

素粒子物理学から学ぶもの

石渡 弘治

(いしわたこうじ)

金沢大学 素粒子・宇宙・理論物理研究室

Nanao, September 7, 2017

1. はじめに

僕の仕事を書き表す言葉として思いつくのは

- 大学教員
- 公務員
- 先生
- 理論物理学者
- 宇宙論学者

僕の仕事を書き表す言葉として思いつくのは

- 大学教員
- 公務員
- 先生
- 理論物理学者
- 宇宙論学者

→ 何となく立派そうな言葉に見える

略歴

- ▶ 福島県郡山市で生まれる
- ▶ 福島県立安積高等学校
- ▶ 東北大学、東北大学大学院
- ▶ 東京大学宇宙線研究所 研究員
- ▶ カリフォルニア工科大学(米国) 研究員
- ▶ DESY(ドイツ) 研究員
- ▶ 金沢大学 助教

略歴

- ▶ 福島県郡山市で生まれる
- ▶ 福島県立安積高等学校
- ▶ 東北大学、東北大学大学院
- ▶ 東京大学宇宙線研究所 研究員
- ▶ カリフォルニア工科大学(米国) 研究員
- ▶ DESY(ドイツ) 研究員
- ▶ 金沢大学 助教

→ 何となくそれっぽい

PHYSICAL REVIEW D **73**, 051301(R) (2006)**Right-handed sneutrino as cold dark matter**

Takehiko Asaka, Koji Ishiwata, and Takeo Moroi

Department of Physics, Tohoku University, Sendai 980-8578, Japan

(Received 15 December 2005; published 10 March 2006)

We consider supersymmetric models with right-handed neutrinos where neutrino masses are *purely Dirac-type*. In this model, right-handed sneutrino can be the lightest supersymmetric particle and can be a viable candidate of cold dark matter of the universe. Right-handed sneutrinos are never thermalized in the early universe because of weakness of Yukawa interaction, but are effectively produced by decays of various superparticles. We show that the present mass density of right-handed sneutrino can be consistent with the observed dark matter density.

DOI: [10.1103/PhysRevD.73.051301](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.73.051301)

PACS numbers: 14.60.Pq, 12.60.Jv, 95.35.+d, 98.80.Cq

In recent years, various experiments have confirmed the phenomenon of neutrino oscillation. (See, for example, [1–5].) Those results strongly suggest very small but nonvanishing neutrino masses. This fact raises serious problems because the nonvanishing neutrino mass is not allowed in the standard model of particle physics and also because suggested values of neutrino masses are extremely small. The easiest way of generating neutrino masses is to introduce right-handed neutrinos; with this extension, Yukawa couplings of neutrinos may exist. Consequently, neutrinos can acquire masses after electroweak symmetry breaking.

Even with right-handed neutrinos, there are two different classes of scenarios for generating neutrino masses. Probably, more popular one is with Majorana masses for

of right-handed sneutrinos are dominantly from effects of supersymmetry (SUSY) breaking. Then, one should note that the lightest superparticle (LSP) may be the (lightest) right-handed neutrino $\tilde{\nu}_R$. Importantly, since the LSP $\tilde{\nu}_R$ becomes stable by the R -parity conservation and also is very weakly interacting, it can be a viable candidate of cold dark matter (CDM) provided that its relic density is the right amount.

In this paper, we consider the minimal supersymmetric standard model (MSSM) with three generations of right-handed (s)neutrinos where small neutrino masses are purely Dirac-type. In particular, we study the case where the LSP is the lightest right-handed sneutrino and see if the relic density of $\tilde{\nu}_R$ can become consistent with the present CDM density. Since interaction of right-handed sneutrino

僕



PHYSICAL REVIEW D **73**, 051301(R) (2006)

Right-handed sneutrino as cold dark matter

Takehiko Asaka, **Koji Ishiwata**, and Takeo Moroi

Department of Physics, Tohoku University, Sendai 980-8578, Japan

(Received 15 December 2005; published 10 March 2006)

We consider supersymmetric models with right-handed neutrinos where neutrino masses are *purely Dirac-type*. In this model, right-handed sneutrino can be the lightest supersymmetric particle and can be a viable candidate of cold dark matter of the universe. Right-handed sneutrinos are never thermalized in the early universe because of weakness of Yukawa interaction, but are effectively produced by decays of various superparticles. We show that the present mass density of right-handed sneutrino can be consistent with the observed dark matter density.

DOI: [10.1103/PhysRevD.73.051301](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.73.051301)

PACS numbers: 14.60.Pq, 12.60.Jv, 95.35.+d, 98.80.Cq

In recent years, various experiments have confirmed the phenomenon of neutrino oscillation. (See, for example, [1–5].) Those results strongly suggest very small but nonvanishing neutrino masses. This fact raises serious problems because the nonvanishing neutrino mass is not allowed in the standard model of particle physics and also because suggested values of neutrino masses are extremely small. The easiest way of generating neutrino masses is to introduce right-handed neutrinos; with this extension, Yukawa couplings of neutrinos may exist. Consequently, neutrinos can acquire masses after electroweak symmetry breaking.

Even with right-handed neutrinos, there are two different classes of scenarios for generating neutrino masses. Probably, more popular one is with Majorana masses for

of right-handed sneutrinos are dominantly from effects of supersymmetry (SUSY) breaking. Then, one should note that the lightest superparticle (LSP) may be the (lightest) right-handed neutrino $\tilde{\nu}_R$. Importantly, since the LSP $\tilde{\nu}_R$ becomes stable by the R -parity conservation and also is very weakly interacting, it can be a viable candidate of cold dark matter (CDM) provided that its relic density is the right amount.

In this paper, we consider the minimal supersymmetric standard model (MSSM) with three generations of right-handed (s)neutrinos where small neutrino masses are purely Dirac-type. In particular, we study the case where the LSP is the lightest right-handed sneutrino and see if the relic density of $\tilde{\nu}_R$ can become consistent with the present CDM density. Since interaction of right-handed sneutrino

$$W_{RPV} = \lambda_{ij\mu} \hat{L}_i \hat{L}_j \hat{E}_\mu^c + \lambda'_{ijk} \hat{L}_i \hat{Q}_j \hat{D}_k^c, \quad (3.15)$$

where \hat{L}_i and \hat{Q}_j are left-handed lepton, quark doublets, while \hat{E}_i^c and \hat{D}_j^c are right-handed lepton, down-quark singlets, respectively. (Here, “hat” is for superfield.) Then, in order not to wash out the baryon asymmetry of the Universe, the coupling constants in the above superpotential are constrained as [22]

$$\lambda_{ijk}, \lambda'_{ijk} \leq 10^{-7}. \quad (3.16)$$

For example, if we assume that the size of R -parity violating terms are $O(\kappa_i)$ relative to the corresponding R -parity conserving ones (which are obtained by replacing \hat{H}_j with \hat{L}_j), and that the size of the SUSY breaking parameters are typically of the order of the electroweak scale, then the above constraint is consistent with the one obtained from the neutrino mass.

B. Gravitino decay

In the case of RPV, gravitino LSP is no longer stable and decays to standard-model particles with a finite lifetime [23]. Here, we will take a closer look at the gravitino decay.

In the present scenario, gravitino mainly decays in the two-body decay processes shown in Fig. 1: $\psi_{\tilde{g}} \rightarrow \gamma \nu_i$, $Z \nu_i$, $W \nu_i$, and $h \nu_i$. (Here and hereafter, $\psi_{\tilde{g}}$ denotes the gravitino.) Decay widths of each process are given by⁴

$$\Gamma_{\psi_{\tilde{g}} \rightarrow \gamma \nu_i} = \frac{1}{128\pi} \frac{\kappa_i^2 m_{3/2}^3}{M_{\text{Pl}}^2} g_2^2 \theta_{\tilde{g}}^2, \quad (3.17)$$

$$\Gamma_{\psi_{\tilde{g}} \rightarrow Z \nu_i} = \frac{\beta_Z}{128\pi} \frac{\kappa_i^2 m_{3/2}^3}{M_{\text{Pl}}^2} \left[g_2^2 \theta_{\tilde{g}}^2 F(m_{3/2}, m_Z) + \frac{3\nu}{2m_{3/2}} g_2^2 \theta_Z G(m_{3/2}, m_Z) + \frac{1}{3} \beta_W H(m_{3/2}, m_Z) \right], \quad (3.18)$$

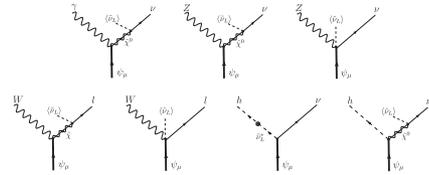


FIG. 1. Diagrams of gravitino decay.

KI, Matsumoto, Moroi '08

$$\Gamma_{\psi_{\tilde{g}} \rightarrow W \nu_i} = \frac{\beta_W}{64\pi} \frac{\kappa_i^2 m_{3/2}^3}{M_{\text{Pl}}^2} \left[g_2^2 \theta_W^2 F(m_{3/2}, m_W) + \frac{3\nu}{2m_{3/2}} g_2^2 \theta_W G(m_{3/2}, m_W) + \frac{1}{3} \beta_W H(m_{3/2}, m_W) \right], \quad (3.19)$$

$$\Gamma_{\psi_{\tilde{g}} \rightarrow h \nu_i} = \frac{\beta_h^2}{384\pi} \frac{\kappa_i^2 m_{3/2}^3}{M_{\text{Pl}}^2} \left(\frac{m_h^2}{m_{3/2}^2 - m_h^2} + m_Z \sin\beta \sum_{\alpha} \frac{c_{\tilde{g}X\alpha} c_{\tilde{g}Y\alpha}^c}{m_{\tilde{X}\alpha}^2} \right)^2, \quad (3.20)$$

where $M_{\text{Pl}} \simeq 2.4 \times 10^{18}$ GeV is the reduced Planck mass, $m_{3/2}$ is the gravitino mass

$$\beta_X \equiv 1 - \frac{m_X^2}{m_{3/2}^2}, \quad (3.21)$$

and the functions F , G , and H are given by

$$F(m_{3/2}, m_X) = 1 - \frac{1}{3} \frac{m_X^2}{m_{3/2}^2} - \frac{1}{3} \frac{m_X^4}{m_{3/2}^4} - \frac{1}{3} \frac{m_X^6}{m_{3/2}^6}, \quad (3.22)$$

$$G(m_{3/2}, m_X) = 1 - \frac{1}{2} \frac{m_X^2}{m_{3/2}^2} - \frac{1}{2} \frac{m_X^4}{m_{3/2}^4}, \quad (3.23)$$

$$H(m_{3/2}, m_X) = 1 + 10 \frac{m_X^2}{m_{3/2}^2} + m_{3/2}^4. \quad (3.24)$$

In addition, we define

$$\theta_{\tilde{g}}^{\tilde{X}} \equiv \nu \sum_{\alpha=1}^4 \frac{c_{\tilde{g}X\alpha} c_{\tilde{g}Y\alpha}^c}{m_{\tilde{X}\alpha}^2}, \quad (3.25)$$

$$\theta_{\tilde{g}}^Z \equiv \nu \sum_{\alpha=1}^4 \frac{c_{\tilde{g}Z\alpha} c_{\tilde{g}Y\alpha}^c}{m_{\tilde{X}\alpha}^2}. \quad (3.26)$$

KOJI ISHIWATA, SHIGEKI MATSUMOTO, AND TAKEO MOROI

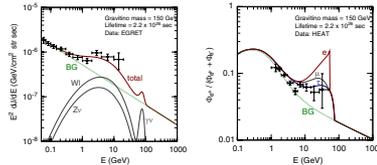


FIG. 5 (color online). Gamma-ray flux (left figure) and positron fraction (right figure). Here, we take $m_{3/2} = 150$ GeV, $\tau_{3/2} = 2.2 \times 10^{26}$ sec, and MSSM parameters as Fig. 2.

flux, and $\sigma_{\text{obs},i}$ is the error of $x_{\text{obs},i}$. In addition, N is number of bins; $N = 10$ for EGRET. In Fig. 8, we show the region with $\chi^2 < 18.3$ on the $m_{3/2}$ vs $\tau_{3/2}$ plane, which is 95% C.L. allowed region. As one can see, the present scenario could well explain the EGRET anomaly in a wide parameter region. 10^{26} sec $\lesssim \tau_{3/2} \lesssim 10^{27}$ sec and $m_{3/2} \gtrsim 90$ GeV. From Fig. 2, it can be seen that $10^{-10} \lesssim \kappa_i \lesssim 10^{-8}$ is favored. In Fig. 8, we also show the parameter region, which is consistent with the HEAT data ($N = 9$) at 95% C.L. (i.e., $\chi^2 < 16.9$).

As one can see, the present scenario can simultaneously explain the observed gamma and positron fluxes.

C. Future prospects

In the previous subsection, we have shown that the gamma-ray and positron fluxes from decaying gravitinos can successfully explain the results of the past observations. As we have seen, however, the energy ranges of the past observations are limited up to $O(10)$ GeV although the signal from the gravitino decay may significantly affect the cosmic-ray spectra up to the energy of $O(100)$ GeV. In addition, it is also true that the uncertainties of the cosmic-ray spectra observed by the past observations are relatively large at the energy range of $E \sim O(10)$ GeV. Thus, it is

desirable to test the scenario of gravitino dark matter with RPV with better observations.

Fortunately, in the near future, new observations of cosmic rays, Gamma-ray Large Area Space Telescope (GLAST) and Payload for Antimatter Matter Exploration and Light nuclei Astrophysics (PAMELA), are expected to provide results of new measurements of the cosmic-ray fluxes. These experiments are designed to detect cosmic rays with energy up to a few hundreds GeV. Thus, they will give us better test of the scenario. Since GLAST (PAMELA) has better energy range and resolution than EGRET (HEAT) in the measurement of gamma-ray (positron) flux, they should confirm the anomalies if they really exist.

Even if the fluxes of the cosmic rays are smaller than the best-fit value of those observed by EGRET and HEAT, we still have a chance to see signals from the decay of dark-matter gravitino. To see expected constraints on the parameter space, we calculate the expectation value of the χ^2 variable defined as

$$\langle \chi^2 \rangle = \left\langle \sum_{i=1}^N \frac{(N_{\text{th},i} - N_{\text{BG},i})^2}{\sigma_{\text{BG},i}^2} \right\rangle, \quad (5.2)$$

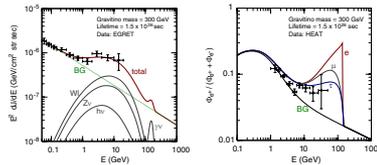


FIG. 6 (color online). Same as Fig. 5, except for $m_{3/2} = 300$ GeV and $\tau_{3/2} = 1.5 \times 10^{26}$ sec.

The solutions of the RGEs are given as follows:

$$C_S^q(\mu) = C_S^q(\mu_0) - 4C_S^q(\mu_0) \frac{\alpha_s^2(\mu_0)}{\beta(\alpha_s(\mu_0))} (\gamma_m(\mu) - \gamma_m(\mu_0)), \quad (2.42)$$

$$C_S^G(\mu) = \frac{\beta(\alpha_s(\mu))}{\alpha_s^2(\mu)} \frac{\alpha_s^2(\mu_0)}{\beta(\alpha_s(\mu_0))} C_S^G(\mu_0). \quad (2.43)$$

Eq. (2.42) shows that the anomalous dimension at $O(\alpha_s)$, i.e. Eq. (2.38), is enough for the NLO calculation.

Next, we consider the RGEs for the twist-2 operators. The two-loop anomalous dimension matrix of the operators is evaluated as [46,47]

$$\mu \frac{d}{d\mu} (C_{\text{T},i}^q, C_{\text{T},i}^G) = (C_{\text{T},i}^q, C_{\text{T},i}^G) \Gamma_{\text{T}}, \quad (2.44)$$

with Γ_{T} a $(N_f + 1) \times (N_f + 1)$ matrix:

$$\Gamma_{\text{T}} = \begin{pmatrix} \gamma_{qq} & 0 & \cdots & 0 & \gamma_{qg} \\ 0 & \gamma_{qq} & & & \\ \vdots & & \ddots & & \\ 0 & \cdots & 0 & \gamma_{qg} & \gamma_{gg} \\ \gamma_{gq} & \cdots & \cdots & \gamma_{qg} & \gamma_{gg} \end{pmatrix}, \quad (2.45)$$

where

$$\begin{aligned} \gamma_{qq} &= \frac{16}{3} C_F \cdot \frac{\alpha_s}{4\pi} + \left(-\frac{208}{27} C_F N_f - \frac{224}{27} C_F^2 + \frac{752}{27} C_F N_c \right) \left(\frac{\alpha_s}{4\pi} \right)^2, \\ \gamma_{qg} &= \frac{4}{3} \cdot \frac{\alpha_s}{4\pi} + \left(\frac{148}{27} C_F + \frac{70}{27} N_c \right) \left(\frac{\alpha_s}{4\pi} \right)^2, \\ \gamma_{gq} &= \frac{16}{3} C_F \cdot \frac{\alpha_s}{4\pi} + \left(-\frac{208}{27} C_F N_f - \frac{224}{27} C_F^2 + \frac{752}{27} C_F N_c \right) \left(\frac{\alpha_s}{4\pi} \right)^2, \\ \gamma_{gg} &= \frac{4}{3} N_f \cdot \frac{\alpha_s}{4\pi} + \left(\frac{148}{27} C_F N_f + \frac{70}{27} N_c N_f \right) \left(\frac{\alpha_s}{4\pi} \right)^2. \end{aligned} \quad (2.46)$$

Finally we give the threshold corrections at the scale where heavy quarks are integrated out. For example, in the vicinity of the bottom-quark threshold $\mu_b \simeq m_b$, we match the strong gauge coupling constant and the Wilson coefficients as

$$\frac{1}{\alpha_s(\mu_b)|_{N_f=4}} = \frac{1}{\alpha_s(\mu_b)|_{N_f=5}} + \frac{1}{3\pi} \ln \left(\frac{\mu_b}{m_b} \right), \quad (2.47)$$

Hisano, KI, Nagata '15

こう改めて見てみると何となく

- 大学教員
- 公務員
- 先生
- 理論物理学者
- 宇宙論学者

っぽいかも。

がしかし、僕自身にそんな自覚がないです。。

最大の理由はたぶん、

子供の頃からの疑問を考え続けているだけだから

最大の理由はたぶん、

子供の頃からの疑問を考え続けているだけだから

- 力とは何か？
- 物質は何でできているのか？
- 宇宙はどう始まり、未来にはどうなるのか？

最大の理由はたぶん、

子供の頃からの疑問を考え続けているだけだから

- 力とは何か？
- 物質は何でできているのか？
- 宇宙はどう始まり、未来にはどうなるのか？

→ 現代素粒子物理学が教えてくれる

とは言ったものの、

素粒子を志す前も後も、たくさん迷いました。

とは言ったものの、

素粒子を志す前も後も、たくさん迷いました。

僕の迷いを何かの参考にしてもらえればと思います。

Outline

1. はじめに
2. 素粒子と宇宙
3. 素粒子との出会い (進路と仕事選び)
4. 考える力
5. 最後に

Q. あなたおいくつ？

A. 40歳~

B. 35歳~40歳

C. 30歳~35歳

D. 25歳~30歳

E. 20歳~25歳

Q. あなたおいくつ？

A. 40歳~

B. 35歳~40歳

C. 30歳~35歳

D. 25歳~30歳

E. 20歳~25歳

→ 正解は後ほど。

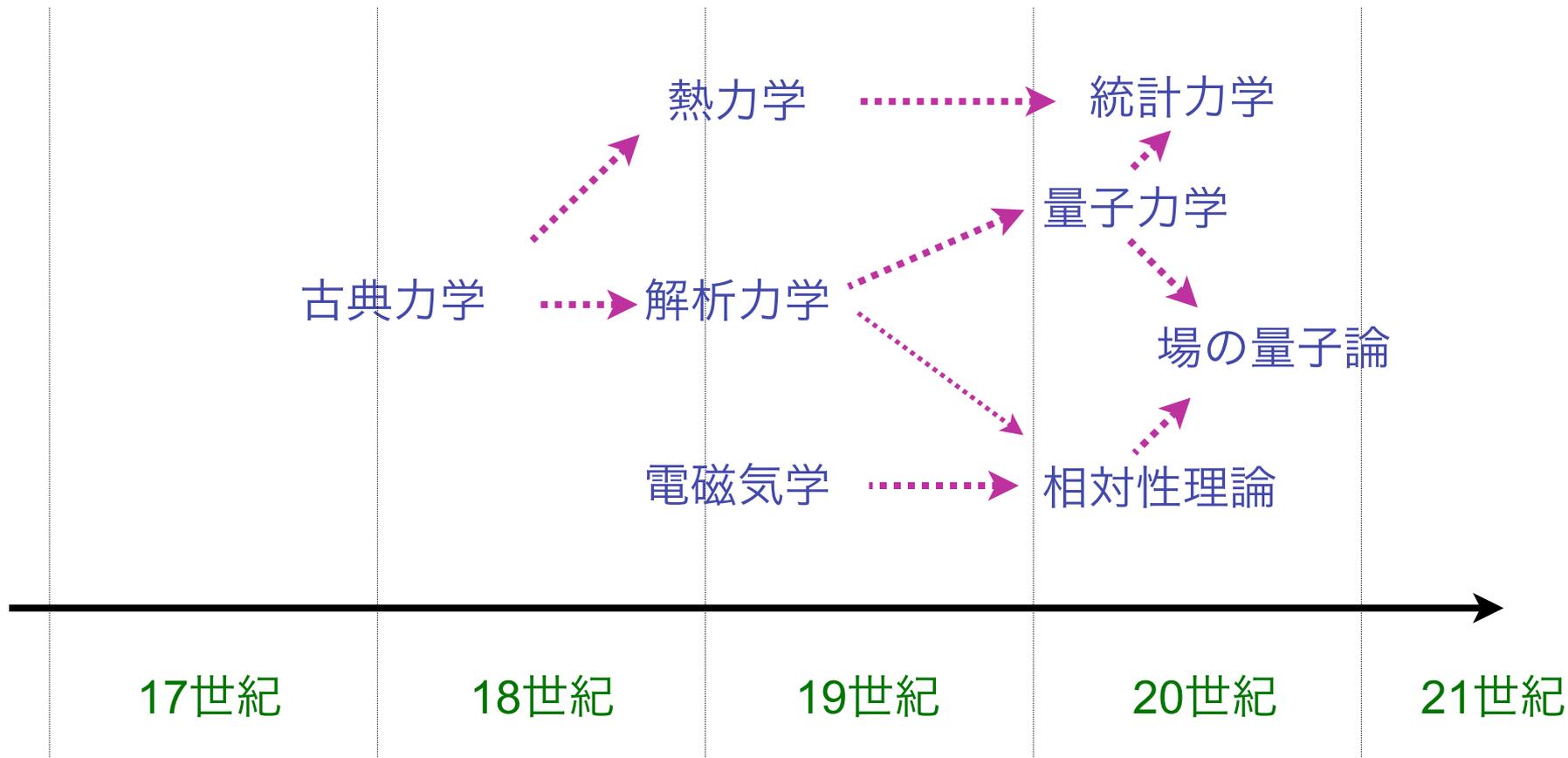
2. 素粒子と宇宙

素粒子、現在どこまでわかっているか？

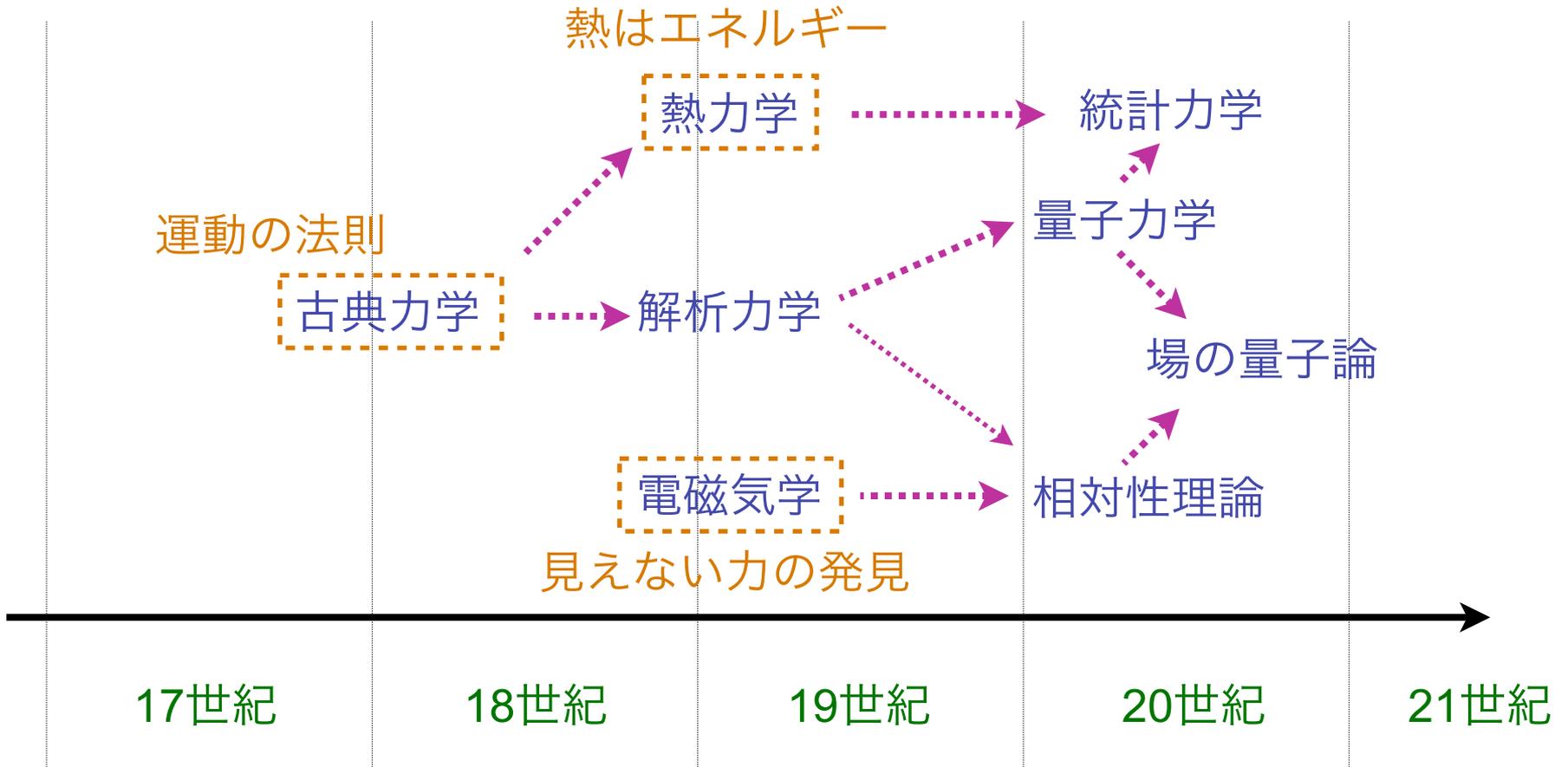
素粒子、現在どこまでわかっているか？

の前に、まず物理学の紹介から。。

物理学をざっくり書くとこんな感じ。

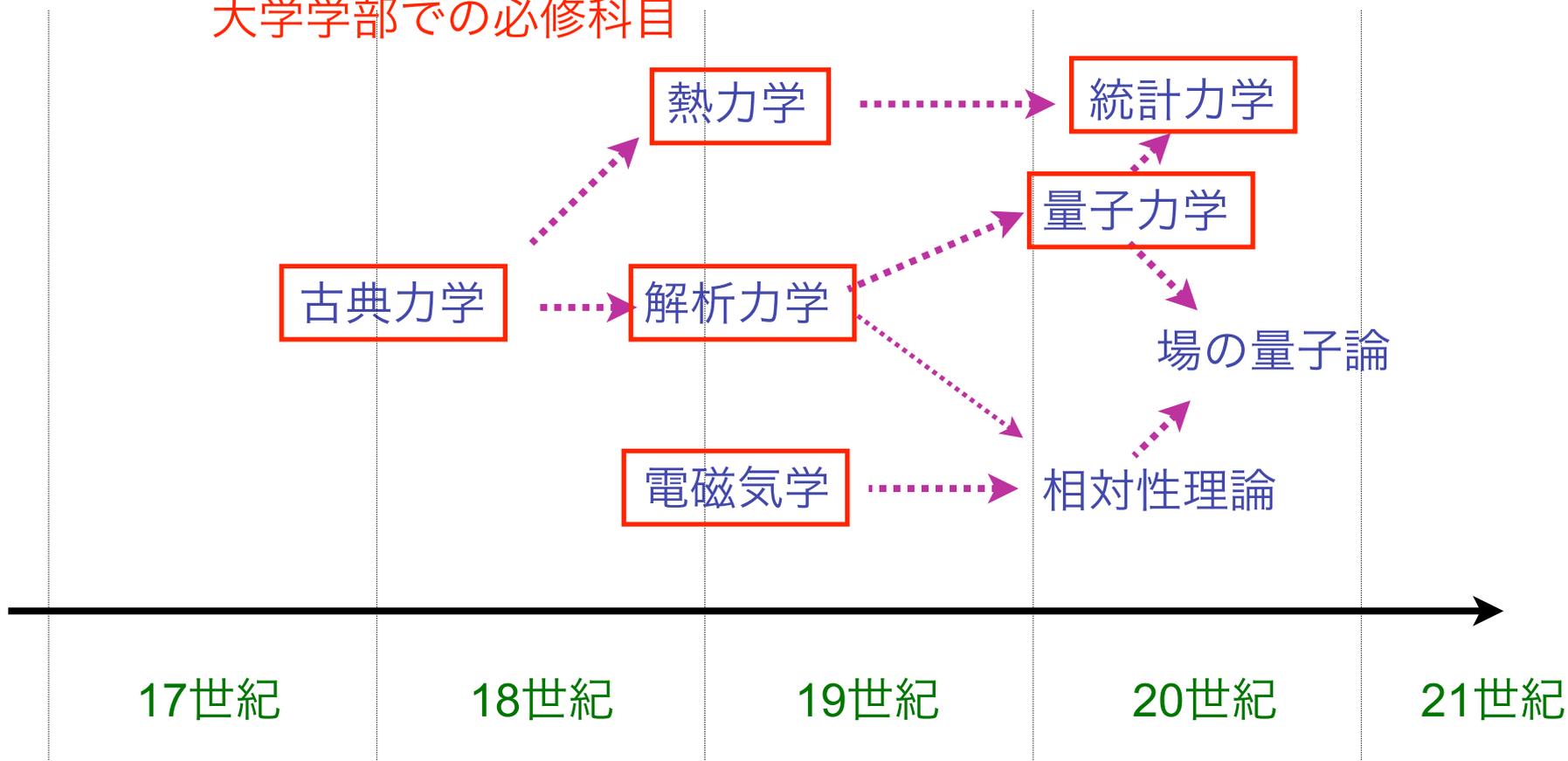


物理学をざっくり書くとこんな感じ。



物理学をざっくり書くとこんな感じ。

大学学部での必修科目

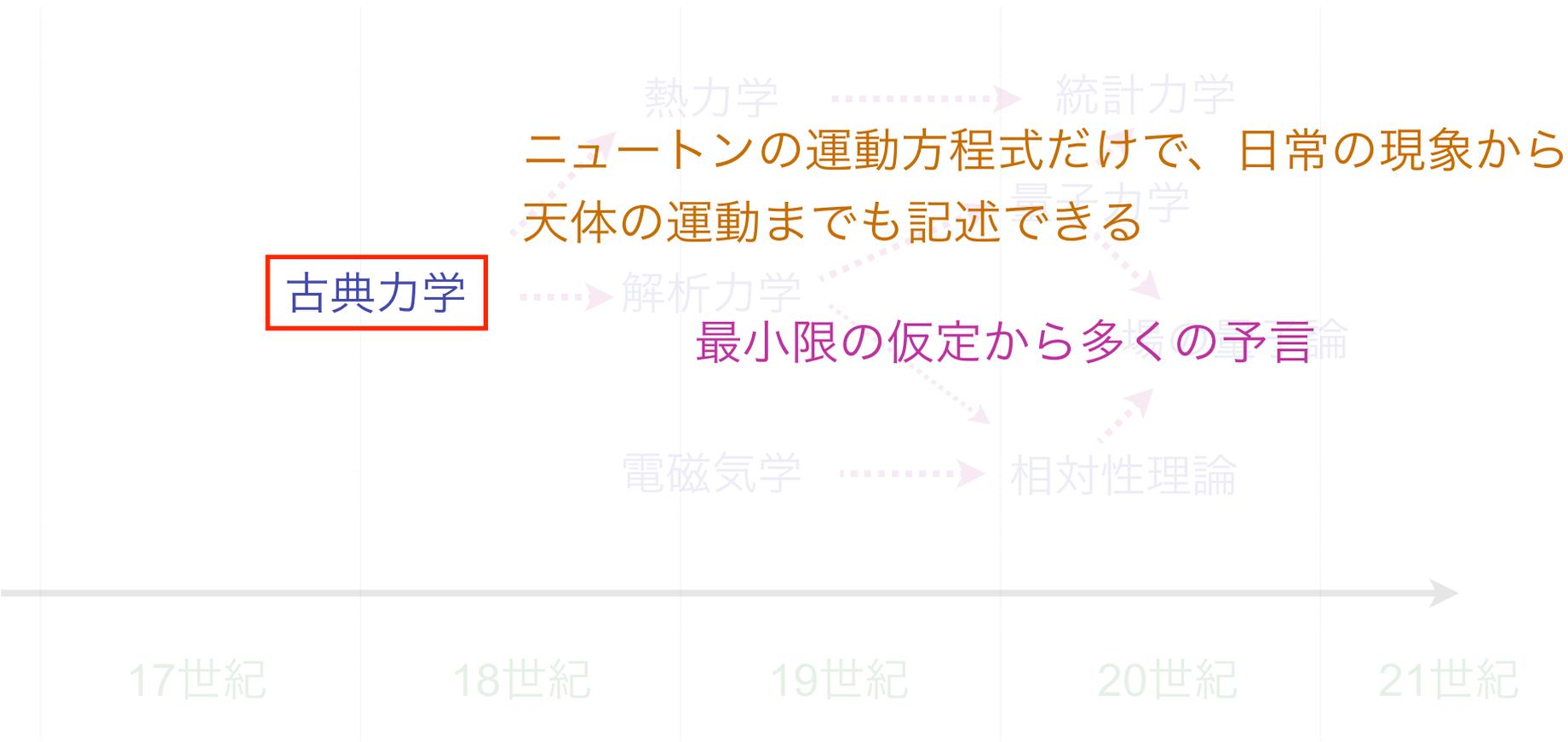


いかにも堅そう。。

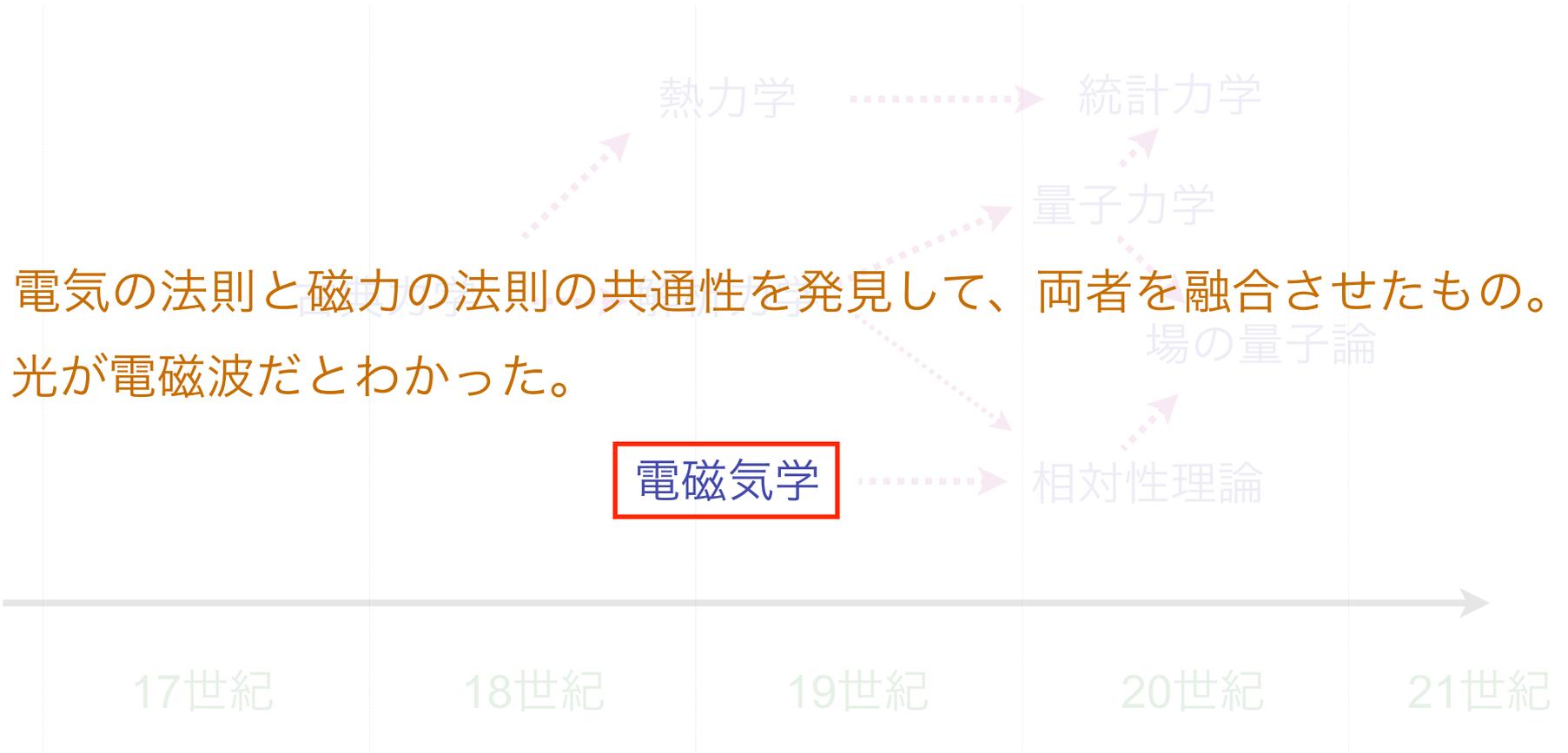
でも物理学者がやるうとしてることって、実は単純なんです。

最小限の仮定から、たくさんのことを説明する。

(覚えるのが苦手な人に向いている。笑)

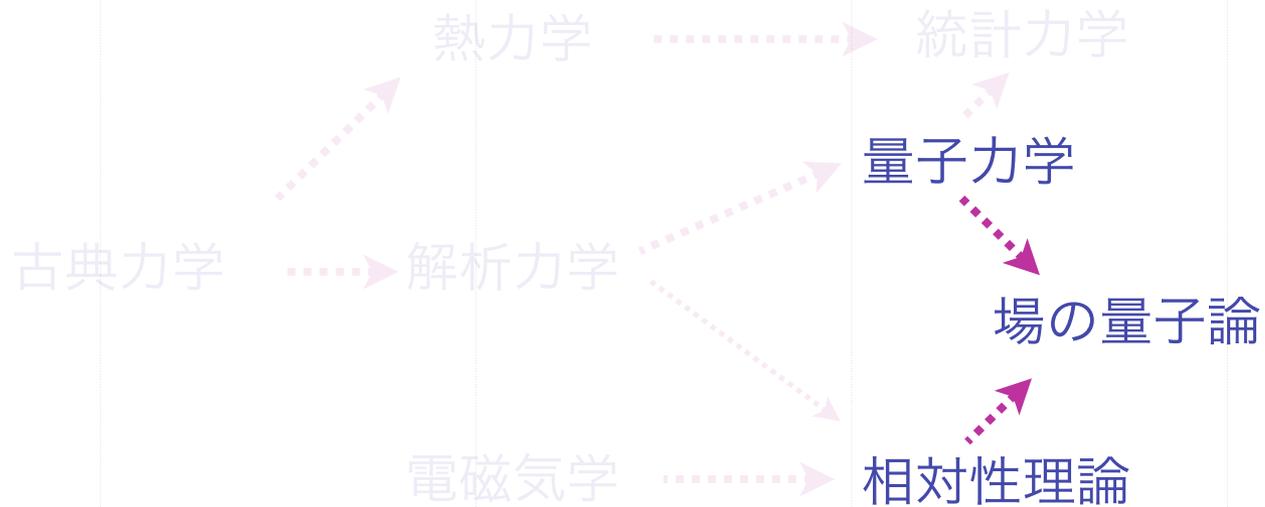


電気の法則と磁力の法則の共通性を発見して、両者を融合させたもの。
光が電磁波だとわかった。



量子力学を相対性理論と融合させて作られたのが「場の量子論」

→ 素粒子物理学の基礎



17世紀

18世紀

19世紀

20世紀

21世紀

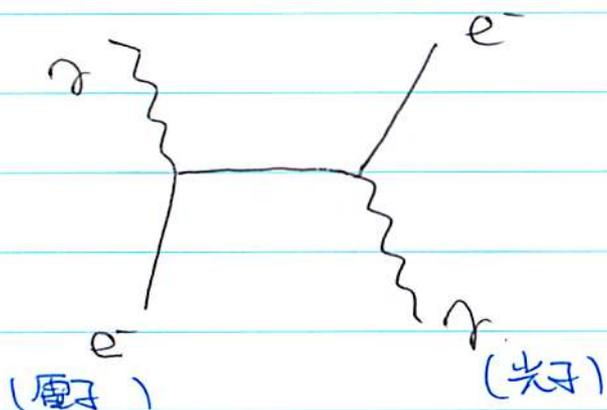
素粒子、現在どこまでわかっているか？

● 自然界には4つの力が存在する

電磁気力

Electromagnetic interaction

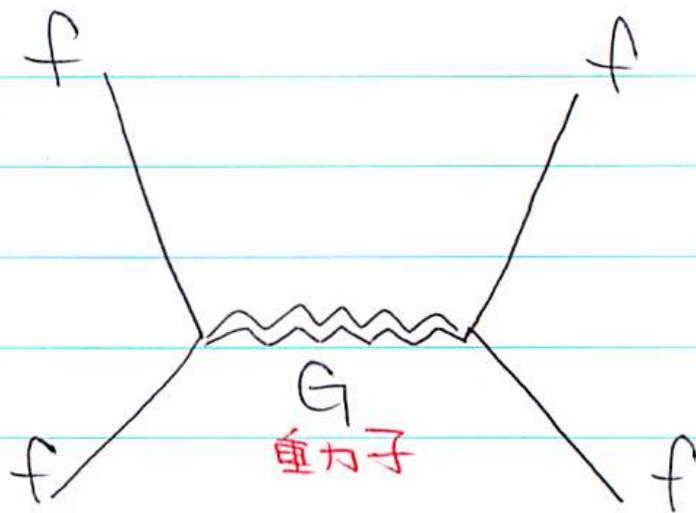
例として



"コンプトン散乱"も電磁気力による

重力

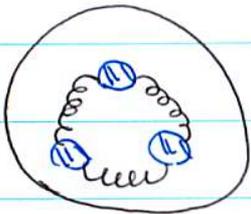
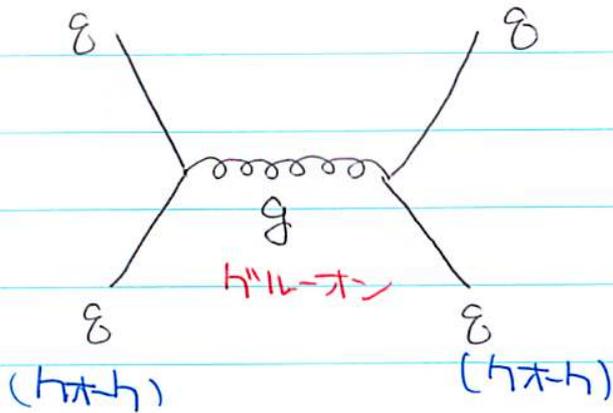
Gravitational interaction



いわゆる万有引力

強い力

Strong interaction

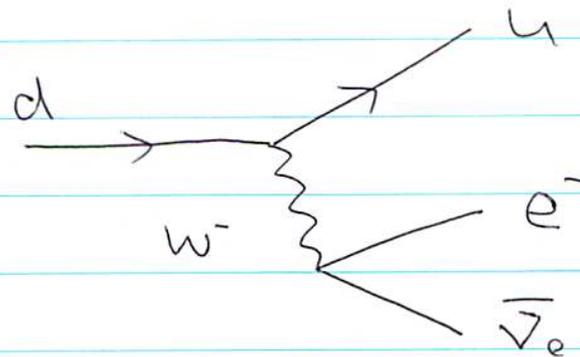


核子を結びこめる

陽子 / 中性子をつくる力

弱い力

Weak interaction



中性子を陽子に変える力

- このうち重力を除く 3つの力は統一的に説明できる

「素粒子標準模型」

$$\underline{SU(3)_c \times SU(2)_L \times U(1)_Y}$$

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4} G^{A\mu\nu} G_{A\mu\nu} - \frac{1}{4} W^{a\mu\nu} W_{a\mu\nu} - \frac{1}{4} B^{\mu\nu} B_{\mu\nu}$$

$$+ \bar{\psi}_{L_i} i \not{\partial} \psi_{L_i} + \bar{\psi}_{R_i} i \not{\partial} \psi_{R_i} + \bar{\psi}_{R_i} i \not{\partial} \psi_{R_i}$$

$$+ \bar{\psi}_{L_i} i \not{\partial} \psi_{L_i} + \bar{\psi}_{R_i} i \not{\partial} \psi_{R_i}$$

$$(- y_u^{ij} \bar{\psi}_{L_i} \epsilon H^* \psi_{R_j} - y_d^{ij} \bar{\psi}_{L_i} H \psi_{R_j} - y_e^{ij} \bar{\psi}_{L_i} H \psi_{R_j} + \text{h.c.})$$

$$+ |D_\mu H|^2 + \mu^2 H^\dagger H - \lambda (H^\dagger H)^2$$

where

$$D_\mu = \partial_\mu + i g_s A_\mu^A T^A + i g^a W_\mu^a T^a + i g' B_\mu Y$$

← 素粒子標準模型の基本方程式

じゃあ、素粒子標準模型はどのくらい現実と合っているの？

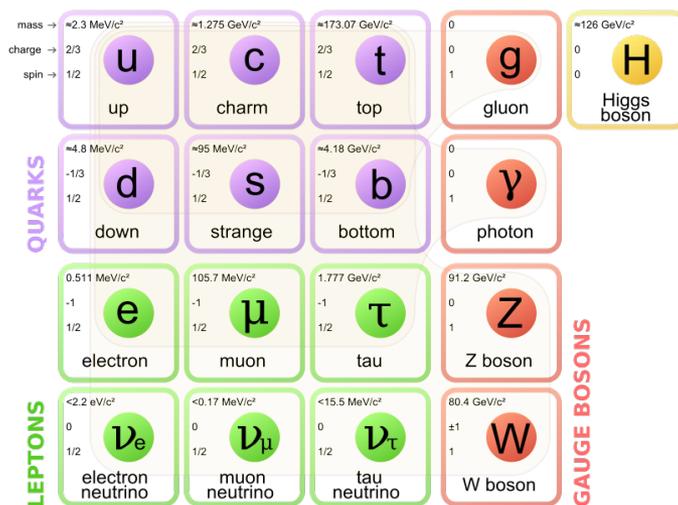
じゃあ、素粒子標準模型はどのくらい現実と合っているの？

→ とてもよく合っている

じゃあ、素粒子標準模型はどのくらい現実と合っているの？

→ とてもよく合っている

- 地上実験においてほぼ矛盾点なし
- 予言された粒子はすべて発見された



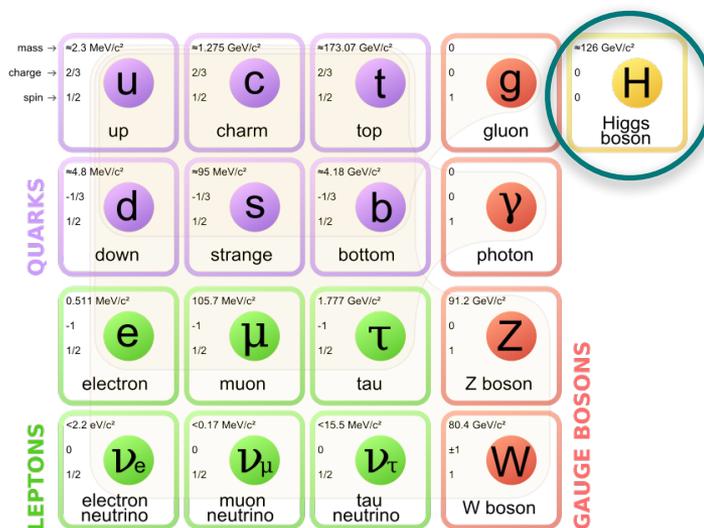
from Wikipedia

じゃあ、素粒子標準模型はどのくらい現実と合っているの？

→ とてもよく合っている

- 地上実験においてほぼ矛盾点なし
- 予言された粒子はすべて発見された

ヒッグス粒子の発見(2012年)



from Wikipedia

ん？ちょっと待って。

ん？ちょっと待って。

2. 素粒子と宇宙

??



A large yellow circle with a thin grey border. Inside the circle, there is text in orange and brown colors.

力、物質の起源を探る

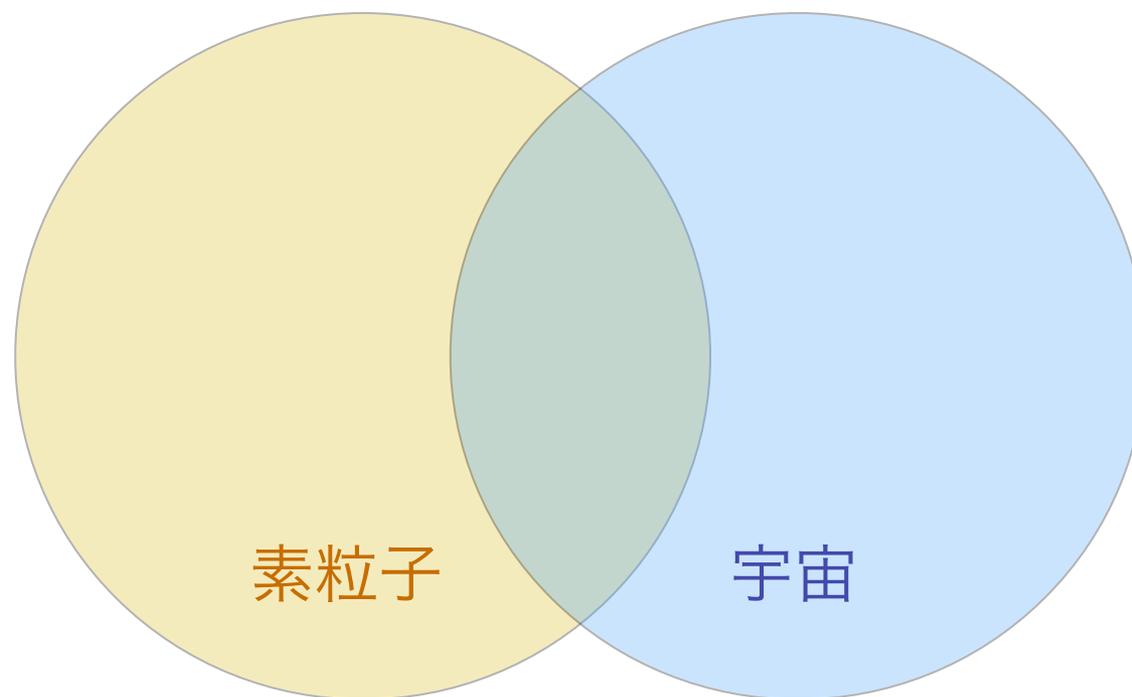
素粒子

A large blue circle with a thin grey border. Inside the circle, there is text in blue and brown colors.

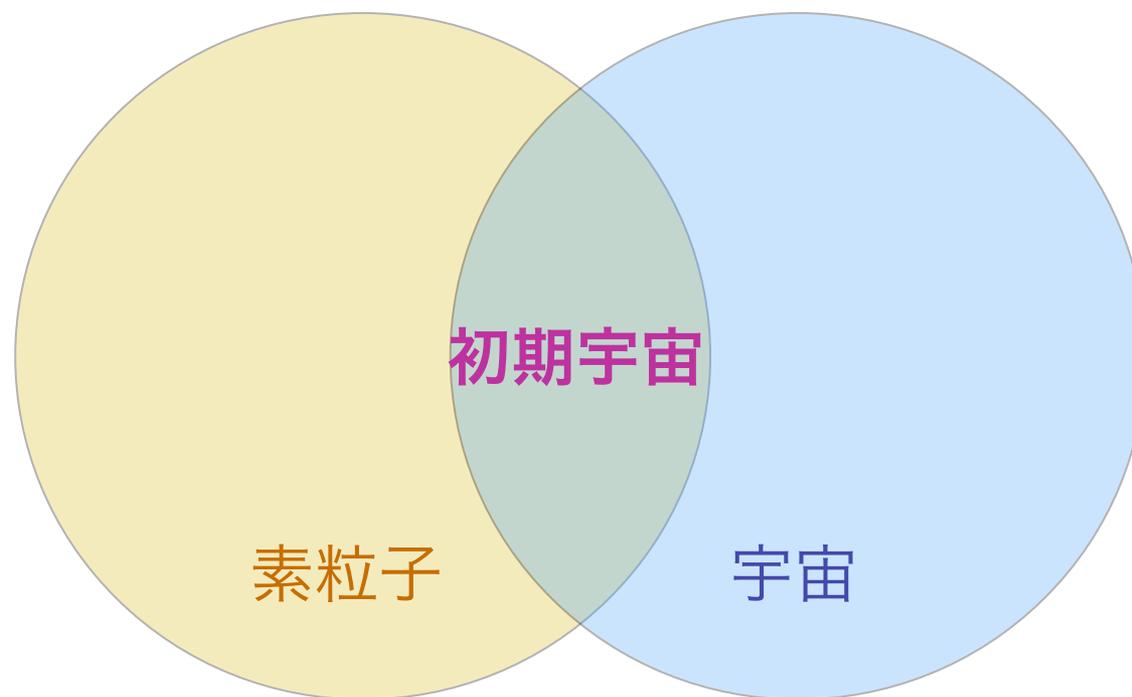
天体、宇宙の構造を探る

宇宙

最近ではこんな感じ



最近ではこんな感じ



なぜ初期宇宙が素粒子と関係あるのか？

なぜ初期宇宙が素粒子と関係あるのか？

→ 宇宙は膨張しているから

なぜ初期宇宙が素粒子と関係あるのか？

- 宇宙は膨張しているから
- 過去にさかのぼれば宇宙はミクロな存在

初期宇宙は素粒子の法則に従って進化

なぜ初期宇宙が素粒子と関係あるのか？

- 宇宙は膨張しているから
- 過去にさかのぼれば宇宙はミクロな存在

初期宇宙は素粒子の法則に従って進化

逆に言えば、

初期宇宙を観測できれば、素粒子の法則を調べられる

なぜ初期宇宙が素粒子と関係あるのか？

- 宇宙は膨張しているから
- 過去にさかのぼれば宇宙はミクロな存在

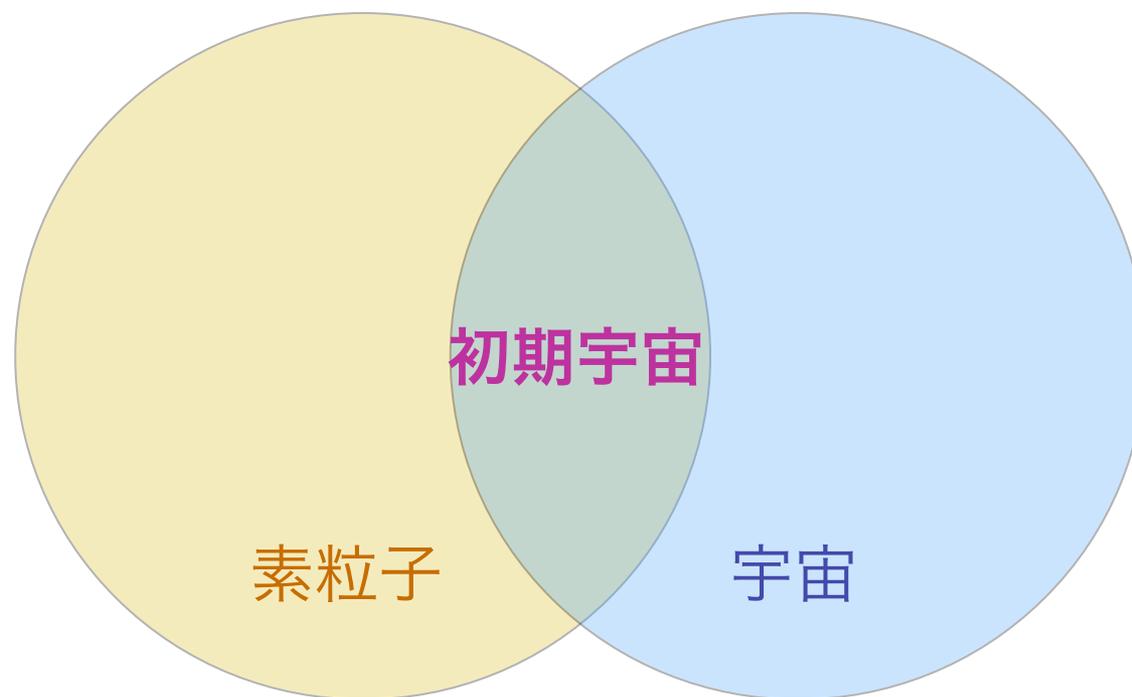
初期宇宙は素粒子の法則に従って進化

逆に言えば、

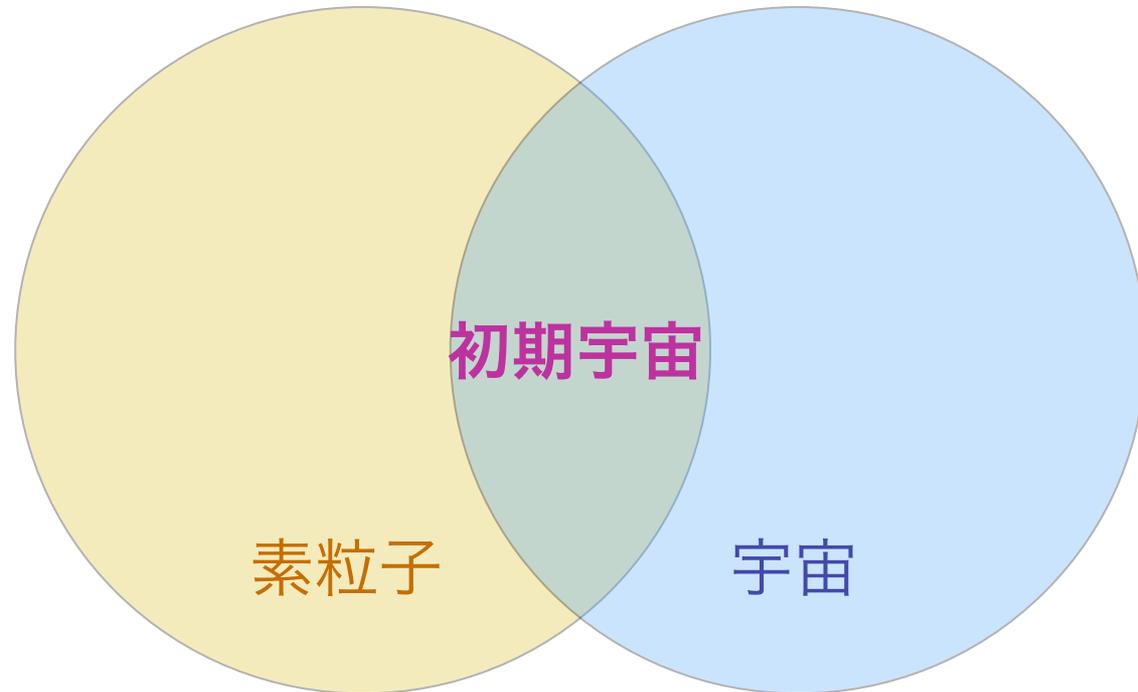
初期宇宙を観測できれば、素粒子の法則を調べられる

遠くの宇宙＝昔の宇宙なので、それが可能！

というわけで



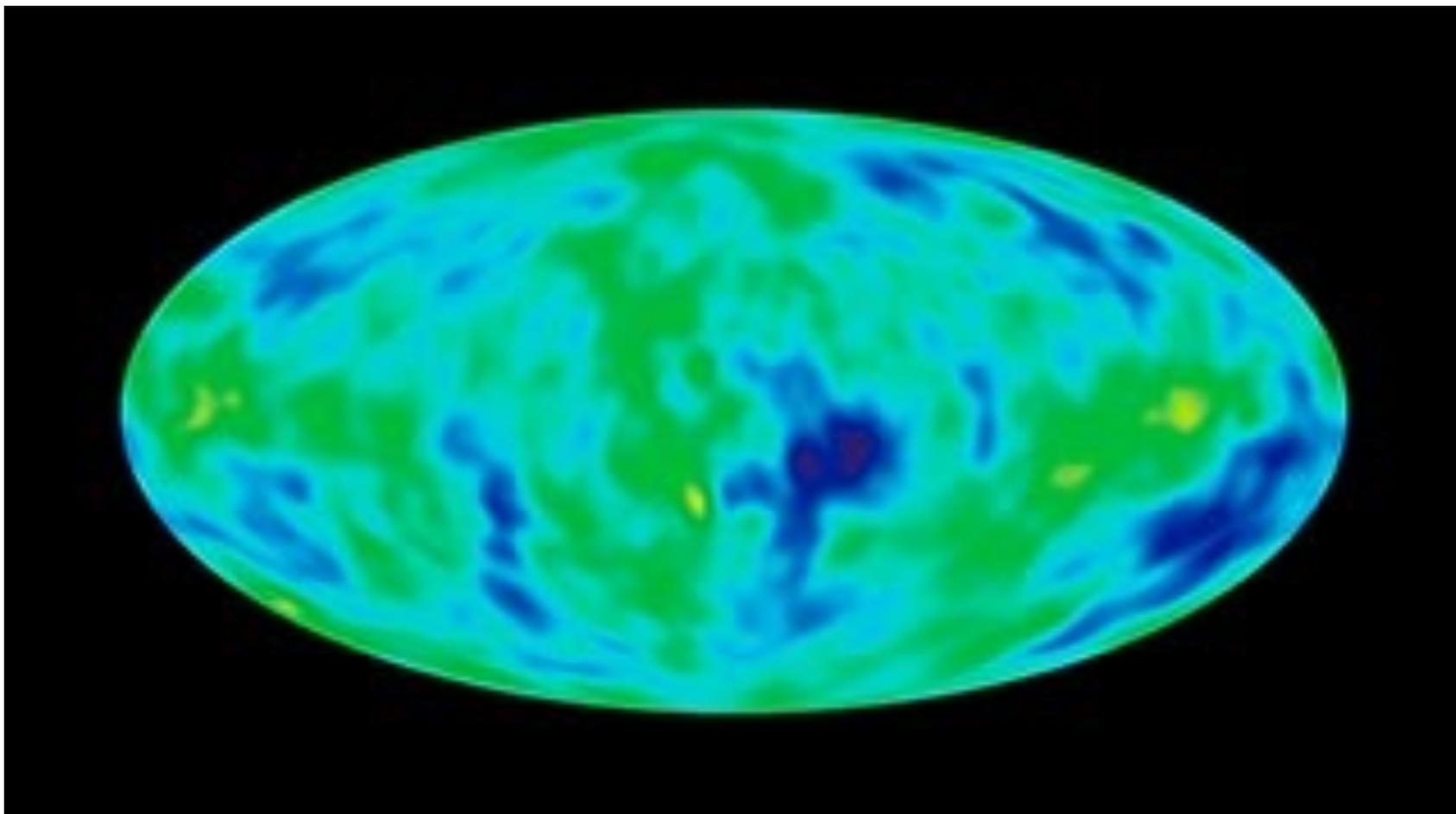
というわけで



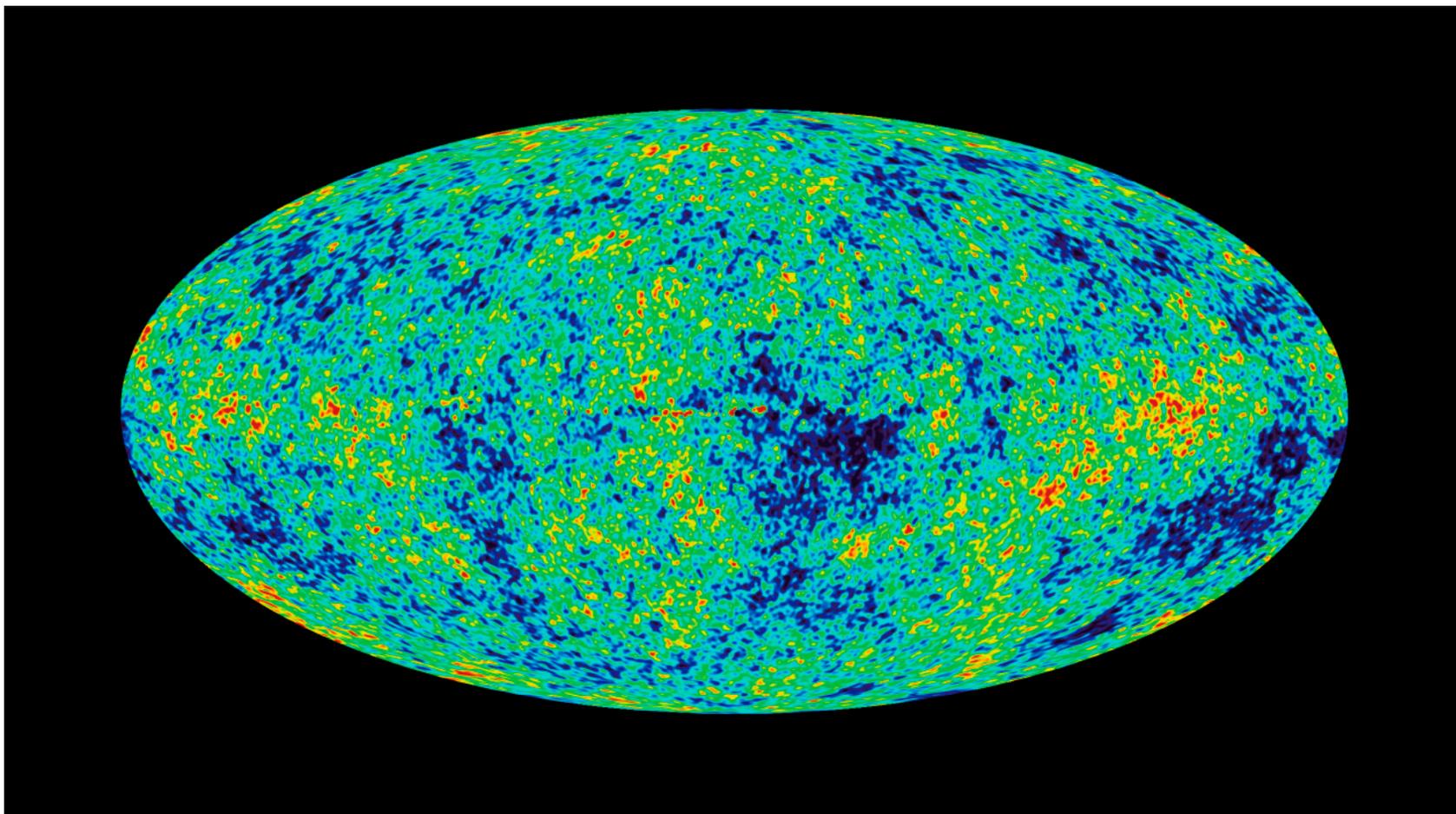
究極の目標は“theory of everything”を見つけること

実際、1990年代から初期宇宙の精密測定が盛んになっている

COBE '92

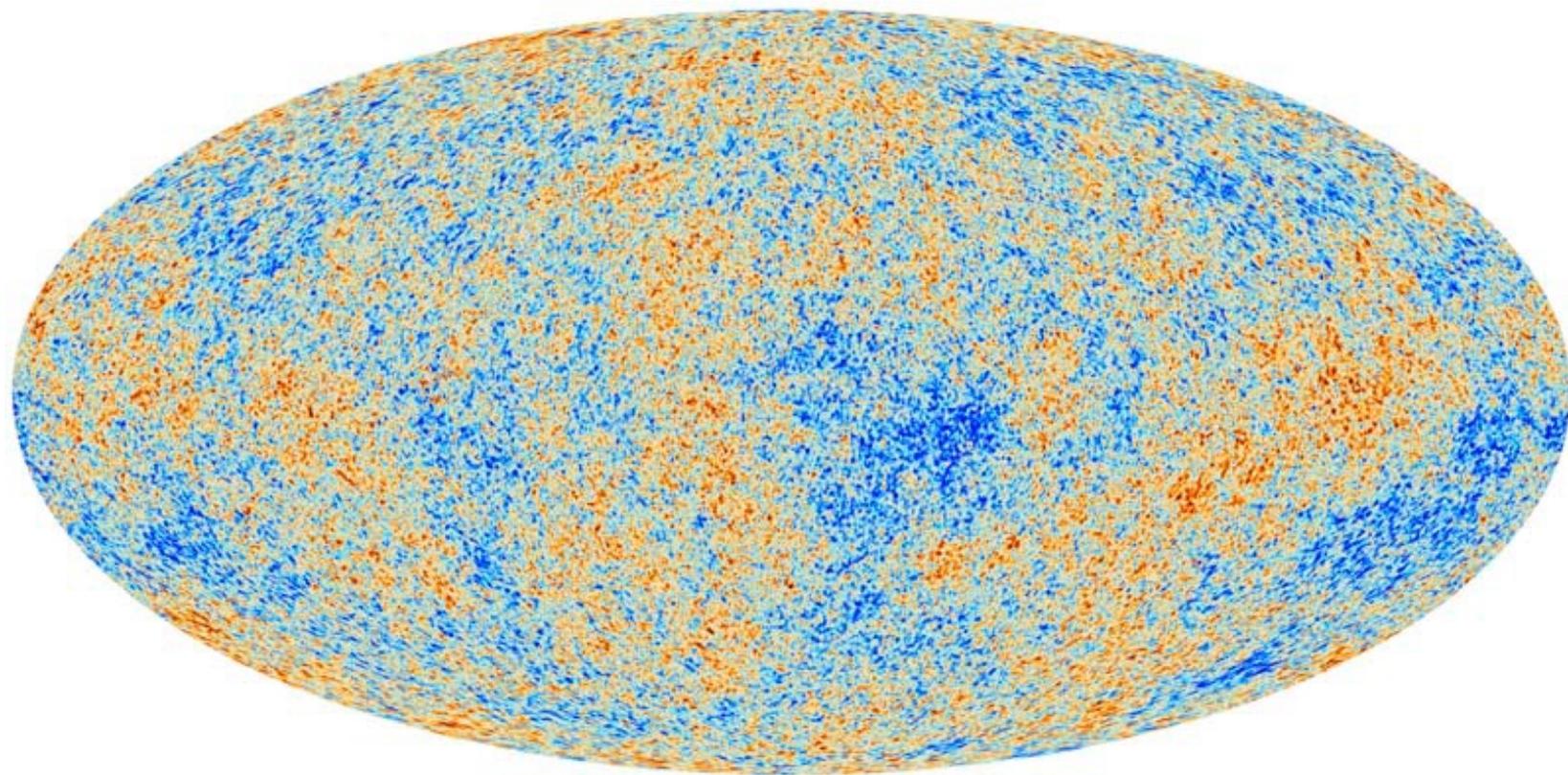


宇宙マイクロ背景放射の温度揺らぎ



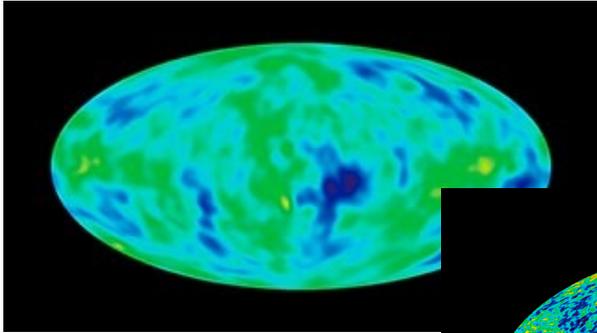
宇宙マイクロ背景放射の温度揺らぎ

Planck '13

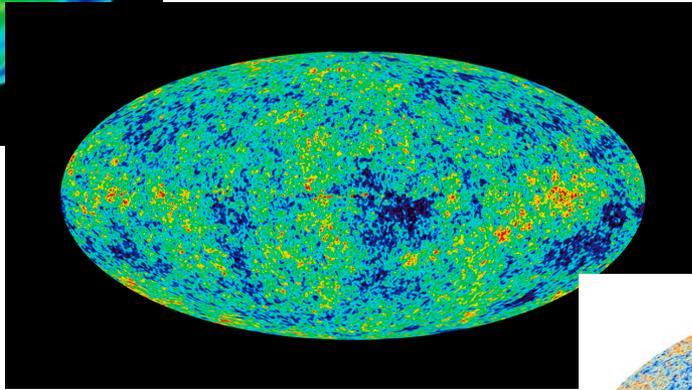


宇宙マイクロ背景放射の温度揺らぎ

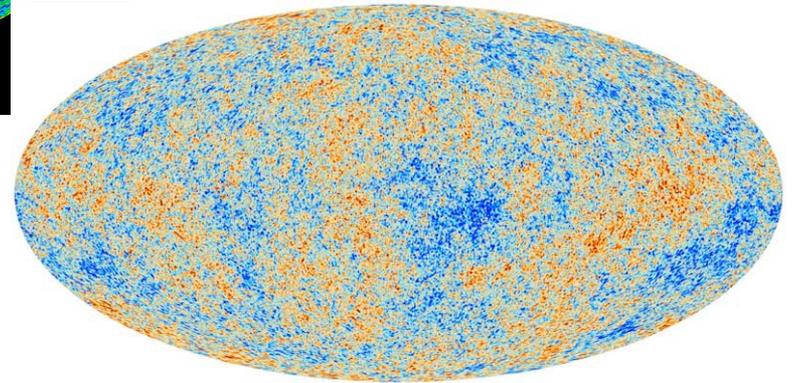
COBE '92



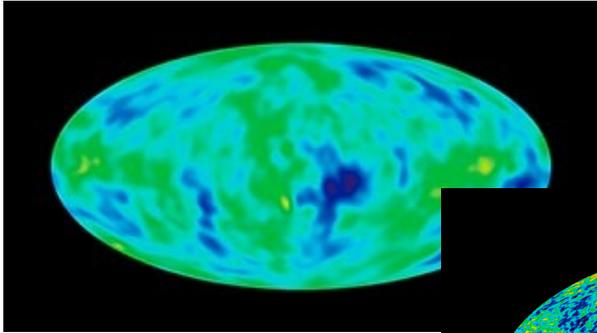
WMAP '03



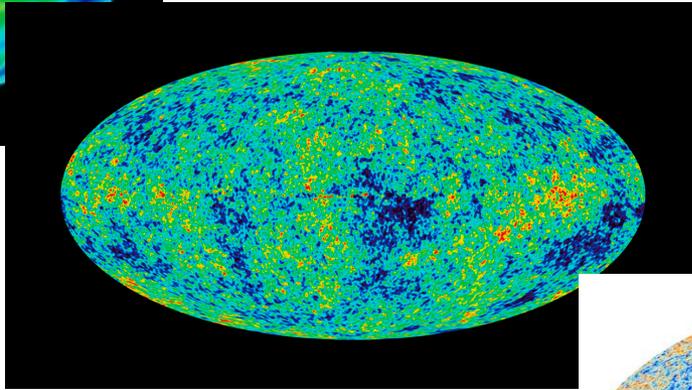
Planck '13



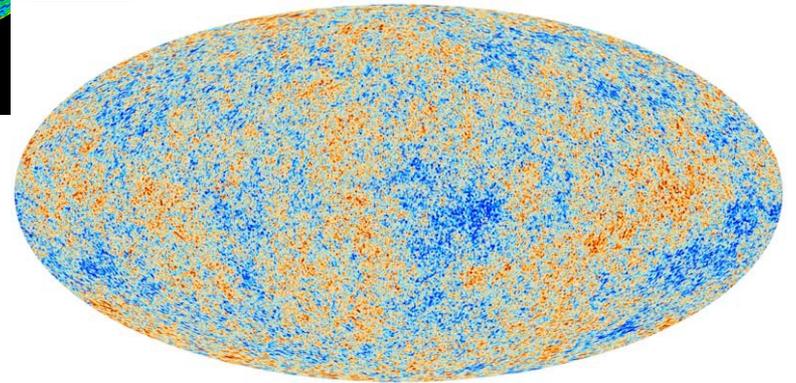
COBE '92



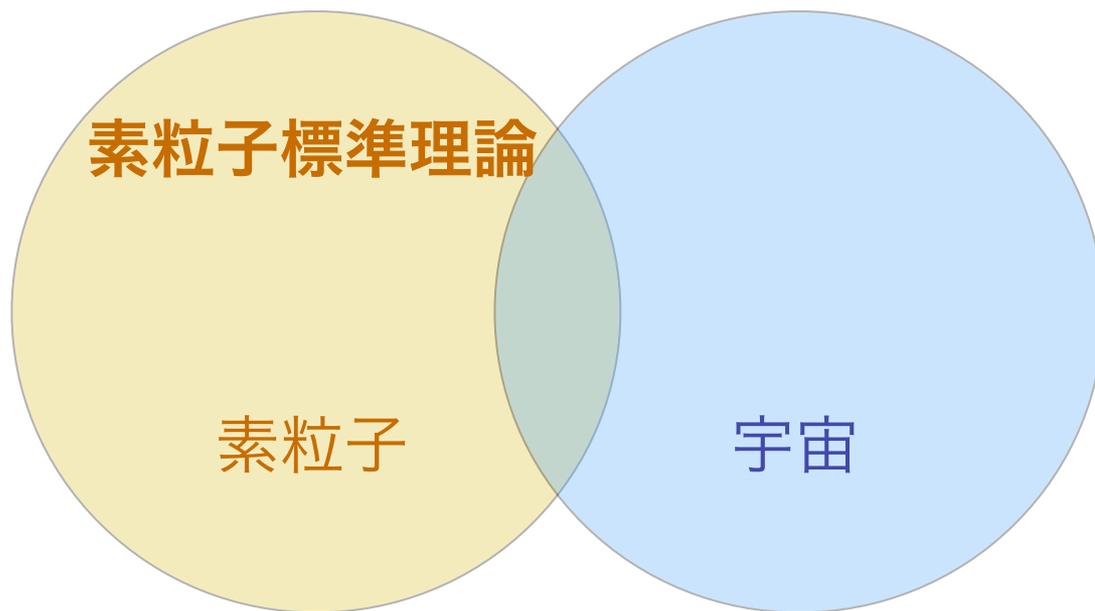
WMAP '03



Planck '13



明らかになったのは、素粒子との大きな矛盾点！



素粒子標準理論

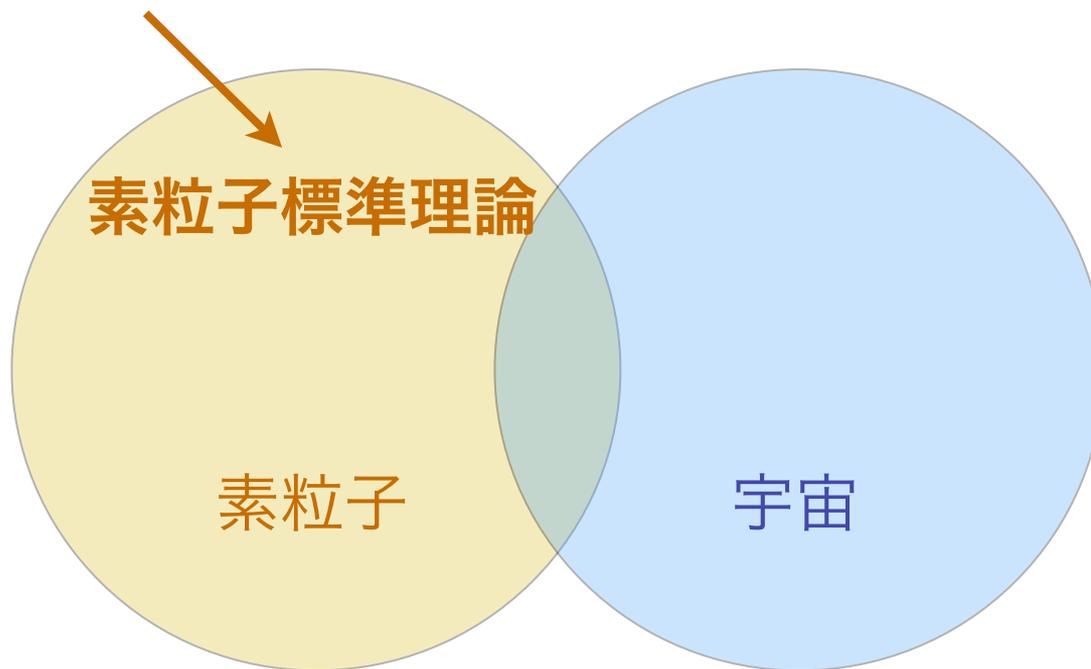
素粒子

宇宙



LHC実験

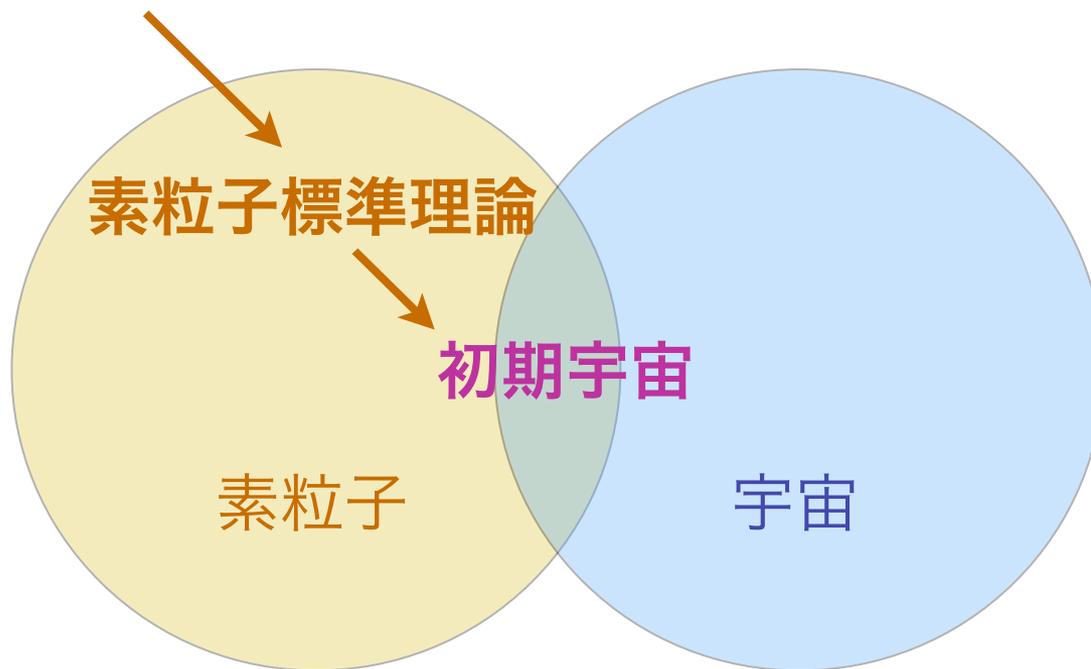
地上実験とほぼ無矛盾

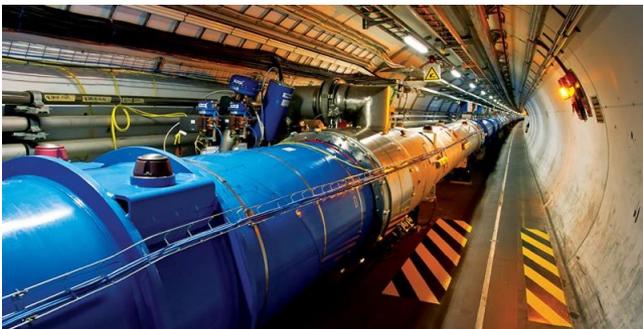




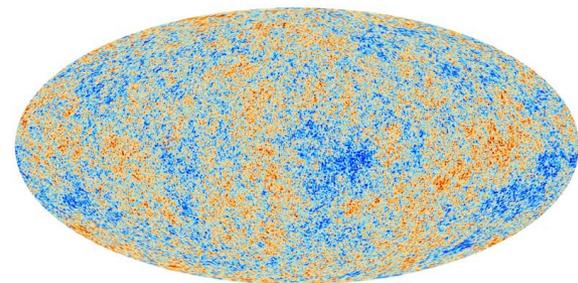
LHC実験

地上実験とほぼ無矛盾



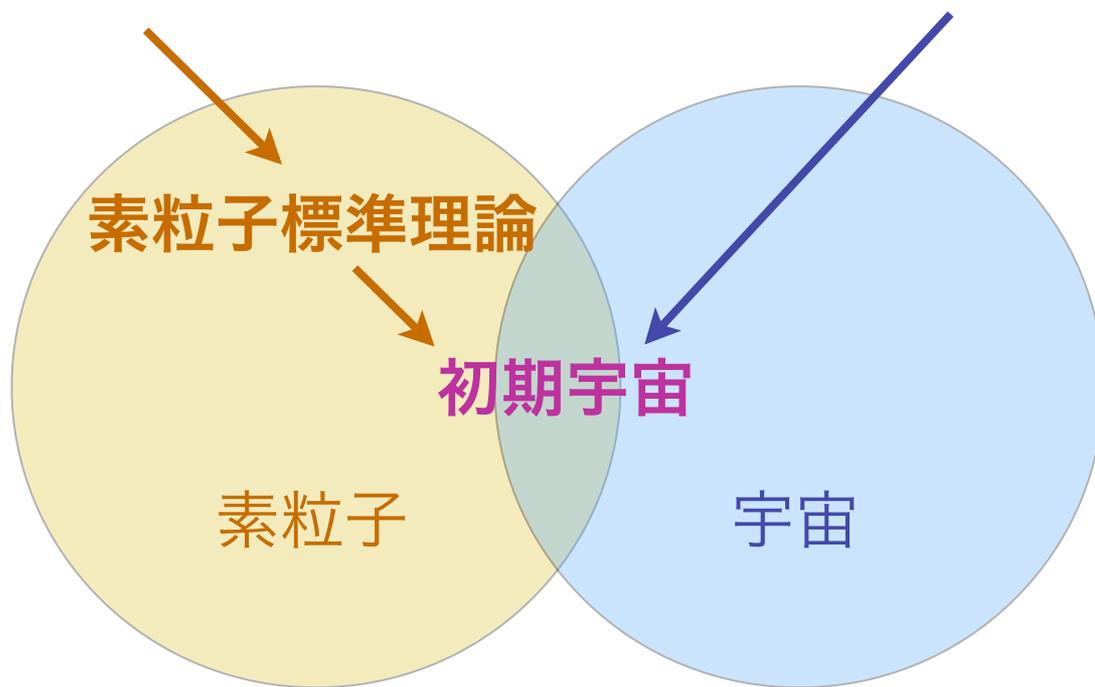


LHC実験



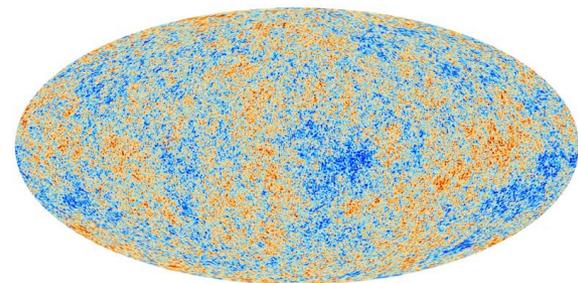
初期宇宙の精密観測

地上実験とほぼ無矛盾



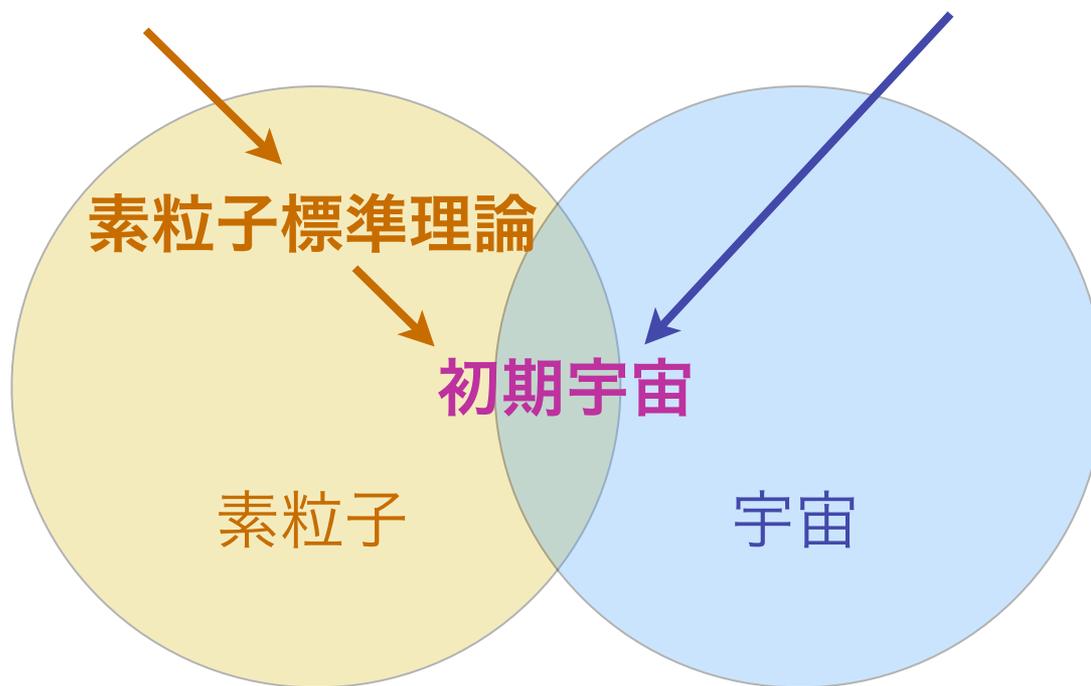


LHC実験



初期宇宙の精密観測

地上実験とほぼ無矛盾



大きな矛盾

なんと星も銀河もない宇宙ができあがってしまう！

謎ではあるけど、何がダメなのかはわかってきている！

ダメポイント 1.

そもそも星や銀河のモトがない

ダメポイント 2.

暗黒物質がない

謎ではあるけど、何がダメなのかはわかってきている！

ダメポイント 1.

そもそも星や銀河のモトがない

→ 宇宙初期にどう物質が作られたかを解明すべし

ダメポイント 2.

暗黒物質がない

→ 暗黒物質の正体を解明すべし

謎ではあるけど、何がダメなのかはわかってきている！

ダメポイント 1.

そもそも星や銀河のモトがない

→ 宇宙初期にどう物質が作られたかを解明すべし

ダメポイント 2.

解明できればノーベル賞

暗黒物質がない

→ 暗黒物質の正体を解明すべし

目指せノーベル賞！ということで(笑)、

修士論文：

右巻きニュートリノを含む超対称素粒子模型と
宇宙暗黒物質問題

博士論文：

Cosmic Rays from Decaying Dark Matter
in Supersymmetric Model

(超対称模型における暗黒物質崩壊を起源とする宇宙線の研究)

研究ってこんな感じ

1. 論文を読んだりして面白そうなことを探す
2. 何か見つければ計算してみる
3. 結果が出れば論文にまとめて発表する
4. 学会や国際会議で研究の発表をする

「宇宙の研究って壮大すごいですね！」

「国際会議で発表ってすごいですね！」

「やりたいことをやれるっていいですね！」

とか言われますが、実際に毎日やっている作業はすごく地味、

研究ってこんな感じ

1. 論文を読んだりして面白そうなことを探す
2. 何か見つければ計算してみる
3. 結果が出れば論文にまとめて発表する
4. 学会や国際会議で研究の発表をする

研究ってこんな感じ

1. 論文を読んだりして面白そうなことを探す

← なかなか見つからずに数ヶ月、、

2. 何か見つければ計算してみる

← 計算に数ヶ月、、

3. 結果が出れば論文にまとめて発表する

← 数ヶ月計算してボツになる、、

4. 学会や国際会議で研究の発表をする

← 英語がわからなくて泣きそうになる、、

注：個人差があります。

研究ってこんな感じ

1. 論文を読んだりして面白そうなことを探す

← なかなか見つからずに数ヶ月、、

2. 何か見つければ計算してみる

← 計算に数ヶ月、、

3. 結果が出れば論文にまとめて発表する

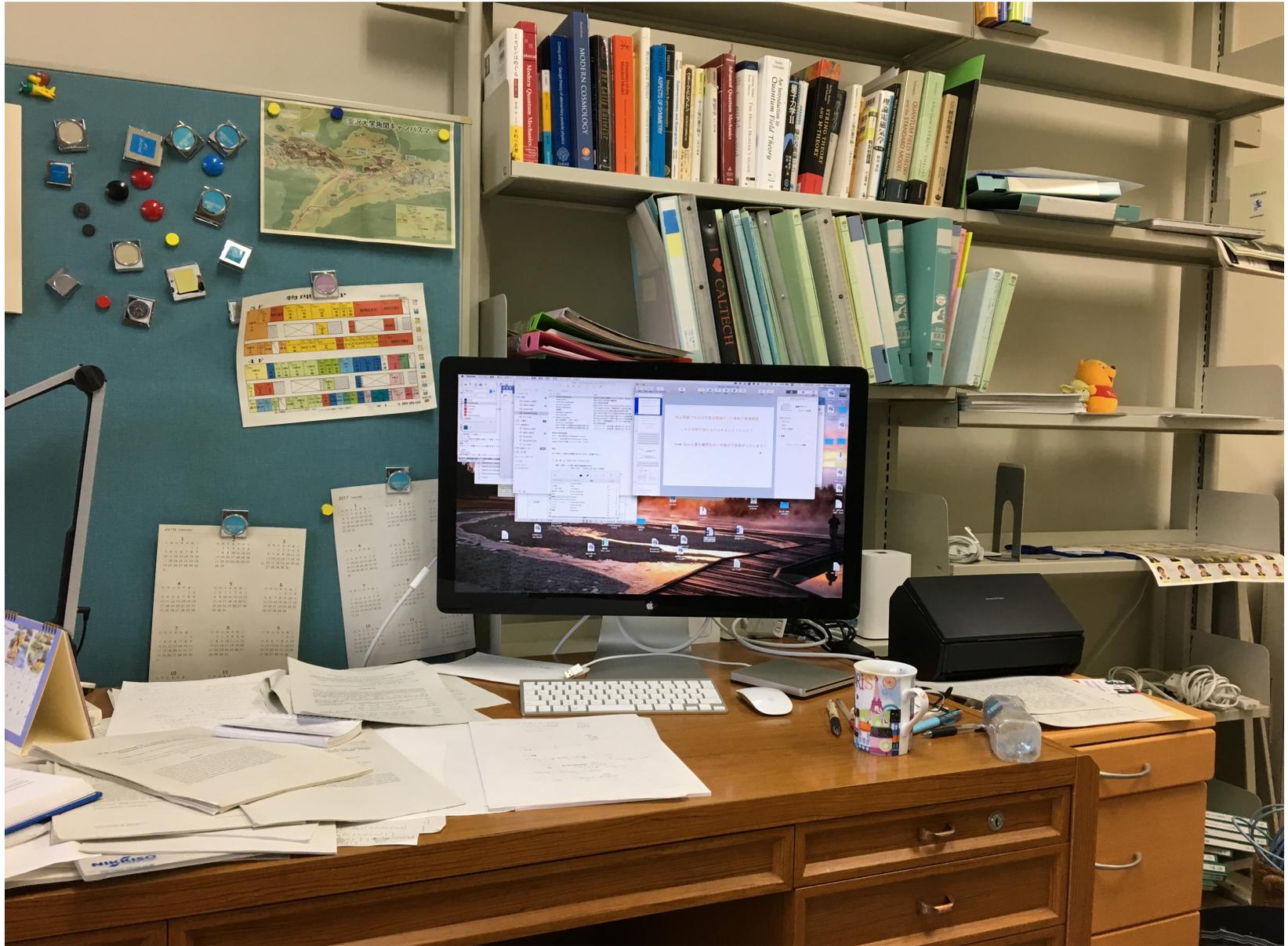
← 数ヶ月計算してボツになる、、

4. 学会や国際会議で研究の発表をする

← 英語がわからなくて泣きそうになる、、

研究室ってこんな感じ

机



DD in non-min UED

$$\lambda(M_U) = \lambda(M_P) + \frac{3}{8\pi^2} [\lambda^2(m_U) - R^4(M_U)] \log \frac{M_U}{M_P}$$

large $M_S \rightarrow \tan\beta \sim 1$

vector like matter contribution should be small

$M_S \leq 10 \text{ TeV}$

vectorlike matter $\sim 10 \text{ TeV}$

SM like

$M_U, M > M_S$ $(M \sim \bar{M})$ $\bar{M}^2 = M^2 + M_U^2$

$\lambda(\bar{M}) = \frac{1}{2} g_2^2(M) \cos^2 2\beta(M) + \delta\lambda_M$

\downarrow RGE (w/o g_2^4 term)

$\lambda(M_S) = \lambda_S(M_S) + \delta\lambda_S$

\downarrow RGE (SM)

$M_U, M < M_S$

$\lambda(M_U) = \frac{1}{2} g_2^2(M_U) \cos^2 2\beta(M_U)$

\downarrow RGE (SM) \leftarrow cancel

$\lambda(M) = \lambda_U(M) + \delta\lambda_U$

\downarrow RGE (SM)

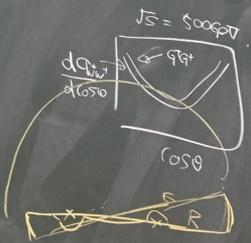
$$0 = \sum \frac{d\lambda_R^{SM}}{dt} + \frac{\sum N_c Y_t^2}{(4\pi)^2} \left(\frac{M_U^2}{M^2} \right) \left(-\frac{1}{2} \right) + \dots$$

$$t = \log M^2 + \frac{\sum N_c Y_t^2}{(4\pi)^2} \frac{M_U^2}{M^2}$$

$$\left(\frac{d\lambda_R^{SM}}{dt} \right) = + N_c Y_t^2 \lambda_R^{SM} - N_c Y_t^4$$

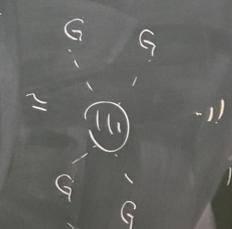
$$\frac{d\lambda}{d \log M^2} = \frac{3}{8\pi^2} (-R^2) - \lambda \frac{3}{16\pi^2} R^2$$

$$\frac{d\lambda^{SM}}{d \log M^2} = \frac{3}{16\pi^2} (-R^2) - \lambda \frac{3}{16\pi^2} R^2$$



$\lambda_{H_u H_d S^2}$

$J_S = 500 \text{ GeV}$ 1 TeV



$\frac{R^2}{2 R^2}$

3. 素粒子との出会い (進路と仕事選び)

生い立ち

- ▶ 福島県郡山市で生まれる
(何度か引越ししつつ)
- ▶ 福島県立安積高等学校
- ▶ 東北大学、東北大学大学院
- ▶ 東京大学宇宙線研究所 研究員
- ▶ カリフォルニア工科大学(米国) 研究員
- ▶ DESY(ドイツ) 研究員
- ▶ 金沢大学 助教

生い立ち

▶ 福島県郡山市で生まれる
(何度か引越ししつつ)

▶ 福島県立安積高等学校

← 転機①

▶ 東北大学、東北大学大学院

← 転機②

▶ 東京大学宇宙線研究所 研究員

▶ カリフォルニア工科大学(米国) 研究員

▶ DESY(ドイツ) 研究員

▶ 金沢大学 助教

Q. このなかで僕の趣味じゃないものはどれ？

A. サッカー

B. ダンス

C. クラシック音楽

D. 旅

E. フィギュアスケート

Q. このなかで僕の趣味じゃないものはどれ？

A. サッカー

B. ダンス

C. クラシック音楽

D. 旅

E. フィギュアスケート

→ 正解は A. サッカー

転機①：高校時代 ('98 - '01)

- そこそこの進学校。まわりには部活も勉強もできる連中。
- が、僕はこれとって得意なものもなかった。
- が、物理は面白いとっていて、何となく科学者に憧れていた。

でも、いざ大学や学科を選ぼうにもよくわからない。。

- 物理といっても工学部と理学部はどう違うの？
- 研究者以外の仕事ってあるの？
- 研究者ってどれくらいなるのが難しいの？
- ってというか、そもそも僕は物理に向いてるの？

結局、えいっと決める。

- 母には理学部へ行くことは反対された。
(「医学部へ行け」→「薬学部へ行け」→「工学部へ行け」)
- 規模が大きな大学なら物理の中でも色々選択肢があるだろうと思い、東大を目指すことにした。

が、受験は失敗した。。

- センター試験で大失敗し、東大を諦め、やけくそで前期：京大、後期：東北大を受けることにした。
- 京都は落ち、後期でかろうじて東北大へ受かった。
- 努力してもダメなことはあるんだと思った。
(「あんなに勉強してたのに落ちるんだ」と思って、弟は勉強する気をなくしたらしい。笑)

が、受験は失敗した。。

- センター試験で大失敗し、東大を諦め、やけくそで前期：京大、後期：東北大を受けることにした。
- 京都は落ち、後期でかろうじて東北大へ受かった。
- 努力してもダメなことはあるんだと思った。
(「あんなに勉強してたのに落ちるんだ」と思って、弟は勉強する気をなくしたらしい。笑)

→ でもこの挫折は結果的によかった。

よかったと思えた理由：

- 自分で考えて選んだ道だから、失敗しても後悔はなかった。
- 大学に入ってからが始まりだ！と思えた。

ちょっと休憩。今と昔を比べてみました。

2000年以前くらい

今

● スポーツ

サッカー、バスケ

多様化
(ゴルフとか)

● 漫画

ドラゴンボール、るる剣、
スラムダンク、キャプつば
ワンピース、ナルト
コナン、メジャー

ワンピース、ナルト
コナン
(??)

2000年以前くらい

今

- テレビ
ブラウン管
薄型
- 録画メディア
VHS
HD, DVD, Blu-ray
- 音楽メディア
カセットテープ、CD, MD
iPod, スマホ, ...
- インターネット
ダイヤルアップ
WiFi, 常時接続
- 電話
携帯電話、PHS
スマホ
- テレビ電話
テレビ電話
スカイプ、LINE, ..

ちなみにアメリカでは世代ごとにネーミングがあります

1980年～2000年 生まれ → “Generation Y”, “Millennials”

2000年～ 生まれ → “Generation Z”

最近では、別な分類として

1980年代以降 → “Digital Natives”

1980年以前 →

ちなみにアメリカでは世代ごとにネーミングがあります

1980年～2000年 生まれ → “Generation Y”, “Millennials”

2000年～ 生まれ → “Generation Z”

最近では、別な分類として

1980年代以降 → “Digital Natives”

1980年以前 → “Digital Immigrants”

大学学部時代 ('01 - '05)

- 物理と英語は真面目に勉強した。
- 自分で調べる・考える、人に聞く、などいろんな勉強の仕方を学んだ。
- 量子力学に特に興味を持ち、大学院でもっと学びたいと思うようになった。

大学学部時代 ('01 - '05)

- 物理と英語は真面目に勉強した。
- 自分で調べる・考える、人に聞く、などいろんな勉強の仕方を学んだ。
- 量子力学に特に興味を持ち、大学院でもっと学びたいと思うようになった。

← 勉強するほどわからない、けど面白い

そのほかの大学生活

- 部活、サークルは一切やらず。
- バイト：山パンの夜勤、家庭教師、塾講師
- 彼女ができる

ちなみに、、

高校時代もずっと帰宅部でした。

(文武両道は僕には無理だと思ったので、、)

でも大学に入ったら、まわりの友達は結構部活やってたやつが多くて、何だかパツとしない青春だなあと感じてました。

ちなみに、、

高校時代もずっと帰宅部でした。

(文武両道は僕には無理だと思ったので、、)

でも大学に入ったら、まわりの友達は結構部活やってたやつが多くて、何だかパツとしない青春だなあと思ってました。

→ それが大学院に入ってから変革が起こる。。

生い立ち

▶ 福島県郡山市で生まれる
(何度か引越ししつつ)

▶ 福島県立安積高等学校

← 転機①

▶ 東北大学、東北大学大学院

← 転機②

▶ 東京大学宇宙線研究所 研究員

▶ カリフォルニア工科大学(米国) 研究員

▶ DESY(ドイツ) 研究員

▶ 金沢大学 助教

転機②：院生時代 ('05 - '10)

- わからないことだらけ。研究をやめようかと悩む。
 - 彼女にふられる。
 - でもまわりに助けられながら何とか研究を続けた。
- 辛い時期だったけど、いろんなことを突き詰めて考えることができた時期でもあった

Q. 彼女にふられたときに言われたことは？

- A. 好きな人ができました
- B. 遠距離は辛いです
- C. 仕事が楽しくなりました
- D. 成長するために別れたいです
- E. 元々好きじゃなかったです

Q. 彼女にふられたときに言われたことは？

- A. 好きな人ができました
- B. 遠距離は辛いです
- C. 仕事が楽しくなりました
- D. 成長するために別れたいです
- E. 元々好きじゃなかったです

→ 正解は E. 元々好きじゃなかったです

考えたこと

- 自分は本当に何がやりたいのか？
- 物理の価値って一体なんなんだ？
- 自分の幸せって一体なんなんだ？

→ 研究者としてやっていくことを決心する。

まあでも現実逃避気味に沖縄に行ったりとかして、、



(沖縄県宮古島 '08 D2の夏)

ちなみに大学院生の頃行った場所：

- 九州 (夜行バス＋青春18切符＋レンタカー)
- 四国 (夜行バス＋青春18切符＋レンタカー)
- 岐阜 (夜行バス＋青春18切符)
- 宮古島 (飛行機)
- 東北各地 (青春18切符)
- ドイツ、イタリア、スペイン (研究で)

そして趣味もいろいろの変動、、

- クラシック音楽にはまる (学部2年の頃)
- 近所のランニングを始める (修士2年の頃)
- ラジオにはまる (修士2年の頃)
- フィギュアスケートを始める (博士1年の頃)

そして趣味もいろいろ変動、、

- クラシック音楽にはまる (学部2年の頃)
- 近所のランニングを始める (修士2年の頃)
- ラジオにはまる (修士2年の頃)
- フィギュアスケートを始める (博士1年の頃)

→ 25歳くらいからどんどん体力が上がる。
(意図せず、文武両道。笑)

生い立ち

- ▶ 福島県郡山市で生まれる
(何度か引越ししつつ)
- ▶ 福島県立安積高等学校
- ▶ 東北大学、東北大学大学院
- ▶ 東京大学宇宙線研究所 研究員
- ▶ カリフォルニア工科大学(米国) 研究員
- ▶ DESY(ドイツ) 研究員
- ▶ 金沢大学 助教

生い立ち

- ▶ 福島県郡山市で生まれる
(何度か引越ししつつ)
- ▶ 福島県立安積高等学校
- ▶ 東北大学、東北大学大学院
- ▶ 東京大学宇宙線研究所 研究員
- ▶ カリフォルニア工科大学(米国) 研究員
- ▶ DESY(ドイツ) 研究員
- ▶ 金沢大学 助教

(楽しい)
海外放浪生活へ

→ 時間があれば後で
話します。

次に進む前に、僕が高校の頃持っていた疑問
についての答えを。

- 物理といっても工学部と理学部はどう違うの？
- 研究者以外の仕事ってあるの？
- 研究者ってどれくらいなるのが難しいの？
- ってというか、そもそも僕は物理に向いてるの？

Q. 物理といっても工学部と理学部はどう違うの？

Q. 物理といっても工学部と理学部はどう違うの？

A. 物理法則を表す基本方程式を見た時、

- この式を使って何ができるかな？と思う人

→ 工学部系

- この式は一体どこから導かれるのか？と思う人

→ 理学部系

Q. 研究者以外の仕事ってあるの？

Q. 研究者以外の仕事ってあるの？

A. 理学部物理卒から色々な職種へ就職しています。

- 一般企業や一般企業の研究所
 - 教員
 - 公務員
- etc.

工学部の方が就職に有利だという声も聞きますが、これまで見てきた感じだとあまり関係なさそうです。

Q. 研究者ってどれくらいなるのが難しいの？

Q. 研究者ってどれくらいなるのが難しいの？

A. うーむ、分野に依ると思います。。

例えば僕らの素粒子理論分野ではこんな感じ↓

博士号取得



任期付研究員(2, 3年)

(これを何度かくりかえす。。)



任期のない仕事に就く

Q. 研究者ってどれくらいなるのが難しいの？

A. うーむ、分野に依ると思います。。

例えば僕らの素粒子理論分野ではこんな感じ↓

博士号取得



任期付研究員(2, 3年)

(これを何度かくりかえす。。)



任期のない仕事に就く

日本だけでなく海外にも行く
いつまで続くかわからない



Q. っていうかそもそも僕は物理に向いてるの？

Q. っていうかそもそも僕は物理に向いてるの？

A. さあ。笑

ずっと考えてますが、たぶん他のことよりは向いてるかなあと思います。

ここまでをちょっとまとめます。

頑張っても思うようにいかないことが起こる

素粒子をやりながら僕がたどり着いた結論：

頼れるのは「考える力」

4. 考える力

高校、大学で僕が持っていた一番の謎は

「なぜ、(問答無用で)勉強しなきゃいけないのか？」

(しかもいろんな科目、国語、社会、芸術、、、)

僕が出した結論

- 高校の頃
- 大学学部の頃
- 大学院の頃

で変わっていった

- 高校の頃：

物理は面白かったけど、受験対策や、その他の科目は嫌いだった。

→ 勉強は、行きたい大学に行くため
(とわりきった)

- 大学学部の頃：

嫌いだったものはやらなくて済むようになったので(笑)

→ 勉強は、自分の行きたい道に進むため

- 大学院の頃：

わからないこと、うまくいかないことが多くなって、勉強する意味を見失う。

→ でも、物理を続けながら、**物理以外のことで得たものが多いことに気づく。**

元の疑問に戻ります。

「なぜ、(問答無用で)勉強しなきゃいけないのか？」

- 高校の頃 → 行きたい大学に行くため
- 大学学部の頃 → 行きたい道に進むため
- 大学院の頃 → 物理以外に得るものが多い

元の疑問に戻ります。

「なぜ、(問答無用で)勉強しなきゃいけないのか？」

- 高校の頃 → 行きたい大学に行くため
- 大学学部の頃 → 行きたい道に進むため
- 大学院の頃 → 物理以外に得るものが多い

→ 物理を続けながら、他のいろいろなことを学ぶことができる

僕がこう言うのもなんですが、

自分らしく生きるために高校や大学の勉強がいらないと思うなら、それでいいと思います。

僕がこう言うのもなんですが、

自分らしく生きるために高校や大学の勉強がいらないと思うなら、それでいいと思います。

→ それを判断するのはとても難しいこと。。

そのためには、

- 自分で「**考える力**」が大事
- 勉強は考える力の基礎であり、練習の場
- 自分で本を読む、人に訊く、人と話をする、失敗する、楽しいと感じる、、、すべてが“**勉強**”

そのためには、

- 自分で「**考える力**」が大事
- 勉強は考える力の基礎であり、練習の場
- 自分で本を読む、人に訊く、人と話をする、失敗する、楽しいと感じる、、、すべてが“**勉強**”

→ “**勉強**” が自分の未来につながる

考えるって、結構楽しいことです。

見えなかった景色が見える、そんな感じ。

(ただ、見えてよかったと思うことと、見えてへこむことがあります。。)

以下、少し具体例を紹介します

例1). 基礎科学

人の役に立たない、と言われがちな基礎科学。

- 確かに素粒子とか宇宙とかがすぐに人の生活を豊かにするわけではない。
- 当然お金儲けにもならない。
- でも長期的に見ると実は役に立っている部分もある。
(素粒子の理論が別の分野の発展に応用されるなど)
- でもそれをわかってもらえることが多くない。。

事実、最近強調されるのは短期的な結果や成果。。

- すぐに社会の役に立つ研究が重視されている
- でもそもそも、“社会の役に立つ”ってどういうこと？売れる商品を作ること？生活を便利にすること？
- でもそれで人の心は豊かになるんだらうか？（物も情報も溢れて、自分の意思が消えそうになりませんか？）

原因は恐らく、情報の多さ

- 入ってくる情報量が多いので、立ち止まって考える余裕がない
- すると誰かが言ったそれっぽいことをそのまま受け入れるようになる（その方が効率がいいので）
- すると無意識に、テレビやネットにコントロールされてしまう

原因は恐らく、情報の多さ

- 入ってくる情報量が多いので、立ち止まって考える余裕がない
- すると誰かが言ったそれっぽいことをそのまま受け入れるようになる（その方が効率がいいので）
- すると無意識に、テレビやネットにコントロールされてしまう

→ 基礎科学が持つ、**突き詰めて考える姿勢**が
広い意味で一人一人の役に立つのではないかと
思うわけです。

提案、というほどのものでもないですが、

- 入ってくる情報量を意識して減らす
- スマホアプリで遊ぶくらいなら、外見でぼーっとする
- 数字に頼りすぎない (数字だけで人やものを評価しない)

5. 最後に

みなさんへのメッセージ

- “勉強”しながら考えることの楽しさを
- まわりの意見も聞きながら、しかし流されず
- 一度きりの人生を自分らしく

あくまで今の僕の意見です。

何か少しでも参考になったら幸いです。

何かあれば、いろいろ質問してみてください。

余談