

الميكانيك الكلاسيكي

Classical Mechanics

١ مقدمة (Introduction)

من بين الظواهر الطبيعية اليومية التي تحيط بنا: حركة الأجسام. فهناك حركة الكائنات الحية، السقوط الحر، حركة الكواكب، إلخ. سنحاول فيما يلي تتبع التطور التاريخي للنظريات التي وضعها الإنسان بهدف تفسير أسباب الحركة. يمكن تقسيم هذا المحور إلى أربعة أقسام:

- **السقوط الحر (free fall):** سناقش التفسير المقترحة من العصر القديم (الحضارة اليونانية) إلى غاية أعمال غاليلو غاليلي تاركين الحديث عن قانون نيوتن للجاذبية إلى ما بعد معالجة حركة الكواكب.
 - **قوانين الحركة لنيوتن (Newton's laws of motion):** سنعالج التطور التاريخي للمفاهيم التي تعتمد عليها صياغة هذه القوانين، و المتمثلة في: الزمان، الفضاء خاصة الفراغ، العطالة، كمية الحركة، و القوة.
 - **حركة الكواكب (Astronomy):** سندرس مختلف المقترحات لوصف و شرح حركة الكواكب. بعد ذلك سنناقش قانون نيوتن للجاذبية.
 - **ما بعد نيوتن (Beyond Newton):** سينصب إهتمامنا على بعض المفاهيم الأساسية التي طورت في الميكانيك الكلاسيكية مثل: قوانين الإنحفاظ، الكمون. سيكون عرضنا سطحيًا و خاليًا من أي مناقشة تقنية.
- الغائب الأكبر هو **الكهرودمغناطيسية (electromagnetism)**. سنحاول -إن أسعنا- الحظ- أن نخصص محورًا كاملًا لهذا الموضوع. يمكن للقارئ المهتم تصفح الموقع الإلكتروني:

<https://plato.stanford.edu/contents.html>

للإطلاع على أعمال بعض الفلاسفة و العلماء. سيتم ذكر البعض منهم فيما يلي.

٢ السقوط الحر (Free Fall)

كانت التفسيرات الأولى للسقوط الحر تعتمد على الإعتقاد بأن الأرض مسطحة. فالسقوط من أعلى إلى أسفل هي حركة طبيعية (natural) ولا تحتاج إلى أي تفسير. لكن هذا التفسير الساذج لم يعد صالحًا مع إدراك كروية الأرض حوالي القرن الثالث قبل الميلاد^(١).

^(١)لقد ناقش الفلاسفة الإغريق إمكانية كروية الأرض قبل ذلك، إنطلاقًا من حوالي القرن السادس قبل الميلاد، و قدموا بعض الأدلة لتعزيز تخمينهم.

إعتمد أرسطو (Aristotle 384-322 BC) على نظرية العناصر الأربعة لتقديم تفسير للسقوط الحر. كان الاعتقاد السائد آنذاك هو أن الأجسام التي توجد على الأرض^(٢) (Earth) هي مزيج من أربعة عناصر^(٣): الماء (Water)، الهواء (Air)، النار (Fire)، و الأرض أو التربة (Earth). أعطى أرسطو لهذه العناصر الأساسية خصائص حركية:

- طبيعة التربة و الماء تجعلهما يسقطان في إتجاه مركز الكون (Universe center) الذي هو نفسه مركز الأرض (Earth center).
- في المقابل طبيعة الهواء و النار تجعلهما يصعدان نحو السماء (Heaven).

تتعلق الحركة الطبيعية للأجسام بنسبة العناصر الأساسية في تركيبها. فالجسم يسقط نحو مركز الأرض إن كانت نسبة الماء و التربة هي الغالبة و العكس صحيح. إضافة إلى هذا، إعتقد أرسطو أن سرعة سقوط الأجسام تتناسب مع وزنها (weight): الأجسام الثقيلة تسقط أسرع من الأجسام الخفيفة. لم تمس إضافات المسلمين أسس نظرية أرسطو للسقوط الحر. فمعظم النقاشات كانت تتمحور حول حركة الكواكب التي سيكون لنا معها جلسة فيما بعد. نذكر في هذا المقام أعمال أبو الفتح الخازني (Abu al-Fath Khazini)، حوالي القرن الحادي عشر، حيث طور مفهوم الطاقة الكامنة للجاذبية (gravitational potential energy)، و إقترح أن جاذبية الأرض تتناسب عكسيا مع المسافة عن مركزها. كما أنه كان السباق في التمييز بين الكتلة (mass) و الثقل (weight). كان علينا إنتظار غاليليو غاليلي (Galileo Galilei 1564-1642) و أعماله لتغيير نظرتنا حيال السقوط الحر. رغم الأسطورة التي تتحدث عن رميه لكرتين ذات وزنين مختلفين من برج بيزا المائل (Leaning Tower of Pisa) لإثبات أن سرعة السقوط الحر لا تتعلق بالوزن، إلا أن أعماله المكتوبة لا تتحدث عن ذلك. فعلى العكس، إستعمل غاليليو التجربة العقلية (thought experiment) لإثبات وجود تناقض في نظرية أرسطو كالاتي. تخيل أننا ندرس السقوط الحر لجسم مركب من كرتين ذات وزنين مختلفين مربوطتين بقضيب مهمل الكتلة. هناك نتيجتان ممكنتان لهذه التجربة حسب نظرية أرسطو للسقوط الحر:

- من جهة، يسقط الجسم ككل أولا، لأن وزنه هو الأكبر.
- من جهة أخرى، تسقط الكرة الأثقل، ثم الكرة الأخف.

هذا التناقض الواضح دليل على أن النظرية التي إنطلقنا منها خاطئة. فالخلاصة الحتمية لغاليليو هي أن « سرعة السقوط الحر لا تتعلق بوزن الأجسام ». إختلف المؤرخون حول ما إذا كان غاليليو قد إستعمل التجربة للتأكد مما توصل إليه. فهناك تجربة المستوي المائل (inclined surface) التي يعتقد بأنه قام بها. كان الهدف من وراء إستخدام المستوي المائل تغيير سرعة السقوط الحر و جعلها أبسطاً مما يجعل قياس مدة السقوط أدق. يجب أن نتذكر أن آلات قياس الزمن آنذاك لم تكن ذات دقة عالية. لمزيد من المعلومات يمكن الإطلاع على الفصل الأول في الكتاب:

^(٢)يختلف مفهوم الأرض عند الإغريق عن مفهومنا في نقاط ثانوية. فيمكننا أن نتصور الأرض عند الإغريق على أنها الكرة الأرضية مع غلافها الجوي.
^(٣)سنعود لهذه النظرية بشيء من التفصيل في محور الكيمياء (Chemistry).

<http://www.arvindguptatoys.com/arvindgupta/ten-beautiful-experiments.pdf>

لكن تعين علينا أن ننتظر أعمال نيوتن لنحصل على تفسير للسقوط الحر.

٣ قوانين نيوتن للحركة (Newton's Laws of Motion)

إن قوانين نيوتن للحركة هي نتاج تظافر جهود عدة فيزيائيين و فلاسفة عبر التاريخ. قبل الغوص في بعض جوانب هذه القصة الشيقة و مختلف الإلتباسات في المفاهيم و الصعوبات التي كان على الفيزيائيين تجاوزها، دعونا نذكر أنفسنا بمبادئ الحركة بهدف توجيه سبرنا للتاريخ.

١.٣ المبادئ (The Principles)

وضع نيوتن (Newton 1642-1726) ثلاثة قوانين للحركة. لكل قانون وضيافته، و الكل يشكل مجموعة متكاملة. سنعرض -فيما يلي- نصوص هذه القوانين مرفقين ذلك بنقاش بسيط حول أهمية كل منها و ما يعنيه.

١.١.٣ قانون العطالة (Principle of Inertia)

يسمى القانون الأول لنيوتن بقانون العطالة لأنه يعرف لنا معالم (frames) خاصة: المعالم العطالية (Inertial frames).

«في معلم عطالي، يبقى أي جسم على حاله (سكون أو حركة مستقيمة منتظمة) إن لم يؤثر عليه مؤثر خارجي.»

“In an inertial frame, an object either remains at rest or continues to move at a constant velocity \vec{v} , unless acted upon by a force.”

فقوانين الفيزياء تأخذ نفس الشكل في هذه المعالم العطالية. لكننا عندما نحاول فهم ماهية هذه المعالم العطالية نلاحظ أنها تتطلب مفهوما خاصا للزمن (time) و الفضاء (space). فالمعالم العطالية موجودة بنفسها و لا ترتبط بأي ظاهرة فيزيائية. لإعطاء إطار لهذه المعالم، إعتبر نيوتن الزمان و المكان **كيانين مطلقين** (absolute entities). سنعود إلى هذه النقطة عندما نناقش تطور مفهوم الزمن و الفضاء -خاصة الفراغ (vacuum)- فيما يلي.

يحتوي هذا القانون على مفهوم مهم آخر ألا و هو **الحركة الدائبة** (perpetual motion) و المتمثلة في الحركة المستقيمة المنتظمة. هذا النوع من الحركة كان موضع إهتمام و إلتباس على مر العصور -كما سنرى ذلك فيما بعد-

٢.١.٣ القانون الثاني (The Second Law)

يعطي المبدأ الثاني القانون الأساسي للميكانيك.

«في معلم عطالي، يساوي مجموع القوى الخارجية \vec{F} المؤثرة على جسم كتلة هذا الجسم m ضرب التسارع \vec{a} »

“In an inertial frame, the vector sum of external forces “ \vec{F} ” on an object is equal to the mass “ m ” of that object multiplied by its acceleration “ \vec{a} ”.

$$\sum \vec{F} = m \cdot \vec{a} = \frac{d}{dt} \vec{p} .$$

رغم أن هذه الصياغة للقانون هي الأكثر تداولاً إلا أن الصياغة الأصح هي:

«في معلم عطالي، يساوي مجموع القوى الخارجية \vec{F} المؤثرة على جسم مقدار تغير كمية حركة (momentum) هذا الجسم بالنسبة للزمن»

تعرف كمية الحركة عادة على أنها كتلة الجسم m ضرب سرعته \vec{v} ، لكن التعريف الأعم يستعمل الوصف الهاميلتوني (Hamiltonian formulation) للميكانيك. من خلال هذه الصياغة يتضح أن المفاهيم الأساسية في هذا القانون هي: القوة و كمية الحركة.

يمكننا، بالنظر إلى الصيغة الرياضية (mathematical formulas)، اعتبار القانون الأول كحالة خاصة من القانون الثاني. لكن هذه النظرة تجانب السبب الأساسي لصياغة القانون الأول و إعطائه هذا الوصف (القانون الأول). كما أسلفنا الذكر، الهدف من القانون الأول هو إعطاء تعريف للمعالم العطالية.

٣.١.٣ القانون الثالث (The Third Law)

يمكن اعتبار القانون الثالث قانون توازن (equilibrium).

« لكل فعل رد فعل يساويه في الشدة و يعاكسه في الإتجاه. »

“When one body exerts a force on a second body, the second body simultaneously exerts a force equal in magnitude and opposite in the direction on the first body.”

يلعب هذا القانون دوراً أساسياً عند دراسة الجمل الميكانيكية المعزولة (isolated mechanical systems). فالجمل الميكانيكية المعزولة هي الجمل التي لا تؤثر على و لا يؤثر عليها الوسط الخارجي، لكن مختلف مكوناتها تؤثر على بعضها البعض. فبدون وجود القانون الثالث أعلاه لا يمكن إيجاد مثل هذه الجمل بإستثناء الجمل العديمة الأهمية (trivial systems).

كانت إحدى أول المحاولات لصياغة هذا القانون على يد الفيلسوف و العالم المسلم ابن باجة (Avempace 1095-1138). حيث قال: « لكل قوة مؤثرة قوة مضادة » (“there is always a reaction force for every force exerted”). لكنه لم يحدد إن كان رد الفعل مساوياً للفعل.

٢.٣ القوة (Force)

يعود مصطلح القوة الخارجية (external force) إلى أرسطو (Aristotle 384-322 BC) الذي قسم القوى إلى ثلاثة أصناف:

- القوى الطبيعية (Natural Forces): وهي القوى التي تتعلق بطبيعة الأجسام كالسقوط الحر (طالع فقرة السقوط الحر) و حركة الأجرام السماوية (Heavenly Bodies) (طالع فقرة المجموعة الشمسية).
- القوى التلقائية (Spontaneous Forces): وهي القوى النابعة من الكائنات الحية (Living Organisms).
- القوى الخارجية (External Forces): وهي جميع القوى الأخرى.

يظهر جليا من هذا التقسيم سبب التسمية. فيمكن إعتبار القوى الطبيعية و التلقائية قوى داخلية لأنها نابعة من داخل شيء ما، عكس القوى الخارجية. أعطى أرسطو الوصف التالي لتأثير القوة الخارجية^(٤):

«تكون سرعة الجسم \vec{v} متناسبة طرديا مع شدة القوة الخارجية \vec{F} و عكسيا مع وزن الجسم m و كثافة الوسط ρ ».

“The speed “ \vec{v} ” at which an object moves is proportional to the amount of force exerted on it “ \vec{F} ” and inversly proportional to its weight “ m ” and the density of medium “ ρ ” through which it moves.”

يمكن صياغة قانون الحركة لأرسطو على الشكل التالي:

$$\vec{F} = \frac{m}{\rho} \cdot \vec{v}$$

بوسعنا ربط الأخطاء المرتكبة في صياغة القانون بأمرين:

- قياس الزمن (Time Measurement): لم يكن قياس الزمن دقيقا في وقت أرسطو. و ما زاد الطين بلة تعريف أرسطو للزمن الذي ربطه بالتغير، طالع الفقرة الخاصة بالزمن لمزيد من المعلومات.
- الإحتكاك (Friction or Resistance): لاحظ أرسطو أن حركة الأجسام تتعلق بالوسط (الهواء أو الماء) الذي تتحرك فيه و كذا شكل الجسم. ربط أرسطو الملاحظة الأولى بتأثير كثافة الوسط^(٥)، لكنه لم يجد تفسيرا للملاحظة الثانية. للتغلب على الإشكالية الأخيرة، قرر أرسطو أن يقارن تأثير القوة على أجسام ذات الشكل نفسه. يمكن فهم هذا التصرف على أن أرسطو إعتبر شكل الجسم جزءا من طبيعته. النظرة الحديثة هي وجود قوة إحتكاك بين الجسم و الوسط الذي يتحرك فيه.

^(٤) يمكن أن تكون صياغة أرسطو لهذا القانون بدون المقادير الشعاعية.

^(٥) رغم أن أرسطو إستعمل كثافة الوسط في قوانينه إلا أنه لم يعطها تعريفا دقيقا. يعتقد بعض المؤرخين أنه قصد لزوجة (viscosity) الوسط.

دعونا نتقمص شخص أرسطو و نناقش نتائج قانونه مقارنين إياها بالأشياء المعروفة آنذاك. يمكننا طرح أسئلة كوسيلة لنقد القانون:

- ماذا يحدث عندما نؤثر بقوة لمدة زمنية معينة؟

- ماذا يحدث في الفراغ (vacuum)؟

من السهل أن نستنتج -إنطلاقاً من قانوننا- أن الجسم يتوقف تماماً حين يتوقف تأثير القوة. كان هذا موقف أرسطو لكنه إصطدم بإشكالية حركة **القذائف** (projectiles) التي تستمر رغم إنتهاء تأثير القوة. لحل هذه الإشكالية، إفترض أرسطو أن القوة تحتاج لوسط لكي تستطيع التأثير. فالقوة تؤثر بالإلتماس (contact) عندما ندفع أو نسحب جسماً ما، أو يتم نقلها عن طريق الهواء (أو الماء) في حالة القذيفة.

يضعنا السؤال الثاني أمام معضلة (dilemma) لأن قانوننا لا يصلح في هذه الحالة ($\rho = 0$). تصادف نفس الإشكالية مع الإقتراح السابق بإلزامية وجود وسط لكي تستطيع القوة أن تؤثر. قرر أرسطو أن يتخلص من الفراغ لحل هذين الإشكاليين. فالفراغ بالنسبة إليه غير موجود أصلاً (horror vacui). سنعود لهذه النقطة عند حديثنا عن الفراغ.

تعود أول صياغة رياضية لقوة خارجية إلى العالم **أرخميدس** (Archimedes 287-212 BC) وهي **دافعة أرخميدس** (Archimedes law of buoyancy). يقول هذا القانون أن «كل جسم مغمور في الماء يحس بقوة تتناسب مع ثقل الماء المزاح». بدأت تظهر عيوب قانون أرسطو مع تقدم صناعة آلات قياس الزمن و تحسن دقتها. زد على ذلك إهتمام العلماء (خاصة الكيمائيين) بتعريف كثافة المواد و حسابها. فهناك العالم **ابن باجة** (Avenpace 1095-1138) الذي نضى تعلق ناتج تأثير القوة بكثافة الوسط. قام معاصره **هبة الله البغدادي** (1080-1164) بنقض قانون أرسطو حيث قال أن القوة تتناسب مع التسارع (acceleration) عوض السرعة (speed). و عرف التسارع على أنه مقدار تغير السرعة مع الزمن. قام **ابن رشد** (Averroes 1126-1198) بالنظر إلى قانون الحركة في الإتجاه المعاكس حيث إستعمله لقياس القوة بحيث عرفها على أنها مقدار العمل اللازم لتغيير الحالة الحركية لجسم ما. و رغم صحة ما ذهب إليه العلماء المسلمون إلا أنه كان علينا إنتظار نيوتن لمعرفة الصيغة الرياضية الدقيقة لقانونه الثاني. قبل المرور إلى الموضوع التالي المرتبط بالعطالة، دعونا نناقش مفهوما مهما في القانون الثاني لنيوتن بدءاً بالسؤال التالي:

«كم عدد مفاهيم الكتلة (mass) (الذي نجده) في الميكانيك؟»

الجواب المتعارف عليه هو مفهومان: **الكتلة العطالية** (inertial mass) و **الكتلة الثقالية** (gravitational mass). فالكتلة العطالية هي التي تظهر في القانون الثاني لنيوتن، أما الكتلة الثقالية فهي التي تتأثر بقوة الجاذبية. و من العلماء الأوائل الذين تحدثوا عن الكتلة العطالية **ابن رشد** (Averroes 1126-1198). لكنه بما أن سرعة السقوط الحر لا تتعلق بالكتلة، فيمكننا إستخلاص -إعتماداً على القانون الثاني للحركة- أن الكتلة العطالية و الكتلة الثقالية متناسبتان. و بوسعنا جعلهما متساويتان بإختيار مناسب للوحدات. لكن التساؤل الذي يبقى مطروحاً:

«هل للكتلة العطالية و الكتلة الثقالية نفس الطبيعة؟»

سنناقش الإجابة على هذا السؤال عند حديثنا عن **النسبية العامة** (general relativity).

٢.٣ كمية الحركة (Momentum)

عندما ننظر بتمعن إلى القانون الأول للحركة لنيوتن نلاحظ أنه يحتوي على ثلاثة مفاهيم: العطالة، المعلم العطالي، و الحركة المستقيمة المنتظمة الدائبة. سننظر أولاً في الحركة المستقيمة المنتظمة التي تمثل حالة خاصة من الحركة الدائبة. ستقودنا رحلتنا لمناقشة كمية الحركة.

١.٣.٣ الميل (Inclination)

إعتقد الإغريق أن هناك فرقاً جوهرياً بين الحركة (movement) و السكون (rest). إعتبر أرسطو أن السكون هو الحالة الطبيعية (natural state) للأجسام بينما خالفه الرأي لوكريتيوس^(٦) (Lucritius 99-55 BC) حيث إعتقد أن الحالة الطبيعية للأجسام هي عبارة عن حركة ذات سرعة ثابتة^(٧). رغم أن هذه النظرة لم تؤد مباشرة إلى ثورة في الأفكار، إلا أن قبول إمكانية وجود حركة دائبة إعتبر خطوة أولى في الإتجاه الصحيح. لكن ما هي الخاصية التي تضمن إستمرارية الحركة الدائبة؟ يمكننا -لتكوين فكرة عن هذه الخاصية- أن ندرس حركة تشبه شيئاً ما الحركة الدائبة. حركة لا تعتمد على قوة ظاهرية لتستمر: حركة القذائف. كما أسلفنا سابقاً، لم يكن تفسير أرسطو لحركة القذائف مقنعاً كلية، خاصة أنه قاد إلى التخلي عن الفراغ. من بين الفلاسفة الذين راجعوا شرح هذه الحركة جون فيلوبونوس (John Philoponus 490-570). إقترح فيلوبونوس أن استمرار حركة القذيفة ليس بسبب نقل تأثير قوة من طرف الوسط بل لأن القذيفة تكتسب خاصية سماها ميل (inclination/motive power) عند مغادرتها. لكنه إعتقد أن القذيفة تفقد تدريجياً هذه الخاصية مما يؤدي إلى توقفها. قام المسلمون بأخذ فكرة فيلوبونوس و تطويرها معتمدين على التجارب. نذكر على سبيل المثال ابن سينا (avicenna 980-1037) الذي خلص إلى مبدأ شبيه بمبدأ العطالة لنيوتن.

«يواصل الجسم المتحرك حركته في نفس الإتجاه ما لم تؤثر عليه قوة خارجية».

“A body moves perpetually unless an external force stops it or changes its direction of motion”.

كان ابن سينا بهذا من الأوائل الذين لاحظوا إمكانية الحركة الدائبة (perpetual motion). لم ينقصه سوى المعلم العطالي للحصول على مبدأ العطالة الكامل. كما كان له السبق في تعريف كمية الحركة^(٨) (momentum) على أنها حاصل ضرب كتلة الجسم في سرعته. إعتقد ابن سينا -عكس فيلوبونوس- أن كمية الحركة هي كمية محفوظة و لا تختفي من تلقاء نفسها. فكما هو واضح من المبدأ أعلاه، ربط ابن سينا تبدد كمية الحركة بتأثير قوة خارجية.

^(٦) يمكن أن يكون قد تأثر بأعمال أبيقور (Epicurus 341-270 BC).

^(٧) لا يعرف بالتحديد إن كان المقصود هو الحركة المستقيمة أو أي حركة منتظمة.

^(٨) إستعمل ابن سينا مصطلح الميل لفيلوبونوس بدل كمية الحركة.

٢.٣.٣ الزخم Impetus

كانت بدايات تعامل الأوربيين مع كمية الحركة و الحركة الدائبة مبنية على أعمال فيلوبونوس و ابن سينا. سمي جون بوريدان (Jean Buridan 1295-1363) الخاصية التي يكتسبها الجسم بعد التأثير عليه بقوة: **الزخم** (Impetus). وافق بوريدان ابن سينا الرأي حيث إعتبر أن الزخم لا يتبدد من تلقاء نفسه. يعتبر الزخم سلف مفهوم **كمية الحركة** (momentum) فكلا المفهومين يشتركان في عدة خصائص حيث يعتمدان على الكتلة و السرعة، و كلاهما محفوظ بإستثناء حالة تأثير قوة خارجية. لكنه يوجد فرق جوهري بين المفهومين: فالزخم عبارة عن **مقدار سلمي** (scalar quantity) عكس كمية الحركة التي هي **مقدار شعاعي** (vectorial quantity). فالزخم يتعلق **بطويلة شعاع السرعة** (speed) عكس كمية الحركة التي تتعلق بشعاع السرعة.

إستعمل بوريدان الزخم لتفسير حركة الكواكب^(٩). إنطلاقاً من تعريف الزخم و إنحفاظه في غياب مؤثر خارجي يمكن تفسير كل من الحركتين المستقيمة و الدائرية المنتظمتين. يعود الفضل إلى **جيامباتيستا بينيديتي** (Giambattista Benedetti 1530-1590) لتصحيح هذه النظرة و حصر الحركات التي يمكن تفسيرها بالزخم إلى الحركة المستقيمة المنتظمة:

«الحركة الذاتية لأي جسيم مادي تحت تأثير زخم إكتسبه عن طريق تأثير قوة خارجية هي حركة مستقيمة غير منحنية.»

“... [Any] portion of corporeal matter which moves by itself when an impetus has been impressed on it by any external motive force has a natural tendency to move on a rectilinear, not a curved, path.”.

إستعمل بينيديتي حركة الحجر في **المخدفة** أو **المقلاع** (sling) كمثال لإثبات أن الحركة الدائرية هي حركة قصرية. أثرت نظرية الزخم على المحاولات الأولى لصياغة قوانين الميكانيك. سنرى بعضاً من ذلك فيما يلي.

٢.٣.٣ الديناميك الزخمي (Impetus Dynamics)

رغم ظهور عدة نقائص في نظرية أرسطو للديناميك إلا أن الفيزيائيين لم يكونوا مستعدين للتخلي عنها كلياً. كانت المحاولات الأولى عبارة عن إجراء عمليات تجميلية لهذه النظرية. على سبيل المثال، كان بوريدان -رغم نظريته المختلفة لحركة القذيفة- يشاطر أرسطو الرأي في إعتبر **السكون و الحركة** شيئين مختلفين جوهرياً. لكن نظرية الزخم التي صاغها كانت من أهم الأسباب التي أدت إلى وأد نظرية أرسطو للديناميك. فقد أدت نظرية الزخم إلى واحدة من أهم **التجارب الفكرية** (thought experiment) في تاريخ الفيزياء ألا و هي **تجربة النفق** (The tunnel experiment). كانت هذه التجربة بوابة **حركة النواس** (pendulum motion) و **الحركة الإهتزازية** (oscillatory motion) للولوج إلى عالم الميكانيك. كما أسلفنا سابقاً، كانت بدايات نظرية الزخم كمحاولة لإعطاء تفسير آخر لحركة القذائف. ثم تطورت هذه النظرية لتلخص في المبدأين:

^(٩) أي الحركة الدائرية المنتظمة. تذكر أن الإعتقاد السائد آنذاك كان أن حركة الكواكب ليست نتاج أي قوة.

- تأثير قوة على جسم في حالة سكون تؤدي إلى زيادة زخم هذا الأخير.
- كمية الزخم لا يتغير إلا تحت تأثير قوة خارجية.

لكن التساؤل المطروح:

«ماذا أضافت نظرية الزخم من جديد إلى مائدة الميكانيك آنذاك؟»

كانت تجربة النفق إجابة لهذا التساؤل. يمكننا أن ننسب فكرة التجربة إلى محاولة إيجاد قوة في الطبيعة تغير اتجاه تأثيرها في مرحلة ما من التجربة. وقع الاختيار على جاذبية الأرض لأنها تحقق هذه الخاصية. كان الاعتقاد آنذاك أن سبب الجاذبية هو طبيعة الأجسام التي تدفعها للسقوط نحو مركز الأرض أو أن مركز الأرض يجذب إليه الأجسام. فإن كنا في نقطتين متناظرتين بالنسبة لهذا المركز (antipodal)، سيكون تأثير قوة الجاذبية في اتجاهين متعاكسين. لكي نتمكن من القيام بهذه التجربة يتوجب علينا حفر نفق يمر بمركز الأرض^(١٠) الذي سبب التسمية.

تتمثل تجربة النفق في جعل جسم في حالة سكون على إرتفاع معين من سطح الأرض يسقط في هذا النفق. ماهي النتائج التي يمكننا أن نتوقعها من هذه التجربة؟

- إن إعتدنا على نظرية أرسطو، فإن الجسم يتوقف عن الحركة نهائياً عند وصوله إلى مركز الأرض. و إن إستعملنا أي نظرية تشترك مع نظرية أرسطو في المبادئ نتوصل إلى النتيجة نفسها.

- في المقابل تعطي نظرية الزخم نتيجة مختلفة تماماً. عند سقوط الجسم و قبل بلوغه مركز الأرض، تزداد كمية زخمه مع مرور الوقت حتى تبلغ قيمتها القصوى عند مركز الأرض. لأن الزخم لا يتبدد من تلقاء نفسه فإن حركة الجسم لا تتوقف بل تستمر بعد الوصول إلى مركز الأرض. لكن اتجاه تأثير الجاذبية هذه المرة هو عكس اتجاه الحركة مما يؤدي إلى تبدد كمية الزخم شيئاً فشيئاً. و لأن أصل كمية الزخم هو الجاذبية و لأن الجاذبية نفسها هي سبب تبدد الزخم، فإن الجسم لا يتوقف عن الحركة حتى يكون على نفس الإرتفاع الذي بدأ منه، لكن في الجهة الأخرى من الأرض، مما يعيدنا إلى وضعية مشابهة لوضعية البداية. بإستعمال نفس الأفكار نخلص إلى أن حركة الجسم تكون إهتزازية ذهاباً و إياباً بين نقطتين على نفس الإرتفاع من سطح الأرض لكن متناظرتين بالنسبة لمركزها.

يمكن تلخيص هذه النتيجة في المقولة التالية لغاليليو:

« يكتسب جسم أثناء سقوطه من إرتفاع ما كمية من الزخم كافية لإعادته إلى نفس الإرتفاع. »

“The heavy falling body acquires sufficient impetus [in falling from a given height] to carry it back to an equal height”.

^(١٠) لاحظ أن هذه التجربة تفترض أن حقل الجاذبية الأرضية ذو تناظر كروي (spherically symmetric). هذه الخاصية محققة إن إعتبرنا أن مركز الأرض هو سبب الجاذبية، لكننا نعلم أن ذلك غير صحيح لأن كتلة الأرض هي سبب الجاذبية. هذا يعني أن توزيع هذه الكتلة يجب أن يتعلق بالمسافة عن مركز الأرض فقط.

رغم أن هناك فرقا واضحا بين النتائج المتوقعة لتجربة النفق اعتمادا على النظرية المستعملة إلا أنه لا يمكن إجراء التجربة. و بدل التخلي عنها نهائيا، استعملت نتائجها لشرح حركة النواس (pendulum) بالشكل التالي. أعتبر أن الجسم المهتز مربوط بحبل طويل يتدلى من سقف القبة السماوية حيث توجد النجوم الثابتة (fixed stars) ليشكل الكل نواسا ضخما. لأن قطر الأرض أصغر بكثير من طول الحبل، يمكن إعتبار حركة كرة النواس مستقيمة. يمكن الآن النظر إلى النواس العادي على أنه جملة مصغرة عن النواس الكوني متكونة من حبل صغير و كتلة تتحرك فوق الأرض لا داخل النفق، و مركز الأرض هو منتصف الحركة^(١١). تم تطبيق نفس الفكرة لتفسير أي حركة إهتزازية: تزداد كمية الزخم إنطلاقا من السكون لتصل ذروتها ثم تتناقص لتصبح منعدمة لتزداد مرة أخرى و هكذا دواليك.

٤.٣.٣ كمية الحركة (momentum)

حاول رينيه ديكارت (René Descartes 1596–1650) استعمال الزخم في بناء نظريته للميكانيك. فانطلق من الافتراضين (assumptions):

- الكون مكون من جسيمات.
 - الجسيم يبقى على حاله (سكون أو حركة) إلا إذا اصطدم بجسيم آخر.
- وضع ديكارت مبدأ إنحفاظ الزخم (conservation of impetus) كمبدأ أساسي للميكانيك. لكن النظرية التي توصل إليها عانت من مشاكل عدة. قام بعد ذلك كل من جون واليس (John Wallis 1616-1703)، كريستوفر رن (Christopher Wren 1632-1723)، و كريستيان هوغنس (Christiaan Huygens 1629-1695) بحل مسألة التصادمات المرنة^(١٢) (elastic collision)، حيث وضعوا المبدأين^(١٣):
- لا تتغير كمية الحركة الكلية (total momentum) قبل و بعد التصادم.
 - لا تتغير الطاقة الحركية الكلية (total kinetic energy) قبل و بعد التصادم.
- كما أسلفنا سابقا، يكمن الفرق بين الزخم و كمية الحركة في كون الزخم كمية سلمية عكس كمية الحركة التي هي كمية شعاعية. لكن النتائج الفيزيائية لهذا الفرق ذات أهمية قصوى. ففي الواقع لا يلعب الزخم أي دور فيزيائي في الميكانيك. لكن، كيف نفسر نجاح الزخم في تفسير الحركة الإهتزازية بما فيها حركة النواس؟ الجواب يتعلق بإنحفاظ الطاقة (conservation of energy).

٤.٣ العطالة (Inertia)

كما أسلفنا سابقا، عندما نتكلم عن العطالة (inertia) فإننا نقصد عدة مفاهيم:

^(١١) لاحظ أن هذه النظرة تختلف تماما عن النظرة الحديثة لحركة النواس. تعتبر النظرة الحديثة أن الحركة الإهتزازية تكون من أعلى إلى أسفل، عكس نظرية الزخم التي تعتبر الحركة الإهتزازية هي حركة جانبية من اليمين إلى اليسار.

^(١٢) في الواقع درس واليس أيضا التصادمات الغير مرنة (inelastic collision).

^(١٣) اقترح غوتفريد لايبنتز (Gottfried Leibniz 1646-1716) تعريف الطاقة الحركية.

• عرفت **العطالة** (inertia) في البداية على أنها مقاومة أي جسم فيزيائي لتغيير حالته الحركية. يمكن إستعمال **الكتلة العطالية** (inertial mass) أو **الحركة المستقيمة المنتظمة** (uniform rectilinear motion) لوصف ذلك.

• **مبدأ العطالة** (Principle of inertia) و الذي ينص على تكافؤ المعالم (frames) التي تتحرك بسرعة ثابتة بالنسبة لبعضها البعض.

لقد تحدثنا عن النقطة الأولى لتبقى النقطة الثانية. كان **غاليليو** (Galileo) السباق في ملاحظة هذا التكافؤ رغم أنه صاغه بالنسبة للحركة **الدائرية المنتظمة** (uniform circular motion). لكن ما هو السبب وراء ذلك؟ للإجابة على هذا السؤال يجب أن نتحدث عن حركة الكواكب - خاصة الأرض - بدون الدخول في التفاصيل لأننا سنخصص فقرة كاملة لذلك.

• **أرسطو** (Aristotle): إعتبر أرسطو أن الأجرام السماوية تتكون من مادة مثالية لا وزن لها و غير قابلة للتغيير سماها **الأثير**^(١٤) (Ether). إعتقد أرسطو أن حركة الأجرام السماوية -كونها مثالية- هي حركة منتظمة، و لأنها دورية فقد آمن بأن الحركة هي حركة دائرية منتظمة.

• **كوبرنيك** (Copernicus): إعتبر كوبرنيك أن الشمس هي مركز المجموعة الشمسية و أن الكواكب بما فيها الأرض تدور حولها. و يمكن إعتبار حركة الأرض حركة دائرية منتظمة^(١٥).

كان غاليليو من مساندي نظام كوبرنيك لحركة الكواكب. بنى موقفه هذا اعتمادا على ملاحظاته الفلكية بإستعمال المنظار (telescope).

• هناك جبال على سطح القمر مما يعني أن الكواكب ليست مثالية كما كان يعتقد.

• وجود أربعة أقمار تدور حول كوكب **المشتري** (Jupiter) مما يعني أن الأرض لا تختلف عن الكواكب الأخرى.

• يمر كوكب **الزهرة** (Venus) بنفس مراحل القمر مما يعني أنه يدور حول الشمس.

لكن هل نستطيع أن نثبت حركة الأرض إنطلاقا من تجربة على سطحها؟ إهتم غاليليو بحركة الأرض حول نفسها. إعتقد غاليليو، اعتمادا على تعميم لحركة النواص مستعملا نظرية الزخم و حركة القمر، أن:

«أي جسم يتحرك في حركة دائرية منتظمة مركزها مركز الأرض يواصل حركته ما لم تؤثر عليه قوة خارجية».

“all external impediments removed, a heavy body on a spherical surface concentric with the earth will maintain itself in that state in which it has been; if placed in movement towards the west (for example), it will maintain itself in that movement”.

^(١٤) لقد لمح أستاذه **أفلاطون** (Plato) إلى هذه المادة.

^(١٥) على الأقل في حدود دقة الملاحظة آنذاك.

فبالنسبة لغاليليو، إن تحركت سفينة نتيجة زخم إكتسبته ، فإنها ستواصل حركتها الدائرية المنتظمة حول الأرض بدون توقف ما لم تؤثر عليها أي قوة. إنطلاقاً من هذه النتيجة و بإستعمال تجربة فكرية داخل حجرة السفينة، توصل غاليليو إلى نتيجة إستحالة معرفة ما إذا كانت السفينة في حركة أو سكون ما لم نستعمل ملاحظة خارجية. لكنه كان يتكلم عن الحركة الدائرية المنتظمة. يجدر بنا أن نذكر في هذا المقام أن أول من فكر في مبدأ العطالة من الأوروبيين هو إسحاق بيكمان (Isaac Beekman 1588-1637). بعد محاولات فاشلة لفهم طبيعة الزخم (impetus) الذي كان يعتبر سبباً للحركة الدائبة (perpetual motion)، طرح التساؤل التالي:

«لماذا يتوقف الجسم عن الحركة ما لم يكن تحت تأثير خارجي؟»

قاده هذا السؤال إلى الإستنتاج أن التغيير في الحركة -لا الحركة نفسها- هي التي تحتاج إلى تفسير.

٥.٣ الفراغ (Vacuum)

كان مفهوم الفراغ (vacuum) و إمكانية وجوده محل نقاش منذ القدم. إعتبر مؤيدو النظرية الذرية (atomism)، أمثال ليوكيبوس (Leucippus 5th century BC) و ديمقراط (Democritus 460-370 BC) أن الفراغ موجود لأنه أساسي لحركة الذرات. خالفهم الرأي أفلاطون (Plato 427-423 BC) و تلميذه أرسطو (Aristotle 384-322 BC). فتعريف الفراغ نفسه بالنسبة لأفلاطون يجعل وجوده محل شك، أما أرسطو، فقد جزم بعدم وجوده مستعملاً عدة حجج، من بينها أن الفراغ ستملؤه أي مادة محيطة به، زد على ذلك أن حركة أي جسم في الفراغ ستكون حركة دائبة (perpetual motion)، الشيء الذي إعتبره أرسطو ضد الطبيعة. هناك أيضاً إشكالية تأثير القوة التي تحتاج، حسب أرسطو، لوسط كي تؤثر. من أجل هذا إستعمل أرسطو المصطلح horror vacui أو الطبيعة تمقت الفراغ (Nature abhors a vacuum).

إختلف العلماء المسلمون حول إمكانية وجود الفراغ أم لا. فمنهم من كان ضد فكرة وجوده مستعملين حججاً شبيهة بحجج أرسطو، من بينهم الفارابي (Alfarabi 872-950). في المقابل كان هناك من آمن بوجود الفراغ من أمثال ابن الهيثم (Alhazen 965-1040). و من الفلاسفة الذين أخذوا موقفاً وسطاً البيروني (al-Biruni 973-1048) حيث قال:

«لا توجد هناك أدلة قابلة للملاحظة التي تثبت وجود الفراغ من عدمه».

“there is no observable evidence that rules out the possibility of vacuum.”

كان هناك نقاش من نوع آخر أثناء العصر الذهبي للحضارة الإسلامية حول طبيعة الفضاء، أهو مستمر (continuous) أم متقطع (discontinuous). كانت معظم النقاشات في هذا المجال كانت تعتمد على النظرية الذرية (atomism). فقال مساندوا الفضاء المتقطع بأن إستمرارية الفضاء تتعارض مع كون الذرة لا تتجزأ. و قال المناوئون لهذه النظرة بأن كون الفضاء مستمراً شرط أساسي لحركة الذرات.

١.٥.٣ الفراغ الجزئي (Partial Vacuum)

عاد التساؤل عن إمكانية وجود الفراغ إلى الواجهة مع بداية النهضة الأوروبية. كان النقاش يتمحور أساساً حول إمكانية خلق فراغ جزئي. رغم بعض المحاولات السابقة في هذا الإتجاه، إلا أن هذا التساؤل نقل النقاش من الفلسفة إلى الفيزياء. كانت لتجربة إيفانجليستا توريتشيلي (Evangelista Torricelli 1608-1647) -التي أدت إلى إختراع البارومتر (Barometer)- أهمية كبرى في هذا الموضوع. كان الهدف من هذه التجربة هو إيجاد حل لظاهرة لاحظها صناع المضخات المائية. رغم محاولات متعددة، لوحظ أن 10 أمتار هو الإرتفاع الأقصى الذي يبلغه الماء بواسطة مضخة شفط (suction pump). لحل هذه الإشكالية قرر توريتشيلي إستعمال الزئبق بدل الماء لمعرفة ما إذا كان الإرتفاع الأقصى يرتبط بطبيعة الماء أم شيء آخر؟ قام توريتشيلي بصناعة أنبوب طوله 1م تقريباً ذو جهة مسدودة ثم ملأه بالزئبق. بعد ذلك غمر الجهة المفتوحة في إناء به زئبق فلاحظ أن إرتفاع الزئبق في الأنبوب أصبح 76سم. هذا الإرتفاع يكافئ إرتفاع الماء السابق إن أخذنا كثافة الزئبق بعين الإعتبار. نعرف أن السبب في هذه الظاهرة هو ضغط الهواء (atmospheric pressure).

بعد أن علم بليز باسكال (Blaise Pascal 1623-1662) بأعمال توريتشيلي، قام بإعادة تجربته عدة مرات. لكنه صب إهتمامه على محاولة فهم القوة التي تتحكم في الإرتفاع الأقصى (maximum height) و فهم الشيء الذي يملأ الفضاء فوق الزئبق داخل الأنبوب. كان إعتقاد غالبية العلماء آنذاك أن هنالك مادة شافة ما تملأ ذلك الفضاء. كانت حجتهم في ذلك أن الضوء ينتشر عبر ذلك الفضاء. و كان موقف باسكال مخالفاً تماماً، حيث إعتقد أنه لا وجود لشيء هناك سوى الفراغ (vacuum). رغم أن إعتقاده هذا أدى إلى عدة نزاعات مع العديد من العلماء لكنه ثبت على ذلك. قال دفاعاً عن نفسه:

«لا تكفي إمكانية شرح جميع الظواهر إنطلاقاً من فرضية لإثبات صحتها، لكن تكفي ظاهرة واحدة فقط تناقض هذه الفرضية لإثبات خطئها».

“In order to show that a hypothesis is evident, it does not suffice that all the phenomena follow from it; instead, if it leads to something contrary to a single one of the phenomena, that suffices to establish its falsity”.

أدت نتائج هذه التجارب إلى لين في نظرة الفيزيائيين إلى الفراغ. لكن ما لبثت الأمور أن تعقدت.

٢.٥.٣ الأثير (Ether)

مع إثبات الطبيعة الموجية للضوء بعد تجربة شقي يونغ (double slit experiment) لتوماس يونغ (Thomas Young 1773-1829) سنة 1801 و إكتشاف الأشعة الكهرومغناطيسية (electromagnetic waves) من طرف هاينريش هيرتز (Heinrich Hertz 1857-1894)، كان على الفيزيائيين أن يواجهوا السؤال التالي:

«كيف تنتقل الموجات الكهرومغناطيسية؟»

كان الإعتقاد السائد آنذاك هو أن الأمواج تحتاج إلى وسط لتنتقل فيه^(١٦).
فإقترحوا أن الكون مملوء بمادة الأثير (Ether).
هذه النظرة لم تعمر طويلا و تخلص عنها الفيزيائيون مع ظهور النسبية
الخاصة. النظرة الحديثة هي أن الأمواج الكهرومغناطيسية تنتقل في الفراغ. لكن
مع ظهور نظرية الحقول الكمية (quantum field theory) أصبح مفهوم الفراغ أكثر
تعقيدا.

٦.٣ الزمان (Time)

كان درب الإجابة عن التساؤل «ما هي طبيعة الزمن؟»، محفوظا بالإلتباس و الحيرة.
كانت البدايات مع الفيلسوفين أنتيفون أنتيفون (Antiphon the Sophist, 5th century BC)
و بارمينيدس (Parmenides 540-480 BC). إعتبر أنتيفون أن الزمن غير حقيقي لكن
عبارة عن مفهوم (concept) او قياس (measure). إلتخذ بارمينيدس موقفا مشابها
حيث إعتبر الزمن وهما (illusion). حجته إعتمدت على ملاحظة أن الإنسان غير
قادر على التأثير على الزمن إلا في لحظة الحاضر (present instant)، فالماضي
(past) قد ولى و المستقبل (future) لم يحن بعد. لكن لحظة الحاضر هي لحظة
آنية (instantaneous) و لا يمكننا قياسها. كرد لهذا الإعتقاد، إعتبر معاصره
هرقليطس (Heraclitus) أن لا شيء يبقى على حاله فكل شيء في تغير مستمر،
معتبرا الزمن حقيقة.

إعتقد أفلاطون (Plato 427-347 BC) أن الوقت خلق لحظة خلق الكون. قرن
أفلاطون الزمن مع حركة الأجرام السماوية و إعتبره مطابقا لدور (period) هذه
الحركة. وافقه تلميذه أرسطو (Aristotle) في قرن الزمن مع الحركة و إعتبر
وجود الزمن مرتبطا مع وجود حركة أو تغير، فبدونهما لا يوجد الزمن. فقد
وصف الزمن على أنه «ترقيم للحركة المستمرة» (numeration of continuous
"movement" أو بتعبير آخر «عدد التغيرات من لحظة قبل إلى لحظة بعد»
(number of change in respect of before and after). فالوقت بالنسبة لأرسطو
هو قياس للتغير لكنه ليس التغير نفسه. إعتقد أرسطو أن الزمن لا نهائي -لا بداية
و لا نهاية له- عكس الفضاء الذي هو منته، كما إعتقد بأنه ذو بنية مستمرة.

من الخصائص الأخرى للزمن التي نوقشت هي إمكانية كونه دوريا (cyclic)
فبدل كونه لا نهائيا، أو ذا بداية و\أو نهاية، يمكن أن يتكرر كلما مرت فترة
من الزمن. فهناك الإعتقاد بأن الكون يمر بسلسلة من الخلق (creation) و الإبادة
(annihilation). بإعتبار أن وجود الزمن مرتبط بوجود الكون، يكتسب الزمن
خاصية الدورية. يمكن العثور على هذا التصور في أساطير الهند القديمة أو في
بعض الأعمال المعاصرة حول علم الكونيات (cosmology).

تأرجح رأي الفلاسفة بين ثلاثة مواقف: الزمن هو شيء فيزيائي، التغير في
الزمن هو الشيء الفيزيائي، الزمن غير فيزيائي. كما نجد أيضا نقاشات حول
ما إذا كان الزمن ذا بنية مستمرة أم متقطعة -نتيجة لظهور النظرية الذرية
(atomism) لبنية المادة- و ما إذا كان الزمن منتهيا أم لا، أم دوريا. فكل إلتجاه
حججه و مساندوه، لكن لم تكن الغلبة لأي إلتجاه فلسفي.

^(١٦) لاحظ التشابه بين ما قام به أرسطو مع القوة و ما فعله علماء القرن التاسع عشر.

عندما حاول **نيوتن** (Newton 1642-1726) صياغة قوانينه للديناميك، واجه عدة إشكاليات منها:

- وجود معلم خاص، **المعلم العطالي** (inertial frame)، الذي تتحقق فيه قوانينه.
- وجود حركة دائبة (perpetual motion) و التي تتمثل في **الحركة المستقيمة المنتظمة** (rectilinear uniform motion).
- تكافؤ المعالم التي تتحرك بسرعة ثابتة بالنسبة لبعضها البعض. و ما زاد الطين بلة، أن كل قيم السرعة مسموحة.

توصل نيوتن إلى حل الإنطلاق من فرضية أن **الزمان** (time) و **المكان** (space) مفهومان **مطلقان** (absolute). فالزمان و المكان بالنسبة إليه كائنات فيزيائيات و هما المسرح الذي تحدث فيه الظواهر الفيزيائية. لم يشاطر كل من **ليبنيز** (Gottfried Leibniz 1646-1716) و **كانط** (Immanuel Kant 1724-1804) نيوتن الرأي حيث إعتبروا الزمن -و كذا المكان و الأعداد- **مفاهيم عقلية** (intellectual concepts). فبالنسبة لهما لا يشير الزمان إلى بعد مادي تتحرك خلاله الأحداث و الأشياء و لا كيان يتدفق (entity that flows).

ظلت الأمور تقريبا على هذا الحال حتى ظهور **النسبية العامة** (general relativity) التي غيرت كيفية نظرنا إلى الزمان و المكان. سنعود إلى هذه النقطة فيما بعد. نختتم هذه الفقرة بهذا الرأي حول الزمن للفيلسوف **مارتن هايدغر** (Martin Heidegger 1889-1976):

«نحن لا نعيش داخل الزمن، بل نحن الزمن نفسه».

٤ المجموعة الشمسية (The Solar System)

لعبت دراسة حركة الكواكب دورا هاما في إكتشاف قانون الجاذبية (gravitational law) و ما صاحبه من مفاهيم جديدة. سنحاول أن نتابع تطور النماذج المقترحة لوصف هذه الحركة، نوعية الأسئلة المطروحة، و المشاكل التي واجهت العلماء في كل مرة. سنبدأ أولا بوصف الطريقة المستعملة لمتابعة تحرك الكواكب، ثم نخرج على تاريخ مقتضب لتطور الأفكار الأساسية التي بنيت عليها هذه النماذج. بعد ذلك سنناقش بشيء من التفصيل الأنظمة الثلاثة التي كانت متواجدة عندما بدأ **كبلر** (Johannes Kepler 1571-1630) عمله في الفلك ألا و هي:

- **نظام بطليموس** (Ptolemaic system): أقدم نظام بين الثلاثة و هو يعتبر أن الأرض ثابته لا تتحرك و مركزها هو مركز الكون.
- **نظام كوبرنيك** (Copernican system): يعتبر أن الشمس هي مركز الكون و أن جميع الكواكب تدور حول الشمس.
- **نظام براهي** (Tycho's system): آخر الأنظمة الثلاثة حسب الترتيب الزمني. يمكن إعتباره خليطا من النظامين السابقين. حيث يعتبر الأرض مركز الكون لكن الكواكب الأخرى تدور حول الشمس التي هي بدورها تدور حول الأرض.

نتبع ذلك بمناقشة أعمال كبلر الفلكية بهدف الوصول إلى قوانينه لحركة الكواكب. و في الأخير سنتقمص شخص نيوتن و نستعين بمبادئه للحركة و قوانين كبلر لحركة الكواكب للوصول إلى تفسير فيزيائي لحركة الكواكب. يجدر الإشارة إلى أن هدفنا هو دراسة تطور الأفكار، خاصة ما قام به كبلر، و لهذا فنحن لن نتعمق كثيرا في الجانب التاريخي و لن نستطيع فعل ذلك و لو أردنا لضيق الوقت. يجب أيضا قراءة أجزاء مما يلي بالموازاة مع مقاطع الفيديو (video clips) الموجودة على الصفحة:

<http://science.larouchepac.com/kepler/astronomianova/home/1>

يمكن أيضا تصفح:

<http://science.larouchepac.com/kepler/newastronomy/newastronomy.html>

<http://www.keplersdiscovery.com/Intro.html>

لمزيد من التفاصيل. و لمزيد من المعلومات التاريخية، يمكن الرجوع إلى:

https://en.wikipedia.org/wiki/Geocentric_model

<https://en.wikipedia.org/wiki/Heliocentrism>

قبل كل شيء سنذكر بعض المصطلحات التي سنستخدمها كثيرا فيما يلي.

١.٤ بعض المصطلحات (Some Terminology)

تجدون فيما يلي قائمة لبعض المصطلحات باللغتين العربية و الإنجليزية لتسهيل مطالعة المراجع المذكورة أعلاه.

١.١.٤ الكواكب (Planets)

يستطيع الإنسان - في غياب التلوث الضوئي (light pollution) - أن يرى بالعين المجردة ستة كواكب (planets) ألا و هي:

- Mercurus: عطارد.
- Venus: الزهرة.
- Mars: المريخ.
- Jupiter: المشتري.
- Saturn: زحل.
- Uranus: أورانوس.

بالإضافة إلى الشمس (sun) و القمر (moon). رغم أننا نستطيع أن نرى أورانوس بالعين المجردة إلا أن القدماء لم يعتبروه كوكباً^(١٧) لبطء حركته و عتمته. يعتبر أورانوس أول كوكب يكتشف بالمنظار (telescope). آخر و أبعد كوكب معروف في المجموعة الشمسية هو نبتون (Neptune). فهو كوكب لا نستطيع رؤيته بدون مساعدة و قد تنبأ الفيزيائيون بوجوده بإستعمال النظرية قبل ملاحظته بإستعمال المنظار.

٢.١.٤ بعض المصطلحات لوصف المسار (Some Terms for Orbits)

سنلخص فيما يلي أهم المصطلحات التي سنصادفها عند وصف الأنظمة المقترحة لوصف حركة الكواكب قبل كبلر. بنيت هذه الأنظمة -كما سنرى في الفقرات الموالية- على إفتراض أرسطو (Aristotle) أن الطريقة الوحيدة لوصف حركة الكواكب هي بإستعمال الحركة الدائرية المنتظمة أو مزيج منها.

- fixed stars = النجوم الثابتة: و هي جميع النجوم بإستثناء الشمس.
- epicycle = فلك التدوير: هو عبارة عن دائرة يتحرك عليها الكوكب حركة دائرية منتظمة.
- deferent = الناقل: هو عبارة عن دائرة أخرى يتحرك عليها مركز دائرة فلك التدوير
- eccentric = مركز الناقل: مركز دائرة الناقل و يختلف عن الأرض.
- equant = معدل المسار: مركز خيالي إقترحه بطليموس. إن وضعنا ملاحظ في هذه النقطة سيلاحظ حركة مركز فلك التدوير حركة منتظمة.
- aphelion = الأوج: يكون الكوكب أبعد ما يكون عن الشمس عند هذه النقطة و يتحرك بسرعه الدنيا.
- perihelion = الحضيض: يكون الكوكب أقرب ما يكون من الشمس عند هذه النقطة و يتحرك بسرعه القصوى.
- line of apsides = خط القبا: خط خيالي يصل بين الأوج و الحضيض.
- ellipse = قطع ناقص: شكل مدار الكواكب.
- ecliptic = مدار الشمس: هو دائرة ترسمها الشمس على القبة السماوية خلال سنة.
- first motion = الحركة الأولى: و هي حركة قبة السماء اليومية إن إعتبرنا الأرض ثابتة أو دوران الأرض حول نفسها يوميا إن إعتبرناها تتحرك.
- second motion = الحركة الثانية: و هي الحركة النسبية للكواكب بالنسبة للنجوم الثابتة.

دعونا نبدأ الآن رحلتنا التاريخية حول دراسة حركة الكواكب.

^(١٧)التسمية كوكب (planet) أصلها من اللغة الإغريقية و تعني النجم الجوال (wondering star) أو الجوال (wonderer).

٢.٤ أين هي الكواكب؟ (Where Are the Planets?)

سنستعمل أجزاء من مقطع الفيديو الموجود على الرابط:

<http://science.larouchepac.com/kepler/astromianova/part1/2>

كمراجع مرئي لمساعدة القارئ على التصور، رامزين له ب: (vd1) فيما يلي. يمكن أيضاً استعمال الصور و المخططات المتواجدة على الصفحات الإلكترونية:

<http://www.keplersdiscovery.com/Intro.html>

<http://www.keplersdiscovery.com/Intro2.html>

<http://science.larouchepac.com/kepler/newastronomy/newastronomy.html>

سنستعمل في إستكشافنا -كأي باحث علمي- خطوات المنهجية العلمية و نبدأ بالملاحظة.

١.٢.٤ ملاحظة السماء (Observing the Sky)

يصعب علينا في الوقت الحاضر أن نرى جمال السماء الليلية بسبب التلوث الضوئي. فيجب علينا أن نبتعد تماماً عن التجمعات السكنية لكي يمكن لنا أن نمتع أعيننا بهذا الجمال. لإختصار الطريق، يمكن الرجوع إلى (vd1 0:42-1:59) لتكوين فكرة عما يمكن رؤيته في الليل إن نظرنا جهة الشمال مع تسريع للحركة. النجم الذي يصعب ملاحظة حركته هو **نجم الشمال** (Polaris) الذي كان يستعمل قديماً لتحديد الإتجاه. من الملاحظة اليومية، يبدو لنا أننا محاطون بكرة كبيرة مرصعة بالنجوم -القبة السماوية- و التي تدور يومياً حول محور يمر قرب نجم الشمال و لا شيء أكثر، لأن الوليمة توجد في الإتجاه المعاكس الجنوب. الملاحظات الأولية للسماء الجنوبية تعزز فكرة دوران القبة السماوية حولنا (vd1 2:08-4:05) مع بعض الفوارق:

- يغير القمر شكله (vd1 4:07-4:40). بالإضافة إلى ذلك تبدو لنا سرعة القمر أبطأ من سرعة القبة السماوية.
- تبدو حركة الشمس أبطأ من حركة القبة السماوية (vd1 5:19-6:29). نستطيع أن نتأكد من ذلك عندما نقارن يومياً النجوم الأقرب إلى الأفق (horizon) قرب مكان غروب الشمس لحظة ذلك.
- هناك نجوم تتحرك بالنسبة لقبة السماء (vd1 8:55-9:38). سميت هذه النجوم **كواكب** (planets) بسبب تجوالها.

تسمى حركة القبة السماوية **الحركة الأولى** (first motion) و هي حركة بطيئة جداً يصعب ملاحظتها بالعين المجردة. لكن يمكن أن نقارن وضعية النجوم مع معالم أرضية ثابتة على فترات زمنية (vd1 8:34-8:54) للتأكد من أن هذه الحركة موجودة فعلاً.

بعد أن لاحظنا السماء الليلية لمدة معتبرة من الزمن^(١٨)، يمكننا الآن الجلوس لنبحث عن **نمط** (pattern) حركة الكواكب.

^(١٨)نحن نتكلم عن عقود إن لم نقل قروناً من الملاحظة.

٢.٢.٤ تنظيم المعطيات (Lokking for Patterns)

بعد جمع معطيات (data) حول ظاهرة ما، يجب أن نستخرج المعلومات المهمة من البقية. لنتمكن من ذلك يجب أن ننظم ملاحظتنا و نصنفها حسب معايير تستخلص من الظاهرة تحت الدراسة. هدفنا هو دراسة حركة الأجرام السماوية. فالسؤال الذي يطرح نفسه:

«كيف نصف و ندون حركة الأجرام السماوية؟»

لرؤية ما نحاول وصفه شاهد (vd1 10:40-12:33). كما هو معروف، لوصف أي حركة، نحتاج إلى معالم ثابتة نستعملها كمراجع. لكن الإشكالية التي علينا مواجهتها هي أن كل شيء في السماء يتحرك، فما العمل؟ يمكننا البحث على حركة منتظمة و نصف الحركات الأخرى بالنسبة لها^(١٩). لحسن حظنا هناك حركة القبة السماوية اليومية (vd1 8:08-8:17) التي يمكننا إستعمالها كمراجع (background). زد على ذلك، تقريبا كل الأجرام السماوية ثابتة بالنسبة لهذه الحركة^(٢٠). فيمكننا وصف حركة أي جرم سماوي إن تمكنا من وضع خريطة لهذه النجوم الثابتة. كان أبرخش (Hipparcus of Nicaea 190-120 BC) من الأوائل الذين وضعوا خريطة (catalogue) سماوية للنجوم الثابتة و التي إحتوت على 1000 نجم. بعد الإنتهاء من هذه الخريطة، يمكننا أن نحول إهتمامنا إلى الأجرام التي تتحرك بالنسبة لهذه النجوم أو الحركة الثانية (vd1 8:18-8:34).

- هناك حركة القمر الدائرية التي دورها 29,5 يوما.
- تتحرك الشمس وفق دائرة و تعود إلى مكانها الأصلي كل عام (vd1 6:46-7:40). هذا المدار يسمى مسار الشمس (ecliptic).
- لنأخذ كمثال عن حركة الكواكب حركة كوكب المريخ (vd1 10:40-12:33). يظهر جليا أن هذه الحركة غير منتظمة فأحيانا تكون سريعة، و أحيانا بطيئة، و أحيانا أخرى ترسم حلقة. لكن المسار يبقى قريبا من مسار الشمس^(٢١). ينطبق الشيء نفسه على الكواكب الأخرى.

بعد الإنتهاء من وصف حركة الأجرام السماوية، حان وقت طرح الأسئلة. لاحظ أن طبيعة السؤال المطروح يحدد نوع و إتجاه المجهود الذي سنقوم به. من الأسئلة التي طرحت قديما:

- ما سبب الحركة الأولى؟
- هل تشبه الأجرام السماوية الأرض أم لا؟
- أي الأجرام السماوية أقرب إلى الأرض؟ و هل يمكن معرفة بعدها؟
- هل يمكن أن نتنبأ بمواقع الكواكب و كذا الشمس و القمر؟

^(١٩) نستعمل هذه الطريقة كثيرا في حياتنا اليومية. عندما تصادفنا إشكالية أو شيء من هذا القبيل، نبدأ أولا بالتعامل مع الصورة الكبيرة ثم نهتم بالتفاصيل.

^(٢٠) هذا هو سبب التسمية: الحركة الأولى.

^(٢١) نقصد المسار الذي يرسمه و ليس سرعة حركته و لا قربه من الشمس.

- كم مرة يقوم كوكب المريخ بحركته الحلقية؟ و ما هي المدة التي يستغرقها المريخ ليعود إلى مكانه الذي بدأ منه؟
- ما سبب حركة الكواكب؟

لقد رتبنا الأسئلة تقريبا حسب الترتيب التاريخي لمعالجتها. دعونا نسافر إلى الماضي في محاولة منا لمرافقة تطور الإجابات المقترحة.

٣.٤ أين نبدأ؟ (Where to Start?)

لاحظ أن وصفنا لحركة الأجرام السماوية الذي قدمناه كان بالنسبة لملاحظ يعيش على سطح الأرض، مما يعني أننا اعتبرنا أن الأرض ثابتة. فإهتمامنا كان و صف ما نراه في السماء الليلية. لكن الحركة (movement) - كما نعلم- شيء نسبي (relative) فالساكن و المتحرك لا يحملان معنى مطلقا (absolute). فالسؤال المطروح: «هل هناك طريقة لنفصل في الأمر؟» على الأقل حين نتحدث عن حركة الأجرام السماوية. دعونا نلقي نظرة على مختلف الفرضيات التي أقرحت.

١.٣.٤ الحركة الأولى (The First Movement)

نبدأ أولا بمناقشة الحركة الأولى. هناك تفسيران طبيعيان هما:

الأرض ثابتة: يمكن أن نصنف هذا الاختيار في خانة: ما نراه هو الحقيقة. فيما أننا لا نملك المبادئ -قوانين الميكانيك- التي تدلنا على الجواب الصحيح، نستطيع أن نثق بمعلوماتنا الحسية. كما يمكننا أيضا الإعتماد على مبدأ أرسطو^(٢٢): «السكون هي الحالة الطبيعية للأجسام» لتبرير ثبات الأرض. إعتقد بعض الفلاسفة أن حركة الأرض حول نفسها يجب أن يؤدي إلى الظواهر التالية^(٢٣):

- رياح قوية في إتجاه واحد.
- إن قفز أحدنا في السماء يكون مكان سقوطه مختلفا عن مكان قفزه.
- إتجاه طيران الطيور و حركة السحب تكون في إتجاه واحد.

فغياب هذه الظواهر يعني أن الأرض ساكنة.

الأرض تدور حول نفسها: هناك الإختيار المعاكس تماما: الأرض هي التي تدور و القبة السماوية ثابتة. من الفلاسفة الأوائل الذين إقترحوا دوران الأرض حول نفسها **هرقليد** (Heraclides of Pontus 390-310 BC). و رغم تعارض هذا الموقف ضد حدسنا (intuition) إلا أننا نجده مذكورا في أعمال بعض الفلكيين (astronomers)

^(٢٢) لاحظ أن هذا المبدأ يتعلق بالأجسام التي تتواجد على الأرض، عكس الأجرام السماوية التي تتكون من مادة الأثير (Ether) مما يجعلها مختلفة.

^(٢٣) لاحظ أن هذه الحجج هي خاطئة بسبب مبدأ العطالة.

و الفلاسفة كعالم الفلك الهندي أريابهاتا (Aryabhata 476-550). كما ناقش بعض الفلكيين المسلمين من أمثال الطوسي (al-Tusi 1201-1274) و علي قوشجي (Ali-Qushji 1403-1474) هذه الإمكانية. لكن أشهر هؤلاء هو الفلكي كوبرنيك (Copernicus 1473-1543) الذي زاد على ذلك بإقتراح دوران الأرض حول الشمس. لكن كان علينا إنتظار فوكو (Foucault 1819-1868) لإعطاء الإثبات التجريبي لدوران الأرض حول نفسها. تعرف هذه التجربة بنواس فوكو (Foucault pendulum). لمزيد من المعلومات طالع:

https://en.wikipedia.org/wiki/Foucault_pendulum

<https://www.youtube.com/watch?v=aAN8yenz3nA>

فيما يلي سنعتبر أننا فسرنا الحركة الأولى (first motion) أيا كان الموقف الذي نؤمن به (دوران الأرض حول نفسها أو حركة فعلية للقبة السماوية) و ننتقل إلى دراسة الحركة الثانية (second motion). قبل التطرق إلى لمحة تاريخية لتطور الأنظمة المقترحة، سنناقش أولاً بعض المبادئ التي بنيت عليها هذه الأنظمة.

٢.٣.٤ سبب الحركة (Movement)

كانت المحاولات الأولى لدراسة حركة الأجرام السماوية تهدف إلى وصف الحركة بهدف توقع مواقع الكواكب و ضبط الموسم الفلاحي. لكن الأهداف تغيرت مع بروز الفلاسفة الإغريق^(٢٤) الذين حاولوا إيجاد سبب للحركة. فالتساؤل الذي طرح:

«هل الكواكب هي التي تتحرك من تلقاء نفسها؟ أم أنها تتحرك نتيجة الوسط الذي تعيش فيه؟ أم هناك سبب آخر؟»

لقد ناقشنا مختلف تفسيرات الحركة الأولى (first motion) التي إقترحت، ماذا عن الحركة الثانية للكواكب (second motion)؟ في البداية أعتبرت الأرض ثابتة مما يعني أن الحركة الأولى (first motion) هي نتيجة حركة الوسط. لاحظ أن النجوم الثابتة (fixed stars) لا تتحرك من تلقاء نفسها. يمكننا أن نحاول إستعمال نفس التفسير للحركة الثانية (second motion). لكن الحركة الثانية ليست ببساطة الحركة الأولى. للتعامل مع هذه التعقيدات الإضافية تم تقديم إقتراحين لتفسير هذه الحركة: هناك من ربط الحركة كلية بالوسط مع إضافات و هناك من إعتبرها خليط من الإثنين. لننظر على سبيل المثال إلى تفسير أرسطو لحركة الكواكب:

- تعتمد الحركة الطبيعية للأجسام على جوهرها. فالأجسام التي نسبة عنصري الماء و الأرض فيها هي الغالبة تسقط نحو مركز الأرض و العكس بالنسبة للأجسام التي عنصريها الغالبين هما الهواء و النار. لكن حركة الكواكب تختلف جذريا عما سبق مما دفع أرسطو إلى إقتراح وجود عنصر خامس الأثير (Ether) الذي يكون كلا من الأجرام السماوية و السماء.

^(٢٤) لا يمكننا الجزم بأن الإغريق كانوا هم الأوائل الذين إهتموا بهذا السؤال إلا إن غالبية الأعمال الأخرى قد ضاعت.

- الحالة الطبيعية للأجسام على الأرض هي السكون عكس الأجرام السماوية التي حالتها الطبيعية هي الحركة الدائبة (perpetual motion).
- بما أن الأجرام السماوية تعود إلى وضعيتها الأصلية بعد مدة من الزمن، فإن حركتها دائرية.
- بما أن السماء مكان مثالي (ideal) -عكس الأرض- فحركة الكواكب يجب أن تكون دائرية منتظمة.

لكن النتيجة النهائية لا تتوافق مع الملاحظة. لحل هذه الإشكالية، تم تقسيم السماء إلى مجموعة من الكرات (spheres) المتمركزة (concentric) مع الأرض، والتي أطلق عليها اسم **الكرات البلورية** (crystalline spheres). هذه الكرات ليست ساكنة لكنها تدور بسرعة ثابتة. ثم تم ربط كل كوكب بعدد مناسب من هذه الكرات بهدف الحصول على حركة توافق الملاحظة. فالحركة الثانية هي خليط بين حركة الوسط و حركة الكوكب الذاتية. يمكننا أن نعتبر حركة الكوكب الذاتية نتيجة لحركة كرة أخرى الكوكب محمول عليها. في هذه الحالة تكون الحركة الثانية نتيجة الوسط كلية.

رغم أننا تكلمنا عن تفسير أرسطو لحركة الكواكب، إلا أن هذا التفسير يشترك في كثير من الخصائص مع تفسير آخر قدم قبله (طالع الفقرة الموالية). السبب الذي جعلنا نركز على تفسير أرسطو هي مبادئه التي إنطلق منها، خاصة المبدأين:

- الحركة الوحيدة الممكنة هي الحركة الدائرية المنتظمة (uniform circular motion)، أو مزيج منها.
- تختلف الأجرام السماوية جوهرًا عن الأرض و ما فيها.

بنيت غالبية إن لم نقل كل الأنظمة المقترحة لتفسير حركة الكواكب -حتى بدايات أعمال كبلر- على هذين المبدأين.

أثناء العصور الذهبية للحضارة الإسلامية، ظهرت إلى الوجود آراء تشبه إلى حد بعيد النظرة الحديثة. حدث هذا عندما أعيد النظر في إقتراح أرسطو أن الأجرام السماوية مختلفة عن الأرض. ففي القرن التاسع، إفترض **محمد ابن موسى** -أكبر الإخوة بنو موسى- وجود قوة جاذبية بين الأجرام السماوية. و في بداية القرن الحادي عشر ناقش **ابن الهيثم** نظرية حول وجود قوة جاذبية بين الكتل. كما قال بأن الأجرام السماوية تخضع لنفس قوانين الفيزياء الأرضية. رغم وجود مثل هذه الأفكار إلا أن وصف حركة الكواكب عند المسلمين إعتمد أساسًا على نظرة أرسطو خاصة الإعتقاد أن الحركة الدائرية المنتظمة هي المكون الأساسي لهذه الحركة.

بعد أن ناقشنا الأسس المستعملة لوصف حركة الكواكب، دعونا نلقي نظرة خاطفة على التطور التاريخي للأنظمة المقترحة.

٢.٣.٤ الأرض مركز الكون (Geocentrism)

دعونا نناقش السبب من وراء الإعتقاد بأن الأرض لا تتحرك قبل التطرق لتطور الأنظمة المقترحة. لقد ناقشنا سابقًا الحجج التي قدمت ضد دوران الأرض حول نفسها. سنركز فيما يلي على الحجج ضد حركة الأرض حول الشمس. بالإضافة

إلى الحجج السالفة الذكر التي يمكن إستخدامها في هذا الموقف، هناك حجج أخرى و التي هي:

- عدم وجود أي تغير في الوضعية النسبية (relative position) للنجوم الثابتة، خاصة نجم الشمال (Polaris).
- ثبوت اللمعان الظاهري (apparent luminosity) لكوكب الزهرة (Venus).

لكن هذه الحجج أغفلت نقاطا مهمة. فالحجة الأولى إعتبرت أن النجوم قريبة منا. لكن الحقيقة عكس ذلك، فبعد النجوم عنا يجعل هذه التغيرات مهمة و تحتاج إلى منظار (telescope) قوي لرؤيتها. أما بالنسبة للحجة الثانية، فثبوت اللمعان يرجع إلى تضايف عاملين: مراحل الزهرة التي تشبه مراحل القمر و بعدها عن الأرض. فكلما كان السطح الذي يعكس أشعة الشمس صغيراً كلما كان كوكب الزهرة قريباً منا. لم يكن كلا من التفسيرين معروفاً خلال الفترة الزمنية التي تهمننا.

لا يعرف بالضبط أول نظام أقترح لوصف حركة الكواكب لأن معظم الوثائق التاريخية قد ضاعت أو أتلقت. من بين أول الأنظمة الهندسية الثلاثية الأبعاد لوصف حركة الكواكب النظام الذي إقترحه^(٢٥) إيودوكسوس (Eudoxus of Cnidus 390-337 BC) و كاليبوس (Callipus of Cyzicus 370-300 BC). إعتد هذا النظام على 27 كرة متحدة المركز مع الأرض و التي هي مركز الكون. قام أرسطو (Aristotle 384-322 BC) برفع عدد الكرات إلى 47-55 كرة.

لكن هذه الأنظمة لم تكن عملية البتة. زد على ذلك أن الفصول الأربعة لا تستمر لنفس المدة^(٢٦). أدت هذه الإشكاليات إلى البحث عن تحسينات لنظام أرسطو. تم زحزت مركز الكرات البلورية عن مركز الأرض^(٢٧) لحل إشكالية الفصول الأربعة. مما يجعل حركة الشمس غير منتظمة بالنسبة لملاحظ أرضي. إضافة إلى هذا، تم إستبدال الكرات البلورية بدائرتين لكل كوكب: **الناقل** (deferent) و **فلك التدوير** (epicycle). أول من إقترح هذا النظام **أبلونيوس البرغاوي** (Apollonius of Perga 262-190 BC) ثم طوره **أبرخش** (Hipparchus of Nicaea 190-120 BC). بعد ذلك قام **بطليموس** (Claudius Ptolemy 100-170) بإضافة التعديل الأخير و المتمثل في **معدل الحركة** (equant). و هكذا برز إلى الوجود **نظام بطليموس** (Ptolemaic system) و الذي إستمر إلى غاية أعمال كبلر. سنعود إلى هذا النظام بشيء من التفصيل في الفقرة المخصصة له.

في البداية، ركز الفلكيون على تصحيح قيم المعاملات (params) التي يعتمد عليها نظام بطليموس دون المساس ببنية. بعد ذلك غيروا إهتمامهم و بدأوا في نقد هذه البنية حيث كان إهتمامهم ينصب في الإجابة عن **إشكالية مصحح الحركة**

^(٢٥) هناك أنظمة أقدم من هذا النظام لكنها لم تأخذ الحركة الحلقية للكواكب بعين الإعتبار. يمكن الإطلاع على الموقع الإلكتروني:

<http://www.astronomy.ohio-state.edu/~pogge/Ast161/Unit3/greek.html>

لمزيد من المعلومات.
^(٢٦) كان الإعتقاد آنذاك أن كل ربع دائرة من مسار الشمس يوافق فصلاً معيناً. فالحركة الدائرية المنتظمة تتنبأ بفترات متساوية.
^(٢٧) يحق لنا التساؤل إن كان لحرارة الصيف و برودة الشتاء دخل في هذا الإقتراح. فبعد الأرض عن الشمس سيكون مختلفاً على طول السنة.

(equant problem) و إشكالية اللامركزية (eccentric problem). فالتساؤل الذي كان مطروحا هو:

«هل يمكننا بناء نظام بدون مصحح الحركة و اللامركزية؟»

و الذي كان محاولة لتجنب الإجابة عن السؤالين:

• كيف تعرف الكواكب أنها يجب أن تتحرك بانتظام بالنسبة لنقطة خيالية (مصصح الحركة (equant))؟

• هل يمكن العودة إلى الحركة الدائرية المنتظمة؟

كانت هذه الأسئلة نتيجة الملاحظات التالية. رغم أن بطليموس إنطلق من المبادئ الفيزيائية التي وضعها أرسطو لبناء نظامه لحركة الكواكب إلا أن نظامه هذا يتعارض مع هذه المبادئ: فمركز الناقل يختلف عن مركز الكون (الأرض)، زد على ذلك، الحركة على الناقل ليست منتظمة بالنسبة لمركزها. إتخذ بطليموس موقفا عمليا (pragmatic approach) حيث تخلى عن مبادئ أرسطو للحصول على نظام بسيط يصف حركة الكواكب.

صب المسلمون جهودهم للإجابة على التساؤل أعلاه و كللت بالنجاح مع بروز و تطور مدرسة المراغة (Maragha school). من بين الفلكيين الذين ينسبون إليها مؤيد الدين العرضي 1200-1266، نصير الدين طوسي 1201-1274، قطب الدين شيرازي 1236-1311، و ابن الشاطر 1304-1375. نجحت هذه المدرسة في تقديم أنظمة لحركة الكواكب بدون مصصح الحركة (equant) و تم إعادة الأرض إلى المركز. لكن الثمن الذي وجب دفعه هو زيادة عدد الدوائر. لمزيد من المعلومات يمكن الإطلاع على المراجع:

<http://www.encyclopedia.com/science/encyclopedias-almanacs-transcripts-and-maps/ptolemaic-astronomy-islamic-planetary-theory-and-copernicuss-debt-maragha-school>

<https://www.cambridge.org/core/services/aop-cambridge-core/content/view/S0957423900001429>

<http://paperity.org/p/51456472/the-role-of-maragha-in-the-development-of-islamic-astronomy-a-scientific-revolution>

<http://qisar.fssr.uns.ac.id/wp-content/uploads/2015/04/Qisar-Roshdi-Rashed-Encyclopedia-of-the-History-of-Arabic-Science.pdf>

ناقش المؤرخون إمكانية تأثر كوبرنيك (Copernicus) بأعمال هذه المدرسة. الشيء المتأكد منه هو أن أعمال فلكيي مدرسة المراغة تبنت فكرة مركزية الأرض، لكن البنية الرياضية لأعمالهم (خاصة طريقة القضاء على مصصح الحركة و اللامركزية) تشبه إلى حد بعيد نظام كوبرنيك. طالع على سبيل المثال:

<http://www.ub.edu/arab/suhayl/volums/volum7/paper%203.pdf>

٤.٣.٤ الشمس مركز الكون (Heliocentrism)

ليست فكرة «الشمس هي مركز المجموعة الشمسية (أو الكون)» نتيجة النهضة الأوروبية كما يعتقد غالبية الناس. فالفكرة قديمة لكنها لم تلاق القبول لعدة أسباب منها ضياع التفاصيل، خاصة الحجج المستعملة لإثبات وجهة النظر هذه. زد على ذلك كون هذا التوجه ضد التوجه المتعارف عليه (مركزية الأرض) و ضد ما يتوقعه الناس من تجاربهم اليومية.

حسب المعلومات المتبقية، أول الفلاسفة الذين إعتبروا أن الشمس هي مركز الكون هو أرسطرخس الساموسي (Aristarchus of Samos 310-230 BC). للأسف الشديد، لم تنج كتاباته الأصلية و كل ما نعلمه نابع عن مقاطع من كتابات أرخميدس (Archimedes). إعتقد أرسطرخس أن النجوم الثابتة هي عبارة عن شمس أخرى لكنها بعيدة جدا عنا، و لهذا السبب لا نرى أي تغير في مواقعها لما تتحرك الأرض. إقترح بعض المؤرخين أن السبب وراء إعتقاد أرسطرخس بثبوت الشمس هو حجمها الكبير. فقد قام بقياس حجم و بعد الشمس عن الأرض بأستعمال القمر. إستنتج من أعماله أن حجم الشمس أكبر من حجم الأرض بمئات المرات. مما يعني أن احتمال حركة الأرض -الأصغر حجما- أكبر من احتمال حركة الشمس. لمزيد من المعلومات يمكن مطالعة المراجع:

[https://en.wikipedia.org/wiki/On_the_Sizes_and_Distances_\(Aristarchus\)](https://en.wikipedia.org/wiki/On_the_Sizes_and_Distances_(Aristarchus))

<https://ia600502.us.archive.org/17/items/aristarchusofsam00heat/aristarchusofsam00heat.pdf>

هناك فلكي آخر -إضافة إلى أرسطرخس- إعتقد بمركزية الشمس، ألا و هو سلوقس السلوقي (Seleucus of Seleucia 190-150 BC). يزعم المؤرخ فلوطرخس (Plutarch 46 -120) أن سلوقس أثبت أن الشمس ثابتة و أن الأرض تتحرك، لكننا لا نعلم يقينا إن فعل ذلك و كيف. هناك أيضا الفلكي المسلم قطب الدين شيرازي (1311-1236) الذي ناقش إمكانية كون الشمس مركز الكون لكنه تخلى عنها.

كان علينا إنتظار كوبرنيك (Copernicus 1473-1543) لبعث نظرية مركزية الشمس إلى الحياة. لكن السبب وراء إتخاذه هذا الموقف يبقى محل تخمين من طرف المؤرخين. لم يتمكن في كتابه أن يعطي أي دليل تجريبي لنظريته لكنه إعتد على حجج حول بساطة النظام و أناقته (elegance). فنظامه يفسر ببساطة الحلقات أو الحركة الرجعية (retrograde motion) التي ترسمها الكواكب في السماء على أنها نتيجة إختلاف سرعة دوران الأرض و الكواكب حول الشمس. كما ربط الفصول الأربعة بميل محور دوران الأرض. قدم غاليليو أول الإثباتات التجريبية لدوران الكواكب حول الشمس فهو لاحظ أن لكوكب الزهرة مراحل مثل مراحل القمر.

٥.٣.٤ النظام الهجين (Hybrid Proposal)

لم تكن الأنظمة التي تعتمد على مركزية الأرض أو الشمس هي الوحيدة التي إقترحت لتفسير حركة الكواكب، فهناك أنظمة هجينة بينهما. كان الدافع الأساسي لمثل هذه الأنظمة عدم التخلي عن مركزية الأرض لكن الأخذ بعين

الإعتبار إمكانية دوران الكواكب حول الشمس، خاصة الكواكب الداخلية: الزهرة (venus) و عطارد (mercury). نواجه مرة أخرى مشكلة ندرة -إن لم نقل ضياع- كتابات العهود القديمة. فعلى سبيل المثال هناك إعتقاد أن الفيلسوف هرقليد (Heraclides of Pontus 390-310 BC) جعل الكواكب الداخلية تدور حول الشمس. لكنه لا وجود لأي دليل قطعي يثبت ذلك.

نجد في الحضارة الهندية أعمالاً في هذا الإتجاه. فعلى سبيل المثال قام الفلكي **أريابهاثا** (Aryabhata 476-550) بإعطاء دور (period) الكواكب بالنسبة للشمس. رغم أن كتاباته تشير إلى أنه إعتبر الأرض هي المركز (geocentric) إلا أن بعض المؤرخين يعتقدون أنه إستعمل نظاماً هجيناً أو اعتبر أن الشمس هي المركز (heliocentric). قام **نيلاكانثا سومياجي** (Nilakantha Somayaji 1444-1544) بإقتراح نظام هجين حيث تدور جميع الكواكب المعروفة آنذاك حول الشمس التي تدور بدورها حول الأرض.

بعد نشر كوبرنيك لنظامه، إختلف العلماء حول صحة ما ذهب إليه أو خطئه. من بين الفلكيين الذين حاولوا إثبات خطئه **تيخو براهي** (Tycho Brahe 1546-1601). قام براهي بأخذ النقاط الإيجابية لنظام كوبرنيك -رغم معارضته له- ليتحصل على نظامه الهجين و الذي يشبه نظام سومياجي (Somayaji) الأنف الذكر. إتخذ براهي هذا الموقف لأنه لا يوجد أي تفسير لحركة الأرض، عكس الكواكب الأخرى (بما فيها الشمس و القمر) التي تتكون من مادة الأثير، الشيء الذي يجعل حالتها الطبيعية الحركة الدائبة.

بعد أن تكلمنا على التطور التاريخي للأفكار، دعونا نزر ممثل (representative) كل نظام بشيء من التفصيل. سنركز فقط على الحركة الثانية (second motion) للكواكب.

٤.٤ نظام بطليموس (Ptolemaic system)

نبدأ حديثنا عن نظام **بطليموس** (Claudius Ptolemy 100-170) كممثل عن أنظمة مركزية الأرض (Geocentrism). سنعتمد فيما يلي على مقاطع من الفيديو:

<http://science.larouchepac.com/kepler/astronomianova/part1/4>

الذي سنرمز له: (vd2) و الفيديو:

<http://science.larouchepac.com/kepler/astronomianova/part1/5>

الذي سنرمز له: (vd3). دعونا نحاول محاكات تفكير بطليموس عندما بني نظامه.

دائرتين لكل كوكب (Two Circles): كان هدف بطليموس توقع مكان الكواكب حين نظرنا إلى السماء. فالشيء الأول الذي يجب علينا الحصول عليه هو الحركة الحلقية (looping) أو الحركة الرجعية (retrograde motion) للكواكب (vid2) (2:29-2:45). تذكر أننا ملزمون -حسب أرسطو- بإستعمال الحركة الدائرية المنتظمة (uniform circular motion) فقط. خلص بطليموس^(٢٨) إلى أننا نحتاج إلى

^(٢٨) كما أسلفنا سابقاً -عند تحدثنا عن التطور التاريخي لأنظمة مركزية الأرض- نظام بطليموس كان نتيجة تظافر أعمال عدة فلكيين. فيما يلي سنضحى بالدقة لفائدة البساطة و الوضوح.

دائرتين (vid2 2:46-3:03) لوصف حركة كل كوكب. تسمى الدائرة الأولى **الناقل** (deferent) و مركزها الأرض. و تسمى الدائرة الثانية **فلك التدوير** (epicycle) و مركزها يتحرك بسرعة منتظمة على الناقل. أما الكوكب فيتحرك بسرعة منتظمة على فلك التدوير. فالحركة التي نراها من الأرض هي نتاج تركيب هاتين الحركتين. عندما نغير نسبة قطر فلك التدوير مقارنة بقطر الناقل نستطيع أن نحصل على الحركة الحلقية (vid2 3:04-3:31)، و أثناءها يقترب الكوكب من الأرض. هذا يوافق الملاحظة لأن كوكب المريخ (Mars) يكون في أوج لمعانه (brightest) أثناء حركته الرجعية (retrograde motion). يمكن مشاهدة نظام بطليموس الناتج - و ليس الكامل- في المقطع (vid2 3:32-3:54).

كما أسلفنا سابقا، كان هدف بطليموس توقع مكان كوكب ما عندما نرفع أعيننا إلى السماء، لا موقع الكوكب الحقيقي. هذا يعني أن الشيء الوحيد الذي يمكننا قياسه عن طريق الملاحظة هو النسبة بين قطر فلك التدوير إلى قطر الناقل، شاهد المقطع (vid2 3:55-4:11) حيث يغير كل من قطري فلك التدوير و الناقل دون أن يؤثر ذلك على الإتجاه الذي نرى فيه الكوكب. يمكننا إستغلال هذه الخاصية لتغيير قطر الناقل للكوكبين الزهرة (Venus) و عطارد (Mercury) و جعله مساويا لقطر مدار الشمس، لنجعل هذان الكوكبان يظهران و كأنهما يدوران حول الشمس (vd2 5:29-5:51).

الحركة الغير منتظمة (Irregular Motion): بعد أن أخذنا الحركة الحلقية للكواكب بعين الإعتبار و جب علينا مواجهة الإشكالية التالية: الحلقات التي يرسمها كوكب ما ليست بنفس الحجم. شاهد المقطع (vd3 0:12-1:33). إن إعتدنا فقط على النظام الذي توصلنا إليه سابقا فإن الحلقات تكون متساوية (vd3 1:35-1:44). قام بطليموس أولا بزحزحة الأرض عن مركز الناقل (vd3 1:46-2:16) لحل هذه الإشكالية. مما يجعل حركة مركز فلك التدوير غير منتظمة بالنسبة لمراقب من الأرض. و رغم هذا لم يحصل بطليموس على نفس الحلقات المشاهدة في السماء (vd3 2:18-2:36).

قام بطليموس بتغيير جديد في نظامه حيث أضاف نقطة جديدة: **مصحح الحركة** (equant)، حيث تكون حركة مركز فلك التدوير على الناقل حركة منتظمة (vd3 2:37-3:30) بالنسبة لملاحظ يقف عند مصحح الحركة. وضع بطليموس مركز الناقل منتصف المسافة بين مصحح الحركة و الأرض، و تمكن بهذا من الحصول على حلقات مطابقة تقريبا للحلقات الملاحظة (vd3 3:31-3:43). يمكن أن نشاهد التغيرات التي تحدث للحلقات مع كل إضافة إلى نظام الفقرة السابقة في المقطع (vd3 3:44-4:02).

الخلاصة (Conclusion): يعتمد نظام بطليموس على المركبات التالية:

- الأرض ثابتة و الشمس تتحرك.
- الناقل (deferent) و هو دائرة يتحرك عليها مركز فلك التدوير (epicycle) و مركزها يختلف عن الأرض.
- فلك التدوير (epicycle) و هو دائرة يتحرك عليها الكوكب بسرعة ثابتة.

- مصحح الحركة (equant) و هي نقطة خيالية حيث تبدو حركة مركز فلك التدوير على الناقل حركة منتظمة بالنسبة لها. وضع بطليموس مركز دائرة الناقل منتصف المسافة بين الأرض و مصحح الحركة.

يمكن مشاهدة نظام بطليموس الكلي في المقطع (vd3 4:03-4:42).

٥.٤ نظام كوبرنيك (Copernican system)

فيما يلي سنستعمل الفيديو:

<http://science.larouchepac.com/kepler/astromianova/part1/6>

كمرجع بصري و نرمر له: (vd4).

ينسب إلى كوبرنيك (Nicolaus Copernicus 1473-1543) جعل الأرض تتحرك و وضع الشمس في مركز الكون. حيث كتب قائلا:

«توجد الشمس في وسط الكل. فمن يستطيع أن يضع فانوس معبد جميل في مكان آخر أو أحسن من هذا المكان، من هنالك يمكن للفانوس أن يضيء كل شيء و في نفس الوقت؟ و هكذا تحكم الشمس، و كأنها جالسة على عرشها الملكي، عائلة الكواكب التي تحوم حولها.»

“In the center of all rests the sun. For who would place this lamp of a very beautiful temple in another or better place than this, from which it can illuminate everything at the same time?... And so the sun, as if resting on a kingly throne, governs the family of stars which wheel around.”

لنناقش ما أتى به نظام كوبرنيك من جديد على ضوء ما رأيناه سابقا.

الحركة الرجعية (Retrograde Motion): كيف يفسر كوبرنيك الحركة الحلقية (looping motion) للكواكب التي نشاهدها من الأرض؟ لنأخذ على سبيل المثال كوكب المريخ (Mars). التفسير يعتمد على الملاحظتين:

- كل من المريخ و الأرض يدوران حول الشمس في حركة دائرية.
- يستغرق المريخ وقتا أطول من الأرض لإتمام دورته حول الشمس.

هذا يعني أن الأرض ستتجاوز المريخ في فترات زمنية متساوية، مما يجعل ملاحظا أرضيا يشاهد المريخ و كأنه يعود إلى الوراء (vd4 1:00-1:21). فلا حاجة هنا لإستعمال دائرتين.

الحركة الغير منتظمة (Irregular Motion): لقد تمكنا من تفسير الحركة الحلقية ببساطة لكن هذه الحلقات ذات شكل غير ثابت عكس ما يتوقعه نظامنا البسيط. يمكننا أن نقوم بنفس ما قام به بطليموس و نضيف مصحح الحركة (equal). لكن كوبرنيك لم يستعمل هذا الحل لأنه كان من أشد المعارضين للحركة

الغير منتظمة. قرر كوبرنيك أن يضيف **فلك تدوير مزدوج** ^(٢٩) (double epicycles) لكل كوكب. شاهد المقطع (vd4 1:27-1:47) لرؤية نظام كوبرنيك. لكن إستعمال فلك تدوير مزدوج أو مصحح حركة لا يشكل أي فرق من ناحية الملاحظة (vd4) (1:47-2:40).

الخلاصة (Conclusion): يعتمد نظام كوبرنيك على المكونات التالية:

- الشمس ثابتة و الأرض تدور حول الشمس.
- لكل كوكب ناقل (deferent) و فلك تدوير مزدوج (double epicycle).
- جميع الحركات هي حركات دائرية منتظمة.

كما أسلفنا سابقا، يمكن إستبدال فلك التدوير المزدوج (double epicycle) بمصحح الحركة (equant). نختم هذه الفقرة بملاحظة صغيرة. إستعمل كوبرنيك مركز مدار الأرض -الذي يختلف عن الشمس- ليبنى عليه نظامه. فرغم أن كوبرنيك ثبت الشمس و جعل الأرض تدور إلا أن الشمس لا تلعب أي دور في نظامه.

٦.٤ نظام براهي (Tycho system)

سنستعمل الفيديو على الرابط:

<http://science.larouchepac.com/kepler/astronomianova/part1/7>

كمرجع بصري و نرمل له: (vd5).
قام **تيخو براهي** (Tycho Brahe 1546-1601) بإقتراح نظام هجين بين النظامين السابقين، حيث جعل الكواكب تدور حول الشمس و التي بدورها تدور حول الأرض الثابتة. شاهد المقطع (vd5 1:14-1:48). فمكونات نظامه هي نفسها مكونات نظام كوبرنيك بإستثناء جعل الأرض ثابتة و جعل الشمس تتحرك. في الحقيقة، لم يستعمل براهي الشمس كمركز لحركة الكواكب الأخرى. بل إستعمل مركزا (mean sun) قريبا من الشمس و يتحرك حول الأرض حركة دائرية منتظمة (vd5 1:49-2:13). فالشمس (true sun) لا تلعب أي دور في نظام براهي و هو نفس حالها في نظام كوبرنيك.

٧.٤ قوانين حركة الكواكب (Laws of Planetary Motion)

عندما بدأ **كبلر** (Johannes Kepler 1571-1630) عمله تحت براهي لاحظ أن هناك ثلاثة أنظمة لشرح حركة الكواكب. كان كبلر مؤمنا بأن الشمس هي سبب حركة الكواكب. كان يعتقد أن الشمس تشبه المغناطيس حيث تجذب الكواكب و تجعلها تدور حولها. سنحاول فيما يلي تتبع أهم المراحل في أعمال كبلر و التي أدت إلى وضع قوانينه الثلاث لحركة الكواكب.

^(٢٩) إستعمال فلك تدوير مزدوج بدل مصحح الحركة ليست بالفكرة الجديدة. فأنظمة مدرسة المراغة إستعملت حيلة مشابهة للتخلص من مصحح الحركة.

١.٧.٤ تكافؤ الأنظمة الثلاثة (Equivalence of the Three Systems)

سنستعمل في هذه الفقرة الفيديو:

<http://science.larouchepac.com/kepler/astronomianova/part1/8>

كمرجع بصري و نرمل له: (vd6). من أهم أعمال براهي الفلكية تدوين حركة الكواكب لمدة 40 سنة و بدقة كانت الأفضل في وقته. عندما إلتحق كبلر بالعمل تحت براهي كان يؤمن بأن الشمس هي سبب حركة الكواكب. و لهذا أراد أن يستعمل ملاحظات براهي لإثبات أن نظام كوبرنيك هو النظام الصحيح. بدأ كبلر إستقصاءه لكنه خلص إلى نتيجة غريبة:

«إن كان هدفنا هو إيجاد مكان كوكب ما عندما نرفع عيوننا إلى السماء، فالأنظمة الثلاثة تعطي نفس التوقع في حدود أخطاء التجربة.»

أي أنه لا يمكن التمييز بين الأنظمة الثلاثة إنطلاقاً من الملاحظات الأرضية. شاهد المقطع (vd6 2:03-2:17) حيث يتم مقارنة وضعية كوكب المريخ التي سيلاحظها مراقب أرضي حسب توقعات الأنظمة الثلاثة: لا يوجد أي فرق!!! يمكننا إثبات تكافؤ الأنظمة الثلاثة بإستغلال خاصية:

كل ما نستطيع قياسه بإستعمال نتائج الملاحظة، هي نسب أقطار مختلف الدوائر المتواجدة في كل نظام.

فإن قمنا بتغيير أقطار هذه الدوائر دون تغيير هذه النسب سنحصل على تمثيل مقبول للنظام تحت الدراسة. هذا ما يتم فعله في المقطع (vd6 2:28-4:53) إنطلاقاً من نظام بطليموس مروراً بنظام براهي لنصل إلى نظام كوبرنيك. يجب أثناء هذه العملية التخلص من اللامركزية (eccentric) في نظام بطليموس ثم مقايضة مصحح الحركة (equant) بفلك تدوير مزدوج (double epicycle). يظهر جلياً من المناقشة أعلاه أن الإشكالية تقع في نوع السؤال الذي كان مطروحاً عند بناء مختلف الأنظمة:

«أين نجد الكوكب عندما نرفع أعيننا إلى السماء؟»

فالسؤال الواجب طرحه هو:

«ما هي الحركة الحقيقية (actual motion) للكواكب؟ و ما سببها؟»

لاحظ كبلر أنه إن تتبع حركة الكواكب بإستعمال أي نظام فإنه يحصل على سخافات (absurdities) من نوع أو آخر. لاحظ المخططات في القسم الثاني من الصفحة الإلكترونية:

<http://www.keplersdiscovery.com/Hypotheses.html>

مثل هذا المسار المعقد لا يمكن أن ينتج من قوة مركزها الشمس. فإن كان منطلقنا هو: الشمس هي سبب حركة الكواكب، يجب علينا أن نبحث عن نظام جديد لوصف حركة الكواكب. سيقترن حديثنا فيما يلي عن كوكب المريخ (Planet Mars) لأن الحديث عن الكواكب الأخرى لا يضيف أي جديد.

٢.٧.٤ مراجعة الملاحظة (Re-observing)

كان كبلر شديد الدقة (meticulous) في أعماله. فأول ما قام به قبل أن ينطلق في مجهوده الفكري هو التأكد من نتائج الملاحظة. فكان عليه أن يواجه الإشكاليات التالية:

- بما أن الأرض تتحرك فإن الحركة الظاهرية للكواكب هي محصلة حركة الكوكب الذاتية و حركة الأرض.
- مستوي حركة الأرض يختلف عن مستوي حركة المريخ.
- عدم إستعمال الشمس الحقيقية في القياسات السابقة.

قام كبلر بقياس موقع المريخ عندما تكون الأرض بين الشمس و المريخ و على نفس الإستقامة (Measurement at opposition) للتخلص من حركة الأرض. نحقق ذلك بأخذ القياسات عندما تغرب الشمس و يكون المريخ جهة الشرق أو العكس. هذه الطريقة كانت مستعملة منذ القدم لكنها لم تأخذ بعين لإعتبار إختلاف مستويي حركة الأرض و المريخ. لاحظ كبلر هذا الخطأ و قام بتصحيحه. طالع:

<http://www.keplersdiscovery.com/Observations.html>

هناك إشكالية أخرى كان على كبلر مواجهتها. كان الإعتقاد أن حركة الأرض حول الشمس هي حركة دائرية منتظمة. هذا أدى إلى إستعمال مركز هذه الحركة (mean sun) كمرجع للقياسات. لكن موقع الشمس الحقيقية يختلف عن هذا المركز. يمكن مطالعة الصفحة:

<http://www.keplersdiscovery.com/MeanSun.html>

عند أخذ إختلاف مستويي حركة الأرض و المريخ بعين الإعتبار، يصبح مشكل مركز حركة الأرض (mean sun) ذو تأثير أكبر على تحليل نتائج الملاحظة. إنطلق كبلر من الفرضية أن الشمس هي سبب حركة الكواكب، لهذا كان عليه إعادة تفسير الملاحظات بإستعمال الشمس الحقيقية. لمزيد من المعلومات طالع:

<http://www.keplersdiscovery.com/CorrectedTable.html>

بعد أن قضى كبلر على كل المواطن الممكنة (potential sources) لأخطاء القياس، إنطلق في عمله النظري.

٢.٧.٤ مراجعة الفرضيات (Reviewing the Hypothesis)

يجب أن ننطلق -أثناء بناء نظام أو نظرية جديدة- من فرضيات لا تتناقض مع الملاحظة. إنطلق كبلر من الفرضيتين:

- حركة المريخ هي حركة دائرية ذات مركز يمكن أن يختلف عن الشمس.
- هناك مصحح حركة و حيد (equant) حيث تظهر حركة المريخ بالنسبة له منتظمة.

يجب أن يلاحظ القارئ المتفطن أن هذه الفرضيات تكافئ -في حدود أخطاء التجربة- الفرضيات التي بني عليها نظام كوبرنيك. هذا لأن نظام كوبرنيك هو الأقرب إلى منطلق كبلر: الشمس هي سبب الحركة. لكن الإختلاف يكمن في التصحيحات التي أدخلها كبلر على الملاحظة. كان هدف كبلر من تصرفه هذا دفع الأنظمة المتواجدة آنذاك إلى أقصاها (push to the limit) قبل الإنطلاق في مغامرة البحث عن نظام جديد إن استلزم الأمر.

زيادة على ذلك، أراد كبلر أن يجد مكان مصحح الحركة (equant) تجريبيًا. سيكون هذا الموقع -بطبيعة الحال- على خط القبا (line of upsides) لأن الكوكب يكون أسرع لما يقترب من الشمس و أبطأ لما يبتعد عنها. طالع:

<http://www.keplersdiscovery.com/Equant.html>

لتكوين فكرة عن تأثير مصحح الحركة. لكن كيف قام كبلر بتعيين مكان مصحح الحركة؟ تذكر أن هناك دائرة وحيدة تمر بثلاثة نقاط ليست على إستقامة واحدة. هذا يعني أننا نحتاج إلى أربعة نقاط على الأقل إذا أردنا التأكد من أن المسار عبارة عن دائرة. رجع كبلر إلى جدول ملاحظاته و إختار أربعة مواضع لكوكب المريخ على فترات زمنية متساوية. مما أعطاه زوجان من أربعة محاور متقاطعة: أربعة محاور للزمن تتقاطع عند مصحح الحركة (equant) و أربعة محاور لوضعية المريخ تتقاطع عند الشمس (sun). ثم بحث بعد ذلك عن تقاطع لمحاور الزمن مع محاور الوضعية للحصول على أربعة نقاط تنتمي لدائرة واحدة. لتكوين فكرة عن هذه العملية المضنية طالع القسم الأول من:

<http://www.keplersdiscovery.com/Vicarious.html>

إستعمل كبلر طريقة **خمن و تأكد** (guess and check) عدة مرات للحصول على الدائرة. بعد ذلك قارن توقعات نظامه مع مواقع المريخ من الملاحظة و وجد أن الفرق يتعدى دقة الملاحظة آنذاك. مما يعني أن نظامه خاطئ. كما أسلفنا سابقا كان كبلر شديد الدقة في أعماله. لهذا قرر أن يقوم بقياس آخر للتأكد من أن نظامه المبني على نفس مبادئ الأنظمة الثلاث لا يتوافق مع الملاحظات الفلكية، مما يعني أن كل الأنظمة خاطئة. علم كبلر أنه يمكن له أن يقيس بعد المريخ عن الشمس عند موضعي الأوج (aphelion) و الحضيض (perihelion) بإستعمال الملاحظة و بإستعمال نظامه. طالع القسم الثاني من:

<http://www.keplersdiscovery.com/Vicarious.html>

لمعرفة طبيعة الحساب الذي قام به. وجد كبلر أن نتائج نظامه تختلف عن الملاحظة بقيمة تتجاوز دقة الملاحظة. هذا يعني أن إحدى أو كلا الفرضيتين التي إنطلق منهما خاطئة.

يظهر أننا وصلنا لطريق مسدود فما العمل؟ قرر كبلر أن يتخلى عن أي فرضية مبدئية و يرسم مدار المريخ إنطلاقاً من الملاحظة. لكن -كما رأينا سابقاً- حركة المريخ التي نلاحظها من الأرض ليست حركته الذاتية: يجب علينا معرفة الجزء المتعلق بحركة الأرض. لا يمكننا أن نستعمل نفس الحيلة السابقة لأننا نريد أكبر عدد ممكن من مواضع المريخ. يجب علينا إذن أن نعرف مسار الأرض بدقة.

٤.٧.٤ ما هو مسار الأرض؟ (The Orbit of Earth)

كما أسلفنا الذكر، لم يملك كبلر الخيار و وجب عليه تحديد مسار الأرض. لكن كيف يبدأ لكي يجد هذا المسار؟ جرت العادة من أيام أبرخش (Hipparchus) أن تعتبر حركة الأرض (أو الشمس) حركة دائرية منتظمة. كانت نتائج هذه الفرضية متفقة مع الملاحظة في حدود دقة القياس. لكن شخصية كبلر التي تبحث عن الدقة قادتته إلى الإنطلاق من فرضية أن مسار الأرض دائري لكن حركته على هذا المسار ليست منتظمة. لاحظ أن هذه الفرضية هي نفسها التي إستعملها في دراسة مسار المريخ. يمكن فهم هذا التصرف على أنه نتيجة منطقية لمبدئه الذي إنطلق منه: «الشمس هي سبب حركة الكواكب». لكن الإشكالية التي كان عليه مواجهتها هي أننا نقوم بجميع الملاحظات من سطح الأرض. فكيف نستطيع تحديد مسار الأرض دون مغادرتها؟

يمكن تحديد مكان نقطة عن طريق تقاطع مستقيمين لهذا علينا إيجاد مستقيمين يتقاطعان عند الأرض. لكننا نحصل على التقاطع عند الأرض بدون بدل أي مجهود لأن قياسنا يتم من الأرض. و نعلم من درسا في الهندسة الإقليدية أن من بين الطرق لتحديد مستقيم هي معرفة نقطة و الشعاع الموازي له -أي الإتجاه-. هناك نقطة ثابتة وهي الشمس فبقياس موضعها في السماء، نستطيع أن نحصل على المستقيم الأول. لكن كيف نجد النقطة الثانية؟ فالكواكب كلها تتحرك و النجوم الثابتة بعيدة جدا. قام كبلر بحل هذه المعضلة عن طريق تثبيت كوكب المريخ. كان كبلر يعلم أن دور حركة المريخ 687 يوما. فإن قمنا بملاحظة مكان المريخ في السماء كل 687 يوم نحصل على المستقيم الثاني. بهذه الطريقة يمكن معرفة مسار الأرض لأن الشمس و المريخ لا يغيران مكانهما. إستعمل كبلر ثلاثة قياسات لتحديد الدائرة ثم تأكد من نتيجته بإستعمال قياس رابع. طالع الصفحة:

<http://science.larouchepac.com/kepler/newastronomy/part3/24/index.html>

لرؤية مخطط توضيحي لطريقة كبلر. خلص كبلر إلى أن مدار الأرض دائري و حركة الأرض منتظمة بالنسبة لمصحح حركة (equant) مختلف عن مركز المدار أصبح بإمكان كبلر -بعد تحديد مسار الأرض بدقة^(٣٠)- الرجوع إلى دراسة مدار كوكب المريخ.

٥.٧.٤ ما هو مسار المريخ؟ (The Orbit of Mars)

كانت فكرة كبلر لتخطي إشكالية مسار المريخ عدم الإنطلاق من أي فرضية. لقد قرر أن يعيد قياس موضع المريخ بإستعمال مسار الأرض الذي توصل إليه. بعد ذلك حاول أن يجد الشكل الهندسي الذي يشمل هذه النقاط. و رغم ذلك، قرر أن يعطي الحركة الدائرية فرصة أخرى. فأعاد حساباته مرة أخرى لكن النتيجة لم تتغير. أعاد كبلر حساباته مرات و مرات إلى أن قرر أخيرا التخلي عن الدائرة نهائيا. و عندئذ إنقضت غشاوته و عرف أنه ينظر إلى شكل بيضوي (oval shape). شاهد المخطط الأخير على الصفحة:

<http://www.keplersdiscovery.com/NotaCircle.html>

^(٣٠) مسار الأرض ليس دائريا لكن في حدود دقة الملاحظة آنذاك يمكن إعتباره كذلك.

لكن السؤال المطروح هل يمكن وضع معادلة لوصفه؟
بعد أن أعاد كبلر قياساته و حساباته عدة مرات للتأكد من أنه لم يرتكب
أي خطأ، حاول وصف هذا الشكل بإستعمال إضافات هندسية للدائرة. لمن يريد أن
يكون نظرة عن محاولات كبلر يمكن أن يطلع على:

<http://science.larouchepac.com/kepler/newastronomy/part4/index.html>

تذكر كبلر أخيراً أنه أثناء دراسته لظاهرة **إنكسار الضوء** (refraction) إطلع
على أعمال **أبولونيوس البرغاوي** (Apollonius of Perga 3th century BC) حول **القطع**
المخروطية (conic sections). فأدرك أن مسار كوكب المريخ هو **قطع ناقص**
(ellipse). طالع:

<http://www.keplersdiscovery.com/Elipse.html>

لمزيد من المعلومات.

٦.٧.٤ قوانين حركة الكواكب (Laws of Planetary Movement)

رغم أن كبلر قد نجح في وصف مدار الكواكب انطلاقاً من فرضية أن الشمس
ثابتة (heliocentrism)، إلا أنه فشل في الإمتحان الآخر. عندما بدأ كبلر رحلته
الفلكية كان هدفه إثبات أن الشمس هي سبب حركة الكواكب. لكنه لم يستطع
أن يعطي وصفا لهذه القوة الناتجة عن الشمس. فقرر أن يبحث عن خصائص عامة
(universal properties) لحركة الكواكب عليها تساعد مستقبلاً في إيجاد السبب
الفيزيائي وراء هذه الحركة. إستطاع كبلر أن يستنبط ثلاثة قوانين بالإضافة
إلى معرفته أن مدار الكوكب ينتمي لمستوى واحد.

القانون الأول:

« يرسم الكوكب أثناء حركته قطعاً ناقصاً تقع الشمس في إحدى بؤرتيه. »

“The orbit of a planet is an ellipse with the Sun at one of its two foci.”

القانون الثاني:

« يمسح الشعاع الذي يربط الشمس بالكوكب مساحات متساوية أثناء فترات
زمنية متساوية. »

“A line segment joining a planet and the Sun sweeps out equal areas during
equal intervals of time.”

القانون الثالث:

« يتناسب مربع الفترة المدارية لكوكب مع مكعب نصف المحور الرئيسي لمداره. »

“The square of the orbital period of a planet is proportional to the cube of the semi-major axis of its orbit.”

قبل أن نناقش قانون الجاذبية العامة لنيوتن، دعونا نناقش المعنى الفيزيائي للقانون الثاني أعلاه. إنه تمرين تقليدي في الحساب الشعاعي (vector calculus). من السهل أن نثبت أن المساحة التي يمسحها الشعاع \vec{r} أعلاه في فترة زمنية dt يتناسب مع طول شعاع عزم الحركة (Angular Momentum) \vec{L} المعروف ب:

$$\vec{L} = \vec{r} \wedge \vec{p},$$

حيث \vec{p} هو كمية حركة (momentum) الكوكب. يكون عزم الحركة \vec{L} محفوظا عندما نتعامل مع القوة المركزية (central force) مثل الجاذبية (gravitation). القانون الثاني أعلاه هو نتيجة هذا الإنحفاظ. زد على ذلك، من تعريف عزم الحركة نستنتج أن \vec{L} عمودي على كل من الشعاعين \vec{r} و \vec{p} . مما يعني أن حركة الكوكب تنتمي إلى مستو واحد. لكننا يمكن أن ننظر إلى القانون الثاني على أنه هو الأصل. عندئذ نستنتج أن القانون الثاني -عندما نضيف إليه أن الحركة تتم في مستو واحد- يدل على أن عزم كمية الحركة ثابت.

٨.٤ قانون الجاذبية العام (Gravitational Attraction)

السؤال المتبقي من دراسة حركة الكواكب هو: «ما سبب حركة الكواكب؟» بعد أن وضع نيوتن (Newton 1642-1726) قوانينه للحركة لاحظ أن هذا السؤال يعطي فرصة لتجريبها. لكن بدل التعامل مع الحالة العامة سنناقش -كما فعل نيوتن- الحالة الخاصة للحركة الدائرية المنتظمة. فيما يلي، سنرمز لقوانين نيوتن بالرموز: $N1$ ، $N2$ ، و $N3$. كما سنرمز لقوانين كبلر ب: $K1$ ، $K2$ ، و $K3$.

- من $(N1 + K1)$ نستنتج أن هناك قوة \vec{F} تؤثر على الكوكب.
- يأخذ تسارع حركة دائرية منتظمة ذات سرعة v و نصف قطر R القيمة:

$$a = \frac{v^2}{R}.$$

- تعطى الفترة المدارية T للحركة بالقيمة:

$$T = \frac{2\pi R}{v}.$$

- نستنتج بإستعمال القانون $K3$ أن:

$$v^2 = \frac{\alpha}{R},$$

حيث α ثابت.

- بإستعمال القانونين N2 و N3، بالإضافة إلى النتائج السابقة، نحصل على قانون الجاذبية:

$$F = G_N \frac{mM}{R^2},$$

حيث m هي كتلة الكوكب و M هي كتلة الشمس.

لاحظ نيوتن أن القانون الذي تحصل عليه يحمل نفس خصائص قوة الجذب الأرضية. دفعه هذا إلى إفتراض أن هذا القانون نفسه يصف السقوط الحر. للتأكد من ذلك، قام نيوتن بالمقارنة بين حركة القمر حول الأرض مع السقوط الحر للأجسام. وجد أن قانونه يوافق النتائج التجريبية مثبتا بهذا أن هناك قوة جاذبية بين أي كتلتين m_1 و m_2 .

لنعكس طريقة تفكيرنا و ننتقل من القانون العام للجاذبية و نحاول إستنتاج قوانين كبلر. لن نقوم بدراسة هذه الجملة هنا و نكتفي بمناقشة بعض الخصائص العامة. عندما ندرس مجموعة ميكانيكية معزولة تتكون من جسمين ذوي كتلتين m_1 و m_2 ، نقوم أولا بعزل حركة مركز الثقل (center of mass) من حركة الجسم الفعّال (reduced mass). تأخذ صيغتنا كتلة مركز الثقل M و شعاع موضعه \vec{R} الشكل:

$$M = m_1 + m_2, \quad \vec{R} = \frac{1}{M} (m_1 \vec{r}_1 + m_2 \vec{r}_2),$$

حيث \vec{r}_i هو شعاع موضع الكتلة m_i . في المقابل تأخذ كتلة الجسم الفعّال μ و شعاع موضعه \vec{r} الصيغة:

$$\frac{1}{\mu} = \frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2}, \quad \vec{r} = \vec{r}_1 - \vec{r}_2.$$

تعني الجملة الميكانيكية المعزولة عدم وجود قوى خارجية تؤثر عليها. هذا محقق بالنسبة لجملة مكونة من جسمين بسبب القانون الثالث لنيوتن. من نتائج هذه الخاصية، أن مركز الثقل M يكون حرا و يخضع للقانون الأول لنيوتن. في المقابل يخضع الجسم الفعّال μ لقوة. في حالة قوة الجاذبية، يرسم الجسم الفعّال قطع ناقص أثناء حركته.

عند تطبيق هذه النتائج على المجموعة الشمسية، يجب الأخذ بعين الإعتبار أن كتلة الشمس تشكل معظم كتلة المجموعة الشمسية. من هذا المنطلق يمكن إعتبار الشمس مركز ثقل المجموعة الشمسية و بالتالي لا تتحرك^(٣١). في المقابل يمكن أعتبار أن الكواكب ترسم قطع ناقصا أثناء حركتها.

٥ ما بعد نيوتن (Beyond Newton)

أدى بروز قوانين نيوتن للحركة و قانونه للتجاذب العام^(٣٢) إلى نشاط واسع لدراسة هذه القوانين و إستكشاف (explore) نتائجها. سنخرج فيما يلي على أهم المفاهيم (concepts) و المبادئ (principles) التي تم وضعها أثناء السنوات الذهبية

^(٣١) يمكن أيضا أن تكون حركة الشمس حركة مستقيمة منتظمة.

^(٣٢) هناك جدل حول ما إذا كان نيوتن تأثر بأفكار روبرت هوك (Robert Hooke 1635-1703) عندما اكتشف قانون الجاذبية.

(golden ages) للميكانيك الكلاسيكية. يجب أن ننبه القارئ إلى أن بعض قوانين الإنحفاظ كانت معروفة قبل أعمال نيوتن و تمت فقط مراجعتها على ضوء أعماله.

١.٥ الكمون (Potential)

كان ردود فعل الفيزيائيين تجاه قانون الجاذبية مختلفة لكنهم إتفقوا على كون **قوة الجاذبية** (Gravitational Force) قوة غامضة (mysterious). فالقوة تؤثر عن بعد (action at a distance)، الشيء الذي كان غير مألوفا: مهما كان البعد بين الكتلتين m_1 و m_2 فإنهما -بطريقة أو بأخرى- سيعرفان بوجود الكتلة الأخرى و يتبادلان **التأثير** (interaction). هناك أيضا الإشكالية التالية: تخيل أننا وضعنا كتلة وحيدة M في الفضاء، هل هناك أي تغيير ناتج عن هذه الكتلة في هذا الفضاء أم لا؟ يمكن أن نتخذ أيا من الموقفين:

- لا يوجد أي تأثير لأن القوة تعتمد على وجود كتلة. لكن إن سلمنا بهذا، كيف لنا أن نفسر بروز هذه القوة إلى الوجود لحظة وضع الكتلة الثانية؟
- إن إتخذنا الموقف الثاني و سلمنا بوجود تغيير، يجب أن نجيب على التساؤل حول طبيعة هذا التغيير و كيف يمكننا قياسه؟

كان **لابلاس** (Laplace 1749-1827) من مساندي الرأي الثاني حيث أنه يعطي وصفا موضعيا (local description) للجاذبية. إنطلاق لابلاس من الملاحظة أن قوة الجاذبية هي الطريقة الوحيدة المعروفة آنذاك لقياس الجاذبية، فأيا كان تأثير الكتلة M يجب أن يتعلق بشكل أو آخر بهذه القوة. ثم إستعمل العلاقة^(٣٣):

$$F_i = \partial_i V(x), \quad V(x) \sim \frac{1}{r_i},$$

ليثبت أن **الكمون** (potential) $V(x)$ يحقق العلاقة:

$$\Delta_x V(x) = -4\pi\rho(x),$$

حيث $\rho(x)$ هو **توزيع الكتلة** (mass distribution) التي هي مصدر (source) الكمون الثقلي (gravitational potential) $V(x)$. الطرف الأيمن للمعادلة أعلاه الذي يتعلق ب: $\rho(x)$ لم يكن في معادلة لابلاس بل أضافه **سيميون بواسون** (Siméon Poisson 1781-1840). إعتبر الكمون في البداية حيلة رياضية لتبسيط الكميات (quantities) التي يجب التعامل معها.

- الكمون عبارة عن مقدار سلمي (scalar quantity) مما يسهل علينا التعبير عنه عندما نغير المعالم (change of coordinates).
- يمكننا الكمون من تعميم قوانين النقط المادية (point particle) إلى جمل ميكانيكية أكثر تعقيدا بسهولة.
- يمكننا الكمون من تعريف **الطاقة الكامنة** (potential energy).

لكن الأمور تغيرت مع بروز نظرية النسبية العامة (general relativity) حيث أصبح للكمون الثقلي وجود فيزيائي.

^(٣٣) يمكن أن يكون الكسيس كليرو (Alexis Clairaut 1713-1765) أول من إقترح هذه العلاقة.

٢.٥ قوانين الإنحفاظ (Conservation Laws)

تحتل قوانين الإنحفاظ (conservation laws) مكانة مهمة في دراسة الظواهر الطبيعية. من بين فوائد هذه القوانين:

- تسهل قوانين الإنحفاظ القياسات التي نقوم بها أثناء التجربة. فلا نحتاج إلى أن نقوم بالقياسات بصفة مستمرة.
- يمكن أن تشكل المنطلق للبحث عن قوانين جديدة للطبيعة أو وصفها. تذكر ما قام به كبلر على سبيل المثال.
- تشكل أداة إستكشاف للمجهول. أستعملت على سبيل المثال كأداة لإكتشاف جسيمات جديدة كما فعل بولي (Pauli) مع النترينو.
- يمكن أيضا إستعمال قوانين الإنحفاظ كأداة لتبسيط المسائل الرياضية. خذ على سبيل المثال الحركة في حقل مركزي (central force)، بإستعمال قانون إنحفاظ عزم الحركة نستطيع أن نخفض عدد درجات الحرية (degrees of freedom) من ثلاثة إلى اثنين.

يمكن إعتبار قانون إنحفاظ الطاقة (conservation of energy) أهم قوانين الإنحفاظ و أكثرها خصوبة (fruitful)، لكن يجب علينا أن نعترف أنه لحد الآن لا يوجد تعريف عام للطاقة. كما قال كرامرز (Hendrik Kramers 1894-1952):

« يحدث أن يكون في عالم الفكر الإنساني عامة، و في العلوم الفيزيائية خاصة، أن أهم و أخصب المفاهيم هي التي يستحيل أن نعرفها بدقة. »

“ In the world of human thought generally, and in physical science particularly, the most important and fruitful concepts are those to which it is impossible to attach a well-defined meaning. ”

لاحظ أن الطاقة بدون مبدأ إنحفاظها لا تعني شيئا البتة. للأسف الشديد لا يمكننا أن نغوص في تاريخ مبدأ إنحفاظ الطاقة و سنكتفي بذكر اليسير منه. كانت البدايات مع أعمال ديكارت (Descartes) و محاولة إستعمال نظرية الزخم و إنحفاظه كمبدأ لصياغة قوانين الفيزياء كقوانين تصادمات. قادت هذه المحاولة كلا من واليس، رن، و هوغنس لصياغة قوانين إنحفاظ كمية الحركة و الطاقة الحركية في التصادمات المرنة. كان ليبنز أول من لاحظ أهمية الطاقة الحركية^(٣٤) (kemitic energy) و إنحفاظها في كل التصادمات. كما كان يؤمن بأن جزء من الطاقة الحركية يتحول -في حالة التصادمات الغير مرنة- إلى طاقة داخلية (latent energy).

قام الفيزيائيون -في هذه الفترة- بعدة تجارب كالسقوط الحر، النوابض، التصادمات، و كان الإتجاه العام هو محاولة تفسير النتائج عن طريق قوانين الإنحفاظ. أدى هذا إلى ظهور عدة مسميات للطاقة خاصة الطاقة الحركية. من بين هذه التجارب تجربة ولم غرافسند (Willem's Gravesande 1688-1742) الذي درس تأثير سقوط كرات معدنية على طين لين (soft clay). وجد أن عمق الحفرة يتناسب مع مربع سرعة الكرة عند الإصطدام.

^(٣٤) أطلق عليها إسم الطاقة الحية (living force)

بدأ الرياضيون (mathematicians) يهتمون بالميكانيك بعد ظهور قوانين نيوتن للحركة، و وضعوا على عاتقهم إعادة صياغة قوانينها تحت أشكال مكافئة. من أهم الخصائص المشتركة لهذا التوجه الجديد تحويل قوانين نيوتن الشعاعية (vectorial equations) إلى قوانين تعتمد على مقادير سلمية (scalar quantities). نذكر على سبيل المثال: أويلر (Euler 1707-1783)، دالمبرت (d'Alembert 1717-1783)، و لاغرانج (Lagrange 1736-1813).

تعتمد هذه الصياغات الجديدة على تعويض القوة بمقدار سلمي (scalar function) يسمى الطاقة الكامنة (potential energy). فهذه الصياغات ممكنة فقط من أجل نوع خاص من القوى، و معادلات الحركة هي معادلات تفاضلية تظم كلا من الطاقة الحركية (kinetic energy) و الطاقة الكامنة (potential energy). لكن فهم أصل هذه المعادلات إحتاج إلى أعمال هاملتون (Hamilton 1805-1865) و جاكوبي (Jacobi 1804-1851). أدت هذه الأعمال إلى ملاحظة إنحفاظ مجموع الطاقتين الحركية و الكامنة.

مع تطور الأعمال النظرية في الديناميك الحرارية (thermodynamics)، ميكانيك السوائل (hydrodynamics)، و الكهرومغناطيسية (electromagnetism)، و ظهور الآلات مع النهضة الصناعية لوحظ أن هناك مبدأ عام (universal principle) محقق في جميع المجالات ألا و هو إنحفاظ الطاقة الكلية (conservation of total energy). كان علينا إنتظار أعمال إيمي نوثر (Emmy Noether 1882-1935) لربط قوانين الإنحفاظ بالتناظرات (symmetries):

- إنحفاظ الطاقة الكلية \iff التناظر تحت الإنسحاب في الزمن (time translation invariance).
- إنحفاظ كمية الحركة الكلية \iff التناظر تحت الإنسحاب في المكان (space translation invariance).
- إنحفاظ عزم الحركة \iff التناظر تحت اللدوران (rotation invariance).

تستعمل نظرية نوثر عادة في الإتجاه المعاكس لصياغة قوانين الفيزياء.