

スーパーコンピュータは 銀河形成の夢を 見るか？

牧野淳一郎

東京工業大学大学院 理工学研究科 理学研究流動機構

今日話をしようと思っていること

- 銀河形成についてどんなことがわかっているか
- 特に、渦巻銀河の渦巻はどういうものか
- 基礎科学の意義
- 震災・原子力災害と天文学(者)

銀河形成

なにが問題か？

銀河とか星団とかはそもそもどうしてそこにあるのか？

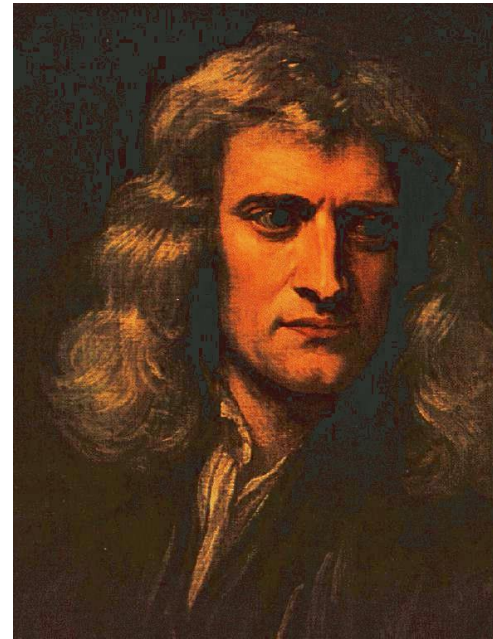
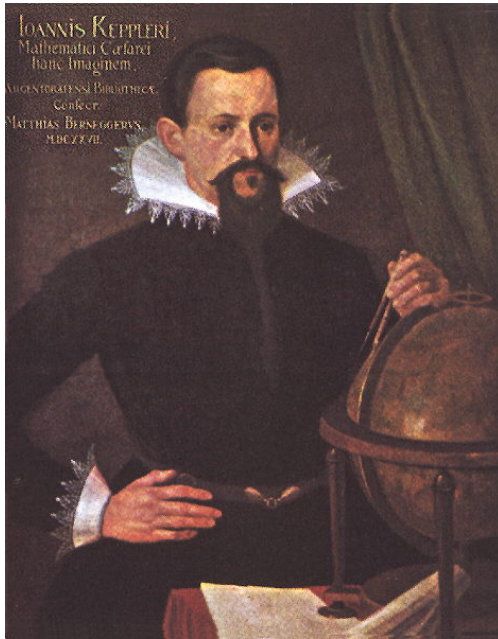
それらは安定なのか？

どうやってできたのか？

というようなことが問題。

ちょっとだけ歴史の話

ケプラーの惑星運動の3法則が、ニュートンの万有引力の法則と運動の法則によって説明された。

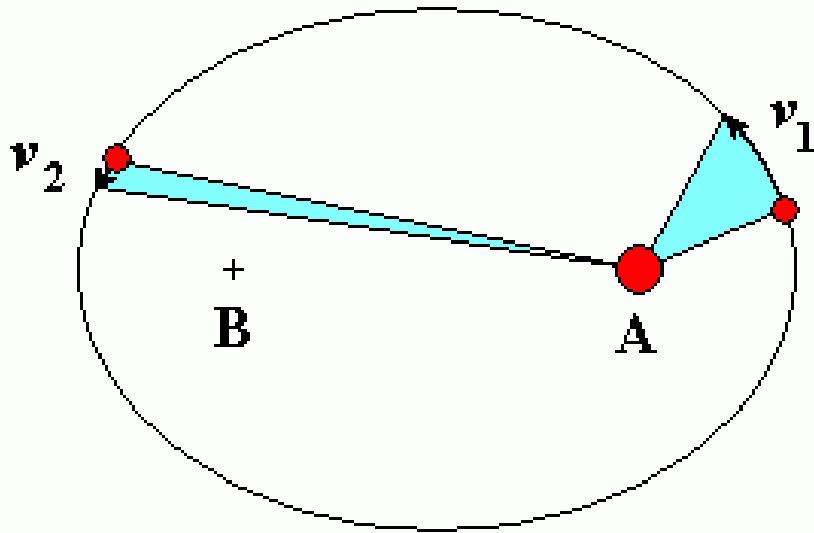


天体の運動も、地球上と同じ物理法則に支配されている。

惑星はそうとして、星や銀河は？

ケプラーの3法則

- 惑星の軌道は太陽を1つの焦点とする楕円
- 「面積速度」は一定
- 軌道周期は軌道長半径の 1.5 乗に比例



ニュートンの
万有引力の法則

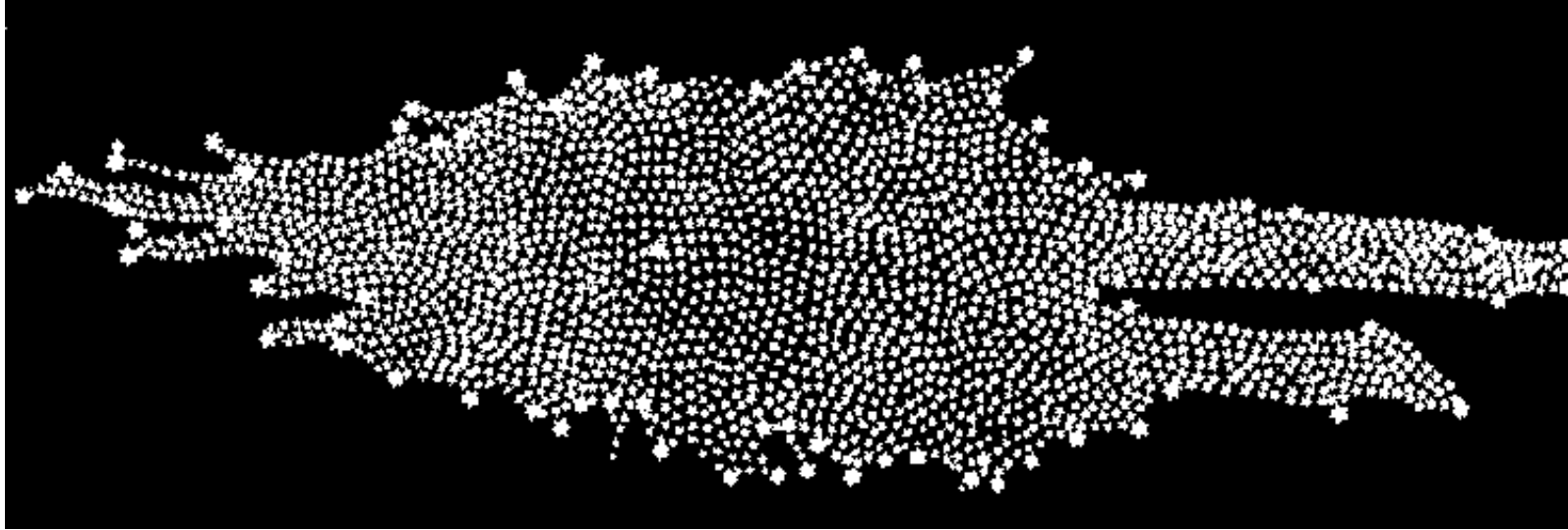
$$F = -G \frac{Mm}{r^2}$$

こっちが大事、ということ

銀河というものについての理解

18世紀: W. ハーシェル

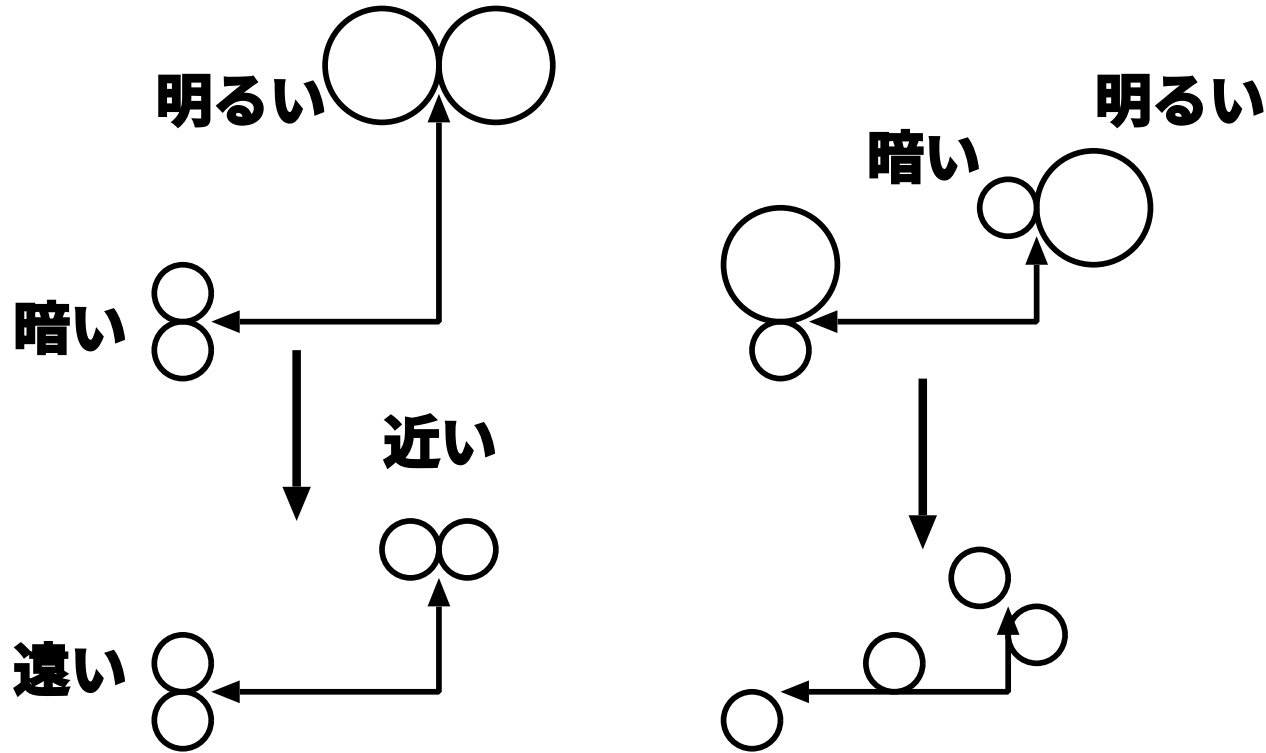
「全ての星は同じ明るさ」と仮定して距離を求めて書いてみた。



星の分布は一様ではなくてひらたくなっている = 銀河の発見

星がみんな同じ明るさのはずないのでは？

それはまあそうなんだけど、地球からみた方向によって星の明るさが違うのでなければ傾向は同じ。

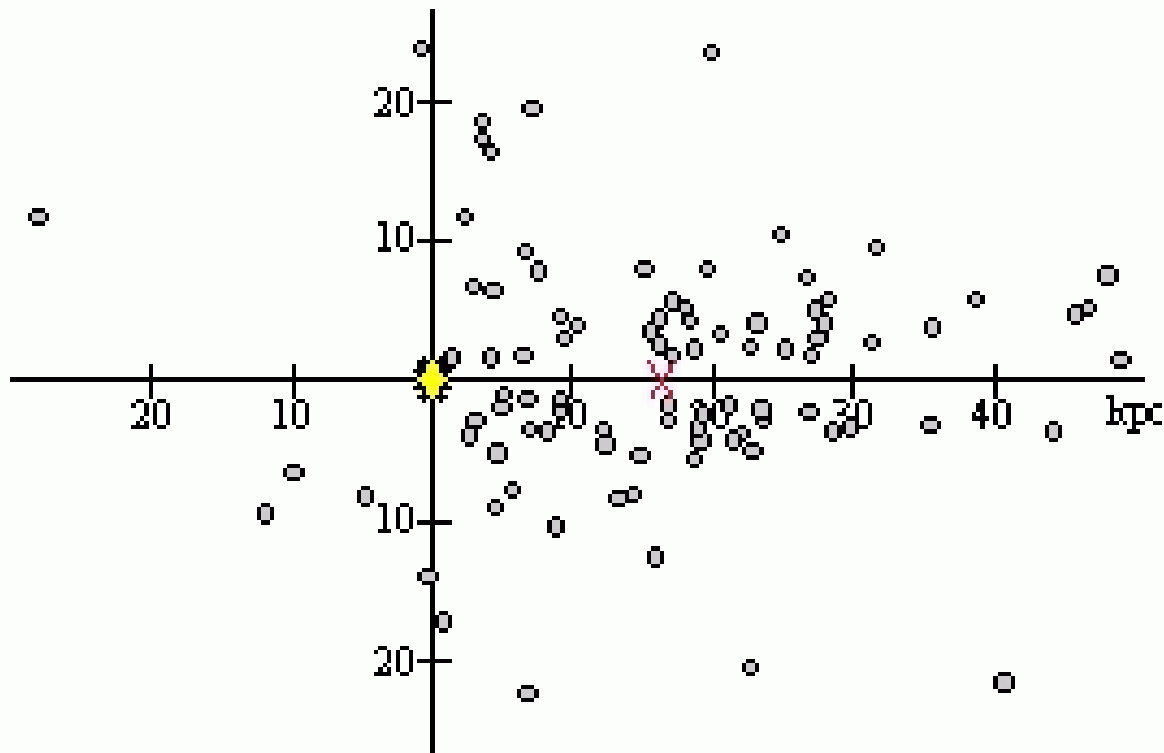


結果の本質が変わらない範囲で物事を単純化するのはとても重要なこと

20世紀初め: H. シャプレー

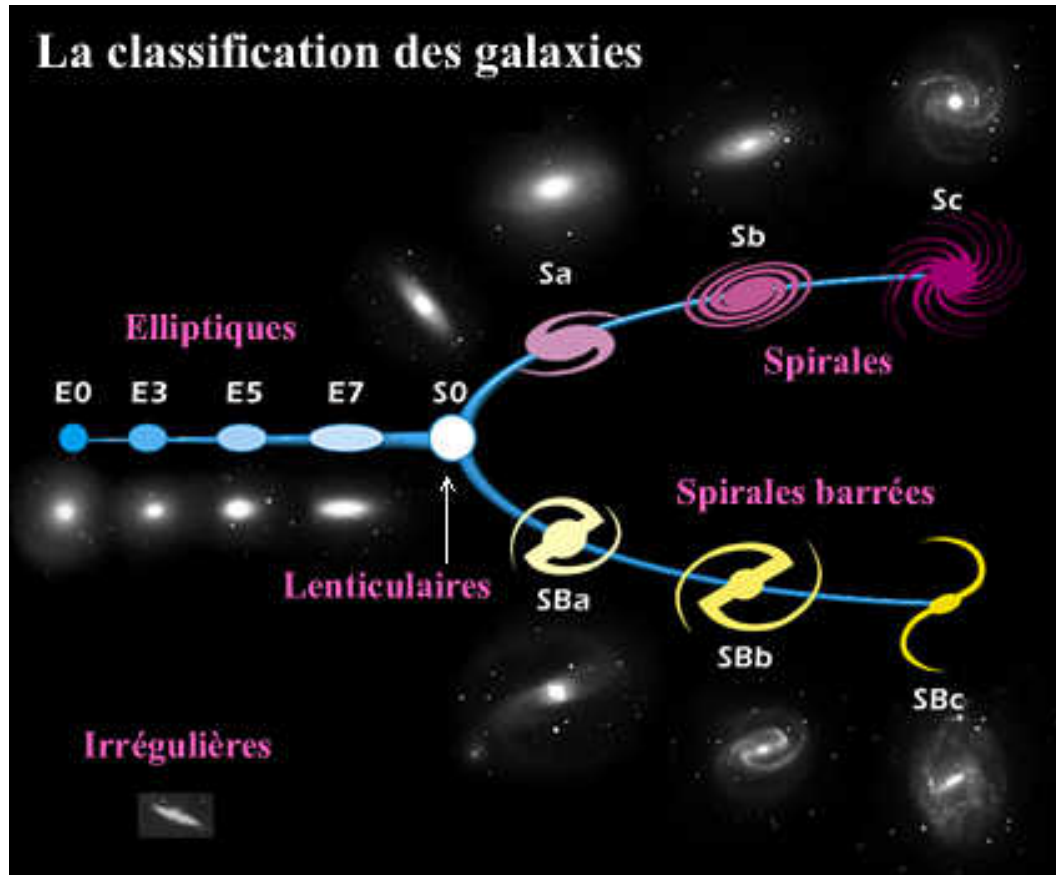
ケフェウス型変光星は変光周期と明るさに関係がある
＝ 変光周期と明るさがわかれば距離がわかる

Shapley's Globular Cluster Distribution



太陽系は銀河系の中心にあるわけではない。

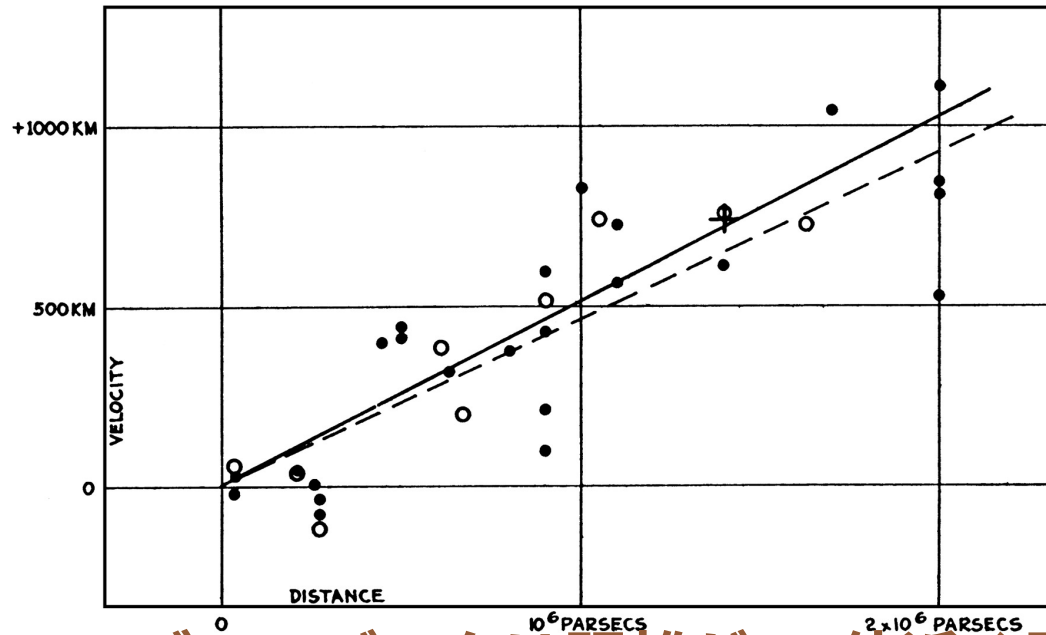
20世紀初め: E. ハッブル (1)



「星雲」と呼んできたものの多くは我々の銀河系と同じような銀河

銀河は「ハッブル系列」によって分類できる

20世紀初め: E. ハッブル (2)



遠くの銀河ほど速く
我々の銀河系から遠
ざかっている

「宇宙膨張」

我々の宇宙は「ビッグ
バン」から始
まった

ハッブルのデータは距離が10倍近く間違っていたので、宇宙の
年齢が地球の年齢より短くなった、、、

ちなみに

ケルビン卿 (とても偉い物理学者) は、「進化論はおかしい」とダーウィンを攻撃したらしい

- 太陽の明るさが今とあまり変わらない期間: 7000 万年よりずっと短い (重力収縮で光っているとした)
- ダーウィンの進化論での、現代の生物に進化するまでの必要時間: 数億年

ケルビン卿の時代には知られてなかったけど現代の我々は知っていること: 太陽は核融合で光っていて、寿命は 100 億年

宇宙膨張と銀河

2つの問題がある。

- 宇宙全体としてはなにがおきているのか
- 一つ一つの星、太陽系、銀河とかについてはどうか？

宇宙全体としてはなにがおきているのか？

「宇宙論」の基本的問題。

＝宇宙空間というものはどうやってそこに存在できているか？

一般相対性理論で初めて本当に扱えるようになった問題。

私は良く知らない

ものが落ちないようにする方法

- 「反重力」でささえる
- 宇宙は広がっているということにする。重力で減速はしている。
- 上の2つの組み合わせ

「反重力」なんての超科学かトンデモかと思うかもしれないけど、これはそうでもなくて**アインシュタイン自身のアイディア**。そういうもの（宇宙項）があるということにすると空間が落ちてこないで済む。

宇宙膨張

宇宙が全体として膨張しているとすればアインシュタイン方程式に宇宙項をつけなくても解がある：ルメートルとかド・ジッターのアイディア。これは 1920 年ころ。

遠くの銀河を観測すると本当に距離に比例した速度で遠ざかっているらしいとわかってきたのが 1930 年頃。

最初は速度－距離の比例係数の見積りがいと 10 倍違ったのでいろいろ混乱があった。

宇宙膨張の問題点

当初の問題：

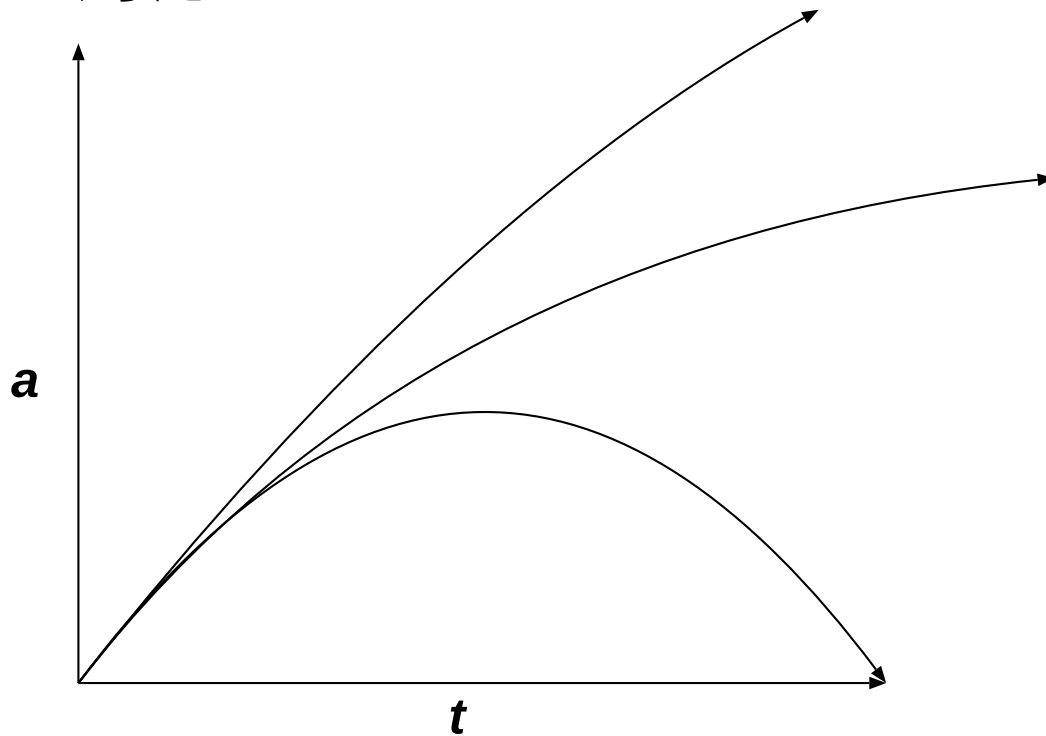
宇宙の年齢が今の $1/10$ になって、放射性元素で決めた地球の年齢よりずっと若くなった。

これを回避するために、「膨張するけれど定常で年齢は無限大」といったモデルも考えられた。

最近は大きな矛盾はなくなっている（一応）。

宇宙膨張の3通り

それぞれが2体問題の双曲線解、放物線解、楕円解
に対応



現実の宇宙は？

決定的な証拠があるかどうかにはまだ議論がないわけではないが、いまのところいろいろな観測結果ともっとも矛盾しないのは、

- 無限に膨張する
- しかも、単純な双曲線解よりも最近膨張が速くなっている

というのが一番「本当らしい」

加速するもの = ダークエネルギー (これもダークマターと同様、名前つけただけ)

ちなみにこの観測が今年 (2011 年) のノーベル賞

銀河等はどうやってできたか？

- 宇宙全体は一様に膨張しているとする、惑星とか、太陽とか、銀河はどうやってできたのか？
- 銀河は重力で星が集まっているだけなのにどうして潰れてしまわないのか？

という問題は依然として残っている。
まず、どうしてそれら、とりあえず銀河とか、ができたのか？
ということ。

重力不安定による揺らぎの成長

- 宇宙全体としては、(非常に大きなスケールでは) 一様で密度一定であるとしても、小さなスケールになると揺らぎのために一様からずれている。
- 宇宙が熱い火の玉から現在まで膨張する過程で、その揺らぎが自分自身の重力のために成長して、ものが集まってできるのが銀河とか銀河団

では、銀河はどんなふうにできるのか？

宇宙はなにからできているか

- そのへんにある普通の物質：バリオン（陽子、中性子）＋電子でできている。
- 宇宙のバリオンのほとんどは水素原子のまま（ビッグバンの最初にヘリウムやリチウムが少しできて、あとは星のなか、特に超新星爆発の時にもっと重い元素が核反応で作られる）

ダークマター？

見えるバリオンの量（星と、あとは電波や X 線でみえる水素ガスの量）：例えば銀河系の質量や、銀河団の質量のほんの一部でしかない。

銀河：回転曲線

銀河団：X 線ガスの温度から質量を推定

- 重力の理論が間違っている？
- なんだかわからないものがある？

ダークマター

- どちらが本当かというのは簡単にはいえないわけだが、今のところ「なんだかわからないものがある」というほうが主流。
- これはいろいろな状況証拠があるが、(僕の意見としては) 大きいのは重力理論が違ふことにした時に、銀河毎に重力理論が違ふというわけにはいかない(統一的な説明があるはず) とすると説明が難しいということ。

ダークマターは何か？

大きくわけて 2 つの理論：

- Hot dark matter 質量をもったニュートリノが大量にあって、それが宇宙の物質のほとんどを占めている。
- Cold dark matter 未知の素粒子があってそれが宇宙の物質のほとんどを占めている。

実はニュートリノではうまくいかないということがわかっている。この場合銀河団とか大きいものはできていても銀河はまだできていないことになってしまうため。

ダークマター候補として最近有力だった粒子の存在の証拠は LHC で見つかるかもと言われていたがまだ見つかってない。

現在の宇宙に対する我々の基本的な理解

- 宇宙の物質のほとんどは、偉そうに言えば「未知の素粒子」、わかりやすくいえば**なんだかわからないもの**である。
- 宇宙は全体としては一様だが、揺らぎがあって完全に一様なわけではない。宇宙膨張の間にその揺らぎが成長して銀河とか銀河団ができてきた。

こういった理解が正しいかどうか：本当にこういうやり方で現在の宇宙の構造ができるかどうかを計算機シミュレーションで調べることである程度はチェックできる。

宇宙の大規模構造形成のシミュレーション

計算の 1 例（国立天文台理論研究部（当時）・石山さん提供）

Large scale structure formation with AMR

ここでやっていること：

- 基本的には「一様」な宇宙を、なるべく沢山の粒子で表現する
- 理論的に「こう」と思われる揺らぎを与える
- 理論的に「こう」と思われる初期の膨張速度を与える
- あとは各粒子の軌道を数値的に積分していく。

わかること

- 宇宙全体としては膨張していく
- 最初に密度が高いところは、他に比べて相対的に密度がどんどん大きくなっていく。
- 特に密度が高いところは、そのうちに膨張しきって潰れ出す。
- （このシミュレーションでは）最初に小さいものが沢山できて、それらがだんだん集まって大きなものになる
- 大雑把にいうと、銀河とか銀河団はこのようにして潰れたもの。

但し

- このシミュレーションではダークマターだけを計算している
- 普通の物質 (バリオン) はない。なので星もなにもない「暗黒銀河」しかできない
- 観測と比べる時には、色々モデルをいれてこういうふうにダークマターが集まってきたらこんな銀河になるはず、みたいなことをする

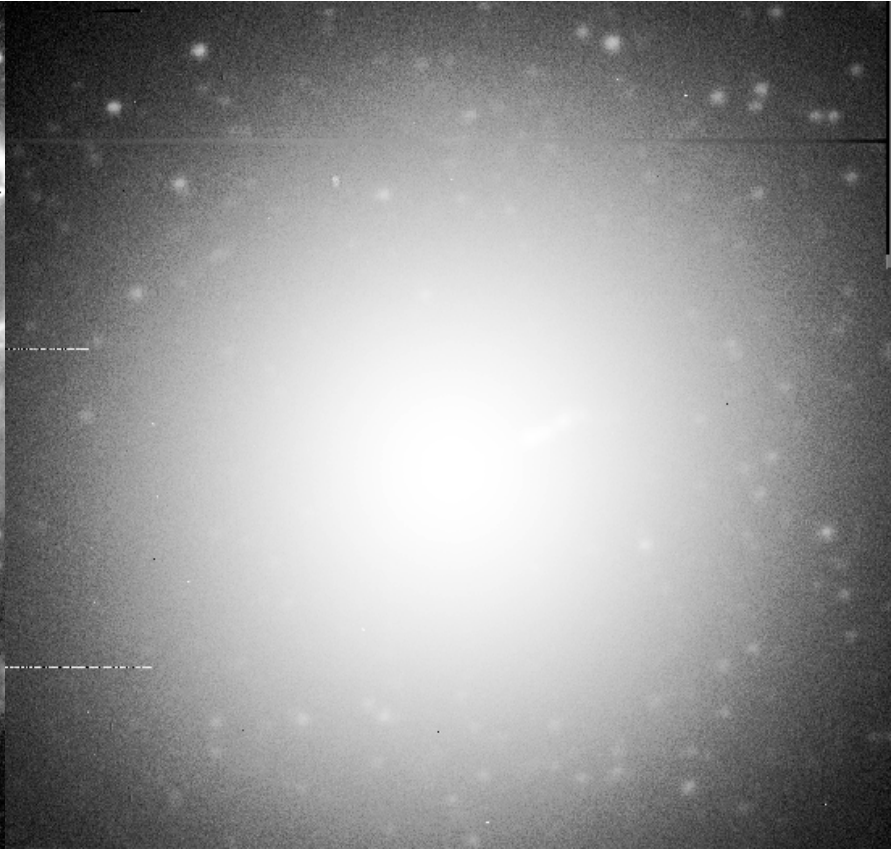
何かちょっとやりたかったことと違うような気がする

やりたかったこと: シミュレーションで銀河を作る

銀河

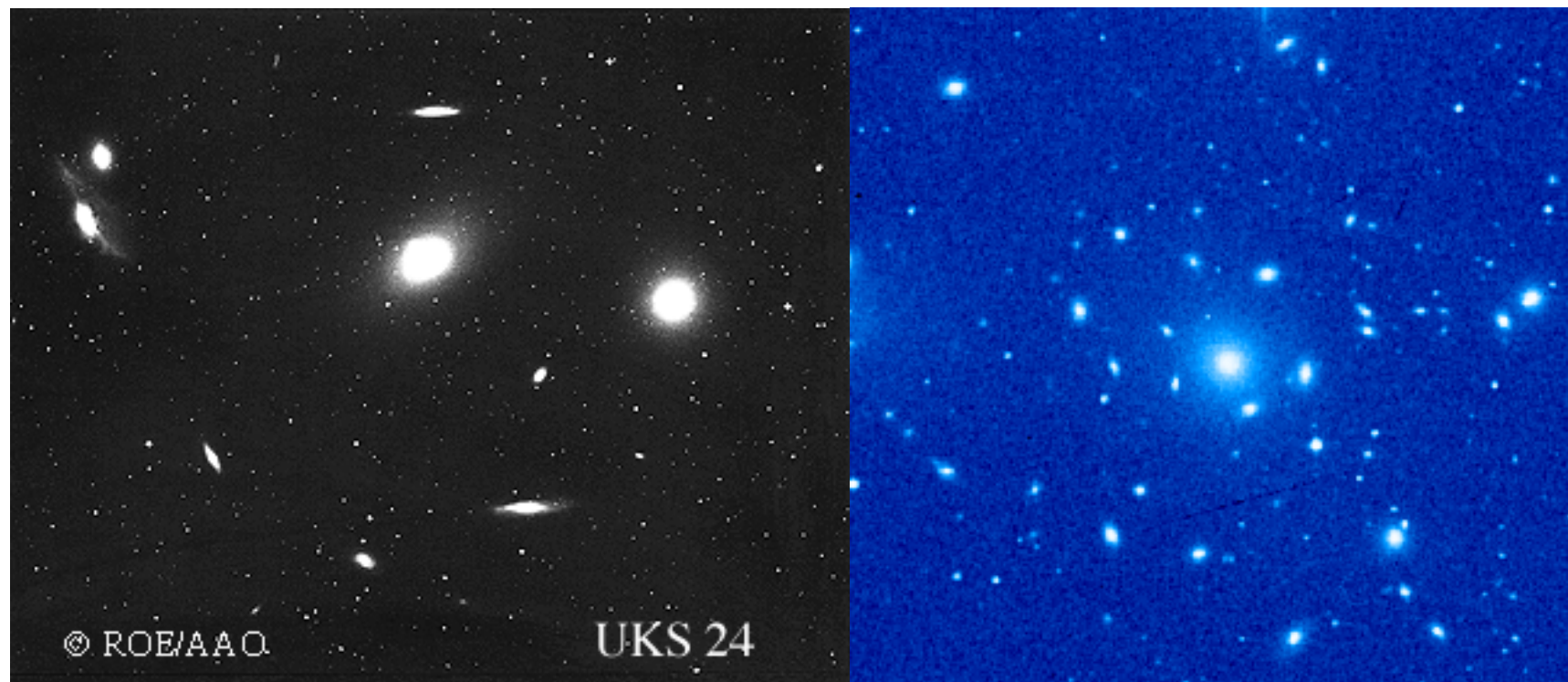


M101

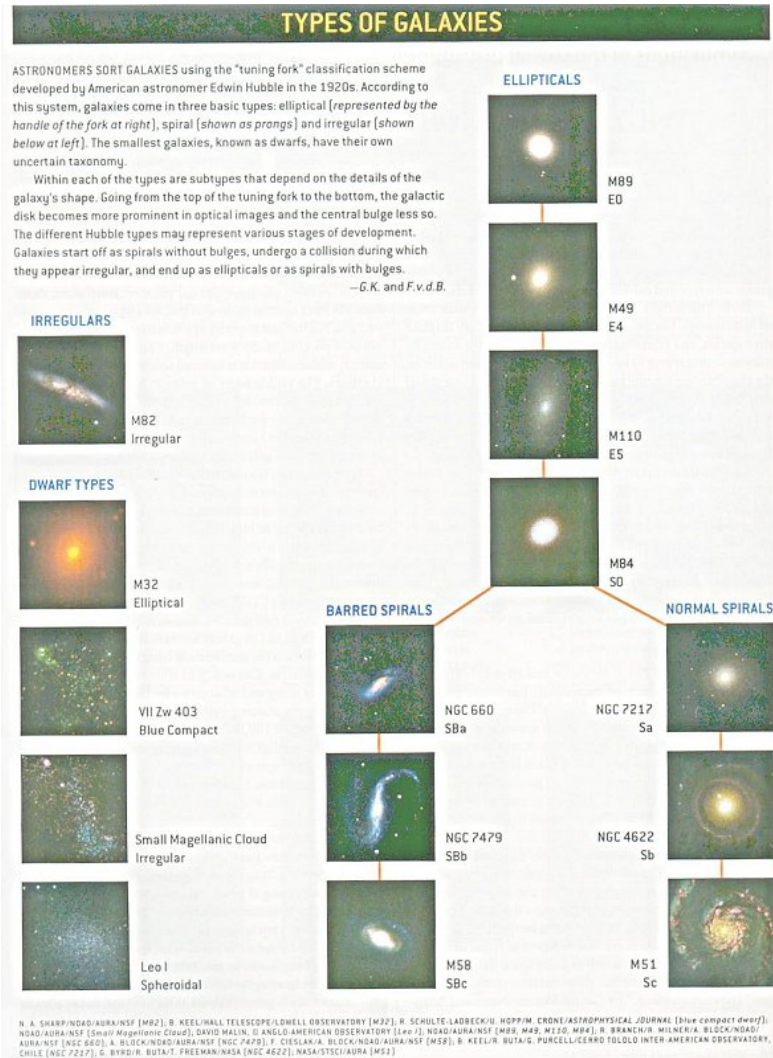


M87

銀河団



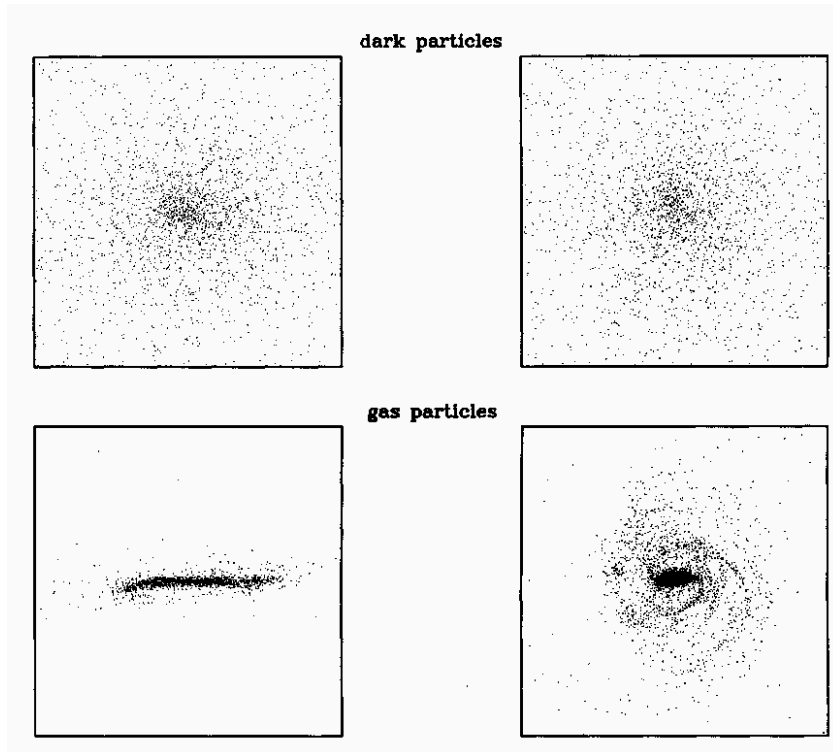
銀河形成シミュレーション



基本的な考え方

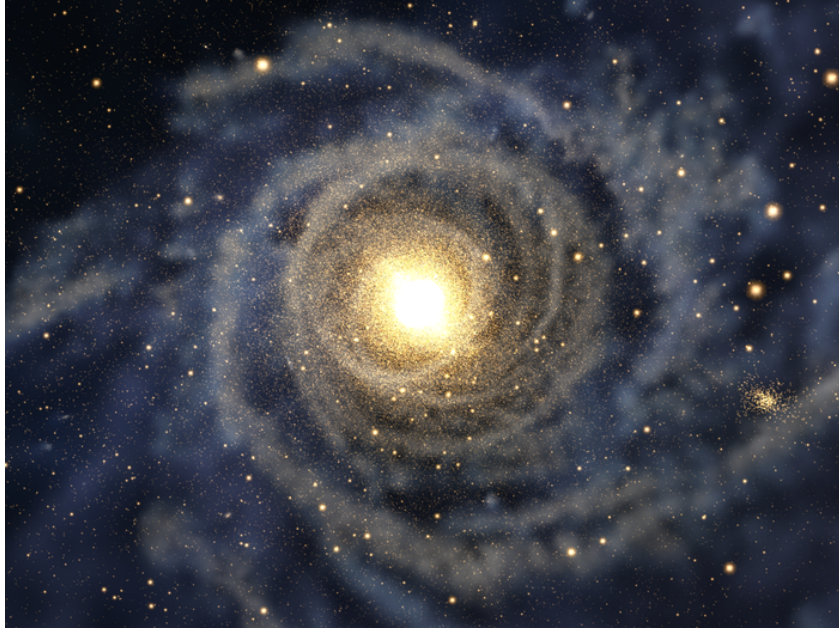
- 宇宙の初期ゆらぎから星形成までを「まるごと」シミュレーション
- 何故銀河には色々あるのか？
どうやってできたのか、を明らかにしたい。

Katz and Gunn 1992



- Dark Matter + ガス + 星
- DM, 星: 粒子、
ガス:SPH 粒子
- 10^4 粒子、Cray YMP
500-1000 時間
- 質量分解能: 10^7 太陽質量
くらい

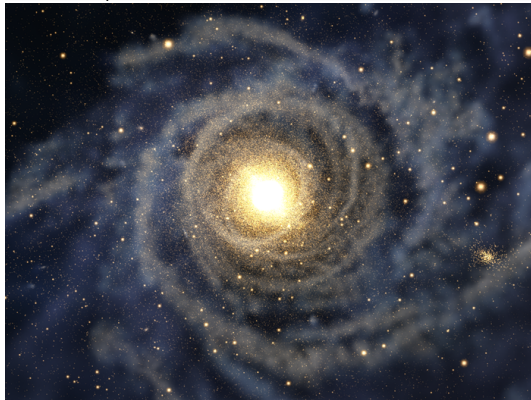
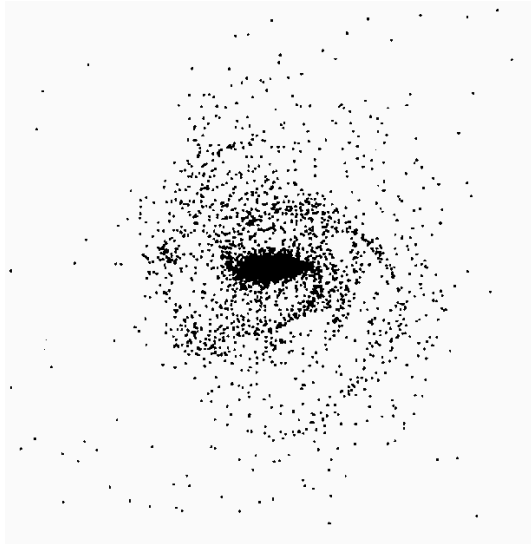
Saitoh et al. 2005



アニメーション

- Dark Matter + ガス + 星
- DM, 星: 粒子、
ガス: SPH 粒子
- 2×10^6 粒子、GRAPE-5
11 ヶ月
- 質量分解能: 10^4 太陽質量
くらい

分解能をあげたことの御利益



- たいして変わらない？
- 実はこの計算では本当はたいして変わらない。
- 本当の利益: サブグリッドの星形成、超新星フィードバックモデルの「精密化」

星形成のモデル

- 星形成シミュレーションに必要な質量分解能: 最低限 10^{-4} 太陽質量くらい
- 現在の銀河形成シミュレーションの最高の分解能: 10^3 太陽質量
- 「適当に」星を作る必要あり
 - ガスの密度、温度、速度場の発散がある条件を満たしていると、「適当な」タイムスケールで星ができる、とするのが普通
 - パラメータ 3 個くらい
 - パラメータの選び方でどんな銀河ができるかが変わる
- 超新星爆発の扱いも同様な問題あり

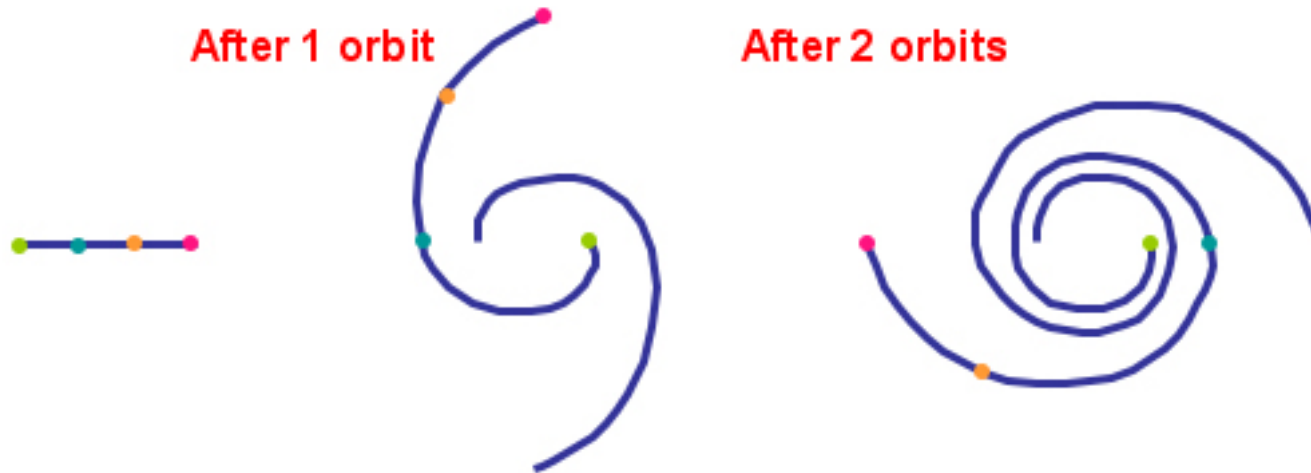
どこまで分解能上げる必要があるか？

- やって見ないと本当はわからない
- 理論的には、「ある程度密度が上がればそこから先は全部星になる」でいいはず
- そういうきざしが見えてきた。

銀河をいきなり作る前に もうちょっと地道に

- 銀河の渦巻構造はシミュレーションで再現できるか？(斎藤君のも実はあんまり渦巻銀河らしくない)
- そもそも銀河の渦巻構造はどういうふうに行っているのか？— これが実は良くわかっていない

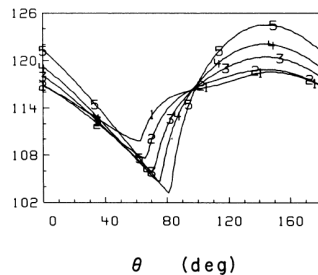
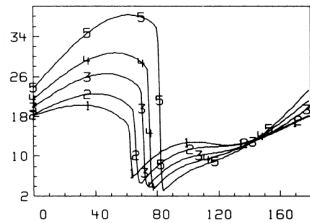
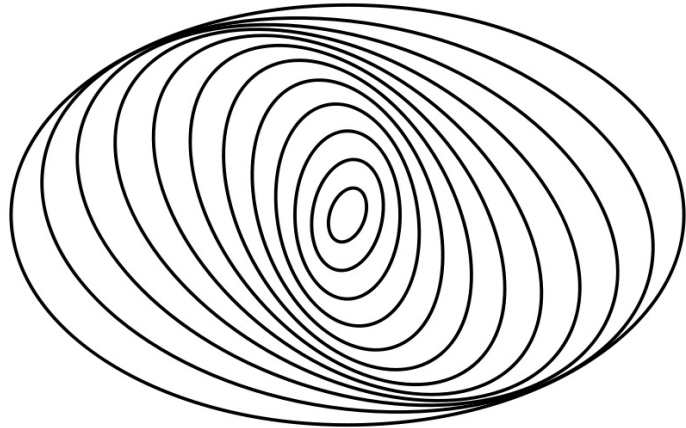
巻き込みの困難



外側のほうがゆっくり回っているので、どんどん巻き込んでいくはずなのに、観測されている銀河の腕はそうになってない

30年くらい前から教科書にのってる理論

— 定常密度波理論



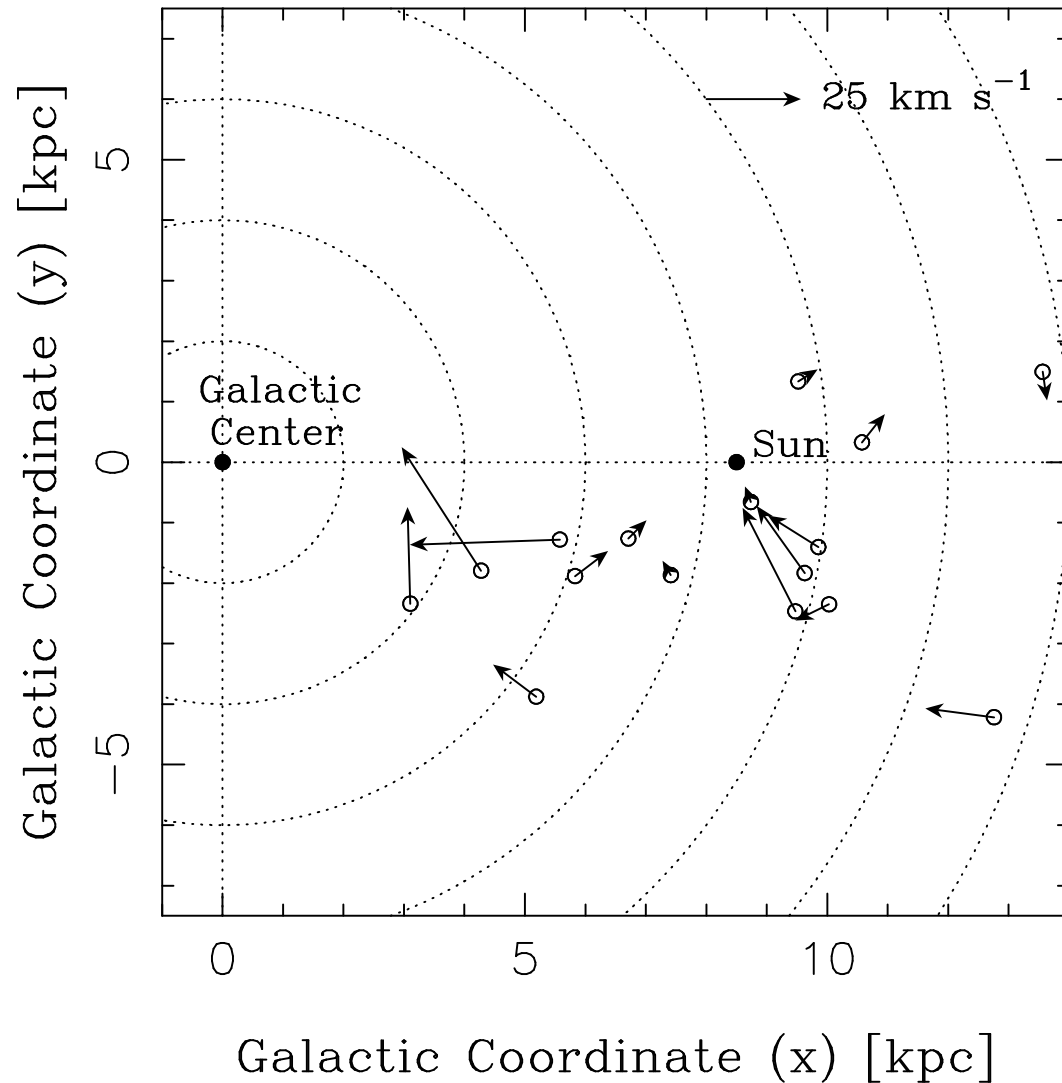
- 左の図のように、「何故か」星は楕円軌道をそろって回っていて、その軸が半径によってずれると「仮定」する
- そう仮定すると時間たっても消えない渦巻構造はできる
- 「何故か」は不明なんだけど、、、
- 他の説も色々あるけどこれが正しいという決定的なものはない
- 数学的には色々議論できるのは密度波理論

良くわかってなかった理由

- 現実の銀河系の中で腕がどう動いているかわかってなかった
- シミュレーションでは長時間腕を維持出来てなかった

最近の観測

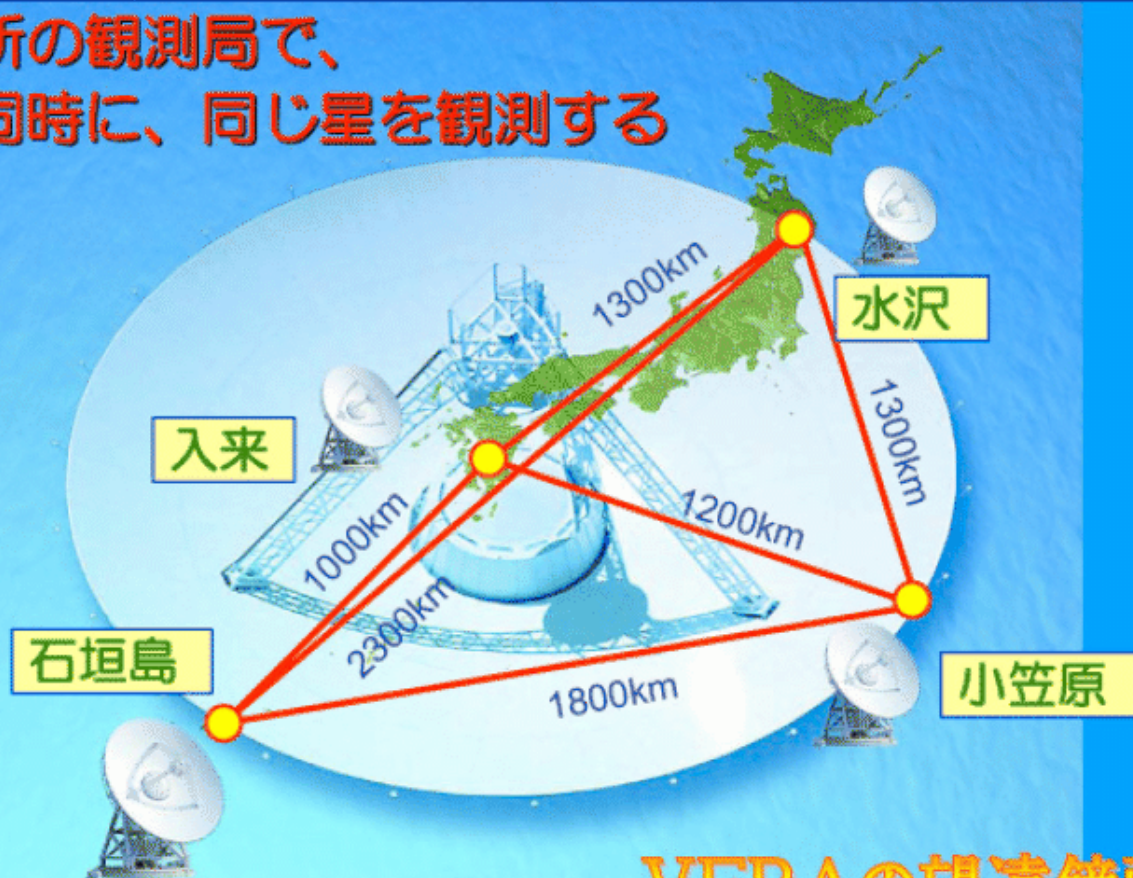
- VLBI (超長基線干渉計) で遠くの星の距離と動く速度を三角測量で決める
- アメリカの VLBA と日本の VERA の観測結果が主
- データ集めたのが右図



VERA

口径2300kmの電波望遠鏡！

4ヶ所の観測局で、
同時に、同じ星を観測する



VERAの望遠鏡配置

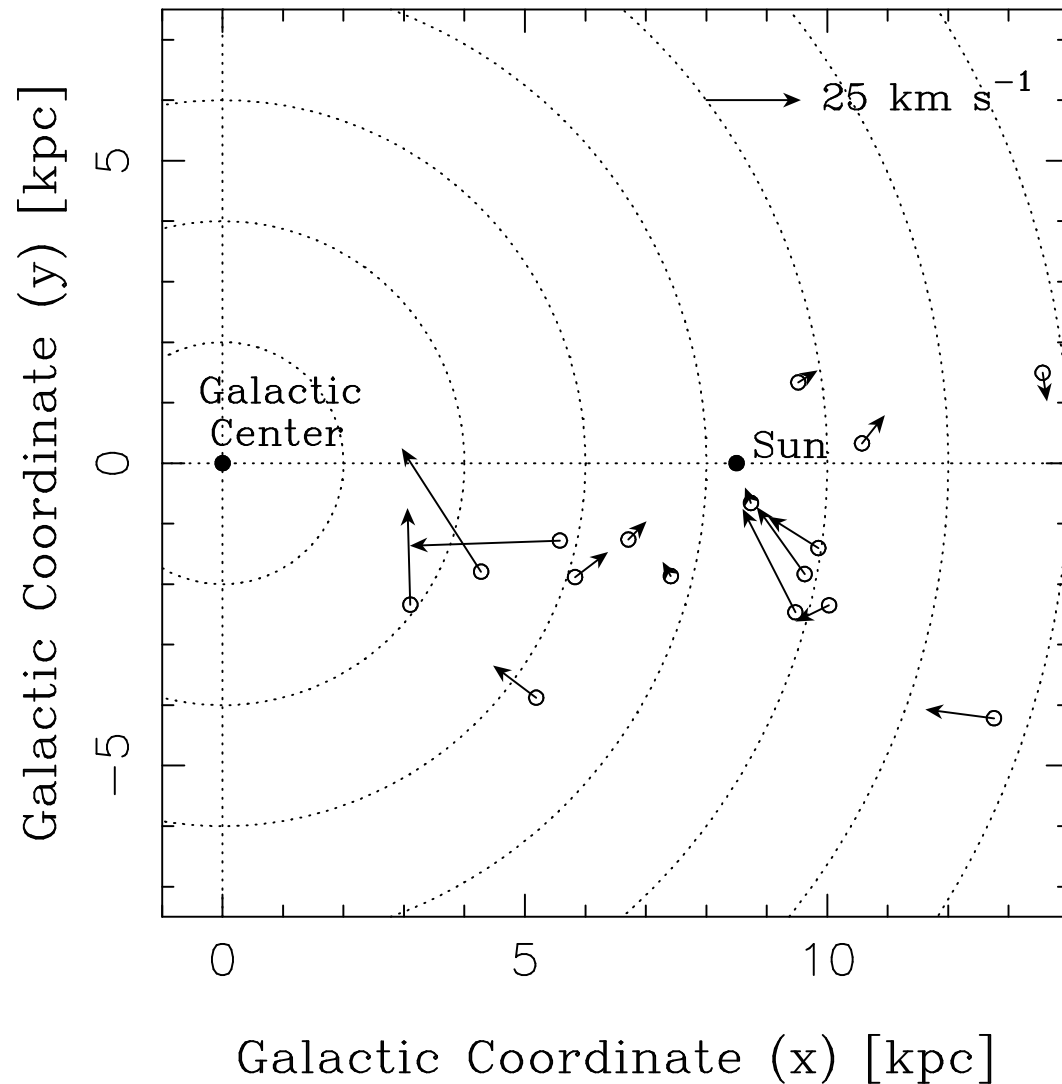
但し

とても大変な観測

- 空間分解能は高いけれど、感度はそんなに高くない
＝ 特別に明るい天体しか見えない
- 三角測量 ＝ 年に何回も観測しないといけない (原理的には最低3回)
- 実はその間に明るい場所が変わったりする
- 望遠鏡の位置、大気による遅延その他の誤差が 1cm 以下でないといけない
- 天体のほうの広がりやその変化の影響もある

最近の観測

- 結構円運動からはずれて動いている
- 定常密度波理論はこういうことはないはず



はて？

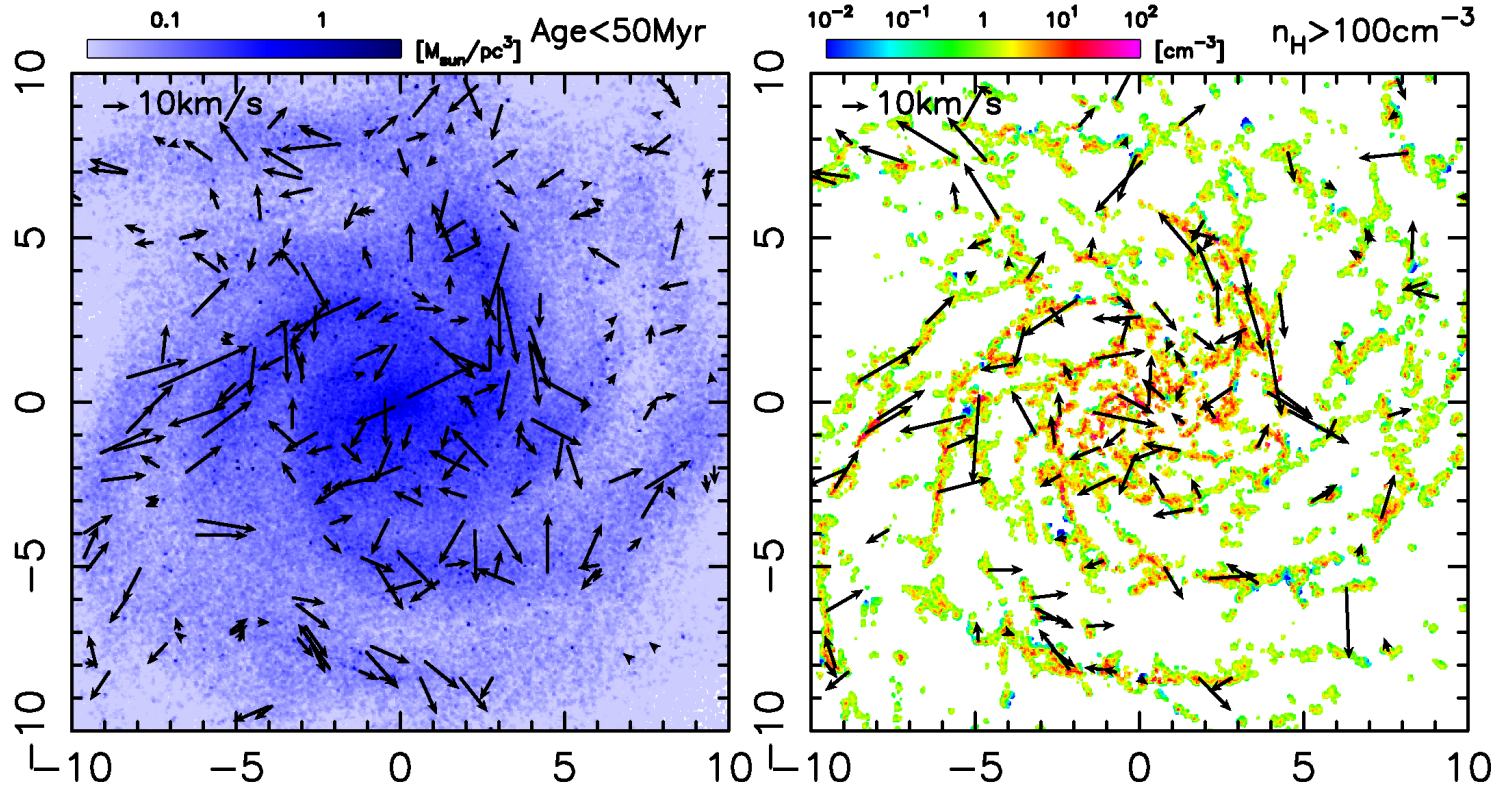
最近のシミュレーション

(馬場他 2009)

animation 1 2 3)

空間構造と、円運動からのずれ

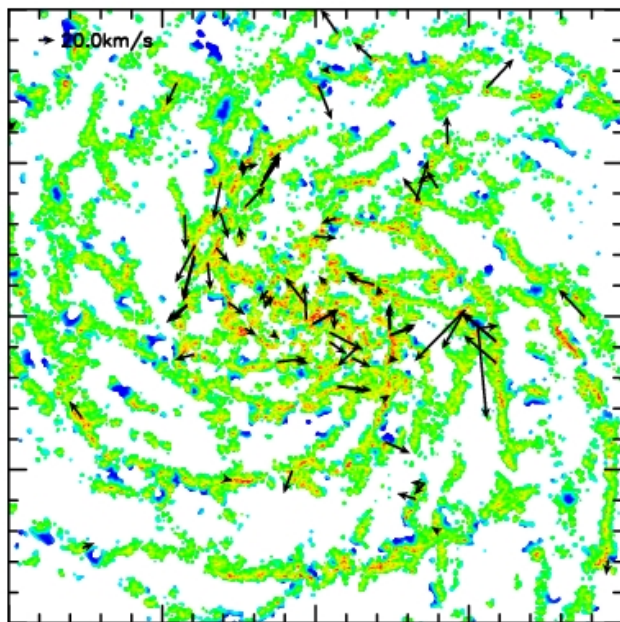
TIME=500Myr



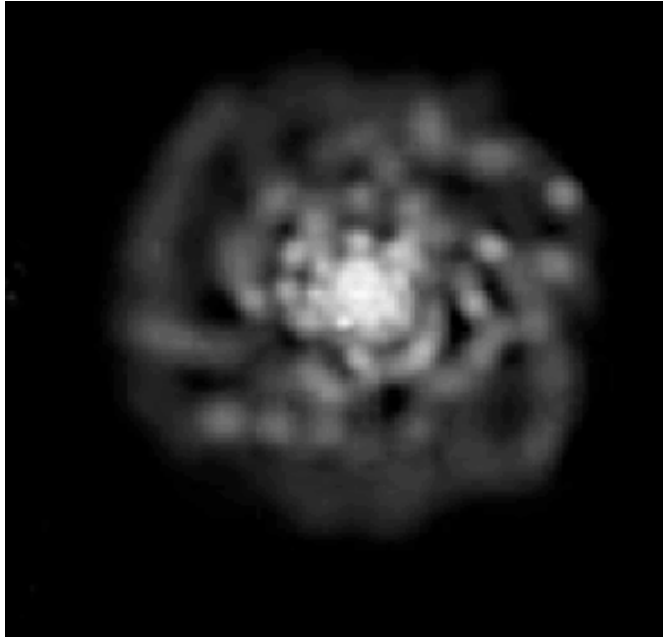
左:星の分布

右: 冷たい星間ガス

観測と比べると



ちょっと昔のシミュレーションは



昔の計算と何が違うか？

昔の計算

- 空間分解能 $\gg 100\text{pc}$
- ガスの温度は1万度以上を保たせる
- 星は $\rho \geq 0.1\text{cm}^{-3}$ (銀河内の平均密度くらい) ができる
(こうしないと計算できなかった)

最近の計算

- 空間分解能 $\sim 10\text{pc}$
- ガスは絶対温度 20K まで冷却できる
- 星は $\rho \geq 100\text{cm}^{-3}$ (まあ分子雲くらい) ができる

数値計算法の色々な改良(というか、原理的に問題があったところの修正等)で可能になった。

星の運動を見ると

motion of stars
motion in $E - L_z$ plane

- 渦状腕は常に新しく作りだされる
- 星は半径方向にかなり大きく動く

星だけの円盤の計算

(藤井他 2010)

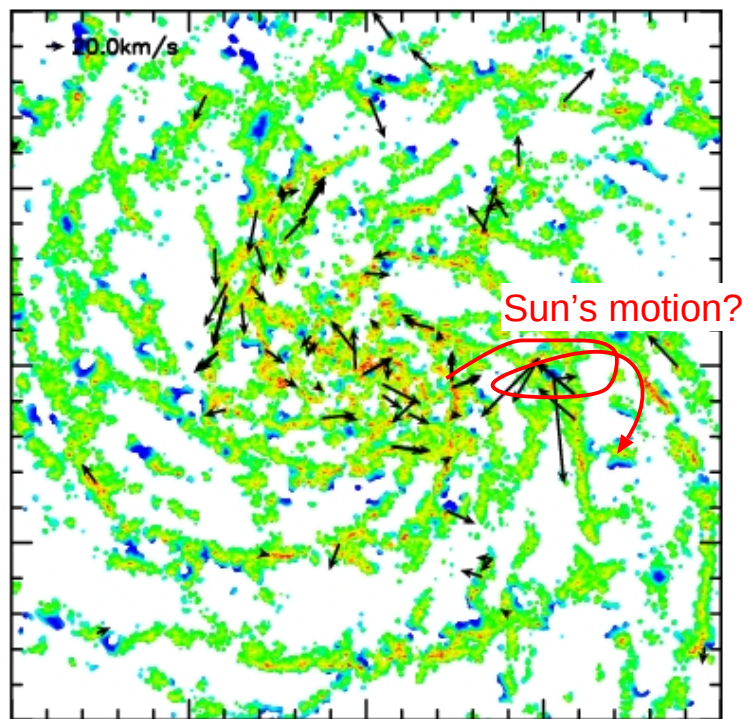
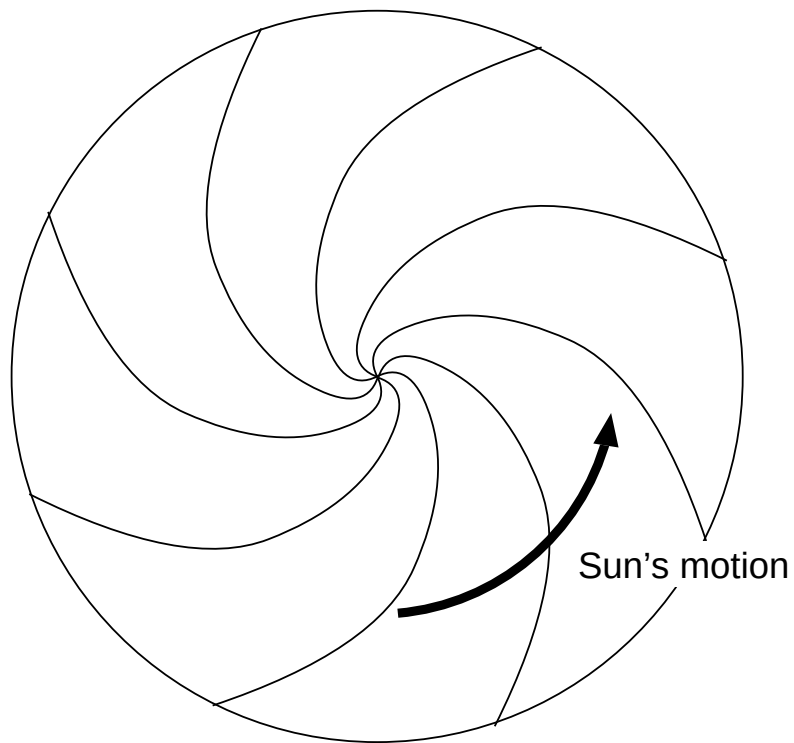
Animation a1

Animation a2

Animation b1

- 軸対称な、腕がないところから計算始める
- 腕は勝手にできて、100 億年くらいはきえない
- ある種の定常状態になっている

従来の見方と新しい見方



ここまでのまとめ

- 銀河の渦巻構造についての理解はここ数年で全く変わりつつある。
- 渦巻は時間定常な構造ではなく、常に生成消滅している。
- いわゆる「巻き込みの困難」は、常に新しい腕を作り出すことで解決された。
- 星もガスも単純な円軌道ではなく複雑な運動をする

こういう研究は何かの役に立つのか？

これは、基礎科学・理学は何か役に立つのか？という話

といっても、例えば素粒子物理と宇宙物理では、社会に対しての貢献のありかたはそもそも違うのでは？それ以前に、科学の目指すものが違う？

- 素粒子物理：物理法則自体の探求、基本法則から素粒子の性質を明らかに
- 宇宙物理：色々。でも、基本的には、既知の物理法則を使って宇宙の様々な現象を理解

物理の場合

少なくとも 20 世紀前半までの成果:結果として「役に立った」のは間違いない

- 量子力学: 様々な技術の基礎
- 原子核物理: 原子力とか (役に立ってるかどうかは議論があるかも)

宇宙物理は？

「役に立つ」たちかたは多分2種類

- 得られた知識自体が役に立つ
- 方法論、ツールが役に立つ

銀河系がどうできたか、という話が直接何か役に立つとは思えないが、役に立つとは思えなかったものが役に立った例はある

役に立った知識の例：核の冬

核戦争によって発生し、成層圏まで巻き上げられる大量のエアロゾルが、太陽光をさえぎることで極端な気候変化を起こし、生態系、社会に壊滅的な打撃を与える、というシミュレーション予測

- 提唱者：Carl Sagan (「コスモス」の) 他、惑星科学者。元々、火星や金星大気の研究をしていた。特に火星のダストストームとかを研究していた。
- 惑星大気の研究で得られた、非常に広い範囲での気候モデル (例えばエアロゾル量が現在の大気より何桁も大きいとか) を、地球の気候に適用
- 「限定」核戦争でも、全地球的・壊滅的な影響をもちえることを指摘

役に立った知識の例：核の冬

核戦争によって発生し、成層圏まで巻き上げられる大量のエアロゾルが、太陽光をさえぎることで極端な気候変化を起こし、生態系、社会に壊滅的な打撃を与える、というシミュレーション予測

- 提唱者：Carl Sagan (「コスモス」の) 他、惑星科学者。元々、火星や金星大気の研究をしていた。火星のダストストームとかを研究していた。
- 惑星大気の研究で得られた、非常に広い範囲での気候モデル (例えばエアロゾル量が現在の大気より何桁も大きいとか) を、地球の気候に適用
- 「限定」核戦争でも、全地球的・壊滅的な影響をもちえることを指摘

ひょっとすると、人類を救ったのかもしれない

もっともらしくいうと:

宇宙物理: 他の自然科学ではあまり考えないような、極端に広い範囲を変化する物理量を扱う

その結果

- 予想もしていなかった、重要な知識が得られる
「こともある」
- どこから重要な知識がでてくるか予想できるような気がしないので、おそらく、色々やっておくくらいしかない。

もっともらしくいうと:

宇宙物理: 他の自然科学ではあまり考えないような、極端に広い範囲を変化する物理量を扱う

その結果

- 予想もしていなかった、重要な知識が得られる
「こともある」
- どこから重要な知識がでてくるか予想できるような気がしないので、おそらく、色々やっておくくらいしかない。

つまり:

今のやることが役に立つかわからない。でも、やってないと人類が滅亡するかも。

もっともらしくいうと:

宇宙物理: 他の自然科学ではあまり考えないような、極端に広い範囲を変化する物理量を扱う

その結果

- 予想もしていなかった、重要な知識が得られる
「こともある」
- どこから重要な知識がでてくるか予想できるような気がしないので、おそらく、色々やっておくくらいしかない。

つまり:

今のやってることが役に立つかわからない。でも、やってないと人類が滅亡するかも。

(基礎科学やってなければ核爆弾もなかったかも、、、)

もっともらしくいうと:

宇宙物理: 他の自然科学ではあまり考えないような、極端に広い範囲を変化する物理量を扱う

その結果

- 予想もしていなかった、重要な知識が得られる
「こともある」
- どこから重要な知識がでてくるか予想できるような気がしないので、おそらく、色々やっておくくらいしかない。

つまり:

今のやっтерることが役に立つかどうかわからない。でも、やってないと人類が滅亡するかも。

(基礎科学やってなければ核爆弾もなかったかも、、、)

これは、2010年3月のHPCI戦略プログラム分野5のシンポジウムでした話

あとまあ、時々聞くような話

- スペースシャトル チャレンジャー事故の時のファインマンの役割
- ブースターの設計上の欠陥であった Oリングの低温時の機能低下を事故調査委員会で指摘
- 理論物理学者の偏見のない視点が役に立った、みたいな
- まあ、たまたまじゃなかったかという意見もある

というわけで

福島原発事故の時に基礎科学(者)は 何か役に立ったか

- 事故の経緯
- 個人的なにか
- もうちょっと色々

3/11-18 における (当時の報道・発表資料 による) 事故の進展 (1) 3/11

3/11 18:28 時事通信

経済産業省原子力安全・保安院によると、11日午後の地震の影響で、福島第一原発の原子炉を冷却するための機能が作動していないという。

3/12 1:52 朝日

東日本大震災で、炉心を冷やす緊急炉心冷却システム（ECCS）が動かなくなった福島第一原子力発電所の1号機について、東京電力は12日未明、原子炉格納容器の圧力が高まっているため、容器内の放射能を含む蒸気を放出する作業を検討していることを明らかにした。

3/12

3/12 NHK (記事は消えてます)

- セシウム 137 を建屋の外で検出
- 核燃料棒を束ねた「燃料集合体」が、最大で1メートル70センチほど露出している

15:30 1号機の爆発



朝日 3/12 19:11

一方、保安院によると、爆発音のあった後に、1号機の原子炉格納容器の圧力が急激に下がってきたという。格納容器の破損を防ぐため、弁を開けて内部の空気を抜く作業が効果を上げたのか、他の要因かは不明だ。

空気とともに容器内の放射性物質も外部に放出されたとみられ、放射線の観測値は上昇している。

3/13

以下読売の見出しだけ

- 福島第一原発事故、深刻度「レベル4」以上か (3月13日 01:51)
- 原発海水注入「あと数時間で満杯」福山副長官 (3月13日 03:46)
- 福島第一3号機、圧力下げる弁の開放に成功 (3月13日 09:59)
- 福島第一3号機、冷却水位下がり燃料棒が露出 (3月13日 12:57)
- 福島第一3号機も原子炉に海水注入開始 (3月13日 15:05)
- 福島第一3号機建屋も水素爆発の恐れ (3月13日 23:48)

3/14

- 福島第二原発1・2号機、冷却システム回復 (3月14日 10:36)
- 福島第一原発の半径20km住民に屋内退避指示 (3月14日 11:45)
- 爆発の3号機、格納容器は健全…枝野官房長官 (3月14日 11:51)
- 爆発3号機、放射性物質拡散の恐れも (3月14日 11:55)
- 爆発3号機、中性子計測されず…東電 (3月14日 12:07)
- 爆発した3号機、放射線量は小さな程度 (3月14日 12:24)
- 原発3号機も水素爆発、炉心溶融の可能性 (3月14日 13:20)
- 福島第一2号機も冷却機能が停止 (3月14日 15:24)
- 米空母のヘリ乗員17人から放射線検出 (3月14日 19:39)
- 東電「海水注入で炉内水位上昇」…第一2号機 (3月14日 20:58)

3/15

- 福島第一2号機、燃料棒すべて露出…冷却水消失 (3月15日 02:38)
- 福島第一原発正門で中性子線検出、3号機からか (3月15日 03:30)
- 福島第一原発2号機、水位回復せず…空だき続く (3月15日 07:34)
- 福島第一原発2号機で水位回復、露出2・8m (3月15日 08:52)
- 爆発音の2号機、何が起きた?…専門家の見方 (3月15日 11:08)
- 福島第一4号機で火災、爆発音も…屋根には損傷 (3月15日 11:46)
- 福島原発近くの風向きは北関東方向へ (3月15日 12:08)
- 爆発の2号機、燃料棒が2度にわたり完全露出 (3月15日 14:02)

3/16

- 福島第一1号機、核燃料の7割破損…東電試算 (3月16日 03:09)
- 第一原発事故はレベル6または7…米機関が見解 (3月16日 09:56)
- 福島第一原発で放射線上昇、自衛隊ヘリで消火へ (3月16日 13:26)
- 炉心冷却装置の復旧へ、新送電線着工 (3月16日 14:31)

3/17-18

- 東電謝罪、2号機の異常データは単位換算ミス (3月17日 01:19)
- 警視庁高圧放水車投入へ…冷却水枯渇止める！ (3月17日 06:52)
- 陸自へり、3号機に水投下…海水くみ上げ4回 (3月17日 09:55)
- 4号機プール内に大量の水、自衛隊へり確認 (3月17日 13:01)
- 冷却装置回復へ、原発に送電線引き込み工事開始 (3月17日 13:25)
- 福島第一原発の深刻度「レベル5」に引き上げ (3月18日 18:01)

当時私が思ったこと

3/11: ECCS が動作しなくなった → 炉心溶融は避けられないのではないか？

3/12: 1号機水素爆発「格納容器は爆発していない」→ ??

3/13: 3号機「水素爆発」「格納容器は爆発していない」→ ???

- 原子炉は本当はどうなってるんだろう？(本当は壊れてんじゃないのか？)
- 一体どれだけの放射性物質がどんなふうに出たんだろう？(すごい量の放射性物質がでてんじゃないか？)
- どうすればなにかどうなってるかわかる？

原子力安全基盤機構の シミュレーション結果

10 原シ報 - 0003
JNES/NSAG10 - 0003

平成21年度
地震時レベル2 P S Aの解析（BWR）

平成22年10月

独立行政法人 原子力安全基盤機構

3/13 に BWR の構造、事故のモデル
とかの資料がないかと調べていたら、
原子力安全基盤機構の報告書というの
を見つけた。

読んで見ると大体何が書いてあるかわ
からなくもない

原子力安全基盤機構報告書サイト(1)



JNESのご紹介



広報誌・年報



技術情報



情報公開・提供

技術情報



[ホーム](#) > [技術情報](#) > [成果報告書](#) > 原子力システム安全部の一覧
2009年度

このページを印刷する

成果報告書に戻る

原子力システム安全部の一覧 2009年度

報告書表題【平成21年度】

報告書

ダウンロード

BWR プラント統計的安全評価手法の整備＝不確か
さ解析機能の組込みと実機ベンチマーク問題解析
＝

10原熱報
-0001

[目次](#)
[全文](#)
(4.60MB)

三次元核熱動特性解析コードによるRIA 解析機能
の整備

10原熱報
-0003

[目次](#)
[全文](#)
(2.12MB)

技術情報

- 検査等の結果
 - ▶ 定期安全管理審査の結果
 - ▶ 検査等実績
- 保安活動総合評価結果
- 規格基準整備
 - ▶ 発電用原子力設備に関する
技術基準を定める省令と解
釈に対する解説
 - ▶ 学協会規格の技術評価
 - ▶ IAEA安全基準邦訳データ
ベース
- トピカルレポートの技術評
価
- 安全研究計画

原子力安全基盤機構報告書サイト (2)

地震時レベル2PSA 手法の整備 (PWR)	10原シ報 -0002	目次  全文  (3.39MB)
地震時レベル2PSAの解析(BWR)	10原シ報 -0003	目次  全文  (5.13MB)
地震時のレベル3PSAの検討 = 不確実さ解析手法 の検討 =	10原シ報 -0004	目次  全文  (1.74MB)
シビアアクシデント時原子炉冷却系内多次元熱流 動及びFP挙動解析	10原シ報 -0005	目次  全文  (6.68MB)
シビアアクシデント時格納容器内多次元熱流動及 びFP挙動解析	10原シ報 -0006	目次  全文  (5.36MB) 付録  (2.29MB)

「地震時レベル 2PSA の解析 (BWR)」

「地震時レベル2PSAの解析」って何？

- 「地震時」 これは意味は明快
- 「レベル2」 これはなんか知らないけどとりあえず知らなくても大丈夫そう？
- 「PSA」 ???

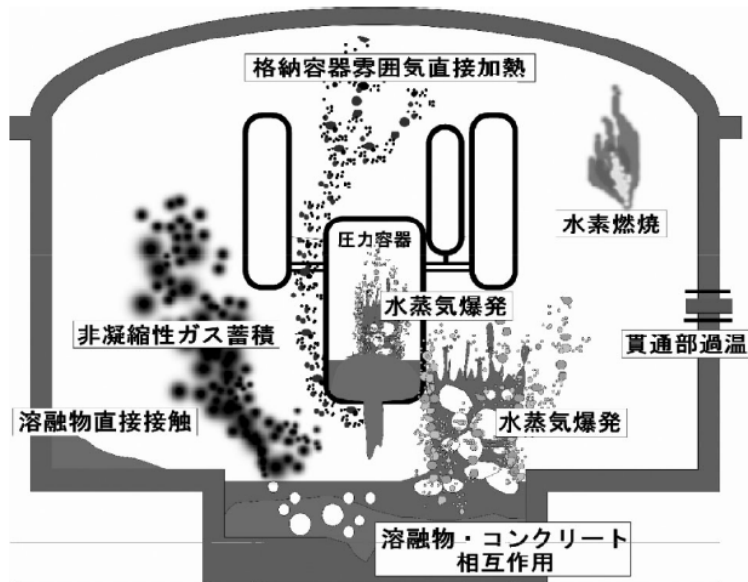
PSA: 「確率的安全評価」

大雑把にいうと、起こりそうな事故シーケンスについて、その確率を評価する。

評価する方法: 基本的には数値シミュレーション (実験なんかできない)

解説記事から

連載講座「軽水炉の確率論的安全評価 (PSA) 入門」第5回 内的事象レベル2PSA (梶本、日本原子力学会誌 2006, Vol 48, No 8)



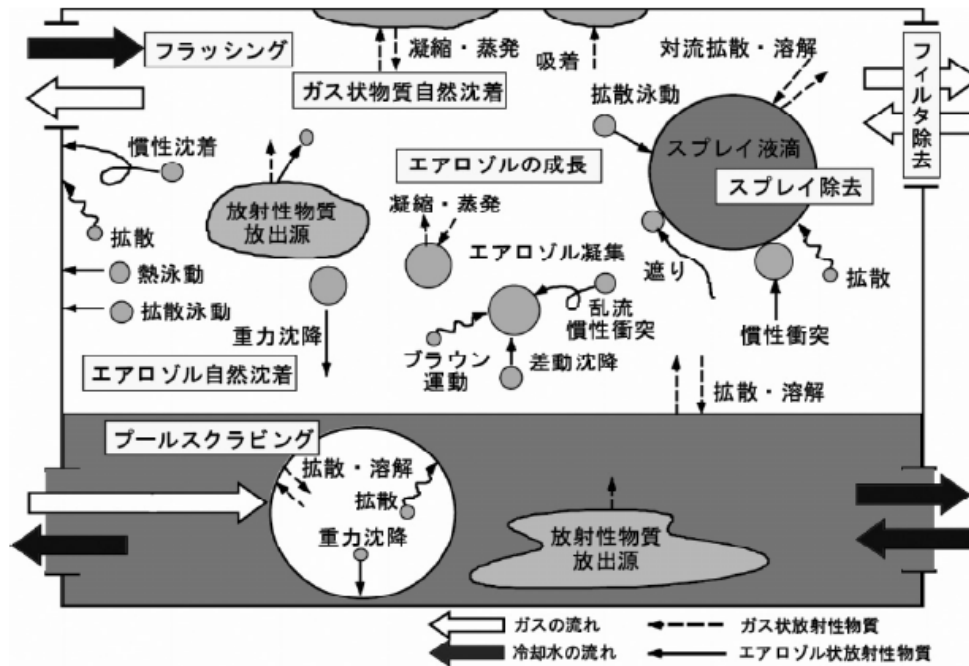
解析対象になるプロセス:

炉心損傷(燃料溶融)の後に起こると想像されるいろんなもの。

水蒸気爆発、水素爆発、格納容器破壊、等。

解説記事から (2)

放射性物質の挙動 本文から:



炉心が著しく損傷すると、希ガス、ヨウ素、セシウム等の揮発性の高い放射性物質が、燃料から原子炉冷却系へ放出される。ヨウ素またはセシウムは、 CsI または CsOH 等の化合物を形成して蒸気圧が低下し、原子炉冷却系配管部に運ばれる頃には大部分がエアロゾル化する。

ストロンチウム等の難揮発性の物質は、高温領域でもエアロゾルになる。

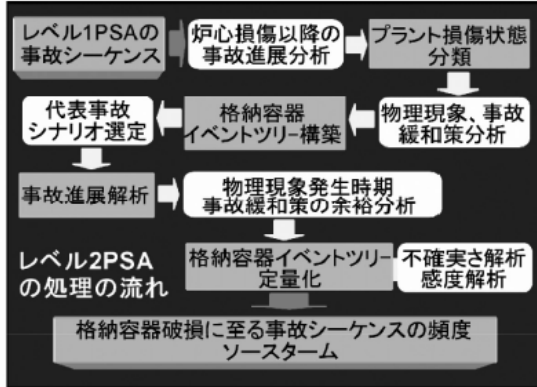
解説記事から (3)

このような放射性物質を含むエアロゾルの一部は、雰囲気ガスの流れで原子炉冷却系内を移動して、配管破断口または弁開口部から格納容器雰囲気中へ放出される。一部のエアロゾルは、重力沈降、熱泳動、拡散泳動、慣性衝突等によって構造物および配管表面等に沈着する。

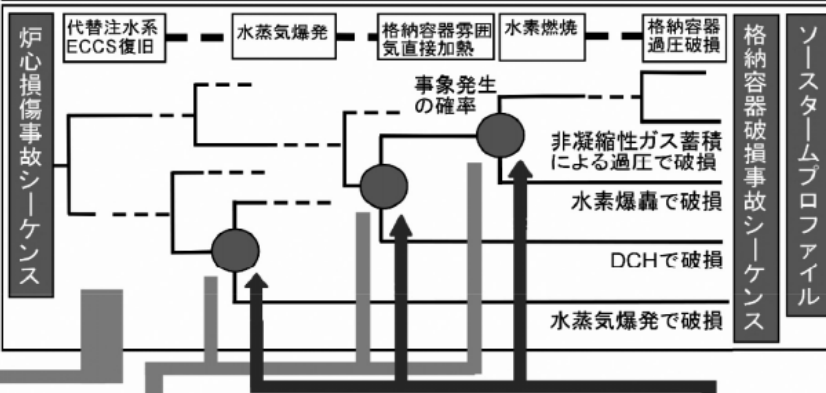
原子炉圧力容器が破損して溶融物が格納容器に流出する状況になると、溶融物とコンクリートとの反応に伴って、溶融物から放射性物質が放出される。これらの放射性物質を含むエアロゾルは、凝集によって粒子径が急速に大きくなり、構造物表面へ沈着する。

計算機シミュレーション

レベル2PSA手法



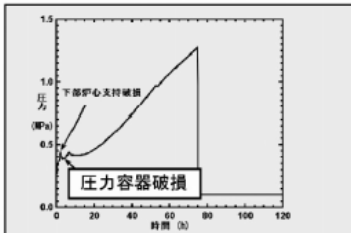
格納容器イベントツリーを用いた炉心損傷後の事故シーケンスの分類



解析コード・データベース

シビアアクシデント総合解析コード

格納容器イベントツリーの事故シーケンスに沿って熱水力挙動及び放射線物質挙動を解析し、事象発生タイミング等から復旧操作等の時間的余裕及びソースタームを調べる。



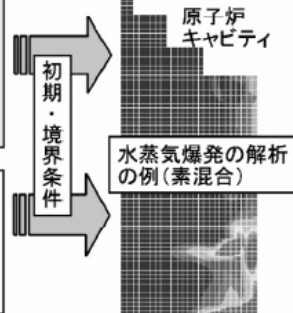
国内外の試験・解析結果

国内水素挙動試験
OECD/NEA国際協力プロジェクト
2国間協定の国際協力計画共同体
CSARP等の国際協力プロジェクト

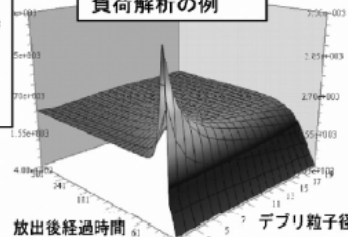
現象の詳細解析コード

水蒸気爆発、格納容器雰囲気直接加熱（DCH）、水素燃焼・爆燃・爆轟等の物理化学的現象に対して、動的圧力負荷に対する構造物応答及び不確実さ伝播を解析する。

現象の詳細解析



DCH時の格納容器負荷解析の例



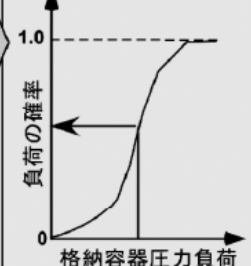
水素燃焼時の格納容器負荷解析の例



分岐確率の解析（不確実さ伝播解析）

水蒸気爆発、格納容器雰囲気直接加熱（DCH）、水素燃焼・爆燃・爆轟等の物理化学的現象に対して、不確実さ伝播解析等で格納容器負荷の発生確率を解析する。

負荷の確率分布



というわけで

レベル 2PSA 解析:簡単にいうと、

代表的なイベントツリーにそってイベントの詳細な数値解析をして、
どんなふうに原子炉が破壊されてどれくらいの放射性物質がでるかを
予測する

シミュレーションには 1970 年代からの歴史があり、 BWR 電源喪失については基本的に同じ結果が当初から得られているが、今日は安全基盤機構の最新レポートベースで。

解析対象になっていた原子炉

- BWR-3
- BWR-4 (50 万 kW 電気出力) (1 号機?)
- BWR-4 Mark-I (福島第一 2-4 号機)
- BWR-5 Mark-II (福島第一 5,6 号機?)
- ABWR RCCV(浜岡 5 号機)

BWR-4 (50万kW 電気出力) の代表的事故シーケンス

- 電源喪失 (TBU)
- インターフェース LOCA(V)
- 大 LOCA 時未臨界確保失敗 (AC)
- 小 LOCA 時未臨界確保失敗 (S2C)

LOCA: Loss of Coolant Accident, 原子炉冷却材喪失事故

ちなみに：インターフェースLOCA とは

余熱除去系統は、余熱除去ポンプ、燃料取替用水タンク、配管、弁等からなる。今、何らかの理由により RCS と余熱除去系の間の圧力バウンダリを構成する隔離弁が破損あるいはリークし、RCS の高い圧力が、耐圧の低い余熱除去系配管にかかり、その配管の破断が格納容器外で生じる事故を考える。これは余熱除去系隔離弁破断LOCA（インターフェイスLOCA）と呼ばれる。事故発生後、原子炉は制御棒挿入により停止するが、冷却材が格納容器の外で漏えいしているため格納容器再循環サンプに水が溜まらず、再循環運転ができない、さらに、余熱除去系配管破断のため低圧注入系が使えない、と仮定する。

（東大工学部レポート課題から）

シミュレーション可視化の例

動画で見る炉心溶融

独立行政法人・原子力安全基盤機構が事故前に、原子力防災専門官向け資料として作成していた、炉心溶融のシミュレーション画像。

原子炉の構造

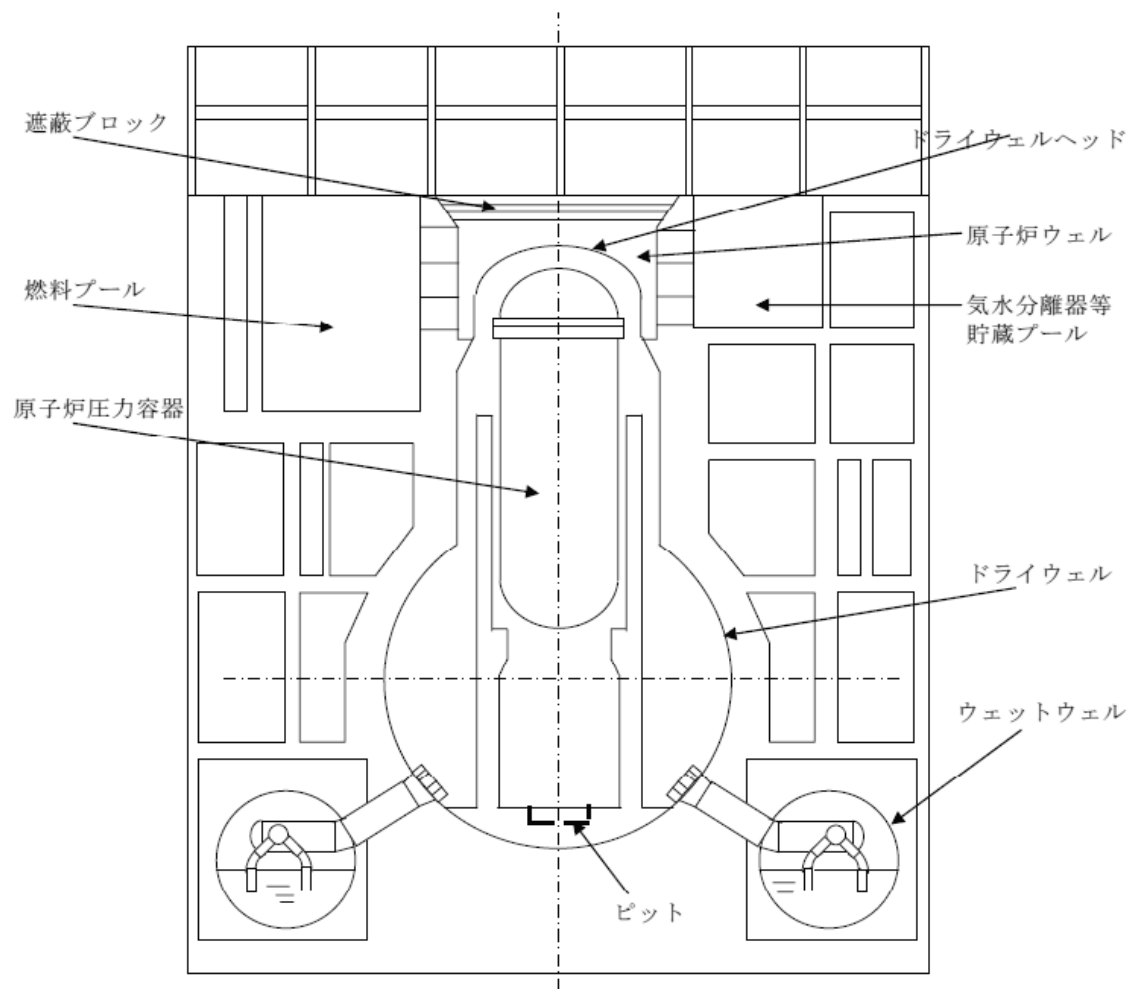
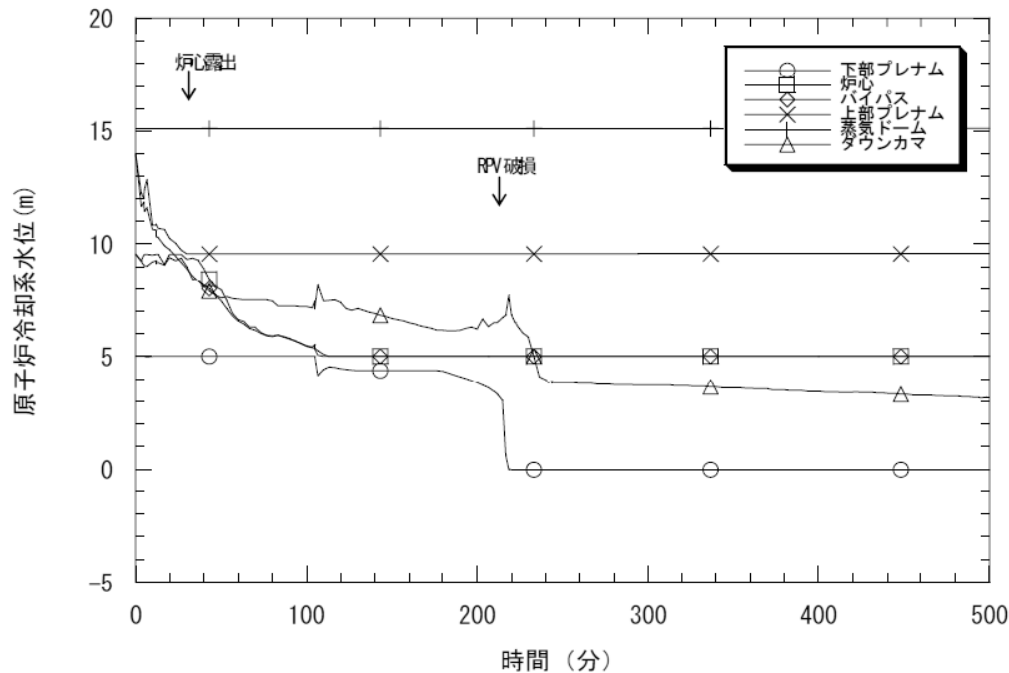


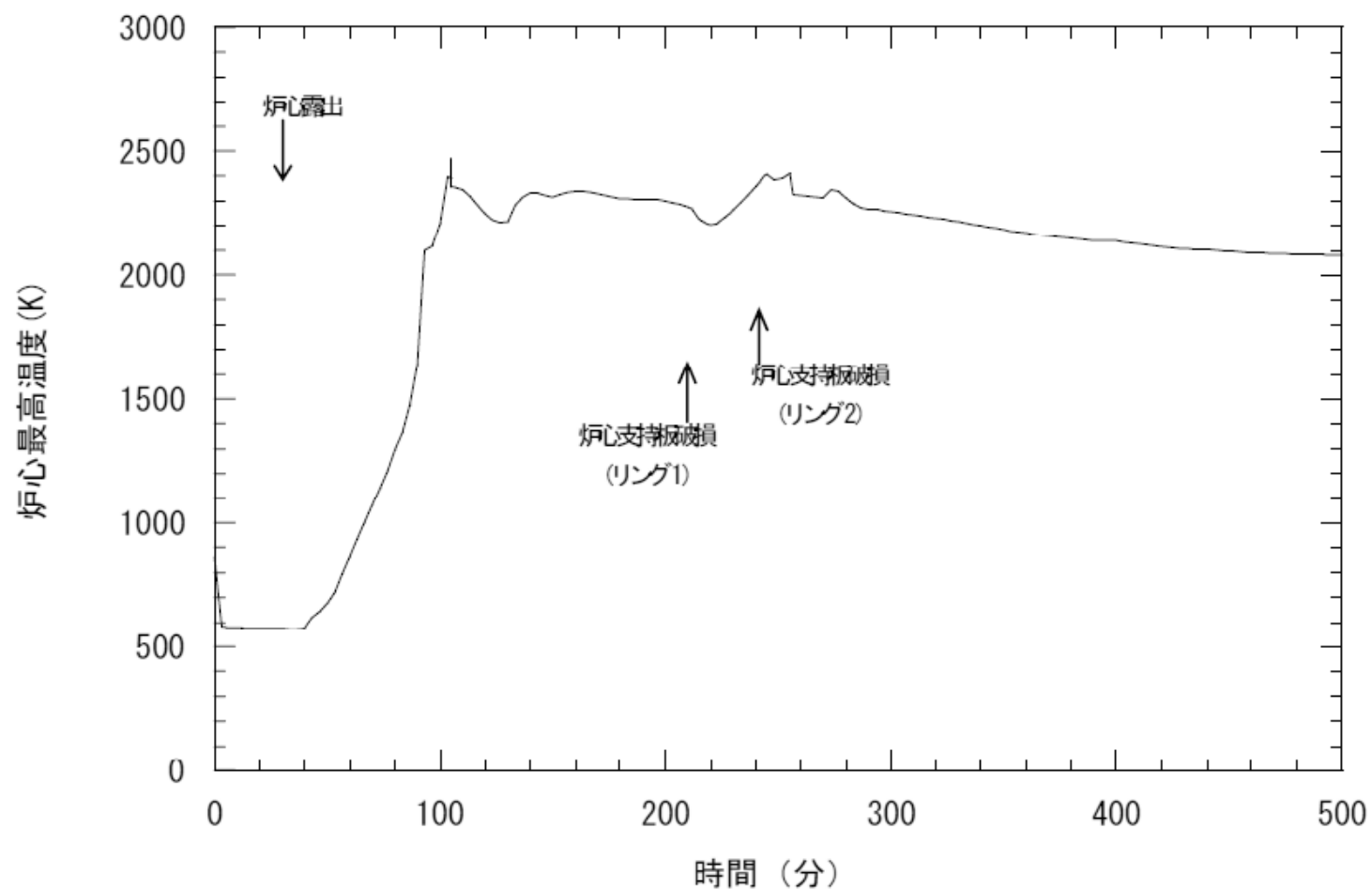
図 2.6 BWR-4 MarkI 型の原子炉建屋概要図

電源喪失のシミュレーション結果詳細 (BWR-4の場合)

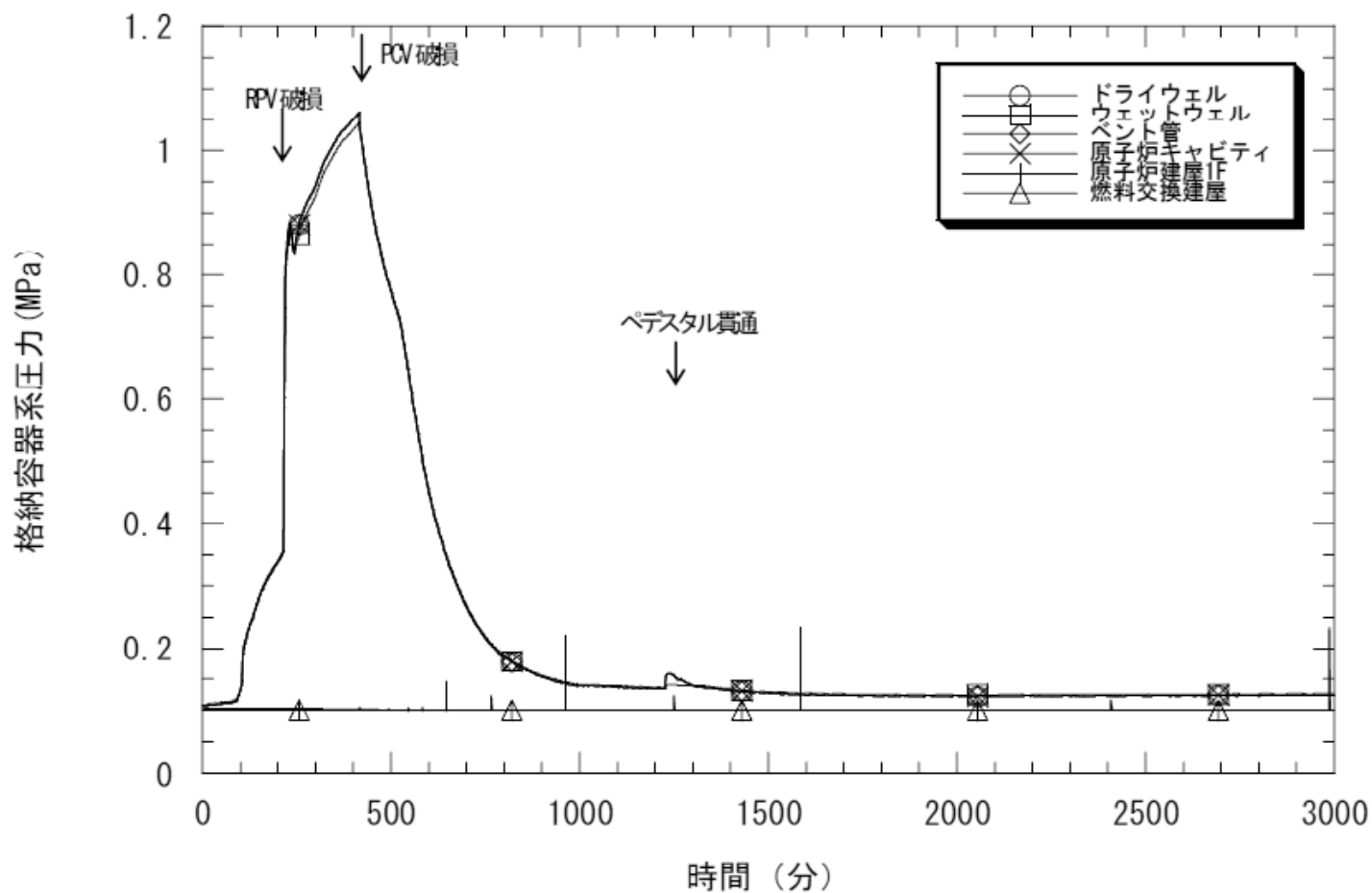


- 1 時間で炉心露出
- 3 時間で圧力容器破壊

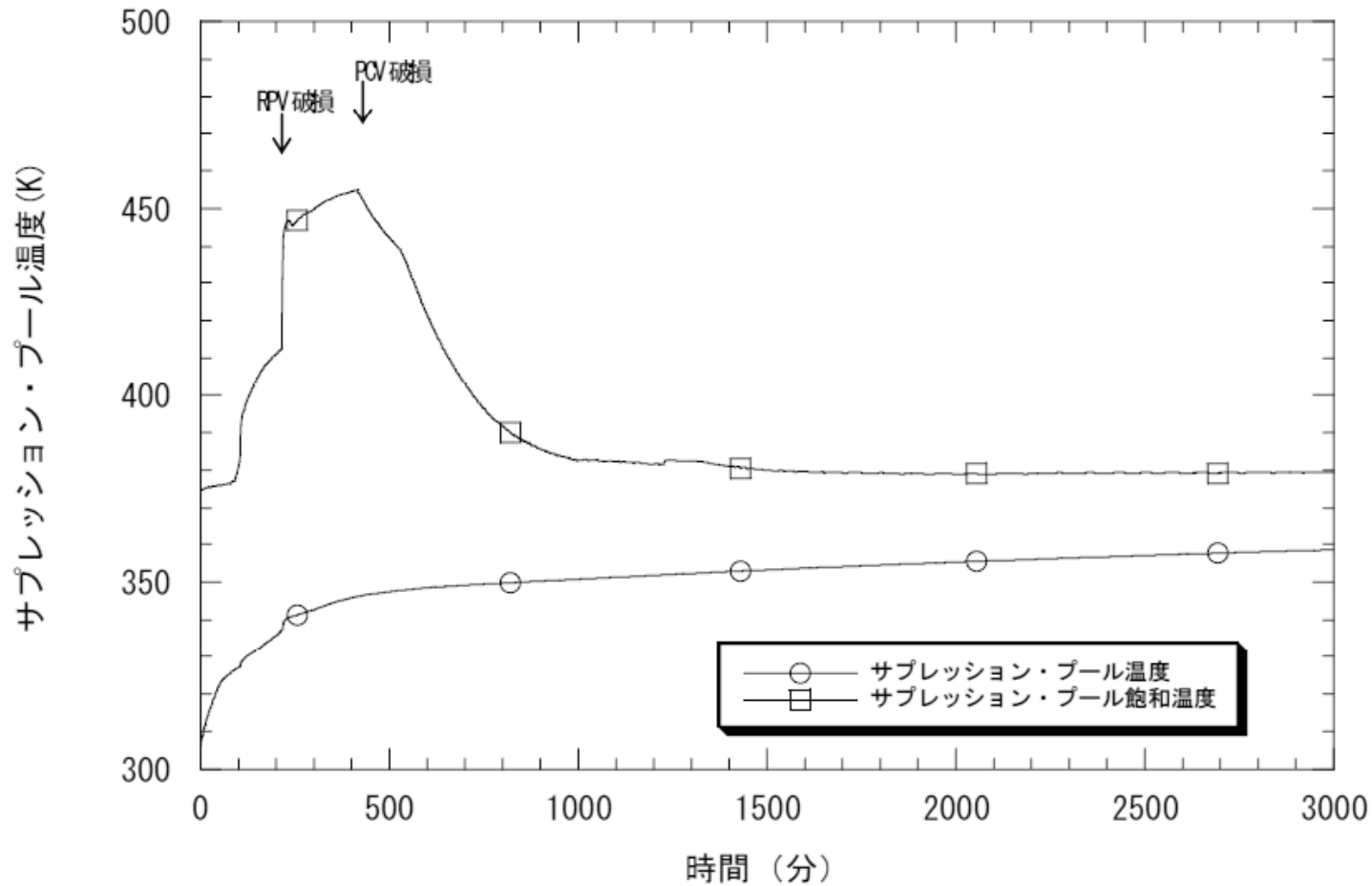
炉心温度



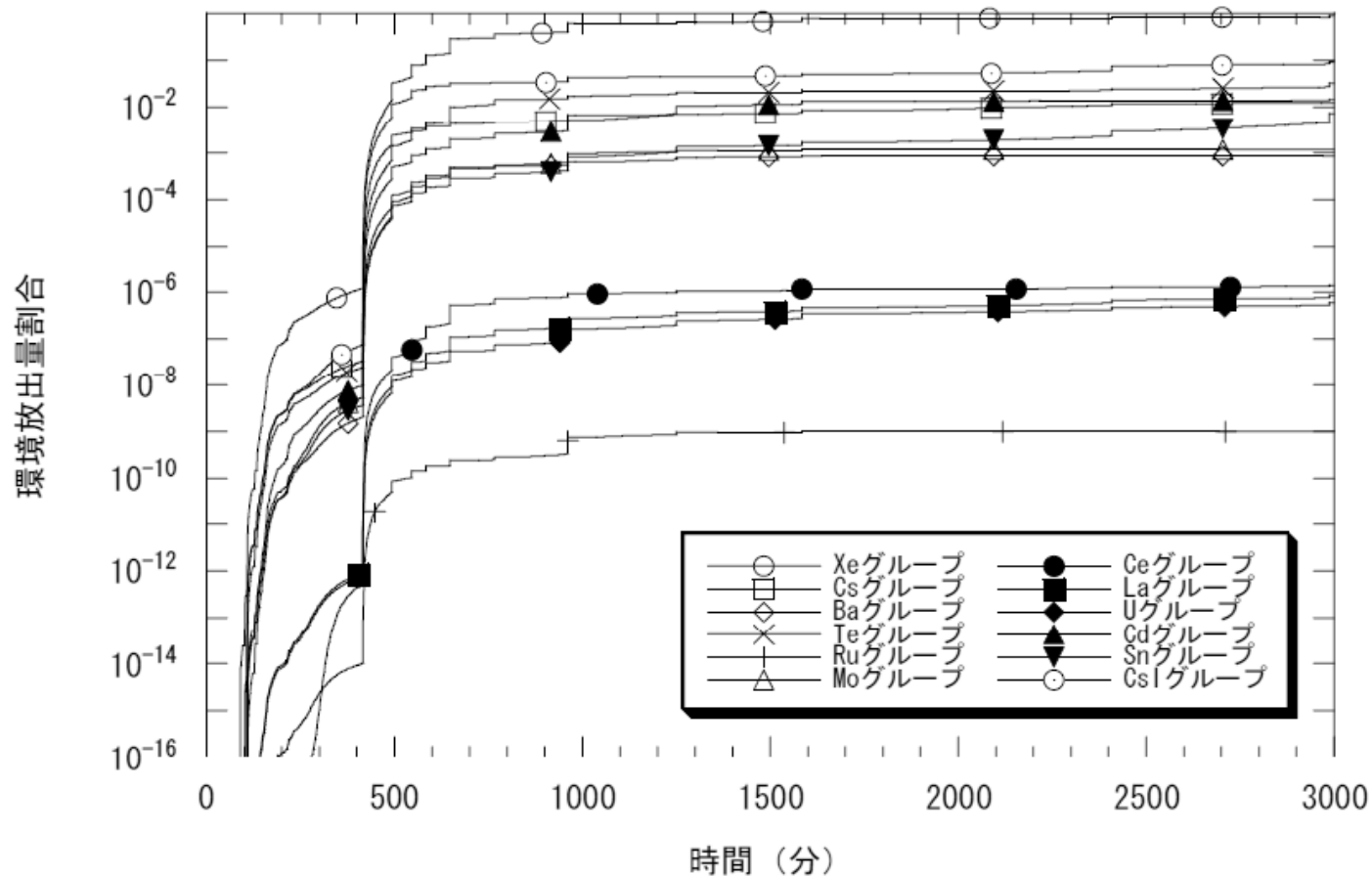
格納容器圧力



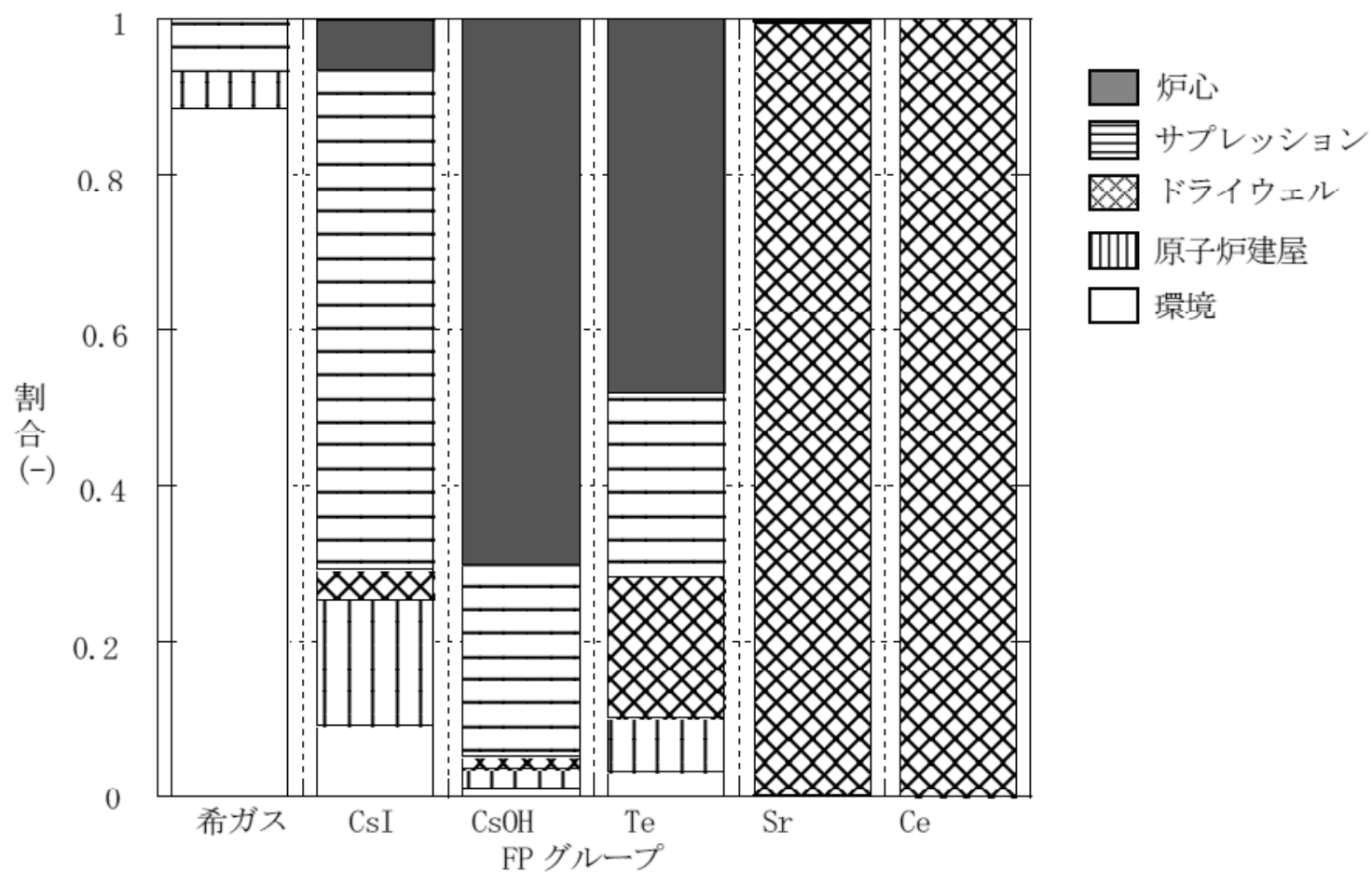
サプレッションプール温度



環境放出量割合



放射性物質分布



シミュレーションでわかっていたこと

- 電源喪失事故の進展は速い。
1 時間後炉心露出、3 時間後圧力容器破壊、7 時間後格納容器破壊、20 時間後建屋基礎貫通
- 格納容器破壊後環境への放出始まる。放出はシミュレーション時間範囲 (50 時間) でだらだら続く。
- 環境にでるのは主に稀ガス、ヨウ素、セシウム、テルル。ヨウ素で10% 程度、セシウムはその数分の一。

「現時点」での「事実」と思われるもの

- 1号機についてはほぼシミュレーション通りで手も足も出ないままに格納容器破壊にいたった。(東電 5/15 発表資料)
- 2、3号機は1-2日遅れだけど基本的には同じ。

東電が発表したのは5月だけど、シミュレーション結果、事故に関する報道、発表資料、環境放射線レベルから推定した放出量からは3/15くらいにはほぼシミュレーション通りにもものが動いていたことはわかっていた

シミュレーションがこんなに上手くいくのは何故？

例えば地震予知とか天気予報は難しいのに、原発事故ってそんなに簡単に計算できるのか？

銀河形成だって全然上手くできてないし、、、

これは実はできる。工学的な人工物は(壊れるまでは)計算できるように作ってある。

もう少し細かくいうと:

電源喪失から炉心溶融までは、圧力容器の圧力は(弁の作用で)一定に保たれる。また、放射性物質の崩壊熱の大きさは正確にわかっている。このため、どれだけの率で水が蒸発していき、何時間後に炉心損傷するかはかなり正確にわかる。

圧力容器は燃料棒落下後そんなにもたない。格納容器は破壊にいたる圧力は正確にはわからないが、時間はそんなにずれない。

放出された放射性物質の量

- 3/13 INES レベル 4(数百テラベクレル以下)
- 3/18 INES レベル 5(数百—数千テラベクレル)
- 4/12 INES レベル 7(数万テラベクレル以上)
- 6月現在: 「(ヨウ素換算)77万テラベクレル」(主にセシウムで 2万テラベクレル)、チェルノブイリの約 1/7

保安院の計算にはいっている放出のほとんどは 3/15-16 と 3/20-21 に起きているので、実際には 3/15-16 の時点でレベル 7 だったということ。
これは実は簡単な計算で当時容易に見積もることができた。

牧野の 3/18 の見積り

放出量と汚染度分布がわかっているウィンズケール事故と比較した。

- ウィンズケール事故では、原子炉から 50km のところの汚染は典型的には 10^4Bq/m^2 、総放出量は 1000 テラベクレル。
- 3/19 における福島県での原発から 50km のところでの典型的な測定値は $2\text{--}3 \mu\text{Sv/h}$
- ヨウ素に対する換算係数を使うと $1 \mu\text{Sv/h} = 4 \times 10^5 \text{Bq/m}^2$ (正しい数字は 7。4 は牧野の概算)
- なので、福島汚染は 10^6Bq/m^2 となり、ウィンズケールの 100 倍
- 従って大体 1000 テラベクレルのウィンズケール事故の 100 倍、10 万テラベクレル

牧野の 3/18 の見積り

放出量と汚染度分布がわかっているウィンズケール事故と比較した。

- ウィンズケール事故では、原子炉から 50km のところの汚染は典型的には 10^4Bq/m^2 、総放出量は 1000 テラベクレル。
- 3/19 における福島県での原発から 50km のところでの典型的な測定値は $2\text{--}3 \mu\text{Sv/h}$
- ヨウ素に対する換算係数を使うと $1 \mu\text{Sv/h} = 4 \times 10^5 \text{Bq/m}^2$ (正しい数字は 7。4 は牧野の概算)
- なので、福島汚染は 10^6Bq/m^2 となり、ウィンズケールの 100 倍
- 従って大体 1000 テラベクレルのウィンズケール事故の 100 倍、10 万テラベクレル

これは「天文学的手法」での見積もり

ウィンズケール事故とは？

- 1957年10月にイギリス、ウィンズケールのプルトニウム生産専用原子炉で起こった。
- 原子炉は黒鉛減速炭酸ガス冷却炉。日本だと東海1号炉（既に停止・廃炉）
- 停止・点検中に黒鉛から発熱、火災に。消火まで16時間
- 約 1,000 テラベクレルのヨウ素が放出された

日本への輸出が決まった直後。イギリスが「事故の時の補償はしない」と通告してきたきっかけになった？ → 原子力損害賠償法

安全委員会の 4/12 日発表

- 3/16 までの放出はヨウ素で大体 8 万テラベクレル
- セシウムはその 1/10

ということで、牧野の概算は 2 倍は違ってない。

但し、これは総放出量とは全く違う、ということに注意。爆発のあった 3/12-14 にはより大量の放出があったはずだが、これはその 3 日間の強い西風のため全て太平洋にいったと思われる。3/15 は事故後初めて北東からの風になった。

ここまでのまとめ

- 福島原発で起きたタイプの事故 (電源喪失) については詳細なシミュレーションが昔から行われていた
- 結果は、基本的に数時間後 (非常用電源が何かあればそれがなくなって数時間後) にメルトダウン、稀ガス、ヨウ素、セシウムが大量放出される、というもの
- 5月以降の東京電力発表では、ほぼシミュレーション通りになっていたとしている
- 放射性物質の放出については、シミュレーション通りなら 3/12-14 に莫大な量の放出があったはず (実際、米空母ロナルドレーガンは 3/14 に 100 マイル離れたところで放射性物質の雲に遭遇している)
- 地上に落ちた量については 3/15 時点で 10 万テラベクレル程度

津波については？

これもシミュレーションあり。「地震に係る確率論的安全評価手法の改良
＝BWRの事故シーケンスの試解析」

仮定:

- 海水ポンプは波高 7m 以上、復水貯蔵タンク/起動変圧器等の屋外設置機器は 15m で機能喪失
- 建屋への海水侵入は 13m、15m で機能喪失

結論:

- 7m 以上で炉心損傷確率が「1」。つまり、他が無傷でも海水ポンプ機能喪失だけで自動的に炉心損傷となる。

要するに

7m の津波でメルトダウンすると以前からわかっていた

「想定外」の 14m の津波が事故の原因、というのは嘘、とはいわないが、予測の範囲の津波でもどうせ事故になっていたはず

要するに

7m の津波でメルトダウンすると以前からわかっていた

「想定外」の 14m の津波が事故の原因、というのは嘘、とはいわないが、予測の範囲の津波でもどうせ事故になっていたはず

え、でも、想定外だったから大事故になったんじゃない？

国会での議論

2006/12/13 巨大地震の発生に伴う安全機能の喪失など原発の危険から国民の安全を守ることにに関する質問主意書

この要点は地震、津波の時に

- ディーゼルは動かないのではないか？
- 燃料棒バーンアウトは起きないのか？

というもの。

答弁

- 我が国において、非常用ディーゼル発電機のトラブルにより原子炉が停止した事例はなく、また、必要な電源が確保できずに冷却機能が失われた事例はない。
- 経済産業省としては、お尋ねの評価は行っておらず、原子炉の冷却ができない事態が生じないように安全の確保に万全を期しているところである。

国の答弁の意味

この答弁を素直に読むと

**起こったことがない事故のことなんか知らん
今まで事故起きてないんだから大丈夫だ**

と書いてある。予想されていてもまだ起こってない事故には対策しない、
といってる

つまり：「想定外」＝まだ起こってなかったので対策しませんでした

どうしてそんな馬鹿なことになったか？

人間の特性 7 箇条（高橋秀俊）

- 人間は気まぐれである
- 人間は怠け者である
- 人間は不注意である
- 人間は根気が無い
- 人間は単調を嫌う
- 人間は理論的思考力に弱い
- 人間は何をするかわからない

事故が起きてないと段々さぼる。

というだけかも。

「科学者からの情報発信」

- 特に事故直後の1週間程度、原発事故の影響がどれほどのものか、は国・東京電力の公式発表やメディア報道からはよくわからなかった(例の「ただちに健康に影響はない」しか情報がなかった)
- ここまででみたように、国・東京電力の3月頃の発表と、現在わかっている当時の原子炉の実際の状況、放射性物質の放出状況には大きなずれがあった。

このギャップを埋めるのは「客観的で中立」な情報を提供する科学者の役割、とかいう議論もできないわけではない。実際はどうだったか？

天文学会MLに3/19に流れたメールから

「福島原発の放射能を理解する」スライド公開

<http://ribf.riken.jp/~koji/jishin/>

素粒子実験分野の研究者／院生の皆さん

今回の震災に起因した福島原発の事故について
国民の不安が高まっています。チェルノブイリの
ようになってしまおうと思っている人も多いです。
放射線を学び、利用し、国のお金で物理を研究
させてもらっている我々が、持っている知識を
周りの人々に伝えるべき時です。

アメリカの Ben Monreal 教授が非常に良い解説を
作ってくれました。

続き

<http://online.kitp.ucsb.edu/online/plecture/bmonreal11/>

もちろん個人的な見解ですが、我々ツイッター物理
クラスタの有志はこれに賛同し、このスライドの
日本語訳を作りました。能力不足から至らない点もあると
思いますが、皆さん、これを利用して自分の周り（家族、
近所、学校など）で国民の不安を少しでも取り除くための
「街角紙芝居」に出て頂けませんか。

よろしくお願いします。

(人名省略)

翻訳の許可をオリジナル作成者よりいただいています。

物理学者の活動の方向

先に紹介したメッセージは典型的

- 「チェルノブイリのようにになってしまうと思っている人も多いです」
(放射性物質放出量は実際になっていた)
- 「国民の不安を少しでも取り除く」(取り除くのは自明に正しいのか?)

つまり:ネット上でみられた科学者の活動の多くは、事故の規模を過小評価した上で「安全」を強調するものになってしまっていた。

何故か?はともかく前例はチェルノブイリでもあった
(ソ連だけでなくイギリス・フランスでも)。

理由の憶測

- 単に皆さん単純に安全であると思い込みたかった。(正常性バイアス)
- 研究者の側だけの問題ではなく、情報を受容する側が危険を過小評価する情報を積極的に受容・拡散した
- 原子核・素粒子の研究者は(意識的かどうかはともかく)危険を過小評価する傾向を持つ
- その他

理由の憶測

- 単に皆さん単純に安全であると思い込みたかった。(正常性バイアス)
- 研究者の側だけの問題ではなく、情報を受容する側が危険を過小評価する情報を積極的に受容・拡散した
- 原子核・素粒子の研究者は(意識的かどうかはともかく)危険を過小評価する傾向を持つ
- その他

次に何かあった時にどうするかは考えておかない
といけない

おしまい