# الباب الأول

## الانتظام من الشواش

قبيل الثورة العلمية فى القرن السابع عشر الميلادى، كان الشواش يحكم العالم بشكل يختلف اختلافا كبيرا عن الطريقة التى يستخدمها العلماء الآن لهذا اللفظ. بالطبع لا يوجد قانون بسيط يفسر سلوك الرياح والطقس، حدوث المجاعات أو مدارات الكواكب سوى أنها الإرادة الإلهية (أو الآلهة). لقد ساد الاعتقاد أن الكون متناسق، تدور الكواكب والشمس حول الأرض وهى مركز الكون وكل شىء. كل هذه المدارات دائرية لأن الدائرة أكمل الأشكال.

تسقط الأجسام لأسفل لأنها تتجه نحو مركز الأرض وهو مركز كل شىء وهو أيضا مركز التماثل وبالتالى فهو المكان الذى تتدافع إليه كل الأجسام وتحب أن تستقر به. حتى عندما جرؤ الفيلسوف أرستاركوس (من ساموس) والذى عاش فى القرن الثالث قبل الميلاد، أن يقول إن الأرض تدور حول الشمس كان يُتبع ذلك بأن المدار دائرى الشكل.. وهذه الأمثلة توضح بشكل جلى الفرق الأساسى بين العلوم القديمة والعلوم ما بعد جاليليو.

كان من بين قدماء اليونان علماء رياضيات بارعين وبالأخص فى الهندسة، يفهمون جيدا العلاقات بين الأشكال الثابتة، وظهرت هذه المعرفة بظهور المجتمعات الزراعية من بناء المنازل إلى تقسيم الأرض إلى حقول، ولكن كان ينقص هؤلاء فهم كيف تتحرك الأجسام وقوانين الحركة. يوضح هذا لغز «زينو» الشهير (Zeno) والذى يصف الجندى الذى لا يمكن أن يصيبه سهم؛ حيث إنه يتحرك بمسافة أبعد كلما قرب السهم منه، وهذا اللغز كان يدهش القدماء بشكل كبير.

بقى نموذج الكون الذى يتمركز حول الأرض حتى بعد أن أفصح نيكولاس كوبرنيكس فى عام ١٥٣٩م عن النموذج الآخر الذى يتمركز حول الشمس ولكن مع الاحتفاظ بكل المدارات دائرية الشكل، ولكن مع ظهور أعمال كبلر - بناء على مشاهدات تيكوبراهى - ثبت أن المدارات ليست دائرية وإنما على شكل قطع ناقص، خلافا لكل المعتقدات الراسخة عند قدماء اليونان، ويضاف إلى هذا أن جاليليو كان أول من أدخل مفهوم مقارنة النموذج النظرى مع نتائج التجربة العملية. لقد كان مفتاح أعمال جاليليو حادثة فى عام ١٥٨٣م حين كان يحضر احتفالا فى الكنيسة ولاحظ تأرجح النجفة المعلقة بسقف الكنيسة وقام بمقارنة زمن تأرجح هذه النجفة بنبضات قلبه، ثم توصل جاليليو إلى حقيقة كبرى وهو أن زمن الدورة - أى الزمن

اللازم لكى تكمل النجفة ذبذبة كاملة – يعتمد على طول الحبل الذى يحمل النجفة وليس المسافة التى، تتأرجح فيها النجفة، فاستخدم جاليليو فى التجارب اللاحقة بندولا بسيطا لقياس زمن حركة كرات على أسطح مائلة، وبهذا استطاع جاليليو أن يبلور مفهوم العجلة، وانتهى إلى أن عجلة الجاذبية تساوى ٩,٨٨ متر/ثانية مربعة وهى مقدار ثابت تسقط به كل الأجسام فى مجال الجاذبية الأرضية بصرف النظر عن كتلتها.

أضاف جاليليو رؤية هامة جدا سادت العلم بعد ذلك لما يقرب من أربعة قرون: لقد لاحظ جاليليو أن حركة الكرات تعتمد على مدى خشونة كل من سطحها والسطح المائل الذى تتحرك عليه، واستطاع جاليليو أن يصيغ النتائج التى توصل إليها عند استبعاد الاحتكاك الناتج عن خشونة الأسطح، بذلك أدخل مفهوم النماذج المثالية فى العلم، والتى استخدمها العديد من العلماء فيما بعد فى صياغة القوانين التى تحكم تصادم الكرات فى العلاقات والقوانين التى توصلوا إليها. قبل نيوتن كان المعتقد أن قذيفة المدفع تتحرك فى البداية فى خط مستقيم ثم تكمل مسارها على شكل جزء من دائرة ولكن أثبت جاليليو أن مسار القذيفة هو جزء من قطع مكافئ، كذلك أثبت جاليليو أن أكبر مدى للقذيفة عندما تُطلق بزاوية قدرها ٤٥° مع الأفقى، ثم ذاع صيت جاليليو بعد ذلك للأهمية العلمية لهذه الاكتشافات؛ فقد كان اهتمام العسكريين لا يتركز على النصوص الدينية أو المسارات المثالية وإنما على المسار الفعلى للقذيفة لكى تصيب أبعد هدف.

لقد كان كل هذا تمهيدا لأكبر اكتشاف فى القرن السابع عشر، وهو اكتشاف نيوتن لقانون الجذب العام، وأضاف نيوتن إلى كل هذا فكرة عبقرية وهى التجريد حيث كان يعتبر أن كتلة كل جسم – سواء كان المريخ. القمر أو حتى تفاحة – تتركز فى مركز ثقلها.

لكى يتمكن نيوتن من إجراء الحسابات المطلوبة وضع مبادئ حساب التفاضل والتكامل، ولكنه كان يضطر لترجمة هذه الحسابات للّغة السائدة التقليدية حتى يفهمها معاصروه، وتباطأ نيوتن فى نشر هذه الطريقة فى الحساب بحيث سبقه معاصره الألمانى ليبنتز فى نشر هذه الأفكار، مما خلق لبسا عند مؤرخي العلم: لمن ينسب الفضل فى وضع مبادئ حساب التفاضل والتكامل؟(*)

يمكن تطبيق نفس فكرة التجريد هذه وتجزئة كل جسم إلى عناصر صغيرة، بل

(*) فى نسخة وحيدة لأحد أعمال أرشميدس والتى تمت ترجمتها فى القرن العشرين يظهر سبق أرشميدس بفكرة التكامل مما يجعل المفاضلة بين نيوتن وليبنتز غير ذات معنى.

متناهية الصغر ثم جمع تأثير كل عنصر بإجراء تكامل، يمكن تطبيقها على الزمن أيضا: حيث يمكن رصد مسار سهم على شكل فترات زمنية قصيرة جداً ثم جمع تأثير كل هذه الفترات القصيرة بإجراء تكامل؛ لذا يمكن حساب مسار السهم بدقة عالية وينكشف سر لغز زينو ولا يصبح لغزا. بهذا يمكن أن نجزم بأهمية هذه الخطوة أنها حققت طفرة بالنسبة لقدماء اليونان الذين كانوا بارعين فى تحليل العلاقات بين الأشكال الساكنة فقط. الآن يمكن أن نصل إلى علاقات دقيقة تصف ما يحدث بين الأجسام المتحركة. توصل نيوتن إلى أن الجاذبية تخضع لقانون التربيع العكسى، ولكن هذه الحقيقة كانت معروفة لدى كل من روبرت هوك، أدموند هالى وكريستوفر رن (Rebert Hooke, Edmond Halley, Christopher Wren) وكلهم أعضاء فى المجمع الملكى، لكن كان على نيوتن أن يثبت أن قانون التربيع العكسى هو الوحيد الذى يؤدى إلى مدارات على شكل قطع ناقص، كذلك كان سبق نيوتن أن قانون الجذب العام صحيح ليس فقط بين الأرض والقمر أو الأرض والشمس وإنما لأى جسم مادى وأى جسم آخر: أى أنه قانون كونى صالح لكل زمان ومكان، كما وضع نيوتن قوانين الحركة الثلاثة المسماة باسمه، وبذا شملت دراسته الأجسام المتحركة والساكنة معا.

مع كل هذا النجاح الذى أحرزته قوانين نيوتن فى وصف حركة جسمين، إلا أنها كانت تحوى بذرة الشواش من حيث أنها تعطى إجابات دقيقة إذا كان الجسمان معزولين تماما، ولكن فى الكون لا يمكن فصل الأجسام بعضها عن البعض، وبالتالى حين نبدأ فى دراسة حركة ثلاثة أجسام، لا تعطى هذه القوانين إجابات دقيقة وإنما تحوى نسبة من الخطأ. لابد أن نشير هنا إلى نقطة جوهرية وهى أن هذه الإجابات التى تحوى نسبة من الخطأ ليس معيبة أو ينتج هذا عن قصور منا وإنما هى طبيعة الأمور وتدخل فى صلب البنية الرياضياتية نفسها.

يكمن الحل فى هذه الحالة فى فرض بعض التقريب، كأن نفرض أن أحد الأجسام ساكن فى البداية، ونبدأ فى دراسة حركة الجسمين ثم نضيف تأثير الجسم الثالث ثم الرابع وهكذا..

بالنسبة للمجموعة الشمسية وحيث أن كتلة الشمس تفوق مجموع كتل الكواكب الأخرى فى هذه المجموعة، فإن استخدام التقريب مثلا بالنسبة للمريخ يعطى مدارا قريبا جدا من القطع الناقص إذا أهملنا كتل بقية الكواكب.

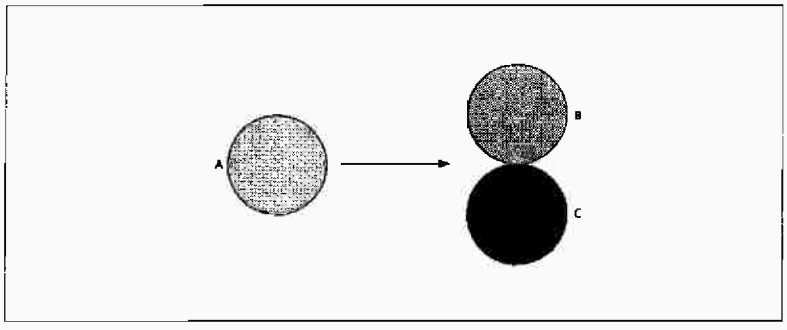
هذا التقريب لا يصلح أيضا إذا ما كانت كتل الأجسام الثلاثة التى ندرسها متقاربة والمسافات متساوية، ففى هذه الحالة يصعب الحصول على حلول تصف مدارات هذه الأجسام بدقة وإلى الأبد.

كان نيوتن واعيا لهذه النقطة، وكرد على ذلك وحيث أنه كان متدينا (رغم اختلاف معتقداته مع تعاليم الكنيسة فى ذلك الوقت) فقد قال إنه عندما تجنح مدارات هذه الكواكب عن طريقها المرسوم فسوف يتدخل الرب ليعيدها إلى مساراتها المرسومة. كان ليبنتز أيضا واعيا لهذه النقطة، وانتقد بشدة ميكانيكا نيوتن قائلا: إن ذلك يعنى أن الرب ليس صانع ساعات ماهر، وعليه التدخل عندما تجنح الساعة وتختل حركتها.

ظل هذا اللغز بلا حل حتى نهاية القرن الثامن عشر عندما بدأ عالم الرياضيات بيير لابلاس (Pierre Laplas) فى حساب مدارات كواكب المشترى وزحل وهى من أثقل الكواكب وخطوة بخطوة وجد لابلاس أن مدار المشترى يتمدد ومدار زحل ينكمش، وبهذا ظن لابلاس أنه قد أعاد الانتظام للمجموعة الشمسية، حتى أنه قال لنابليون: «إن عدم الانتظام فى هذين الكوكبين وإن كان يبدو أنه يناقض قانون الجذب العام ولكن الآن كل هذا يبرهن وبشكل صارخ على صحة هذا القانون».

كما سنرى فإن لابلاس كان محقا ولكن إلى نقطة معينة. بعد ذلك استقر الفكر بين علماء القرنين التاسع عشر والعشرين أن حل نظام المعادلات فى الميكانيكا يصف وبدقة حركة الكواكب والأجسام الأخرى، وعندما تتعقد الأمور فيكفى إيجاد حلول تقريبية تفى بالغرض المطلوب.

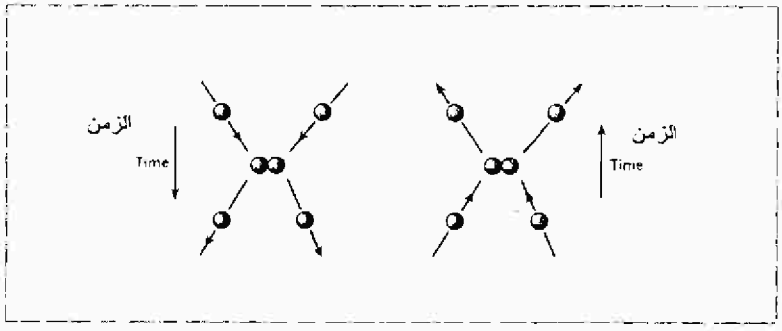
فى مثال آخر أصبح من الواضح أنه فى مسائل التصادم إذا صدمت كرة مرنة أخرى سواء كانت ساكنة أو متحركة فقوانين نيوتن تعطى الإجابة وبدقة كيف ستتحرك الكرتان بعد التصادم، ولكن إذا صدمت كرة كرتين متلامستين، فإن نفس تلك القوانين تعجز عن وصف سلوك الكرات بعد التصادم شكل (١-١).




شكل (١-١)

انشغل العلماء فى القرن التاسع عشر بحل المسائل التى يمكن حلها، وغضوا البصر عن تلك المعقدة، وهذا شىء طبيعى.

ولكن أثار لابلاس فى ١٨١٤م مشكلة أخرى هامة وهى أنه لو وجدت طريقة يمكن بها جمع كل المعلومات الضرورية عن كل الأجسام على اطلاقها فى الكون الذى نعيش فيه، وتم حل كل المعادلات التى تنتج عن ذلك أمكننا أن نحسب الأوضاع الماضية، كذلك والمستقبلية لهذه الأجسام. يعنى هذا أن قوانين نيوتن لا تحوى أفضلية لاتجاه الزمن نحو الماضى أو المستقبل. فعلا كما نرى فى شكل (١-٢) عند تصادم جسمين يمكن عكس كل الأسهم، أى عكس سهم الزمن، ولا يؤثر كل هذا على عملية التصادم ذاتها.




**شكل (١-٢): تصادم جسمين وانعكاس اتجاه سهم الزمن ولكن لابد هنا أن نشير إلى مالم يلاحظه أى من العلماء فى القرن التاسع عشر أنه لو حدث تصادم بين ثلاثة أجسام فى أى مكان فى الكون، ينهار هذا المبدأ تماما، ولكن لنترك هذا الموضوع للفلاسفة لكى يتناقشوه.**

من ناحية أخرى، من أهم الانتصارات العلمية فى القرن التاسع عشر هو نظرية المجالات الكهرومغناطيسية التى وضعها ماكسويل (١٨٣١ - ١٨٧٩م) والتى ارتكزت على أعمال فاراداى ((١٧٩١ - ١٨٦٧م) الذى أدخل مفهوم المجالين الكهربى والمغناطيسى.

رغم أن فاراداى وضع الصورة الكاملة للمجالين الكهربى والمغناطيسى إلا أنه لم يكن يملك المهارات الرياضية لكى يصيغ الشكل الرياضى لها، ولكن أنجز هذا العمل جيمس كلارك ماكسويل في الستينيات من القرن التاسع عشر، وصاغ نظرية مكونة من أربع معادلات أصبحت بمثابة قوانين نيوتن بالنسبة للميكانيكا - بحل هذه المعادلات الأربع أشار ماكسويل إلى ما يسمى بالموجات الكهرومغناطيسية التى تنتشر وتحمل معها مجالين كهربى ومغناطيسى، كذلك فسرت معادلات ماكسويل كيف تعمل المحركات والمولدات الكهربائية. ثمة جانب أساسى فى معادلات ماكسويل أنها أدت إلى اكتشاف موجات تنتشر بنفس سرعة الضوء ($٣\times١٠^{٨}$م/ث) والتى كانت معروفة آنذاك، وهذا مما يؤكد الطبيعة الكهرومغناطيسية للضوء. جانب آخر أساسى فى هذه المعادلات وهو أن سرعة الضوء ثابتة بصرف النظر عن حركة

المصدر الذى يُصدر هذا الضوء، وهذه الصفة بالذات قادت أينشتين إلى التوصل إلى النظرية النسبية الخاصة فى عام ١٩٠٥م. دون التوقف كثيرا عند النظرية النسبية الخاصة بالتفصيل، كل الذى يهمنا أن قوانين الحركة فى النسبية الخاصة ضرورية وفقط عندما تتحرك الأجسام بسرعات قريبة من سرعة الضوء هذه، أما بالنسبة لحركة الكواكب فى المجموعة الشمسية فتكفى وبدقة عالية جدا معادلات نيوتن.

لابد هنا أن نشير إلى أن معدلات ماكسويل أيضا لها حد أقصى – عندما نتعامل مع مسافات صغيرة جدا (على مستوى الذرات والجزيئات) فلا ميكانيكا نيوتن ولا معادلات ماكسويل تصلح – لابد أن نستخدم ما يسمى بميكانيكا الكم وهى الميكانيكا التى تصف سلوك الأجسام الصغيرة جدا فى مسافات ضئيلة جدا على المستوى الذرى والجزيئى.

لكن الجانب الأهم فى معادلات ماكسويل هو أنها أيضا مثلها مثل ميكانيكا نيوتن لا تعطى أية أفضلية لاتجاه سهم الزمن ، فمثلا من الغريب أن نرى كرات البلياردو تتجمع مرة أخرى وتقذف بالكرة التى قذفها اللاعب فاصدمت بهم، وتستعيد طاقة الاحتكاك وترقص فى مثلث جميل كما كان الوضع لحظة بدء اللعبة – هذا شىء غريب فعلا بالنسبة لكل هذه المعادلات ألا تفرق بين الحدث ومعكوسة.

من الانجازات الكبيرة فى فيزياء القرن التاسع عشر هو إثارة هذه المسألة المتعلقة بسهم الزمن، لقد أثيرت هذه القضية وبشدة فى الديناميكا الحرارية، فمن الجوانب الأساسية الهامة فى الديناميكا الحرارية أنها تتعامل مع عدد كبير جداً من الجسيمات ويحتاج التعامل معها إلى التعامل مع متوسطات وإحصائيات، ولكن الجانب المثير هو اعتبار أن أى نظام ثرموديناميكى يفترض أن هذا العدد الهائل من الجسيمات يتحرك ويتصادم بعضه مع البعض ومع جدران الآنية التى تحويه حسب قوانين نيوتن للحركة.

إن النظرية الحركية للغازات مثال هام جدا، لكيفية استخراج الانتظام من النظم العشوائية؟ إن كلمة غاز (gas) قد نحتها العالم البلجيكى بوهانز هلمونت من كلمة الشواش (chaos) ، فقد ظلت هذه الصورة سائدة على مدى ثلاثمائة عام، حتى صاغ كل من ماكسويل فى بريطانيا وبولتزمان فى النمسا النظرية الحركية للغازات. أحد أسس هذه النظرية أن ضغط الغاز ينشأ عن تصادمات العدد الهائل من الجزيئات (فى علبة كبريت هناك ألف بليون بليون ٠٠٠ أى العدد ١٠ متبوع بثلاث وعشرين صفرا) . فى هذه الحالة لايهم إذا أخذنا صندوقا أكبر أو أصغر عشر مرات. إن جزىء الهواء يتصادم حوالى أربع ملايين مرة فى الثانية الواحدة مما يعطى إحساسا بأن الهواء

هو وسط استمرارى (continuous medium) . مع هذا العدد الهائل واضح أنه لا معنى لمعرفة كل معادلات الحركة لكل الجزيئات، وبالتالى لابد من المعالجة الإحصائية لمثل هذا النظام المكون من عدد هائل من الجسيمات. ولكن كان على علم الحرارة والديناميكا الحرارية أن يعالج بعض الظواهر الحرارية فى عالمنا الحقيقى هذا، وهو أن الحرارة تنتقل من الجسم الساخن إلى الجسم البارد وليس العكس. هنا يكمن شىء كبير: إن سهم الزمن واضح هنا. إذا تركنا ثلجا فى الهواء الجوى فإنه يمتص حرارة من الجو المحيط وينصهر، ولكن لم يحدث أن رأى أحد أن كمية من الماء تترك لنفسها فنجد أنها تجمدت دون أن نمتص منها حرارة بشكل ما هنا واضح جدا سهم الزمن – إنه يسير فى اتجاه واحد. كانت أعمال العالم الفرنسى جوزيف فوريه هى الصيغة النظرية للتعبير عن هذه الحقيقة، وأن مقدار الحرارة الذى ينساب عبر وسط ما يتناسب مع فارق درجات الحرارة . يمثل قانون فوريه هذا حجر الزاوية فى فهم سلوك الحرارة، كما كانت أعمال جاليليو أساس الميكانيكا التى تبلورت بعد ذلك على يد من أتوا بعده.

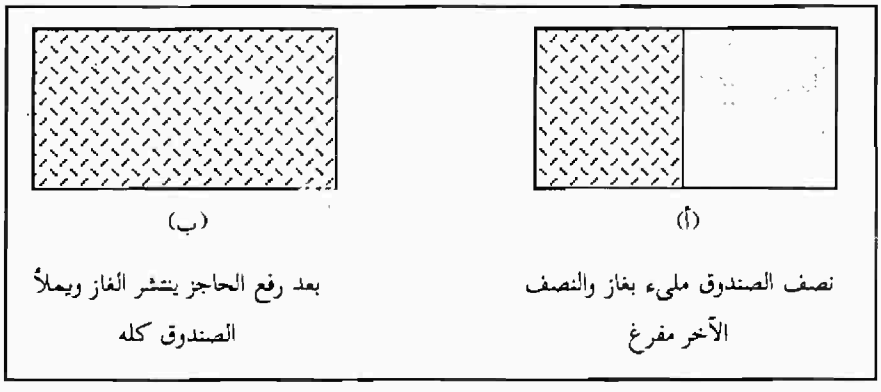
بعد ذلك لاحظ الكونت رومفورد فى باڤاريا فى التسعينيات من القرن الثامن عشر (ولد باسم بنيامين طومسون فى ماساتشوستس والتى كانت مستعمرة بريطانية فى ذلك الوقت، وخلع عليه جورج الثالث ملك باڤاريا لقب كونت، وكان رومفورد يعمل كمستشار له) وكان مسئولا عن ثقب مواسير المدافع. لقد لاحظ رومفورد أنه فى نهاية عملية الثقب فإن الماسورة وفتات المعدن المتبقى والمثقاب كلها تسخن وبشدة.

هكذا تبلورت حقيقة أن الآلة البخارية تحول الحرارة إلى شغل ميكانيكى، وثقب مواسير المدافع يحول الشغل الميكانيكى إلى حرارة. هكذا نرى أن الشغل والحرارة وجهان لعملة واحدة. بعد ذلك قام جيمس جول فى بريطانيا فى أربعينيات القرن التاسع عشر بتجارب دقيقة لقياس معامل تحول الشغل الميكانيكى إلى حرارة. قاد كل هذا هلمهولتز فى ألمانيا إلى صياغة قانون بقاء الطاقة وما يسمى بالقانون الأول للديناميكا الحرارية، ويعنى قانون بقاء الطاقة أن الطاقة لا تفنى ولا تخلق من عدم وإنما تتحول من صورة إلى أخرى. كل ذلك يتم فى «نظام مغلق» وهذا نموذج آخر مثالى (مثل السطح الأملس). تبلور بعد ذلك القانون الثانى للديناميكا الحرارية والذى ينص على أنه فى نظام مغلق ستنتهى كل الطاقة الحركية إلى حرارة، وسوف تنتهى كل فروق درجات الحرارة ويصبح النظام بدون أية سمات مميزة، بل وعديم الفائدة.

أصبح لما يسمى الآن بالقانون الثانى للديناميكا الحرارية عدة صيغ بعد أن صاغه لأول مرة اللورد كلڤين (Kelvin) (وليام طومسون) (William Thomson) فى عام ١٨٥٢م.

كانت الفكرة المحورية فى صياغة طومسون أن الكون هو عبارة عن آلة ضخمة تحول الحرارة إلى شغل ميكانيكى ولكن أثناء هذه العملية يُفقد جزء من هذه الحرارة، فى الواقع هى لا تفقد ولكن تتناثر وتنتشر فى الفراغ الكونى وترفع درجة حرارته بمقدار ضئيل. لا يتعارض هذا مع القانون الأول للديناميكا الحرارية نظرا لأن مقدار الطاقة ككل ثابت، ولكن مقدار الطاقة «المفيدة» يتناقص. بهذا أصبح على الفيزيائيين أن يدرسوا هذه الطاقة المفيدة ويُخضعوها لمعادلات رياضية تسمح بإجراء الحسابات اللازمة للاستفادة القصوى منها. دفع كل ذلك العالم الألمانى رودولف كلاوزيوس لكى (Rudolph Clausius) يُدخل مفهوم «الأنتروبية» فى منتصف الستينيات من القرن التاسع عشر.

لنأخذ مثالا على ذلك: صندوق نصفه ملىء بغاز والنصف الآخر فارغ، وبين النصفين حاجز (شكل (١-٣)). إذا رفعنا هذا الحاجز فسوف يشغل الغاز الحيز بالكامل وتنخفض درجة حرارة الغاز قليلا نظرا للتمدد، وإذا أردنا إعادة الغاز إلى نصف الصندوق مرة أخرى، لابد من بذل شغل، وفى النهاية هناك طاقة مفيدة قد فقدت. مثال آخر: إذا أخذنا لوحة شطرنج يكون بها مربعات سوداء وأخرى بيضاء، لنتصور أننا استطعنا خلط كل جزيئات هذا الطلاء فسوف نحصل على لوحة مطلية بلون رمادى، إذا أردنا بشكل ما إعادة اللوحة إلى شكلها الأول، فلابد أن نبذل شغلا حتى نعيد الطلاء إلى المربعات التى كانت سوداء.



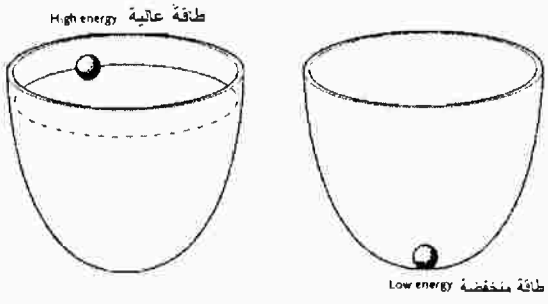

شكل (١-٣)

يعنى كل هذا أن سهم الزمن واضح فى هذه المسائل – كل نظام مغلق يميل نحو الفوضى. إذا طبقنا هذه الرؤية على الكون كنظام ثرموديناميكى نجد أنه فى النهاية لابد أن تتساوى درجات الحرارة فى الكون وبالتالى تنتهى الطاقة المفيدة ويحدث ما يسمى بالموت الحرارى للكون. ساد هذا الاعتقاد بين علماء النصف الثانى من القرن التاسع عشر، ولكن فى بداية القرن العشرين اكتشف العلماء الفلكيون أن الكون يتمدد وبذا أصبحت هذه القضية أكثر تعقيدا مما كان يُتصور.

من كل ما سبق نرى أنه فى الحياة على المستوى الماكروسكوبى يسير كل شىء من الانتظام إلى الفوضى، ولكن على المستوى الميكروسكوبى إذا عكسنا سهم الزمن فلابد أن يعود كل شىء كما كان: أى يكون اتجاه سهم الزمن من الفوضى إلى الانتظام. كان من الواضح أن هناك معضلة ولابد لها من حل.

كَمُن الحل فى إدخال مفهوم الجاذب "attractor" فبالنسبة للصندوق الذى يحوى نصفه غازا ونصفه الآخر فارغ، إذا حدثت فتحه فى الحاجز فإن الغاز ينتشر فى النصف الفارغ ويتوزع متجانسا فى كل الحيز ويصل إلى حالة اتزان. هذه الحالة تتميز بشيئين: إنها حالة استقرار (أى الحد الأدنى للطاقة) والآخر هو أن هذه الحالة لا تعنى بالكيفية التى وصل بها الغاز إلى هذا الحالة (أى أنها لا تحمل أى بصمات عن الماضى أو عن تاريخ الأحداث التى أوصلت الغاز إلى هذه الحالة المستقرة).

فى حالات أخرى أبسط وضعنا كرة ملاصقة للجدار الداخلى لإناء، كما فى شكل (١-٤)، نجد أن الكرة بعد بعض التذبذبات تستقر فى القاع - تمثل نقطة القاع «الجاذب» فى هذه الحالة.



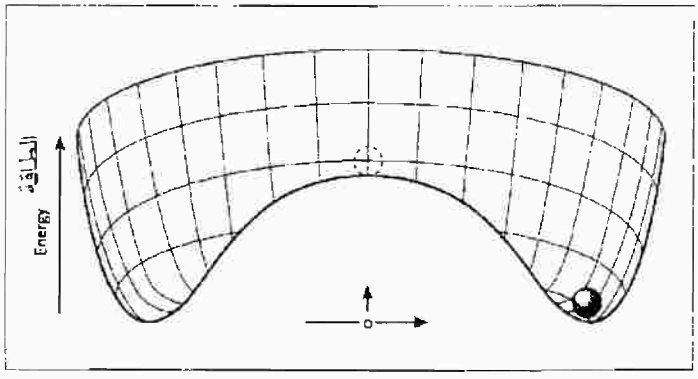

شكل ١-٤

ليست الأمور بهذه البساطة - إذا وضعنا كرة فى قبعة مكسيكية فإنها تستقر عند أى نقطة فى القاع ويسمى الجاذب فى هذه الحالة «جاذب القبعة المكسيكية» كما فى شكل (١-٤ ) حيث يمثل الجاذب دائرة كاملة.

بالنسبة للبندول البسيط المثالى فإنه يظل يتذبذب دون توقف، وهذه هى الحالة «الجاذبة» لهذا النظام. أما بالنسبة للبندول الحقيقى فإنه سوف يتوقف بعد عدد من التذبذبات فى وضع رأسى، وهذه هى «الحالة الجاذبة» بالنسبة للبندول الحقيقى - من المهم هنا أن هذه الحالة لا تحمل أية معلومات عن كيف وصل النظام إليها - أى أن ليس لها «ذاكرة»، ويقال إن النظام ينسى الشروط الابتدائية له - أى من أين

بدأ حتى وصل إلى حالته النهائية هذه. كل ما يهمنا هو: أين بدأ حتى وصل إلى حالته النهائية هذه؟ كل ما يهمنا هو: أين يوجد النظام الآن؟

السؤال الآن هو: ومتى يصل النظام إلى حالة الاستقرار؟




**شكل (١ – ٥): إن الحالة التى يستقر عندها النظام تسمى «بالجاذب» فى الحالة المبيّنة سوف تستقر الكرة فى قاع «الوادى» وهى منطقة ممتدة وليست نقطة.**

لنستعر مثالا أورده إليا بريجوجين Ilya Brigogine وإيزابيل ستينجر Izabelle Stengers

إذا أوصلنا أسطوانتين تحويان خليطا من غازى الأيدروجين وكبريتيد الأيدروجين فإنه عند حالة الاستقرار يكون الخليط متجانسا. أما إذا كانت درجة حرارة إحدى الأسطوانتين أعلى ولو بقدر ضئيل، يبدأ الخليط فى الانفصال وتأخذ نسبة الأيدروجين فى الازدياد فى الاسطوانة الأدفأ. هكذا نرى أن حالة الاستقرار تزول ويبدأ ظهور انتظام فى حالة الشواش. وهكذا إذا بعدنا قليلا عن حالة الاستقرار، نلاحظ أن الطاقة تنساب من مكان لآخر – أى يظهر انتظام . الخلاصة أن النظام عند استقراره تكون الأنتروبية أعلى ما يمكن، ولكن معدل إنتاج الأنتروبية يقل عندما يبعد النظام عن وضع الاستقرار. لم يتبلور هذا المفهوم إلا فى بداية القرن العشرين. أدى ذلك إلى ظهور الديناميكا الحرارية كعلم إحصائى، وامتدت إلى ما يسمى «بالميكانيكا الإحصائية» وهكذا تبلورت أيضا التفرقة بين كون النظام فى حالة استقرار وكونه قريبا من الاستقرار، والفارق بين الحالتين كبير جدا.

الجزء الأكبر من هذه الأعمال يرتبط بمحاولة وصف سلوك الغازات بواسطة علاقات ومعادلات رياضية فيما يسمى بالنظرية الحركية للغازات. لقد أدخل كلاوزيوس مفهوم «المسار الحر المتوسط» فى ١٨٥٨م، وهو المسافة المتوسطة التى يقطعها الجزىء بين كل تصادمين متتاليين، كذلك أدخل كلاوزيوس مفهوم القطر الاعتبارى للجزىء، وبنى ماكسويل على هذه المفاهيم وتوصل إلى ما يسمى «توزيع

ماكسويل للسرعات». أضاف لودفيج بولتزمان إلى كل أعمال ماسكويل ووضع أسس الميكانيكا الإحصائية. على الجانب الآخر من الأطلنطى وفى الولايات المتحدة قام جوشوا ويلارد جيبس (Josua Willard Gibbs) بصياغة قوانين الميكانيكا الإحصائية فى قالب رياضى أنيق.

دون الدخول فى تفاصيل «الميكانيكا الإحصائية» سوف نحاول تفسير اللغز السابق، وهو أن كل حركات الجزيئات وتصادماتها تخضع لقوانين نيوتن، أى أنها انعكاسية، ولكن إذا وضعنا جزيئات غاز فى نصف صندوق ثم أزحنا الحاجز فإنه ينتشر فى الصندوق كله ولم ير أحد حتى الآن أن الغاز يمكن أن يتجمع وحده مرة أخرى فى نصف الصندوق دون تدخل خارجى.

لنرى كيف عالجت «الميكانيكا الاحصائية» هذه المشكلة، إذا بدأنا بجزيئين اثنين فالحالات المختلفة التى تتواجد بها الجزيئات فى نصفى الصندوق هى أربع حالات: الجزىء أ فى النصف الأيمن والجزىء ب فى النصف الأيسر والعكس، أو يتواجد الجزيئان إما فى النصف الأيمن أو فى النصف الأيسر. وهكذا مع الوقت يمكن أن نشاهد أن أيًا من الأوضاع الأربعة يتحقق فيه ربع وقت الملاحظة. إذا كان هناك أربع جزيئات، فسوف نلاحظ أنه فى معظم الوقت يكون هناك جزيئان فى كل نصف من الصندوق. من النادر تماما أن ترى تجمع الجزيئات الأربعة فى أى من النصفين. إذا أخذنا ثمانية جزيئات فسوف يكون الوضع الذى تتوزع فيه الجزيئات أربعا فى النصف الأيمن وأربعا فى النصف الأيسر سبعين حالة مقابل حالة واحدة عندما تتجمع الجزيئات فى أحد النصفين.. وهكذا نرى أن تجمع الجزيئات فى أحد النصفين احتمال ضئيل وإن كان لا يساوى الصفر. مع ازدياد عدد الجزيئات تقل احتمالية هذا التجمع بشكل كبير جدا. توصل بولتزمان (Boltzmann) إلى علاقة تربط الأنتروبية بالاحتمالية(*) وكان فخورا جدا بهذه العلاقة.

السؤال الآن: كم من الجزيئات فى صندوق صغير من الغاز؟ تأتى جذور هذه المشكلة منذ صاغ العالم الإيطالى أماديو أفوجادرو فى ١٨١٤م مبدأه الذى ينص على أن الحجوم المتساوية من الغازات عند معدل الضغط ودرجة الحرارة تحوى عددا متساويا من الجزيئات.

رغم المحاولات العديدة التى تمت لتحديد عدد الجزيئات فى حجم معين سوف نذكر عمل لوشميدث فى الستينيات من القرن التاسع عشر حيث استطاع بمهارة أن يحدد أنه فى السنتميتر المكعب الواحد يوجد ٢,٦٨٤ × ١٩١٠ جزىء. لكى نعطى

(*) هذه العلاقة هى $S = K. \log p$ حيث S- الأنتروبية، P- الاحتمالية، k- يسمى ثابت بولتزمان وقد نقشت هذه العلاقة على قبر بولتزمان .

فكرة عن كبر هذا الرقم، لنأخذ فى الاعتبار أنه فى مجرة درب التبانة حوالى ٣٠٠ بليون أى ٣٠٠ × ٩١٠ نجم، وإذا ضربنا هذا الرقم فى نفسه نحصل على ٩٠٠ × ١٩١٠ نجم فى الكون كله من هذا نجد أن ٤٥٠ سنتيمتر مكعب تحوى عددا من الجزيئات تساوى تقريبا عدد النجوم فى الكون كله. مع هذا العدد الضخم من الجزيئات توصل بولتزمان أنه فعلا يستقر الغاز فى حالة تساوى درجات حرارة جزيئاته – أى أن علاقات بولتزمان تتحدث عن قيم متوسطة لضغط ودرجة حرارة جزيئات الغاز – وليس عن ما يحدث بالتفصيل مع الجزيئات نفسها.

ولكن يظل سؤال هام: لماذا نعيش نحن الآن فى كون منتظم؟ ذهب بولتزمان أبعد من أى شخص آخر وقال: إن الموت الحرارى للكون قد حدث فعلا، ونحيا نحن الآن فى حالة استقرار. ولكن ثمة سؤال آخر: لماذا نحيا نحن فى عالم منتظم؟ كيف تكون الحياة على الأرض بعيدة هكذا عن الاستقرار؟ أجاب بولتزمان: إن الحياة على الأرض هى مجرد «اضطراب fluctuation» عالى الشدة قصير العمر،ولخص بولتزمان رؤيته أننا أمام وضع من اثنين إما أن نفرض أن الكون ككل فى حالة من حالات الاحتمالات الضئيلة أو غير المحتملة بالمرة؛ نظرا لأن المسافة بيننا وبين أقرب نجم سيريوس (Sirius) هى لحظة قصيرة جدا فى عمر كون بهذا الحجم الهائل. فى هذه الحالة سوف توجد أجزاء من الكون حيث تزداد الأنتروبية وفى أجزاء أخرى سوف تقل، وكلا الاتجاهين لا يمكن التفريق بينها فهما متكافئان، مثلما يستحيل تحديد «إلى أعلى» و«إلى أسفل» فى مثل هذا الكون. مثل هذه الفرضية مقبولة إذ إنها تفسر لماذا يكون اتجاه الزمن من عالم أكثر انتظاما إلى عالم أقل انتظاما، وهذا يحدد الماضى والمستقبل، ويدعم كذلك القانون الثانى للديناميكا الحرارية، والموت الحرارى لكل عالم منفصل معزول دون التأثير على كون الكون ينتقل من حالة ابتدائية إلى حالة أخرى نهائية.

رغم أن بولتزمان قد اختار الجاذبية للتعرف على الاتجاه إلى أعلى أو إلى أسفل، فإن الجاذبية هى نفسها التى تقوض فكرة أن الكون يتجه من حالة ابتدائية إلى حالة نهائية، حيث أن فكرة بولتزمان تدعم الاعتقاد السائد بنظرية الانفجار الكبير، ولكن الآن يؤمن الكثير من الفلكيين أن الجزء المرئى من الكون هو جزء صغير جدا من الكون الكبير، بل اللانهائى، وأن عالمنا هو واحد من فقاعات كثيرة جدا تتحدد فى كون متجانس إلى حد ما.

لكن هناك عيب واضح ليس فى رؤية بولتزمان الفلسفية ولكن فى الرياضيات التى استخدمها، لقد بدأ بولتزمان بفرضية أن الجزيئين المتصادمين فى الغاز لا يعرف أحدهما الآخر قبل التصادم، وبالتالى فحركتهما غير مرتبطة – أحدهما بالآخر – ولكن بعد التصادم فالحركة مرتبطة حسب قوانين نيوتن، وهكذا يظهر سهم الزمن فى

هذه الحسابات، ولكن ليس من المنطقى أن نفترض أن هذا الارتباط يعمل فى اتجاه ما ولا يعمل فى الاتجاه المعاكس. وضع لابلاس هذا النقد بصورة أن هذه الحسابات تؤدى إلى أن أوضاع وسرعات كل جزىء تمتلك ذاكرة عن كل الأحداث الماضية للغاز، أى أن كل تصادم لكل جزىء مرتبط بسلوك كل جزىء من جزيئات الغاز.

هنا ظهر هنرى بوانكاريه (١٨٥٤ - ١٩١٢م) ليثبت بشكل رياضى صارم أنه بالنسبة لصندوق يحوى عددا محدودا من الجزيئات (مهما كان كبيرا ولكن ليس نهائيا) ويخضع لقوانين نيوتن للحركة، فإنه سوف يمر بحالات متكررة، بحيث يتكرر وضع وسرعة كل جزء مساويا للحالة التى بدأ بها الغاز. يمكن أن نسوق مثالا مناسبا ففى ورق اللعب (الكوتشينة) عندما نبدأ بترتيب معين للأوراق ونبدأ فى خلطها بشكل عشوائى فسوف يمر وقت معين حتى تأخذ الأوراق نفس الترتيب بالضبط الذى بدأنا به. يسمى الزمن اللازم لذلك «بالزمن الدورى لبوانكارية» .هنا يمكن القول بأن الأنتروبية وإن زادت فسوف يمر وقت معين تعود بعده إلى قيمتها الأولى، وهذا ناتج عن تطبيق قوانين الحركة لنيوتن والتى لا تفرق بين الماضى والمستقبل، كلاهما له نفس الاحتمالية.

لكن هنا جانب هام وهو أن الفترات الزمنية التى نتحدث عنها كبيرة بدرجة يستحيل استيعابها، إن عمر الكون هو $١٧١٠$ ثانية، من ناحية أخرى يحوى السنتيمتر المكعب $١٩١٠$ جزىء وهكذا يمكن تصور احتمالية أن الغاز يمكنه أن يتواجد فى حالة بعيدة عن حالة الاستقرار، إنها بالقطع احتمالية متناهية الضآلة. إذا كان الصندوق يحوى اثنين وخمسين جزيئا (أى عدد الأوراق فى كومة ورق اللعب) يكون زمن الدورة $٥٢١٠$ ثانية أى $٣٥١٠$ مرة عمر الكون. لكى يساوى زمن الدورة عمر الكون لابد أن يحوى الصندوق سبعة عشر جزيئا فقط.

فى النهاية يمكن أن نستنتج أن الديناميكا الحرارية تسمح بزيادة الأنتروبية كما تسمح بنقصانها، ولكن هذه الحقيقة لم تكن مريحة لكل علماء الفيزياء. بعد قرنين من الزمن منذ أعمال نيوتن، وبعد ٧٥ سنة من أعمال لابلاس يجد العلماء أن العالم ليس عالما محددا وإنما عالم احتماليات، ولكن استقر هذا الوضع، وولدت أجيال من الفيزيائيين ونشأت وكبرت ونشأت على هذه الحقيقة وتقبلتها كواقع، لكن بوانكاريه انتقل إلى مشكلات أخرى، فى أواخر الثمانينيات من القرن التاسع عشر: تبين أن نيوتن كان محقا فى قلقه على استقرار مدارات الكواكب وأن لابلاس لم يكن محقا فى قناعته أنه قد توصل إلى حل اللغز ، وتوصل بوانكاريه إلى أنه لا يمكن حل مسألة الأجسام الثلاثة ولا حتى تقريبيا، وأن المدارات البسيطة التى تخضع لقوانين الحركة لنيوتن وقانون الجاذبية يمكن أن تسلك سلوكا شواشيا وغير ممكن التنبؤ بما يحدث لها بكل معنى الكلمة.