

はじめに

奈良女子大学理学部 理学部長 林井久樹

本冊子は、「これで分かる！ノーベル賞受賞の理由」と題して、2015年11月30日(月)に本学文学部の大教室で開催した講演会で使用された資料をブックレットの形式にまとめたものです。本講演会は、今年度日本人が受賞したノーベル賞の受賞理由をその分野の専門家が高校生や大学生、一般の方にかみ砕いて説明することを目的とし、理学部と理系女性教育開発共同機構で協力して開催しました。

喜ばしいことに、近年、日本人のノーベル賞の受賞ラッシュが続いています。2015年には、「熱帯感染症の特効薬開発」で大村智・北里大特別荣誉教授がノーベル生理学・医学賞を、「ニュートリノ振動の発見」で梶田隆章・東京大学宇宙線研究所長がノーベル物理学賞を、それぞれ受賞されました。本講演会では、研究院自然科学系生物学領域の吉川尚男が「大村先生のイベルメクチンの発見と寄生虫病の制圧」というテーマで生理学・医学賞の解説をしました。講演会では、イベルメクチンで治療できる寄生虫病等に関する非常に多くの貴重な写真や資料が紹介されました。物理学賞については、「梶田先生と、ニュートリノ振動とニュートリノ質量の発見」という題目で実験の話が私が、その後、研究院自然科学系物理学領域の高橋智彦が、「ニュートリノ質量から宇宙の成り立ちへ」という題目で、ニュートリノの質量が宇宙や素粒子の未知の問題とどのような関連がある可能性があるかという話をしました。

ここ100年の科学の進歩は目覚ましいものがあります。多くの自然の神秘が解き明かされ、極微の世界の様子も非常によく分かるようになりました。そのおかげで、昔は夢物語であったものが現在では当たり前になっていることが沢山あります。我々はそのようなものに日々囲まれて暮らしています。しかしながら、科学が進んだ結果、逆に最先端の知識がどんどん日常生活から離れていき、ブラックボックス化してしまったという側面も見逃すわけにはいきません。これが科学は理解できない難しいものであるという先入観を生み、ひいてはそれが理科嫌い、理科ばなれにつながっているとすれば、科学を専門とする研究者はもっと最先端の知識を幅広い層に伝える努力をしなければならない。これが本講演会を企画した動機です。科学を専門に学んだことはないが、科学の話には興味がある高校生や大学生が、ノーベル賞の背景や中身を理解し、これをきっかけにして最先端の科学を少しでも身近に感じてもらうことにつながれば幸いです。

最後に、本講演会を最初に提案され、その準備を主導的に進めていただいていたにもかかわらず、突然のご病気でお亡くなりになった故寺尾治彦教授(大学院自然科学系物理学領域)にこの場を借りて謹んで哀悼の意を表させていただきます。

目次

- 大村先生のイベルメクチンの発見と寄生虫病の制圧 ……………1
吉川尚男
(研究院自然科学系生物学領域)
- 梶田先生と、ニュートリノ振動とニュートリノ質量の発見 ………10
林井久樹
(理学部長・研究院自然科学系物理学領域)
- ニュートリノ質量から宇宙の成り立ちへ ……………24
高橋智彦
(研究院自然科学系物理学領域)

大村先生のイベルメクチンの発見と寄生虫病の制圧

吉川尚男(研究院自然科学系生物学領域)

講演会では、イベルメクチンで治療できる寄生虫病等に関する多くの貴重な写真や資料が紹介された。

しかし、著作権等の関係で、このブックレットには掲載できなかった。

About the Nobel Prize in
Physiology or Medicine 2015

[Summary](#)

[Prize Announcement](#)

[Press Release](#)

[Advanced Information](#)

[Greetings](#)

[William C. Campbell](#)

[Satoshi Ōmura](#)

[Youyou Tu](#)

[The Nobel Prizes in Physiology or
Medicine](#)

[The Nobel Prizes in 2015](#)

The Nobel Prize in Physiology or Medicine 2015



Ill. N. Elmehed. © Nobel
Media AB 2015.

William C. Campbell

Prize share: 1/4



Ill. N. Elmehed. © Nobel
Media AB 2015.

Satoshi Ōmura

Prize share: 1/4



Ill. N. Elmehed. © Nobel
Media AB 2015.

Youyou Tu

Prize share: 1/2

The Nobel Prize in Physiology or Medicine 2015 was divided, one half jointly to William C. Campbell and Satoshi Ōmura *"for their discoveries concerning a novel therapy against infections caused by roundworm parasites"* and the other half to Youyou Tu *"for her discoveries concerning a novel therapy against Malaria"*.

Roundworm parasites

Roundworm = parasitic nematodes (寄生性線虫)

マツノザイセンチュウ (松枯れ)

ヒトでは: 回虫・蟯虫

動物では: イヌ回虫・ネコ回虫

ヒトへ感染は世界で数千例・日本では
約100例

イヌ糸状虫 (犬フィラリア症)

ヒトへの感染例は日本で約120例

メルク社との共同研究の条件

1. 研究費で探し当てた微生物が産生する有用な化合物が見つかった場合、その使用権は企業に渡す。
2. 企業がその化合物を実用化、あるいは販売した場合、特許料として売り上げに応じた額を北里研究所に支払う。

ANTIMICROBIAL AGENTS AND CHEMOTHERAPY, Mar. 1979, p. 361-367
0066-4804/79/03-0361/07\$02.00/0

Vol. 15, No. 3

Avermectins, New Family of Potent Anthelmintic Agents: Producing Organism and Fermentation

RICHARD W. BURG,^{1*} BRINTON M. MILLER,¹ EDWARD E. BAKER,¹ JEROME BIRNBAUM,¹ SARA A. CURRIE,¹ ROBERT HARTMAN,¹ YU-LIN KONG,¹ RICHARD L. MONAGHAN,¹ GEORGE OLSON,¹ IRVING PUTTER,¹ JOSEFINO B. TUNAC,[†] HYMAN WALLICK,¹ EDWARD O. STAPLEY,¹ RUIKO OIWA,² AND SATOSHI OMURA²

Merck Sharp & Dohme Research Laboratories, Rahway, New Jersey 07065,¹ and The Kitasato Institute and Kitasato University, Shirokane, Minato-ku, Tokyo 108, Japan²

Received for publication 15 November 1978

The avermectins are a complex of chemically related agents which exhibit extraordinarily potent anthelmintic activity. They are produced by a novel species of actinomycete, NRRL 8165, which we have named *Streptomyces avermitilis*. The morphological and cultural characteristics which differentiate the producing organism from other species are described. The avermectins have been identified as a series of macrocyclic lactone derivatives which, in contrast to the macrolide or polyene antibiotics, lack significant antibacterial or antifungal activity. The avermectin complex is fully active against the gastrointestinal nematode *Nematostrioides dubius* when fed to infected mice for 6 days at 0.0002% of the diet. Fermentation development, including medium modification and strain selection, resulted in increasing the broth yields from 9 to 500 µg/ml.

ストレプトミセス族放線菌が産生するさまざまな抗生物質

ストレプトマイシン生産菌 (*S. griseus*)

抗生物質ストレプトマイシンの生産菌。タンパク質合成を阻害することによりバクテリアの成長や代謝を停止させる。1943年ラトガース大学のセルマン・ワクスマンの研究室の学生Albert Schatzにより発見された。

カナマイシン生産菌 (*S. kanamyceticus*)

梅沢浜夫らによって1957年にストレプトマイセス・カナマイセティカス(*Streptomyces kanamyceticus*) から発見されたカナマイシン (kanamycin) は、アミノグリコシド系抗生物質の一種。日本で最初に発見された抗生物質。

ダウノマイシン生産菌 (*S. peucetius*)

制がん剤として用いられるダウノマイシンを生産する放線菌で1963年発見された。

アクラシノマイシン生産菌 (*S. galilaeus*)

心毒性が低く、急性白血病、悪性リンパ腫、乳がん他に臨床的に使用されるアクラシノマイシンを生産する。

フェノキサゾン系抗腫瘍性抗生物質生産菌 (*S. parvulus*) (*S. antibioticus*)

抗菌作用が強い。

Streptomyces avermitilis

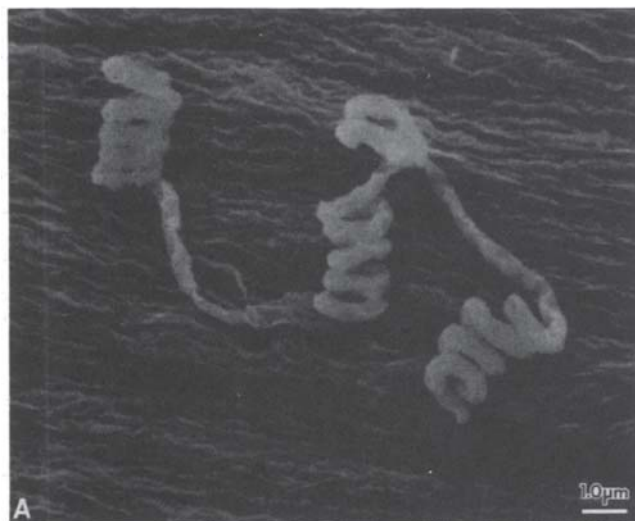
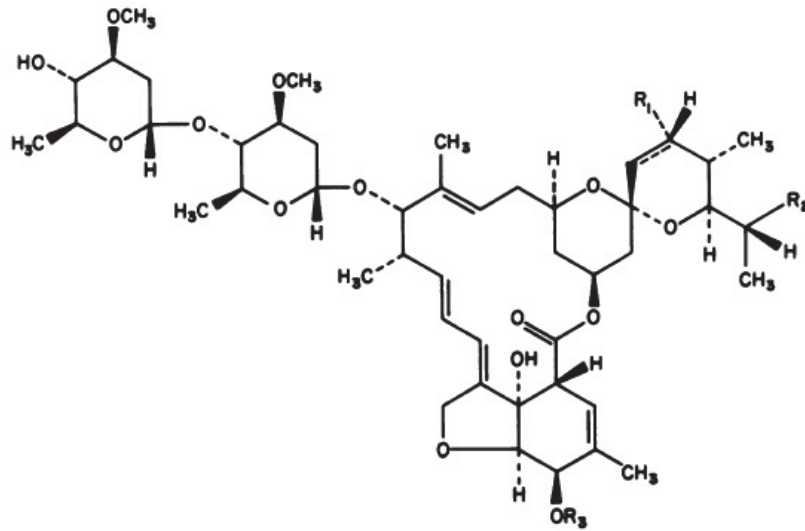


FIG. 3. (A) Scanning electron micrograph of *S. avermitilis* MA-4680 (NRRL 8165) showing sporophores forming compact to slightly open spirals; (B) transmission electron micrograph showing the smooth surface of spherical to oval spores.



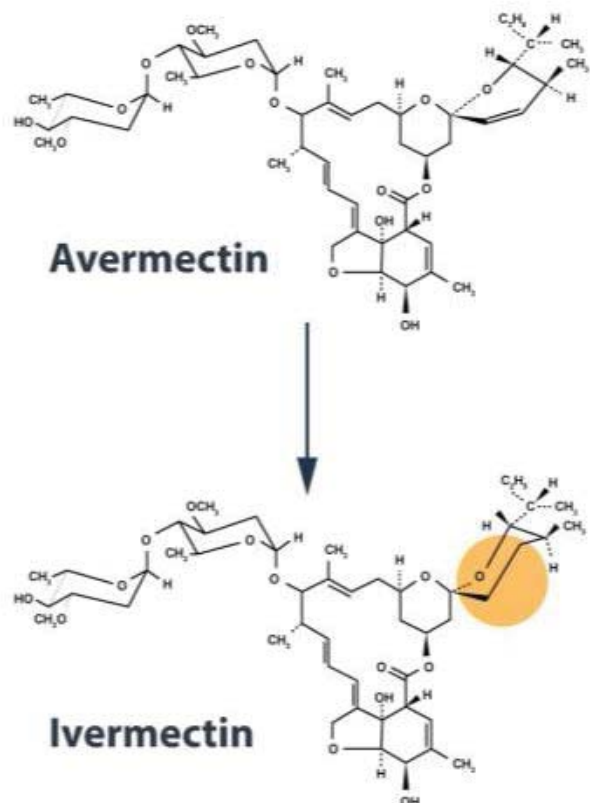
Avermectin	R ₁	R ₂	R ₃
A1e		C ₂ H ₅	CH ₃
A1b		CH ₃	CH ₃
A2e	OH	C ₂ H ₅	CH ₃
A2b	OH	CH ₃	CH ₃
B1e		C ₂ H ₅	H
B1b		CH ₃	H
B2e	OH	C ₂ H ₅	H
B2b	OH	CH ₃	H

Where R₁ is absent, the double bond (====) is present.
Both sugars are α-L-oleandrose.

FIG. 1. Structure of the avermectins.

1981年

メルク社は、動物薬として分子構造を少し変えた薬剤をイベルメクチン(Ivermectin)と名付けて、家畜用の薬剤として販売。



1983年

メルク社の動物薬として売り上げトップとなる。

1984年

ヒトへの薬剤として、副作用・安全性をクリアしたイベルメクチンを商品名：メクチザン (Mectizan®) として販売。



CONTACT US

Go

[About](#) [Diseases](#) [Achievements](#) [Partners](#) [Resources](#) [News](#) [Apply for Tablets](#)

**Mectizan and
albendazole for river
blindness and
lymphatic filariasis**



[Latest news](#)

[Latest resources](#)

[Partners](#)



ガーナにおけるイベルメクチンの無料配布によるオンコセルカ症の減少傾向

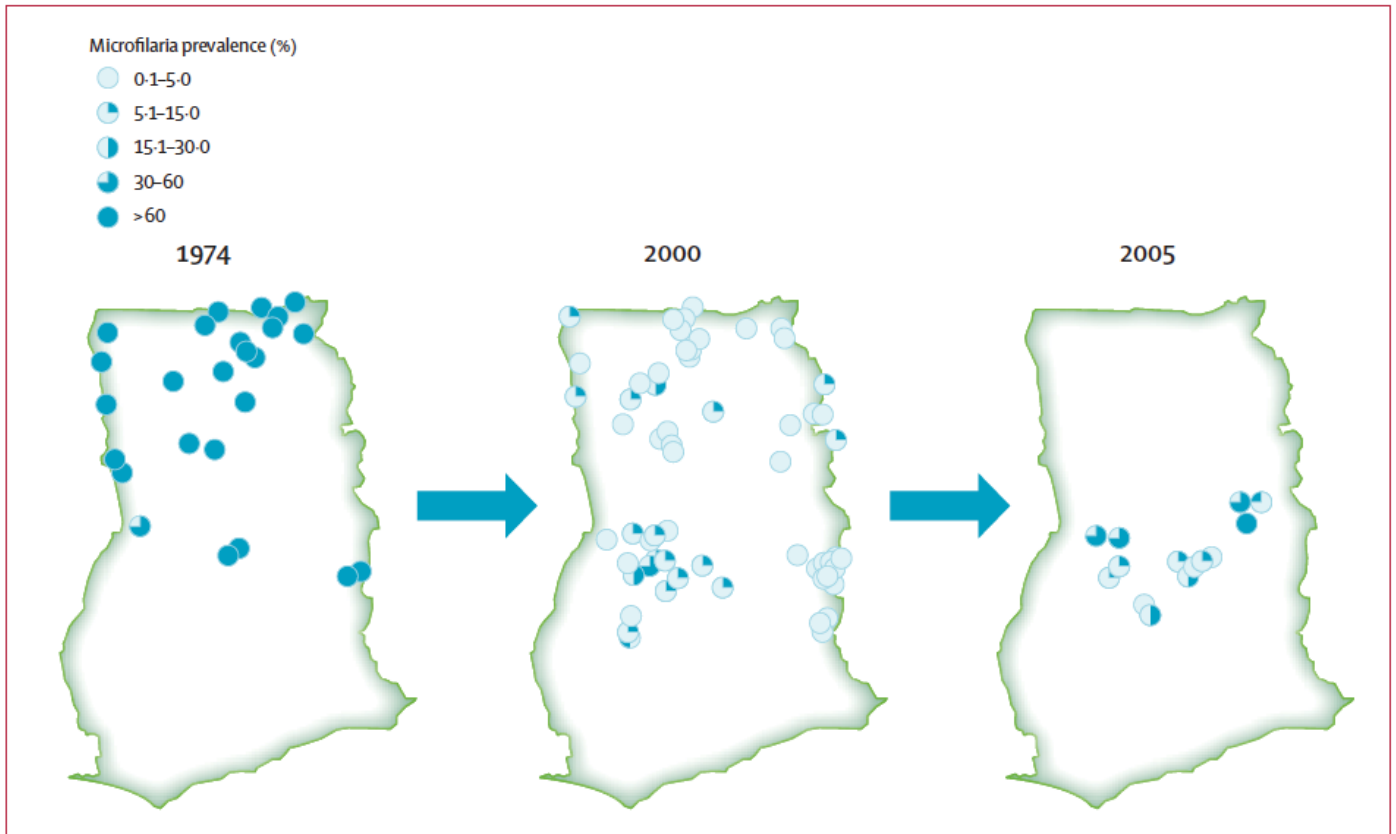


Figure: Microfilaria prevalence rates in some endemic communities over the past three decades of onchocerciasis control
 Microfilaria prevalence in 1974 and 2000 is adapted from reference 20. The circles for 2005 represent only the microfilaria prevalence rates found in the study areas.

International Journal of Antimicrobial Agents 31 (2008) 91–98

Review

Ivermectin: 25 years and still going strong[☆]

S. Ōmura

The Kitasato Institute, Tokyo, Japan

Received 20 August 2007; accepted 20 August 2007

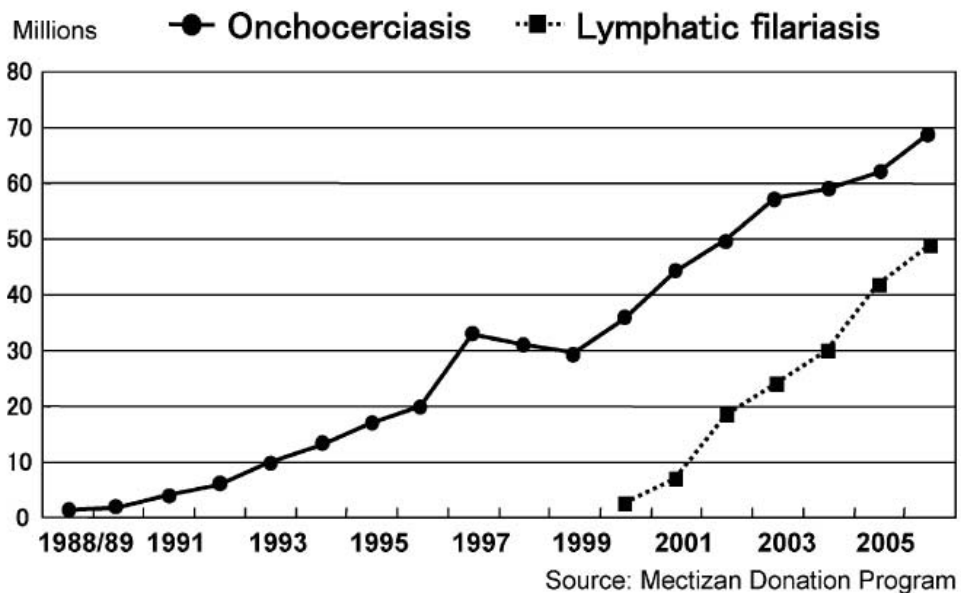
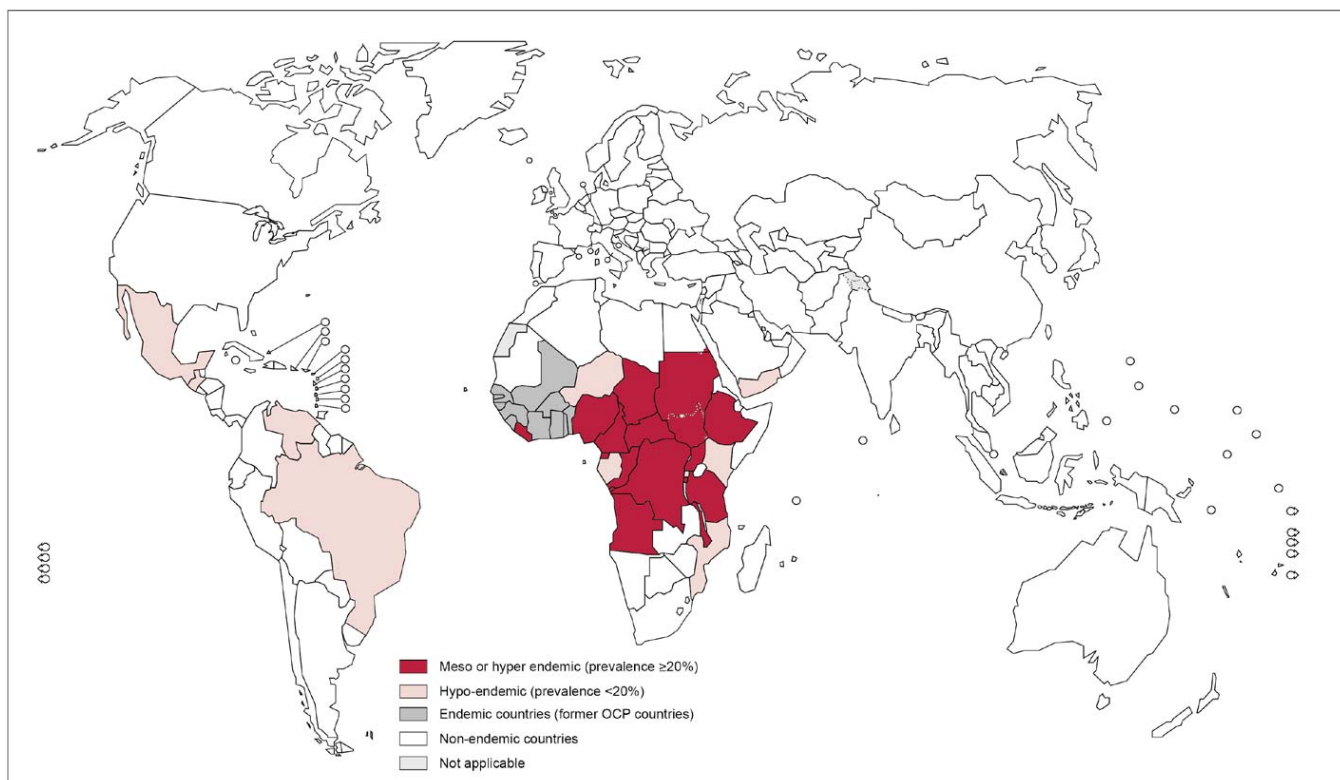


Fig. 5. Trends in ivermectin treatments approved (1988–2006).

Distribution of onchocerciasis, worldwide, 2013



The boundaries and names shown and the designations used on this map do not imply the expression of any opinion whatsoever on the part of the World Health Organization concerning the legal status of any country, territory, city or area or of its authorities, or concerning the delimitation of its frontiers or boundaries. Dotted lines on maps represent approximate border lines for which there may not yet be full agreement. © WHO 2013. All rights reserved

Data Source: World Health Organization
Map Production: Control of Neglected
Tropical Diseases (NTD)
World Health Organization



RESEARCH ARTICLE

Control, Elimination, and Eradication of River Blindness: Scenarios, Timelines, and Ivermectin Treatment Needs in Africa

Young Eun Kim^{1,2*}, Jan H. F. Remme³, Peter Steinmann^{1,2}, Wilma A. Stolk⁴, Jean-Baptiste Rongou⁵, Fabrizio Tediosi^{1,2}

1 Swiss Tropical and Public Health Institute, Basel, Switzerland, **2** University of Basel, Basel, Switzerland, **3** Consultant, Ornex, France, **4** Erasmus MC, University Medical Center Rotterdam, Rotterdam, The Netherlands, **5** African Programme for Onchocerciasis Control, Ouagadougou, Burkina Faso

* young.kim@unibas.ch



Abstract

River blindness (onchocerciasis) causes severe itching, skin lesions, and vision impairment including blindness. More than 99% of all current cases are found in sub-Saharan Africa. Fortunately, vector control and community-directed treatment with ivermectin have significantly reduced morbidity. Studies in Mali and Senegal proved the feasibility of elimination with ivermectin administration. The treatment goal is shifting from control to elimination in endemic African regions. Given limited resources, national and global policymakers need a

OPEN ACCESS

Citation: Kim YE, Remme JHF, Steinmann P, Stolk WA, Rongou J-B, Tediosi F (2015) Control,

Fig 2. Years when CDTi is expected to be stopped in endemic African regions.

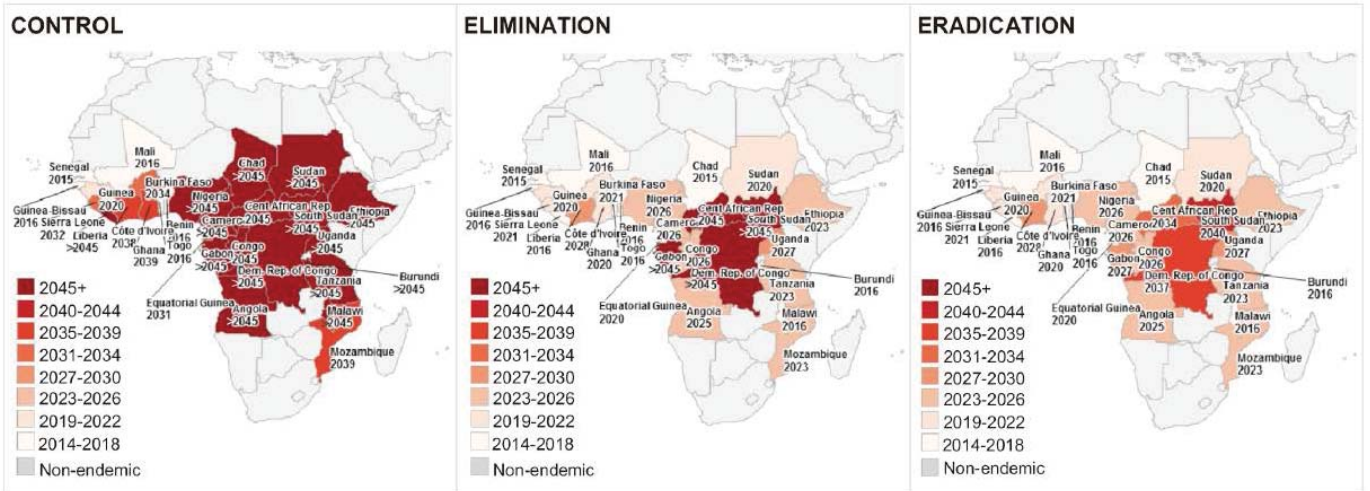


Fig 2. Years when CDTi is expected to be stopped in endemic African regions.

CDTi: community-directed treatment with ivermectin

Fig. 4. Cumulative number of ivermectin treatments and annual number of projects with ongoing CDTi in endemic African regions, 2013–2045.

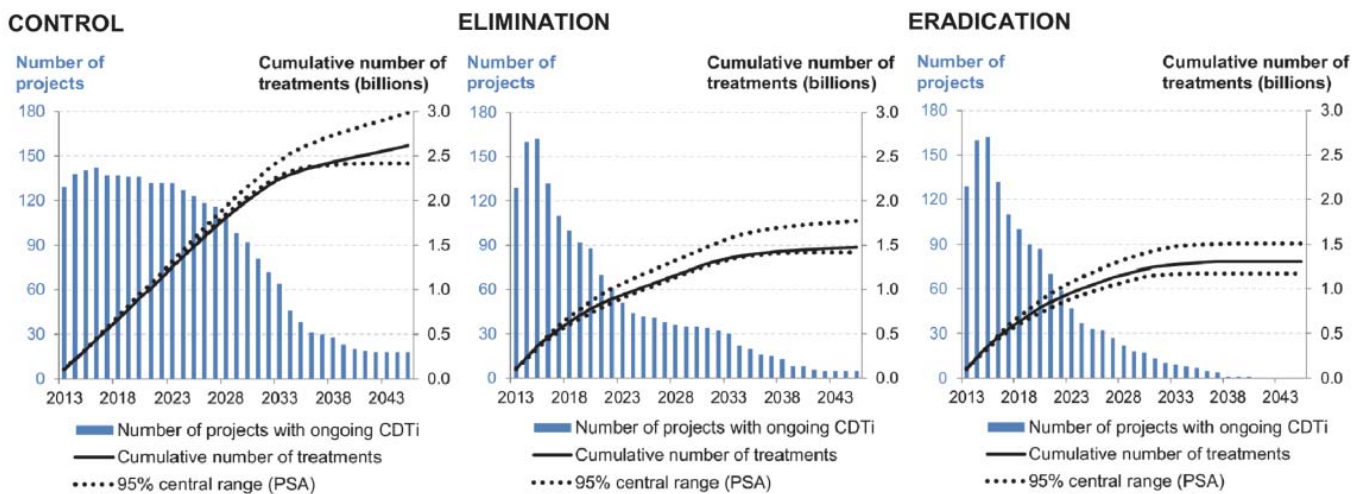


Fig 4. Cumulative number of ivermectin treatments and annual number of projects with ongoing CDTi in endemic African regions, 2013–2045.

梶田先生と、ニュートリノ振動と
ニュートリノ質量の発見

林井久樹(理学部長・研究院自然科学系物理学領域)

2015年 ノーベル物理学賞の解説(1)
梶田先生と、ニュートリノ振動とニュートリノ質量の発見

奈良女子大学
大学院自然科学系物理学領域
林井久樹

ノーベル物理学賞の解説(2)
「ニュートリノ質量と宇宙のなりたちへ」 (高橋智彦)

奈良女子大学理学部・理系女性教育開発共同機構 共催

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 “for the *discovery of neutrino oscillations*, which shows that neutrinos have mass “

「2015年のノーベル物理学賞は、**ニュートリノ振動の発見とその結果ニュートリノが質量を持つ**ということを示したことに
対して、**梶田隆章氏とアーサー マクドナル氏に授与する**」

ノーベル財団のHPより

ウェブ（NHK）での解説



梶田さんたちは、カミオカンデの後継機となる「スーパーカミオカンデ」を使って、宇宙から降り注ぐ放射線が、地球の大気にあたることで生み出されるニュートリノを詳しく観測しました。そして、ニュートリノに質量、つまり重さがあることを世界で初めて突き止め、1998年に開かれた国際学会で発表しました。

また、マクドナルドさんは、太陽から飛来するニュートリノを観測し、やはり質量があることを突き止めました。

これらの研究成果は、ニュートリノには質量が無いものとして、長い間、物理学者が組み上げてきた素粒子物理学の定説を根底から覆すもので、世界の研究者を驚かせました。

（ここにはニュートリノ振動という言葉なし）

3

2015年ノーベル物理学賞

2015/11/30

話の予定

- ニュートリノとは
- スーパーカミオカンデ実験と素粒子の測定法
- 宇宙線起源のニュートリノの不思議（梶田氏）
- 太陽から飛来するニュートリノの不思議（マクドナルド氏）
- ニュートリノ振動とニュートリノ質量
- なぜ、物理学者はニュートリノの質量がゼロだと思っていたのか。

4

2015年ノーベル物理学賞

2015/11/30

ニュートリノの導入

- 今から85年ほど前（1930年頃）。その頃に分かっていたこと。
 - アインシュタインの相対性理論 $E = mc^2$
質量(m)はエネルギー(E)に変換できる（cは光速）
 - 放射線には3つの種類がある。
（アルファ線、ベータ線、ガンマ線）
- 疑問：原子核のベータ崩壊で放出される電子のエネルギーが連続的分布している。

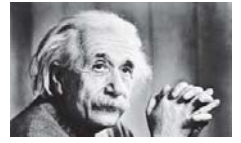
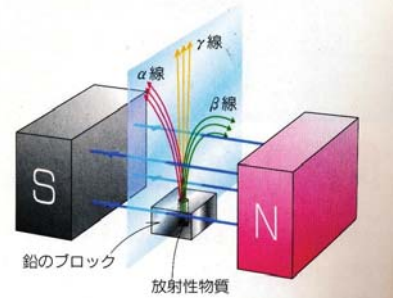


表1 α線・β線・γ線の比較

放射線	正体	電荷	透過力	電離能力
α線	He原子核 (α粒子)	+2e	小	大
β線	電子	-e	中	中
γ線	電磁波	0	大	小



崩壊が (原子核A) → (原子核B) + e⁻ (電子)

であれば、電子のエネルギーは一定のはず。

$$m_A c^2 = m_B c^2 + E_e \text{ (電子のエネルギー)}$$

→ ベータ崩壊ではエネルギーが保存していない! ?

5

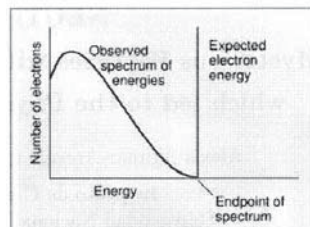
2015年ノーベル物理学賞

2015/11/30

ニュートリノの導入 (続)

- パウリの予想（1930年）；「ベータ崩壊では、もうひとつ検出できない粒子が放出されている。
(原子核A) → (原子核B) + e⁻ (電子) + (見えない粒子)

検出できない粒子を予言してしまった



- フェルミ（イタリアの原子核物理学者）がこの粒子を「ニュートリノ」（ν）と名づける。
（イタリア語で「電氣的に中性の小さな粒子」という意味）
- どれくらい反応しないか？



ニュートリノは反応するまでに地球を平均100個通過する。

6

2015年ノーベル物理学賞

2015/11/30

ニュートリノの発見



- しかし、**数打ちゃ当たる。**
- 地上で最大のニュートリノ源；原子力発電所
原子炉中で起こっていること；
 $^{235}\text{U} + n \rightarrow (\text{不安定原子核}) \rightarrow (\text{不安定原子核のベータ崩壊})$

- 米国の物理学者（ライネスとコーエン）は原子炉の近くに検出器を置き、原子炉から出てくるニュートリノのよって陽電子が発生する反応の観測に成功した。
(1956年)



(反ニュートリノ) (陽子) (陽電子) (中性子)
(原子炉から) (検出器) (観測される粒子)

- 注意：上付きのバーは反ニュートリノを意味する。
- 陽電子とは、電子の反粒子のこと。

7

2015年ノーベル物理学賞

2015/11/30

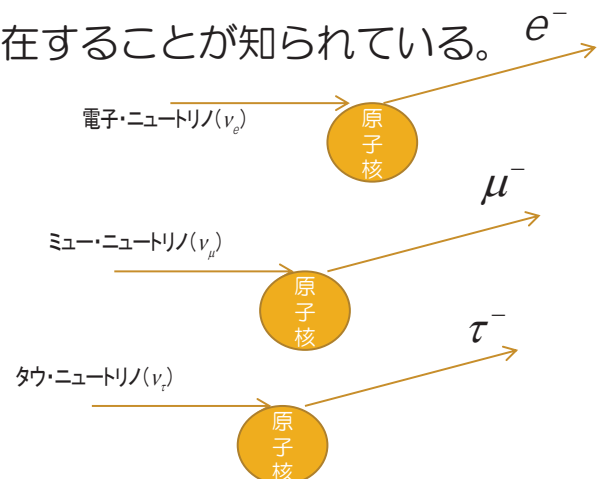
その後の発見

- その後、加速器を使った実験から、**異なる種類のニュートリノ**を確認。
陽子と陽子を衝突させて、 π （パイ）中間子と呼ばれる素粒子を生成。
この π 中間子は、ミュー粒子とニュートリノに崩壊。
 $\pi^- \rightarrow \mu^- + \nu$

このニュートリノ原子核と反応させるとミュー粒子を発生するが、電子を発生しない。
これは、ベータ崩壊で発生するニュートリノと π 中間子の崩壊で発生するニュートリノが違う種類であることを意味している。

現在では3つの種類のニュートリノが存在することが知られている。

- **電子・ニュートリノ** (1956年に発見)
原子核との反応で電子（または陽電子）を発生
- **ミュー・ニュートリノ** (1963年に発見)
原子核との反応でミュー粒子を発生
(ミュー粒子の質量は電子の質量の200倍)
- **タウ・ニュートリノ** (1995年に発見)
原子核との反応でタウ粒子を発生。
(タウ粒子の質量は電子の質量の3400倍)



8

2015年ノーベル物理学賞

2015/11/30

様々なニュートリノ源（加速器以外）

- 原子炉

不安定な原子核のベータ崩壊で（反）電子・ニュートリノが多量に発生

- 太陽起源

太陽の熱源（核融合反応： $4p \rightarrow {}^4\text{He} + 2e^+ + 2\nu_e$ ）

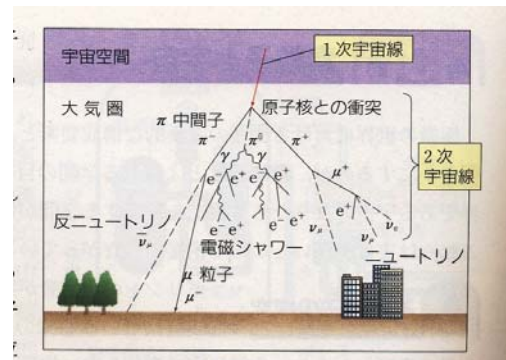
太陽内部では電子ニュートリノが大量に生成

- 宇宙線起源

$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$$

$$\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$$

電子・ニュートリノとミュー・ニュートリノ



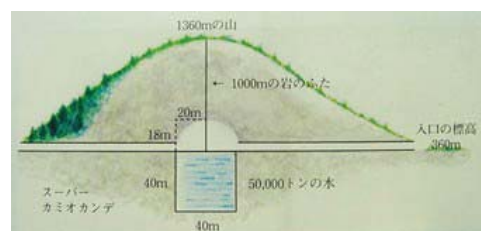
9

2015年ノーベル物理学賞

2015/11/30

（スーパー）カミオカンデ検出器

	カミオカンデ	スーパーカンデ
場所	神岡鉱山跡、地下1 km	神岡鉱山跡、地下1 km
検出器本体	純水（3千トン）	純水（5万トン）
水の体積	10m ³	37m ³
光検出器	大型光電子増倍管（50 cm 径）	大型光電子増倍管（50 cm 径）
光検出器の個数	1000本	11000本
運転期間	1982年－1990年	1990年－現在
総予算	約10億円	約90億円



10

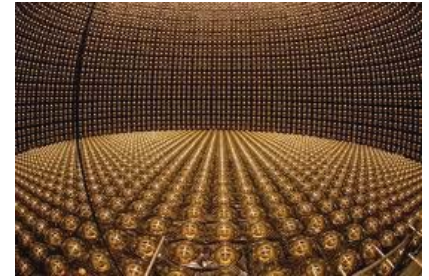
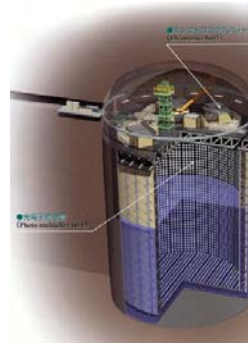
2015/11/30

光電子増倍管とは？

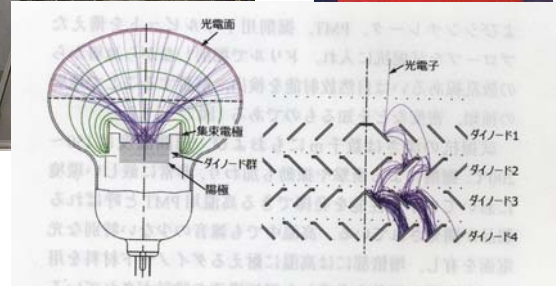
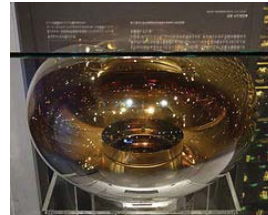
- 超高感度の光検出器のこと



図1 浜松ホトニクス製PMTラインナップ、中央が世界最大径のPMT R3000



- 最新のものは、**光を1個、2個と数える**ことができる。（人間の目；光が200個あれば検出可能）
- カミオカンデの実験のために初めて直径50cmの大型の光電子増倍管をハマツホトニクス社が開発
- 素粒子実験だけでなく、医療用等に多数利用されている。
- ハマツホトニクス社の世界シェア90%

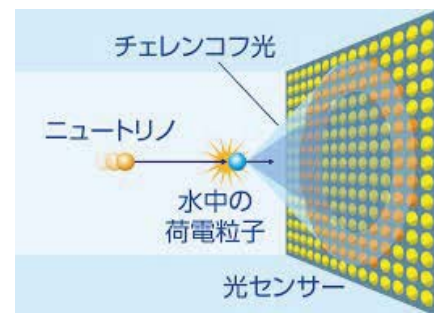


11

2015年ノーベル物理学賞

なぜ水で素粒子を検出できるのか？

- 水の屈折率 $n = 1.33$
- 水中での光の速さは真空中の光の速さの $1/n$
- 従って、水中では粒子は水中の光より速く走る事が可能
- 水中で粒子が光よりも早く走ると、その進行方向の対して、円錐状に光を発生する（これをチェレンコフ光と呼ぶ）
- 音速より速く飛ぶジェット機が出す衝撃波に類似。



12

2015年ノーベル物理学賞

2015/11/30

(スーパー) カミオカンデでのチェレンコフ光の測定

- 円錐状に出るチェレンコフ光を壁に設置された光電子増倍管で観測すると光を検出した光電子増倍管が楕円状の分布する。
- 楕円の大きさから荷電粒子の速さが分かる。
- また、輪郭のぼけ具合から荷電粒子が電子かミュー粒子かの区別できる。

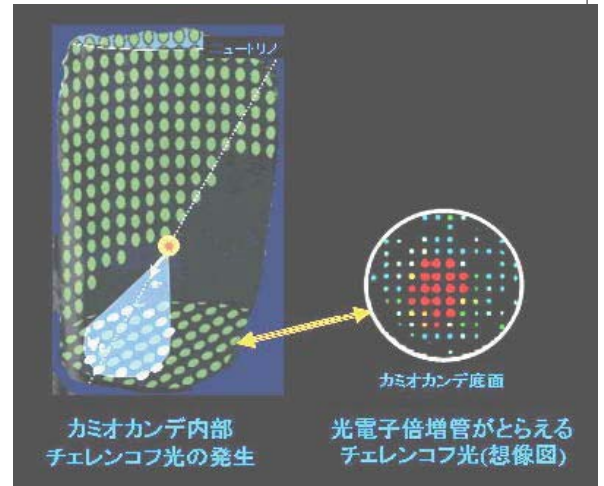
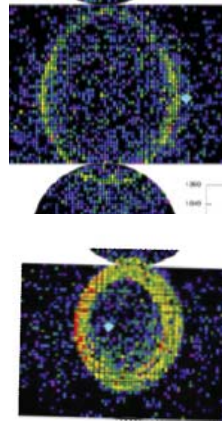
ミュー粒子の場合；

輪がくっきり

電子の場合；

輪がぼやけている。

電子は走っている途中で光子を出し、それがまた電子・陽電子対をつくるため。



13

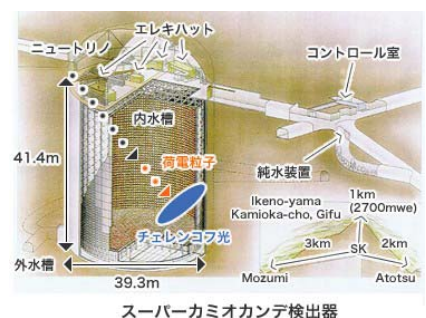
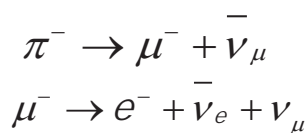
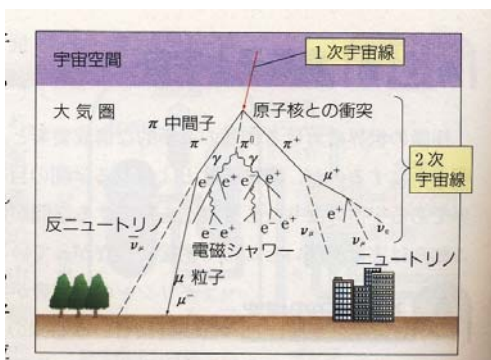
2015年ノーベル物理学賞

スーパーカミオカンデの実験

- スーパーカミオカンデでも、第1目的は「陽子崩壊」と「太陽ニュートリノ」の観測であった。
- その中で、梶田氏はそれまで信号のバックグラウンドとして扱われていた宇宙線起源のニュートリノに注目。

宇宙線起源のニュートリノに期待されること。

$$\frac{\text{電子ニュートリノの数}}{\text{ミューオンニュートリノの数}} = \frac{1}{2}$$

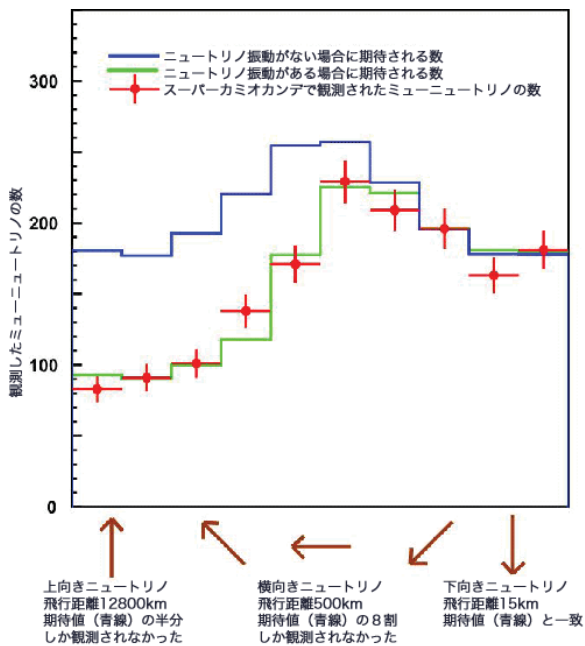


14

2015年ノーベル物理学賞

2015/11/30

宇宙線起源のニュートリノの不思議



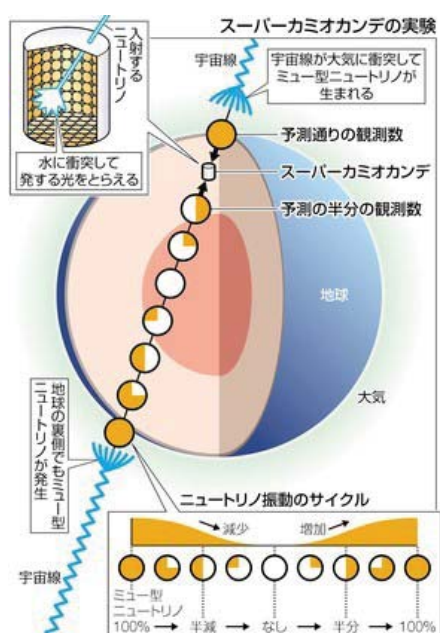
- 電子・ニュートリノの数は予想どおり.
- しかし、ミュー・ニュートリノの数、特に地球の反対側から来たニュートリノ数が**予想される数の半分程度**になっていることを発見(右図)
- 1998年岐阜高山市で開催された国際会議でリーダーの梶田氏が発表

15

2015年ノーベル物理学賞

2015/11/30

ニュートリノ数減少の理由の解釈



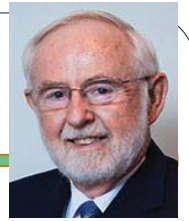
- ニュートリノが飛行中に別の種類のニュートリノに変化しているため(これを**ニュートリノ振動**と呼ぶ)
- 宇宙線起源のニュートリノの場合、地球を通過中に、ミュー・ニュートリノからタウ・ニュートリノに変化している。
- タウ・ニュートリノはそのエネルギーがタウ粒子を発生できるほど高くないので、水と反応しない。そのため、ニュートリノの数が減少したように見える。

16

2015年ノーベル物理学賞

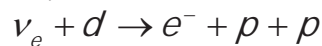
2015/11/30

太陽ニュートリノ不思議

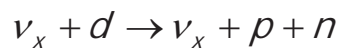


- 太陽の内部では核融合によって大量のニュートリノが作られる。しかし地球で観測される数は理論に基づいて予測した量より大幅に少ない。この問題が研究者を30年以上も悩ませてきた「太陽ニュートリノ問題」。
- カナダの地下に建設されたSNO（スノー）実験では、水の代わりに「重水」を用いてこの問題を研究した。
- 「重水」とは水の陽子(p)が重陽子(d=pn)に置き変わった水のこと。化学的性質は水と同じ。カナダでは重水を多量に確保可能。
- 重水を用いる利点

電子・ニュートリノでのみ起こる反応



とニュートリノの種類によらずすべてのニュートリノで起こる反応を同時に測定可能



- 結果：
太陽からの電子・ニュートリノはニュートリノ振動が無い時の予想値の半分程度、しかし、ニュートリノの種類に依らない反応の数は、太陽で生成される電子・ニュートリノの数から期待される数に一致。
- 「太陽ニュートリノ問題」も「ニュートリノ振動」で解決

17

2015年ノーベル物理学賞

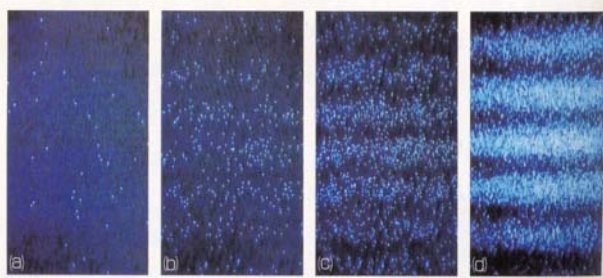
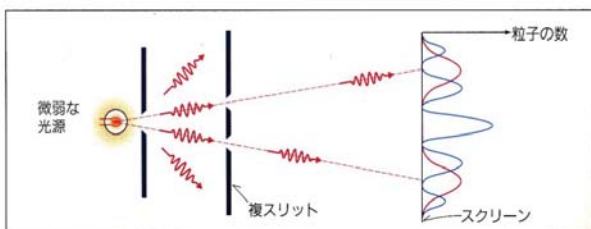
2015/11/30

ニュートリノ振動とニュートリノ質量

- ミクロの世界では粒子は波動と粒子の二重性を持つ。

(量子力学の教え)

二重スリットの実験



- 光は粒々で、1個、2個と数えられる。
- それが、多量に集まると波動で予想される干渉パターンが見える。
- 電子でも、干渉パターンが見える。



- ミクロの世界では、現象は確率的に起こり、その確率は、2つの波の振幅の重ね合わせで与えられる。

(スクリーン上xの位置に粒子を観測する確率)

$$= |(\text{穴1を通過した粒子の振幅}) + (\text{穴2を通過した粒子の振幅})|^2$$

- 二重スリットの場合、干渉は穴1と穴2の場所が異なるために生じる

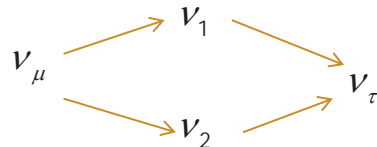
18

2015年ノーベル物理学賞

2015/11/30

ニュートリノ振動とニュートリノ質量 (続)

- ニュートリノの種類が決まった状態は質量が決まった状態の重ね合わせ。
- たとえば、 ν_μ は質量 m_1 の状態と質量 m_2 の2つの状態を取ることができる。
- 質量の違いが二重スリットの場合の2つの穴に相当



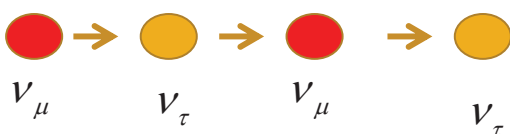
P(初めミュオン・ニュートリノ(ν_μ)であったものがタウ・ニュートリノ(ν_τ)に変わる確率)
 $= |(\nu_\mu \rightarrow \text{質量}m_1\text{のニュートリノ} \rightarrow \nu_\tau\text{の振幅}) + (\nu_\mu \rightarrow \text{質量}m_2\text{のニュートリノ} \rightarrow \nu_\tau\text{の振幅})|^2$

ニュートリノ振動とニュートリノ質量 (2)

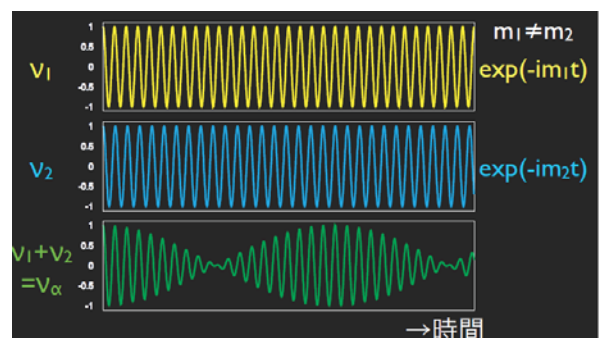
P(初めミュオン・ニュートリノ(ν_μ)であったものがタウ・ニュートリノ(ν_τ)に変わる確率)
 $= |(\nu_\mu \rightarrow \text{質量}m_1\text{のニュートリノ} \rightarrow \nu_\tau\text{の振幅}) + (\nu_\mu \rightarrow \text{質量}m_2\text{のニュートリノ} \rightarrow \nu_\tau\text{の振幅})|^2$

相対性理論より $E = \sqrt{(pc)^2 + (mc^2)^2} = h\nu$ (ν は波動の振動数)

同じ運動量(p)でも質量が違えば、振幅の振動数 (ν) に違いが生じ、そのためにニュートリノ振動が起きる。



すなわち、ニュートリノ振動があるということはニュートリノが質量を持つということを意味する。



ニュートリノについて現在分かっていること

$$P_{\nu_i \rightarrow \nu_j}(x) = \sin^2 2\theta \sin^2 \left(1.3 \frac{\Delta m_{ij}^2}{(eV)^2} \frac{x}{m} \frac{MeV}{E_\nu} \right) \quad (i \neq j) \quad E \approx pc + \frac{1}{2} \frac{(mc^2)^2}{pc}, \text{ if } (pc) \gg mc^2$$

- ニュートリノ間の質量差の2乗が有限。

大気ニュートリノ $(\Delta m_{23})^2 = |m_2^2 - m_3^2| c^2 = 2.5 \times 10^{-3} eV^2$

太陽ニュートリノ $(\Delta m_{12})^2 = |m_1^2 - m_2^2| c^2 = 7.6 \times 10^{-5} eV^2$

- ニュートリノの質量の絶対値は上限値しか決まっていない。

$$m_{\nu_e} c^2 < 2 \text{ eV}$$

注意：電子の質量 $m_e c^2 = 5.2 \times 10^5 \text{ eV}$

$1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ ジュール}$

21

2015年ノーベル物理学賞

2015/11/30

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 “for the *discovery of neutrino oscillations, which shows that neutrinos have mass*”

「2015年のノーベル物理学賞は、**ニュートリノ振動の発見**とその**結果ニュートリノが質量を持つ**ということを示したことに対して、**梶田隆章氏とアーサー マクドナルド氏に授与する**」

ノーベル財団のHPより

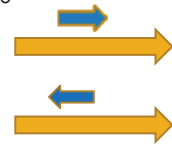
22

2015年ノーベル物理学賞

2015/11/30

なぜ、多くの物理学者がニュートリノの質量がゼロだと思っていたのか。

- 1980-90年代：素粒子の標準理論の完成時期
- 素粒子の標準理論では、右巻の粒子と左巻の粒子は別の粒子。
 右巻の粒子 (R)：粒子のスピンの進行方向と同じ
 左巻の粒子 (L)：粒子のスピンの進行方向と逆



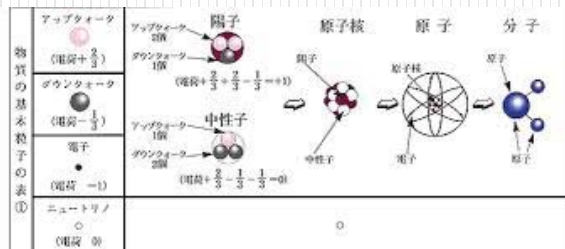
- 粒子を特徴づける量子数 (Q, I₃, Y) $Q(\text{電荷}) = I_3 + \frac{Y}{2}$

粒子	Q	I ₃	Y	粒子	Q	I ₃	Y
$\nu_{e,L}$	0	+1/2	-1	$u_{,L}$	+2/3	+1/2	1/3
$e^{-,L}$	-1	-1/2	-1	$d_{,L}$	-1/3	-1/2	1/3
$\nu_{e,R}$	0	0	0	$u_{,R}$	+2/3	0	4/3
$e^{-,R}$	-1	0	-2	$d_{,R}$	-1/3	0	-2/3

- 右巻のニュートリノのみ、すべての量子数がゼロ。すなわち、標準理論内では相互作用しない、存在しないことを意味する。そのためにはニュートリノ質量がゼロであることが必要。

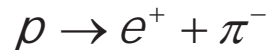
Backup

現代の素粒子像



カミオカンデ実験の成果

- カミオカンデ実験を始めた最初の目的は「陽子崩壊」の探索



- 当時、太陽から来るニュートリノが期待される数の半分くらいしか観測されない（「太陽ニュートリノ問題」）という問題が注目されており、カミオカンデでも太陽ニュートリノ観測のために、ノイズの低減に取り組んでいた。
- 1987年に、我々の隣の銀河である大マゼラン星雲にてあった超新生爆発からのニュートリノ11個をキャッチ
（タンクに飛来したと予想されるニュートリノの数； 2×10^{16} 個）
- 2002年に、神岡実験を開始した小柴昌俊氏がノーベル物理学賞を受賞



スーパーカミオカンデにつながる。

ニュートリノ質量から宇宙の成り立ちへ

高橋智彦(研究院自然科学系物理学領域)

ニュートリノ質量から 宇宙のなりたちへ

高橋 智彦

奈良女子大学研究院自然科学系物理学領域

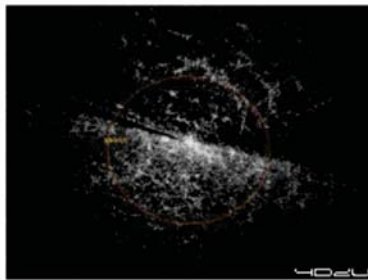
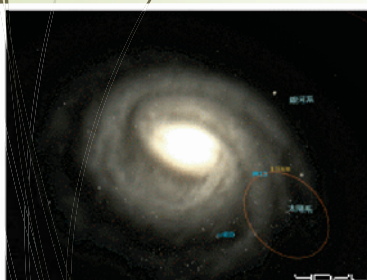
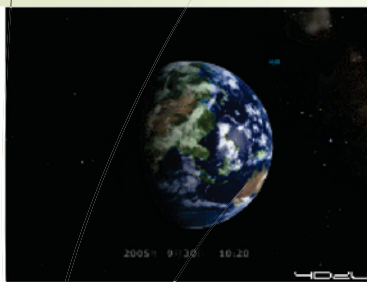
素粒子論研究室

「これでわかる！ノーベル賞受賞の理由」

2015年11月30日（月） 於 奈良女子大学文学部S235教室

宇宙の構造

- 遠い昔、はるか彼方の銀河系で... -

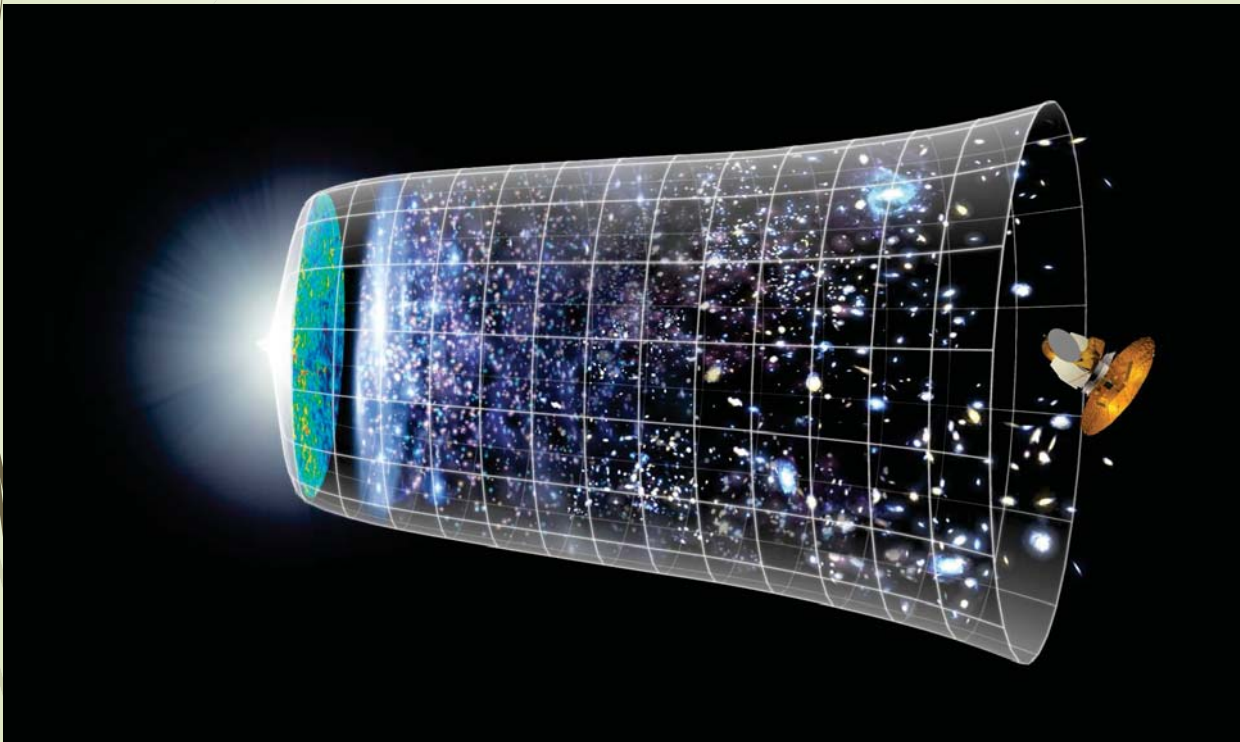


4次元デジタル宇宙ビューワー
"Mitaka"

「国立天文台4次元デジタル宇宙プロジェクト提供」

宇宙の歴史

- ビックバンから138年後の現在へ -

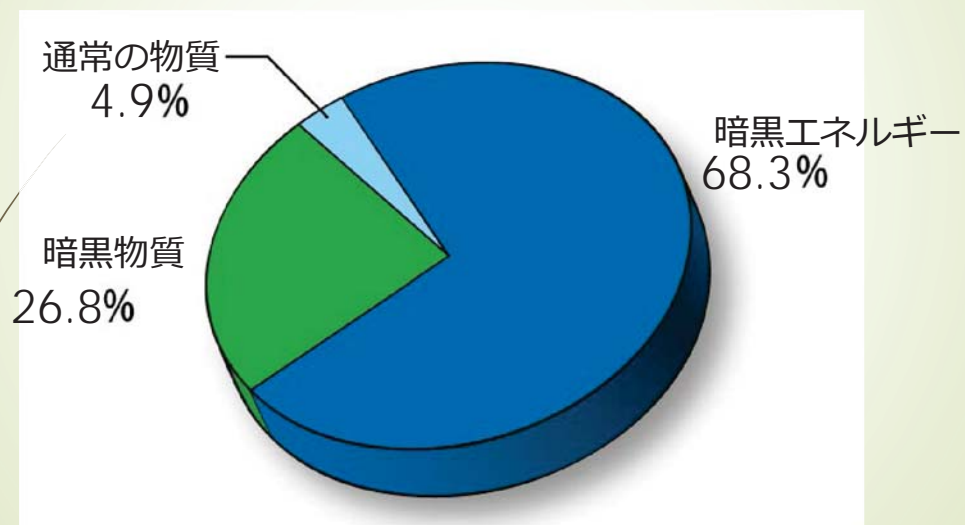


(NASA/WMAP Science Team 提供)

宇宙の組成

- 宇宙のエネルギーを担うもの -

■ 現在の宇宙 (宇宙誕生から138億年)



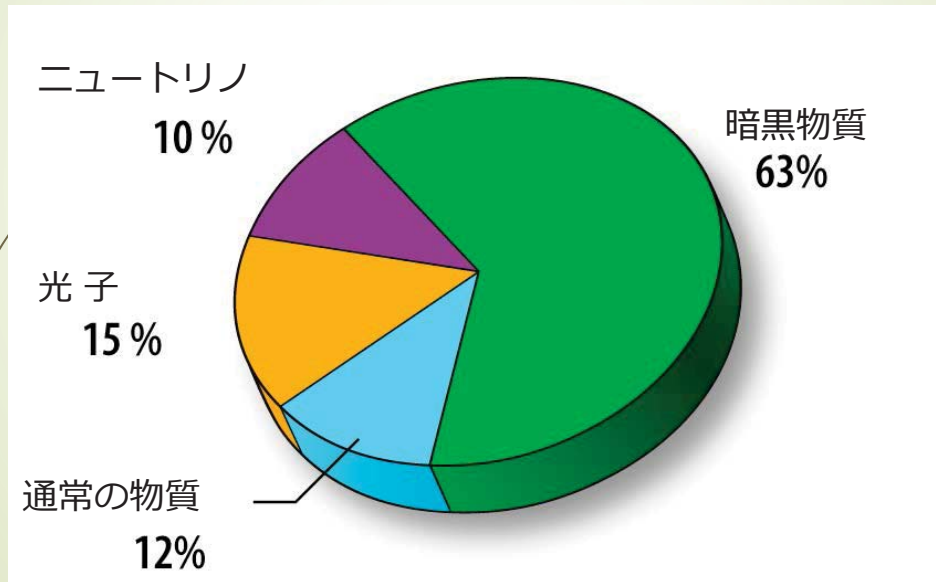
■ ニュートリノは 1% 以下

(NASA/WMAP Science Team 提供の図を
Planck 衛星の結果に基づいて改変)

宇宙の組成

- 宇宙のエネルギーを担うもの -

■ 宇宙誕生から38万年後



■ ニュートリノの寄与は10%もあった!!

(NASA/WMAP Science Team提供の図を改変)

ニュートリノ質量から 宇宙の大規模構造へ

宇宙誕生から38万年後

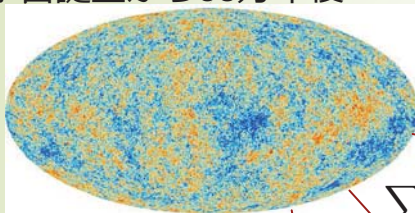
■ コンピュータシミュレーションの結果

(S.Agarwal and

Feldman,

arXiv:1006.0689v2

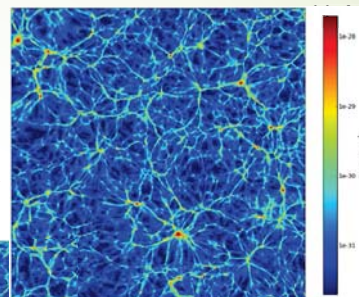
[astro-ph.CO](2012))



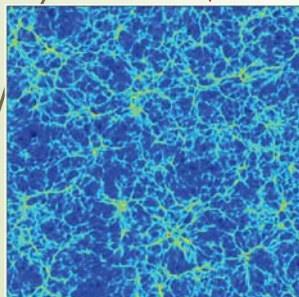
ESA, Planck Collab. 提供

ニュートリノなし

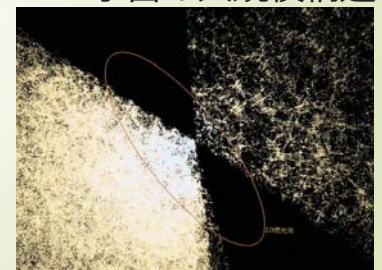
$$\sum m_\nu = 0.95\text{eV}$$



$$\sum m_\nu = 1.9\text{eV}$$



宇宙の大規模構造



■ 宇宙観測でニュートリノ質量についてわかる。

■ 逆に、ニュートリノ質量から大規模構造がわかる。

4次元デジタル宇宙
ビューワー "Mitaka"

ニュートリノ質量から物質起源へ

- ▶ 38万年前よりもっと昔、宇宙が1000兆度よりもっと熱かった頃、宇宙には粒子と反粒子が同じ数だけあった。
電子 ↔ 反電子, クォーク ↔ 反クォーク, etc
- ▶ しかし、現在の宇宙に反粒子からつくられた反物質は見当たらず、粒子からつくられた物質ばかり。
- ▶ 一つの自然な疑問
宇宙はなぜ「反物質」ではなく「物質」でつくられているのか？

ニュートリノ質量から物質起源へ

- ▶ 小林-益川理論 (1973年提唱, 2008年ノーベル賞受賞)
クォークが6種類あれば、粒子と反粒子の間に違いがある。
(CP対称性の破れ)
- ▶ この粒子-反粒子の違いから、「宇宙が物質でつくられている」ことを説明できる？
- ▶ 現在のところ、小林-益川理論だけでは説明できないことがわかっている。

ニュートリノ質量から物質起源へ

- ところが、ニュートリノに質量があると、粒子と反粒子に新たな違いが生じる！

(レプトンCP対称性の破れ)

- この粒子-反粒子の違いと小林-益川理論を合わせれば、「宇宙が物質でつくられている」ことを説明できる？
- 現在も研究が進行中。
- ニュートリノ質量の発見は、物質起源の研究に方向性を与えた。

ニュートリノ質量から究極の物質像へ

- 38万年前よりもっと昔、宇宙が1000兆度よりもっと熱かった頃、電子とニュートリノ、 u クォークと d クォークにはほとんど区別がなかった

$$\begin{pmatrix} \nu_L \\ e_L \end{pmatrix} \quad e_R \quad \begin{pmatrix} u_L \\ d_L \end{pmatrix} \quad u_R \quad d_R$$

- ニュートリノに質量があると

$$\begin{pmatrix} \nu_L \\ e_L \end{pmatrix} \quad e_R \quad \nu_R \quad \begin{pmatrix} u_L \\ d_L \end{pmatrix} \quad u_R \quad d_R$$

電子とニュートリノ、 u クォークと d クォークは同じ構造をもつのが自然。

ニュートリノ質量から究極の物質像へ

- ▶ ν_R があれば、38万年前よりもっとずっと昔、電子、ニュートリノ、クォークのすべてに区別がなかったと考えられる。

(SO(10)大統一理論による物質の統一)

- ▶ ニュートリノ質量の発見が、究極の物質像、大統一理論の研究にヒントを与えている。

まとめ

- ▶ ニュートリノ質量の発見は、

- 宇宙の構造
- 物質創成（粒子-反粒子の違い）の起源
- 究極の物質像

など、宇宙のなりたちの解明と理解にとって大きな意義をもつ。

- ▶ Scientific Backgrounds on the Nobel Prize in Physics 2015 (スウェーデン王立科学アカデミー) より



ニュートリノの性質を理解することは、素粒子物理だけでなく天体物理、宇宙論の研究においても、今日の最重要課題である。(二重ベータ崩壊の記述省略) ニュートリノ質量の大きさの順序、ステライルニュートリノの探索、ニュートリノのCP対称性の破れの測定など、他にも多くの実験が行われている。レプトンCP対称性の破れの効果は(中略)宇宙の物質-反物質の非対称性に重要な役割を果たしているかもしれない。このように、ニュートリノ振動の発見によって、私たちが住むこの宇宙のより幅広い理解に向けて扉が開かれたのである。

LADy SCIENCE BOOKLET 12
これでわかる！ ノーベル賞受賞の理由

2016年3月15日発行

奈良女子大学 理系女性教育開発共同機構

CORE of STEM

Collaborative Organization for Research in women's Education of
Science, Technology, Engineering, and Mathematics

〒630-8506 奈良市北魚屋東町

コラボレーションセンター Z207

TEL.&FAX 0742-20-3266

ladyscience@cc.nara-wu.ac.jp
