Bファクトリーで探る標準模型を越える物理

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つきまとうのでエ夫が必要

これが今回の講義のメイントピックです





- 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



- 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



Ð

Eur. Phys. J. C (2014) 74:3026 DOI 10.1140/epic/s10052-014-3026-9 THE EUROPEAN PHYSICAL JOURNAL C

Review





Prog. Theor. Exp. Phys. 2019, 123C01 (654 pages) DOI: 10.1093/ptep/ptz106

The Belle II Physics Book

E. Kou^{75,*,§,†}, P. Urquijo^{145,‡,†}, W. Altmannshofer^{135,§}, F. Beaujean^{79,§}, G. Bell^{122,§}, M. Benek e^{114,§}, I. I. Bigi^{148,§}, F. Bishara^{150,16,§}, M. Blank e^{49,51,§}, C. Bobeth^{113,114,§}, M. Bona^{152,§}, N. Brambilla^{114,§}, V. M. Braun^{50,§}, J. Brod^{112,135,§}, A. J. Buras^{115,§}, H. Y. Cheng^{43,§}, N. Bramolila⁽¹⁾, V. M. Braun¹⁰, J. Brod^{120,10,10}, A. J. Buras⁻¹, R. I. Curgi⁻²,
 C. W. Chiang^{02,5}, M. Ciuchin^{50,8}, G. Colangelo^{128,5}, A. Crivellin^{102,8}, H. Czyz^{156,20,8},
 A. Datta^{44,65}, F. De Fazio^{53,8}, T. Deppisch^{51,8}, M. J. Dolan^{14,84}, J. Evans^{135,8},
 S. Fajfer^{109,141,8}, T. Feldmann^{122,8}, S. Godfrey^{7,8}, M. Gronau^{62,8}, Y. Grossman^{15,8},
 F. K. Guo^{45,13,4}, U. Haisch^{150,11,8}, C. Hanhart^{21,8}, S. Hashimoto^{30,26,8}, S. Hiros^{689,8}, J. Hisano^{89,90,§}, L. Hofer^{127,§}, M. Hoferichter^{168,§}, W. S. Hou^{92,§}, T. Huber^{122,§}, T. Hurth 63,§, S. Jaeger^{159,§}, 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^{114,140,§} N. Kosnik^{109,141,§}, A. S. Kronfeld^{20,§}, Z. Ligeti^{19,§}, H. Logan^{7,§}, C. D. Lu^{41,§}, V. Lubicz^{153,§}, F. Mahmoudi^{142,§}, 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^{167,§}, J. Shigemitsu^{117,§}, D. Shih^{105,§}, N. Shimizu^{162,§}, Y. Shimizu^{69,§}, L. Silvestrini^{58,§}, S. Simula^{59,§}, C. Smith^{76,§}, P. Stoffer^{131,§}, D. Straub^{113,§} F. J. Tackmann^{16,§}, M. Tanaka^{98,§}, A. Tayduganov^{112,§}, G. Tetlalmatzi-Xolocotzi^{95,§}, T. Teubner^{140,§}, A. Vairo^{114,§}, D. van Dyk^{114,§}, J. Virto^{82,114,§}, Z. Was^{93,§}, R. Watanabe^{147,§}, I. Watson ^{155,§}, S. Westhoff^{139,§}, J. Zupan^{135,§}, R. Zwicky^{136,§} F. Abu din én^{83,‡}, I. A da chi^{30,26,‡}, K. A damczyk^{93,‡}, P. Ahlburg^{129,‡}, H. Aihara^{162,‡}, A. A lo isio^{54,‡} L. Andricek^{84,‡}, N. Anh Ky^{44,‡}, M. Arndt^{129,‡}, D. M. Asner^{5,‡}, H. Atmacan^{158,‡}, T. Aushev^{87,‡} V. Aushev^{110,‡}, R. Ayad^{161,‡}, T. Aziz^{111,‡}, S. Baehr^{48,‡}, S. Bahinipati^{33,‡}, P. Bambade^{75,‡} Y. Ban^{103,‡}, M. Barrett^{170,‡}, J. Bau dot^{47,‡}, P. Behera^{36,‡}, K. Belous^{38,‡}, M. Bender^{78,‡} J. Bennett^{8,‡}, M. Berger^{40,‡}, E. Bernieri^{59,‡}, F. U. Bernlochner^{48,‡}, M. Bessner^{138,‡}, D. Besson^{88,‡}, S. Bettarini^{57,‡}, V. Bhardwaj^{32,‡}, B. Bhuyan^{34,‡}, T. Bilka^{10,‡}, S. Bilmis^{86,‡}, S. Bilokin^{47,‡}, G. Bonvicini^{170,‡}, A. Bozek^{93,‡}, M. Bračko^{144,109,‡}, P. Branchini^{59,‡}, N. Braun^{48,‡}, R. A. Briere^{8,‡}, T. E. Browder^{138,‡}, L. Burmistrov^{75,‡}, S. Bussino^{59,‡}, L. Cao^{48,‡}, G. Caria^{145,‡}, G. Casarosa^{57,‡}, C. Cecchi^{56,‡}, D. Červenkov^{10,‡}, M.-C. Chang^{22,‡}, P. Chang^{92,‡}, R. Cheaib^{146,‡}, V. Chekelian^{83,‡}, Y. Chen^{154,‡}, B. G. Cheon^{28,‡}, K. Chilik in^{77,‡}, K. Cho^{70,‡}, J. Choi^{14,‡}, S.-K. Choi^{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^{129,‡}, M. Destefanis^{60,‡}, S. Dev^{116,‡}, F. Di Capua^{54,‡}, S. Di Carlo^{75,‡}, J. Ding felder^{129,‡}, Z. Doležal^{10,‡}, I. Domínguez Jiménez^{125,‡}, T. V. Dong^{30,26,‡}, D. Dossett^{145,‡}, S. Duell^{129,‡}, S. Eidelman^{6,96,77,‡},

[†]Editor. [‡]Belle II Collaborator. [§]Theory or external contributing author.

C DeAdator() 2019. Published by Oxford Usions (P. Pars on bable for (HPPs) pic 15 Scient) of Days. This is a Oxfore a strict of 30 and and are histoms of (Neuronic Common Artifician License (HPL), Streathereamnum, arg (License (Hy 4.0)), which permits are availed at more, data bables, and representations in any malium, provided the original work is properly cells. Third and PSCOMP.

「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

0.0

Ð

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)
 - $K^0 → \mu^+ \mu^-$ が発見されないことを説明、チャームクォークを予見



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

Open Access、一段組でわずか6ページ、https://academic.oup.com/ptp/article/49/2/652/1858101

Descent of Theorem 1997 No. 49, No. 5, Holmany 1979. ("Preisibility in the Restauralizable Theory,"

of Weak Interaction:

Makete Konstrant and Taikhole Mass sur-Department of Physics, Spole University, Epsile

Respond Supports 1, 1975.

In a honormal of the intermediable flowsy of work interaction, problems of CP-vinktion are started. It is concluded that iso values models of CP-resistons outs in the spacker achies without interacting any other new fields. None possible models of CP-relations are also flowmand.

When we apply the renormalizable through a weak interaction? to the hadron when we have some facilities on the haloss maid. It is well haven that there exists, is the same of the triplet model, a difficulty of the changement change ing people) screep and that the country model is from how this difficulty. For the theorem, Multi and one of the present arthene (T.M.) have showed¹⁰ that, in the latter case, the means interaction must be delvel $(2D/0) = \sqrt{2D/0}$ interaction on previously as the conservation of the shird component of the interpin ξ_{i} . In addition ion is fore argument, for the theory is in reduce, CP-stalking interaction should be incompared in a gauge install way. This requirement will improve detected be incompared in a gauge install way. This requirement will improve influid installance on the ladows model and the CProteining interaction itself. The purpose of the present paper in to investigate this problem. In the following, It will be down the in the case of the abro-mantimed quartet model, we cannot make a CP-relating instantion without streducing out ofter new fields when we require the following conditions: a) The mass of the barth member of the quarter, which we will call () is collected large, b) the model should be conistent with our well-antiduded incomining of the somiliphonic proanna Alian that some coulds, were allocation (CPublicities into the denery will be discussed

We consider the quarter model with - tharge amigunant of Q, Q-3, Q-1 and $(\underline{0})$ for p, n, d and $\underline{0}$, respectively, say we take the same underlying gauge group $H^{*}_{cons}(0) = \delta U(0)$ and the order mobile field p so these of Weinberg's riginal model?" Then, hadronic parts of the Lagrangian can be devided in the following wart

San - San + Sann + Sanne + St.

where No. is the complementary kinetic part of the control field, a so that is metalog inserving with the gauge fields from it a generalized man taxe of g, which includes Netzwa roughings to prices they contribute to the most of p through the apentaneous beaking of gauge symmetry. Junea is a strongistics

CP-Violation in the Americalisable Theory of Wook Interaction 482.

estimated which contained A and therefore shiel \$2500 (\$250) invariant? We around C and Alexinderse of Jacque. The last term density residual interaction parts if they raise. Since Joint modules couplings with as it has panal-bilities of violating CP-conservation. A is known as Higgs phenomenal¹⁶ these mandres components of a can be absoluted into the manters gauge fields and eliminated from the Lagrangian. Even dive this has been door, both avalar and percebenalar paris remain in Laws. For he must inves, herevers, we can eliminate such providence has more by produing on conversion constant array transformation on a which does not affect on Joint de le prope innertant.

Now we consider possible wave of similaring the constant field in rearrange intions of the ST_1(2). Since this group is commutative with the Lorentz transformation. But hill and right components of the another field, which are no spectively defined as gy=0(1+1/2 and gy=0(1-1/2); do not not each other under the gauge transformation. Then, tack component has three possibilities:

41 4-2+2.

40 4-3+1+1.

C. 4-1+1-1-1.

where on the sites, a density an administrational representation of 20(2). The parameter common at many paragramment is to parameter on the present representations of a 7-3. As a result, we have now possibilities which we will denote by (A, A), (A, R), ..., where the leaser (Adhed) in the parentheses indicates the transforme the properties of the left (right) component. Since all members of the quarter should take part in the weak interaction and size of the strangeness changing corred current is bounded experimentally to a very small rates, the cases of $(B_1 C)$, (C, B) and (C, C) should be absorbed. The models of (B, D) and (C, R)are maintained in these of (D, R) and (D, C), respectively, second relative fields between vector and and worker parts of the weak current. Since party ratio on accounted sale for comparing states, the difference of the relative signs would er reduced to a dynamical problem of the composite system. So, we investigate in detail the same of (A, A), (A, A), (A, K) and (A, B).

D. Constitution

This is the most materal choice is he searchd model. Let us denote here (AU_{sen}(2)) doublets and how singlets by La. La, R27, R27, R27, R27, where representing plot indicates p.Mar in Mad datase states. In this case, J____ takes, in general, the following from :

 $\mathcal{L}_{num} = \sum_{i} \sum_{j} \left(M_{ij}^{nin} \mathbb{E}_{abj} \mathcal{R}_{ij}^{aj} + \mathcal{R}_{ij}^{aj} \mathbb{R}_{ij}^{aj} + \mathbb{R}_{ij}^{aj} \right) + h.c.,$ $r = \binom{n}{2} = \binom{n-1}{n-1}$

01

0.0

0.00

10.0 M. Kalescaki and T. Mashine

where M2^a and M2^a are arbitrary complex residers. We can eliminate these Coldstone make & he polling

 $q = e^{i q \cdot q} {i + q \choose i + q}$.

120

00

100

where it is a variable expectation value of q² and T is a massive and r field. Threadler, perhensing a dispondization of the tenaining mass term, we obtain

Survey (1+5).

m. 0. 0 08 1.1.1.1.1

Then, the interaction with the gauge field in Jac is thereard at

2 alman 1th

Here, A is the regrammedate metric of \$10mm(0) for this name and replicitly

 $A_{1} = \frac{A + iA}{2} = A \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} K^{A}, \quad A = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -1 & 0 \end{pmatrix}, \quad K = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & 0 \end{pmatrix}$

where \$7 is a 2x2 units matrix. Here and hereafter are neglect for gauge field corresponding to STD which is indexest to see discussion. With an appropriate phase convection of the quarter field we can take IT an

 $\psi = \begin{pmatrix} -\sin d & \sin d \\ -\sin d & -\sin d \end{pmatrix}$.

Therefore, if f = 0, as threadshing over in the case. It should be noted, between, that this argument share not bulk when we introduce one more fermion doublet, with the same charge antipanent. This is between all phones of elements a 3+3 mitry metty result is also had into the place convertion of vit fields. This pushfilly of CS-colution all he dismand later on

Cons (A. R).

This is a reflect definite case. We denote new left-deadline, one right deadled and here simpleit by L_{2} , L_{2} , R_{2} , $R_{2}^{(0)}$ and $R_{2}^{(0)}$, respectively. The general lines

CJ. Telaine is the Amersolitatic Theory of West Interaction 627

Next we consider a tight model, ander interesting model of CF-riskston. printing, respectively. Just as the case of \$4, C}, we have a similar expression the charged week current with a 2 of instead of EX.2 onthey matrix in Eq. (2). An was pointed out, is this case ar senses showly of planes of matrix channels into the phone concention and non-inde, for example, the following -----

- nin H, ran H. - start, sind, and, so the out it can it, and it, - sin it, sin is" the it, so it, sin it, s sin it, out is " and, and, could in \$, on \$, 1 and, include" and, and an \$, - on \$, in \$," 100

Then, we have CP-soluting effects through the interference using these different current components. An interesting function of this model in that the CP-inducing plants of lowest order apport only in \$7.54 analogously processes and in the consideptons doing of spottel strongs means (up are not resovered with higher states with the new quantum masked) and not in the other resolveptonic, of - 0 territorial and providential process. On the sector considered only the straightforward consistent of the original

Weinkers's maint. However, other scheme of underlying gauge groups and/or make helds are possible. Gonga and Gadara's make? is one of from . We can easily see that CF-violation is incorporated into their model webbest introducing any other fields than (mang) are fields which they have introduced already.

S. Washong, Peps. Rev. Lenses, B. (2005), 1994, F. (2017), 1988.
 S. Maik, and T. Mathama, HOT Him Quester), April 2004, 1984, October 30, 1998

Dented

Reputies (NE) should read as

OP. Subation in the Americalizable Theory of Weak Interaction 1988

of James in given by

ÌΨ

П Π

 $J_{aaa} = \sum_{i,j=1}^{n} \left(m_{ij}^{2} m_{ij}^{2} H_{ij} + M_{i}^{-1} \sum_{i,j\neq i} H_{ij}^{i} + M_{ij}^{-1} \sum_{i,j\neq i} \mu_{ij}^{i} H_{ij}^{i} + h_{ij} \right) + h_{ij} = 0$

where m, MC¹⁴ and MC¹⁶ are arbitrary couples numbers. After dispendication of many terms (in this case, the CP-old per of coupling with a down not drappene is granul) such realizable can be expressed as follows:

 $L_{0} = \frac{1+p}{2} \Big(\sum_{\alpha \in \mathbb{R}^{d_{0}}, \beta \neq (\alpha \in \mathbb{R}^{d_{0}})}^{\beta} \Big), \qquad L_{0} = \frac{1+p}{2} \Big(\sum_{\alpha \in \mathbb{R}^{d_{0}}, \beta \neq (\alpha \in \mathbb{R}^{d_{0}})}^{d_{0}^{d_{0}}} \Big).$ $A_{\mu} = \frac{1-\mu_{1}}{2} \Big(\frac{\sin 1 \cdot \mu + \sin 1 \cdot c}{\sin \mu \cdot \mu + \sin \mu \cdot J} \Big), \qquad B_{\mu} = -\frac{1-\mu_{1}}{2} [\cos \theta_{1} \mu - \sin \theta_{2} \cdot C],$

8,"-1-Disary-map.0. 01

where place hower or, if and y namely two relations with the mainer of the quarket \mathcal{A} we also be as $f \to \infty$, see Fixed $\to \mathcal{A}$ is, for f_{1} 100

at any constrained as a range single out if a state of the proof of Owing in the presence of plane former, more exists a possibility of CP-solution

ness screeps on west restore. However, is since one despise solution is proportional to sing overy and its reprincedal sugger bound to Highly

where we the $\mathcal{O} \subset \mathbb{R}^{n-1}$.

Then, unding an approximation of simp-0 (the other choice on p-0 is how critical) we obtain from Eq. 40

matter and the Part

m/m-sinklinet.

1301

We have an involving particle with a quantum number corresponding to C on fact my, which is a measure of chiral 27(4) > 35(4) benaking, checkli he coll ficiently large compared to the sames of the other monders. However, the present opportunated results on the \$4,50 often of the orbit batton \$1,0000 would not penale sin firmind. Thus, it seems difficult to provable the hierarchy of chiral symmetry breaking with the experimental traveledge of the semileptonts

101 Case (0.10)

As a parriage one, in this case also, securescut of CF-rightness in parellels, had in order in moment [45]-1 month curtants, coefficients of the anticipenter part of \$5-1 and \$2-1 area convertions, take right appendic to such other. This controllets again the superiments of the herves Johnson

M. Astronatic and T. Madowa 636

10 Gas (A.4)

In a similar way, we can show that as CP-riskston secure in this new as he as J"=0. Parkenine this model avails relace to an easily UOB sym. nam's one

formarising the doors read to us have as realistic models in the quarter achieves as far as J" = 0. Here we remainly some manuples of CP-risksing through f_{i}^{c} . Howeher us will consider only the same of (A,C). The first one is in introduce another nodes doublet field ϕ . Then, we may consider an interaction with this new field

r-met-later.

 $\phi = \begin{pmatrix} \phi^{(1)} & \phi^{(1)} & 0 & 0 \\ -\phi^{(1)} & \phi^{(2)} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \phi^{(2)} & \phi^{(2)} \end{pmatrix}, \qquad C = \begin{pmatrix} c_1 & 0 & c_2 & 0 \\ 0 & d_1 & 0 & d_2 \\ c_1 & 0 & c_2 & 0 \\ 0 & d_2 & 0 & d_2 \\ 0 & d_2 & 0 & d_2 \end{pmatrix}$

where a, and d, are arbitrary complex nucleus. Since we have already made one of the goinge transformation to get rd of the CP-add part from the quarter must turns, these remains an such arbitrariants. Furthermore, we note that on arbitrariants of the phase of a current elevels of the phases of as, and als. So, artistransia in the plane of p content strengt of the planes of 1.5 and 2.5. St. fair interaction can score a CF relation. Another one interaction. Let us Another one is a possibility mitociald with the strong interaction. Let us

titles a make famalematic) field S which mediates the strong interaction For the interaction to be concreasionable and Allow-(3) invariant, it must being to a 54, P1+ (P, O representation of chiral AV(0) = AV(0) and interact with o through acular and providentalian roundings. In also interacts with a and proxibit condicable forms are given an follow

is KATAL the

 $\ln \left((1,T_{M}) \|_{H}^{2} (1) \right) + \ln n \, .$ to RANDARA Hard Hard.

- 10

100100 -1 P 11 0.0 # * 0 0 -11

where G₁ is a 4 o 4 sampley matrix and so have and a first matrix representation for X. It is one to see that these interaction terms can column EFFem. our variant.

b クォーク発見 — ↑ 共鳴状態





参考:https://history.fnal.gov/botqrk.html

B 中間子発見 — ↑(4S)

- $\Upsilon(1S), \Upsilon(2S), \Upsilon(3S), \Upsilon(4S), \Upsilon(5S), \Upsilon(6S)(?), \cdots$
- $ightarrow \Upsilon(4S)$ **10580 MeV は B 中間子対に崩壊**
 - b フォークの量子数が現れる最も軽い状態: B⁰ (bd), B⁺ (bu)
 - 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





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











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
- $\mathcal{A} \mathcal{P} = \mathcal{A} = \mathcal{A}$ 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、...
- 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

Ħ

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 $V_{cb}\sim$ m 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→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



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



同じ始状態 → 終状態のダイヤ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

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

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

 $\mathcal{H}_{\rm SM} = \frac{1}{4} \frac{C_0}{\Lambda_0^2} (V_{ti}^* V_{tj})^2 [\overline{d}_{Li} \gamma_\mu d_{Lj}]^2 \quad \Box \Box \overline{C} \wedge_0 = 4\pi m_W / g^2 = 2.5 \text{TeV}$

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

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

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

• 新物理に $(V_{ti}^*V_{tj})$ のようなフレーバー構造がなければ $\mathcal{H}_{NP} = \frac{C_{NP}}{\Lambda_{NP}^2} [\overline{d}_{Li} \gamma_{\mu} d_{Lj}]^2$ 、もし $\mathcal{H}_{NP} \sim \mathcal{H}_{SM}$ だと $\Lambda_{NP} \sim 500$ 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(100GeV) 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も例えば崩壊の振幅(の二乗の崩壊幅)が計算できない ⇔ 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 リ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 $B^0 \Leftrightarrow \overline{B}^0, B^+ \Leftrightarrow B^-$
- 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リティー $-e \Leftrightarrow \mu \Leftrightarrow \tau$

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 ルのダイヤグラムとの対応づけができる
 - $B \to X_s \gamma, B \to X_c \ell \nu, B \to X_u \ell \nu$ 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
- r 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

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

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きている
 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



(最初の) Bファクトリーの設計



・速度を持った B⁰-B⁰ 状態を 10⁸ 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 $\overline{B^0}$ か)
- 🗕 崩壊点の差を測る

スーパーBファクトリーの設計



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 *N*[±] − (陽) 電子数

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

 $\sigma_{x/v}$ — 衝突断面の幅/高さ f — 衝突頻度 *I*₊ - ビーム電流

 $\xi_{\pm\nu}, \beta_{\nu}^* - 加速器パラメータ$

- β^{*}_ν 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 | % |
| eta_x/eta_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 | А |
| beam-beam ξ_y | 0.129 | 0.090 | 0.0886 | 0.0830 | |
| luminosity | 2.1×10^{34} | | 8×10^{35} | | $cm^{-2}s^{-1}$ |

Belle II TDR (2010) Table 2.3

ーナノビーム: 極小ビームサイズ (~ 60 nm) ⇔ β^{*}_ν ~0.3 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)



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



colliding bunches _____"nano-beam"____









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 ightarrow 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

(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



読み出し2 — PXD

8M ピクセル (×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



- 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





0

中尾幹彦