

プラズマ物理学者が物理学にどの ように貢献できるか

大阪大学名誉教授 長谷川晃

2021年6月18日 於 NIFS

エントロピー、 $S=-n/np$ に関して

- シュレディンガーの言う「人間はネグエントロピーを食べて生きている」の意味
- 生体の情報処理の熱効率はずなぜスパコンよりはるかに良いか？
DNAのエントロピーと水のエントロピー、トランジスターのエントロピー
- 環境問題とエントロピー

環境問題とエントロピー：

地球は太陽からエネルギーではなく、ネゲントロピーを受け取って生命体を維持し、地上で生み出されたエントロピーは夜間に黒体放射によって宇宙に放出することにより地上でのエントロピーの増加を防いでいる。地球は開放系であり、エネルギーバランスは0、しかし大きな負のエントロピーを太陽から得ている。これにより、地球上の秩序、すなわち生命現象を維持している。つまり地球自身が生命体に似ている。

光子のエントロピー

- $S_p = -n_p \ln p$
- $n_p = E/h\omega$
- Note: 太陽光は紫外線、地球から黒体放射で宇宙に出てゆく光は赤外線、周波数比はほぼ1/20. つまり
- $n_p(\text{output}) \sim 20 n_p(\text{input})$
- 黒体放射で宇宙に放出されるエントロピーは太陽から受け取るエントロピーの20倍程度もある。
- 結果、総電力の出入りは0でも地球は太陽から莫大なネゲントロピーを得ている。生命体と似ている、地上の生命の維持

シュレディンガーの言う「人間はネグントロピーを食べて生きている」の意味？

生体は細胞で出来ていて、細胞の中にDNAが存在する。DNAの分子量はほぼ水の 10^{12} ほどあり、

DNAは食事で摂取した蛋白質をアミノ酸に分解して、このアミノ酸を合成してつくられている。

単位体積あたりのDNAの密度はバラバラの炭素や水素分子の密度のほぼ1兆分の1。つまりDNAは水素分子に比べて密度、 n , が遥かに小さい分、莫大なネグントロピーをもつ。（つまり遥かに秩序が良い）

生命とはこの秩序、つまりネグントロピーを維持することに他ならない。これが「ネグントロピーを食べて生きている」の意味。

スパコンは因碁でも人間に勝つようになった しかし、熱効率では全く太刀打ちできない。なぜか？

- スパコンの消費電力：ほぼ30万kW (発電所一基分) → 人間の消費電力；60W、つまり人間の脳の情報処理の熱効率はスパコンの 10^7 倍。なぜか？
- 理由；1。の細胞のエントロピーはトランジスターのそれのほぼ1兆分の1
- 2。演算によるエントロピープロダクションは (DNAの数の変化を伴わないため) 対数でしか効かない。 $-n/np$, (内部構造の変化 p を利用している)
- 一方トランジスターの演算は電子密度 n の変化を使っている。エントロピーは線形的に増大する。このことがスパコンの熱効率を悪くしている。
- エントロピー増大を伴わない演算の例：量子コンピューターは電子の位相を使うのでエントロピーの増加は対数的にしか効かない。
- 光情報処理も光子の数 (つまり光パルス) でなく、光の位相を使う方が熱効率が良い。

Phys. Today 2020 Letter 1

The article by Paul Davies (PHYSICS TODAY, August 2020, page 34) addresses the importance of information theory in biological systems. As pointed out by Erwin Schrödinger, biological systems gain negative entropy from food and have tremendously less entropy than physical or thermodynamical systems.

Let me quantify that statement. Claude Shannon showed that the entropy in information theory is related to a thermodynamical system through $-k_B N \ln p$, where k_B is the Boltzmann constant, p is the probability of a given state, and N is the state's number of degrees of freedom.¹ The fact that a biological system has huge negative entropy can be explained simply by considering N .

Phys. Today 2020 Letter 2

If a DNA molecule acts as one unit of a degree of freedom, as it should, the entropy of a human body is about 12 orders of magnitude smaller than that of a system having free molecules in equilibrium at the same temperature, since the molecular weight of a DNA molecule is approximately a trillion times that of, say, a water molecule. That is, human cells are better ordered by a huge factor (10^{12})

Phys. Today 2020 Letter 3

than is a system in thermodynamic equilibrium.

That factor allows the human system to work with a thermal efficiency much higher than a supercomputer's. In a chess game between a person and a supercomputer, for example, the energy efficiencies differ by about six orders of magnitude. A human brain weighs about one-millionth of what a supercomputer does; thus the efficiency per unit weight of a human brain can be 1 trillion times greater, in agreement with the amount of negative entropy of the human cell system.

Since the molecular weight of human DNA is not much different from that in other living cells, a similar argument applies to most living systems. Most other animals do not play chess, but the amount of information processed in their visual and other sensory systems can be similar in magnitude to the human brain's processing capacity. Furthermore, I would say that life is a process of maintaining the system's huge negative entropy through cell division (reconstruction of a cell) and autophagy, while disease and death arise in the gradual and sudden increase of internal entropy or loss of negative entropy.

Reference

1. See, for example, L. Brillouin, *Science and Information Theory*, Academic Press (1962).

Akira Hasegawa

流体の非線形な振る舞いについて

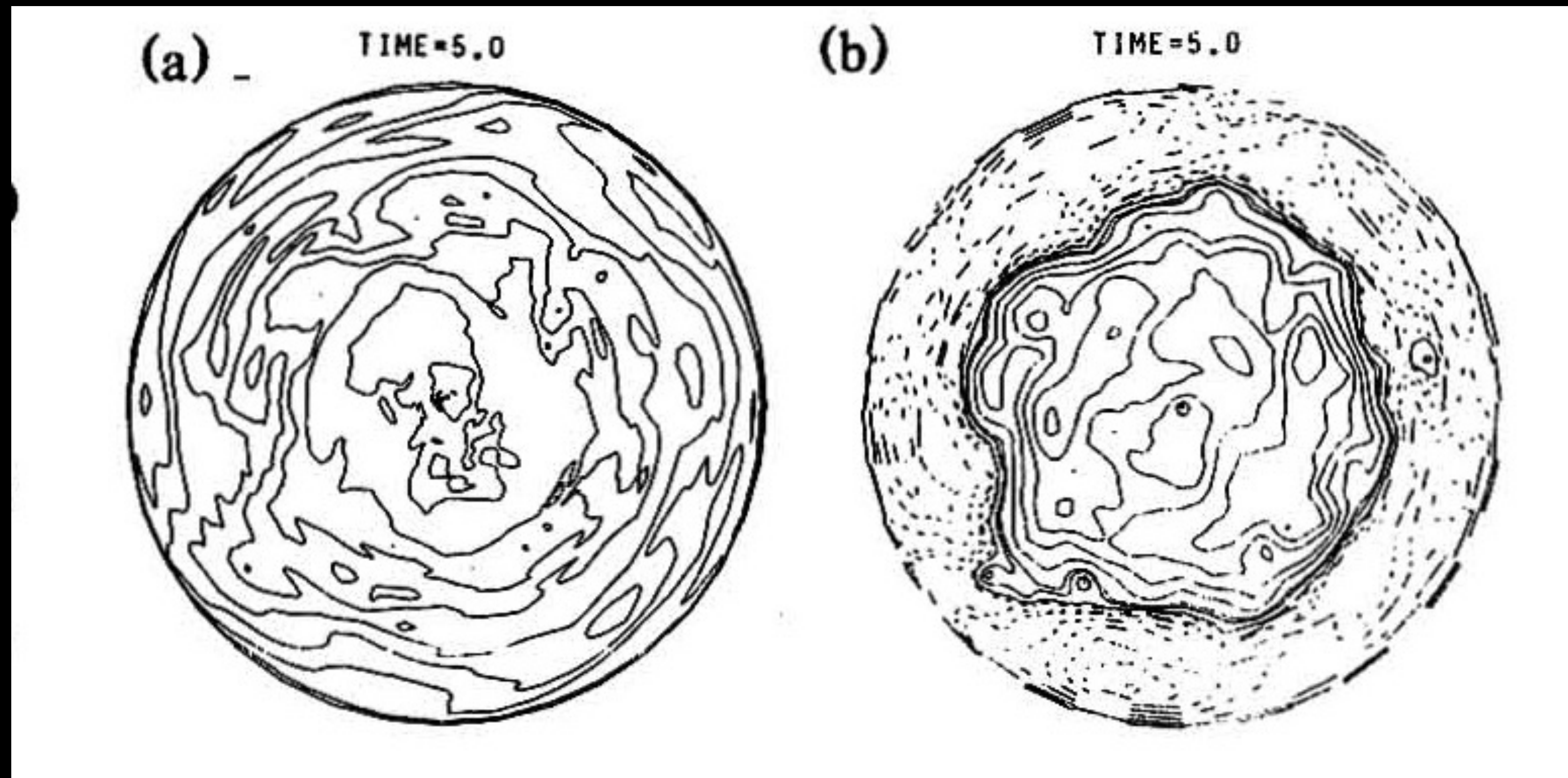
- Phys. Today 2021年8月号のLetter:
- Rajan Menon's letter "Nobels neglect fluid dynamics" (*Physics Today*, January 2021, page 10) correctly points out how the importance of physicists' real-world contributions have been undervalued in physics community.
- Many physicists apparently have the misunderstanding that finding elementary forces among particles solves the world's problems. The reality is far from it.
- Since Isaac Newton's time, it's been well known that the three-body system cannot be solved analytically, and numerical approaches can lead to chaos. The real world consists of infinitely many-body systems whose temporal evolution is intrinsically unsolvable. Even for the simplest hydrodynamics systems, the Navier-Stokes equation, which is only an approximate model, is not solvable. Plasmas are much more rich in their time evolution, and a large number of fundamental discoveries in that area have not been properly appreciated in the physics community. Some unexpected discoveries in nonlinear continuous media certainly deserve higher valuation in terms of their real-world contributions; conspicuous examples include the applications of optical solitons in high-speed transcontinental communications and the influence that self-organization of plasma turbulence has had on fusion confinement.

Drift波の乱流とRossby波の乱流は全く違うもの

- Drift 波乱流のスケール：
- $n_1/n_0 \sim e\phi/T_e \geq \rho_i/a \rightarrow$ 強い乱流
- Rossby 波の乱流スケール
- $h/H_0 \ll \text{Rossby Radius/Planetary Radius} \rightarrow$ 常に弱い乱流
- 弱い乱流状態では波の量子性が保存され、Drift波の場合は乱流スペクトルは幅がイオンのラーマー半径程度の帯状流を作るが強い乱流状態では波の量子が破壊されラーマー半径のスケールが失われる。結果乱流スペクトルは二次元のNavier-Stokes形になり、帯状流の幅はメソスケールとなる。Rossby波の乱流では起こり得ない。Rossby波の乱流はNavier-Stokes形にはなり得ない。
- 長谷川—三間方程式は流体力学でも引用されている、なぜプラズマ物理学者が流体力学者名前を付して不適切なクレジット与えるのか、もっと自信を持って欲しい。

プラズマの渦、大気の渦

- 磁場中プラズマの乱流と渦（長谷川ー若谷のシミュレーション）



中心付近の渦は高気圧の渦、縁の渦は低気圧の渦

渦の非対称性について

プラズマの中心付近には正の電荷を持つ渦（高気圧の渦）が集まり、周辺には中心が負の電荷を持つ渦（低気圧の渦）が集まる。


この結果zonal flowが発生する。

しかし、

- 高気圧の渦（中心電荷が正の渦）は広がるが、一方低気圧の渦は狭まり、同時に強度が増す。（台風の発生）。この非対称性はどこから来るのか？

- →新しい問題

Zonal Flow とTokamakの定常運転

- 乱流エネルギーがzonal flowに凝縮すると、Bose Condensationのようなcondensed stateの安定性問題が発生する。
- 特に核融合炉が電力増幅機として動作する場合には連続的な電力入力に耐える運転が必要となる。
- このためには小さなエントロピー状態（必要な圧力勾配）を維持しながら内部のエネルギーの蓄積を防がねばならない。
- つまり電氣的な入力電力と電力ロスがバランスしなければならない（地球の例）、これにはZonal Flowの電力を外部に逃がす必要がある。これにはアルフヴェン波が使える？。
-  **新しい問題**

その他の重要なプラズマ物理学者の貢献

- ソリトンの発見と、逆散乱法による可積分性の証明
- Kortweg-deVriesの方程式
- 非線形シュレディンガー方程式
- Autonomous 非線形方程式の解など

幸運だった私の場合

- ベル研究所の環境が幸運：ミッションに追われることなく、科学的に面白そうなテーマが自由に選べた。優れたパートナーと師匠（谷内俊弥先生）
- 1000件前後の被引用件数にある長谷川の論文は全て共同作業の論文
- 光ソリトン F.D. Tappart
- 地磁気の振動現象の解明, Kinetic Alfvén Wave L.Chen
- ドリフトは乱流 K. Mima



チームワークの重要性

結論

プラズマ物理学者が貢献できる 分野

非線形物理学—乱流：ソリトン、（非線形連続体）カオス（少数自由度の非線形ダイナミクス、惑星と地球の衝突）など

統計力学：エントロピーの立場で見る環境問題、生体の物理、情報処理、

核融合炉と環境問題（核廃棄物など）、Advanced Fuelの必要性、エントロピープロダクションの立場で評価

マシン固有の問題処理は必要だがそれにとらわれずに、より普遍的な見方で解決、マシンと心合せしないように。