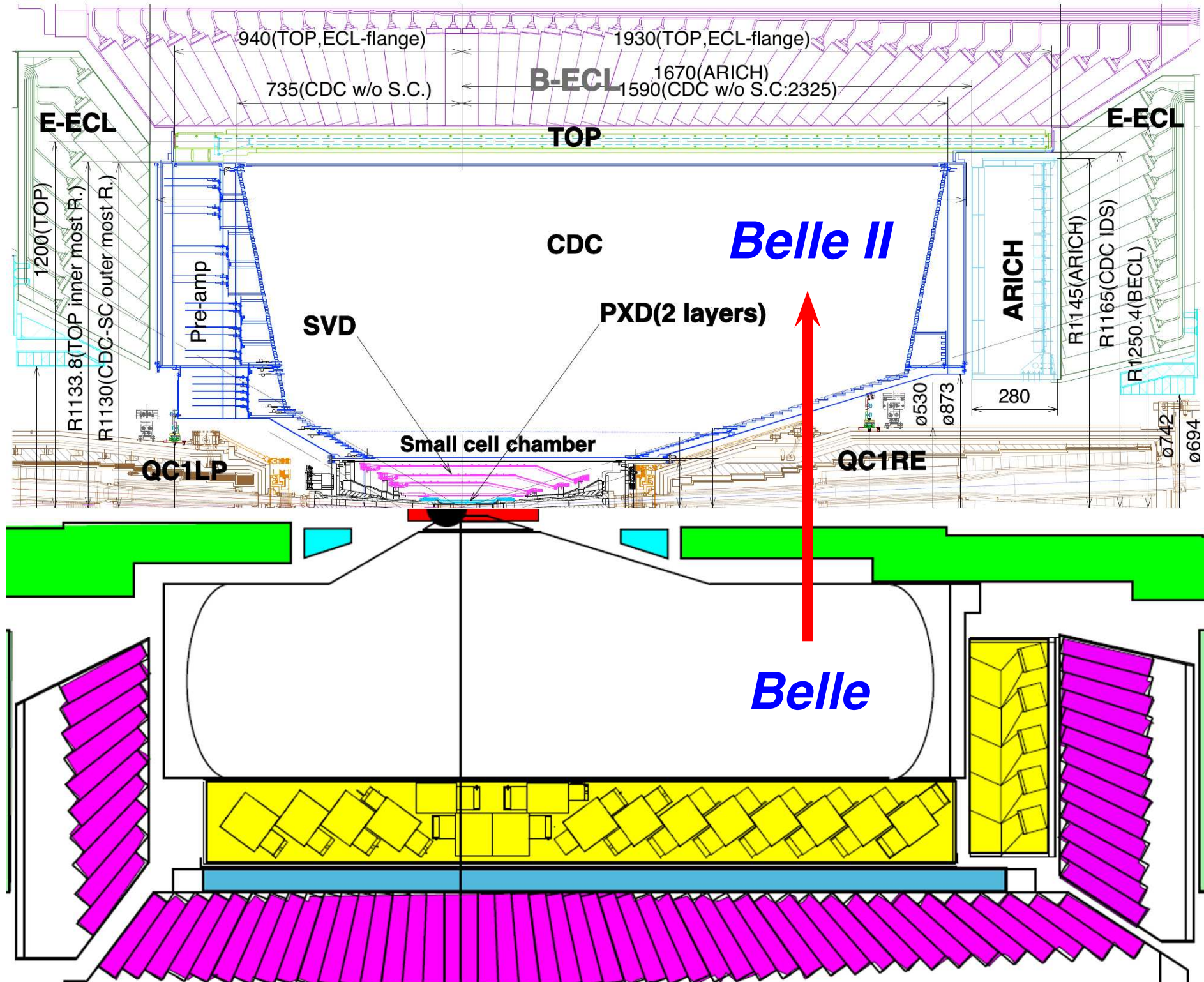
$$\mathcal{L} = \frac{\gamma_{\pm}}{2e r_e} \left(1 + \frac{\sigma_y^*}{\sigma_x^*} \right) \frac{I_{\pm} \xi_{\pm y}}{\beta_y^*} \left(\frac{R_L}{R_y} \right)$$

target $\mathcal{L} = 8 \times 10^{35} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

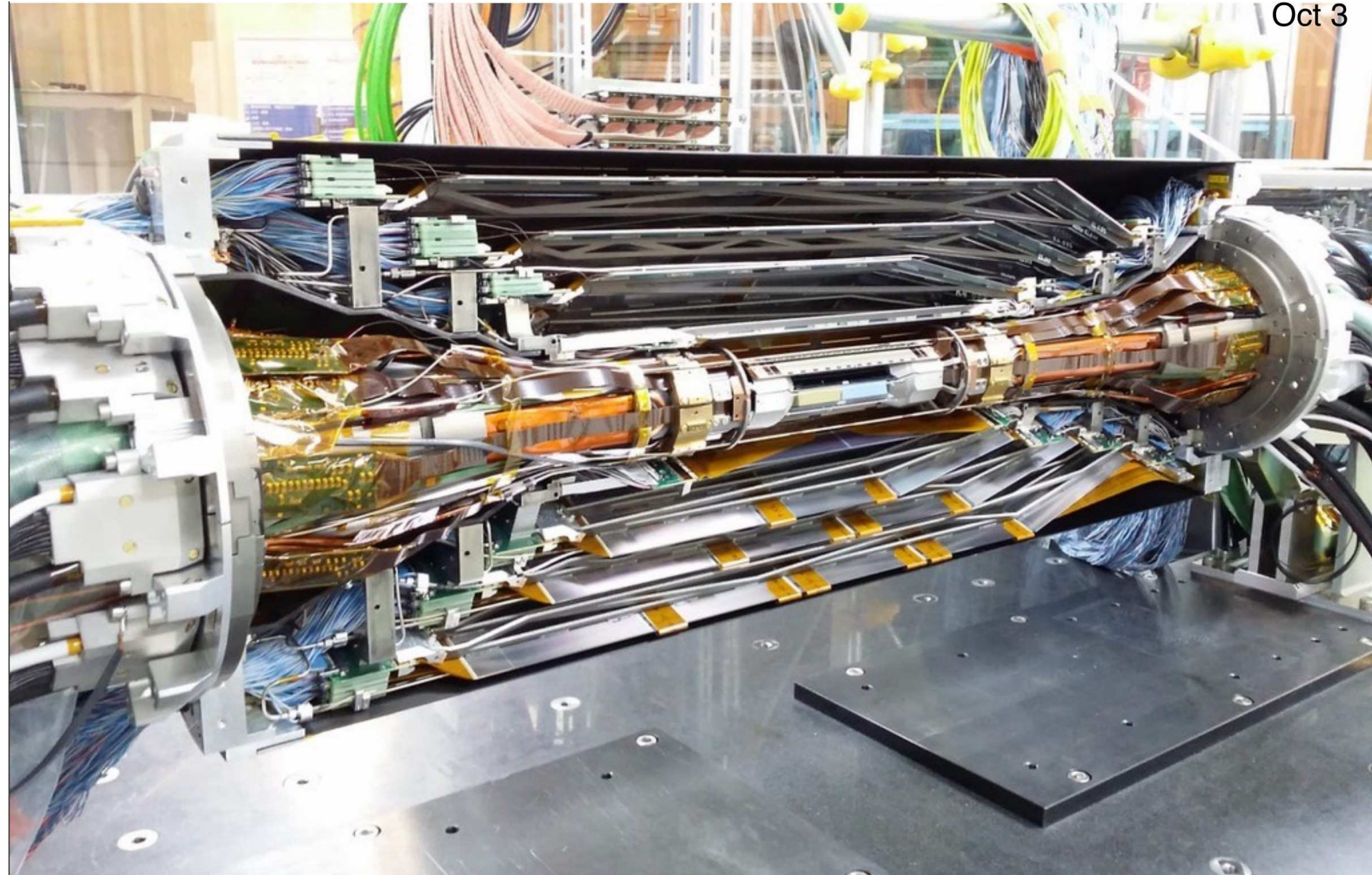
現状

Remark : $\beta_y^* = 1.0$ mm is under tuning





Oct 3



Belle II 検出器

● 高トリガーレート (500 Hz → 30 kHz)

- 読み出しのパイプライン化、デッドタイム削減

● バックグラウンド耐性強化: 高精細化、時間分解能向上

- 最内層のピクセル化、CDC のスモールセル化
- サンプリング読み出しから時間・波高抽出

● 崩壊点検出器の強化

- より細いビームパイプ (15mm → 10mm)、衝突点により近い最内層
- より大きな最外層 (4 層 → 6 層)

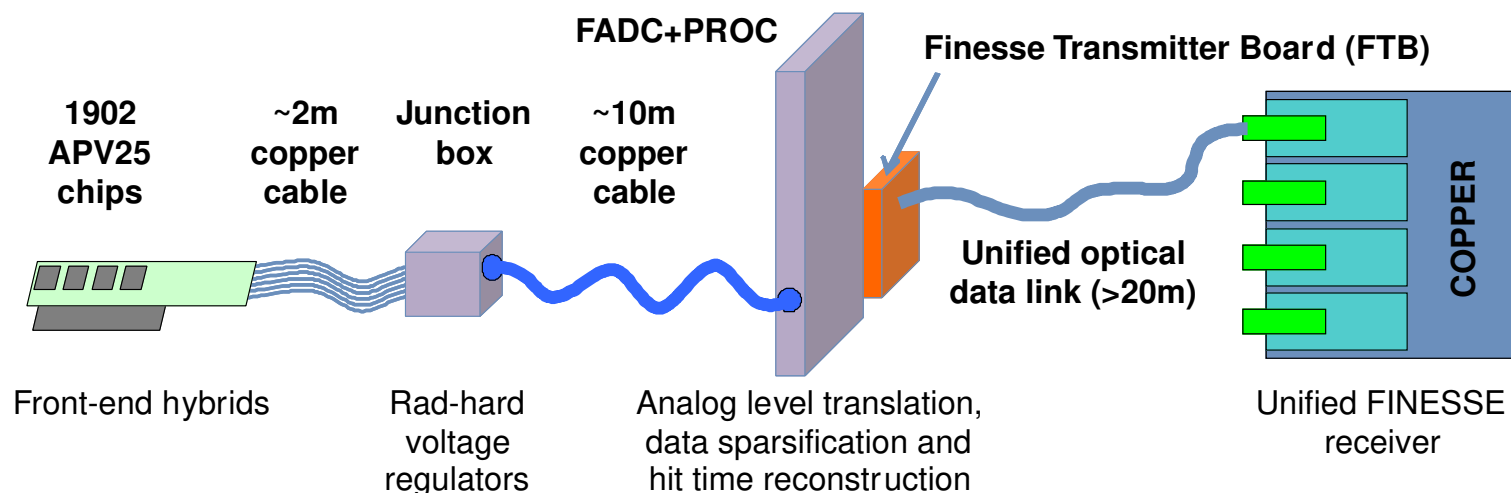
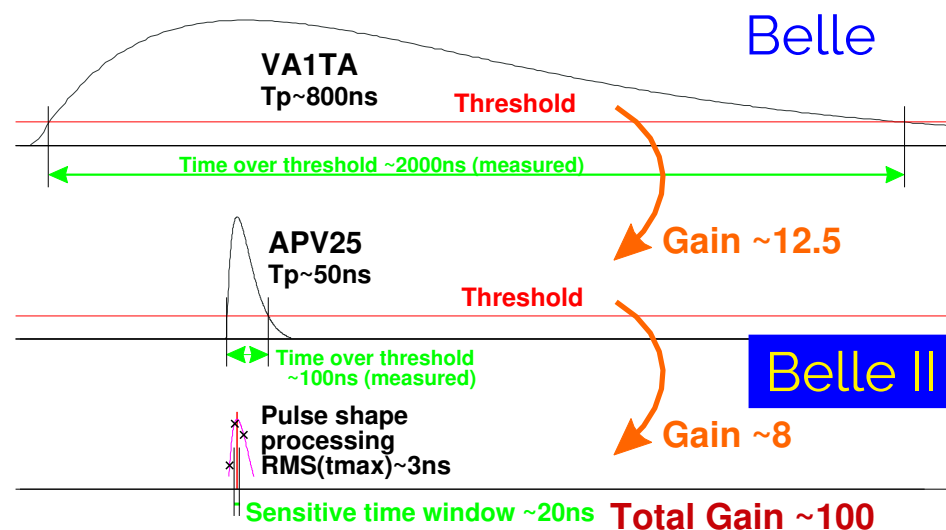
● 荷電粒子識別の強化

- Time-of-propagation カウンタ (TOP)
- Focusing Ring Image チェレンコフカウンタ (ARICH)

読み出し1 — SVD

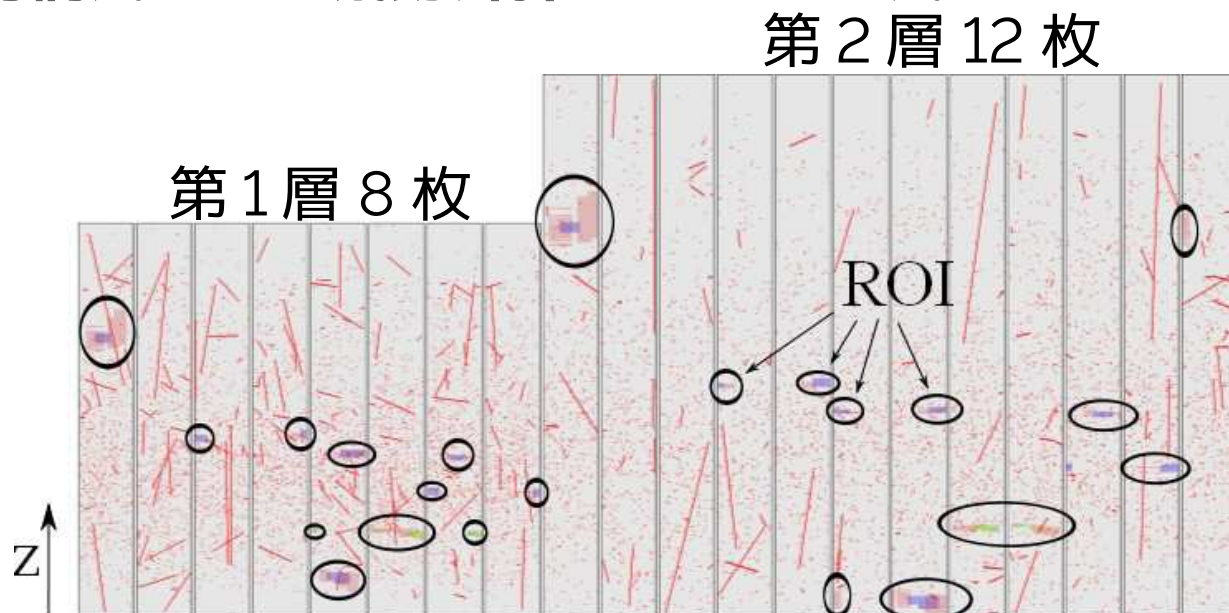
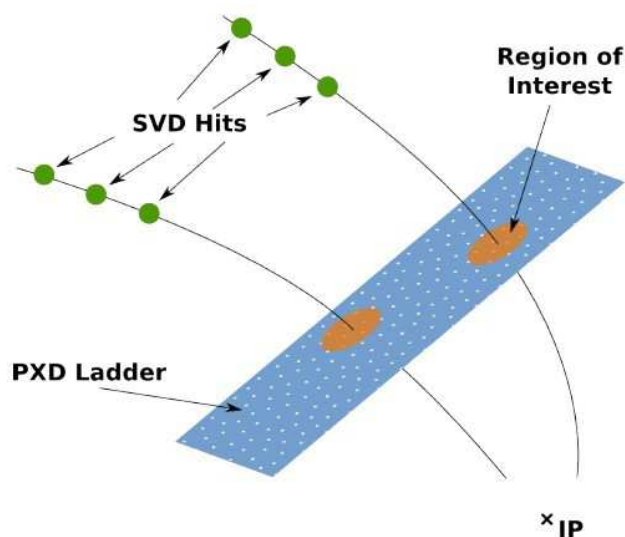
(自分の趣味で DAQ 関係の話が中心になります)

- CMS に使用されている APV25 を使用 (**放射線耐性**)、読み出しクロック (32ns) によるパイプライン読み出し
- **L1 トリガのレイテンシーと DAQ の主要スペックを SVD がほぼ決めてる**
- 3 または 6 サンプルを読み出し、ピークを検出
- 時間分解能向上によりノイズヒットを格段に減らす



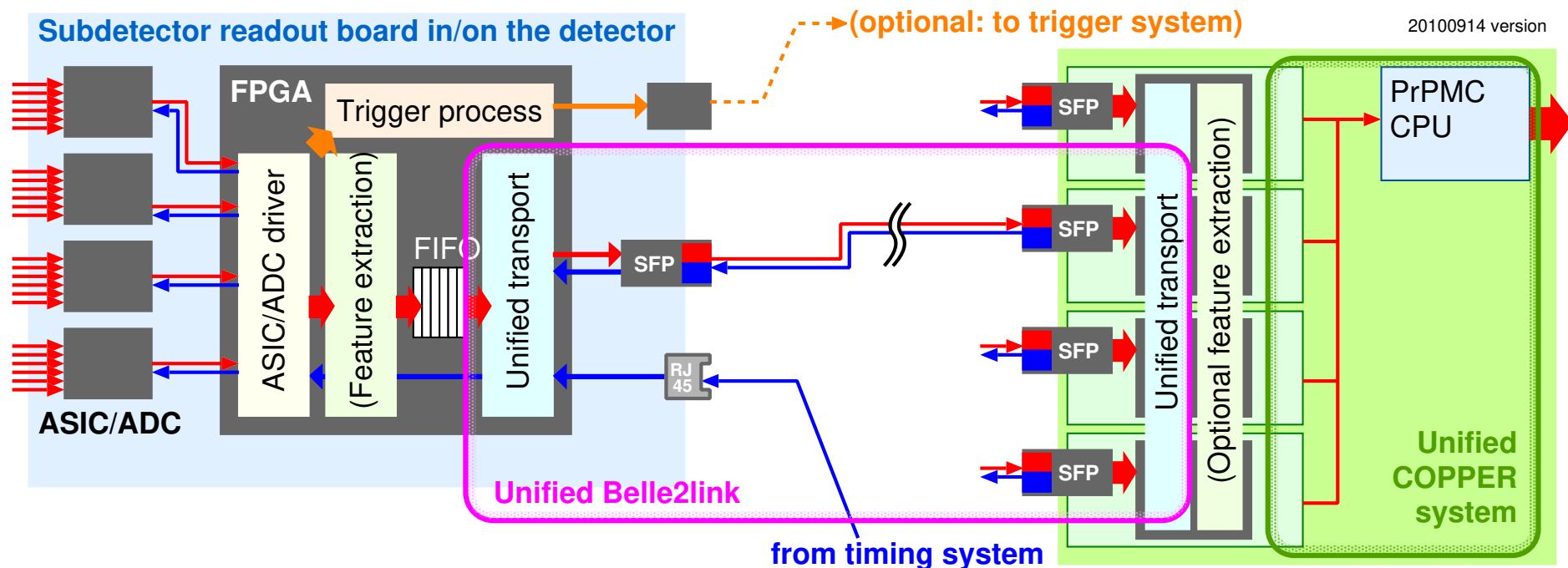
読み出し2 — PXD

- 8M ピクセル ($\times 4$ byte) — 何もしないと 1TB/s
- フロントエンドで zero suppression、occupancy は 2% を想定 (3% 以上だと使いものにならない)
- 飛跡とマッチする領域 (region-of-interest/ROI) のみ残すようにする 1/10 にするが、それでも 2GB/s は Belle II 残り全体より多い
- **オンラインでの取りこぼしは許されない!**
SVD を含めた事象再構成による飛跡外挿で ROI を生成

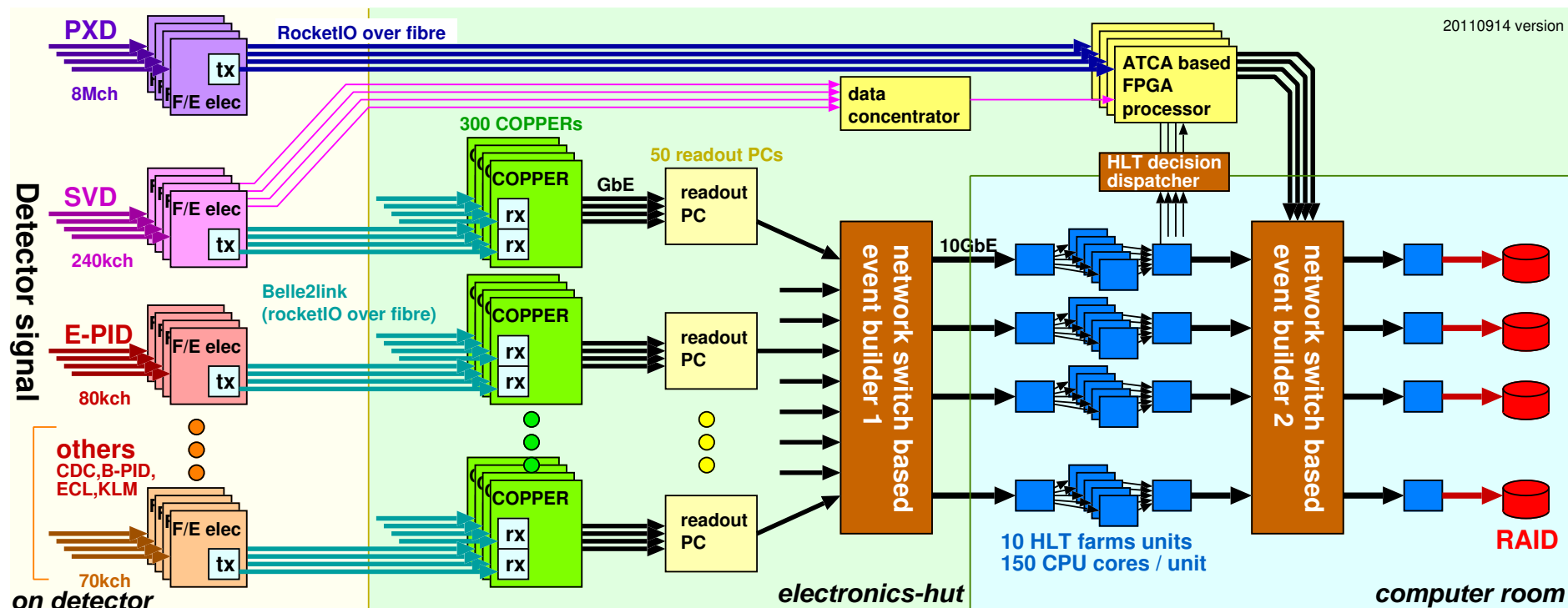


読み出し3 — その他

- 他のすべての検出器も検出器内 (CDC、TOP、ARICH)、あるいはすぐ外側 (ECL、KLM) で信号をデジタイズ
- デジタル信号は FPGA で処理して後段に送る (基本はみな同じ)
- **そこで、フロントエンドのインターフェイス、プロトコル (Belle2link)、受け側モジュール (COPPER+HSLB) を共通化**
- トリガ・タイミングの信号分配も共通化

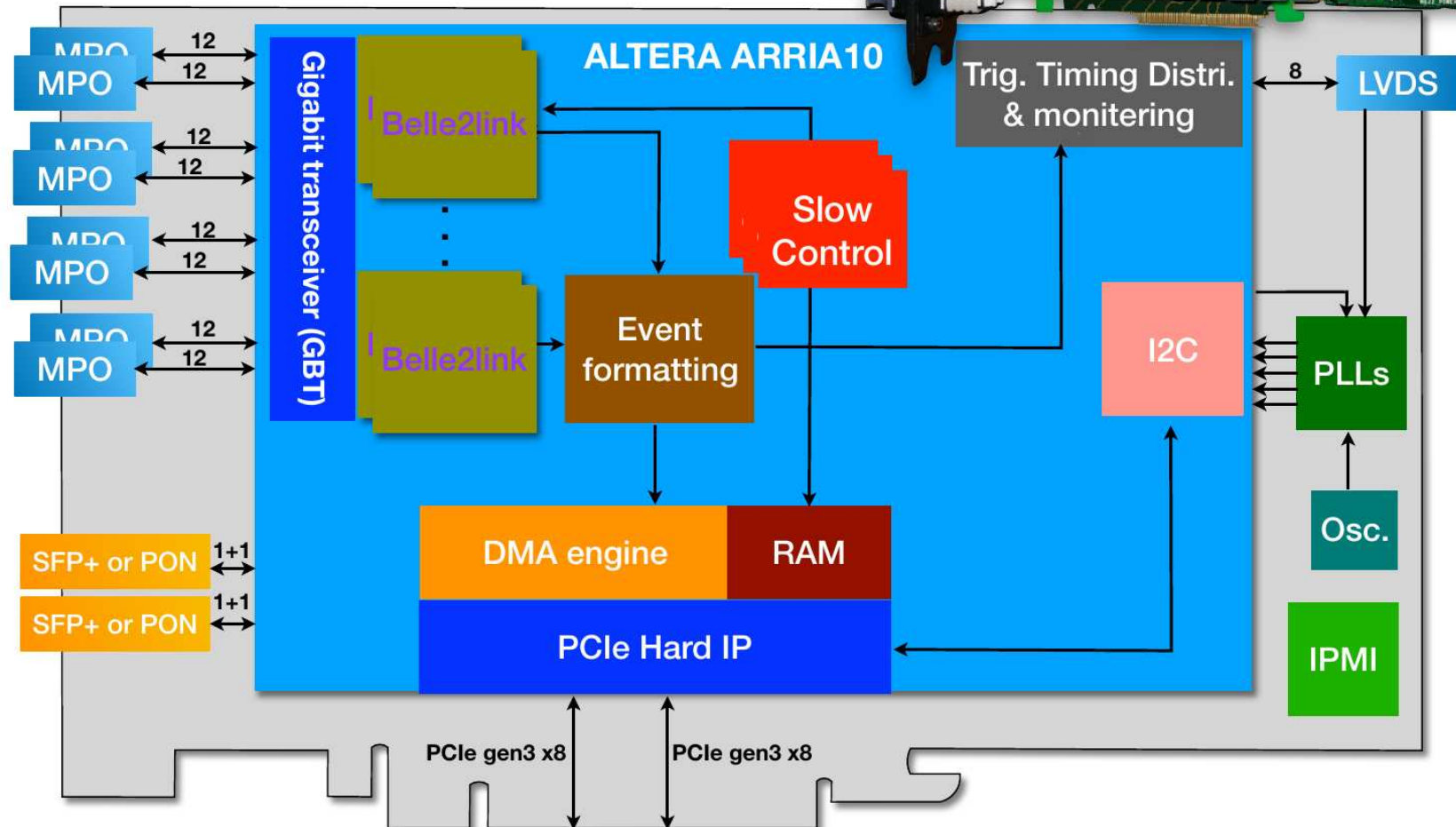


読み出し4 - まとめ

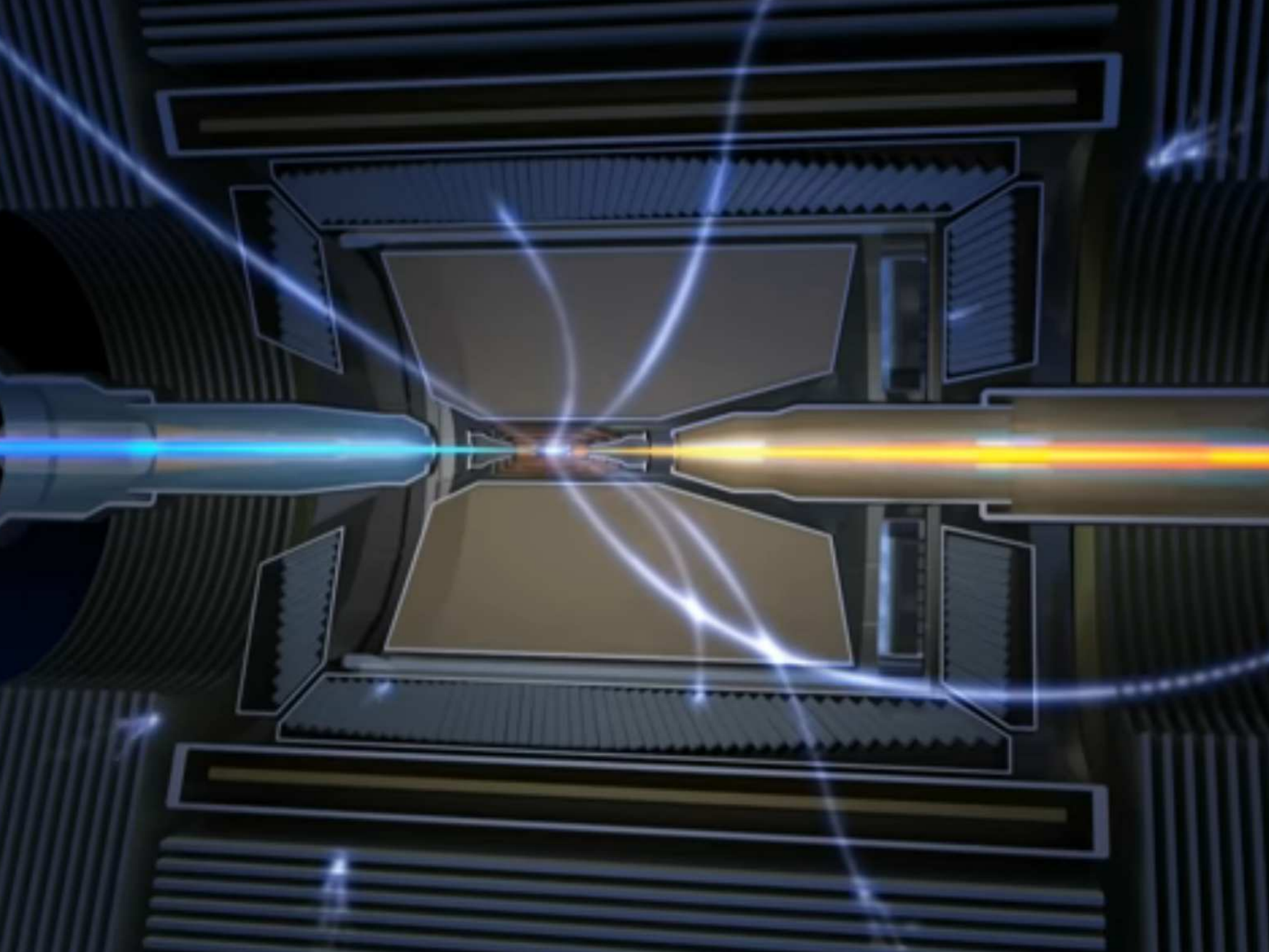


- 30 kHz の L1 トリガレートでデッドタイム O(1%) の設計
- PXD を除いて共通化
- トータルで約 2GB/s のデータ、HLT を並列化してスケーラブルに
- 実際に動かすのはけっこう大変

読み出し5 – さらに



- PCI express based solution, also adopted for LHCb and ALICE readout upgrade
- Intel/Altera Arria 10 FPGA (current system using Xilinx FPGA)
- 48 bi-directional optical links
- 19 PCIe40 boards to replace ~300 COPPERs



講義1 — 終