ニュートリノ物理

(最先端研究IV)





宇宙・素粒子スプリングスクール 2016年3月10日

2015年ノーベル物理学賞



The Nobel Prize in Physics 2015 was awarded jointly to Takaaki Kajita and Arthur B. McDonald <u>"for the discovery of neutrino oscillations, which shows that neutrinos have mass"</u> ニュートリノに質量があることを示す ニュートリノ振動の発見に対して

http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2015/

ニュートリノとは? ニュートリノ振動? 質量を持つことがそんなに重要?

ニュートリノ振動の発見 (1998年)

VOLUME 81, NUMBER 8

PHYSICAL REVIEW LETTERS

24 August 1998

Evidence for Oscillation of Atmospheric Neutrinos

Y. Fukuda,¹ T. Hayakawa,¹ E. Ichihara,¹ K. Inoue,¹ K. Ishihara,¹ H. Ishino,¹ Y. Itow,¹ T. Kajita,¹ J. Kameda,¹ S. Kasuga,¹ K. Kobayashi,¹ Y. Kobayashi,¹ Y. Koshio,¹ M. Miura,¹ M. Nakahata,¹ S. Nakayama,¹ A. Okada,¹ K. Okumura,¹ N. Sakurai,¹ M. Shiozawa,¹ Y. Suzuki,¹ Y. Takeuchi,¹ Y. Totsuka,¹ S. Yamada,¹ M. Earl,² A. Habig,² E. Kearns,² M. D. Messier,² K. Scholberg,² J. L. Stone,² L. R. Sulak,² C. W. Walter,² M. Goldhaber,³ T. Barszczxak,⁴ D. Casper,⁴ W. Gajewski,⁴ P. G. Halverson,^{4,*} J. Hsu,⁴ W. R. Kropp,⁴ L. R. Price,⁴ F. Reines,⁴ M. Smy,⁴ H. W. Sobel,⁴ M.R. Vagins,⁴ K.S. Ganezer,⁵ W.E. Keig,⁵ R.W. Ellsworth,⁶ S. Tasaka,⁷ J.W. Flanagan,^{8,†} A. Kibayashi,⁸ J.G. Learned,⁸ S. Matsuno,⁸ V.J. Stenger,⁸ D. Takemori,⁸ T. Ishii,⁹ J. Kanzaki,⁹ T. Kobayashi,⁹ S. Mine,⁹ K. Nakamura,⁹ K. Nishikawa,⁹ Y. Oyama,⁹ A. Sakai,⁹ M. Sakuda,⁹ O. Sasaki,⁹ S. Echigo,¹⁰ M. Kohama,¹⁰ A.T. Suzuki,¹⁰ T.J. Haines,^{11,4} E. Blaufuss,¹² B.K. Kim,¹² R. Sanford,¹² R. Svoboda,¹² M.L. Chen,¹³ Z. Conner,^{13,‡} J. A. Goodman,¹³ G. W. Sullivan,¹³ J. Hill,¹⁴ C. K. Jung,¹⁴ K. Martens,¹⁴ C. Mauger,¹⁴ C. McGrew,¹⁴ E. Sharkey,¹⁴ B. Viren,¹⁴ C. Yanagisawa,¹⁴ W. Doki,¹⁵ K. Miyano,¹⁵ H. Okazawa,¹⁵ C. Saji,¹⁵ M. Takahata,¹⁵ Y. Nagashima,¹⁶ M. Takita,¹⁶ T. Yamaguchi,¹⁶ M. Yoshida,¹⁶ S. B. Kim,¹⁷ M. Etoh,¹⁸ K. Fujita,¹⁸ A. Hasegawa,¹⁸ T. Hasegawa,¹⁸ S. Hatakeyama,¹⁸ T. Iwamoto,¹⁸ M. Koga,¹⁸ T. Maruyama,¹⁸ H. Ogawa,¹⁸ J. Shirai,¹⁸ A. Suzuki,¹⁸ F. Tsushima,¹⁸ M. Koshiba,¹⁹ M. Nemoto,²⁰ K. Nishijima,²⁰ T. Futagami,²¹ Y. Hayato,^{21,§} Y. Kanaya,²¹ K. Kaneyuki,²¹ Y. Watanabe,²¹ D. Kielczewska,^{22,4} R. A. Doyle,²³ J. S. George,²³ A. L. Stachyra,²³ L. L. Wai,^{23,||} R.J. Wilkes,²³ and K.K. Young²³ (Super-Kamiokande Collaboration)

引用数:3105

ニュートリノ振動の発見 (1998年)

Abstract (概要)

We present an analysis of <u>atmospheric neutrino</u> data from a 33.0 kton yr (535-day) exposure of the <u>Super-Kamiokande detector</u>. The data exhibit a zenith angle dependent deficit of muon neutrinos which is inconsistent with expectations based on calculations of the atmospheric neutrino flux. Experimental biases and uncertainties in the prediction of neutrino fluxes and cross sections are unable to explain our observation. The data are consistent, however, with two-flavor $\nu_{\mu} \leftrightarrow \nu_{\tau}$ oscillations with $\sin^2 2\theta > 0.82$ and $5 \times 10^{-4} < \Delta m^2 < 6 \times 10^{-3}$ eV² at 90% confidence level. [S0031-9007(98)06975-0]

大気ニュートリノ? スーパーカミオカンデ? ミューオンニュートリノの不足?



- 素粒子ニュートリノ
- ニュートリノの検出
- 大気ニュートリノ
- ・太陽ニュートリノ
- 加速器ニュートリノ(T2K実験)
- 将来計画

2016年3月10日

素粒子ニュートリノ

謎に満ちた素粒子

ニュートリノ仮説 (1930年)

原子核内の中性子が電子を放出し陽子に 壊変する現象として発見された



ベータ崩壊

ニュートリノ仮説 (1930年)

原子核内の中性子が電子を放出し陽子に 壊変する現象として発見された



2016年3月10日

ベータ崩壊

ニュートリノ仮説 (19と=ュートリノ

原子核内の中性子が電子を放出し陽子に 壊変する現象として発見された



(注) *B* + 崩壊は原子核内で起こる

2016年3月10日

ベータ崩壊

ニュートリノ仮説 (1930年)



(1930年のパウリの書簡) 4 *** **** Absohr1ft/15.12.5

Offener Brief an die Gruppe der Radioaktiven bei der Geuvereins-Tagung zu Tibingen.

Absohrift

Physikelisches Institut der Eidg. Technischen Hochschule Zürich

Zirich, 4. Des. 1930 Dioriastrasse

Liebe Radioaktive Damen und Herren,

Wie der Veberbringer dieser Zeilen, den ich huldvollst ansuhören bitte, Ihnen des näheren auseinendersetsen wird, bin ich angesichts der "falschen" Statistik der N- und Li-6 Kerne, sowie des kontinuierlichen beta-Spektrums suf einen versweifelten Ausweg verfallen um den "Wecheelsata" (1) der Statistik und den Energiesata su retten. Mamilich die Möglichkeit, es könnten elektrisch neutrals Tellohen, die ich Neutronen nennen will, in den Lernen existieren, veloke den Spin 1/2 heben und das Ausschliessungsprinzip befolgen und ale von Lichtquanten unseerden noch dadurch unterscheiden, dass sie might wit Lichtgeschwindigkeit laufen. Die Masse der Neutronen fante von derselben Grossenordnung wie die Elektronenwasse sein und jedenfalls might grosser als 0.01 Protonenasses - Das kontinuierliche bein. Spektrum wäre dann varständlich unter der Annahme, dass beim beta-Zerfall mit dem blektron jeweils noch ein Meutron emittiert wird, derart, dass die Summe der Energien von Mentron und klektron konstant ist.

2016年3月10日

ニュートリノ仮説 (1930年)

(1930年のパウリの書簡)

親愛なる放射性紳士・淑女諸君

私はエネルギー保存則問題について窮余の一策にたどり着きました。すな わち、ニュートリノと呼ばれる電気的に中性な粒子の存在の可能性です。

ベータ崩壊の時に、もしこのニュートリノが電子と一緒に発生してエネル ギーの一部を持ち逃げしているのだとすれば、電子のエネルギーがまちまち なのは納得できます。

この仮説が正しいかどうか自信はありませんが、唯一の解決法と思います。 私はチューリッヒの舞踏会に出ないといけないのでテュービンゲンの会議に は行けませんが、どなたかこれを確かめてください。

パウリ

ニュートリノの発見 (1956年)



ニュートリノの発見 (1956年)

Reines and Cowan

ライネス





Frederick REINES and Cycle COWAN Box 1663, LOS ALAMOS, New Merico Thanks for menage. Everything comes to him who knows how to vait.



Paul: メッセージをありがとう。全てのことは 待つ方法を知っている者にやってくる。 パウリ We. 15.6.18 / 15.35R als night letter

Figure 8. The night letter Pauli sent in response to our message shown in Fig. 7.

ニュートリノ研究の歴史

- 1898年 ラザフォード
- 1930年 パウリ
- 1934年 フェルミ
- 1956年 ライネス/コーワン
- 1961年 レーダーマン他
- 1967年 ワインバーグとサラム
- 1970年 デービス
- 1987年 カミオカンデ実験
- 1988年 カミオカンデ実験
- 1990年 LEP実験
- 1998年 スーパーカミオカンデ実験 名古屋大グループ
- 2001年 SK実験 / SNO実験
- 2004年 カムランド実験
- 2007年 カムランド実験
- 2012年 T2K実験他

- ベータ崩壊の発見
- ニュートリノ仮説
- ベータ崩壊の理論
- 電子ニュートリノの発見
- ミューニュートリノの発見
- 素粒子標準模型の確立(ニュートリノ質量ゼロ)
- 太陽ニュートリノの観測
- 超新星ニュートリノの観測(小柴先生ノーベル賞)
- 太陽ニュートリノの観測
- ニュートリノは3種類
- 1998年 スーパーカミオカンデ実験 ニュートリノ振動の発見(梶田先生ノーベル賞)
 - タウニュートリノの実験検証
 - 太陽ニュートリノ問題解決 (McDonald先生ノーベル賞)
 - ニュートリノ振動の検証
 - 地球ニュートリノの発見
 - ニュートリノ振動の検証

ニュートリノ研究の歴史

宇宙・素粒子スプリングスクール2016

- 1898年 ラザフォード
- 1930年 パウリ
- 1934年 フェルミ
- 1956年 ライネス/コーワン
- 1961年 レーダーマン他
- 1967年 ワインバーグとサラム
- 1970年 デービス
- 1987年 カミオカンデ実験
- 1988年 カミオカンデ実験
- 1990年 LEP実験
- 1998年 スーパ
- 名古屋 2001年 SK実験 / SNO実験
- 2004年 カムランド実験
- 2007年 カムランド実験
- 2012年 T2K実験他

20XX年 XX実験 2016年3月10日

ベータ崩壊の発見 ニュートリノ仮説 ベータ崩壊の理論 電子ニュートリノの発見 ミューニュートリノの発見 素粒子標準模型の確立(ニュート 質量ゼロ) 太陽ニュートリノの卸 招新星 √柴先生ノーベル賞) の観測 n 5 Fリノは3種類 ニュートリノ振動の発見(梶田先生ノーベル賞) タウニュートリノの実験検証 太陽ニュートリノ問題解決 (McDonald先生ノーベル賞) ニュートリノ振動の検証 地球ニュートリノの発見 ニュートリノ振動の検証 XXの発見?(君たちの誰かがノーベル賞?)

15

素粒子とは

物質をどんどん分解していくと...



宇宙・素粒子スプリングスクール2016

2016年3月10日



物質を構成する素粒子



(それぞれの反粒子)

2016年3月10日





ニュートリノの質量は、標準模型を超えた 素粒子物理学における究極の理論構築への 突破口に成り得る

ニュートリノの検出

極端に難しいミッション

素粒子ニュートリノ



- ・3種類(フレーバー)ある
- ・電荷を持たない \rightarrow ニュートリノ自身は信号 を出さない。反応後の特殊な 信号を検出する。 \rightarrow 反応後のフレーバーは保 存する。例えば $\nu_e \leftrightarrow e^-$

	電荷	第	第	第
		—	—	Ξ
		世	世	世
		代	代	代
レプ	0 (νe	νμ	ντ
トン	-1	е	μ	τ
ト ン ク オ	-1 2/3	e u	μ C	τ t

素粒子ニュートリノ



- ・3種類(フレーバー)ある
- ・電荷を持たない
- ・弱い相互作用のみで反応 →ほとんど反応しない。

<u>検出が非常に難しい</u>

	電荷	第	第	第
		—	—	Ξ
		世	世	世
		代	代	代
レプ	0 (${oldsymbol u}$ e	$oldsymbol{ u}$ $_{\mu}$	ντ
トン	-1	e	μ	τ
ト ン ク オ	-1 2/3	e u	μ C	τ t

ニュートリノの観測

原子炉や加速器のニュートリノは人工的に発生させるので いつ発生させたかがわかる



天然のニュートリノ(大気中や太陽内部、地球内部 や超新星爆発などで発生)は、いつ来るかわからず 他の雑音事象との区別が非常に難しい

ニュートリノの観測



岐阜県飛騨市神岡町



神岡地下施設 (地下1000m)



2016年3月...

25

なぜ神岡に?

- ニュートリノ反応は極まれな現象
 - 大量の標的物質が必要
 - 環境ノイズを低減する必要
- 宇宙線(ミューオン)を遮蔽するための厚い土かぶり
- 地下大空洞を掘るための強固な岩盤
- 空洞掘削の技術
- きれいな地下水が豊富

神岡での研究の歴史

- 1983年カミオカンデ運転開始
 - 我が国におけるニュートリノ研究の出発点
- 1996年スーパーカミオカンデ運転開始
 - ニュートリノ研究で世界をリードする
- ・カミオカンデ(Kamiokande)の由来

Nucleon Decay Experiment (核子崩壊実験) Neutrino Detection Experiment (ニュートリノ検出実験)

カミオカンデ (1983-1995)





2002年、小柴先生 ノーベル賞受賞

3000トン水タンク、約1000本の光電子増倍管

超新星爆発 1987a

超新星爆発(星の一生の最後に起こす大爆発)からの ニュートリノを世界で初めて観測



201

スーパーカミオカンデ



2016年3月10日

スーパーカミオカンデ



大気ニュートリノ

大気ニュートリノ



大気ニュートリノ観測



ニュートリノ反応 $\nu_{\mu} + N \rightarrow (\mu^{-}) + N'$ $\overline{\nu}_{\mu}$ + N \rightarrow (μ^+) + N' $\nu_{e} + N \rightarrow e^{-} + N'$ $\overline{\nu}_{e}$ + N \rightarrow (e⁺)+ N'

✓発生粒子の種類から元々のニュー
 トリノのフレーバーがわかる
 ✓発生粒子の方向は、元々のニュー
 トリノの方向を保存する



大気ニュートリノの異常



下から来る上向きのミューオンニュートリノが 明らかに少ない

太陽ニュートリノ もう一つのニュートリノ振動

太陽エネルギーの源は何か?

19世紀後半

- ・太陽黒点の観測、太陽輝線の発見…
- 太陽のエネルギー源??



'Energy production in Stars'

- •20世紀初頭より続々と発見された原子核反応
- 桁違いのエネルギーを発生 (E=mc²)
- 太陽や恒星のエネルギー生成に決定的な
 原子核核融合反応



- n + 14.1 MeV
- 弱い相互作用によるので(ほとんど反応しない)
 燃え尽きるまでに長い時間がかかる
- Hans Bethe博士が1938年に発表



1967年ノーベル賞受賞

太陽内部での核融合反応



2016年3月10日

太陽ニュートリノ観測 (1970~90)



予測値より観測値が半分から三分の1?? 大陽ニュートリノ問題

スーパーカミオカンデ



ニュートリノ反応 $\nu + e^{-} \rightarrow \nu + e^{-}$ ニュートリノの到来方向がわかる

ニュートリノならば 地下にいながらにして太陽が「見える」

スーパーカミオカンデ

ニュートリノ 39.3 m

ニュートリノ反応 $\nu + e^{-} \rightarrow \nu + e^{-}$ 反応確率がニュートリノの種類 によって異なる $\nu_e: \nu_{\mu/\tau} \sim 6:1$

観測値は予測値の40%程度

SNO実験 (カナダ)



重水を使うことによって

νeのみに感度がある反応 $\nu_e + d \rightarrow (e^-) + p + p$

全てのニュートリノに同じ 確率で感度がある反応 $\nu + d \rightarrow \nu + p + n$

を区別して測定ができる

SNO実験 (カナダ)



重水を使うことによって

ν e のみに感度がある反応 ν e + d → e⁻+ p + p

観測値は予測値の35%程度

全てのニュートリノに同じ

確率で感度がある反応 $\nu + d \rightarrow \nu + p + n$

観測値は予測値と一致

スーパーカミオカンデとSNO



νeとして発生した太陽ニュートリノが、ニュートリノ振動により 地球に到達する間に別種のニュートリノに変わった

T2K実験

新たに発見されたニュートリノの性質

ニュートリノ振動













将来計画

今後の研究は?

超新星背景ニュートリノ探索

過去の超新星爆発により発生したニュートリノ



2016年3月10日

超新星背景ニュートリノ探索

過去の超新星爆発により発生したニュートリノ



2016年3月10日

超新星背景ニュートリノ探索

Super-K Gd 計画



SKにガドリニウムを溶かし、世界初の 超新星背景ニュートリノの発見を目指す

J.Beacom and M.Vagins, Phys.Rev.Lett.93(2004)171101



EGADS検出器











EGADS検出器







15 ton buffer tank Control panel of circulation system

2016年3月10日



ハイパーカミオカンデ計画



✓ 百万トンの水チェレンコフ検出器:SKの25倍✓ 光電子増倍管、約10万本(SKの10倍)

ニュートリノ振動



ハイパーカミオカンデ計画



2016年3月10日

ハイパーカミオカンデ計画

ニュートリノと反ニュートリノに違いが見えるのか?



2016年3月10日

宇宙における物質・反物質の謎

ニュートリノと反ニュートリノに違いが見えるのか?

- 宇宙誕生の時には物質と反物質は同数あったはずだが、現在は物質優位の宇宙。何故なのか?
- ニュートリノと反ニュートリノに違い
 があるからではないか?

ハイパーカミオカンデ実験で確かめたい

ニュートリノ研究

√ 素粒子・宇宙分野に関連する 様々なテーマがあり、今現在、 とてもホットでおもしろい。 √ 世界中で激しい競争を展開。 ✓ 日本が最先端を走っている。

ニュートリノ研究

√ 素粒子・宇宙分野に関連する 様々なテーマがあり、今現在、 とてもホットでおもしろい。 ✓ 世界中で激しい競争を展開。 ✓ 日本が最先端を走っている。 (岡山大でもやってます)



ニュートリノ振動





電子1個の粒が重なると、干渉縞(波の性質)が見える

「質量」の状態や「フレーバー」の状態も このような波動関数で表される

2016年3月10日

ニュートリノ振動

- ニュートリノに質量がない場合
 - ▶ ニュートリノの状態は「フレーバー」だけ。 最初の「フレーバー」はそのまま保持 「フレーバー」「質量」
- ニュートリノに質量がある場合
 - 「フレーバー」の状態と「質量」の状態が
 1対1の対応をする場合
 - ▶ 最初の「フレーバー」はそのまま保持
 - •「フレーバー」の状態がいくつかの「質量」 状態の重ね合わせの場合は?



 v_{μ}

2016年3月10日

ニュートリノ振動



2016年3月10日

大気ニュートリノ観測結果から

- 大気ニュートリノは、どの方向からもミューオンニュートリノと電子ニュートリノの比は 2:1 になるはず。
- しかし地球の裏側から13,000km飛んでくるミューオンニュー
 トリノだけが半分に減っていた。
- 飛んでくる間にニュートリノ振動により、ミューオンニュート リノが別のニュートリノ(タウニュートリノ)に変わった。
- ニュートリノ振動は、ニュートリノに質量(正確には2つの フレーバーの間に質量の差)がないと起こらない。



ニュートリノ質量の発見



2016年3月10日