### 天文学 理工・総合情報学部講義 月曜5限

### credit: IceCube collaboration





credit: 東京大学宇宙線研究所

### 東京大学理学系研究科 鈴木昭宏





## 講義のアウトライン

- ・ 第 1 回: 天文学への導入と様々な時間・空間スケールの天体
- 第2回: 電磁波による宇宙の観測
- 第3回: 太陽系内天体と天体の運動
- ・ 第4回: 天体の距離、明るさ、色
- 第5回:恒星1-恒星のエネルギー源と核反応-





2

## 講義のアウトライン

- 第6回: 恒星2 恒星の分類と進化-
- 第7回: 星の誕生と星間物質
- 第8回:銀河1-銀河系の構成要素-
- 第9回:銀河2-銀河の分類と進化-
- 第10回: 超新星爆発と元素の起源

## 講義のアウトライン

- 第11回: 白色矮星、中性子星、ブラックホール
- ・第12回: ニュートリノ天文学と高エネルギー天体
- ・ 第13回: 重力波天文学と中性子星・ブラックホール
- 第14回: 宇宙膨張の発見と宇宙の歴史
- 第15回: 系外惑星の世界

# 第12回: ニュートリノ天文学と 高エネルギー天体

- ニュートリノとは何か
- ・太陽からのニュートリノ
- 高エネルギー天体現象とニュートリノ

# ニュートリノとは何か

- ・ニュートリノは弱い相互作用に関わる、 電気的に中性な素粒子
- 素粒子(elementary particles):物質 をそれ以上分解できなくなるまで分解し たときに現れる要素
- 原子 → 原子核 → 核子(陽子,中性子) → クォーク(quark)
- ・原子 → 電子(レプトンの一種)









# ニュートリノとは何か

- ニュートリノは弱い相互作用に関わる、
  電気的に中性な素粒子
- **素粒子(elementary particles)**:物質
  をそれ以上分解できなくなるまで分解し
  たときに現れる要素
- ・原子 → 原子核 → 核子(陽子,中性子) →
  クォーク(quark)
- ・原子 → 電子(レプトンの一種)



7

# ニュートリノとは何か

- ・ニュートリノは弱い相互作用に関わる、 電気的に中性な素粒子
- 素粒子(elementary particles):物質 をそれ以上分解できなくなるまで分解し たときに現れる要素
- · 原子 → 原子核 → 核子(陽子,中性子) → クォーク(quark)
- ・原子 → 電子(レプトンの一種)



https://www.icepp.s.u-tokyo.ac.jp/elementaryparticle/standardmodel.html 8

## 現代物理学と4つの「力」

- ・現代物理学においては、自然界の力(物質) 間にはたらく相互作用)は4つあると考え られている
- 電磁相互作用(electromagnetic)
- ・弱い相互作用(weak interaction)
- ・ 強い相互作用(strong interaction)
- ・重力(gravity)



宇宙の歴史と力の分化 credit: シリーズ現代の天文学「人類の住む宇宙」

9

### 素粒子標準模型(standard model of elementary particles)

- ・素粒子物理学における3つの相互作用(強 い力、弱い力、電磁気力)を記述する枠 組み
- ・ゲージ粒子: 力を媒介する粒子(グルーオ) ン,Wボソン,Zボソン,光子)
- フェルミオン:物質を構成するクォーク とレプトン
- ・ヒッグス粒子: 質量を媒介する





素粒子標準模型に現れるゲージ粒子とヒッグス粒子 credit:東京大学素粒子物理国際研究センター

https://www.icepp.s.u-tokyo.ac.jp/elementaryparticle/standardmodel.html 10



# ニュートリノの発見

- β(ベータ)-崩壊: 中性子が電子を放出し
  陽子に変わる現象(1898年, A. ラザフォード)
- ・1930年以前、この反応の前後でエネル ギー(mc<sup>2</sup>)が保存しないことが問題とな っていた
- 1930年、W.パウリによるニュートリノ
  仮説: β-崩壊では電気的に中性な未知の
  粒子が放射されているはず



11

# ニュートリノの発見

- β(ベータ)-崩壊: 中性子が電子を放出し
  陽子に変わる現象(1898年, A. ラザフォード)
- ・1930年以前、この反応の前後でエネル ギー(mc<sup>2</sup>)が保存しないことが問題とな っていた
- 1930年、W.パウリによるニュートリノ
  仮説: β-崩壊では電気的に中性な未知の
  粒子が放射されているはず



# ニュートリノの発見

- ニュートリノはβ崩壊などの原子核反応 から発生する
- ・1956年、F.ライネスらによる原子炉から のニュートリノ検出実験
- ・原子炉をon/offしたときの信号の増減 (ニュートリノと陽子・中性子の衝突から 出る蛍光線)からニュートリノ検出に成功
- ・(電子)ニュートリノの存在証明





# ニュートリノの検出

- ニュートリノは他の物質とほとんど反応 しない(すり抜ける) = 検出が極めて難し い(太陽ニュートリノ: 1cm<sup>2</sup>に660億/秒)
- ・大量のターゲットを用意し、わずかなニ ュートリノとの反応を捉える
- ・スーパーカミオカンデ:神岡鉱山(岐阜)の 地下に50,000tの超純水+光電子倍増管 ニュートリノ検出原理(上)と

http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/sk/library/image.html http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/sk/detector/howtodetect.html



リノが叩き出した荷電粒子が走ることによってチェレンコフ光が発生します。



カミオカンデ水タンク内の写真(下)

credit: 東京大学宇宙線研究所

# ニュートリノの検出

- ニュートリノは他の物質とほとんど反応 しない(すり抜ける) = 検出が極めて難し い(太陽ニュートリノ: 1cm<sup>2</sup>に660億/秒)
- ・大量のターゲットを用意し、わずかなニ ュートリノとの反応を捉える
- ・スーパーカミオカンデ:神岡鉱山(岐阜)の 地下に50,000tの超純水+光電子倍増管 ニュートリノ検出原理(上)と

http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/sk/library/image.html http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/sk/detector/howtodetect.html





(c) 東京大学宇宙線研究所 神岡宇宙素粒子研究施設

カミオカンデ水タンク内の写真(下)

credit: 東京大学宇宙線研究所

# ニュートリノの検出

- ニュートリノは他の物質とほとんど反応 しない(すり抜ける) = 検出が極めて難し い(太陽ニュートリノ: 1cm<sup>2</sup>に660億/秒)
- ・大量のターゲットを用意し、わずかなニ ュートリノとの反応を捉える
- ・スーパーカミオカンデ:神岡鉱山(岐阜)の 地下に50,000tの超純水+光電子倍増管
- IceCube実験: 南極の氷を使う



アムンゼン・スコット基地 IceCube実験の概念図 credit: 千葉大学ハドロン宇宙国際研究センター http://www.icehap.chiba-u.jp/icecube/icecube.html

# 第12回: ニュートリノ天文学と 高エネルギー天体

- ニュートリノとは何か
- 太陽からのニュートリノ
- 高エネルギー天体現象とニュートリノ



## 太陽ニュートリノ

- ・我々にとって、一番身近な天体である太陽 からもニュートリノが放射され、地球に届 いている(太陽ニュートリノ: solar neutrino)
- 太陽ニュートリノの観測から、ニュートリノの性質や太陽の物理について何が分かるのか?



ニュートリノで観測した太陽 credit: スーパーカミオカンデ http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/sk/sk/solar-e.html



### 太陽の化学組成

- ・フラウンホーファー線による元素の同定
- 太陽大気のモデリングと組み合わせて、どの元素がどのくらい含まれるかを推定する
- ・太陽表面(光球)の組成
- ・水素、次いでヘリウムが圧倒的に多い
- ・実は宇宙の始まりにできるのが水素とヘリ ウム(+微量の軽元素)

### 太陽表面(光球: photosphere) での化学組成(Asplund et al. 2009)

Solar photospheric abundance Asplund et al. (2009)





### 水素の核融合反応(hydrogen burning)

・4つの水素原子核を1つのヘリウム原子核に 変える反応: 核子同士をつなぎ直す

• 
$$4^{1}H \rightarrow ^{4}He + 2e^{+} + 2\nu_{e} + \gamma$$
  
=  $2\nu_{e} + \gamma$ 

・ 質量欠損(mass defect): 失われた質量に 対応するエネルギーが発生する(相対性理論)

• 
$$\Delta mc^2 = (4m_{\rm H} - m_{\rm He} - 2m_{\rm e})c^2$$

• 0.07kg/水素1kg x c<sup>2</sup>=6.3x10<sup>14</sup>[J/kg]



+(失われた質量に対応する)エネルギー





### 水素燃焼(Hydrogen burning)

### • $4^1 H \rightarrow {}^4 He + 2e^+ + 2\nu_e + \gamma$

- 2種類の燃焼過程
- p-p連鎖(p-p chain): 太陽のような星で 支配的に起こる
- CNOサイクル(CNO cycle): 太陽よりも 重い星(中心温度が高い)で支配的に起こる



credit: ISAS/JAXA





# 陽子-陽子連鎖 (p-p chain)

- pp-l分枝
  - <sup>1</sup>H + <sup>1</sup>H  $\rightarrow$  <sup>2</sup>H + e<sup>+</sup> +  $\nu_e$
  - ${}^{2}H + {}^{1}H \rightarrow {}^{3}He + \gamma$
  - ${}^{3}\text{He} + {}^{3}\text{He} \rightarrow {}^{4}\text{He} + 2 {}^{1}\text{H}$

### p-p I branchの模式図



# 陽子-陽子連鎖 (p-p chain)

- ・pp-ll分枝
  - ${}^{1}H + {}^{1}H \rightarrow {}^{2}H + e^{+} + \nu_{e}$
  - ${}^{2}H + {}^{1}H \rightarrow {}^{3}He + \gamma$
  - ${}^{3}\text{He} + {}^{4}\text{He} \rightarrow {}^{7}\text{Be} + \gamma$
  - <sup>7</sup>Be + e<sup>-</sup>  $\rightarrow$  <sup>7</sup>Li +  $\nu_e$
  - $^{7}Li$  +  $^{1}H$   $\rightarrow$  2  $^{4}He$



p-p II branchの模式図

# 陽子-陽子連鎖 (p-p chain)

- ・pp-III分枝
- ${}^{1}H + {}^{1}H \rightarrow {}^{2}H + e^{+} + \nu_{e}$   ${}^{2}H + {}^{1}H \rightarrow {}^{3}He + \gamma \qquad 1$
- ${}^{3}\text{He} + {}^{4}\text{He} \rightarrow {}^{7}\text{Be} + \gamma$
- <sup>7</sup>Be + <sup>2</sup>H  $\rightarrow$  <sup>8</sup>B +  $\gamma$
- ${}^{8}B \rightarrow {}^{8}Be + e^{-} + \nu_{e}$
- <sup>8</sup>Be  $\rightarrow$  2 <sup>4</sup>He



p-p III branchの模式図

# CNOサイクル (CNO cycle)

- 炭素・窒素・酸素を触媒とする 反応  $^{12}C + {}^{1}H \rightarrow {}^{13}N + \gamma$ 
  - <sup>13</sup>N  $\rightarrow$  <sup>13</sup>C + e<sup>-</sup> +  $\nu_e$
  - ${}^{13}C + {}^{1}H \rightarrow {}^{14}N + \gamma$
  - ${}^{14}N + {}^{1}H \rightarrow {}^{15}O + \gamma$
  - <sup>15</sup>O  $\rightarrow$  <sup>15</sup>N + e<sup>+</sup> +  $\nu_e$
  - ${}^{15}\mathrm{N} + {}^{1}\mathrm{H} \rightarrow {}^{12}\mathrm{C} + {}^{4}\mathrm{He}$



# CNOサイクル (CNO cycle)

- 炭素・窒素・酸素を触媒とする 反応  $^{12}C + {}^{1}H \rightarrow {}^{13}N + \gamma$ 
  - <sup>13</sup>N  $\rightarrow$  <sup>13</sup>C + e<sup>-</sup> +  $\nu_e$
  - ${}^{13}C + {}^{1}H \rightarrow {}^{14}N + \gamma$
  - ${}^{14}\mathrm{N} + {}^{1}\mathrm{H} \rightarrow {}^{15}\mathrm{O} + \gamma$
  - <sup>15</sup>O  $\rightarrow$  <sup>15</sup>N + e<sup>+</sup> +  $\nu_e$
  - ${}^{15}\mathrm{N} + {}^{1}\mathrm{H} \rightarrow {}^{12}\mathrm{C} + {}^{4}\mathrm{He}$



# ニュートリノによる太陽内部探査

- ・核反応によってでてくる光子は太陽内部を
  拡散(吸収・再放射)しながら外へ向かう
- ・その拡散過程で情報(温度など)は失われる
- 一方で、ニュートリノは核反応によって作 られたらそのまま内部を通り抜けて外へ向 かう
- ・原理的にはニュートリノの数を数えれば、 起こっている反応の数も分かる







# ニュートリノによる太陽内部探査

- ・核反応によってでてくる光子は太陽内部を
  拡散(吸収・再放射)しながら外へ向かう
- ・その拡散過程で情報(温度など)は失われる
- 一方で、ニュートリノは核反応によって作 られたらそのまま内部を通り抜けて外へ向 かう
- ・原理的にはニュートリノの数を数えれば、 起こっている反応の数も分かる





 $4^{1}H \rightarrow {}^{4}He + 2e^{+} + 2\nu_{e} + \gamma$ 







### 太陽標準モデル

- 例: Bahcall, Serenelli, & Basu (2005)
- ・外に向かって密度温度圧力が下がっていく
- 中心温度  $T_c \simeq 1.5 \times 10^7$  [K]
- 中心密度  $\rho_{\rm c} \simeq 1.5 \times 10^5 \, [\text{kg m}^{-3}]$
- ・中心では水素がヘリウムに変わっている (元々は水素75%+ヘリウム23%くらい)



29

## 太陽ニュートリノ問題

・1970年、太陽からの(電子)ニュートリノ 観測の開始(R. デイビス)

- ・太陽の中で核燃焼が起きており(H→He)、 太陽の構造を保つのに核燃焼によるエネル ギー生成が大きく寄与している確かな証拠
- ・ただし、問題があった



太陽標準モデルで予想されるニュートリノのスペクトル credit: Bahcall, Serenelli, & Basu (2005) ApJ, 621, L85 https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2005ApJ...621L..85B





## 太陽ニュートリノ問題

- ・1970年、太陽からの(電子)ニュートリノ 観測の開始(R. デイビス)
- ・電子ニュートリノの数が理論予想よりも足 りない(予想の1/3程度)
- カミオカンデでも問題を確認
- ・なぜ?太陽標準モデルが間違っているの か?



太陽標準モデルで予想されるニュートリノのスペクトル credit: Bahcall, Serenelli, & Basu (2005) ApJ, 621, L85 https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2005ApJ...621L..85B



# ニュートリノ振動

- ・実はそれまで確認されていなかったニュ-トリノの性質が原因だった
- ニュートリノ振動(neutrino) oscillation): ニュートリノが空間を伝搬 する間にニュートリノの種類(電子,ミュー, タウ)が入れ替わる現象
- ・SNO実験: 電子型ニュートリノと全ニュー トリノの観測







# ニュートリノ振動

- ニュートリノ振動の存在は太陽ニュートリ ノだけでなく、大気ニュートリノの観測か らも分かっていた
- また、ニュートリノ振動はニュートリノが 質量を持つことで起こる
- ・ニュートリノが(小さいながらも0でない)質 量を持つことを証明したことになる
- 2015年ノーベル賞(梶田氏、McDonald氏)

 $^{1}\text{H} + ^{1}\text{H} \rightarrow ^{2}\text{H} + e^{+} + \nu_{e}$ 太陽  $^{7}\text{Be} + e^{-} \rightarrow ^{7}\text{Li} + \nu_{e}$  $^{8}B \rightarrow ^{8}Be + e^{-} + \nu_{e}$ 梶田隆章氏とA.McDonald氏

credit: ノーベル財団 https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2015/kajita/facts/









# 第12回: ニュートリノ天文学と 高エネルギー天体

- ニュートリノとは何か
- 太陽からのニュートリノ
- 高エネルギー天体現象とニュートリノ



34

## 太陽系外からのニュートリノ

- ・太陽のような普通の星からニュートリノが 放射されていることは分かったが、恒星か らのニュートリノは暗く、太陽以外での検 出はまだ現実的でない
- もっと高エネルギーな天体現象をターゲッ トにしよう
- 重力崩壞型超新星爆発
- 活動銀河核(AGN)



credit: ISAS/JAXA





### 大質量星の最終進化段階」核子あたりの質量エネルギー(12C=0を基準とする)

- ・大質量星進化の最終段階:鉄の中心核 (コア)ができる
- ・鉄コアは周りでの核燃焼により質量を 増やしていく
- ・質量を増していった鉄コアはどこかで 自分自身の重力を支えきれなくなり、 崩壊する(**鉄コアの重力崩壊**)
- ・最終的に爆発する



1核子あたりの質量の質量数依存性 data source: AME2003 atomic mass evaluation https://www-nds.iaea.org/masses/

### 重力崩壞型超新星爆発

- 超新星爆発(supernova explosion): 星 の爆発とそれに伴う発光現象
- ・主に2種類ある超新星のうちの一つ
- ・大質量星の星としての最後の姿
- ・鉄コアの崩壊によって解放される重力エネ ルギーによって、鉄コアより外側が吹き飛 31







### 日本の歴史文献に残る天体現象

### ・藤原定家「明月記」(冷泉家所蔵): 1054年の超新星が「客星」として記されて いる(中国等での観測記録の引用)



### 藤原定家「明月記」(中日新聞ウェブサイトより) https://plus.chunichi.co.jp/blog/asada/article/282/3327/



### 日本の歴史文献に残る天体現象

### · 藤原定家「明月記」(冷泉家所蔵): 1054 いる(中国等での観測記録の引用)



### 藤原定家「明月記」(中日新聞ウェブサイトより) https://plus.chunichi.co.jp/blog/asada/article/282/3327/



かに星雲のハッブル宇宙望遠鏡での観測画像 39 https://hubblesite.org/image/3885/category/35-supernova-remnants





### 重力崩壞型超新星爆発

- ・超新星爆発の観測
- ・銀河系内での歴史的な観測例: SN 1054(かに星雲), SN 1604(ケプラー)
- ・マゼラン雲での超新星SN 1987A: 人類が 現代的な天体観測技術を獲得してから初め ての超新星
- ・人間の生きてる時間スケールで変動する



1984



マゼラン雲で発生した重力崩壊型超新星 1987A credit: Australian Astronomical Observatory

- ・つぶれた鉄コア→原始中性子星
- このとき大量のニュートリノが放射される
- ・鉄コアの重力崩壊のエネルギー=約1046J
- ・このほとんど(99%)をニュートリノ放射が 持ち去る
- ・超新星爆発は残り1%のエネルギーで吹き 飛ぶ



- ・最初期に10秒程度のニュートリノ放射
- ・SN 1987Aの例: 11個のニュートリノ
- ・超新星爆発が起こった最初の瞬間が分かる
- ・地球で観測されたニュートリノの総エネル ギーは、SN1987Aにおいて鉄コアが重力 崩壊したときの予想エネルギーとおおよそ ·致した



- ・最初期に10秒程度のニュートリノ放射
- ・SN 1987Aの例: 11個のニュートリノ
- ・超新星爆発が起こった最初の瞬間が分かる
- ・地球で観測されたニュートリノの総エネル ギーは、SN1987Aにおいて鉄コアが重力 崩壊したときの予想エネルギーとおおよそ 一致した

### 超新星爆発 SN1987Aからのニュートリノ

credit: 東京大学宇宙線研究所

http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/sk/physics/supernova.html



### ita source: Catchpole et al. (1987,88) MNRAS 229 15 https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1987MNRAS.229P..15C

- SN 1987Aからのニュートリノは太陽ニ ュートリノなどと違い、太陽系外天体から のニュートリノ初検出となった
- 「ニュートリノ天文学(neutrino) astronomy)」の幕開けとされる
- ・2002年、ノーベル物理学賞(小柴氏、 R.Davis氏、R.Giacconi)





小柴昌俊氏(1926-2020) credit: ノーベル財団 https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2002/koshiba/facts/

44



# 活動銀河核(Active Galactic Nuclei)

- 可視光で明るく青く輝く中心核
- ・銀河の中心にあるブラックホールの 活動性
- ・銀河スケール(kpc)での電波ジェット の噴き出し
- ・AGN統一モデル: 観測する方向によ って異なる姿





Cygnus Aの可視光(上), 電波(左下), X線(右下)画像 credit: X-ray: NASA/CXC/SAO, NASA/STScl, NSF/NRAO/AUI/VLA https://chandra.harvard.edu/photo/2015/iyl/more.html





## 活動銀河核(Active Galactic Nuclei)

- ・可視光で明るく青く輝く中心核
- ・銀河の中心にあるブラックホールの 活動性
- ・銀河スケール(kpc)での電波ジェット の噴き出し
- ・AGN統一モデル: 観測する方向によ って異なる姿



46

# ブレーザー(blazar)

- AGNからの電波ジェットを正面から 観た天体
- ・ジェットは光速の99%程度にまで加 速されている
- ・ジェットの駆動機構にはまだ謎が多 し
- 観測者方向に明るい高エネルギー放  $\bullet$ 射(相対論的ドップラー効果)

![](_page_46_Figure_5.jpeg)

47

# ブレーザーからのニュートリノ

- ・IceCube-170922A: 2017年、高工 ネルギーニュートリノをlceCube実 験が捉えた
- ・ニュートリノ到来方向を可視光やガ ンマ線で探査した結果、TXS 0506+056というブレーザーからの ものらしいと分かった
- 太陽、SN 1987Aに次いで史上3番 目のニュートリノ天体 credit:

![](_page_47_Figure_4.jpeg)

**青い╋**印は候補となったブレーザーの位置

可視光によるIceCube-170922A方向の探査 「大学間連携による光・赤外線天文学研究教育拠点のネットワーク構築」事業 48 https://oister.kwasan.kyoto-u.ac.jp/results-sci/icecube/

![](_page_47_Picture_6.jpeg)