

○Eric Winsberg(2009) 'Computer Simulation and the Philosophy of Science'

1. イントロダクション

コンピュータシミュレーション（以下 CS）は第二次世界大戦に続く時期に、気象学と原子物理学において科学的道具として開拓され、それから多くの分野（宇宙物理学、材料科学、工学、流体力学、気候科学、進化生物学、生態学、経済学、意思決定理論、社会学、など）で欠かせないものとなった。カオス理論や複雑系理論のようにコンピュータモデルの発達に伴って生じた分野もある。しかし最近まで、科学哲学者はほとんど注意を払ってこなかった（90年代から）。

もちろん、科学哲学者が CS について言うべき多くのことをもっているべきである、ということは明らかではない。新しい哲学的問題がないかもしれない。

20 世紀の理論中心的な科学哲学からすれば、「CS はよく確立された科学理論の適用にほかならない」という見解は自然なもの。

Frigg and Reiss(2009)は、CS が哲学的注意に値する変化を生み出したということを否定する。

この論文の主な目的の一つはそれが間違っていることを示すこと。

CS が科学で使われる仕方に注意を向けた後再考されるべきさまざまな科学哲学におけるトピックがある。

哲学者の注意から利益を受け得る、CS の実践に内在的な多くの概念的問題がある。

まず CS とは何かについて少し言うておく。

この語が何を意味するかについての三つの有益な考え方

(1)最も狭い意味

CS は「普通数学的モデルが解析的に解けない方程式を含んでいるがゆえに、そのモデルの近似的な振る舞いを展開するために段階的な方法を使う、コンピュータで走らされた、アルゴリズム」

(2)より広い意味

「解析的に解けない方程式で最もよくモデルされるシステムを研究する包括的な方法」この意味では CS は、モデルを選ぶ、コンピュータで走らせることができる形でモデルを実装する方法を探す、結果として生じるアルゴリズムの出力を研究する、モデルしようとしているターゲットシステムについて推論するためにその全プロセスを使い、その推論を正当化する(sanction)、などの全プロセスを指す。

(3) シミュレーションの概念をコンピュータとは独立に定義する

シミュレーションは「ある他のシステムに十分に似た力学的振る舞いをもつと信じられあるいは望まれ、その他のシステムについて学ぶためにそのシステムが研究され得るような任意のシステム」

その任意のシステムがデジタルにプログラムされたコンピュータならそれは CS

以下では(2)の定義を念頭に置く。5節では(3)を意識する

2.新しい認識論？

Winsberg が CS に関する中心的な哲学的な問題と考えるもの：CS の認識論

CS が新しい知識を生み出すことの信頼性の問題

とくに実験や解析的に扱うことが可能なモデル方法と比べたとき

CS の結果が意図した目的にとって十分に正確であるか

未来の気候の予測が政策決定の必要を満たすのに十分に正確か、など

Winsberg(1999)は、科学哲学は伝統的に理論の適用(application)ではなく理論の正当化を扱ってきたと論じる。

ほとんどのよく確立された理論を利用する傾向がある。

シミュレーションの認識論は、めったにシミュレーションに使われる基礎理論のテストについてのものではなく、ほとんど理論の適用の結果である仮説の信頼性を確立することについてのもの。

とりわけシミュレーションにおいてなされる推論の三つの特徴がある。Winsberg(2001) それらの組み合わせは科学哲学が関心をもってきた種類の推論の典型ではない。

CS によって生み出された知識は、下向きで(downward)、雑多で(motley)、自律的な(autonomous)推論の結果である。

- ・ 下向き

観察から理論へという上向きではなく、理論から現象の個別的特徴へと下る

- ・ 雑多

さまざまなソースを利用する。

理論だけでなく、物理的洞察、広範な近似、理想化、まったくの虚構、

補助的な情報、試行錯誤の血と汗と涙を含む。流体のシミュレーションの例

- ・ 自律的

シミュレーションによって生み出された知識は観察との比較によって完全に正当化されるわけではない。

シミュレーションは普通データが乏しい現象を研究するのに用いられる。

そのような状況ではシミュレーションは世界についてのデータのソースとして実験や観察に取って替わることを意図されている。星の中の対流などシミュレーションは自分自身でその結果を信じる根拠を与えなければならない。

科学哲学の適切な認識論は、これら三つの特徴にも関わらずシミュレーション結果と計算モデルはたいてい信頼できると考えられているという事実を説明する必要がある。Winsberg(2001)は、伝統的な科学哲学はそれを説明できないから、シミュレーションは新しい認識論を要求する、と論じる。

Frigg and Reiss(2009)は、その主張に対して、これら三つの特徴はシミュレーションに特有のものではないと論じた。

モデルが複雑なだけ。異なった認識論が必要だという結論はCSとは別の科学の実践を研究することによって到達し得た。

P838

確かにCSを含まないが似た特徴を持つ科学における他のモデリング実践があるが、(1)先の結論に他の実践の研究によって「到達し得た」が、到達しなかった。

経済の哲学者が関連した点を論じてきたが、多くの理論がない文脈において。

(2)他のモデル実践への注意が同じ一般的な関心を生じさせたかもしれないが、シミュレーションの認識論に特殊的な多くの特徴がある。

3. 検証(Verification)と妥当化(Validation)

例えば、シミュレーション結果の正当化の議論において広く用いられる検証と妥当化の区別を取りあげてみる。

妥当化：シミュレーションの基礎であるモデル方程式がターゲットシステムを表象しているということを保証するプロセス

検証：シミュレーションの数的な出力とそこから導いた結論が、オリジナルのモデル方程式の解をもし書けたらそうであったようなものに十分に近いということを保証するプロセス

一見してこれらの二つの活動の違いは明確であるように見える。

そしてシミュレーションに特有なのは妥当化[テキスト誤植]活動であり、検証の問題は完全に数学的なものであるように見える。

Frigg and Reiss(2009)は実際にそう論じたが、その結論は早計だ。

Winsberg(1999,2010)は検証と妥当化の区別が単純すぎると論じる。

モデルが複雑で非線形である場合、検証が成し遂げられたということを示す数学的な

議論を提示することはほとんど不可能。

シミュレーション家は代わりに、モデルと計算方法との結合された結果が目的にとって十分に信頼できる結果を与えるということを確立することに焦点を合わせることを強いられる。全球気候の例

これはデュエム問題[反証されたのが理論か補助仮説か決定できない]の一種と見なすことができるがそれ以上の問題。

計算モデルが成功したときモデルが理想的だからでもアルゴリズムが解を見つけたからでもないかもしれない。

[モデルと計算のセットで結果が出るので、それぞれ単独ではダメなのにセットではよい結果になるということがあり得る。

そしてシミュレーションの結果はモデルと計算のセットで評価されるので、妥当化の問題と検証の問題を分けて論じるのは現実的ではない。

ということだと思われる]

4.実験の哲学からのインスピレーション

シミュレーションの認識論のもう一つの独特の特徴は実験の認識論から簡単にインスピレーションを得られるということ。

Franklin は実験家たちが結果の合理的な信頼を増すために用いる多くの戦略を同定した。**Weissart, Winsberg, Parker** らはそれらの戦略とシミュレーション家が結果を正当化するのに利用可能な多くの戦略との間のさまざまな形のアナロジーを論じている。

Parker は **Mayo** の伝統的な実験を理解するためのエラー統計的なアプローチがシミュレーションの認識論を益することができることを示唆する。

エラー統計的な観点をとると、シミュレーションの認識論の中心的な問いは

「われわれが **CS** を自然界についてのある仮説の厳しいテストであると考えてることを保証するのか」になる。

Winsberg(2003)は **Hacking** の研究に訴える。「実験はそれ自身の生活を持つ」

このスローガンで **Hacking** は二つのことを言おうとしていると **Winsberg** は考える。

- ・科学の他の部分が劇的に変化しても実験結果は安定的である
- ・実験は有機的で、発達し、変化するが、ある長期的な発達を維持していて、われわれに実験の反復と再現について語らせる

Winsberg は **Hacking** が言う道具と実験手続き・方法が信用される仕方と同じ仕方でシミュレーション家がモデルをつくるのに使う技術も信用されると論じた。

信用は長期間にわたって発達し、深く伝統に束縛されたものになる。

Hacking の言葉で言えばシミュレーション家が使う技術と仮定の集合は「自己弁護的(self-vindicating)」

よりよい表現は、それらは自身の信用証明(credentials)をもっているというもの。

5. 同一性テーゼ

シミュレーションと実験についての異なった筋がある。

4 節は実験についての議論の哲学的リソースを利用するためのアナロジーだったが、5 節で論じられるのは以下のテーゼ。

同一性テーゼ：CS は文字通り実験である

認識論的依存テーゼ：シミュレーションが仮説に対する信念を保証する程度はシミュレーションと実験の間の類似性に依存する

Norton and Suppe(2001)によれば、シミュレーションは実験なので信念を保証できる
妥当なシミュレーションは、基盤モデルと、モデルされた物理的システムと、
アルゴリズムを走らせているコンピュータとの間に（彼らが「実現」と呼ぶ）
ある形式的な関係が成り立っているもの。

P841

しかしここには二つの問題がある。

- ・彼らの形式的な条件は厳しすぎる

シミュレーションははるかにより理想化し、近似化する営み

- ・中心的な問題にまったく答えていない

われわれはいつ・なぜ実現が成り立つと信じることに於いて保証されるのかを知りたい

Guala(2002)と Morgan(2002)は同一性テーゼを批判する。

Guala は同一性テーゼに反対する次のようなダメな議論を退けることから始める。

「本当の実験はまさに調査のターゲットである現実世界のシステムを操作するが、
シミュレーションは単にターゲットシステムのモデルを操作するので、
シミュレーションは本当の実験とは違う。」

実験がターゲットを操作するというのは誤り。

実験とシミュレーションの両方において操作されるものと現実世界のシステムとの間に複雑な関係がある。

それゆえ、実験とシミュレーションの両方において、操作されているシステムについて学ばれたことが関心のあるシステムに適用可能であるという「外的妥当性」を確立するための議論が必要。

しかし Guala も Morgan も同一性テーゼを否定する。

Guala :

実験における操作の対象は関心のあるターゲットに物質的な類似性をもつが、シミュレーションにおいてはオブジェクトとターゲットの間の類似性は単に形式的なものである、という点においてシミュレーションは実験と異なる。

Morgan はこの議論を受け入れるが、認識論的依存テーゼをとっているように見える :

Guala によって同定された実験とシミュレーションの違いは、シミュレーションが本当の実験に認識論的に劣る（現実世界についての仮説への信念を保証する力が内在的に弱い）ということを含意する。

[認識論的依存テーゼ○で同一性テーゼ×なので、シミュレーション×ということに]

Morgan の議論に対してシミュレーションの認識論的な力の擁護は、同一性テーゼの擁護か認識論的依存テーゼの排除による。

Parker(2009)は前者の戦略、Winsberg(2009)は後者の戦略をとる。

Parker と Winsberg は Guala の同一性テーゼに反対する議論の二つの問題を論じている。

[しかし Winsberg は同一性テーゼを擁護するわけではない]

- ・物質的類似性の概念は弱すぎる

工学でシリコンからなるシステムの振る舞いを研究するためにシミュレーションを使うことがある。

コンピュータの中央処理装置とそのシリコン装置の間には物質的類似性があるので、Guala の区別によればそれは本当の実験の例となるが、それは間違っている。

問題はどんな二つのシステムも互いにいくつかの物質的類似性と差異をもっている、という一般的なもの。

- ・単なる形式的類似性の概念は曖昧すぎる

任意の二つの複雑な存在者を考えれば、それらが形式的に同一である仕方も形式的にまったく異なる仕方も多くある。

こうした議論の後、Parker はシミュレーションと実験を CS 研究が実験となり、多くの実験がシミュレーションを含む仕方で特徴づける。強い同一性テーゼ。

他方 Winsberg は、シミュレーションは研究の「外的妥当性」を論じるために用いられる背景知識に関して実験と異なると論じる。

認識論的依存テーゼも退ける。シミュレーションと実験の認識論的力は背景知識の質に依存する。太陽系のシミュレーションはいかなる実験よりも信頼できる知識を生み出す。普通の実験とシミュレーションには違いがあるが、その違いにはどちらかを内在的により認識論的に強力にするものは何もない。

6. シミュレーションと理論

CSにおいて生じる哲学的問題のすべてが認識論的なものであるわけではない。

Humphreys(2004) CSは理論の構造についてのわれわれの理解に深い含意を持つ。

CSは科学理論の意味論的見解と統語論的見解のどちらも不適切であることを示す。

この主張は Frigg and Reiss(2009)によって攻撃されている。

モデルが解析的な解を許すか否かはそのモデルがどのように世界に関係するかには関わりを持たない。二重振り子の例

この議論自体は正しいが、Humphreysの指摘に対する応答にはなっていない。

理論についての統語論的見解と意味論的見解は、単に「どのようにわれわれの抽象的な科学理論が世界に関係するか」の説明ではなく、「科学的理論化においてどこに哲学的に興味深い活動があるか」についても多くのことを述べる。

- ・統語論的見解は、科学の実践は理論を公理系と見なすことによって適切に合理的に再構成され得る、そして論理的演繹はどのように理論から世界への推論が導かれるのかについて考えるための有効な規定的理想である、と示唆する
- ・意味論的見解は、理論は非言語的存在者[とくにモデル]であり、理論のある特定の形態の言語表現(ある教科書におけるものなど)に哲学者は注意をそらされないよう主張する。

CSはこのどちらも間違っていることを示すように見える。

- ・→統語論的見解
論理的演繹の推論力を大幅にはみ出す理論適用の方法がある。解空間の広さ
- ・→意味論的見解
科学理論が表現される特定の言語形態は哲学的に重要。
理論表現の統語論は、どのような推論をそこから導き得るか、どのような種類の理想化がそこでうまくはたらくか、などに大きく影響する。
オイラーの形態かラグランジュの形態か

7. 他のトピック

哲学的注意に値する他の二つのトピックを紹介する

(1)モデルが不整合な理論的原理を利用しているCSの問題

Winsberg(2006a)は、この種のシミュレーションは、当然と見なされている二つの哲学的直観にプレッシャーを与えると論じる。

- ・第一の直観：法則の不整合な集合はモデルをもたない

↑ マルチスケールシミュレーションの例。

量子力学と古典分子力学の両方に依存するシミュレーションがある。

前者の計算論的な扱えなさで後者の予測の不適切さを克服するため

- ・ 第二の直観：異なった記述のレベルにおける理論間の興味深い関係は、高次の理論が低次の理論に還元される程度によって完全にとらえられる。同じ例(multiscale)が、異なった理論が成功的で信頼できるモデルにおいてどのように関係し合うのかは微妙で経験的な問題であることを示す。

(2)地球の気候の未来を予測するシミュレーションの問題

社会的重要性から近い将来重要な議論の領域になりそう。

気候モデルの確証や不整合なモデルの使用について

○Synthese(2009)の特集より

Volume169,Number3/August 2009 MODELS AND SIMULATIONS

・ Winsberg ‘A Tale of Two Methods’

実験とシミュレーションの違い

(P579)オブジェクトとターゲット、内的妥当性と外的妥当性

(P585 以下)

実験とシミュレーションを分けるのは、オブジェクトからターゲットへの推論の正当性(外的妥当性)のために与えられる議論の性質と、その議論を根拠づける背景知識の性質。

実験においては研究者は、オブジェクトがターゲットの代わりとなる(stand in)という望みを、オブジェクトとターゲットが同じ種類のシステムに属する(物質的に類似している)という事実に基づける。

シミュレーションにおいては、外的妥当性のための議論をモデル形成の信頼できる原理(適切な理論、物理的直観、コンピュータ技術)をもっているという信念に基づける。

実験家はターゲットモデルの形成よりもオブジェクトのコントロールに関心を持つ。

実験においてはモデル形成の信頼性は内的妥当性のために用いられる。

実験やシミュレーションの信頼性は背景知識とそれを行使する技術の質に依存するのであって、背景知識が実験に属するかシミュレーションに属するかによって依存するのではない。

しかしシミュレーションと実験の間には認識論的な差異がある。

実験はしばしば理論、仮説、モデルの決定的なテスト（決定実験）を与えるが、シミュレーションはそうではない。

シミュレーションはどのようにターゲットシステムの特徴のよいモデルをつくるかについてすでに多くのことを知っているかと仮定しているから。

実験はシミュレーションよりも認識論的に力がある(powerful)というわけではないが、認識論的に優先する(prior)。

シミュレーションにおいて知る必要があるのは抽象的で洗練された知識であり、それは普通実験と観察の長い歴史から学んだことに依存する。

• Frigg and Reiss ‘The Philosophy of Simulation: Hot New Issues or Same Old Stew?’

コンピュータシミュレーションが新しい科学哲学的な問題を提起するという主張を以下の四つに分け、批判的に検討する。

- 形而上学的：シミュレーションは、実験が「現実世界」よりも好ましい条件下でなされ得るような、ある種のパラレルワールドをつくり出す。
- 認識的：シミュレーションは新しい認識論を要求する。
- 意味論的：シミュレーションはどのようにモデル・理論が具体的な現象に関係するののかについての新しい分析を要求する。
- 方法論的：シミュレーティングは理論化と実験の「間にある」独特の活動である。

そしてシミュレーションに特有の問題はなく、そのほとんどはすでに別の文脈で論じられた問題の変種であると結論する。

しかし、Friggらの主張はそれらの問題の新奇性を強調するよりも、すでにある議論との連続性の中でそれらを扱った方が実り豊かだというもので、「シミュレーションの哲学」に懐疑的であるわけではない。

• Humphreys ‘The Philosophical Novelty of Computer Simulation.’

Frigg and Reiss への反論

コンピュータシミュレーションは以下の四つの新しい哲学的問題を生じさせると主張。これらの問題は「どのようにわれわれ人間はわれわれ自身の能力を超えた計算論的に基礎づけられた科学的方法を理解し評価することができるのか」という問題

(人間中心的苦境)に関わる。

- CSにおけるプロセスの認知的不透明性
- 計算論的表象と適用の関係

- ・シミュレーションの時間的ダイナミクス
- ・原理的な結果から実践的な考察への転換の必要性

○「シミュレーションの哲学」の関心

- ・シミュレーションの分野と種類

物理学における方程式を解くタイプのものが中心にとりあげられる。
経済学をはじめとする社会科学におけるシミュレーションについても
議論されている(Guala,Morgan)。

モンテカルロ法、Cellular automata(CA)、agent-based モデルなども
言及されないわけではない(Fox Keller,Galison,Humphreys)

- ・シミュレーションと理論・実験（方法論）

理論からの導出（方程式の計算）

実験としてのシミュレーション（数値実験）

理論と実験の間の第三の方法論(Rohrlich1991)

- ・シミュレーションの認識論

「シミュレーション研究の雑多な方法論にも関わらず、われわれがシミュレーション
研究の結果への信念を正当化する方法の研究」(Winsberg 1999)

単純な理論からの演繹でもなく、データとの比較もできない。

シミュレーションの結果はなぜ、どういう場合に、どれだけ信頼できるのか
実験の認識論(Franklin)とのアナロジー
検証と妥当化

- ・シミュレーションと実験(Guala,Morgan,Parker,Winsberg)

介入、モデル、物質性、外的妥当性、背景知識

技術（理想化・近似、視覚化、分析・解釈など）

- ・シミュレーションとモデル

理論→Mechanical モデル→Dynamical モデル→計算モデル→現象モデル
(Winsberg1999)

「媒介者としてのモデル」プロジェクト(Morgan and Morrison 1999b)との関係
理論についての統語論的見解・意味論的見解への含意(Humphreys2004)

- その他、シミュレーションと〇〇
 - アナログシミュレーション
 - ブラックホールの力学をシミュレートするために流体を使う (Winsberg 2009)
 - モデル実験 人間について知るためにモデル生物 (ラットなど) に介入する
 - スケール実験
 - 風洞実験
 - (Parker 2009) ターゲットと「同じ物質」から成るがシミュレーション
 - 思考実験

- シミュレーションの科学哲学への含意
 - シミュレーションが科学に対してインパクトがあるということについてはコンセンサスがあるが、それが新しい哲学的問題を提起するかについては意見の違いがある。
 - Frigg and Reiss(2009)

参考文献

- Bones Inga (2010). *Simulating Science?* GRIN.
- Dowling, D. (1999). Experimenting on theories. *Science in Context*, 12(2), 261–273.
- Fox Keller, E. (2003). Models, simulation, and 'computer experiments.' In H. Radder (Ed.), *The philosophy of scientific experimentation* (pp. 198–216). Pittsburgh: University of Pittsburgh Press.
- Frigg, R., & Hartmann, S. (2006, Spring). Models in science. In E. Zalta (Ed.), *Stanford Encyclopedia of philosophy*. Downloadable at: <http://plato.stanford.edu/archives/spr2006/entries/models-science>.
- Frigg, Roman and Julian Reiss(2009). "The Philosophy of Simulation: Hot New Issues or Same Old Stew?" *Synthese: Models and Simulations* 169(3) : 593–613.
- Galison, P. (1996). Computer simulation and the trading zone. In P. Galison & D. Stump (Eds.), *Disunity of science: Boundaries, contexts, and power* (pp. 118–157). California: Stanford University Press.
- Guala, F. (2002). Models, simulations, and experiments. In L. Magnani & N. Nersessian (Eds.), *Model-based reasoning: Science, technology, values* (pp. 59–74). New York: Kluwer.
- Hartmann, S. (1996). The world as a process: Simulation in the natural and social sciences. In R. Hegselmann, U. Müller & K. Troitzsch (Eds.), *Modelling and simulation in the social sciences from the philosophy of science point of view* (pp. 77–100). Dordrecht: Kluwer.
- Hughes, R. (1999). The Ising model, computer simulation, and universal physics. In M. Morgan & M. Morrison (Eds.), *Models as mediators*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Humphreys, P. (1991). Computer simulations. *Philosophy of Science PSA, 19902*, 497–506.
- Humphreys, P. (1993). Numerical experimentation. In P. Humphreys (Ed.), *Patrick Suppes: Scientific*

- philosopher* (Vol. 2). Dordrecht: Kluwer.
- Humphreys, P. (1995). Computational science and scientific method. *Mind and Machines*, 5, 499–512.
- Humphreys, P. (2004). *Extending ourselves: Computational science, empiricism, and scientific method*. Oxford: OUP.
- Humphreys Paul(2009). ‘The Philosophical Novelty of Computer Simulation.’ *Synthese:Models and Simulations* 169(3) : 615–626.
- Morgan, M. (2002). Model experiments and models in experiments. In L. Magnani & N. Nersessian (Eds.), *Model-based reasoning: Science, technology, values* (pp. 41–58). New York: Kluwer.
- Morgan, M. (2003). Experiments without material intervention: Model experiments, virtual experiments, and virtually experiment. In H. Radder (Ed.), *The philosophy of scientific experimentation* (pp. 216–235). Pittsburgh, PA: University of Pittsburgh Press.
- Morgan, M. (2005). Experiments versus models: New phenomena, inference and surprise. *Journal of Economic Methodology*, 12, 317–329.
- Morgan, M., & Morrison, M. (1999a). Models as mediating instruments. *Models as mediators: Perspectives on natural and social science* (pp. 10–37). Cambridge: Cambridge University Press.
- Morgan, M., & Morrison, M. (1999b). *Models as mediators: Perspectives on natural and social science*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Norton, S., & Suppe, F. (2000). Why atmospheric modeling is good science? In C. Miller & P. Edwards (Eds.), *Changing the atmosphere: Expert knowledge and environmental governance*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Parker, Wendy(2009). ‘Does Matter Really Matter? Computer Simulations, Experiments and Materiality.’ *Synthese: Models and Simulations* 169(3) : 483–96.
- Rohrlich, F. (1991). Computer simulation in the physical sciences. *PSA 1990, II*, 507–518.
- Sismondo, S. (1999). Models, simulations and their objects. *Science in Context*, 12, 247–260.
- Stöckler, M. (2000). On modelling and simulations as instruments for the study of complex systems. In M. Carrier (Ed.), *Science at century’s end: Philosophical questions on the progress and limits of science*. Pittsburgh: University of Pittsburgh Press.
- Winsberg, E. (1999). Sanctioning models: The epistemology of simulation. *Science in Context*, 12(2), 275–292.
- Winsberg, E. (2001). Simulations, models, and theories: Complex physical systems and their representations. *Philosophy of Science*, 68(Proceedings), S442–S454.
- Winsberg, E. (2003). Simulated experiments: Methodology for a virtual world. *Philosophy of Science*, 70, 105–125.
- Winsberg, Eric(2009). ‘A Tale of Two Methods’. *Synthese: Models and Simulations* 169(3) : 575–92.
- Winsberg, Eric(2010). *Science in the Age of Computer Simulation* Chicago: University of Chicago Press .